



PROJETO DE UM MOTOR LINEAR SUPERCONDUTOR
COM FITAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Flávio Goulart dos Reis Martins

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientadores: Rubens de Andrade Junior
Daniel Henrique Nogueira Dias

Rio de Janeiro

Junho de 2014

PROJETO DE UM MOTOR LINEAR SUPERCONDUTOR
COM FITAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Flávio Goulart dos Reis Martins

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Rubens de Andrade Junior, D. Sc.

Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D. Sc.

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Durval Rodrigues Junior, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2014

Martins, Flávio Goulart dos Reis

Projeto de um Motor Linear Supercondutor com Fitas de Segunda Geração/ Flávio Goulart dos Reis Martins. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XIII, 92 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Rubens de Andrade Junior,
Daniel Henrique Nogueira Dias.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 87-91.

1. Fitas supercondutoras. 2. Máquinas elétricas.
I. de Andrade Junior, Rubens, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

PROJETO DE UM MOTOR LINEAR SUPERCONDUTOR COM FITAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Flávio Goulart dos Reis Martins

Junho de 2014

Orientadores: Rubens de Andrade Junior
Daniel Henrique Nogueira Dias

Programa: Engenharia Elétrica

A substituição de condutores de cobre convencionais por enrolamentos supercondutores em máquinas de grande porte permitem motores e geradores menores, mais leves e mais eficientes em comparação aos convencionais de mesma classe de potência. Além disso, garantem outras vantagens elétricas como maior estabilidade, maior capacidade de sobrecarga e menor reatância síncrona. Este trabalho tem por objetivo o projeto, construção e testes de bobinas de fitas supercondutoras operando como o enrolamento de campo (secundário) de um motor linear síncrono. Este é o ponto de partida em direção ao desenvolvimento de uma máquina supercondutora completa. O estudo prévio de um motor linearé justificado pelas suas vantagens operacionais, custo e tempo de construção, sobretudo da parte criogênica. Foram feitos levantamentos de curvas características $V \times I$, mapeamento de campo magnético das bobinas e ensaios estáticos de Força de Tração x Posição. Os resultados foram muito promissores e validaram as simulações deste motor feitas pelo método dos elementos finitos, encorajando a continuidade do projeto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

PROJECT OF A SUPERCONDUCTING MOTOR
WITH SECOND GENERATION WIRES

Flávio Goulart dos Reis Martins

June 2014

Advisors: Rubens de Andrade Junior
Daniel Henrique Nogueira Dias

Department: Electric Engineering

The substitution of conventional copper for superconductor windings in high power electric machines allow smaller, lighter and more efficient motors and generators in comparison to those of same power class, among a series of other electrical advantages as high stability, high overload capability and small synchronous reactance. This work aims to the project, construction and tests of superconducting coils operating as field windings (secondary) in a synchronous linear drive. This is the starting point towards development of a complete superconducting machine. Previously studying a linear drive is justified by its operational advantages, implementation cost and time, above all, of the cryogenics. Results include the coils' $V \times I$ characteristic curves, magnetic field mapping and static Force \times Position essays. Those were very promising as they validate this machine's simulations on finite elements method, thus encouraging project continuity.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Símbolos	xii
Lista de Abreviaturas	xiii
1. Introdução	1
1.1. Motivações	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organização do Texto	2
2. Teoria	3
2.1. Supercondutividade	3
2.1.1. Resistividade Nula	3
2.1.2. Efeito Meissner	4
2.1.3. Supercondutores Tipo I e Tipo II.....	6
2.1.3.1. Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência	7
2.1.3.2. Energia Livre de Superfície.....	9
2.1.4. Pares de Cooper	10
2.1.5. Supercondutores de Alta Temperatura Crítica	10
2.1.6. Limites Teóricos e Práticos dos Supercondutores	11
2.2. Fitas Supercondutoras.....	14
2.3. Máquinas Supercondutoras	16
3. Revisão Bibliográfica	23
3.1. Histórico	23
3.1.1. Máquinas LTS.....	23
3.1.2. Máquinas HTS	25
3.2. Estado da Arte.....	28
4. Metodologia	31
4.1. Motor Linear	31
4.2. Bobinas do Enrolamento de Campo	32

4.3.	Caracterização das Bobinas de Fitas 2G.....	33
4.4.	Mapeamento de Campo Magnético	34
4.5.	Ensaio de Tração.....	34
4.6.	Acionamento do Motor Linear.....	36
4.7.	Veículo das Bobinas de Campo.....	36
4.8.	Encadeamento das Etapas.....	37
5.	Equipamentos.....	38
5.1.	Equipamentos de Trabalhos Anteriores.....	38
5.1.1.	Motor Linear	38
5.1.2.	Sistema de Caracterização de Fitas 2G.....	39
5.1.3.	Sistema de Mapeamento de Campo Magnético	40
5.2.	Equipamentos Desenvolvidos para este Trabalho.....	40
5.2.1.	Mesa Bobinadeira.....	40
5.2.2.	Projeto dos Carreais.....	44
5.2.3.	Bobinas Supercondutoras	50
5.2.4.	Fonte Retificadora	54
5.2.5.	Veículo das Bobinas de Campo.....	62
6.	Resultados e Discussões.....	67
6.1.	Testes de Acionamento da Fonte de Retificadora	67
6.1.1.	Análise térmica por varredura de infravermelho.....	68
6.1.2.	Regulação da Corrente Contínua	71
6.2.	Levantamento de Curva $V \times I$ das Bobinas.....	72
6.3.	Mapeamento de Campo Magnético das Bobinas.....	75
6.4.	Ensaio de Tração \times Posição	78
7.	Conclusões.....	84
7.1.	Trabalhos Futuros	85
7.	Referências Bibliográficas	87
8.	Anexo	92

Lista de Figuras

Figura 1 - Delimitação da supercondutividade pelos seus parâmetros críticos.....	4
Figura 2 - Esquema mostrando a diferença entre um "condutor perfeito" e um supercondutor. Adaptada de [5].....	5
Figura 3 – Diagrama de fase dos supercondutores Tipo I e II em relação ao campo magnético.	7
Figura 4 - Rede de Abrikosov em um supercondutor do Tipo II.....	7
Figura 5 - Fronteira das regiões normal e supercondutora para os Tipos I e II. Adaptada de [5].	8
Figura 6 - Parâmetros λ_L e ξ usados para dimensionar o diâmetro dos centros de aprisionamento de fluxo. Adaptada de [5].	8
Figura 7 - Indução da Força de Lorentz sobre um Floxóide.	12
Figura 8 - Dependência da J_C para diferentes incidências de campo magnético [18].	13
Figura 9 - Limites teóricos e práticos dos supercondutores Tipo II.	14
Figura 10 - H_{C2} e H_{irr} para o BSCCO e YBCO em função da temperatura. Adaptado de [15].	15
Figura 11 - Tamanhos de um grupo-gerador convencional e um HTS com turbina a gás. Adaptado de [32].....	19
Figura 12 - Diagrama comparativo das perdas em máquinas convencionais e supercondutoras. Adaptado de [30] [33].....	19
Figura 13 - Diagramas fasoriais comparativos entre máquina convencional e supercondutora. Adaptado de [33].....	20
Figura 14 - Torque do motor de indução supercondutor japonês [59].....	28
Figura 15 - Foto do rotor supercondutor do <i>Hydrogenie</i>	29
Figura 16 - Aproximação a um motor linear.....	31
Figura 17 – Exemplos de seleção de instantes para ensaios estáticos para um semi-ciclo.....	35
Figura 18 - Esquema do retificador monofásico triplo ligado ao motor em $Y\Delta$	36
Figura 19 - Encadeamento das diferentes etapas do trabalho.	37
Figura 20 - Corte transversal da armadura com os enrolamentos de armadura em destaque.....	38
Figura 21 - Vista da parte superior da armadura.	39
Figura 22–Fabricação da bobina do tipo <i>double pancake</i> [13].	41

Figura 23 - Volante do carretel matriz de fita: (a) o carretel da <i>Superpower</i> , (b) o projeto do miolo replicado, (c) o volante de carretel matriz adaptado e (d) o carretel de Fita 2G em posição.....	42
Figura 24 - Segundo volante com carretel de <i>Kapton</i> cortado em 4 mm.	43
Figura 25– Terceiro volante com uma bobina completa.	43
Figura 26 – Polias e canaletas da bobinadeira (a) e projeto da canaleta (b)	44
Figura 27 - Mesa cortadora de <i>Kapton</i> em vista lateral (a), superior (b) e no projeto (c)	45
Figura 28 – Vista explodida da primeira versão da bobina.	46
Figura 29 – Vista explodida da segunda versão da bobina.	47
Figura 30 - Detalhe do corte no miolo para a passagem da fita e peça do terminal externo.....	47
Figura 31 - Bobina de cobre feita com o segundo projeto.	48
Figura 32 - Vista explodida da terceira versão da bobina.	49
Figura 33 - Projeto dos três tipos de terminais de cobre usados nas bobinas: Tipo L (a), tipo L-invertido (b) e Barramento Central (c).....	50
Figura 34 - Corte esquemático do modelo da Fita 2G utilizada nesse projeto [18].	51
Figura 35 - Pequena amostra da Fita 2G utilizada.	51
Figura 36 - Partes da bobina tipo <i>racetrack</i>	52
Figura 37 - Consumo de Fita em função do número de espiras para a Bobina 3 ..	53
Figura 38 - Bobinas supercondutoras de Fitas 2G com terminais tipo L (a) e L-invertido (b).....	54
Figura 39 –Variac de 0-220 V, 12 A, vista lateral (a) e frontal (b).	55
Figura 40 - Transformador de 220/30 V 6 kVA, vista lateral (a), lado de alta (b) e lado de baixa (c).	55
Figura 41 - Ponte retificadora monofásica VBO 125-12NO7.	56
Figura 42 - Dissipador de alumínio modelo FNT-014-AL.....	56
Figura 43 - Esquema da simulação da fonte retificadora com o motor ligado em triângulo.....	57
Figura 44 - Correntes no motor (I_{MA} , I_{MB} e I_{MC}) e <i>ripple</i> da corrente I_{MC} com fonte a 100% da capacidade, sem C_F	58
Figura 45 - Correntes no motor (I_{MA} , I_{MB} e I_{MC}) e <i>ripple</i> da corrente I_{MC} com fonte a 72% da capacidade e $C_F = 30mF$	58
Figura 46 - Capacitor EPCOS de 33000 μF	59
Figura 47 - Corrente de entrada na ponte retificadora da fase A, I_{TA} , entre 3 s e 5 s.	59
Figura 48- Fusível utilizado na proteção do terceiro estágio.....	60

Figura 49 – Montagem da fonte retificadora.....	61
Figura 50 - Veículo do secundário.....	62
Figura 51 - Projeto com a vista explodida (a) e posicionamento da estrutura principal na ferragem da armadura (b).....	63
Figura 52 – Projeto do Recipiente, destacando o fundo com os rebaixos para encaixe das bobinas (a) e posicionamento no conjunto final (b)	64
Figura 53 - Projeto com a vista explodida (a) e posicionamento da guia linear e suporte central no conjunto final (b).....	65
Figura 54 - Projeto com a vista explodida (a) e posicionamento da célula de carga com os eixos de força no conjunto final (b).....	66
Figura 55 - Pontos de operação das correntes de linha e fase da armadura.....	68
Figura 56 - Análise térmica dos capacitores.....	69
Figura 57 - Análise térmica das pontes retificadoras.....	69
Figura 58 - Análise térmica dos capacitores após adaptação técnica.	70
Figura 59 - Análise térmica das pontes retificadoras após adição dos ventiladores.	70
Figura 60 - <i>Ripple</i> na corrente contínua em uma das fases da armadura.	71
Figura 61 - Caracterizações das bobinas B1 e B2 em um mesmo ciclo térmico....	73
Figura 62 - Caracterização das bobinas B1 e B2 em diferentes dias: C1, C2 e C3 foram feitos uma semana antes de C4 e C5.	74
Figura 63 - Mapeamento de campo magnético da bobina supercondutora.	75
Figura 64 - Componente B_z do campo magnético simulado por MEF.....	77
Figura 65 - Componente B_y do campo magnético nas faces internas e externas da bobina.....	77
Figura 66 - Componentes B_y (a) e B_z (b) do campo magnético no corte transversal da bobina.....	78
Figura 67- Esquema de conexões da fonte e da armadura.....	80
Figura 68 - Resultados de simulações e medições de Força x Posição.....	81
Figura 69 - Componente B_z da armadura nos pontos de operação I (a), II (b) e III (c). A distância equivalente a um passo polar foi demarcada para destacar a mudança do campo magnético em cada ponto de operação.....	82

Lista de Tabelas

Comparação de J_c entre o YBCO em bloco maciço e Fita 2G	15
Primeiro Gerador LTS de alta velocidade [47]	24
Projeto de gerador LTS japonês [49]	25
Protótipo de Gerador HTS da GE [57]	26
Segundo protótipo de gerador HTS da Siemens [34]	27
Terceiro protótipo de motor HTS da Siemens [30]	30
Parâmetros construtivos das bobinas de Fita 2G	53
Exemplos de seleção de instantes para ensaios estáticos para um semi-ciclo.	35
Distribuição das correntes nos pontos de operação escolhidos	79

Lista de Símbolos

T – Temperatura

H – Campo magnético

J – Densidade de corrente

T_C – Temperatura crítica da supercondutividade

H_C – Campo magnético crítico da supercondutividade

J_C – Densidade de corrente crítica da supercondutividade

E – Campo Elétrico

μ_0 – Permeabilidade Magnética do Vácuo

λ_L – Profundidade de Penetração de London

H_{C1} – Primeiro campo magnético crítico do supercondutor de Tipo II

H_{C2} – Segundo campo magnético crítico do supercondutor de Tipo II

ξ – Comprimento de Coerência

Φ_0 – *Quanta* de Fluxo Magnético

h – Constante de Planck

e – Carga Elementar

κ – Razão de Ginzburg-Landau

B_F – Campo magnético no interior do Fluxóide

F_L – Força de Lorentz

J_S – Densidade de corrente de transporte no supercondutor

v_d – Velocidade de deslocamento do Fluxóide

E_L – Campo elétrico induzido pelo deslocamento do Fluxóide

H_{irr} – Campo Magnético Irreversível

J_e – Densidade de corrente de engenharia da Fita 2G

x_d – Reatância síncrona

Lista de Abreviaturas

MEF – Método de Elementos Finitos

BCS – Modelo de Bardeen, Cooper e Scieffer

HTS – Supercondutores de alta temperatura crítica

LTS – Supercondutores de baixa temperatura crítica

YBCO – Óxido de Ítrio-Bário-Cobre

BSCCO – Óxido de Bismuto-Estrôncio-Cálcio-Cobre

Fitas 1G – Fitas supercondutoras de primeira geração

Fitas 2G – Fitas supercondutoras de segunda geração

AMSC – *American Superconductor Corporation*

GPS – Sistema de posicionamento global

PD – Posicionamento Dinâmico

RMS – Valor Médio Quadrado (*Root Mean Square*)

CC – Corrente Contínua

1. Introdução

Em 1911 a descoberta do fenômeno da supercondutividade trouxe à tona uma nova área de estudo nas ciências dos materiais e novas aplicações em engenharia. Este trabalho se insere nesse contexto no desenvolvimento de máquinas elétricas com enrolamentos supercondutores. Nesse primeiro capítulo são explicadas as motivações, objetivos e a organização do texto deste trabalho.

1.1. Motivações

Existem quatro grandes vantagens que motivam a aplicação de supercondutores em máquinas elétricas: o aumento significativo da relação potência/peso/volume, melhora da estabilidade síncrona, maior rendimento e maior capacidade de sobrecarga. Aliadas, elas se tornam extremamente atrativas em cenários de pequenas redes elétricas isolados, como é o caso de instalações navais, e em aerogeração. Estas duas atualmente encontram-se em franca expansão no Brasil graças à crescente exploração petrolífera em águas profundas e a diversificação do setor elétrico visando ao maior aproveitamento de fontes alternativas de energia.

Após pouco mais de cem anos de estudos, a aplicação de supercondutores em máquinas elétricas começa a se tornar viável e ter aceitação do mercado através de projetos de grandes empresas do ramo, como a *American Superconductors*, a *GE* e a *Siemens*. As primeiras pesquisas do gênero datam da década de 1960, mas, até recentemente, a manutenção das temperaturas necessárias ao estado supercondutor, próximas ao zero absoluto, tornava-as inviáveis. Este ainda é um fator determinante, embora esses materiais tenham evoluído, tornando-se supercondutores a temperaturas relativamente mais altas. Além disso, as técnicas de criogenia avançam rapidamente, atingindo temperaturas cada vez mais baixas com maior rendimento. Estes são os fatores fundamentais que garantem a viabilidade dessa inovação.

1.2. Objetivos

Este trabalho é a etapa inicial da construção de uma máquina supercondutora de grande porte, com o objetivo de validar os ganhos previstos na teoria e em trabalhos anteriores de simulação. Esta validação será feita analisando-se o desempenho de um motor linear síncrono operando com um enrolamento de campo de bobinas de fitas supercondutoras de segunda geração. A fabricação dessas bobinas, em especial, representa uma etapa muito importante e delicada, de forma que as técnicas desenvolvidas para tal serão aproveitadas tanto para a continuidade desta quanto para

outras linhas de pesquisa que utilizem enrolamentos supercondutores, como por exemplo mancais magnéticos, que é o foco atual dos trabalhos do Lasup.

No cenário brasileiro ainda não existem pesquisas em máquinas supercondutoras, de forma que o Lasup é pioneiro nesta linha. Pelo fato deste projeto estar em sua etapa inicial, há uma grande variedade de trabalhos ainda a serem desenvolvidos para superar todos os desafios técnicos até o objetivo final. Trata-se de uma tecnologia de ponta, em desenvolvimento em poucos lugares do mundo, abrindo margem para colaborações internacionais que podem trazer resultados significativos para a indústria e notoriedade na sociedade científica.

1.3. Organização do Texto

Este trabalho foi dividido em sete capítulos. Neste primeiro, é feita uma breve introdução para salientar os objetivos gerais e motivações da pesquisa. No segundo é abordada a teoria acerca do fenômeno da supercondutividade, sua evolução histórica e as principais aplicações envolvidas no projeto: fitas supercondutoras de segunda geração e máquinas supercondutoras. No terceiro capítulo é feita uma revisão bibliográfica mais focada em máquinas supercondutoras, também tratando da evolução histórica das pesquisas e do estado da arte do seu desenvolvimento. A seguir, o quarto capítulo mostra os materiais e métodos empregados na construção dos equipamentos utilizados para execução dos ensaios com o motor linear e as bobinas. O quinto capítulo descreve os equipamentos que foram construídos de acordo com a metodologia descrita e aqueles que foram trazidos de trabalhos paralelos a este para auxiliar na tomada de dados. A seguir, são mostrados os ensaios e discutidos os resultados obtidos para, finalmente, no sétimo capítulo, apontar a conclusão final e os trabalhos futuros propostos para a continuidade desta linha de pesquisa.

2. Teoria

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos em torno do fenômeno da supercondutividade. Começando pelo seu desenvolvimento ao longo da história, depois tratando em maiores detalhes da fabricação de fitas supercondutoras e sua aplicação em máquinas elétricas.

2.1. Supercondutividade

A supercondutividade é um fenômeno em que a matéria subitamente muda algumas de suas propriedades físicas abaixo de uma dada temperatura criogênica. Tal mudança justifica considerá-lo um novo estado da matéria, com características e propriedades próprias. Foi descoberta em 1911 por Heike Karmeligh Onnes ao estudar mercúrio a temperaturas próximas ao zero absoluto, e ao longo deste último século, a evolução das ciências permitiu o desenvolvimento de vários materiais supercondutores e suas aplicações. A seguir, um resumo histórico com as principais teorias que procuraram explicar o fenômeno.

2.1.1. Resistividade Nula

Materiais conhecidos por serem bons condutores elétricos, em sua maioria metálicos, possuem esta característica devido a uma estrutura atômica com elétrons mais externos fracamente presos, os ditos “elétrons livres”. Eles são capazes de percorrera estrutura cristalina do material sob a influência de um campo elétrico, transmitindo potência através de uma corrente elétrica. Impurezas, imperfeições e vibrações da rede cristalina oferecem a chamada “resistência” à corrente elétrica, que dissipa energia sob a forma de calor.

Sabe-se que quanto mais puro o material e mais baixa for a sua temperatura (o grau de agitação da rede cristalina), menor será a resistência oferecida à corrente elétrica. Baseado nisso que Heike Onnes partiu da premissa de que um material perfeitamente puro ao zero absoluto (teoricamente sem vibração alguma na rede cristalina) teria resistência nula, e um impuro teria uma resistência residual ao zero absoluto inerente às impurezas [1].

Somente a partir de 1908, quando Onnes conseguiu liquefazer hélio (feito que lhe rendeu um prêmio Nobel), ele pôde verificar sua hipótese. Em 1911, foi surpreendido ao estudar a resistividade do mercúrio imerso em hélio líquido e percebeu que abaixo de 4,2 K ela abruptamente caía a um valor imensurável. Assim, ele batizou o fenômeno de supercondutividade [2].

A continuidade das pesquisas levou Onnes a descobrir em 1914 que, além da temperatura crítica (T_C), a supercondutividade também poderia ser revertida pela aplicação de um campo magnético crítico (H_C) ou uma densidade de corrente crítica (J_C), definindo-se assim as três variáveis das quais ela depende: temperatura (T), campo magnético (H) e densidade de corrente (J), conforme mostrado na Figura 1.

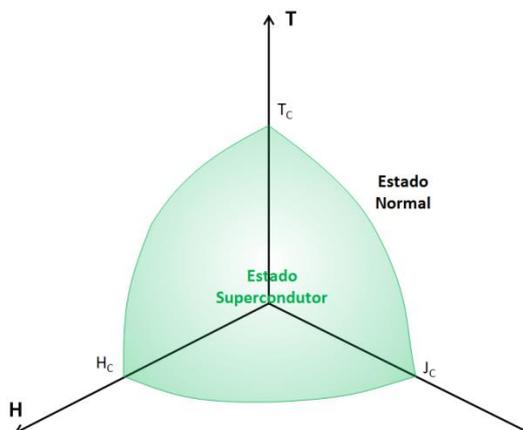


Figura 1 - Delimitação da supercondutividade pelos seus parâmetros críticos

Muitas pesquisas foram desenvolvidas com objetivo de se obter outros materiais supercondutores, especialmente com T_C mais elevada, visto que a necessidade de utilizar o hélio líquido era uma barreira para sua aplicabilidade. Com isto, descobriu-se que grande parte dos metais são supercondutores abaixo de certa temperatura. É notável que materiais que em temperatura ambiente são bons condutores, como o ouro, o cobre e a prata, não apresentam supercondutividade. Além dos metais puros, observou-se que ligas metálicas, como Nb_3Sn , descoberta em 1954, apresentam temperaturas críticas elevadas. Esta liga representou um avanço tecnológico significativo, uma vez que ela possui T_C da ordem de 18K e um valor de H_C mais elevado [3].

2.1.2. Efeito Meissner

A resistividade nula não é a única característica de um supercondutor. Em 1933, Meissner e Ochensfeld [4] descobriram que supercondutores são diamagnetos perfeitos, expulsando o fluxo magnético em seu interior. Essa propriedade foi batizada Efeito Meissner, e permite diferenciar um supercondutor de um “condutor perfeito”, de forma que a supercondutividade passou a ser considerado um novo estado termodinâmico da matéria.

Se um condutor perfeito teórico na presença de um campo magnético for resfriado de uma temperatura $T > T_c$ a um $T < T_c$ (Figuras 2a e 2b, respectivamente) e, em seguida, o campo magnético cessado, correntes seriam induzidas em resposta a variação desse campo. Sendo ele um condutor perfeito, sem perdas, a corrente persistiria eternamente, mantendo-o magnetizado em resposta a ausência do campo externo (Figura 2c). Esse comportamento não se reflete em um supercondutor, que, se feito o mesmo processo (Figuras 2d a 2f), irá apresentar Efeito Meissner, expulsando completamente o campo magnético em seu interior [5].

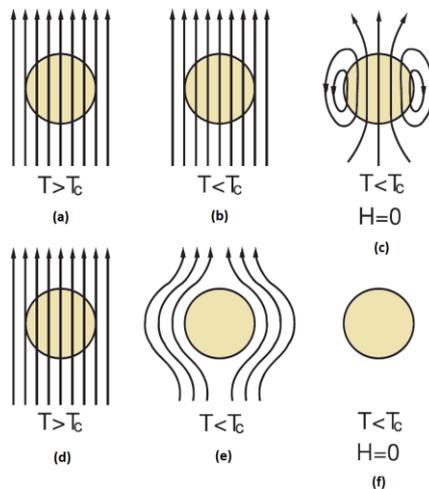


Figura 2 - Esquema mostrando a diferença entre um "condutor perfeito" e um supercondutor. Adaptada de [5]

Em 1935 os irmãos Fritz e Heinz London desenvolveram uma modelagem para explicar a supercondutividade sem desrespeitar as Equações de Maxwell[6]. Nesse desenvolvimento, quando um supercondutor é submetido a um campo magnético externo, ele é blindado por correntes superficiais que magnetizam o seu interior de forma a se contrapor ao campo externo. Outra contribuição importante foi desenvolvimento do modelo de dois fluidos [7], que prevê a coexistência de elétrons normais e “superelétrons”, capazes de percorrer a rede cristalina sem perda de energia quando submetidos a um campo elétrico constante (E). A força que os impulsiona é descrita pela Primeira Equação de London (1)

$$\vec{F}_e = m^* \frac{d\vec{v}_s}{dt} = e^* \vec{E} \quad , \quad (1)$$

em que m^* é a massa dos superelétrons, v_s é sua velocidade e e^* é sua carga. Considerando que sua densidade volumétrica seja η_s , há uma densidade de corrente de superelétrons dada por (2)

$$J_s = \eta_s e^* v_s \quad . \quad (2)$$

Derivando (2) no tempo e substituindo na derivada de (1), obtém-se a Segunda Equação de London (3)

$$J_s = \frac{\vec{E}}{\mu_0 \lambda_L^2} \quad , \quad (3)$$

em que

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m^*}{\mu_0 \eta_s e^{*2}}}$$

é a Profundidade de Penetração de London. Este termo indica o comprimento médio da interface entre o meio supercondutor e meio normal, em que existe um decaimento contínuo do campo magnético incidente, até se anular completamente no interior do supercondutor.

2.1.3. Supercondutores Tipo I e Tipo II

Apesar do modelo de London explicar a supercondutividade através das muito bem sedimentadas Equações de Maxwell, ele possuía limitações. Essas pendências começaram a ser resolvidas pelo modelo de Ginzburg e Landau em 1950, que propunha uma teoria termodinâmica para o comportamento dos supercondutores [8].

Com relação ao efeito Meissner, foi observada a existência de dois comportamentos diferentes, que dividiu os supercondutores em duas categorias: Tipo I e Tipo II. O primeiro apresenta efeito Meissner pleno, expulsando completamente o fluxo magnético do interior do supercondutor enquanto o campo magnético aplicado for menor que H_C .

Os supercondutores de Tipo II caracterizam-se pela existência de dois campos críticos: H_{C1} e H_{C2} . Quando o campo magnético aplicado é $0 < H < H_{C1}$, o supercondutor apresenta efeito Meissner, como um Tipo I. Quando $H_{C1} < H < H_{C2}$, ele apresenta o Estado Misto, onde coexistem regiões supercondutoras e normais. O campo H_{C1} é muito baixo, por vezes inferior ao campo magnético da Terra, de forma que só é possível observar o Estado Misto. Por outro lado, o H_{C2} é muito maior que o H_C dos de Tipo I, de forma que os de Tipo II possuem aplicações práticas, enquanto os primeiros não. A diferença de comportamento entre os tipos I e II em relação ao campo magnético aplicado é mostrada pela Figura 3.

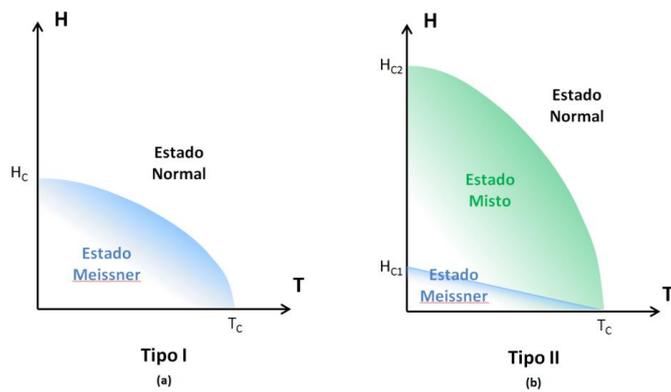


Figura 3 – Diagrama de fase dos supercondutores Tipo I e II em relação ao campo magnético.

As regiões normais dentro do supercondutor se distribuem pelo material em elementos tubulares denominados *Vórtices* ou *Fluxóides*. Esses cilindros são envoltos por vórtices de supercorrentes de blindagem, armazenando fluxo magnético de forma quantizada. Eles se organizam em uma rede trigonal (ou hexagonal), descrita por Alexei Abrikosov, em 1957 [9]. A Figura 4 mostra um esquema da Rede de Abrikosov em um supercondutor do Tipo II.

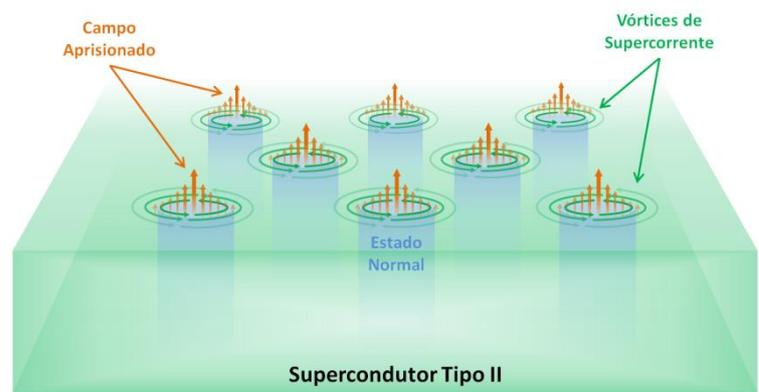


Figura 4 - Rede de Abrikosov em um supercondutor do Tipo II.

2.1.3.1. Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência

Há outros dois parâmetros que podem ser utilizados para caracterizar os supercondutores de Tipo I e II. Um deles é a Profundidade de Penetração (λ_L), já mencionado anteriormente, que caracteriza o comprimento médio da interface entre o meio supercondutor e meio normal. Nos de Tipo I o λ_L é menor que nos de Tipo II[8].

O outro é o Comprimento de Coerência (ξ). Uma das possíveis interpretações de ξ é como sendo o comprimento médio da região entre o meio normal e supercondutor

em que a densidade de superelétrons η_s varia de zero ao valor normal no interior do supercondutor. Nos de Tipo I o ξ é maior que nos de Tipo II [8]. A Figura 5 mostra a relação entre λ_L e ξ nas fronteiras dos supercondutores de Tipos I e II.

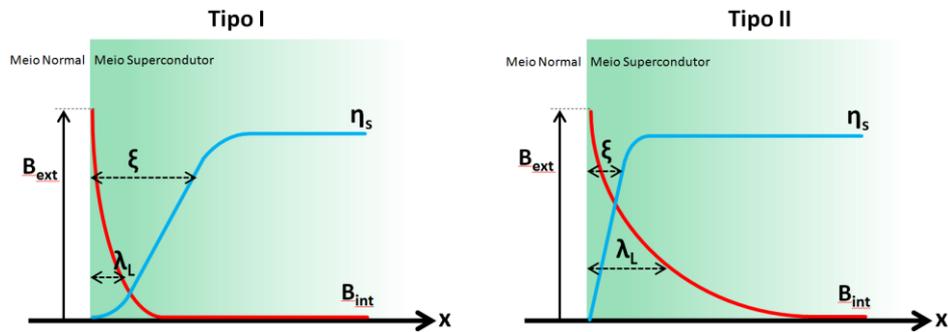


Figura 5 - Fronteira das regiões normal e supercondutora para os Tipos I e II. Adaptada de [5].

No contexto das Redes de Abrikosov dos supercondutores de Tipo II, os parâmetros λ_L e ξ podem ter ainda outra interpretação. Considerando os Fluxóides como cilindros de estado normal blindados por vórtices de supercorrentes, podem-se usar esses parâmetros para dimensionar o diâmetro médio desses elementos [8] com relação à distribuição do campo aprisionado ou com relação à distribuição de η_s , conforme mostrado pela Figura 6.

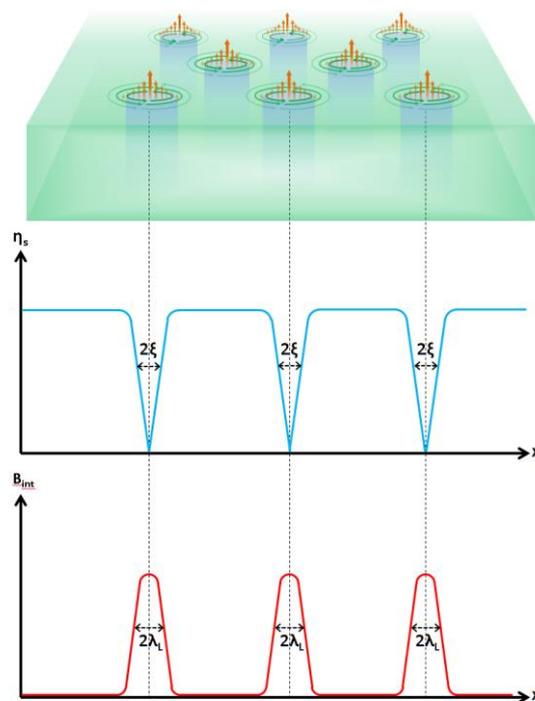


Figura 6 - Parâmetros λ_L e ξ usados para dimensionar o diâmetro dos centros de aprisionamento de fluxo. Adaptada de [5].

2.1.3.2. Energia Livre de Superfície

Devido ao caráter diamagnético dos supercondutores, deve haver uma energia de superfície na fronteira entre os meios normal e supercondutor diretamente proporcional à área da interface [5]. Ela pode ser definida como uma parcela da energia total de um sistema referente à existência da interface estável entre estes diferentes meios.

Num supercondutor, a energia de superfície é devida a duas parcelas: a primeira é a energia da densidade de superelétrons ordenados, e vai depender da distribuição de η_s e, conseqüentemente, ξ . A segunda é a energia referente à desmagnetização do meio supercondutor, que por sua vez depende de como o campo decai no interior dele, portanto de λ_L . Pode-se dizer que a densidade em área de energia livre no supercondutor é dada, aproximadamente, pela Equação (4) [8]:

$$\epsilon_s = \frac{1}{2} \mu_0 H_C^2 (\xi - \lambda_L) \quad . \quad (4)$$

Num supercondutor de Tipo I tem-se que $\xi > \lambda_L$, de forma que a contribuição para a energia do sistema devido à interface será positiva, aumentando a energia total. Num supercondutor de Tipo II, $\xi < \lambda_L$, de forma que essa contribuição será negativa, diminuindo a energia total do sistema.

Considerando que, de acordo com a termodinâmica, o estado mais provável é aquele de menor energia, nos supercondutores de Tipo I isso ocorrerá quando a energia de superfície for mínima, ou seja, quando a sua área de interface for mínima. A única forma de isso acontecer é que a ela seja no máximo a superfície externa do supercondutor. Dessa forma, não haverá nenhuma penetração de fluxo (Efeito Meissner), pois ela tenderia a aumentar essa área.

Nos supercondutores de Tipo II, pela energia de superfície ser negativa, o estado de menor energia será aquele cuja área da interface seja a máxima possível. Para isso acontecer haverá penetração de fluxo de forma a haver a maior quantidade possível de fluxóides, ou seja, que sua disposição seja em uma rede hexagonal (Rede de Abrikosov) e que cada vórtice contenha o mínimo de fluxo aprisionado possível. Dessa forma, explica-se o fato de cada vórtice conter um *quantum* de fluxo magnético aprisionado, definido por (5) [10]:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,068 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad , \quad (5)$$

em que h é a Constante de Planck e e é a Carga Elementar.

Dessa forma, podendo os supercondutores Tipos I e II ser separados de acordo com o sinal da energia de superfície, e conseqüentemente, de acordo com ξ e λ_L , a teoria de Ginzburg-Landau também propôs uma forma de identificar os supercondutores pelos parâmetros λ_L e ξ com a chamada Razão de Ginzburg-Landau (κ), dada pela Equação (6) [8]:

$$\kappa = \frac{\lambda_L}{\xi} \quad (6)$$

Cada supercondutor possui o seu κ característico. Ele pode ser usado para determinar o sinal da energia de superfície ao ser comparado com a constante $1/\sqrt{2}$, de forma que ela será positiva (Tipo I) para $\kappa < 0,707$ e negativa (Tipo II) se $\kappa > 0,707$.

2.1.4. Pares de Cooper

Apesar dos modelos de London e Ginzburg-Landau conseguirem explicar uma série de comportamentos, elas ainda são teorias fenomenológicas, baseadas em observações em laboratório, e não explicam a supercondutividade a partir de relações físicas fundamentais [10].

Essas explicações começaram a surgir em 1956 quando Leon Cooper propôs que os superelétrons se associam em pares. Estes, chamados Pares de Cooper, se manteriam coesos por forças mediadas através de *fônons*, excitações da rede cristalina do material [11].

Em 1957, John Bardeen, Leon Cooper e Robert Scribeffer desenvolveram uma teoria microscópica em que haveria uma diferença de nível energético entre os superelétrons pareados e os elétrons normais[12]. Conhecida como Teoria BCS, ela teve grande sucesso para explicar os supercondutores até a década de 1980 (supercondutores de baixa temperatura crítica).

2.1.5. Supercondutores de Alta Temperatura Crítica

Em 1986 houve a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica (HTS), tendo T_C acima de 30 K, com a cerâmica La-Ba-Cu-O. Desde então vários materiais supercondutores a base de óxidos de cobre foram desenvolvidos, com T_C .

ainda maiores. Eles representaram um grande salto nos estudos de supercondutividade, pois não mais precisavam de hélio líquido para a refrigeração, diminuindo muito os custos com esses equipamentos.

Os HTS mais usados são o $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y-123 ou YBCO), o $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ e o $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2212 e Bi-2213, respectivamente, ou BSCCO) [13], todos com T_c acima de 77 K, podendo ser resfriados com nitrogênio líquido. A vantagem do nitrogênio sobre o hélio é seu baixo custo e fácil obtenção, além de ser abundante na atmosfera, diferentemente do hélio, que se perde para o espaço ao ser liberado no ambiente.

Apesar de a teoria BCS ter tido muito sucesso para modelar os supercondutores de baixa temperatura crítica (LTS), ela se mostrou ineficiente para os de alta. As diferenças comportamentais entre isótopos de supercondutores de baixa temperatura crítica (isotopia) explicadas por essa teoria não se repetiram da mesma forma para os de alta, dentre outras incongruências que invalidaram o modelo. Dessa forma, até os dias de hoje, não existe um modelo capaz de explicar totalmente o comportamento dos supercondutores.

2.1.6. Limites Teóricos e Práticos dos Supercondutores

Apesar de ser possível encontrar na literatura que os limites da supercondutividade se resumem a T_c , H_c (ou H_{c2}) e J_c , responsáveis pela quebra dos Pares de Cooper, eles não refletem a totalidade dos aspectos práticos e teóricos acerca da aplicação dos supercondutores.

Em primeiro lugar, se um supercondutor de Tipo II for permeado por uma densidade de corrente de transporte \vec{J}_S haverá uma interação entre ela e os Fluxóides de campo \vec{B}_F da Rede de Abrikosov, gerando uma Força de Lorentz, \vec{F}_L dada pela Equação (7), conforme mostrado pela Figura 7 [14].

$$\vec{F}_L = \vec{J}_S \times \vec{B}_F \quad . \quad (7)$$

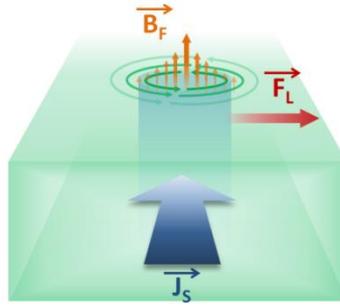


Figura 7 - Indução da Força de Lorentz sobre um Fluxóide.

Sem nenhuma força para contrabalançar a de Lorentz, os Fluxóides tendem a se deslocar com uma velocidade \vec{v}_d , induzindo um campo elétrico \vec{E}_L , de acordo com a Equação (8) [14].

$$\vec{E}_L = \vec{v}_d \times \vec{B}_F \quad . \quad (8)$$

Este campo elétrico possui a mesma direção da corrente, porém sentido contrário. Essa interação entre corrente e campo elétrico caracteriza uma dissipação de energia que, embora não seja de natureza ôhmica, ainda é térmica e leva à perda da supercondutividade pela violação de T_C .

Se a Rede de Abrikosov for deixada a mercê da F_L , o J_C seria baixíssimo, de forma que não haveria utilidade prática para os supercondutores de Tipo II. Para contornar isso, eles são preenchidos com grânulos e poros. Essas pequenas impurezas seguram a Rede de Abrikosov no lugar, mesmo com a corrente de transporte, gerando uma força de aprisionamento (conhecida na literatura como *força de pinning*). O quão grande será essa força dependerá do material supercondutor e de sua fabricação, de forma que sua capacidade de supercondução está intimamente ligada à qualidade desse processo [14].

Portanto, a densidade de corrente crítica J_C é a que supera as forças de *pinning*, dissociando as Redes de Abrikosov, e está ligada a aspectos construtivos do material, e não à quebra dos Pares de Cooper.

Existe, no entanto, uma densidade de corrente crítica teórica, prevista pela BCS, que de fato causa a quebra dos Pares de Cooper, chamada Densidade de Corrente de Depareamento, J_d , mostrada na Equação (9) [15].

$$J_d = \frac{\Phi_0}{\frac{3}{\sqrt{3}}\pi \mu_0 \lambda_L(T)^2 \xi(T)} \quad (9)$$

Esta corrente é altíssima e requereria um nível de *pinning* inalcançável na prática [16].

Outro parâmetro que limita a aplicação dos supercondutores é o Campo Magnético Irreversível, H_{irr} . Este campo é menor que H_{C2} e leva a Rede de Abrikosov de um estado ordenado e cristalino a um estado desordenado e fluido, de forma que o aprisionamento de fluxo se torna impossível, e a corrente crítica não pode assumir valores razoáveis [17].

É importante ressaltar a interdependência entre os parâmetros críticos. A J_c é um parâmetro sensível não só à temperatura, mas também ao campo magnético incidente [18], e esta questão é vital em projetos de eletromagnetos supercondutores. Nesse cenário, a perda da supercondutividade pela superação do J_c devido a um alto campo magnético incidente leva a um superaquecimento quase instantâneo e à destruição (*quenching*) de todo um enrolamento supercondutor. A Figura 8 mostra um exemplo da dependência do J_c em função do campo magnético incidente. Estes dados foram obtidos por levantamentos de curvas $V \times I$ (tensão \times corrente) em fitas supercondutoras de segunda geração com diferentes intensidades de campo magnético incidente perpendicularmente [18].

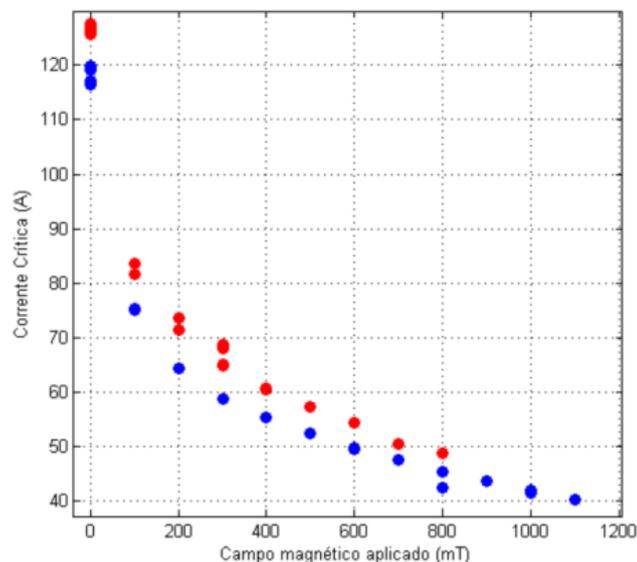


Figura 8 - Dependência da J_c para diferentes incidências de campo magnético [18].

Tendo em mente essa série de detalhes, pode-se redefinir o gráfico apresentado na Figura 1, inserindo os diferentes limites teóricos e práticos dos supercondutores, conforme mostrado na Figura 9.

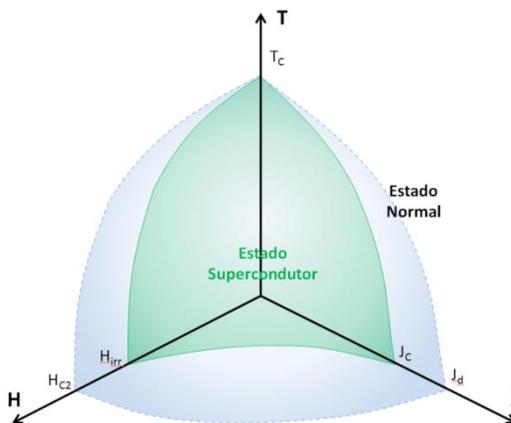


Figura 9 - Limites teóricos e práticos dos supercondutores Tipo II.

2.2. Fitas Supercondutoras

Até a descoberta dos HTS, aplicações com supercondutores maciços eram consideradas inviáveis. A possibilidade de se utilizar supercondutores em mancais magnéticos despertou o interesse dos pesquisadores para o potencial desses materiais [19]. No entanto, a produção de blocos maciços é problemática por não existir uma técnica eficiente para produção em larga escala e ser difícil de manter um padrão de qualidade, com amostras suficientemente homogêneas.

A forma de se produzir supercondutores em escala industrial se deu com o desenvolvimento dos fios supercondutores de NbTi e, anos mais tarde, das fitas supercondutoras de YBCO e BSCCO. Ao invés do crescimento orientado em grandes blocos maciços, ele é feito em filamentos ou camadas micrométricas, aumentando muito sua homogeneidade e, conseqüentemente, as capacidades do material. Além disso, dá flexibilidade mecânica, de forma que possam ser manuseadas de maneira similar aos condutores convencionais, permitindo sua utilização de diversas formas antes impraticáveis.

A primeira geração de fitas supercondutoras (Fitas 1G) possui filamentos de BSCCO (Bi-2223) e uma matriz de prata que representa cerca de 70% do seu volume [20]. Sua produção é limitada devido ao alto custo. A partir de 2005 foram introduzidas as fitas supercondutoras de segunda geração (Fitas 2G), que utilizam o YBCO e um processo produtivo diferente das antecessoras, mais avançado, por deposição orientada multicamada sobre um substrato metálico. Elas possuem uma maior relação US\$/kA.m que as Fitas 1G.

O YBCO também possui uma série de vantagens sobre o BSCCO, no que diz respeito à aplicabilidade. Por exemplo, à temperatura do nitrogênio líquido (77 K) o YBCO possui um H_{irr} muito superior ao BSCCO, de cerca de 5 T a 7 T contra cerca de 0,3 T, conforme mostrado na Figura 10. Mesmo o BSCCO tendo um H_{C2} superior, sua aplicabilidade é de fato limitada pelo H_{irr} .

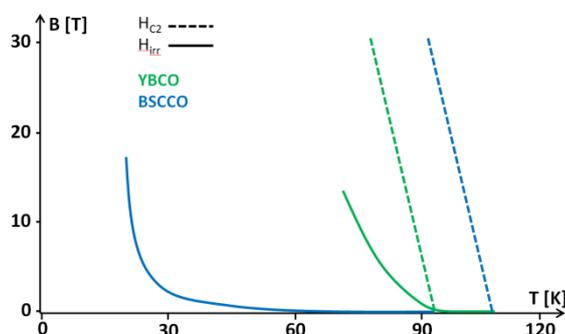


Figura 10 - H_{C2} e H_{irr} para o BSCCO e YBCO em função da temperatura. Adaptado de [15].

Além disso, tanto os valores de J_c quanto de H_{irr} podem ser aumentados com a melhora do aprisionamento de fluxo. No caso do YBCO, o ξ é da ordem de poucos nanômetros, de forma que impurezas de tamanho atômico são capazes de aprisionar fluxo. O YBCO das Fitas 2G é capaz de atingir um altíssimo grau de orientação, permitindo que seu comportamento se aproxime ao de um monocristal [15].

As Fitas 2G são muito mais atraentes economicamente e são produzidas em escala industrial por alguns fabricantes no mundo. No continente americano se destacam a *Super Power* e a *American Superconductors*, que garantem a produção de quilômetros ininterruptos de Fita 2G com alta qualidade [21] [22]. Em comparação aos blocos supercondutores maciços, elas possuem capacidades de condução muito superiores, conforme mostrado na Tabela 1. A título de comparação, a densidade de corrente máxima de trabalho dos condutores de cobre eletrolítico à temperatura ambiente, segundo a tabela AWG, é de cerca de 3×10^6 A/m².

Tabela 1- Comparação de J_c entre o YBCO em bloco maciço e Fita 2G

Temperatura		4 K	77 K
J_c do YBCO	Em bloco maciço:	8×10^{10} A/m ²	1×10^9 A/m ²
	Em Fita 2G:	$1,37 \times 10^{11}$ A/m ²	2×10^{10} A/m ²

Vale ressaltar que as Fitas 2G possuem espessuras de 50 μm a 100 μm , com uma camada de 1 μm de material supercondutor em seu interior. Sendo assim, para cálculos de projeto, foi definida a densidade de corrente de engenharia J_e , que leva em consideração toda a área de seção transversal da fita. Ainda assim, mesmo sendo entre 1% e 2% da densidade de corrente do supercondutor puro, o J_e ainda está muito acima dos condutores de cobre convencionais.

Diversos protótipos em vários campos de aplicação estão em desenvolvimento utilizando as Fitas 2G. Podem-se destacar os cabos para transmissão de energia elétrica [23], limitadores de corrente de curto circuito [24] [25], veículos de levitação magnética [26], eletromagnetos de alto campo [27] e máquinas elétricas supercondutoras [28] [29] [30].

2.3. Máquinas Supercondutoras

A capacidade de condução de altas densidades de corrente contínua sem perdas pode ser muito bem aproveitada para a construção de enrolamentos de campo em máquinas síncronas.

Em uma máquina elétrica o torque pode ser descrito como a interação dos campos magnéticos no entreferro mais a dos núcleos magnetizados pelas correntes dos enrolamentos do rotor e estator.

Considerando que θ seja o ângulo de defasagem entre os eixos magnéticos do rotor e estator, os fluxos magnéticos enlaçados pelos enrolamentos podem ser definidos, respectivamente, por (10):

$$\begin{aligned} \varphi_E &= L_E i_E + M(\theta) i_R \\ \varphi_R &= L_R i_R + M(\theta) i_E \end{aligned} \quad , \quad (10)$$

em que φ_E é o fluxo enlaçado pelo enrolamento do estator, L_E é sua indutância própria e i_E é a sua corrente; φ_R é o fluxo enlaçado pelo enrolamento do rotor, L_R é sua indutância própria e i_R é sua corrente; $M(\theta)$ é a indutância mútua entre os enrolamentos, e depender de θ devido à variação da relutância pela presença das ranhuras dos enrolamentos ou polos salientes.

As tensões terminais dos enrolamentos de rotor e estator, v_R e v_E , respectivamente, são definidas por (11):

$$\begin{aligned} v_R &= R_R i_R + \frac{d\phi_R}{dt} \\ v_E &= R_E i_E + \frac{d\phi_E}{dt} \end{aligned} \quad , \quad (11)$$

com as perdas por efeito Joule nos condutores, respectivamente, do rotor, de resistência R_R , e do estator, de resistência R_E , e a variação temporal do fluxo enlaçado pelos respectivos enrolamentos. Aplicando as equações (10) às derivadas em (11) e resolvendo, obtém-se as equações de malhas elétricas (12):

$$\begin{aligned} v_R &= R_R i_R + L_R \frac{di_R}{dt} + M(\theta) \frac{di_E}{dt} + i_E \frac{dM(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \\ v_E &= R_E i_E + L_E \frac{di_E}{dt} + M(\theta) \frac{di_R}{dt} + i_R \frac{dM(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad , \quad (12)$$

em que a variação de θ no tempo pode ser definida como a velocidade angular do rotor: ω_R , em rad/s.

Para se obter a equação de balanço de potências a partir da equação de malha do estator (ou alternativamente do rotor), multiplica-se a equação (12) pela corrente do enrolamento:

$$v_E i_E = R_E i_E^2 + L_E i_E \frac{di_E}{dt} + i_E M(\theta) \frac{di_R}{dt} + i_E i_R \frac{dM(\theta)}{d\theta} \omega_R \quad , \quad (13)$$

que pode ser dividida de acordo com os seguintes termos:

- $v_E i_E$ é a potência de entrada total, alimentada nos terminais da máquina;
- $R_E i_E^2$ é referente à potência dissipada por efeito Joule no estator;
- $L_E i_E \frac{di_E}{dt} + i_E M(\theta) \frac{di_R}{dt}$ é a variação da energia magnética armazenada;
- $i_E i_R \frac{dM(\theta)}{d\theta} \omega_R$ é a potência mecânica no eixo do rotor.

Comparando este último termo com a equação (14) da potência mecânica:

$$P_{mec} = \tau \omega_R = i_E i_R \frac{dM(\theta)}{d\theta} \omega_R \quad , \quad (14)$$

portanto, o torque aplicado ao eixo da máquina pode ser definido como (15):

$$\tau = i_E i_R \frac{dM(\theta)}{d\theta} \quad . \quad (15)$$

Dessa forma, o torque na máquina elétrica é consequência dos campos magnéticos induzidos pelas correntes nos enrolamentos de campo e armadura e do acoplamento magnético entre eles. Isso significa que o aumento da corrente vai influenciar diretamente o torque resultante.

Em máquinas convencionais, esses enrolamentos são feitos de cobre eletrolítico, de forma que suas capacidades de condução são limitadas pela dissipação de calor por efeito Joule, inerente ao material. Enrolamentos supercondutores são capazes de conduzir correntes muito mais altas sem dissipar calor, fornecendo campos magnéticos muito mais intensos que os conseguidos com condutores convencionais, aumentando a relação de potência/volume das máquinas em até o dobro [31].

Para uma mesma classe de potência, máquinas supercondutoras são menores e mais leves que as convencionais. Essa vantagem pode ser ainda melhor aproveitada em geradores de alta velocidade. Como um gerador supercondutor tem muito menos momento de inércia, ele não requer o alto torque de partida de um motor a combustão de diesel, usado convencionalmente em embarcações. Ele poderia ser substituído por uma compacta turbina a gás, que possui também maior relação potência/volume e eficiência. No geral, todo o grupo-gerador teria uma diminuição significativa em termos de tamanho e peso, conforme mostrado pela Figura 11, e também eficiência, emissão de poluentes e ruídos [32] [33] [34].

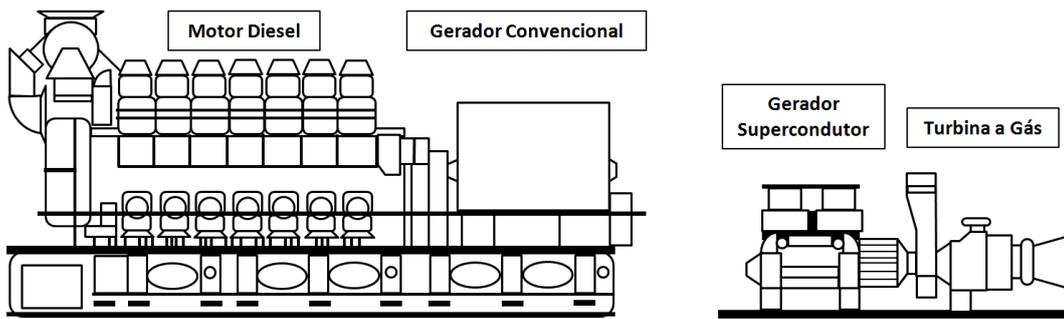


Figura 11 - Tamanhos de um grupo-gerador convencional e um HTS com turbina a gás.
Adaptado de [32]

Devido ao grande aumento na intensidade dos campos produzidos pelos enrolamentos supercondutores, os dentes de ferro das ranhuras dos condutores facilmente saturam, inviabilizando sua função de concentrador de fluxo magnético. Dessa forma, estas partes de ferro podem ser substituídas por outro material mais leve e resistente conseguindo-se mais uma diminuição no peso dessas novas máquinas (ainda assim é necessária uma blindagem ferromagnética externa). Além disso, menos ferro também significa menores perdas por correntes parasitas no núcleo. Unindo isso à ausência de perdas nos enrolamentos de campo, a eficiência das máquinas é aumentada ao ponto de mais do que compensar a necessidade de um sistema de resfriamento [31], conforme mostrado pela Figura 12.

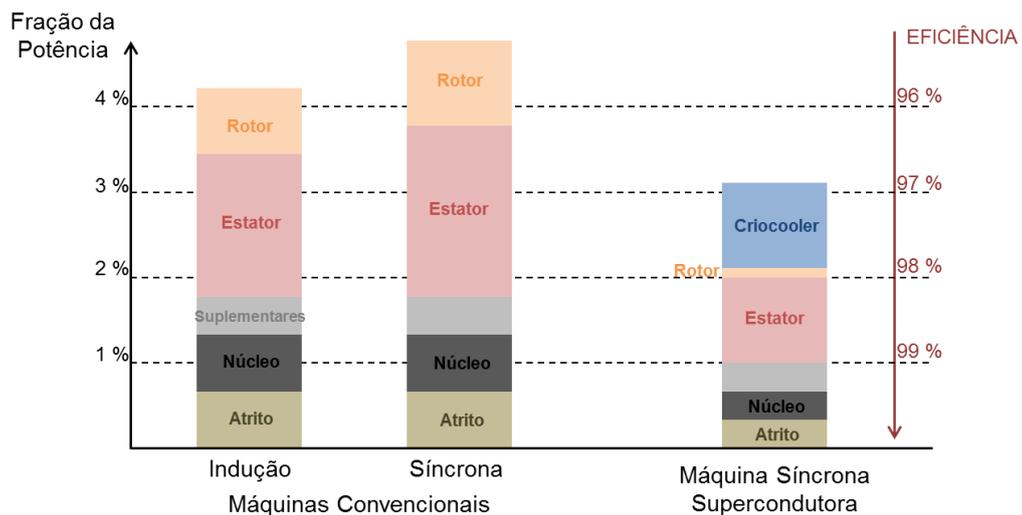


Figura 12 - Diagrama comparativo das perdas em máquinas convencionais e supercondutoras.
Adaptado de [30] [33]

A substituição de parte do núcleo do estator por material não magnético leva a uma reatância síncrona x_d muito pequena, garantindo algumas vantagens operacionais: Ela faz com que a máquina opere com um menor ângulo de carga, permitindo uma maior capacidade de carga para uma mesma alimentação, conforme mostrado na Figura 13. Além disso, permite uma maior corrente de curto-circuito, o que facilita a sua detecção e a atuação dos sistemas de proteção em uma falta na rede. Também garante um comportamento mais robusto, com menores flutuações na tensão terminal frente a variações de carga, sendo ideal para aplicações em redes pequenas, isoladas e mais eletricamente suscetíveis. Poderia também trabalhar facilmente em fator de potência nulo, atuando como um grande compensador síncrono quando sobrecitada ou consumindo quantidade significativa de reativo quando subexcitada [31].

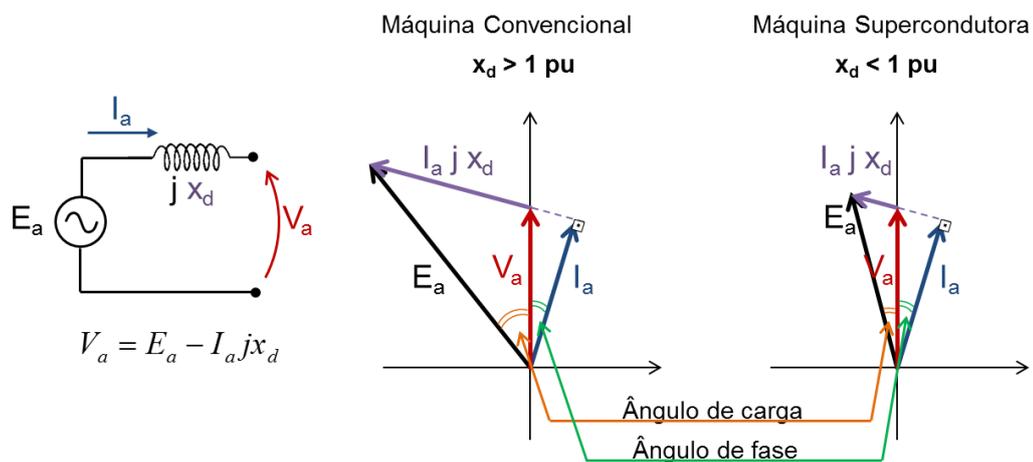


Figura 13 - Diagramas fasoriais comparativos entre máquina convencional e supercondutora. Adaptado de [33]

No estator, no entanto, a substituição do cobre por supercondutor ainda é discutível. Quando conduzindo corrente alternada, os supercondutores apresentam perdas. Mesmo que ainda menores que condutores convencionais, essa dissipação de energia torna ainda mais difícil e energeticamente dispendioso o controle das temperaturas criogênicas necessárias.

Todas essas vantagens tornam as máquinas supercondutoras extremamente atraentes. A questão é qual fatia do mercado estará disposta a pagar o seu preço. A tecnologia de produção em larga escala de HTS é muito recente e ainda relativamente cara, bem como a manutenção criogênica do estado supercondutor, embora as projeções apontem para uma contínua diminuição desses custos. Vale ressaltar que a

tecnologia de produção de fios de cobre já teve muito tempo de aperfeiçoamento para chegar ao custo de produção atual. Dessa forma, é difícil competir globalmente hoje com a tecnologia muito bem sedimentada há mais de 100 anos das máquinas convencionais munido apenas de aumento em eficiência. Para certas aplicações, no entanto, suas outras propriedades são pontos chaves para a entrada das máquinas supercondutoras no mercado, como aerogeração ou sistemas marítimos em geral. Essas aplicações possuem exatamente o tipo de demanda que as máquinas supercondutoras têm a oferecer e são uma ótima oportunidade para o seu desenvolvimento.

Por exemplo, plataformas de petróleo operam com grandes grupos geradores a diesel ou gás em que só o motor corresponde a cerca de três vezes o tamanho do gerador, ocupando um volume da ordem de centena de m³. Para garantir confiabilidade à operação ininterrupta, uma plataforma jamais opera a 100% da capacidade de geração, de forma que a falha de um gerador possa ser compensada pela tomada de carga dos demais. Isso faz com que essas embarcações possuam de quatro a seis unidades, dependendo do seu porte, consumindo diesel a uma taxa da ordem de 1000 m³/dia. Sem contar com o fato desse maquinário ter uma manutenção lenta e dispendiosa, justificando ainda mais uma alta redundância. Em plataformas que operam sobre grandes profundidades, a compensação dos ventos e correntes é feita pelo sistema de posicionamento dinâmico (PD): uma série de propulsores direcionais que mantém a embarcação em posição quase estática, usando como referência o *GPS*. Esse sistema de motores de indução e inversores corresponde em média a cerca de 80% da potência consumida a bordo, que varia com grande frequência de acordo com as diversas condições meteorológicas. São motores que precisam variar rápida e constantemente suas condições de operação e que quanto melhor sua dinâmica, mais eficiente será o PD.

Nesses dois cenários (geração embarcada e PD) as máquinas supercondutoras podem ser bem inseridas garantindo melhoras significativas no desempenho da operação. No caso da geração, o parque de máquinas teria uma redução significativa de volume e consumo de combustível ao se substituir os grupos convencionais a diesel por grupos de turbina a gás com supergerador. Como as máquinas possuem maior relação potência/volume/peso e maior capacidade de sobrecarga, a quantidade de geradores e a redundância necessária para garantir a confiabilidade poderia ser menor. A manutenção dessas máquinas também seria facilitada, graças ao fato de serem menores, mais compactas e modulares, mesmo os sistemas de resfriamento. Além disso, pela embarcação representar um sistema de potência isolado e de

pequeno porte, a baixa reatância síncrona garantiria geradores mais eletricamente estáveis e menos suscetíveis a defeitos, aumentando a robustez da rede. No caso do PD, máquinas menores, mais leves e com uma dinâmica mais rápida garantiriam uma melhora no seu desempenho, respondendo mais prontamente às variações do controle, aumentando a segurança da operação, em que a plataforma possui uma faixa razoavelmente estreita de derivação da posição. Nesse cenário, considerando o alto consumo que esse sistema representa, o alto rendimento também se torna um atrativo a se considerar.

Esse exemplo traz uma série de justificativas para a adoção de máquinas supercondutoras em sistemas embarcados. Esta é uma abordagem bastante explorada por outros projetos na bibliografia, conforme será descrito a seguir, especialmente com relação à propulsão. Por enquanto, para esta tecnologia em desenvolvimento, as aplicações navais oferecem amplas possibilidades e é um campo fértil a continuar sendo explorado, garantindo assim a entrada das máquinas supercondutoras no mercado.

3. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado o contexto global das máquinas elétricas supercondutoras, com um breve histórico desde as primeiras pesquisas no assunto, e as principais referências do estado da arte de sua construção.

3.1. Histórico

As primeiras pesquisas no assunto datam da década de 1960, sendo a primeira menção na bibliografia norte-americana feita por Robert J. Smith, em 1962, em um relatório técnico da Base Aérea de Wright-Patterson, nos EUA, sobre transferência de calor em um rotor de enrolamentos supercondutores [35].

As duas primeiras propostas de projetos de máquinas supercondutoras datam de 1964. Elas são, curiosamente, do mesmo livro, volume e número (*IEEE Transactions on Aerospace*, número 2, volume 2), mas de dois autores de laboratórios distintos [36] [37], ambos voltados para aplicações aeroespaciais.

Os primeiros protótipos de que se têm notícia na literatura foram máquinas homopolares, encabeçadas por A. D. Appleton em 1966 [38], na Inglaterra. A escolha deste caminho provavelmente se deve ao fato de as bobinas supercondutoras nessas máquinas ficarem submetidas a um campo axial e quase nenhum campo transversal. Dessa forma, as preocupações com a influência do campo transversal incidente no J_c desses materiais era negligenciada, permitindo maior foco no desenvolvimento dos sistemas criogênicos e, em especial, dos comutadores. [39].

Em paralelo às máquinas homopolares inglesas, no campo das máquinas síncronas, foram desenvolvidos nos EUA geradores de 8 kVA com enrolamentos de campo supercondutores, também em 1966 [40] [41]. Houve uma tentativa de se desenvolver uma máquina totalmente supercondutora de 50 kW em 1967 [42], onde se depararam com o problema das perdas em CA em enrolamentos de armadura supercondutores. Trabalhos posteriores na Rússia (100 kVA) [43] e na Alemanha Oriental (21 kVA) [44] em 1972 e no Japão (30 kVA) [45] em 1973 são alguns exemplos do início da difusão dessas pesquisas no resto do mundo.

3.1.1. Máquinas LTS

Até 1986, ainda não haviam sido descobertos os HTS, de forma que os materiais supercondutores utilizados eram o NbTi e o Nb₃Sn. O primeiro apresenta maior

aplicabilidade (e é muito utilizado até os dias de hoje) graças ao domínio da técnica de fabricação em larga escala, sob a forma de fios flexíveis, apropriados à construção de bobinas. No entanto, não possuem o H_{C2} mais elevado, de cerca de 12 T, e H_{irr} de 10.5 T a 4 K. O segundo não possui as mesmas propriedades mecânicas. É um intermetálico rígido e quebradiço, de forma que suas bobinas precisem ser criadas em forno por inteiras. Sua vantagem são os $H_{C2} = 27$ T e $H_{irr} = 24$ T, a 4 K, e são aplicados em eletromagnetos de alto campo [15].

Em 1973 a *Westinghouse* concluiu o primeiro protótipo de um gerador LTS de alta rotação com bobinas de campo supercondutoras e potência de cerca de 5 MVA [46] [47], cujos dados estão na Tabela 2.

Tabela 2- Primeiro Gerador LTS de alta velocidade[47]

Fabricante: Westinghouse Electric Corporation	
Potência: 5,4 MVA	Rotação: 12.000 rpm
Tensão: 5 kV	X_d : 0,54 Ω
Comprimento: 0,95 m	Diâmetro: 0,45 m
Supercondutor: NbTi (matriz de Cu)	Refrigerante: LHe (4 K), 40 l/h

A *General Electric* também construiu em 1979 um protótipo de gerador com bobinas de campo supercondutoras com potência de 20 MW e 3600 rpm. A construção dessa máquina foi um sucesso, e permitiu vários testes em diferentes condições de carga, além de uma ampla aprendizagem das técnicas envolvidas e desempenhos elétrico, mecânico e térmico, além de ser a mais potente dessa época. [32] [48].

Na década de 1980, a crise econômica dos EUA e Europa levou a uma sensível diminuição no crescimento do setor energético. Isso causou o encerramento de muitos projetos de máquinas supercondutoras em desenvolvimento até então.

Um dos projetos mais audaciosos dos anos 1990 foi o Super-GM japonês, iniciado em 1988. No decorrer do projeto (encerrado em 1999), foi desenvolvido um gerador com três tipos de rotores diferentes e capacidade de 70 MW, cujos dados estão na Tabela 3. Ele fixou os recordes mundiais da época para uma máquina desse tipo: de potência gerada (79 MW) e maior tempo de operação contínua (mais de 1500 h). Também foi o primeiro a estabelecer uma ligação com a rede de alta tensão [49].

Tabela 3- Projeto de gerador LTS japonês [49]

Super-GM: Rotor 2	
Potência: 70 MW	Rotação: 3600 rpm
Tensão: 10 kV	X_d : 0,35 Ω
Comprimento: 7,00 m	Diâmetro: 1,10 m
Supercondutor: NbTi (matriz de Cu)	Refrigerante: LHe (4 K)

3.1.2. Máquinas HTS

A partir de 1986 foram desenvolvidos os HTS, que possuem T_c superior a 30 K e, nos casos do YBCO e do BSCCO, superior a 77 K, temperatura de ebulição do nitrogênio líquido. A possibilidade de se conseguir supercondutividade sem usar o dispendioso hélio líquido somado aos avanços em sistemas de refrigeração, trouxe uma nova perspectiva para as máquinas supercondutoras ganharem espaço após a recessão. O uso dos HTS em enrolamentos foi o novo rumo tomado por muitos pesquisadores da época.

O grupo *Reliance Electric e Rockwell Automation* foi o primeiro a desenvolver um protótipo de máquina HTS nos EUA. Um motor de 150 kW foi construído e testado em 1996 e um maior, de 750 kW, testado em 2000. Ambos tinham 4 polos e funcionavam a 60 Hz, com enrolamentos de campo de fitas de BSCCO fabricadas pela *AMSC* [50] [51].

A própria *AMSC* foi uma das empresas que mais se destacou nos últimos tempos em projetos de máquinas HTS. A começar pelo projeto de 2001, um motor de 3,7 MW a 1800 rpm, que alcançou seu objetivo de validar os principais aspectos projetivos de enrolamentos supercondutores e sistemas de resfriamento. A seguir, desenvolveu um motor de 5 MW e 230 rpm para aplicações em propulsão naval em conjunto com a *ALSTOM*, que fabricou o estator de núcleo não-ferromagnético. Ele foi entregue em 2003 para a Marinha dos EUA [52]. Esse projeto foi o marco inicial para o desenvolvimento dos projetos seguintes mais ambiciosos: o motor de propulsão de 36,5 MW, entregue em 2009 para a Marinha dos EUA e o compensador síncrono *SuperVAR*, de 2004, com capacidade de 10 MVAR [46] [53] [54].

A *GE* começou seus estudos com máquinas HTS em meados da década de 1990 com a construção e testes de bobinas de BSCCO [55] [56]. A partir de 2002, iniciaram o desenvolvimento de um gerador comercial de 100 MVA, procurando a melhor relação custo-benefício, em especial das fitas supercondutoras, com o objetivo de

facilitar a aceitação do mercado. Para tal, adotaram a filosofia de rotor de núcleo ferromagnético não-refrigerado. Assim, eles minimizariam a quantidade de condutor necessário e diminuiriam as forças impostas diretamente sobre eles, facilitando os parâmetros de projeto e custo. A aplicação deste tipo de gerador seria para grandes usinas, onde peso e volume são o menor dos problemas. Eles abriram mão da alta densidade de energia que pode ser conseguida com uma máquina HTS de núcleo não-magnético em favor da viabilidade assegurada por anos de uso difundido do estator ferromagnético convencional [57].

Eles partiram de um protótipo em menor escala, de 1,5 MW, para validação conceitual do tipo de rotor, desempenho das bobinas HTS e sistemas de refrigeração. O estator foi aproveitado, sem alterações, de um motor de indução de 2000 HP, onde o rotor tipo gaiola foi substituído pelo rotor HTS. Detalhes deste protótipo são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4- Protótipo de Gerador HTS da GE [57]

GE – Gerador HTS Protótipo	
Potência: 1,84 MVA	Rotação: 3600 rpm
Tensão: 4,16 kV	X_d : 1,67 pu
Corrente: 255,5 A	Comprimento útil: 0,44 m
Supercondutor: BSCCO	Refrigerante: He (30 K)

Vários estudos elétricos e mecânicos foram executados para o levantamento dos parâmetros e os resultados foram suficientes para o objetivo de desenvolvimento tecnológico necessário para permitir a construção do gerador de maior escala. No entanto, o projeto foi abandonado ao fim de 2005, após examinados todos os aspectos construtivos nos projetos preliminares, devido à incerteza na viabilidade econômica da tecnologia. O custo inicial de construção acabou sendo maior do que o esperado, especialmente das fitas HTS, do sistema de refrigeração e da estrutura mecânica das bobinas supercondutoras [57].

A *Siemens* começou seu programa de pesquisa com máquinas HTS em 1999. O primeiro modelo foi um protótipo de 400 kW para demonstrar a viabilidade prática do projeto. Esta máquina usa a filosofia de núcleo ferromagnético frio, embutido no criostato rotatório junto com as bobinas HTS, estator de bobinas de cobre com núcleo não metálico e resfriamento por gás Neon a 25 K. Os testes tiveram bons resultados em operação tanto como motor quanto gerador. A partir desses resultados, em 2002

foi dado início ao próximo gerador HTS para aplicações navais e potência de 4 MVA a 60 Hz. Em comparação ao primeiro protótipo, que não foi otimizado, este gerador foi feito para atingir o melhor desempenho possível com esta tecnologia. Seu rotor é baseado no primeiro protótipo, com bobinas de fitas de BSCCO. O resfriamento é feito nos mesmos moldes que na primeira versão, mas utiliza 3 cabeças frias. Para operação normal, duas já são suficientes, mas a redundância é apreciável por questões de confiabilidade e comodidade, além de fornecer potência adicional para acelerar o resfriamento desde a temperatura ambiente. O estator também possui núcleo não metálico. Dentre os resultados dos testes convencionais, ressalta-se que a eficiência desse gerador foi de 98,4%, cerca de 2% superior a de um convencional dessa faixa de potência e já embutido o custo energético da refrigeração, além de redução significativa de ruídos e vibrações. Os detalhes desse gerador estão dispostos na Tabela 5 [30] [34].

Tabela 5– Segundo protótipo de gerador HTS da Siemens [34]

Siemens – Gerador HTS II	
Potência: 4 MVA	Rotação: 3600 rpm
Tensão: 6,6 kV	X_d : 0,41 pu
Peso: 7 t	Eficiência: 98,4%
Supercondutor: BSCCO	Refrigerante: Ne (25 K)

No Japão, três grupos se destacam no desenvolvimento de máquinas HTS. Em 2005, um grupo envolvendo a multinacional *IHI* e a *Sumitomo* desenvolveu um motor axial de 12,5 kW com fitas de BSCCO no enrolamento de campo estático. Foi um dos primeiros arrefecidos a nitrogênio líquido no mundo. Esse motor foi acoplado a um propulsor direcional, mostrando as vantagens em termos de peso e volume comparado ao convencional. O fato da armadura trifásica ser a parte móvel, carecendo de escovas, foi a sua maior desvantagem [58].

Um outro grupo, da Universidade de Kyoto, projetou e testou em 2006 um motor de indução com gaiola feita de fitas de BSCCO, arrefecido a nitrogênio, aproveitando o estator convencional. Durante a partida, as altas correntes induzidas levavam o supercondutor ao ponto de *flux flow*, levemente resistivo, que diminuía conforme a velocidade aumentava e se aproximava da síncrona. Esse motor apresentou altíssimo torque de partida e de velocidade sub-síncrona, bem maiores que no convencional, conforme mostrado pela Figura 14. O mais interessante é que, mesmo sendo um

motor de indução, ele apresenta torque à velocidade síncrona, graças às correntes persistentes na gaiola supercondutora [59] [60].

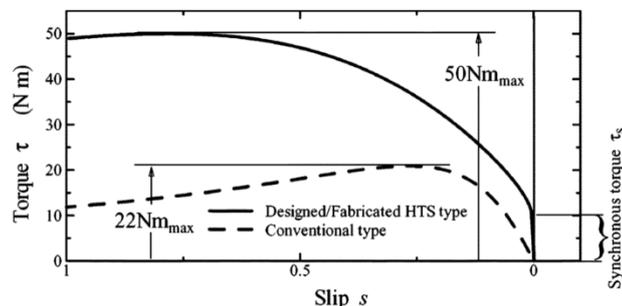


Figura 14 - Torque do motor de indução supercondutor japonês [59].

Um terceiro grupo japonês desenvolveu um motor HTS de 15 kW em 2006 com enrolamento de campo de Fitas 2G arrefecido a hélio a 20 K. Este também usava a filosofia de campo no estator e armadura no rotor, mas com a geometria clássica (radial): o criostato em formato cilíndrico vazado com as bobinas de YBCO e núcleo de ferro a frio e o rotor com alimentação trifásica, escovas e núcleo de ferro. Como as bobinas supercondutoras eram de somente 35 espiras cada, a saturação dos núcleos não era um problema. Os campos induzidos por esses enrolamentos não passavam de 0,4 T. Em termos operacionais esse protótipo não apresentou eficiência maior que a de uma máquina convencional, corroborando para a hipótese de que bobinas supercondutoras em núcleos de ferro para máquinas com densidade de energia equivalente às convencionais não valem a pena [61].

3.2. Estado da Arte

A AMSC continuou as pesquisas com máquinas supercondutoras após o término do projeto com a marinha dos EUA em 2009, mudando o foco para a aerogeração. Aproveitando a experiência de décadas da empresa em dispositivos supercondutores e eletrônica de potência, ela concebeu o aerogerador *Sea Titan*, com capacidade de 10 MW. Uma das suas vantagens é operar a alto torque e baixas velocidades, dispensando o uso de caixa de engrenagens, o que diminui muito o custo de manutenção e peso de um aerogerador, além de aumentar sua confiabilidade e eficiência. Um aerogerador convencional, para essa faixa de potência e com

transmissão direta, tem em média uma nacela de 15 m de comprimento por 5 m de altura, pesando cerca de 800 t, enquanto a proposta supercondutora emprega uma nacela de 10 m de comprimento por 6 m de altura, pesando cerca de 400 t [28].

Em abril de 2013, a *GE* divulgou o sucesso da finalização do gerador supercondutor experimental *Hydrogenie* com capacidade de 1,7 MW a 43 K. Esse gerador seria de grande porte, para aplicações de baixa velocidade e alto torque, especialmente aerogeradores com transmissão direta e hidrogeradores. A Figura 15 mostra a foto do rotor do *Hydrogenie* publicada junto à divulgação deste resultado [29].



Figura 15 - Foto do rotor supercondutor do *Hydrogenie*.

A *Siemens* continuou o desenvolvimento em máquinas HTS com o projeto de um motor de baixa velocidade e alto torque de 4 MW entre 2006 e 2010. Apesar de ter a mesma potência que seu antecessor, este é consideravelmente maior graças a seu torque (320 kNm, contra 10 kNm). Ele é parte de um sistema projetado para ser acionado a velocidades entre 30 rpm e 190 rpm. Apesar dele não ser um motor comercial, seus ensaios de desempenho foram feitos dentro dos padrões da empresa e atenderam às expectativas, demonstrando as capacidades mecânicas e elétricas que tinham que ser provadas. Apresentou capacidade de sobrecarga de 4,5 MW, pesando 25% menos e com um aumento de eficiência de 1,5% a mais que máquinas convencionais desse tipo [30]. Seus dados estão dispostos na Tabela 6. Em paralelo, os testes de longa operação do segundo protótipo continuam até os dias de hoje, contabilizando cerca de dez mil horas de operação. Estando conectado à rede de distribuição em Nurnberg, Alemanha, já passou por vários desligamentos por razões

internas e externas, mas nenhuma delas causada pelos supercondutores ou sistemas de resfriamento. Todos os sistemas toleraram as várias condições de operação até então, não havendo degradação das bobinas HTS [33].

Tabela 6– Terceiro protótipo de motor HTS da Siemens [30]

Siemens – Motor HTS III	
Potência: 4 MVA	Rotação: 30 a 190 rpm
Torque: 320 kNm	Peso: 36 t
Tensão: 3,1 kV	Corrente: 775 A
X_d : 0,3 pu	Eficiência: 94,6%
Supercondutor: BSCCO	Refrigerante: Ne (25 K)

O desenvolvimento das máquinas supercondutoras na atualidade está concentrado ou em grandes fabricantes de máquinas, como a Siemens e a GE ou com os fabricantes de Fitas 2G, como a *AMSC*. Algumas instituições de pesquisa tentam levar o desenvolvimento à frente, mas devido aos altos custos envolvidos, esse grupo é muito limitado. Embora, por um lado isso seja desanimador, olhando-se por uma perspectiva otimista é encorajador no sentido de que há um amplo campo para descobertas. Ninguém até hoje conseguiu difundir amplamente no mercado um projeto de máquina supercondutora, salvo alguns nichos muito específicos, como o *Sea Titan* da *AMSC*, e a tecnologia ainda é muito recente. Projetos como este são, sem dúvida, muito ambiciosos, mas o fato de que há grupos que estão obtendo êxito significa que ele não é impossível.

4. Metodologia

Nesse capítulo serão mostradas as etapas planejadas para a construção e operação dos sistemas desenvolvidos para este trabalho. Foram traçados dois objetivos em série. Primeiramente, é a construção das bobinas de Fitas 2G, que demanda o desenvolvimento de sistemas auxiliares únicos, graças às várias limitações físicas que esse material não convencional possui. Em seguida, foram feitos alguns testes de operação com essas bobinas para validar o sucesso da sua construção. Para os tais foram usados equipamentos de projetos paralelos a este que foram desenvolvidos em trabalhos anteriores justamente para o tipo de demanda que o laboratório possui, incluindo o tipo de análise aqui desejada.

4.1. Motor Linear

Ao invés de partir para uma abordagem muito ambiciosa e construir um motor convencional completo, nessa etapa inicial do projeto optou-se por trabalhar com um motor linear. Uma das formas de se enxergar uma máquina desse tipo é aproximando-a a uma seção de uma máquina de grande número de polos, como um hidrogenerador, por exemplo, conforme ilustrado pela Figura 16.

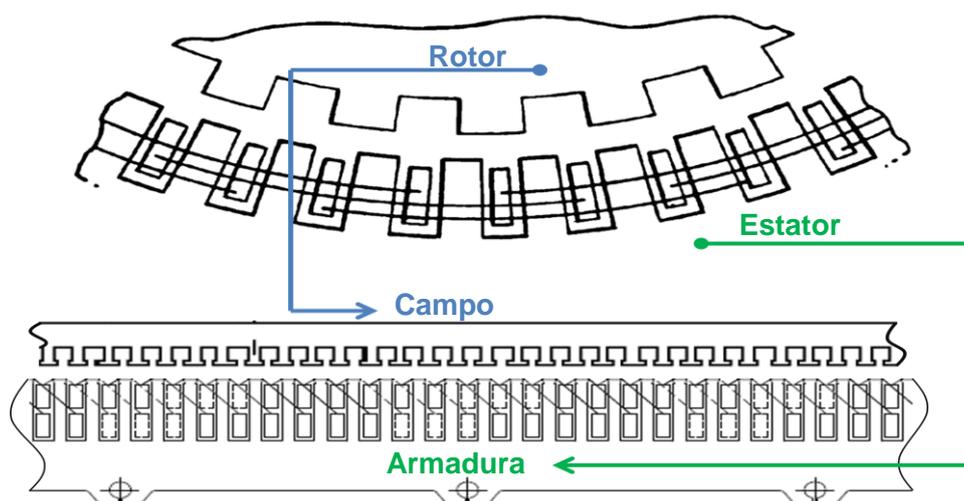


Figura 16 - Aproximação a um motor linear.

Existem algumas topologias de motores lineares. Por exemplo, o caso do veículo Maglev Cobra é um motor linear de indução, em que o secundário é um trilho longo de

barras condutoras curto-circuitadas (formando uma gaiola de esquilo planejada) e a armadura trifásica está acoplada ao veículo e interage com o trilho do secundário como um motor de indução linear, impulsionando o sistema [65]. Em outro caso há a operação feita neste trabalho, em que a armadura com alimentação trifásica é fixa e sobre ela se deslocam os enrolamentos de campo supercondutores com corrente contínua, operando como um motor linear síncrono.

Os princípios que motivaram essa escolha foram simplicidade e confiabilidade. O projeto de um motor supercondutor, conforme já foi salientado anteriormente, é extremamente dispendioso, de forma que seria inviável para este laboratório a obtenção de resultados significativos em tempo hábil. O objetivo neste trabalho, como etapa inicial do projeto maior, é de validar as previsões teóricas e motivar o investimento mais ambicioso numa etapa futura.

O motor linear possui um funcionamento muito mais simples que uma máquina convencional. O simples fato de dispensar um criostato com circulação fechada de fluido refrigerante, giratório e submetido a alto torque, já facilita muito a operação. Além disso, as bobinas de fitas 2G podem ser acessadas a qualquer instante, visto que não estão enclausuradas dentro de um criostato rotórico, facilitando a instrumentação durante os ensaios além de permitir facilmente qualquer modificação do projeto.

4.2. Bobinas do Enrolamento de Campo

Neste motor linear o secundário longo tipo gaiola foi substituído por um par de bobinas trafegantes de Fitas 2G do tipo *single pancake racetracks*, transformando-o em um síncrono de armadura longa. Diferente do observado na literatura para máquinas supercondutoras com estator de núcleo ferromagnético, nesse projeto optou-se por um enrolamento de campo sem núcleo, embora os campos magnéticos ainda não sejam suficientemente intensos para saturá-los. Essa abordagem pode ser justificada por dois aspectos: primeiro, o objetivo geral a longo prazo é o projeto e construção de máquinas supercondutoras sem núcleo ferromagnético, uma das grandes vantagens desta tecnologia; segundo, os modelos de simulação feitos para esse motor linear (os quais os ensaios práticos aqui visam a validar) já previam esse tipo de combinação [68].

Há uma grande problemática em torno da construção de bobinas de fitas supercondutoras graças a sua alta sensibilidade a qualquer tipo de estresse mecânico. Diversas menções na bibliografia salientam esse detalhe como uma das principais dificuldades na construção máquinas supercondutoras sem núcleo, com relação ao fato de as bobinas estarem submetidas a toda a força eletromagnética desenvolvida. Nesses casos a maioria delas era de Fitas 1G (de BSCCO), e naquela época, as Fitas 2G estavam entrando no mercado trazendo a esperança de serem mais resistentes e apropriadas a essas aplicações. Mesmo assim, elas possuem bem mais restrições que um fio de cobre convencional, e requerem um manuseio todo especial para evitar seu desgaste e, principalmente, fraturas na camada micrométrica de YBCO. Para isso, foi construída uma mesa bobinadeira adequada.

Os carretéis das bobinas também passaram por uma série de ajustes até chegarem à versão final, sendo o projeto dos terminais o grande complicador. Eles devem garantir um bom contato elétrico por pressão sem submeter as fitas a esforços mecânicos. A hipótese de soldagem foi descartada, pois isto ainda é um objeto de estudo muito recente, e as técnicas de soldagem e emendas em Fita 2G ainda estão em maturação [69]. A cada etapa, os testes da mesa e dos carretéis foram feitos usando fitas de cobre com as mesmas dimensões que a Fita 2G. Apesar de serem um pouco mais maleáveis, visto que não possuem a camada interna de aço, elas dão uma noção bem próxima do comportamento esperado. Sendo o custo da fita de cobre muito inferior à supercondutora, teve-se tranquilidade para fazer os testes preliminares sem risco de comprometer o material mais caro.

4.3. Caracterização das Bobinas de Fitas 2G

O levantamento de Curvas $V \times I$ permite que se tenha conhecimento das restrições operacionais das bobinas supercondutoras. Conforme descrito anteriormente, o parâmetro crítico J_c depende não apenas da temperatura, como também do campo magnético incidente e, tratando-se de bobinas, o próprio campo induzido (auto-campo) já se torna significativo na determinação desse limite. Portanto, é essencial para este trabalho o conhecimento das Curvas $V \times I$ dessas bobinas, para que elas possam ser acionadas sem risco de se exceder o J_c e causar uma catástrofe.

A característica principal da Curva $V \times I$ de supercondutores é a mudança de um comportamento sem resistência (tensão nula em corrente contínua) para uma rápida ascensão da tensão com o aumento da corrente, marcando a transição do estado

supercondutor para o normal pela violação do J_c , quando o campo elétrico atinge o valor de cerca de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$.

4.4. Mapeamento de Campo Magnético

O mapeamento da bobina permite que se tenha conhecimento da magnitude do campo magnético que ela é capaz de induzir e de sua distribuição no espaço, em especial na região das espiras da bobina. Uma vez que o J_c depende do campo magnético incidente, torna-se importante saber da melhor forma possível sua distribuição em torno das espiras supercondutoras. Para essa tarefa, o laboratório possui um sistema automatizado, amplamente utilizado em trabalhos de mancais magnéticos e supercondutores, permitindo também o mapeamento de ímãs de geometrias não triviais [62] [63] e medição de campos magnéticos aprisionados em supercondutores [71].

4.5. Ensaio de Tração

Uma forma de se avaliar o desempenho de um motor linear é através do conhecimento da sua força de tração, proporcional à interação dos campos magnéticos da armadura e do enrolamento de campo. Tratando-se de um motor síncrono, essa força só será constante com o secundário movimentando-se à mesma velocidade do campo magnético que trafega longitudinalmente.

Esse campo trafegante advém da alimentação trifásica equilibrada na armadura. No motor em questão, para a frequência da rede (60 Hz) a velocidade síncrona seria de $9,94 \text{ m/s}$ ($V_{\text{sinc}} = \text{frequência} \times \text{passo polar}$). Considerando que o motor possui somente $1,10 \text{ m}$, um ensaio ao mesmo tempo simples e confiável seria inviável. A construção de um complexo sistema eletromecânico para mover o secundário à velocidade síncrona e a dependência de um inversor para controlar essa velocidade representariam um custo altíssimo de tempo e recursos.

Para contornar esse inconveniente, a estratégia desenvolvida é a de ensaios estáticos de força de tração em função da posição. A ideia é similar a, numa máquina síncrona cilíndrica convencional, um ensaio com o rotor travado, em que o torque varia senoidalmente no tempo conforme o campo girante do estator força o rotor fixo à posição de equilíbrio. Nesse caso é feito o simétrico: o enrolamento de campo é mantido livre e movimentado sobre o campo magnético da armadura que está travado no tempo. Estes enrolamentos são alimentados com corrente contínua, sendo a soma das correntes nas três fases igual a zero e respeitados os valores correspondentes às

formas de onda senoidais defasadas de 120° do trifásico, conforme exemplificado pela Figura 17 e pela Tabela 7 para um semi-ciclo.

Emula-se assim um instante de tempo fixo, como se a armadura estivesse ligada na rede, e mede-se a força ponto a ponto ao longo de um passo polar para aquela alimentação. Explorando-se diversas possibilidades de alimentação, é possível fazer um levantamento de força em função da posição para quaisquer pontos de operação do motor.

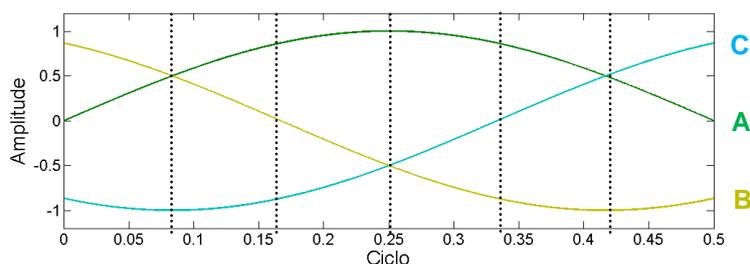


Figura 17 – Exemplos de seleção de instantes para ensaios estáticos para um semi-ciclo.

Tabela 7 – Exemplos de seleção de instantes para ensaios estáticos para um semi-ciclo.

Ciclo	Fase	Amplitudes		
		A	B	C
0,00	0°	0,00	0,86	- 0,86
0,08	30°	0,50	- 1,00	0,50
0,17	60°	0,86	0,00	- 0,86
0,25	90°	1,00	- 0,50	- 0,50
0,33	120°	0,86	- 0,86	0,00
0,42	150°	0,50	0,50	- 1,00
0,50	180°	0,00	- 0,86	0,86

Já ciente desta problemática envolvendo a viabilização dos ensaios práticos, as próprias simulações por MEF deste motor linear já foram feitas nestes moldes [68], com imposição de corrente contínua na armadura e medição de força em função da posição com pequenos deslocamentos do enrolamento de campo.

4.6. Acionamento do Motor Linear

Embora, por um lado, a solução de ensaios estáticos de Força \times Posição melhore muito a viabilidade das medições, por outro torna o acionamento dependente de três fontes de corrente contínua de alta potência (em torno de até 1,7 kW por fase). Considerando o alto custo de fontes controladas comerciais desse nível de potência, optou-se por construir um sistema retificador no próprio laboratório.

A ideia do sistema é um conjunto, para cada fase, de: um transformador abaixador, um retificador monofásico de onda completa e um banco de capacitores. O controle individual das correntes será feito através de um autotransformador (variac) monofásico antes de cada transformador. A Figura 18 ilustra esse esquema.

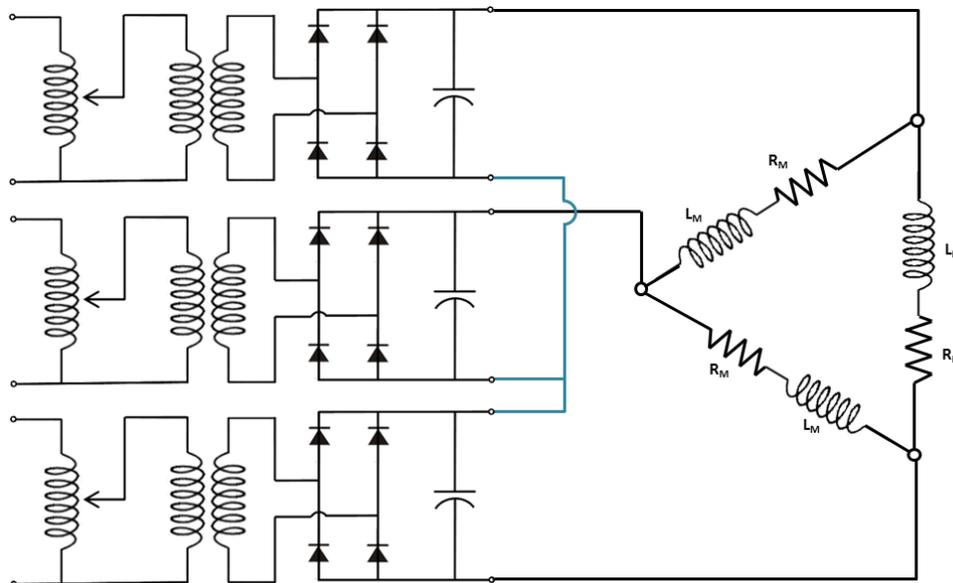


Figura 18 - Esquema do retificador monofásico triplo ligado ao motor em YΔ.

4.7. Veículo das Bobinas de Campo

Para fazer os testes de tração com o enrolamento de campo de bobinas supercondutoras é necessário que haja um recipiente para acomodar as bobinas imersas em nitrogênio líquido e um transdutor de força. Esse conjunto deve se mover solidariamente e alinhado com a direção de tráfego do campo magnético. Para que haja um aproveitamento máximo da força de tração desenvolvida pelo motor, é fundamental que o conjunto se mova com o mínimo de perda por atrito possível.

4.8. Encadeamento das Etapas

Resumidamente, os equipamentos ancilares podem ser classificados em quatro etapas paralelas: fabricação dos carretéis, da bobinadeira, do veículo das bobinas de campo e acionamento do motor. Todas evoluem no tempo em etapas de projeto e implementação, em seguida seguem os resultados. A Figura 19 a seguir ilustra a distribuição desses segmentos e a interação entre eles. As interações entre as etapas são definidas por setas coloridas de acordo com a circunstância do seu resultado. Interações vermelhas representam ações críticas, com grande incerteza e chance de falha. As laranjas são relações decisivas nos projetos, para ajustes, melhoramentos e correções. As verdes representam atos que geram resultados definitivos. Vale ressaltar que os pontos realçados em azul são referentes aos equipamentos e sistemas que foram aproveitados de trabalhos paralelos a este para a obtenção dos resultados. Como as diferentes pesquisas deste laboratório são bastante integradas, esse aproveitamento não apenas ajuda a enriquecer este desenvolvimento, como também fornece dados adicionais interessantes para esses outros projetos, como [62], [63] e [64].

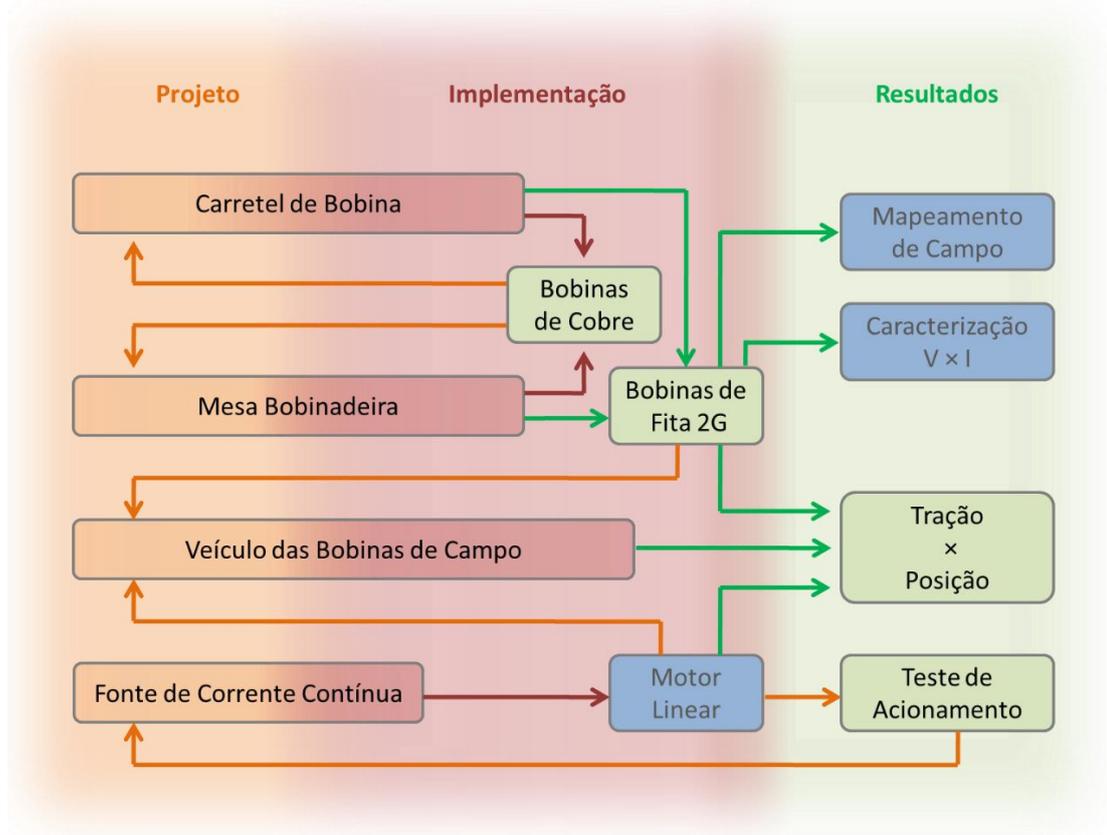


Figura 19 - Encadeamento das diferentes etapas do trabalho.

5. Equipamentos

Neste capítulo serão mostrados os detalhes dos equipamentos necessários para a realização dos objetivos traçados de acordo com a metodologia definida anteriormente. Há dois tipos de equipamentos: os que foram aproveitados de trabalhos anteriores e os que foram desenvolvidos especialmente para este. Ambos os grupos serão descritos a seguir.

5.1. Equipamentos de Trabalhos Anteriores

Neste tópico serão mostrados os equipamentos aproveitados de trabalhos anteriores paralelos a este. Embora eles não tenham sido desenvolvidos especialmente para este trabalho, a integração entre os diferentes projetos do laboratório exigiu que eles fossem construídos anteriormente para o mesmo tipo de resultado que os desejados neste trabalho. Eles são o Sistema de Caracterização e o Sistema de Mapeamento de Campo. O Motor Linear foi aproveitado temporariamente do projeto Maglev Cobra [65] pelos motivos assinalados no capítulo anterior.

5.1.1. Motor Linear

Para este trabalho, escolheu-se usar o primário do motor linear de indução, modelo EALP 100/6 desenvolvido pela *Equacional* em 2009 [66], como a armadura planificada. Originalmente era um motor linear de indução de primário curto, mas foi adaptado para operar como motor linear síncrono de armadura longa, com as bobinas supercondutoras do enrolamento de campo movendo-se sobre ele.

Ele possui passo polar de 165,6 mm e um comprimento útil de 190 mm. Os enrolamentos são de 6 polos por fase, com três bobinas por polo, totalizando 18 bobinas por fase, ligadas em série, com uma resistência de 0,567 Ω /fase [66]. A Figura 20 mostra um corte transversal do primário, com destaque na disposição dos enrolamentos da armadura separados por fase e a Figura 21 mostra uma vista da parte superior dos enrolamentos.

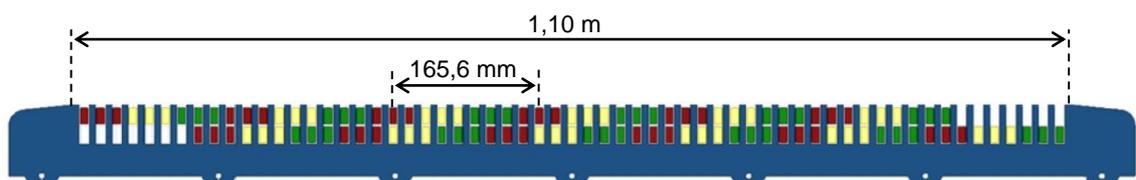


Figura 20 - Corte transversal da armadura com os enrolamentos de armadura em destaque.

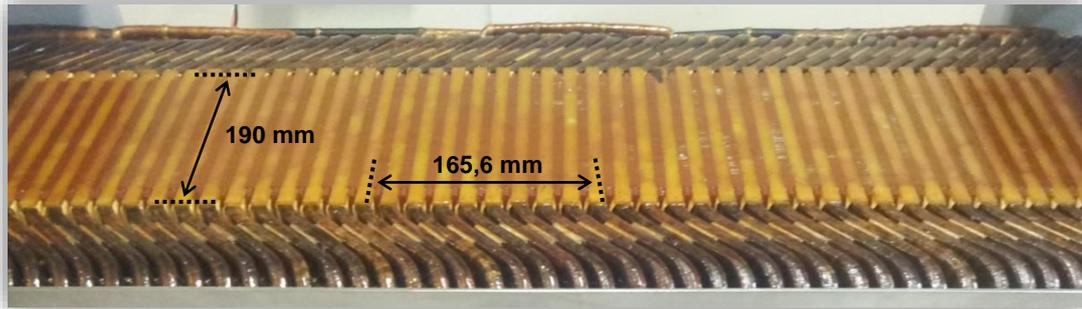


Figura 21 - Vista da parte superior da armadura.

O levantamento da indutância dos enrolamentos foi feita em um trabalho anterior de simulações por MEF do motor linear [67]. Os enrolamentos foram alimentados com a tensão nominal de 242 V a 25 Hz. A corrente calculada pela simulação foi de 2,93 A, defasada de 88,7° em relação à tensão. Esses dados são usados para calcular o valor da impedância das bobinas. Sabendo-se o valor da resistência por fase, aplicam-se os dados à Lei de Ohm (16) tendo como incógnita o valor da indutância própria por fase:

$$\hat{V} = (R + j\omega L_M)\hat{I} \quad (16)$$

$$\left. \begin{array}{l} \hat{V} = 242 \angle 0^\circ \text{ V} \\ \hat{I} = 2,93 \angle 88,7^\circ \text{ A} \\ \omega = 157 \text{ rad/s} \\ R = 0,567 \Omega \end{array} \right\} L_M \approx 0,5 \text{ H} \quad [67]$$

5.1.2. Sistema de Caracterização de Fitas 2G

Para o levantamento de Curvas $V \times I$ das bobinas, foi usado o sistema de caracterização de amostras de Fitas 2G do Lasup. Ele foi desenvolvido e construído em 2011 por F. Sass [14] e já foi utilizado em trabalhos anteriores para caracterizar amostras de comprimentos da ordem de dezenas de milímetros, com e sem a presença de campos magnéticos [14] [64] [69]. Ele consiste basicamente de medidas de quatro pontas colineares em que os terminais externos são ligados a uma fonte de corrente contínua com capacidade de 220 A e 8 V e os terminais internos são ligados a um nanovoltímetro. O controle dos equipamentos e a interface com o usuário são feitos por um programa em *Labview* que coordena a emissão de pulsos de corrente e a aquisição dos valores de tensão na amostra.

5.1.3. Sistema de Mapeamento de Campo Magnético

Para essa tarefa, o laboratório possui um sistema automatizado, desenvolvido e construído em 2011 por R. Fernandes [71], composto de três fusos motorizados, perpendiculares entre si, que movem uma ponteira com um sensor de efeito *Hall*. Esta ponteira também foi construída no próprio laboratório, tendo capacidade de medir a componente B_z do campo, normal à superfície da bancada. Um programa em *Labview* faz a interface gráfica, coordena a movimentação dos três eixos e faz a aquisição dos sinais advindos da ponteira ponto a ponto, gerando no fim um mapa com os valores de campo magnético na área rastreada. Esse sistema é amplamente utilizado em trabalhos de mancais magnéticos e supercondutores, pois permite também o mapeamento de ímãs de geometrias não triviais [62] [63] e medição de campos magnéticos aprisionados em supercondutores [71].

5.2. Equipamentos Desenvolvidos para este Trabalho

Aqui serão mostrados os equipamentos ancilares que foram desenvolvidos integral e especialmente para a obtenção dos resultados deste trabalho. No capítulo anterior, eles foram definidos como as quatro etapas iniciais paralelas: Mesa Bobinadeira, Projeto dos Carreteis, Fonte Retificadora e Veículo das Bobinas de Campo. O progresso do desenvolvimento desses equipamentos, com os parâmetros de projeto em detalhes, será descrito a seguir.

5.2.1. Mesa Bobinadeira

As primeiras tentativas de construção de bobinas de Fitas 2G no *Lasup* foram feitas por F. Sass para estudos de mancais magnéticos supercondutores [13] e serviram de referência para o desenvolvimento das utilizadas neste projeto. Neste trabalho anterior, optou-se por construir bobinas circulares do tipo *double pancakes*, em que os dois terminais ficam facilmente acessíveis, um na última espira de cada camada, conforme mostrado na Figura 22.

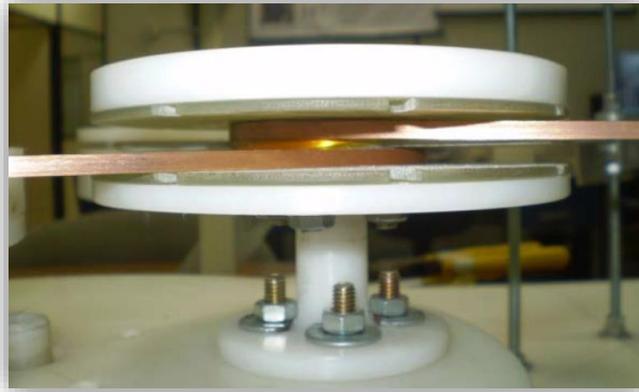
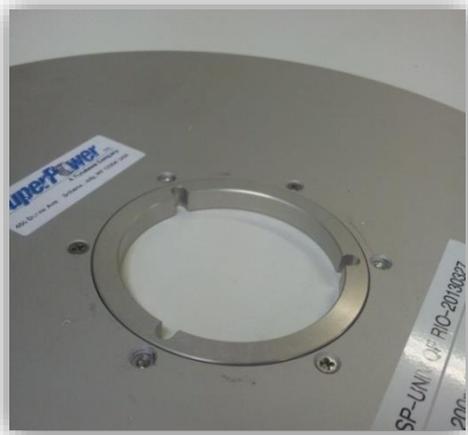


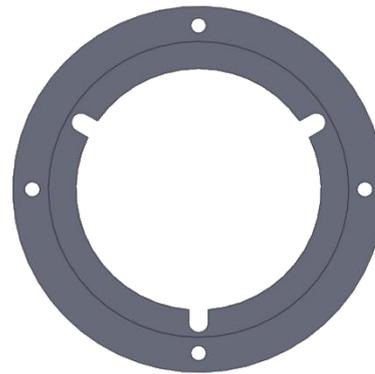
Figura 22–Fabricação da bobina do tipo *double pancake* [13].

O sistema para enrolar essas bobinas é muito mais complexo do que o necessário para as *single pancake racetracks* utilizadas nesse trabalho, mas muitas das peças de Teflon foram aproveitadas para a construção do novo sistema. Ele é composto, basicamente, por três volantes com rolamentos e um grupo de polias e canaletas por onde correm as fitas.

O primeiro volante é para o carretel matriz de fita. Ele foi aproveitado do projeto original [13] e adaptado para encaixar com o padrão do miolo dos carretéis em que a *Superpower* acondiciona a Fita 2G para transporte. Dessa forma, qualquer carretel de fita pode ser acoplado neste volante. Este padrão foi replicado para a fabricação dos carretéis de fita de cobre, que também se acoplam nesse mesmo eixo. A Figura 23 mostra (a) o carretel da *Superpower*, com o miolo padronizado em destaque, (b) o projeto do miolo replicado para os carretéis de cobre, (c) o volante de carretel matriz adaptado ao padrão e (d) o carretel de Fita 2G em posição para o processo de bobinagem.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 23 - Volante do carretel matriz de fita: (a) o carretel da *Superpower*, (b) o projeto do miolo replicado, (c) o volante de carretel matriz adaptado e (d) o carretel de Fita 2G em posição.

O segundo volante é para o carretel de fita isolante *Kapton* previamente cortada na largura de 4 mm. Esta só será utilizada para as bobinas de fita de cobre, visto que as Fitas 2G já vêm de fábrica revestidas com *Kapton* adesivo. Também é uma peça aproveitada e adaptada da bobinadeira original. A Figura 24 mostra o segundo volante com o carretel de *Kapton* em posição.

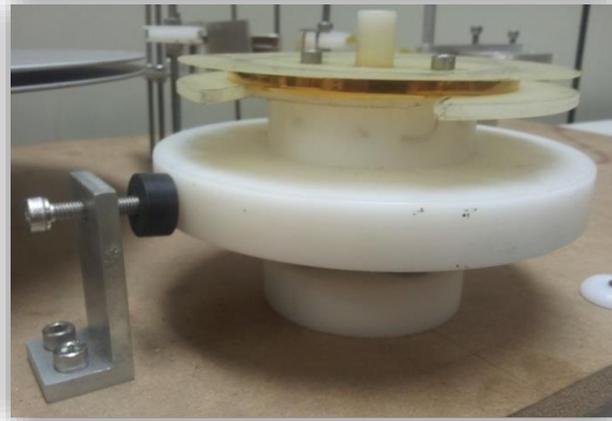


Figura 24 - Segundo volante com carretel de *Kapton* cortado em 4 mm.

O terceiro volante é para a bobina final. Nele são presos os carretéis em que as bobinas são enroladas. Por ser o elemento submetido ao maior esforço (o torque sobre ele traciona as fitas desde os carretéis primários), ele foi feito em um cilindro de alumínio. Dessa forma, os esforços não causam sua deformação, especialmente no acoplamento com o rolamento, como foi observado na bobinadeira original ao longo do tempo, que tinha essa peça em polietileno de alta densidade. Nesse volante também é acoplada uma manivela para acionar o sistema manualmente. A Figura 25 mostra o terceiro volante com uma bobina de cobre completa em posição.

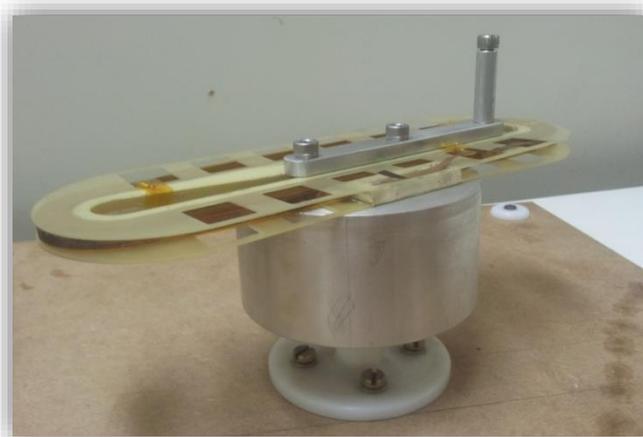


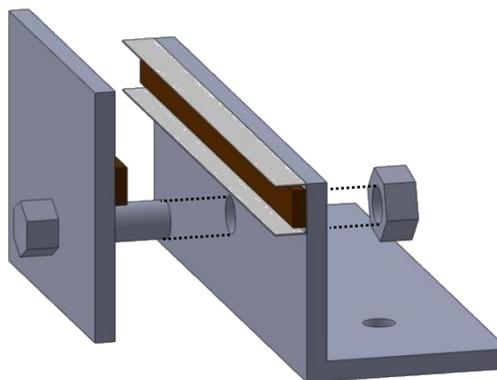
Figura 25- Terceiro volante com uma bobina completa.

No caminho da fita entre o primeiro e o terceiro volante, foi inserido um conjunto de três polias e duas canaletas. Ele tem duas funções: a primeira é a de guiar as fitas de um carretel ao outro sem que elas se torçam (uma consequência natural do ato de tracioná-las); a outra é distribuir a força de tração na fita ao longo do trajeto, ao invés

de concentrá-la totalmente no carretel matriz. Em cada canaleta, a fita corre por entre duas camadas de emborrachado sob uma pressão regulada manualmente nos parafusos de ajuste. A pressão das camadas de emborrachado se traduz em um atrito na fita, que resulta em um acréscimo considerável à força de tração final da fita na bobina. O conjunto de polias e canaletas é preso à mesa por fusos e porcas, o que permite regular a altura de cada elemento para que se ajustem às diferentes alturas de carretéis, mantendo o trajeto da fita sempre coplanar à bobina. A Figura 26 mostra (a) o conjunto de polias e canaletas na bobinadeira, e (b) o projeto da canaleta.



(a)



(b)

Figura 26 – Polias e canaletas da bobinadeira (a) e projeto da canaleta (b)

5.2.2. Projeto dos Carreteis

Para testar a bobinadeira e o projeto dos carreteis, foram usadas fitas de cobre com as mesmas dimensões das Fitas 2G (4 mm de largura por 0,1 mm de espessura) e fita de isolante Kapton. Dessa forma evitou-se o comprometimento do material muito mais caro, o que acabou se provando uma ótima ideia, visto que ao longo do projeto vários pequenos detalhes foram observados, justamente após a bobina estar pronta. No final, foram feitos três projetos diferentes de carretel de bobina até que finalmente fossem adequados às Fitas 2G.

Diferentemente das Fitas 2G compradas para esse projeto, as fitas de cobre não possuem camada isolante. Por esse motivo que a mesa bobinadeira possui um volante com carretel de fita de Kapton. Essas duas fitas são enroladas simultaneamente, gerando uma bobina com camadas de fita de cobre intercaladas com fita isolante.

Nesse ponto, um problema encontrado foi o fato de o fabricante de Kapton ser incapaz de produzir carretéis menores que 19 mm de largura. Para resolver esse problema, foi construída uma pequena mesa de corte para reduzir o isolante à largura certa. Essa mesa possui dois carretéis, um com a fita original, e outro para receber as duas fitas cortadas nos tamanhos desejados. Entre eles foi posicionado um bisturi descartável para fazer o corte, alinhado para cortar duas fitas, com 5 mm e 14 mm. Pelo fato de o bisturi ser uma lâmina bem fina e afiada para precisão cirúrgica, ela se mostrou uma escolha muito eficaz para fazer o corte. A Figura 27 mostra em (a) e (b) duas vistas da mesa de corte em funcionamento e (c) o seu projeto. Após o corte de uma quantidade suficiente de fita, os carretéis secundários são desmontados da estrutura, e o de 4 mm é posicionado no volante secundário da mesa bobinadeira.

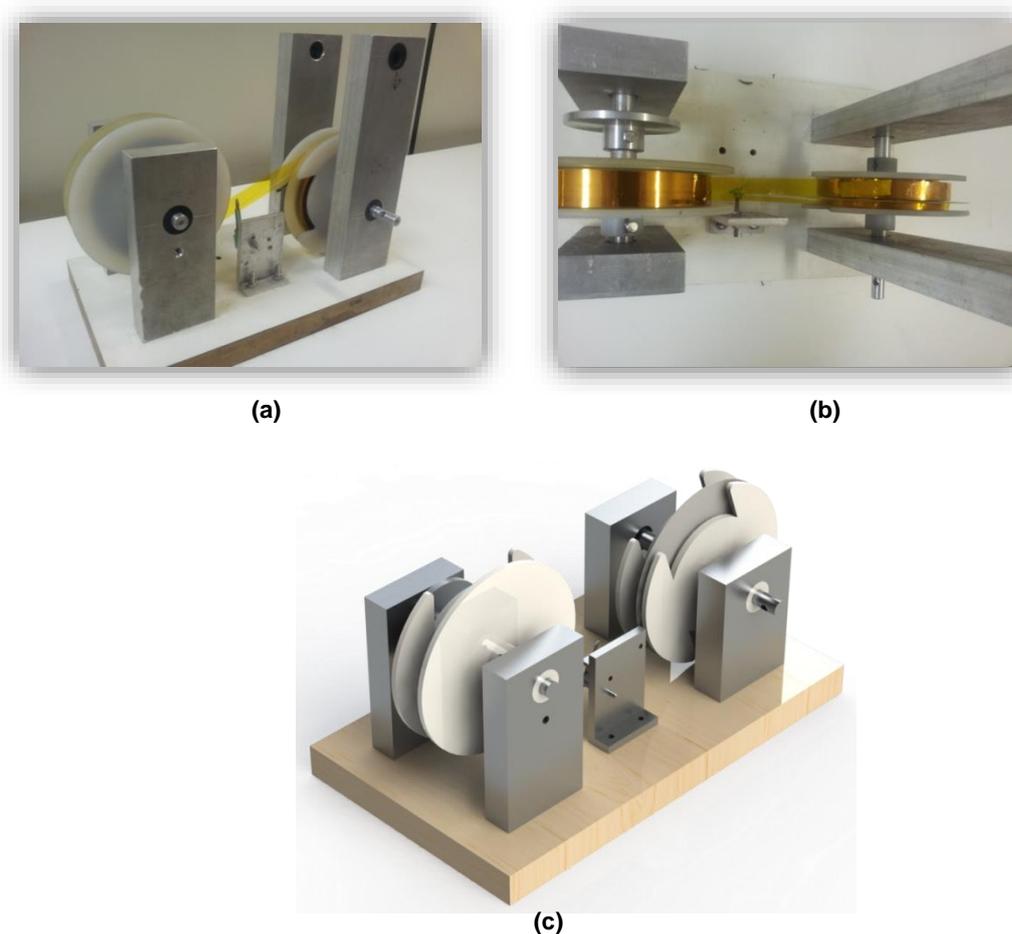


Figura 27 - Mesa cortadora de Kapton em vista lateral (a), superior (b) e no projeto (c)

Três projetos de bobinas foram feitos até se chegar ao considerado ideal para acomodar as Fitas 2G. A primeira versão foi a mais simples, consistindo em somente um eixo maciço com 5 mm de altura e duas chapas planas, no formato da bobina.

Numa das chapas havia um corte transversal no centro, para acessar o terminal interno de fita. A Figura 28 mostra o projeto dessa primeira versão.

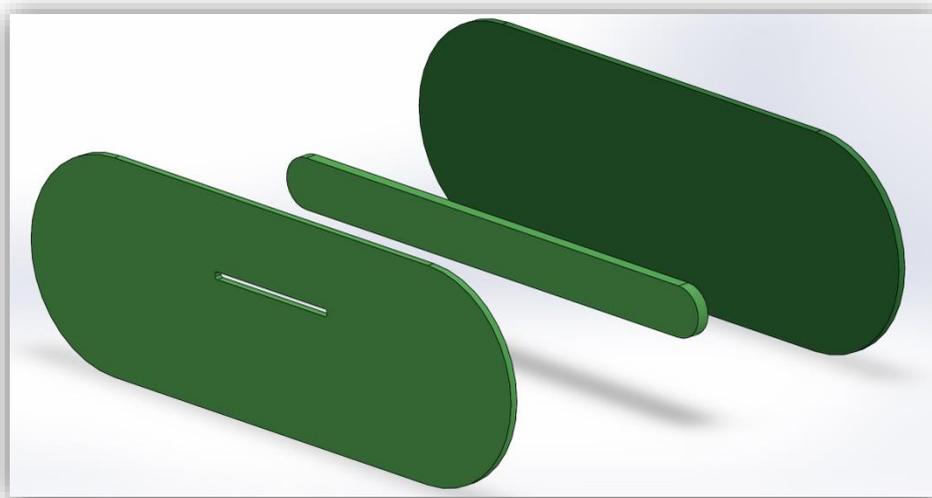


Figura 28 – Vista explodida da primeira versão da bobina.

A ideia desse projeto era que a ponta interna da fita saísse inclinada através do corte da chapa superior para ser fixada ao terminal de cobre fora da bobina, mas ela não funcionou como o esperado. Da forma como ela foi concebida, a fita acabava por ser submetida a muito esforço e sofrer deformação, sem contar que o carretel deveria ser montado e colado depois que a fita tivesse sido posicionada por dentro do corte, complicando muito o processo. Quanto ao terminal externo, a ideia era manter um comprimento de fita de cerca de 50 mm para fora da bobina e conectá-la a uma peça de cobre independente do corpo principal, mas essa ideia se mostrou ser muito pouco prática. O ideal seria que todo o conjunto se mantivesse fixo e coeso, sem qualquer risco da fita ser submetida a esforços. Além disso, observou-se que somente a última espira entraria em contato com o nitrogênio líquido, o que poderia causar problemas de resfriamento no supercondutor das camadas mais internas. Sendo assim, essa versão foi melhorada focando nesses aspectos.

Na segunda versão foram usadas chapas de G10 mais finas (0,5 mm). Além de facilitar o resfriamento das espiras, também ajuda a minimizar a altura entre as bobinas do enrolamento de campo e a armadura. Foram recortadas janelas nas chapas, de forma que o enrolamento entrasse em contato direto com o nitrogênio líquido, melhorando o resfriamento. A segunda versão é mostrada na Figura 29.

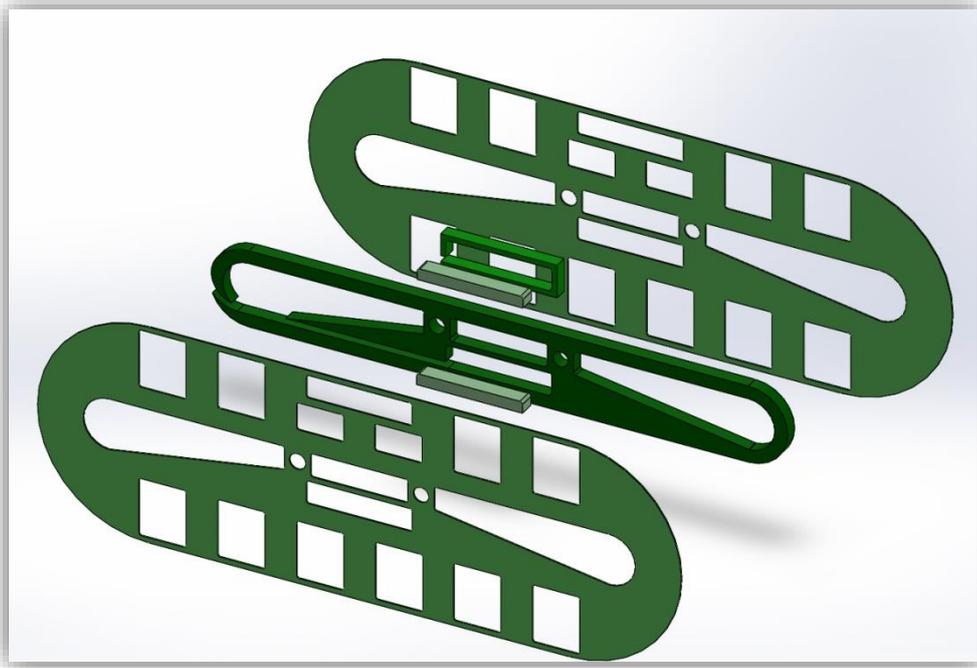


Figura 29 – Vista explodida da segunda versão da bobina.

O detalhe mais interessante desse projeto é o terminal interno. O miolo do carretel é vazado e possui um corte circular, excêntrico ao eixo da volta da bobina, com largura suficiente para a passagem da fita, conforme mostrado na Figura 30. Dessa forma, poderia se fazer o terminal interno independente do resto da bobina. A ideia para os terminais dessas bobinas era prender as peças de cobre às pontas das fitas sob pressão. Uma pequena peça de G10 entraria por último, após a fita estar posicionada, apertando o conjunto no seu lugar. Para o terminal externo, após a bobina ser enrolada, uma peça é colada na posição indicada na Figura 30, e a ponta da fita entraria pelo recorte e seria presa à peça de cobre sob pressão, da mesma forma que o terminal interno. A Figura 31 mostra a bobina completa.

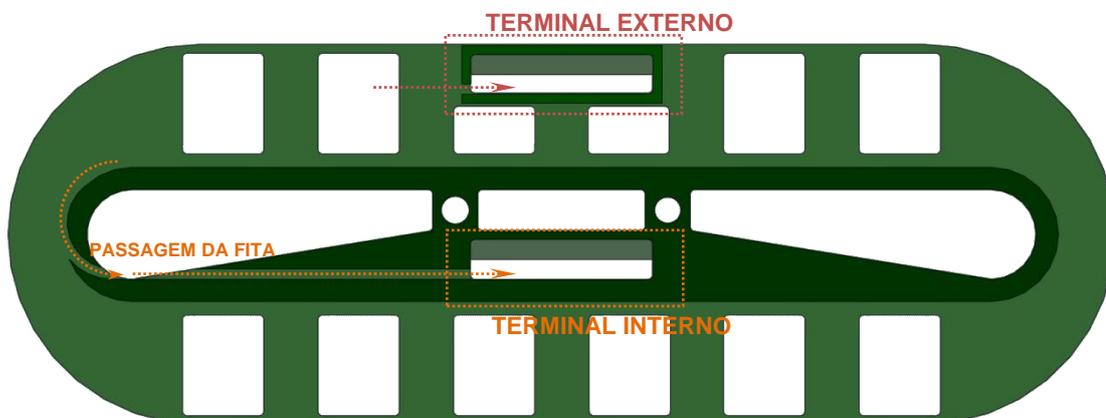


Figura 30 - Detalhe do corte no miolo para a passagem da fita e peça do terminal externo.

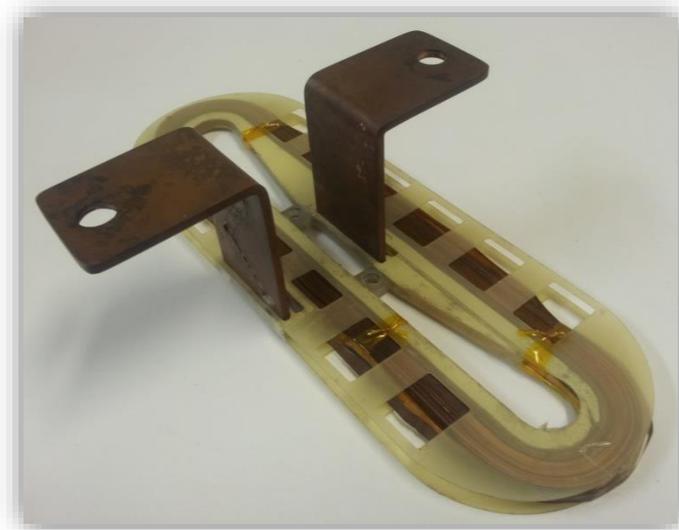


Figura 31 - Bobina de cobre feita com o segundo projeto.

Durante a montagem desse segundo projeto, pôde-se observar que os terminais mais uma vez não funcionaram tão bem quanto o esperado. O procedimento de forçar uma peça para pressionar o conjunto de fita e terminal de cobre é um tanto desajeitado e, por não se ter controle da pressão efetivamente aplicada, foram observadas avarias na fita de cobre. No caso de uma Fita 2G, isso poderia comprometer a bobina, e é motivo suficiente para repensar este detalhe no projeto. Outro detalhe observado é que as espiras da região de comprimento útil da bobina ficaram muito pouco tracionadas. Isso é um problema, pois as forças de Lorentz da interação com o campo induzido pela armadura causariam deformações que comprometeriam a segurança da bobina.

A terceira versão da bobina manteve o desenho básico da segunda, com o recorte no miolo para a passagem da espira mais interna. A chapa inferior foi mantida na espessura de 0,5 mm, mas sem as janelas, que já não faziam sentido, uma vez que ela fica totalmente em contato com o fundo do reservatório de nitrogênio. A chapa superior foi feita com espessura suficiente (3 mm) para que se pudesse abrir rosca para aparafusar os terminais de cobre diretamente nela, acabando com a necessidade de encaixes sob pressão. A Figura 32 mostra esse projeto.

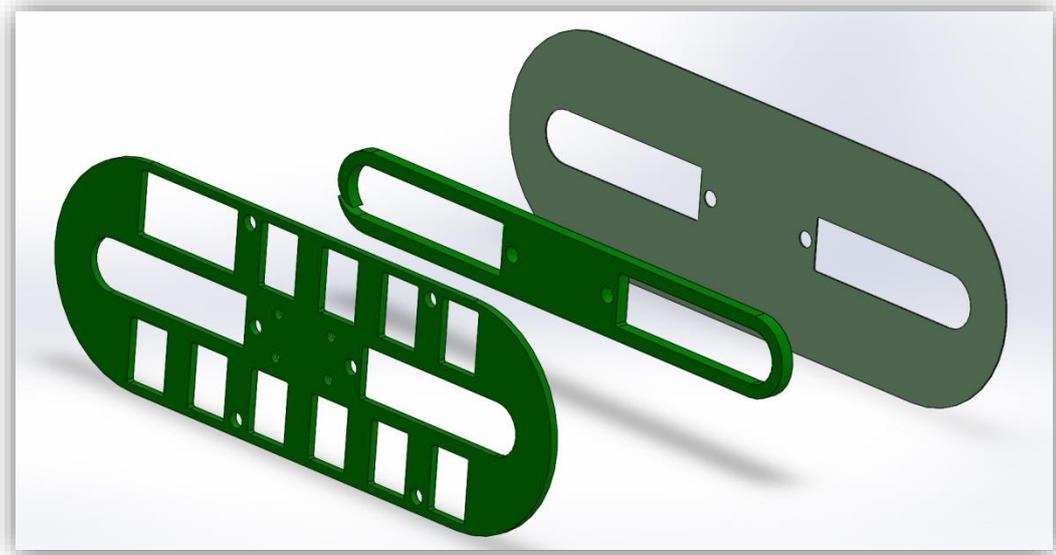


Figura 32 - Vista explodida da terceira versão da bobina.

A ideia nessa versão é que as fitas saiam inclinadas do plano da bobina (adaptado da primeira versão) e sejam fixadas aos terminais. Estes foram projetados com um sistema similar ao que já é usado na caracterização de amostras de Fitas 2G [18] [64] [69], e que apresentou um desempenho satisfatório com relação à baixa resistividade, robustez mecânica e simplicidade na montagem. A ponta da fita é pressionada a um barramento de cobre com uma lâmina de índio com 0,127 mm de espessura na interface entre eles. O índio é um condutor macio capaz de permear as imperfeições das duas superfícies quando o conjunto é pressionado, melhorando muito o contato elétrico. Foram feitos três tipos de terminais, mostrados na Figura 33: L-Simples (a), L-invertido, para facilitar o mapeamento de campo (b), e o Barramento Central para ligar duas bobinas em série (c).

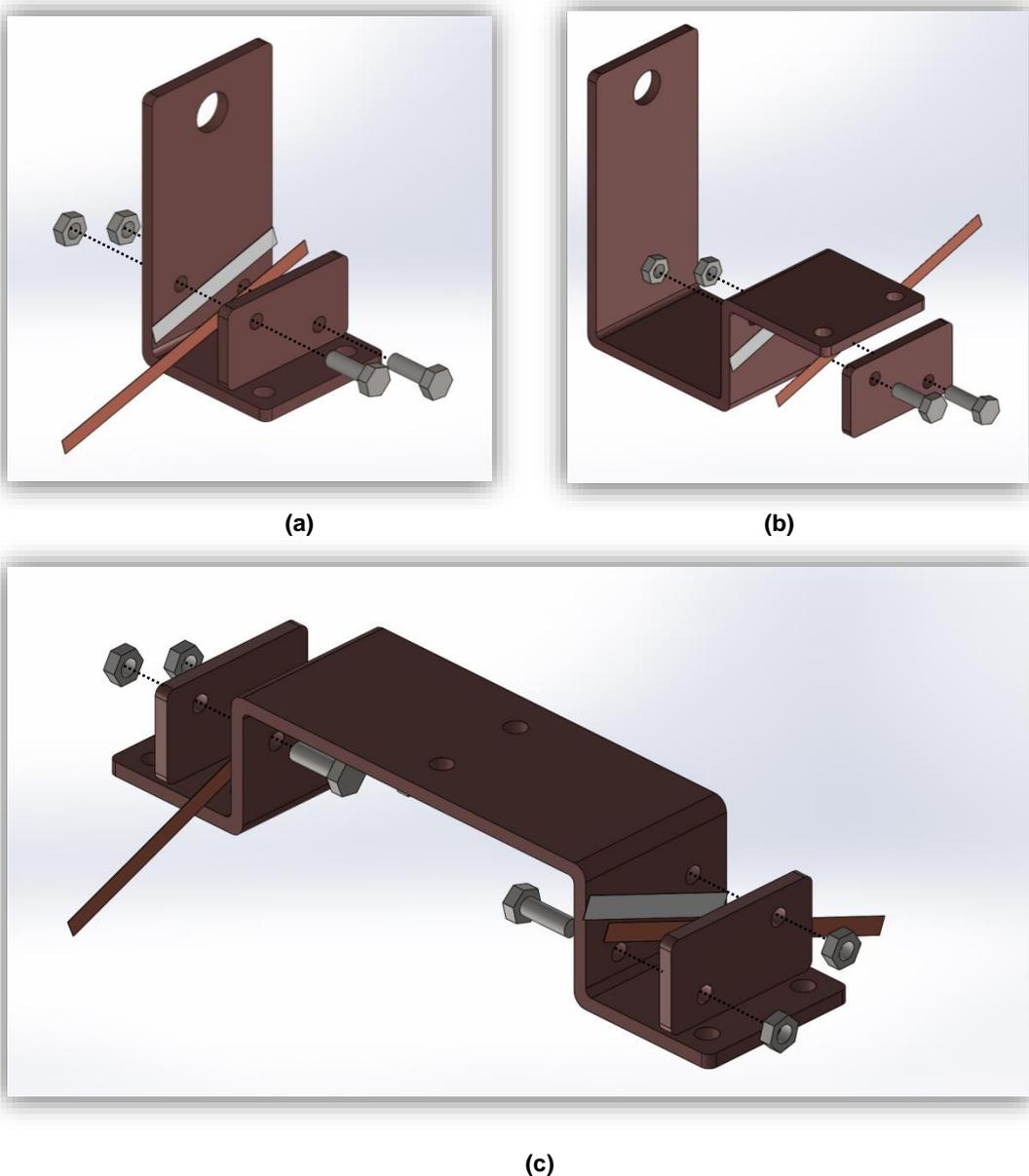


Figura 33 - Projeto dos três tipos de terminais de cobre usados nas bobinas:
Tipo L (a), tipo L-invertido (b) e Barramento Central (c)

5.2.3. Bobinas Supercondutoras

As Fitas 2G possuem estrutura composta por uma série de camadas sobrepostas, cada uma com uma função específica. A espessura final do conjunto é de cerca de 0,1 mm, sendo somente 1 μm composto de fato por material supercondutor. O modelo 2G HTS SCS4050-i-AP fabricado pela *Superpower* foi usado nesse trabalho. Um esquemático da sua estrutura é mostrado na Figura 34.

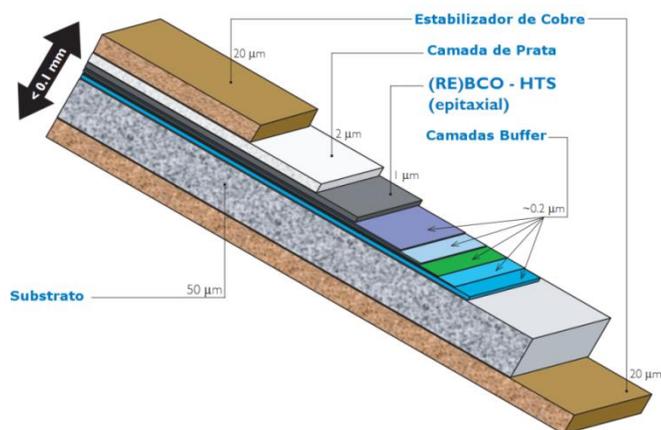


Figura 34 - Corte esquemático do modelo da Fita 2G utilizada nesse projeto [18].

Esta fita possui, além do supercondutor, um substrato de uma liga de aço não magnético (*Hasteloy*), que além de dar estabilidade mecânica, possui características químicas adequadas à deposição das camadas seguintes. Sobre o substrato, há uma série de camadas *buffer* para a orientação do crescimento do cristal supercondutor, depositado sobre elas. A camada de prata dá estabilidade térmica e elétrica, servindo como um caminho de fuga de corrente durante a transição entre os estados. A camada externa de cobre oferece mais uma proteção, além de melhorar a estabilidade mecânica e ajudar a dissipar mais rapidamente o calor durante transições. No final, esse modelo de fita ainda é envolto em uma camada de isolante elétrico *Kapton* adesivo, que o torna ideal para a construção de bobinas. A Figura 35 a seguir mostra um pequeno segmento de alguns centímetros da fita utilizada para construir as bobinas.



Figura 35 - Pequena amostra da Fita 2G utilizada.

Uma das primeiras coisas a serem feitas, em termos de projeto, é o cálculo de comprimento de fita utilizado em cada bobina. Para isso, um modelo matemático foi desenvolvido. As bobinas tipo *racetrack* podem ser modeladas em duas partes,

conforme mostrado na Figura 36: a primeira é referente ao comprimento útil, e nada mais é do que dois grupos iguais de segmentos paralelos; a segunda é referente às curvas, podendo ser modelada como uma Espiral de Arquimedes.

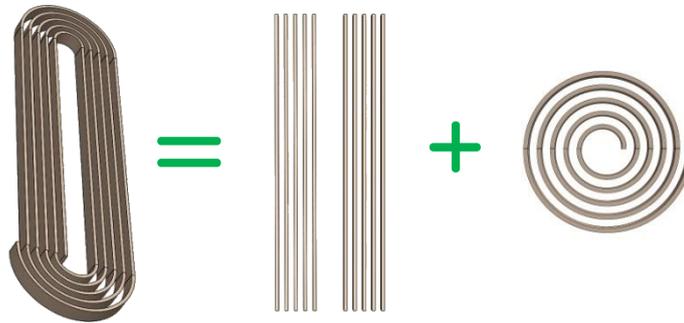


Figura 36 - Partes da bobina tipo *racetrack*.

A Espiral de Arquimedes pode ser escrita em coordenadas polares pela Equação (17), do raio (r) em função da posição angular (θ), em que R_0 corresponde ao raio interno, e a derivada corresponde à espessura da fita (b) por cada volta:

$$r(\theta) = R_0 + \frac{dr}{d\theta} \theta \quad \frac{dr}{d\theta} = \frac{b}{2\pi} \quad (17)$$

Logo, o comprimento de uma espiral deste tipo pode ser obtido pela integral do raio na posição angular para o número de espiras da bobina (N), conforme a Equação (18):

$$C_E = \int_0^{2N\pi} \left(R_0 + \frac{b}{2\pi} \theta \right) d\theta \quad \therefore \quad (18)$$

$$C_E = \pi N(2R_0 + Nb) \quad .$$

O comprimento útil total de fita pode ser calculado simplesmente pelo dobro do comprimento de cada haste paralela (H) multiplicado pelo número de espiras, conforme mostrado na Equação (19):

$$C_H = 2NH \quad (19)$$

Finalmente, o comprimento total de Fita 2G utilizado em cada bobina em função dos seus parâmetros construtivos pode ser escrito como a soma dessas duas parcelas na Equação (20):

$$C_{Total} = 2NH + \pi N(2R_0 + Nb) \quad (20)$$

Com isso é possível fazer uma previsão de gasto de material e adequar o projeto à disponibilidade de quatro segmentos de 50 m de Fita 2G. Esta terceira versão da bobina possui espaço para 50 a 60 espiras. Inserindo-se os parâmetros construtivos na Equação 14, é possível determinar o comprimento total de fita em função do número de espiras (que é de fato a variável de controle durante a sua construção na bobinadeira) conforme mostrado na Figura 37, para um intervalo de 0 a 100 espiras.

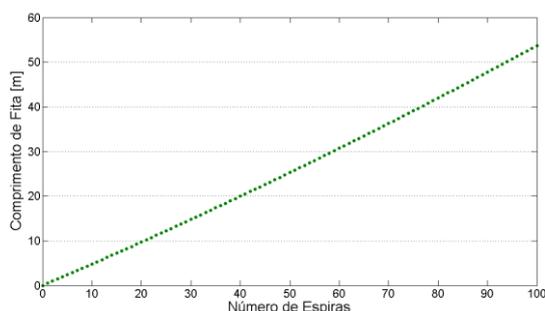


Figura 37 - Consumo de Fita em função do número de espiras para a Bobina 3

Para uma bobina com 55 espiras, os valores construtivos e o comprimento de Fita 2G são mostrados na Tabela 8. Com bobinas como esta, pode-se operar o motor com um par de polos no secundário (duas bobinas) e manter uma redundância em caso de algum imprevisto catastrófico.

Tabela 8- Parâmetros construtivos das bobinas de Fita 2G

Número de Espiras	N	55
Comprimento útil	H	190 mm
Raio Interno	R_0	15 mm
Espessura da espira	b	0,2 mm
Comprimento de Fita 2G	C_{Total}	28 m

Após a bobina ser enrolada, duas peças são fixadas ao longo do seu comprimento útil, pressionando as espiras contra o centro e mantendo-as firmes. Isso é importante para evitar que as espiras sofram flexão em função da interação dos campos magnéticos. Normalmente esse efeito é conseguido com a impregnação das bobinas em resina, mas tratando-se das condições não convencionais de operação (imersão em nitrogênio líquido), preferiu-se realizar um estudo mais aprofundado e o desenvolvimento de uma técnica apropriada para isso em um trabalho futuro.

As bobinas de Fitas 2G enroladas usando a bobinadeira na terceira versão do carretel são mostradas na Figura 38 a seguir, com dois terminais L-simples para caracterização (a) e com dois terminais L-invertido para o mapeamento do campo magnético na face inferior, que é mais fina e totalmente plana (b).



Figura 38 - Bobinas supercondutoras de Fitas 2G com terminais tipo L (a) e L-invertido (b)

5.2.4. Fonte Retificadora

A fonte foi montada em uma estante de armação de perfil de alumínio e três prateleiras de MDF, para cada um dos estágios: Primário, Transformador e Retificador. O dimensionamento dos equipamentos foi feito com base na corrente desejada. Segundo os dados do fabricante do motor, a resistência dos enrolamentos é de 0,567 Ω /fase e a corrente nominal é de 53 A [66].

O estágio Primário contém os equipamentos de controle. Nele ficam a chave geral (disjuntor DIN de 25 A), a chave dos transformadores (disjuntor DIN de 15 A) e os *variacs*. Estes últimos, fornecidos pela *Auje*, modelo M-2412, mostrado na

Figura 39, são projetados para 220/0-220 V ou 220/0-240 V, 12 A e 2880 kVA. As ligações entre estes equipamentos são feitas por cabos flexíveis de 4 mm².

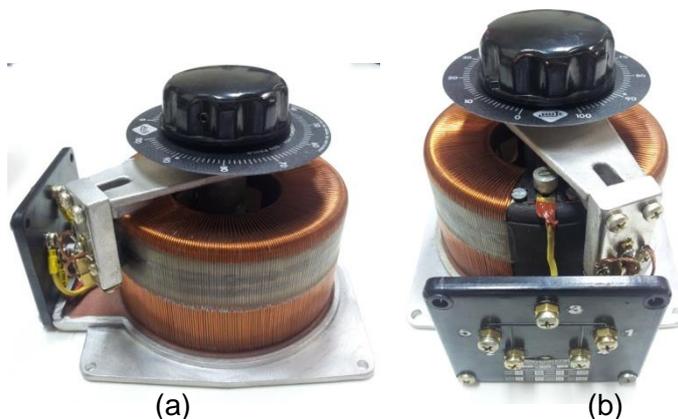


Figura 39 –Variac de 0-220 V, 12 A, vista lateral (a) e frontal (b).

O estágio seguinte possui três transformadores fornecidos pela *Powerbras*, mostrados na Figura 40, de 220/30 V. Esta tensão retificada é suficiente para alimentar a carga com margem razoável. A classe de potência escolhida foi de 6 kVA. O lado de alta dos transformadores é alimentado por cabos de 4 mm² e o lado de baixa com cabos de 35 mm², estando de acordo com a norma [70].

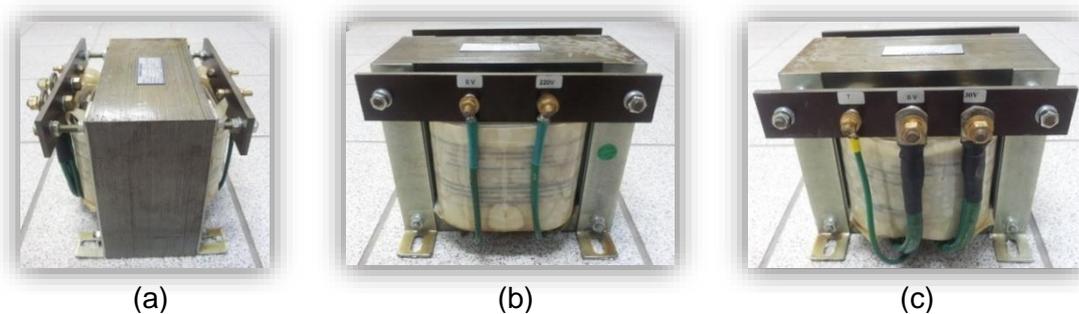


Figura 40 - Transformador de 220/30 V 6 kVA, vista lateral (a), lado de alta (b) e lado de baixa (c).

O último estágio é composto pelos retificadores, os capacitores e os fusíveis. Para as pontes retificadoras foram escolhidos três módulos VBO 125-12NO7, da *IXYS*, mostrado na Figura 41, cuja folha de dados está no Anexo. Ele é capaz de fornecer corrente contínua de até 124 A e capacidade de isolamento de 1200 V. O arrefecimento dos retificadores é feito por blocos de dissipadores *Fenite*, modelo FNT-014-AL, de 200 mm de comprimento cada, mostrado na Figura 42.



Figura 41 - Ponte retificadora monofásica VBO 125-12N07.

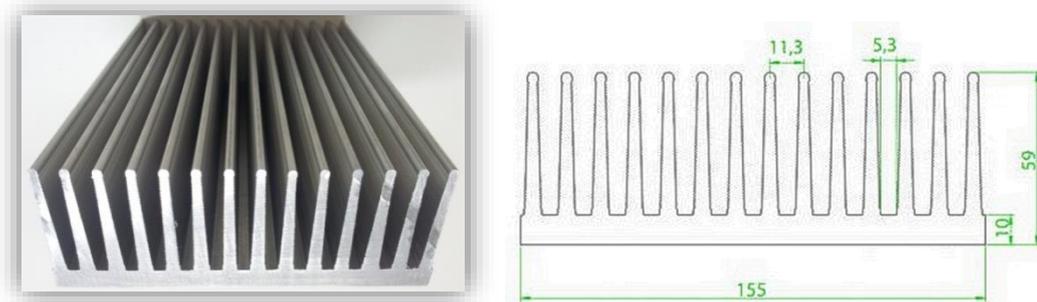


Figura 42 - Dissipador de alumínio modelo FNT-014-AL.

A verificação do projeto e o dimensionamento dos capacitores foram feitos com o auxílio de ferramentas de simulação. Para tal, foi necessário levantar a indutância dos transformadores para dar verossimilhança ao modelo. Eles foram considerados como fontes controladas de tensão seguidas por indutâncias (a indutância do transformador) e observou-se que, de fato, há mudança significativa nos resultados ao se considerar ou não esse elemento.

A indutância do transformador foi obtida via ensaio de curto-circuito do secundário. Foi considerada que a reatância de dispersão é muito maior que a resistência do enrolamento, sendo sua impedância puramente indutiva. Com o secundário curto-circuitado, o transformador foi ligado à rede através do variac e a tensão foi lentamente elevada até atingir o valor máximo de corrente de 12 A (embora o nominal do primário do transformador seja 27 A). Foram marcados 3 pontos que seguem linearmente, como previsto. Com a Lei de Ohm (16) calcula-se a impedância, considerando a resistência nula, e dela, a indutância, conforme a seguir (17):

$$\left. \begin{array}{l} 12 \text{ A } \quad 4 \text{ V} \\ 6 \text{ A } \quad 2 \text{ V} \\ 9 \text{ A } \quad 3 \text{ V} \end{array} \right\} V = X_T I \quad \begin{array}{l} X_T = j\omega L = 0,33 \, \Omega \\ L_T = 0,84 \text{ mH} . \end{array} \quad (17)$$

De posse desses dados o circuito completo foi simulado conforme esquematizado na Figura 43. O ajuste foi feito para o ponto de operação em que as correntes sejam: $I_{MC} = 52 \text{ A}$ e $I_{MA} = I_{MB} = -26 \text{ A}$. Este ponto foi escolhido por ser uma condição em que o sistema estaria submetido a um esforço máximo, com valor de pico na corrente de uma das fases do motor e metade dele nas outras, em sentido contrário. Nos cabos de fase (I_A , I_B ou I_C), haveria igualmente o máximo de corrente que poderia ser exigido deles. Por isso este é um bom ponto de operação para fazer o dimensionamento dos demais equipamentos.

Os diodos foram considerados não ideais, possuindo uma resistência de $1 \text{ m}\Omega$ com uma tensão de $0,8 \text{ V}$ em condução, e resistência infinita em bloqueio.

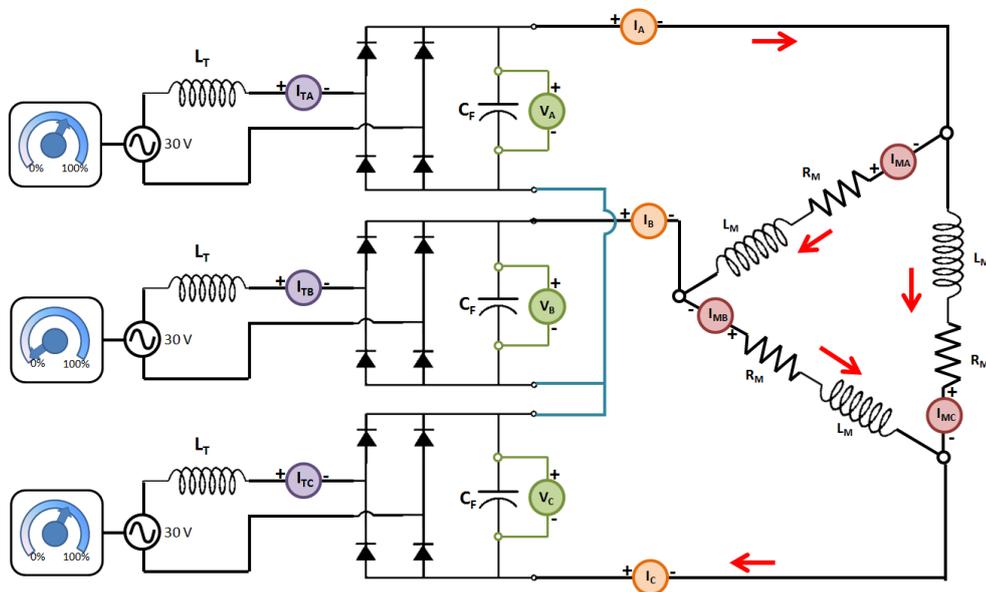


Figura 43 - Esquema da simulação da fonte retificadora com o motor ligado em triângulo.

A primeira observação a ser feita é sobre a ligação das fases do motor em triângulo. Com as fases ligadas em estrela, as simulações mostraram que desta forma não é possível alcançar a corrente nominal com até os 30 V fornecidos pela fonte (equivalente ao transformador abaixador). Por isso optou-se por religar em triângulo, diminuindo a impedância equivalente por fase da carga.

Um dos objetivos dessa simulação é encontrar um valor razoável para os capacitores de filtragem, C_F , e conseguir uma boa regulação de corrente. Para dimensionar os capacitores, a simulação foi feita primeiramente com a fonte a 100% da capacidade e sem os capacitores de filtro. A Figura 44 a seguir mostram que, nessas condições, o sistema é capaz de fornecer 68 A , um pouco mais do que a carga

programada de 52 A, com um *ripple* aceitável de 1,1 % em I_{MC} , sem capacitor algum. Isso, no entanto, significa operá-lo próximo ao seu máximo, com pouca margem de erro caso seja necessário suprir outras perdas não previstas neste modelo.

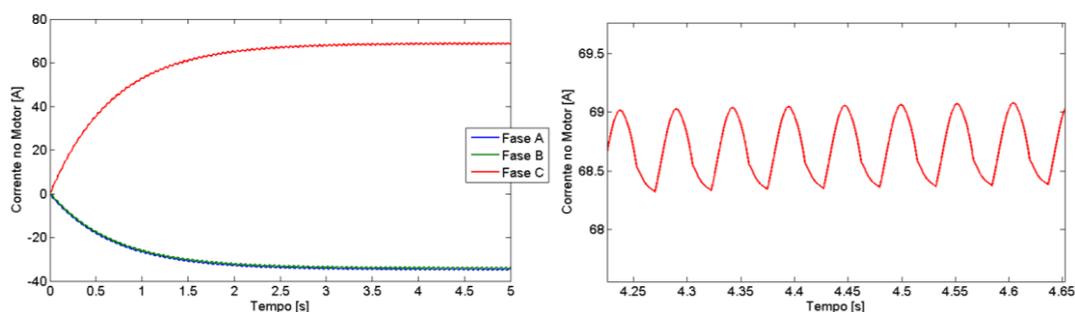


Figura 44 - Correntes no motor (I_{MA} , I_{MB} e I_{MC}) e *ripple* da corrente I_{MC} com fonte a 100% da capacidade, sem C_F .

A partir desse ponto, foram inseridos os capacitores C_F a fim de diminuir ainda mais o *ripple*, na medida do possível, e, principalmente, aumentar o nível médio da tensão na carga. Assim será possível acionar o motor sem utilizar próximo de 100% da capacidade da fonte, deixando uma margem de segurança. Para isso, conforme a capacitância foi aumentada, o ajuste da fonte foi diminuído, tentando manter sempre a corrente I_{MC} em torno dos 52 A com I_{MA} e I_{MB} em cerca de -26 A.

Foi observado que o efeito do capacitor só é significativo a partir da ordem de grandeza dos milifarads. Dentro dessa faixa, a capacitância foi ajustada para dentro de valores comerciais até finalmente ser estabelecida em 30mF. Neste valor, é possível fornecer os 52 A desejados com a fonte a 72% da capacidade, que é uma margem bem considerável. No entanto, não houve melhora no *ripple* da corrente. A Figura 45 mostra estes resultados encontrados.

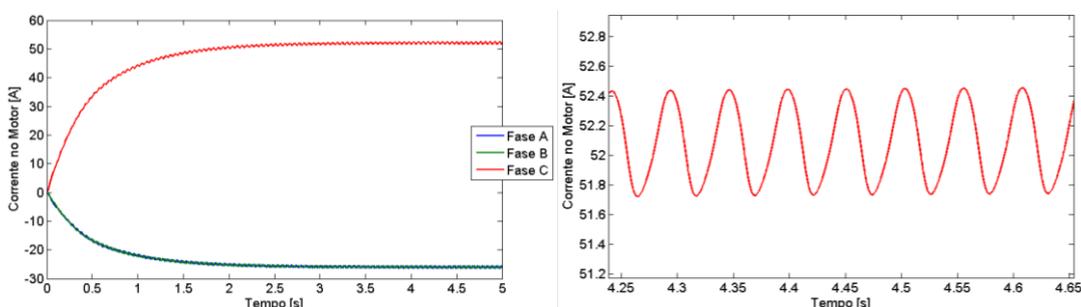


Figura 45 - Correntes no motor (I_{MA} , I_{MB} e I_{MC}) e *ripple* da corrente I_{MC} com fonte a 72% da capacidade e $C_F = 30\text{mF}$.

A proteção do terceiro estágio e do motor não pode ser feito por disjuntores, pois trata-se de corrente contínua. Para tal, foram utilizados 6 fusíveis automotivos de 100 A e 32 V nas saídas das pontes retificadoras. A Figura 48 a seguir mostra uma unidade dos fusíveis utilizados.



Figura 48- Fusível utilizado na proteção do terceiro estágio.

Para acondicionar e facilitar o transporte do sistema, uma pequena estante com rodas em perfis de alumínio e placas de MDF foi projetada e construída. Assim, é necessário somente levar o módulo e conectá-lo à tomada de força e ao motor em qualquer lugar apropriado. A seguir a Figura 49 ilustra o aspecto final da montagem.



Figura 49 – Montagem da fonte retificadora.

A instalação dos equipamentos foi feita pensando-se nos aspectos estruturais e operacionais: os transformadores, tendo um peso muito maior do que os demais equipamentos (120 kg), ficam na parte mais inferior; o estágio primário, por ter que ser operado constantemente, fica na parte mais superior; e os retificadores, capacitores e fusíveis ficam na parte central.

5.2.5. Veículo das Bobinas de Campo

Esta etapa do trabalho custou muito tempo e esforço pois demandou o projeto e fabricação de várias peças (e seus respectivos ajustes finos para a montagem ficar correta). No geral, pode-se dividi-la em quatro partes: estrutura principal, recipiente, guias lineares com suporte central e célula de carga. O arranjo final é mostrado a seguir na Figura 50, e em seguida, cada uma das partes é descrita brevemente de acordo com o procedimento de montagem do conjunto.

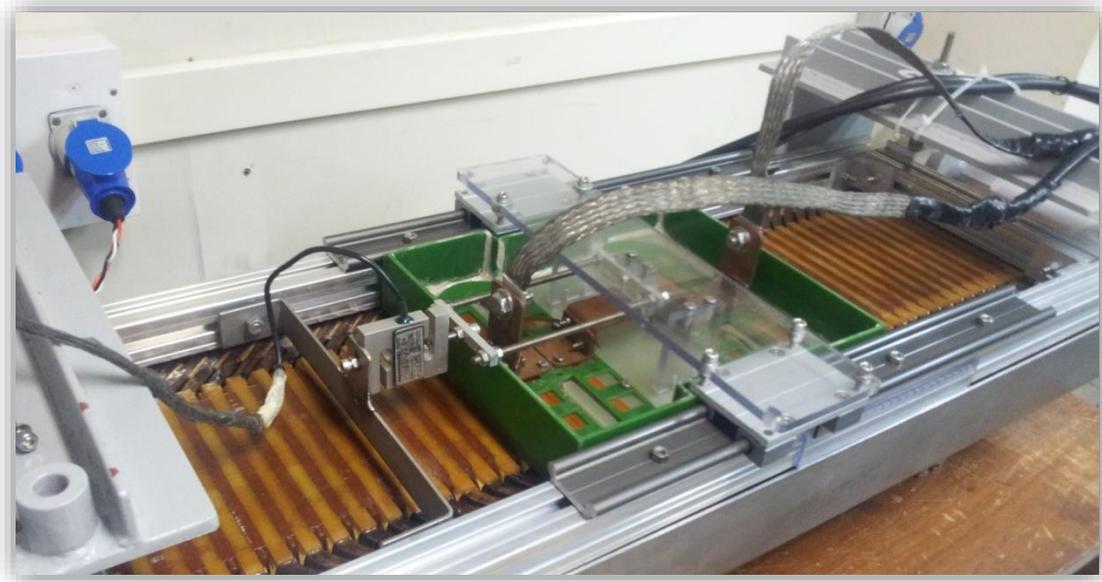
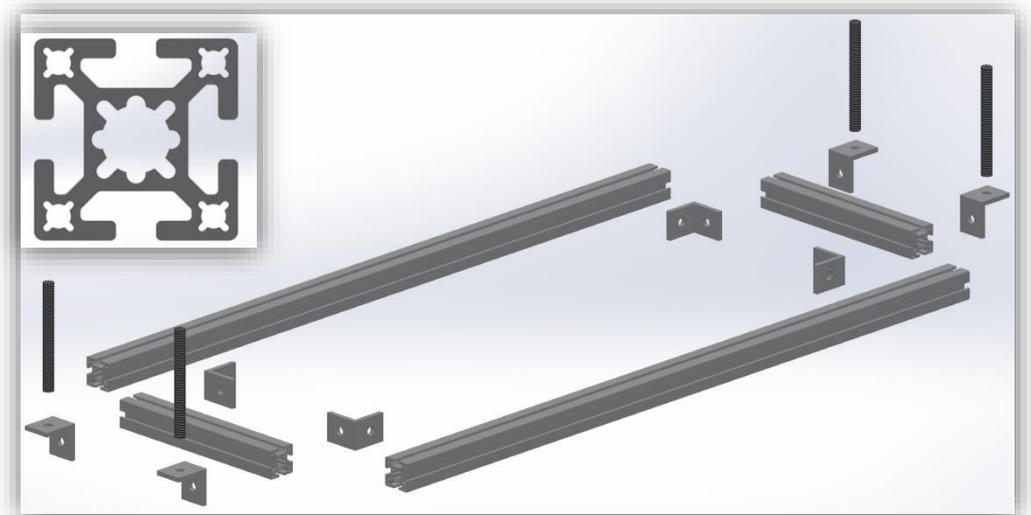
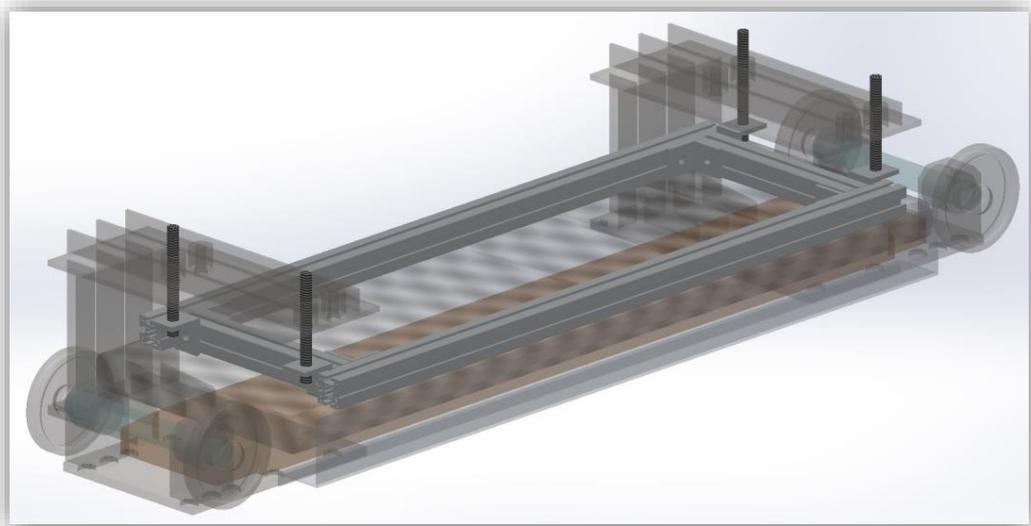


Figura 50 - Veículo do secundário.

A estrutura principal é composta por um arranjo de perfis e cantoneiras de alumínio presos à ferragem da armadura por barras roscadas. Sobre essa estrutura é que todo o conjunto se move. As peças que a compõe são montadas com alguns graus de liberdade, de forma a permitir um bom alinhamento entre as partes, que ajuda a garantir a suavidade do movimento. A Figura 51 mostra o perfil de alumínio usado, a vista explodida da estrutura (a) e a sua montagem sobre a ferragem da armadura do motor linear (b). Os parafusos, porcas e arruelas não são mostrados para facilitar o entendimento do esquema, mas seu uso está implícito.



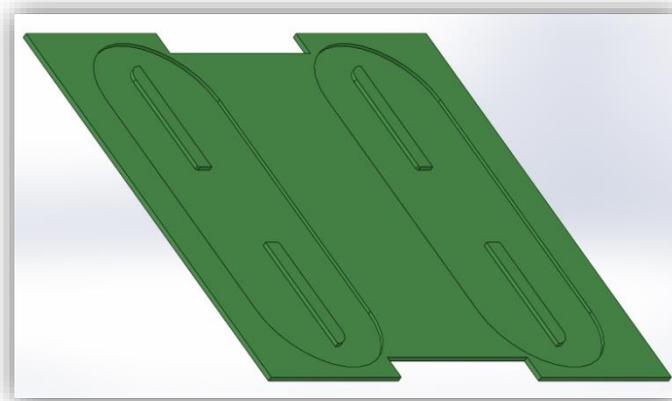
(a)



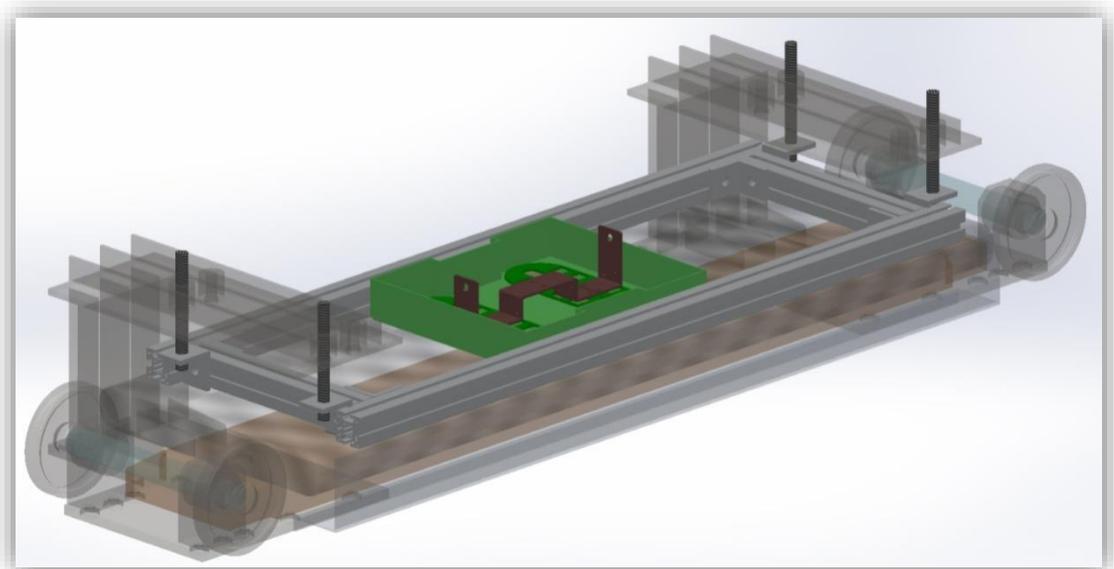
(b)

Figura 51 - Projeto com a vista explodida (a) e posicionamento da estrutura principal na ferragem da armadura (b).

O recipiente para conter as bobinas imersas em nitrogênio líquido é feito em polímero reforçado com fibra de vidro (G10). A face inferior sofreu fresagem para formar um encaixe em baixo relevo para o par de bobinas. Isso não apenas dá ao conjunto uma maior rigidez mecânica, como também diminui a altura entre as bobinas e a armadura. As faces foram coladas e, em seguida, as arestas internas foram todas revestidas com resina especial para baixa temperatura. O recipiente não apresentou nem deformação perceptível com nitrogênio líquido nem vazamento. A Figura 52 mostra o seu fundo, com destaque para o rebaixo das bobinas (a) e seu posicionamento no restante do sistema, já com as bobinas (b).



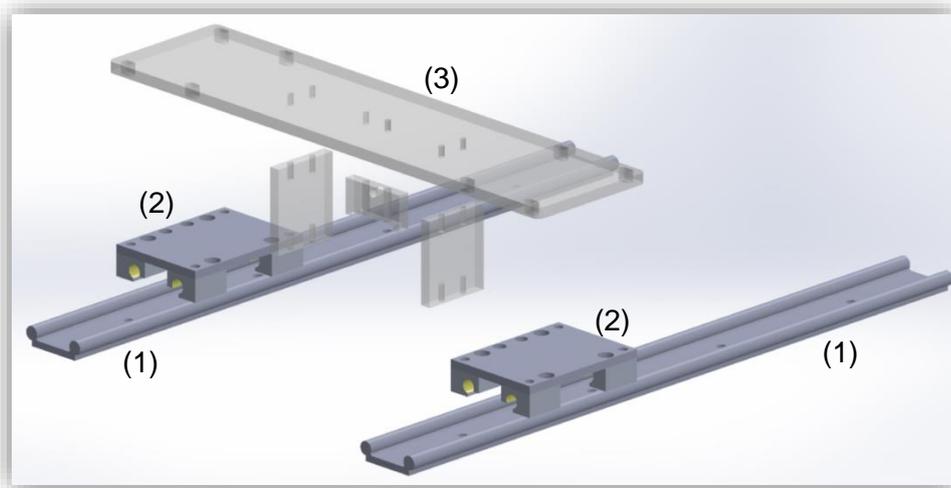
(a)



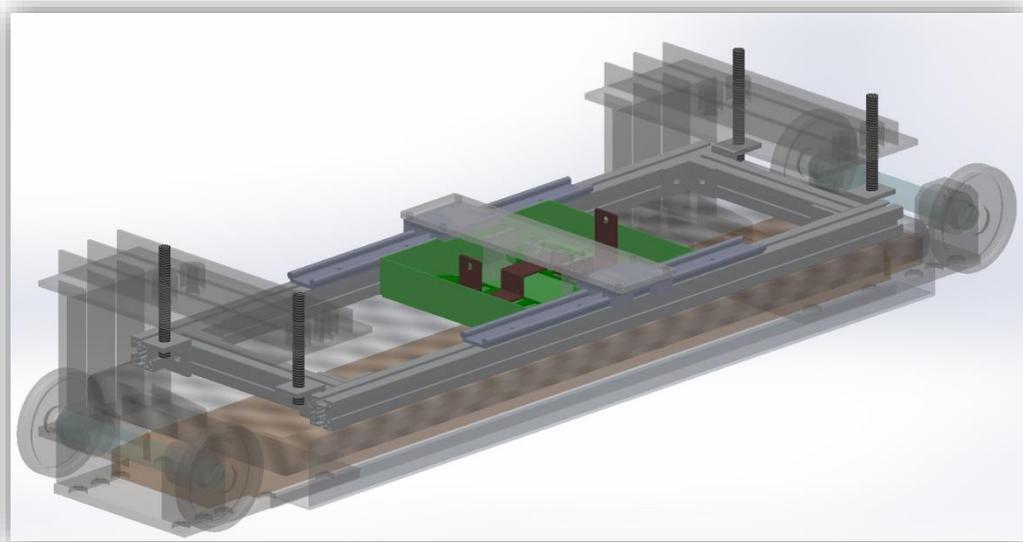
(b)

Figura 52 – Projeto do Recipiente, destacando o fundo com os rebaixos para encaixe das bobinas (a) e posicionamento no conjunto final (b)

As guias lineares movem o conjunto na direção do campo trafegante com pouco atrito. A Figura 53 (a) mostra a vista explodida das peças que formam este conjunto: As duas guias lineares (1), feitas de alumínio, são fixadas na estrutura principal, uma em cada lado. Sobre elas correm dois patins (2) também de alumínio e, preso a eles, o suporte central do recipiente (3), feito em policarbonato. Nessa etapa da montagem são feitos os ajustes de alinhamento e da altura do recipiente com relação à superfície da armadura. A Figura 53 (b) mostra o posicionamento desse conjunto no resto do sistema.



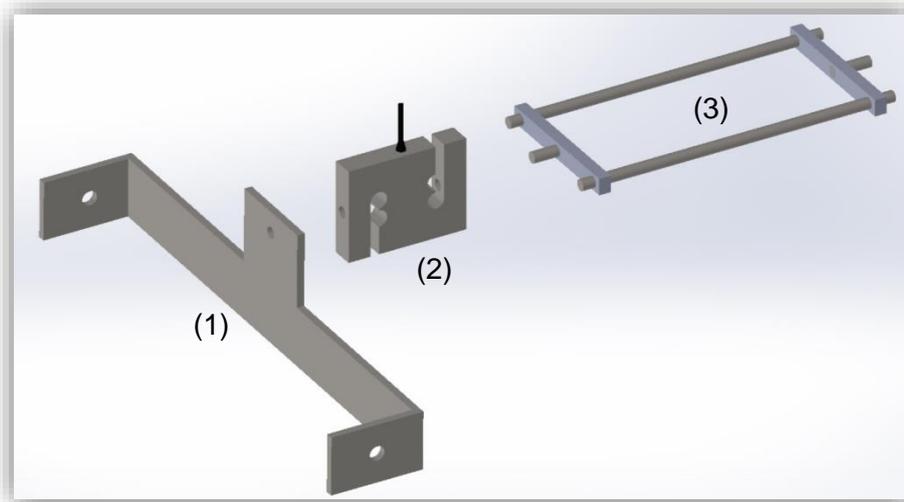
(a)



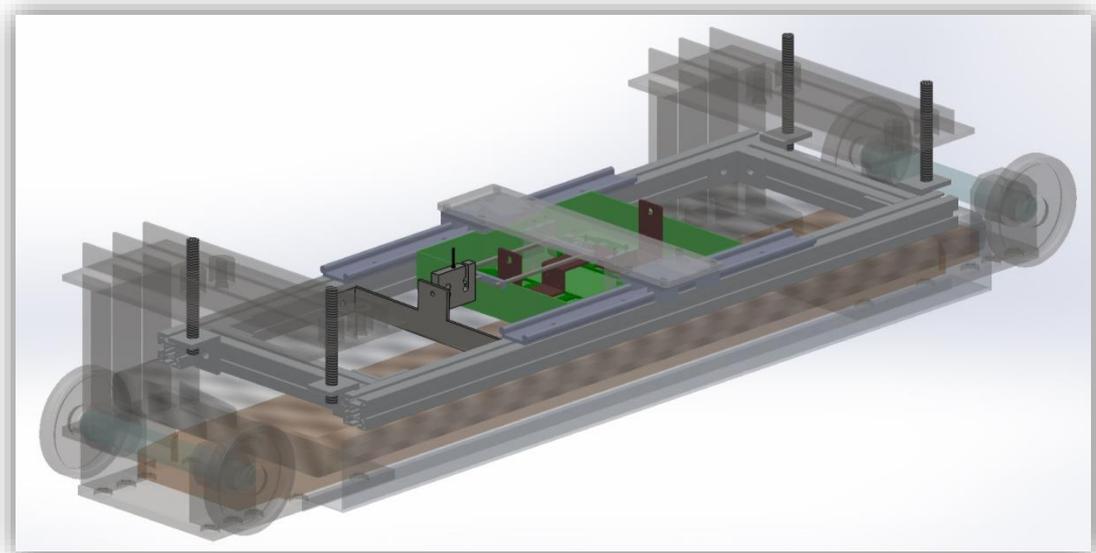
(b)

Figura 53 - Projeto com a vista explodida (a) e posicionamento da guia linear e suporte central no conjunto final (b).

A última parte é composta pela célula de carga com a barra de deslocamento e o eixo de força. A Figura 54 (a) mostra a vista explodida das peças que formam este conjunto: Na barra de deslocamento (1) fica a trava de movimento que faz com que a célula de carga (2) receba a força de tração estática. O eixo de força (3) conecta a célula ao suporte central do recipiente. A Figura 54 (b) mostra seu posicionamento no resto do sistema.



(a)



(b)

Figura 54 - Projeto com a vista explodida (a) e posicionamento da célula de carga com os eixos de força no conjunto final (b).

6. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados para os testes executados com os equipamentos construídos. Para a fonte retificadora foram avaliadas as regulações de tensão e corrente, as bobinas de Fitas 2G tiveram suas curvas $V \times I$ levantadas e campos magnéticos mapeados e, finalmente, foram feitos os ensaios de tração com todos os equipamentos operando em conjunto.

6.1. Testes de Acionamento da Fonte de Retificadora

Antes de fazer os ensaios de tração, é necessário avaliar se a alimentação da armadura está adequada. A regulação da corrente contínua é o foco principal, conforme visto no projeto e nas simulações. Além disso, é preciso fazer uma varredura das temperaturas de operação para certificação de que nenhum componente está superaquecendo, especialmente as pontes retificadoras. A melhor condição para se fazer isso é quando submete-se cada linha à carga máxima.

Os níveis de tensão no primeiro estágio são regulados de acordo com as correntes de linha e das fases da armadura. Vale ressaltar que, tratando-se de uma ligação estrela-delta, conforme mostrado na Figura 55, há uma defasagem de 30° e um fator multiplicativo de $\sqrt{3}$ entre fonte e carga. O valor da máxima corrente na fase da armadura é de 53 A, o nominal de acordo com o fabricante. É importante lembrar que, embora o nominal seja dado em RMS para 25 Hz, esse valor em CC não poderia ser igualado ao valor de pico instantâneo da alimentação trifásica (que seria 75 A) para não superar os limites de temperatura da armadura. A partir dessa corrente nominal é possível determinar os pontos de operação das correntes de linha e das fases da armadura, mostrados na Figura 55. O ponto escolhido para as análises preliminares foi o assinalado em 60° . Nele, observa-se que a corrente da linha B está em seu máximo (91 A).

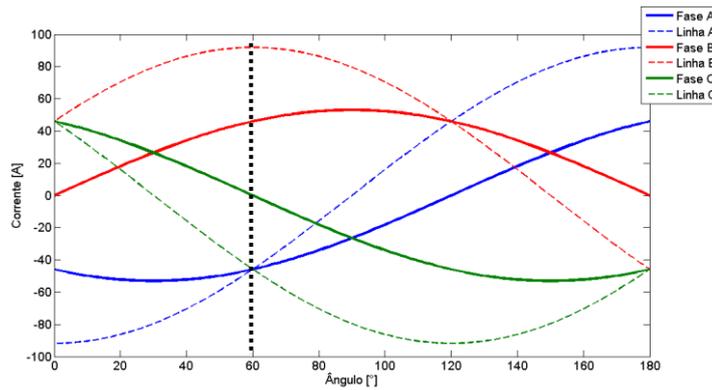


Figura 55 - Pontos de operação das correntes de linha e fase da armadura.

Ao acionar o sistema, observa-se que os valores de tensão RMS medidos na saída dos variacs são numericamente bem próximos aos valores de corrente contínua medidos na saída do retificador de cada fase. Por exemplo, ao ajustar as tensões nos variacs no primeiro estágio para $V_A = 46 \text{ V}$, $V_B = 92 \text{ V}$ e $V_C = 46 \text{ V}$ as correntes de linha, na saída do retificador, são aproximadamente $I_A = 46 \text{ A}$, $I_B = 92 \text{ A}$ e $I_C = 46 \text{ A}$. Esta agradável coincidência facilita o trabalho e vale ressaltar que se esta fosse de fato a intenção, provavelmente nunca chegaria a esse resultado com tanta exatidão.

1.1.1. Análise térmica por varredura de infravermelho

Nesses primeiros testes observou-se problemas de superaquecimento somente nos fios escolhidos para a ligação dos capacitores de filtro e nas pontes retificadoras. Através do termovisor com captação de infravermelho FLIR E40 foi possível fazer leituras das temperaturas desses componentes. A Figura 56 mostra essa leitura para os fios dos capacitores, onde a temperatura passa dos 100°C , muito além dos 70°C aceitáveis para essa classe de isolamento [70]. Quanto às pontes retificadoras, observou-se que elas estavam ultrapassando a sua temperatura crítica (85°C com 124 A , de acordo com o Anexo) à corrente de 91 A , conforme mostrado pela Figura 57.

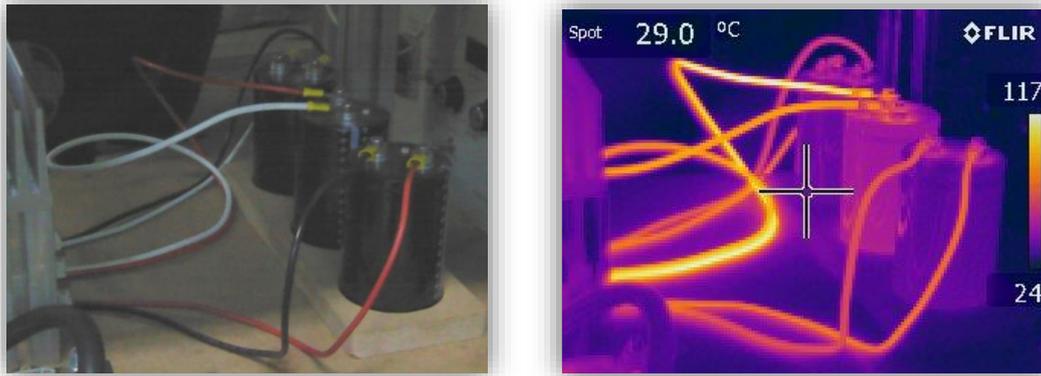


Figura 56 - Análise térmica dos capacitores.

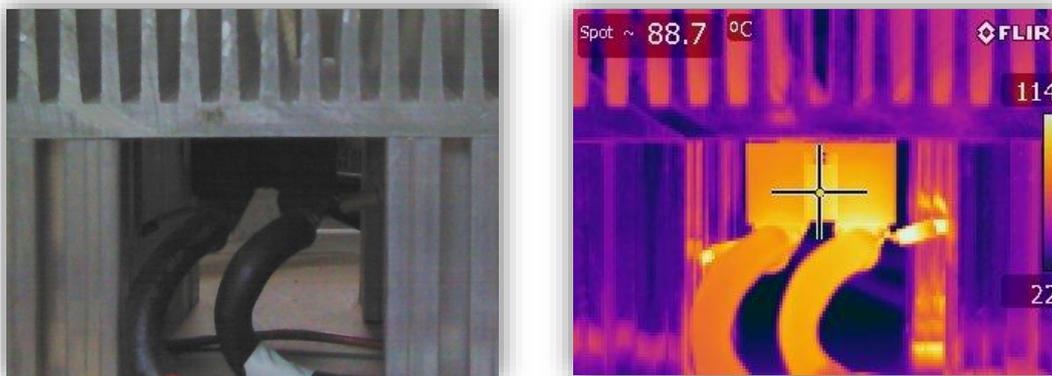


Figura 57 - Análise térmica das pontes retificadoras.

A razão do primeiro problema é que os fios dimensionados para os capacitores estão conduzindo cerca de 84 A (RMS), muito acima da sua capacidade nominal de 28 A. Para sanar esse problema, foi feita uma adaptação técnica adicionando-se mais condutores de 4 mm² em paralelo aos já existentes, dobrando a capacidade de condução e diminuindo a temperatura dos cabos. Apesar de não ter sido completamente eficaz, a diminuição na temperatura foi significativa e já evita que a isolação derreta, conforme mostrado na Figura 58. Para sanar o superaquecimento das pontes retificadoras, aumentou-se a capacidade de dissipação instalando-se ventiladores de 220 V e 12 W que forçam o ar quente para fora dos dissipadores de alumínio. Isso foi suficiente para melhorar as condições de operação até uma temperatura aceitável, conforme mostrado pela Figura 59.



Figura 58 - Análise térmica dos capacitores após adaptação técnica.



Figura 59 - Análise térmica das pontes retificadoras após adição dos ventiladores.

Um detalhe importante que pode-se observar nessas imagens anteriores é que as regiões com maiores temperaturas são em torno dos terminais dos cabos, graças à resistência inerente aos contatos elétricos. Isso mostra que, para futuramente conseguir-se maiores níveis de corrente, é necessário repensar esta montagem. Como estes condutores convergem para nós pontuais (as saídas da ponte retificadora), simplesmente aumentar a quantidade de cabos agravará esse problema. A melhor solução é utilizar o sistema de barramentos de cobre para dividir estes terminais de forma apropriada e afastá-los dessa região crítica, que não pode ser submetida a mais esforço térmico. Esse melhoramento ficará sugerido como trabalhos futuros para o aprimoramento da bancada de testes.

5.1.2. Regulação da Corrente Contínua

Durante a etapa de projeto, buscou-se uma boa regulação de corrente. As simulações mostraram que graças à própria natureza altamente indutiva da carga isso não seria problema. Mesmo assim foram inseridos capacitores no circuito para aumentar o nível médio da tensão na carga e aumentar a margem de serviço da fonte. Para avaliar se a montagem final atende às expectativas (ou também se a modelagem usada na simulação corresponde à realidade), a corrente contínua que circula numa das fases da armadura foi aquirisitada com osciloscópio, e é mostrada na Figura 60 a seguir, dando destaque ao *ripple*. Como há um ruído inerente à aquisição, foi também aplicado um filtro passa-baixa ao sinal com corte em 200 Hz, gerando uma onda mais coesa. Nesse resultado é possível observar um *ripple* de 2%, o que é bastante razoável comparado ao valor obtido das simulações, de 1,1 %. Dessa forma, a regulação de corrente está dentro da esperada e o modelo computacional previu de forma eficaz o funcionamento real desse sistema.

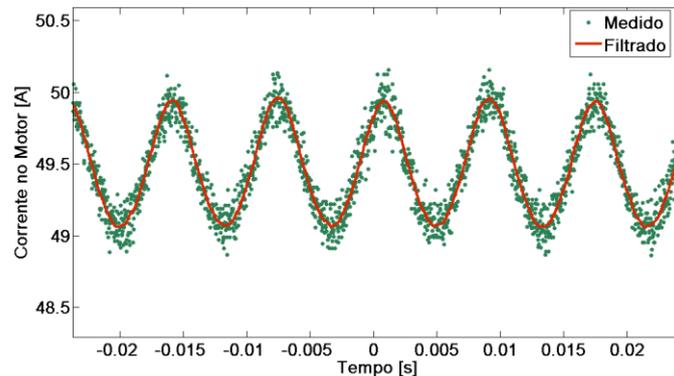


Figura 60 - *Ripple* na corrente contínua em uma das fases da armadura.

Após essas análises preliminares e correção dos problemas observados, a fonte de corrente contínua encontra-se pronta para seu uso com segurança nos ensaios de Tração x Posição. Esses resultados serão mostrados a seguir.

6.2. Levantamento de Curva $V \times I$ das Bobinas

A característica principal da Curva $V \times I$ de supercondutores é a mudança de um comportamento sem resistência (tensão nula em corrente contínua) para uma rápida ascensão da tensão com o aumento da corrente, marcando a transição do estado supercondutor para o normal pela violação do J_c , quando o campo elétrico atinge o valor de cerca de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$. Para uma bobina com 28 m de comprimento, isso representa uma tensão de 2,8 mV medida nos terminais da bobina, considerando uma distribuição homogênea de campo elétrico em todo o seu comprimento. Isto certamente não é verdade (e é até natural que não seja tratando-se de supercondutores), especialmente tendo em vista a distribuição heterogênea do campo magnético induzido, que será discutida a seguir. De qualquer forma, o objetivo dessa caracterização é de se ter uma noção do limite crítico da bobina para se trabalhar abaixo dele.

Os ensaios de caracterização das duas bobinas foram feitos elevando-se a corrente de 1 A em 1 A em pulsos com 2 s de duração espaçados de 4 s. O programa encerra-se automaticamente no primeiro ponto em que a tensão ultrapassa o valor crítico de 2,8 mV.

Foram feitos dois tipos de caracterização. A primeira foi uma bateria de três ensaios consecutivos em cada bobina em um mesmo ciclo térmico, i.e., sem retirar a bobina da imersão em nitrogênio líquido entre eles. Isso garante a repetibilidade dos ensaios nas mesmas condições, considerando que não há alteração de um resultado para o outro, e permite que se tenha a primeira noção dos valores críticos. A Figura 61 mostra os resultados obtidos, estando indicados o nome da bobina (B1 ou B2) e a respectiva caracterização (C1, C2 e C3).

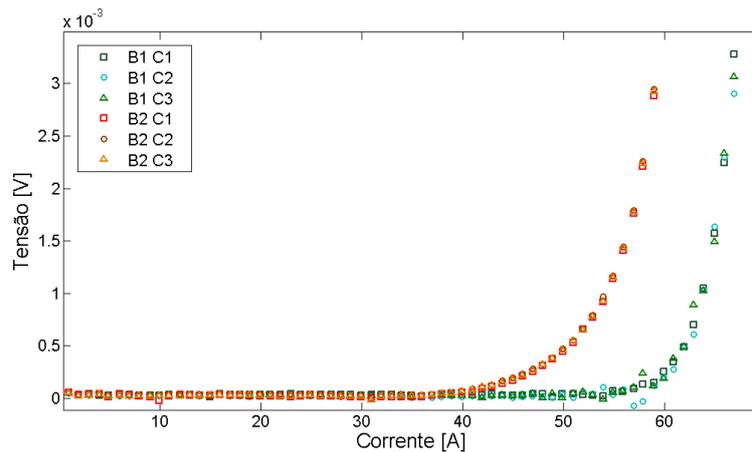


Figura 61 - Caracterizações das bobinas B1 e B2 em um mesmo ciclo térmico.

Desses resultados podem ser observados os diferentes valores de I_c iguais a 66,76 A em B1 e 58,70 A em B2. Embora elas tenham sido feitas da mesma forma e sejam geometricamente iguais, foram usados dois segmentos de 50 m diferentes do lote de 200 m. De acordo com a folha de dados enviada pela *Superpower*, a caracterização deste lote foi feita com os segmentos esticados, de forma que o efeito do campo próprio é desprezível se comparado a uma bobina, e essa diferença de corrente crítica não existia. Esse resultado é interessante por permitir levantar a hipótese de haver heterogeneidade entre os segmentos, perceptível apenas perante caracterização na presença de campo magnético, que o fabricante ainda não faz em larga escala. Como na construção de uma máquina é desejável que os enrolamentos supercondutores tenham o comportamento o mais próximo possível, pode ser um detalhe importante procurar construí-los todos com o mesmo segmento. Claro que isso pode acarretar em um custo adicional considerável, uma vez que o valor por metro de Fita 2G cresce com o comprimento do segmento fabricado. É claro que não se deve ter a pretensão de cogitar que haja somente problemas na fabricação, mas também a possibilidade de qualquer detalhe ter passado despercebido durante o processo de montagem das bobinas, que não é automatizado e é suscetível a todo o tipo de erro humano, por menor que seja. Para se ter alguma certeza quanto à fonte dessa divergência é necessário um espaço amostral maior, que será conseguido ao longo do tempo, com trabalhos futuros que visem a melhorias das técnicas aqui desenvolvidas.

A segunda caracterização foi feita uma semana após a primeira. Juntando todos os resultados, é possível avaliar que não houve degradação das bobinas no decorrer dos ciclos térmicos e com o passar do tempo, considerando que não haja alteração significativa das características das curvas do primeiro e do segundo conjunto de

ensaios. A Figura 62 mostra os resultados obtidos, estando indicados os ensaios da primeira bateria (C1, C2 e C3) e da segunda bateria, feita uma semana depois, (C4 e C5) para as bobinas B1 e B2.

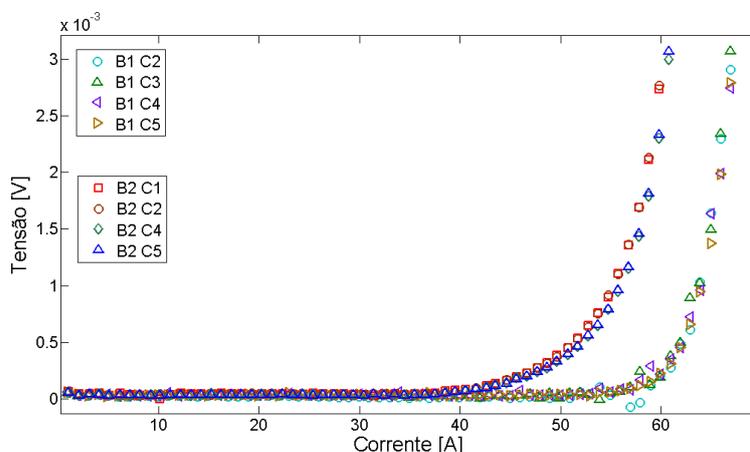


Figura 62 - Caracterização das bobinas B1 e B2 em diferentes dias: C1, C2 e C3 foram feitos uma semana antes de C4 e C5.

Tais resultados permitem afirmar que as bobinas não sofreram degradação ao longo do tempo, mantendo as mesmas características após alguns ciclos térmicos intervalados de uma semana. Além dos cuidados que foram tomados durante a construção e operação, é possível que a durabilidade das fitas utilizadas deva-se principalmente à camada isolante que a envolve completamente. Nos demais supercondutores (fitas ou blocos) estudados em trabalhos anteriores no Lasup, a exposição ao tempo úmido sempre foi um causador de degradação em questão de dias, de forma que sempre procurou-se conservá-los em recipientes fechados com sílica gel, mantendo a atmosfera o mais seca possível. Nesse caso, o invólucro de *Kapton* adesivo evitou o contato direto com a atmosfera, dispensando todo esse cuidado com o acondicionamento. Percebe-se, portanto, que o investimento a mais em um lote de Fita 2G já isolado pelo fabricante é válido, não apenas pela facilidade de construção de bobinas, mas também pelo aumento da durabilidade do material.

A partir dos resultados supracitados, ficou decidido que o limite operacional das bobinas para os ensaios de Tração x Posição seria de 40 A.

6.3. Mapeamento de Campo Magnético das Bobinas

O mapeamento de campo magnético desta bobina supercondutora foi feito varrendo-se o plano paralelo a ela com resolução de 1 mm em uma área de 91 mm x 256 mm, totalizando 23296 pontos, a 2 mm de altura da bobina. Em cada ponto foi medido um valor de campo magnético normal ao plano (componente B_z do campo resultante, considerando que a bobina está no plano x-y). A corrente foi mantida em 40 A. A Figura 63 dispõe os resultados de forma gráfica, com o módulo da componente normal da densidade de fluxo magnético em função da posição. A região clareada diz respeito à posição das espiras da bobina.

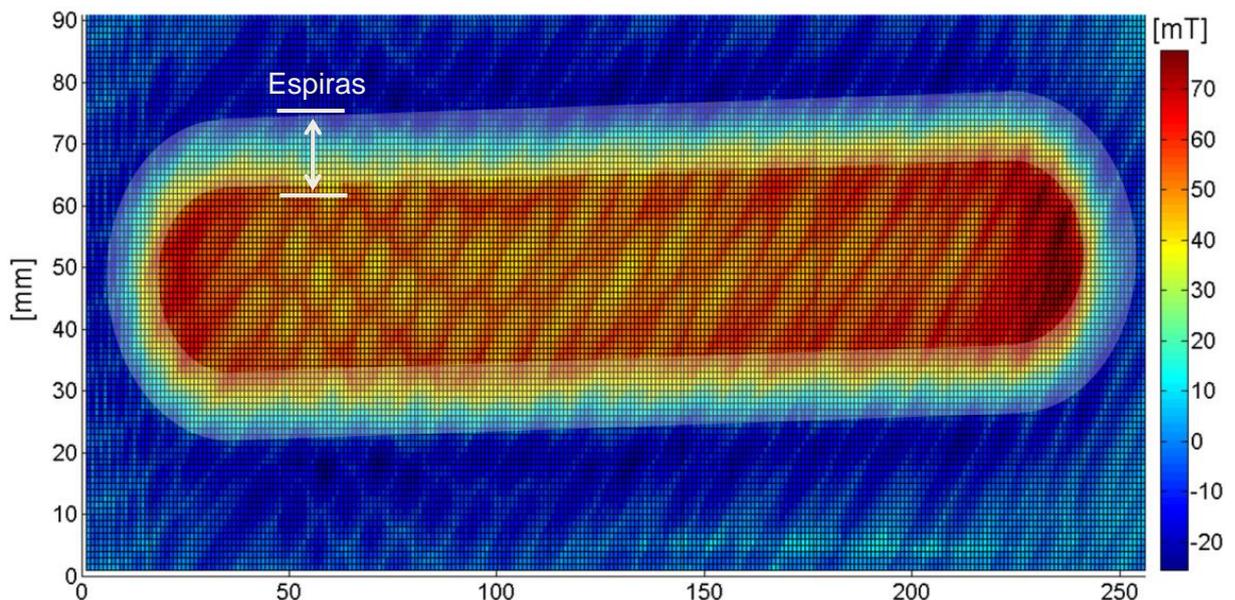


Figura 63 - Mapeamento de campo magnético da bobina supercondutora.

Este resultado permite algumas análises interessantes. Primeiramente, ele ajuda a complementar o resultado anterior de caracterização $V \times I$, visto que é possível observar que existe campo magnético diferente de zero na região das espiras. Deve-se lembrar que existem também outras componentes de campo magnético não mapeadas e que certamente estão influenciando o I_c da bobina. Como o campo magnético é bastante heterogêneo nessa região, fica mais difícil de se afirmar que $V_c = 2,8$ mV (a tensão crítica medida nos terminais da bobina) considerando que $E_c = 1$ μ V/cm. São grandes as chances de a distribuição de campo elétrico no supercondutor também ser heterogênea. Por exemplo, as espiras intermediárias estão sujeitas a um campo magnético menos intenso (quase nulo na componente normal ao

plano mas não necessariamente nas outras), e apresentam $E \ll 1 \mu\text{V}/\text{cm}$. As mais internas, onde o campo magnético é mais intenso, apresentam $E \gg 1 \mu\text{V}/\text{cm}$, e são elas que de fato vão limitar as capacidades operacionais de toda a bobina. No todo, pela medição nos terminais da bobina, a tensão até poderia ser da ordem de 1 mV, mas isso não necessariamente garante que a bobina está operando com segurança, pois há uma diferença significativa na tensão de um segmento para outro ao longo de todo o seu comprimento. Como na prática é inviável de se medir a tensão com um tape a cada espira, a operação dessas bobinas terá de ser feita com base nas caracterizações mostradas anteriormente, acrescidas de bom senso e até um pouco de sorte, procurando manter-se o mais longe possível da região crítica. Existem estudos em desenvolvimento [72] que tratam justamente da modelagem da distribuição de campo elétrico em função de campo magnético para bobinas maiores e podem ser usados como referência para trabalhos futuros.

Outro detalhe que deve ser ressaltado é a variação do campo magnético. Não havia materiais ferromagnéticos nas proximidades que justificasse esse comportamento, e dentro do que se espera da forma do campo magnético gerado por uma bobina, essa anomalia não era prevista. Pelo seu padrão bem definido, lembrando uma colmeia no diagrama de cores, é justo afirmar que não se trata de um problema aleatório de medição, nem algum tipo de realimentação de ruído. A julgar pela variação de cerca de 10 mT, e pelo padrão geométrico da distorção, é possível que a ponteira do sensor estivesse sofrendo alguma ligeira variação na altura do plano da bobina da ordem de fração de milímetro.

Ao simular a bobina pelo MEF, pode-se comparar os resultados e verificar o quão bem o modelo representa a realidade. A Figura 64 mostra um resultado de simulação para uma bobina similar à mapeada. Nele é mostrada a magnitude da componente B_z do campo magnético induzido pela corrente de 40 A nas 55 espiras. Comparando-se essa distribuição de campo à obtida na prática, conclui-se que o modelo é razoavelmente verossímil.

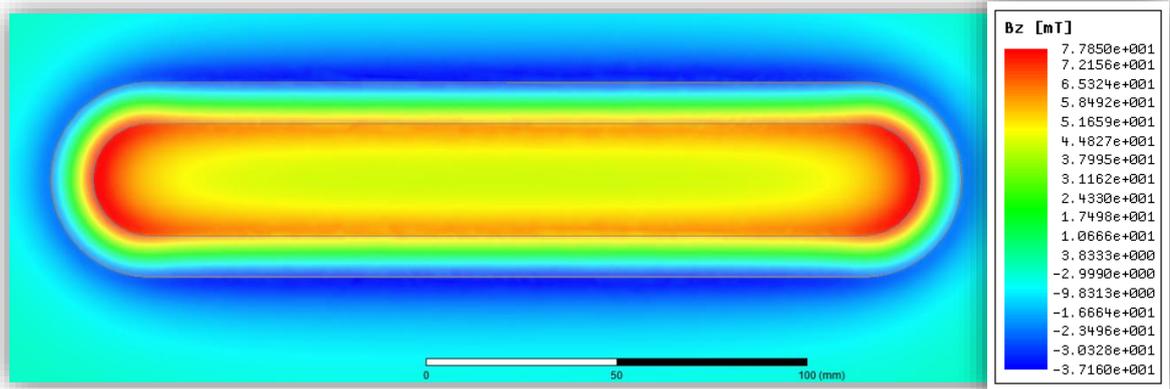


Figura 64 - Componente B_z do campo magnético simulado por MEF.

Uma vez que haja a certeza da qualidade do modelo, esta pode se tornar uma poderosa ferramenta que permite avaliar a magnitude de outras componentes do campo magnético em diferentes posições em toda a bobina. Por exemplo, conforme mostrado pela Figura 65, que mostra a componente B_y do campo magnético que atravessa a face mais interna e a mais externa da bobina.

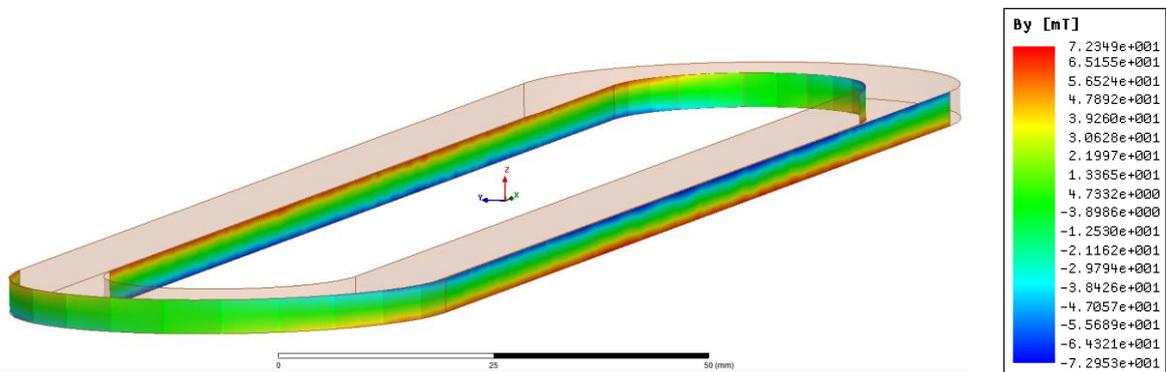
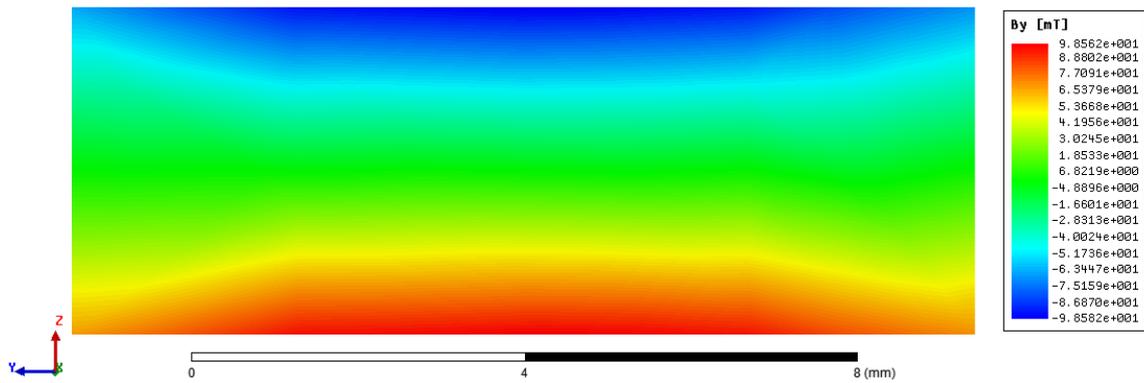
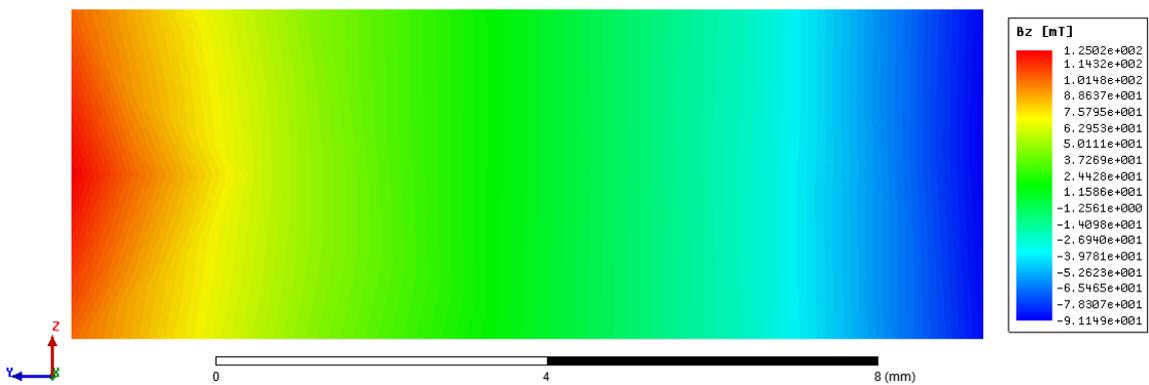


Figura 65 - Componente B_y do campo magnético nas faces internas e externas da bobina.

Em um outro exemplo de análise, mostrado na Figura 66, pode-se fazer um corte transversal na região do comprimento útil da bobina e nele mostrar o comportamento de B_y (a) e B_z (b) em seu interior, onde é impossível de se mapear na prática. Esses resultados mostram como o campo magnético penetra nas espiras de Fita 2G nas direções paralela e perpendicular, e ajudam a confirmar o que foi abordado anteriormente acerca da variação da I_c com o campo próprio da bobina, bem como a heterogeneidade do campo elétrico. Em trabalhos futuros, esses resultados podem ser aproveitados para o desenvolvimento de modelos matemáticos que prevejam melhor o comportamento das fitas supercondutoras.



(a)



(b)

Figura 66 - Componentes B_y (a) e B_z (b) do campo magnético no corte transversal da bobina.

Visando à obtenção de bobinas que consigam atingir correntes críticas mais elevadas, a partir desses resultados pode-se propor trabalhos futuros que utilizem as ferramentas de simulações por MEF para projetar bobinas que minimizem a incidência de campo sobre as espiras, seja mudando seu formato ou acrescentando peças ferromagnéticas para direcionar o campo.

6.4. Ensaios de Tração x Posição

Estes ensaios são o foco principal do trabalho, e é para eles que todo o aparato desenvolvido converge. Sua importância se deve ao fato de eles, primeiramente, comprovarem os resultados teóricos das simulações pelo MEF realizadas em [68]. Segundo, tais resultados abrem as portas para projetos mais ambiciosos de desenvolvimento de máquinas supercondutoras, uma vez que mostram que o

laboratório começa a ter o domínio sobre as técnicas de construção e operação de bobinas de Fitas 2G em campos magnéticos.

Conforme explicado anteriormente no capítulo 4.3, estes ensaios visam a medir a força de tração estática equivalente à instantânea. Consegue-se isso através da alimentação do enrolamento de armadura com corrente contínua, mostrado no capítulo 4.4, emulando um ponto de operação do motor como se ele estivesse ligado à rede trifásica. As bobinas de Fitas 2G sujeitas a essa força de tração estão imersas em nitrogênio líquido, e trafegam solidárias ao seu recipiente. A força de tração é medida pela célula de carga, acoplada ao braço de força do veículo do secundário, conforme mostrado no capítulo 4.5.

O controle da fonte retificadora permite que seja emulada qualquer condição de campo magnético na armadura. Para os testes feitos nessa etapa, foram escolhidos três pontos de operação da corrente de armadura defasados de 80°. A importância de se ter pontos de operação bem distintos se deve à distribuição heterogênea do campo magnético nos enrolamentos, que sofre muita variação devido às ranhuras do núcleo de ferro e causam flutuações significativas na força de tração, conforme será mostrado posteriormente. Os pontos de operação utilizados são mostrados na Tabela 9 a seguir, com as correntes de linha da fonte retificadora e as correntes de fase nos enrolamentos (lembrando que a armadura está ligada em triângulo, conforme mostrado na Figura 67). Os valores foram definidos com base em um arranjo similar à Figura 55 e a medição na prática foi feita com um alicate amperímetro. As bobinas do Secundário foram alimentadas com 20 A e 40 A, dando uma ideia de como a força de tração varia em função deste parâmetro.

Tabela 9- Distribuição das correntes nos pontos de operação escolhidos

Ponto	Correntes de Linha [A]			Correntes de Fase [A]		
	A	B	C	UR	WT	VS
I	+86	-16	-70	+34	+18	-52
II	+46	-92	+46	+46	-46	0
III	-70	-16	+86	-18	-34	+52

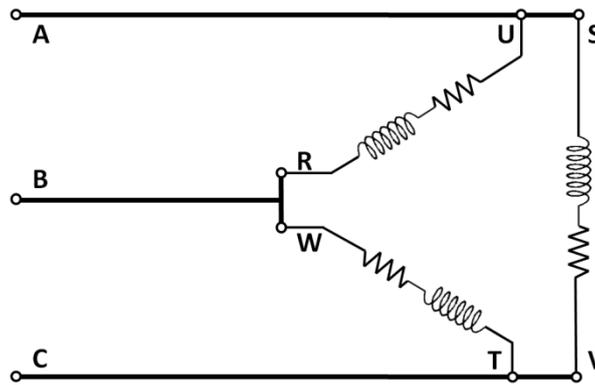


Figura 67- Esquema de conexões da fonte e da armadura.

Em cada um dos seis ensaios o veículo do secundário foi deslocado manualmente em passos de 5 mm ($\pm 0,5$ mm) ao longo de 170 mm (a armadura possui passo polar de 165,6 mm), totalizando 36 pontos a cada experimento. A aquisição de cada um deles foi feita pelo seguinte procedimento:

Ajustar posição → Fixar o veículo → Energizar a armadura → Medir força → Desenergizar a armadura.

As bobinas supercondutoras são mantidas energizadas durante todo o processo, desde que estejam totalmente imersas em nitrogênio líquido.

O veículo foi projetado para ter o mínimo de atrito possível, mas não é possível chegar ao ponto em que ele seja desprezível. Para se ter uma ideia da sua faixa de valor, a célula de carga foi brevemente substituída por um dinamômetro de 2000 g \pm 25 g. O veículo foi manualmente tracionado até o ponto em que saía do repouso, quando o dinamômetro marcava 500 g. Sendo assim, a força de atrito pode ser definida em cerca de 0,5 N. É claro que durante a operação, considerando as folgas entre as peças e acomodações térmicas, essa força pode aumentar, mas é pouco provável que tenha causado variações muito significativas nos resultados.

As simulações feitas pelo MEF que serviram de base para este trabalho experimental partiram de um Secundário composto por duas bobinas de 100, 200 ou 300 espiras e corrente de 80 A [68]. Essas condições não puderam ser reproduzidas na prática e por isso esse modelo foi adequado às condições de operação reais, de 55 espiras com 20 A ou 40 A, os três pontos de operação da armadura e ressimulado. Dessa forma é possível comparar os resultados de condições idênticas. A Figura 68 mostra os resultados de Força de Tração \times Posição para cada um dos pontos de operação da armadura e com as bobinas supercondutoras operando com 20 A e 40 A. Os pontos referem-se à medição e o tracejado ao simulado pelo MEF.

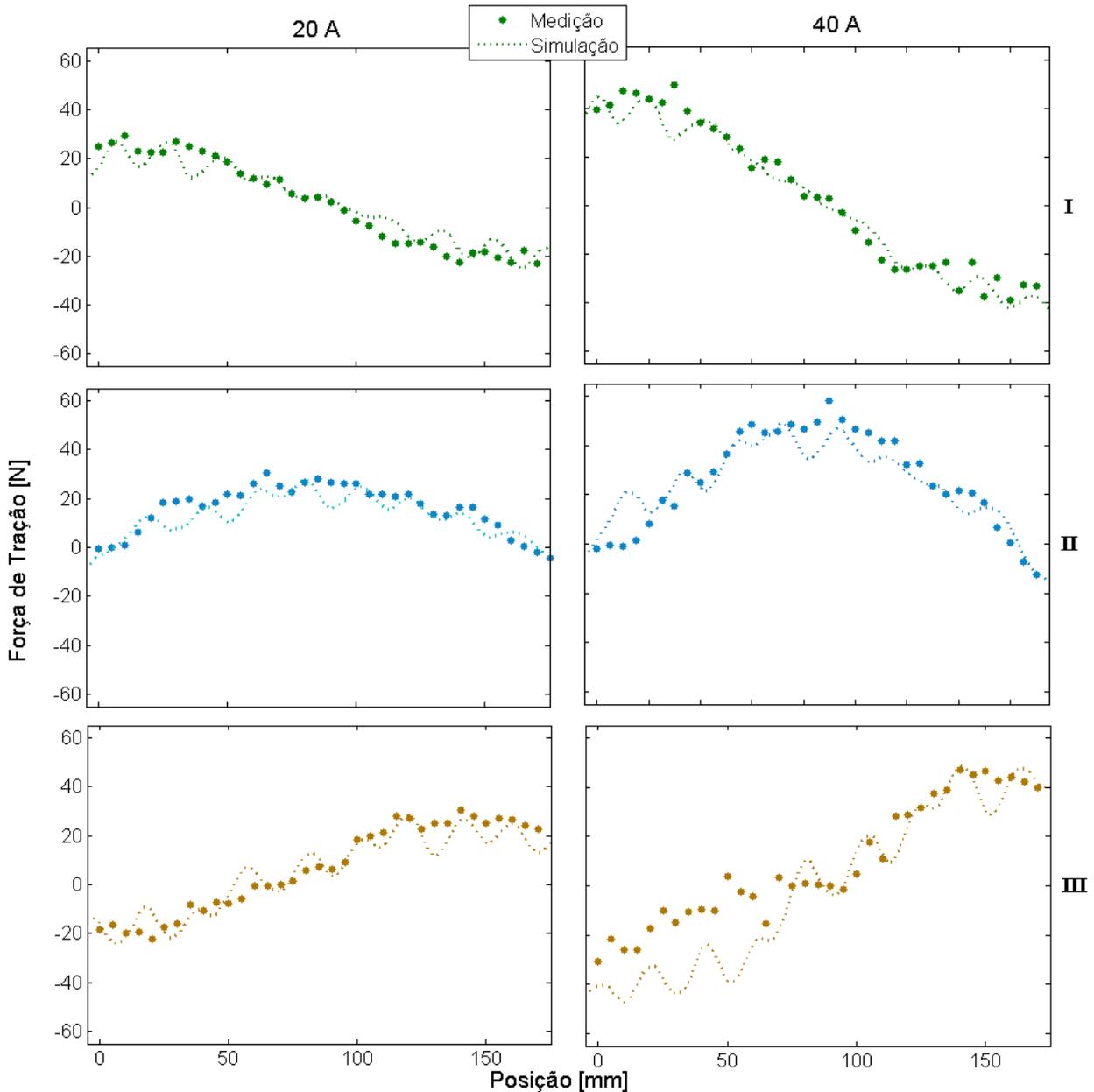


Figura 68 - Resultados de simulações e medições de Força x Posição.

Esses resultados são muito promissores e levam a algumas conclusões interessantes. Primeiramente, é notável o fato das forças medidas estarem tão bem ajustadas ao modelo de simulação em quase todos os casos. Isso permite afirmar tanto que o modelo de simulação é bem verossímil quanto que o aparato experimental foi implementado corretamente. A única exceção foi na primeira metade do último ensaio, em que as forças foram um pouco menores do que o esperado e sugerem algum erro de medição.

A forma como força de tração se distribui em cada um dos pontos de operação escolhidos, com um aspecto bastante senoidal, defasadas entre si de cerca de um quarto de ciclo e com período de cerca de dois passos polares, também mostra que o seu comportamento está de acordo com o previsto. Com relação às oscilações observadas tanto nas simulações quanto nas medições, pode-se afirmar que são devidas às ranhuras do núcleo ferromagnético da armadura. Para investigar esse efeito, foram feitas simulações pelo MEF com a armadura energizada de acordo com os pontos de operação escolhidos, mas sem a presença das bobinas do Secundário. A Figura 69 mostra a componente vetorial B_z da densidade de fluxo magnético em um mesmo segmento do motor linear operando nos pontos I (a) II (b) e III (c). É possível ver que a deformação do campo magnético é graças às ranhuras da armadura e que sua distribuição não é perfeitamente simétrica, justificando que é aconselhável analisar diferentes pontos de operação.

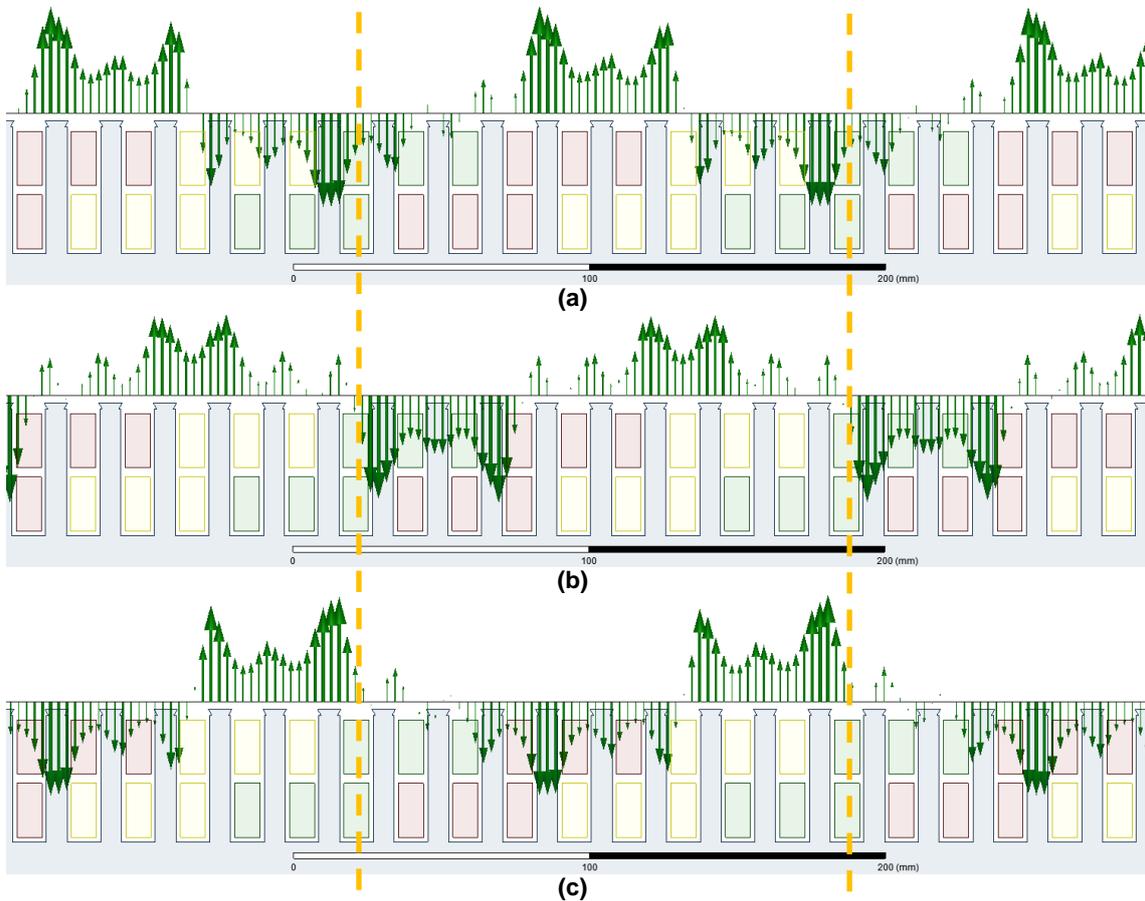


Figura 69 - Componente B_z da armadura nos pontos de operação I (a), II (b) e III (c). A distância equivalente a um passo polar foi demarcada para destacar a mudança do campo magnético em cada ponto de operação.

Com relação à magnitude da força em função da corrente do Secundário, pode-se dizer que a proporção não é direta, no sentido de que dobrar a corrente não dobra a força de tração. O fator multiplicativo médio varia em torno de 1,65 vezes a força do Secundário com 20 A para 40 A. É claro que fazer esta comparação levando em conta somente duas situações não necessariamente prevê o comportamento de todo o universo de possibilidades, mas permite ter uma ideia preliminar do que é esperado em projetos futuros. Isto será um estudo importante, pois a maximização da corrente no supercondutor vai garantir a maximização da força por si só. É preciso saber se essa proporção é linear e provavelmente vai exigir um trabalho de otimização. Este passo ainda é mais distante, visto que estas bobinas já estão trabalhando na margem de segurança, e antes de serem explorados valores maiores de corrente, as próprias bobinas devem ser melhoradas para suportá-los.

Outro detalhe interessante observado é que o campo externo gerado pelo motor aparentemente não foi significativo na operação dos supercondutores. Como a margem de segurança obtida pela caracterização foi em torno de 40 A, poderia ser que, quando somados o campo externo da armadura e o auto-campo do Secundário, o valor de I_c das bobinas caísse ao ponto de que ela não fosse suportar nem mesmo os 40 A, mas isso não aconteceu em nenhum dos 3 pontos de operação. A forma de se identificar isso seria um aumento da tensão na fonte para a corrente constante, significando a transição para o estado normal com a bobina tornando-se resistiva. No entanto, a tensão manteve-se estável em todos os ensaios, estando a armadura energizada ou não.

Provavelmente, como o campo máximo induzido pela armadura (da ordem de 80 mT a 90 mT, de acordo com as simulações) é menor que o campo induzido pelos supercondutores, a resultante não sofreu muita variação, e predominou o aspecto do auto-campo. Essa observação já foi feita matematicamente em outros estudos [72]. A importância desse detalhe é que, se isso for verdade de fato, o projeto de uma máquina supercondutora dependerá mais da relação de I_c com o auto-campo das bobinas do que com os campos externos variando no tempo e no espaço, facilitando bastante as previsões de limites operacionais.

No geral, os resultados obtidos atenderam muito bem às expectativas e mostram que é possível projetar e construir bobinas supercondutoras para aplicação em máquinas elétricas. O fato de as forças simuladas e medidas se corresponderem dão mais uma garantia de que esta modelagem possa ser usada para projetos mais ambiciosos e diferentes topologias de estudo.

7. Conclusões

Neste último capítulo serão feitas as considerações finais acerca do trabalho, desde as etapas iniciais até os resultados, bem como propostas de possíveis trabalhos futuros a fim de dar continuidade ao projeto.

Este trabalho teve por objetivo dar o passo inicial no desenvolvimento prático de máquinas supercondutoras a partir de simulações de trabalhos anteriores que mostraram suas grandes vantagens em termos da relação potência/peso/volume. Para isso foi necessário projetar e construir um sistema eficiente para fabricação de bobinas de Fitas 2G e uma bancada de ensaios que permitisse validar os resultados equivalentes aos de simulação em tempo hábil e a um custo acessível.

O desenvolvimento se deu em quatro etapas envolvendo projeto e construção das partes das bobinas supercondutoras e da bancada de ensaios. No fim, todos os objetivos das etapas foram alcançados e foram suficientes para gerar os dados desse trabalho. Naturalmente, para continuar o desenvolvimento do projeto e gerar resultados mais completos e consistentes, muitos ajustes precisam ser feitos e há um leque de trabalhos futuros possíveis em todas as partes.

Os resultados estão dentro do esperado e deram margem às interpretações bastante significativas citadas anteriormente que ajudarão a melhorar o projeto no futuro. A caracterização das bobinas forneceu um limite operacional viável para os ensaios de tração e mostrou que havia diferença significativa na resposta de cada um dos segmentos de Fita 2G utilizados. Estas podem ser tanto devido ao próprio processo de fabricação do material quanto por algum detalhe do processo de montagem das bobinas. O mapeamento do campo foi interessante por mostrar o quanto as espiras estão sujeitas ao auto-campo, que influencia muito a I_c . Os ensaios de Tração \times Posição mostraram que o sistema se comporta tal qual o modelo de simulação desenvolvido anteriormente. Isso encoraja seu uso em projetos futuros mais audaciosos em direção ao objetivo central de desenvolver máquinas supercondutoras completas.

No geral, este trabalho comprovou os conceitos mostrados na teoria e mostrou que o laboratório possui o conhecimento técnico para investir num projeto desse porte. Sua continuidade em trabalhos futuros gerará resultados que trarão visibilidade no cenário de supercondutividade como uma tecnologia recente que possui um amplo campo de aplicação.

7.1. Trabalhos Futuros

Graças ao fato deste trabalho ser o ponto de partida pelo viés prático, alguns equipamentos foram desenvolvidos especialmente para ele. Estes conseguiram atingir seus objetivos e geraram os resultados desejados, mas ao longo dos vários ensaios, foram observadas possibilidades de melhoramentos que ficarão sugeridas como trabalhos futuros. Estes aprimoramentos são necessários para garantir resultados mais confiáveis, ensaios mais abrangentes e técnicas mais rebuscadas.

Com relação ao motor linear, é interessante usar o MEF para verificar até que ponto a aproximação do segmento de uma máquina cilíndrica é válida. Isto é, o quão grande deve ser o raio de uma máquina para que ela possa ser realmente aproximada a uma máquina linear com um dado erro percentual e o quão longo deve ser o motor linear aproximado para que os efeitos de borda tenham menor influência, criando de fato um modelo matemático para isso. Na parte prática, seria interessante testar armaduras com outras dimensões, disposições de enrolamentos e núcleos não-magnéticos, tentando chegar às topologias observadas na bibliografia para máquinas cilíndricas, e comparar esses resultados dentro do modelo aproximado.

A mesa bobinadeira é eficiente para construção de bobinas em pequena escala, mas o sistema manual está um tanto rudimentar e pode ser melhorado. Por exemplo, a posição dos volantes pode ser otimizada para distribuir melhor a passagem das fitas (especialmente quando são feitas bobinas de camadas duplas de cobre com *Kapton*) e pode ser implementado um sistema automatizado com um motor controlado por um sensor de tração na fita e contador de voltas. Este último, em especial, faz muita falta quando o operador perde a conta do número de espiras enroladas.

O projeto das bobinas chegou a um ponto muito bom para esta geometria específica, mas conforme outras dimensões forem testadas (comprimento útil, diâmetro interno, número de espiras e número de camadas), detalhes terão que ser ajustados para manter sua eficiência. Também será interessante fazer uma pesquisa com o MEF a procura de projetos de bobinas com caminhos de fluxo magnético otimizados, a partir da adição de peças ferromagnéticas, de forma que as Fitas 2G sejam menos submetidas ao campo. Isso será essencial para aumentar sua capacidade de condução de corrente. Conforme as bobinas forem melhoradas e sendo capazes de conduzir mais, é preciso avaliar a progressão da força em função também desta variável.

Um outro possível trabalho é desenvolver uma técnica de resinagem, conforme é feito com enrolamentos de máquinas convencionais, para melhorar a resistência

mecânica das bobinas. A resina utilizada deverá ser resistente ao ciclo térmico de temperaturas criogênicas, com baixo coeficiente de dilatação (para não comprimir as espiras) e boa condutividade térmica.

A fonte retificadora oferece muitas possibilidades de trabalhos futuros e pode ter outras aplicações até mesmo como bancada didática. Durante os ensaios observou-se problemas de contato elétrico que geravam superaquecimento. Esses problemas foram contornados, mas não totalmente sanados. Ela ainda possui limitações de carregamento e tempo de operação não muito mais extenso que poucos minutos, com risco de comprometer as pontes de diodos. É necessário refazer os contatos com peças de cobre ou latão e utilizar barramentos ao invés de alguns condutores flexíveis. Para abrir seu leque de aplicações, seria interessante melhorar a regulação de tensão aumentando a quantidade de capacitores por fase (não necessariamente as cargas serão altamente indutivas como este motor linear é). Atualmente as leituras dos valores de tensão e corrente todas dependem de instrumentos auxiliares (multímetro e alicate amperímetro) e seria muito interessante se houvesse um painel mostrador com os valores de interesse dispostos em tempo real, incluindo sensores de temperatura nas retificadoras e evitando que o indicador crítico seja o cheiro de plástico derretido. Esses trabalhos todos podem garantir um excelente aprendizado de instrumentação para alunos de graduação.

O veículo das bobinas de campo possui algumas falhas que, embora não tenham prejudicado significativamente estes resultados, podem acabar sendo relevantes em análises futuras. O primeiro problema é a movimentação manual com referência em uma régua graduada em milímetros. Isso por si só já torna as medidas demoradas e sujeitas a um erro grande o bastante para não permitir uma amostragem com resolução maior do que 5 mm. Para sanar isso fica a sugestão de automatizar o sistema e colocar a movimentação controlada por um motor de passo com um fuso roscado, que aumentaria a resolução à fração de milímetro. O sistema de guias lineares com patins funcionou razoavelmente bem, mas apresentou um atrito maior do que o esperado, de forma que as peças precisaram ficar folgadas para que o veículo deslizesse sem agarrar. Esta parte do sistema também deve ser repensada, e a substituição por guias lineares de maior qualidade (que usem rolamentos) deve resolver. Além disso, o posicionamento da célula de carga em relação ao veículo deve ser revisto, de forma que a tração atue totalmente sobre o sensor antes das guias lineares. Da forma como o projeto foi concebido, há uma divisão dos esforços no veículo, e não é possível afirmar se a totalidade da força está sendo medida.

7. Referências Bibliográficas

[1] Onnes, H. K., "Report on the researches made in the Leiden Cryogenic Laboratory between the second and the third international congress of refrigeration", Selected Reprints of American Association of Physics Teachers, vol. 34, no. b, pp. 55–70, 1913.

[2] Onnes, H. K., "The Superconductivity of Mercury", Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 120 b, 122 b, 124 e, 1911.

[3] G. G. Sotelo, "Proposta de um Mancais Magnético Supercondutor com Fita YBCO de Segunda Geração". Projeto Final para o grau de Engenheiro Eletricista, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

[4] Meissner, W., Ochsenfeld, W., "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit", Naturwissenschaften, n. 21, pp. 787, 1933.

[5] A. C. Rose-Innes, E. Rhoderick, "Introduction to Superconductivity". Oxford, London, Pergamon Press, 2ª Reimpressão, 1994.

[6] London, F., London, H., "The electromagnetic equations of the supraconductor", Proceedings of the Royal Society, vol. A149, pp. 71–78, 1935.

[7] London, F., "Superfluids", vol. I e II. Nova York, EUA: Dover, 1964.

[8] G. G. Sotelo, "Modelagem de Supercondutores Aplicada ao Projeto de Mancais Magnéticos", Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

[9] Abrikosov, A. A., "On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group", Soviet Physics, vol. 5, pp. 1174, 1957.

[10] D. H. N. Dias, "Modelagem de Mancais Lineares Supercondutores Considerando o Resfriamento na Presença de Campo Magnético", Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

[11] Cooper, L. N., "Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas", Physics Review, n. 104, pp. 1189, 1956.

[12] Bardeen, J., Cooper, L. N., Schrieffer, J. R., "Microscopic Theory of Superconductivity", Physics Review, n. 106, pp. 162, 1957.

[13] F. Sass, "Mancais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fitas de Segunda Geração", Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

[14] W.T. B. de Souza, "Simulações e Ensaio com Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores do Tipo Resistivo", Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

[15] Larbalestier, D., Gurevich, A., Feldmann, D. M. "High-Tc Superconducting Materials for Electric Power Applications", Nature, v. 414, pp. 368–377, 2001.

[16] Xu, K., Cao, P., Heath, J. R. "Achieving the theoretical depairing current limit in superconducting nanomesh films", American Chemical Society, pp. 4206–4210, 2010.

- [17] Chandler, J. G., Jiang, J., Cai, X. Y., et al. "Irreversibility Fields of Bi-2223 at 30-77 K", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003.
- [18] F. G. R. Martins, "Caracterização de Fitas 2G na Presença de Campos Magnéticos", Projeto Final para o grau de Engenheiro Eletricista, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.
- [19] Hull, J. R., Murakami. "Applications of bulk high-temperature superconductors", Proceedings of the IEEE, v. 92, n. 10, pp. 1705–1718, 2004.
- [20] J. S. Lamas, "Projeto e Construção de um Limitador de Corrente Supercondutor Utilizando Fitas de YBCO". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2009.
- [21] Li, X., Rupich, M. W., Thieme, C. L. H., et al. "The Development of Second Generation HTS Wire at American Superconductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, n. 3, pp. 3231, 2009.
- [22] Xie, Y., Selvamanickam, V., Marchevsky, M., et al. "Second-Generation HTS Wire Manufacturing and Technology Advancement at SuperPower", Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, pp. 398, 2009.
- [23] Mukoyama, S., Yagi, M., Mitsuhashi, T., Liu, J., et al., "Long-Term Verification Test of a 275 kV - 3 kA REBCO HTS Model Cable" 11th EPRI Superconductivity Conference, Houston, USA, 2013.
- [24] Baldan, C. A., Lamas, J. S., Shigue, C. Y., et al. "Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor - The Limiting Factor and Its Recovery Time", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, n. 3, pp. 1810, 2009.
- [25] de Sousa, W. T. B., Polasek, A., Dias, R., Matt, C. F. T., da Silva, F. A., de Andrade Jr., R., "Investigation of 2G coil SCFCL – Modeling and Testing", Journal of Physics, Conference Series (Print), v. 507, p. 032005, 2014.
- [26] Ogata, M., Miyazaki, Y., Hasegawa, H., et al. "Basic Study of HTS Magnet Using 2G Wires for Maglev Train", Physica C, pp. 1, 2010.
- [27] Hazelton, D. W., "2G HTS Conductor Development at SuperPower for Magnet Applications", MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, 2013.
- [28] American Superconductors, "Sea Titan 10 MW Wind Turbine", in <http://www.amsc.com/library/>, acesso em 27/05/2014.
- [29] General Electric, "GE Successfully Trials Breakthrough High-Temperature Superconducting Technology for Next-Generation Power Generation", in <http://www.genewscenter.com/Press-Releases>, 04 de Abril de 2013, acesso em 27/05/2014.
- [30] Nick, W., Grundmann, J., Frauenhofer, J., "Test Results from Siemens Low-Speed, High-Torque HTS Machine and Description of further Steps Towards Commercialization of HTS Machines", IEEE/CSC & Esas European Superconductivity News Forum, n. 19, 2012.
- [31] Frank, M., van Haßelt, P., Kummeth, P., et al., "High-Temperature Superconducting Rotating Machines for Ship Applications", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, v. 16, n. 2, 2006.

[32] Kalsi, S. S., Weeber, K., Takesue, H., Lewis, C., Neumueller, H., Blaugher, R. D., "Development Status of Rotating Machines Employing Superconducting Field Windings" Proceedings of the IEEE, v. 92, n. 10, 2004.

[33] Nick, W., "Overview: HTS Rotating Machines", ESAS Summerschool, 2013.

[34] Klaus, G., Nick, W., Neumüller, H., Nerowski, G., McCown, W., "Advances in the Development of Synchronous Machines with High-Temperature Superconducting Field Winding at Siemens AG", Power Engineering Society General Meeting, 2006.

[35] Smith, R. J., "Thermal Analysis of a Superconducting Generator", Flight Accessories Laboratory, Aeronautical Systems Division, Wright Patterson Air Force Base, EUA, 1962.

[36] Mueller, P. M., "Rotating Electric Power Equipment with Superconducting Elements", IEEE Transactions on Aerospace, v. 2, n. 2, pp. 843-850, 1964.

[37] Stekly, Z. J. J., Woodson, H. H., "Rotating Machinery Utilizing Superconductors", IEEE Transactions on Aerospace, v. 2, n. 2, 1964.

[38] "Profile of Mr. A. D. Appleton", IEEE Students' Quarterly Journal, v. 40, issue 158, 1969.

[39] Smith Jr., J. L., Kirtley Jr., J. L., Thullen, P., "Superconducting Rotating Machines", IEEE Transactions on Magnetics, v. MAG-11, n.2, 1975.

[40] Woodson, H. H., Stekly, J. J., Halas, E., "A Study of Alternators with Superconducting Field Windings: I-Analysis", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-85N, n. 3, pp. 264,1966.

[41] Stekly, J. J., Woodson, H. H., Hatch, A. M., Hoppiea, L. O., Halas, E., "A Study of Alternators with Superconducting Field Windings: II-Experiment" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-85N, n. 3, pp. 274,1966.

[42] Oberhauser, C. J., Kinner, H. R., "Some Considerations in the Design of a Superconducting Alternator", Advances in Cryogenics Engineering, v.13, 1968.

[43] Klimenko, E. Y., et al., "100 kW Alternating Current Generator with a Superconducting Solenoid", Report IAE-2182, Institute of Atomic Energy, Moscow, USSR, 1972.

[44] Eckert, D., Lange, F., Endig, M., Muller, G., Seidel, W., "Three-phase Synchronous Alternator with Superconducting Field Winding", Proceedings of the 1972 IEEE Applied Superconductivity Conference, Pub. 72CH0682-TABSC, pp. 128, 1972.

[45] Akiyama, S., Jujino, H., Ishihara, A., Veda, K., "Superconducting Synchronous Machine", Artigo Apresentado na ICEC 5, Kyoto, Japão, 1974.

[46] Gieras, J. F., "Advancements in Electric Machines", Capitulo 8, Springer Netherlands, 1ª Edição, Illinois, EUA, 2008.

[47] Parker Jr., J.H., Blaugher, R.D., Patterson, A., Vecchio, P. D., McCabria, J. L., "A High Speed Superconducting Rotor", IEEE Transactions on Magnetics, v. MAG-11, n.2, 1975.

[48] Keim, T.A., Laskaris, T.E., Fealey, J.A., Rios, P.A., "Design and Manufacture of a 20 MVA Superconducting Generator", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-104, n. 6, pp. 1475-1483, 1985.

[49] Oishi, I., Nishijima, K., "Summary of Development of 70 MW Class Mode I Superconducting Generator – Research And Development of Superconducting for Electric Power Application", Journal of Cryogenic Association of Japan, v. 42, pp. 157-167, 2002.

[50] Schiferl, R., Zhang, B., Driscoll, D., Shoykhet, B., Dykhuizen, R., "Development Status of a 125 Horsepower Superconducting Motor", Advancements in Cryogenic Engineering, v. 42, pp. 977, 1997.

[51] Driscoll, D., "Development of a 1000 Hp Superconducting Motor", Apresentado em IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001.

[52] Gamble, B., Kalsi, S., Snitchler, G., Madura, D., Howard, R., "The Status of HTS Motors", Apresentado em IEEE Power Engineering Society Meeting, 2002.

[53] Eckels, P. W., Snitchler, G., "5MW High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor Design and Test Results", Naval Engineers Journal, v. 117, n. 4, pp. 31-36, 2008

[54] Kalsi, S. S., Madura, D., Howard, R., et al., "Superconducting Dynamic Synchronous Condenser for Improved Grid Voltage Support", Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, v. 2, pp. 747-747, 2003.

[55] Bray, J. W., "Vision of HTS Applications at GE: HTS Generator", Applied Superconductivity, v. 2, n. 3, pp. 149–154, 1994.

[56] Herd, K. G., et al., "Development and Fabrication of a Bi-2223 Racetrack Coil for Generator Applications," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 7, pp. 531–534, 1997.

[57] General Electric Company, "Design and Development of a 100 MVA HTS Generator for Commercial Entry", US Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, 2006.

[58] Toshio, T., Hiroyuki, T., Tomoya, O., "Development of Liquid Nitrogen-Cooled Full Superconducting Motor", IHI Engineering Review, v. 39, n. 2, 2006.

[59] Nakamura, T., Miyake, H., Ogama, Y., Morita, G., Muta, I., Hoshino, T., "Fabrication and Characteristics of HTS Induction Motor by the Use of Bi-2223/Ag Squirrel-Cage Rotor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 16, n. 2, pp. 1469-1472, 2006

[60] Nakamura, Ogama, Y., T., Miyake, Nagao, K., Nishimura, T., "Novel Rotating Characteristics of a Squirrel-Cage-Type HTS Induction/Synchronous Motor", Superconductor Science And Technology, v. 20, pp. 911-918, 2007.

[61] Iwakuma, M., Tomioka, A., Konno, M., et al., "Development of a 15 kW Motor With a Fixed YBCO Superconducting Field Winding" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 17, n. 2, pp. 1607-1610, 2007.

[62] Rodriguez, E. F., Stephan, R. M., "Study of Passive Magnetic Bearings for Vertical-Axis Wind Turbines", Proceedings of the International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 24, 2012

[63] Rodriguez, E. F., Stephan, R. M., "Radial and Axial Forces of a Passive Magnetic Bearing" Proceedings of the First Brazilian Workshop on Magnetic Bearings, 2013.

[64] Polasek, A., De Andrade Jr, R., Dias, R., et al., "*Avaliação Da Curva Vxl de Materiais Supercondutores para Aplicações no Setor Elétrico*", Anais do Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Revista XXII SNPTEE, v. 4, pp. 44.

[65] Sotelo, G. G., de Andrade Jr., R., Dias, D. H. N., Ferreira, A.C., Costa, F., Machado, O. J., de Oliveira, R. Santos, M., Stephan, R. M., "*Tests with One Module of the Brazilian Maglev-Cobra Vehicle*", IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Print), v. 99, pp. 1, 2013.

[66] Equacional Elétrica & Mecânica, "*Relatório Técnico: Motor Linear*", Projeto FAPERJ – PI 56.146, 2009.

[67] Silveira, W. R., "*Relatório Técnico-Científico*" in: Projeto LEVMAG de pesquisa e desenvolvimento da levitação magnética: aplicações, materiais e tecnologia, 2013.

[68] da Cruz, V. S., "*Investigação de Parâmetros de Projeto de Motores Síncronos Supercondutores Utilizando o Método dos Elementos Finitos*", Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

[69] Alves, L. S., "*Caracterização de Fitas Supercondutoras 2G com Juntas Soldadas*", Projeto Final para o grau de Engenheiro Eletricista, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

[70] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "*ABNT NBR 5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão*", 2ª Edição, 2004, Versão corrigida, 2008.

[71] Fernandes, R. P., "*Desenvolvimento de um Sistema de Mapeamento de Densidade de Fluxo Magnético*", Projeto Final para o grau de Engenheiro Eletricista, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

[72] Pitel, J., "*Differences Between Two Definitions of the Critical Current of HTS Coils*", Superconductor Science and Technology, v. 26, pp. 125002-1250015, 2013.

8. Anexo

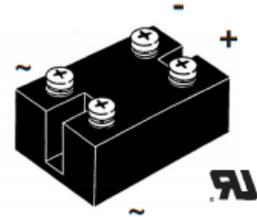
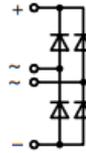
IXYS

VBO 125

Single Phase Rectifier Bridge

$I_{dAVM} = 124 \text{ A}$
 $V_{RRM} = 1200-1800 \text{ V}$

V_{RSM} V	V_{RRM} V	Type
900	800	VBO 125-08NO7
1200	1200	VBO 125-12NO7
1400	1400	VBO 125-14NO7
1600	1600	VBO 125-16NO7
1800	1800	VBO 125-18NO7



Symbol	Conditions	Maximum Ratings	
I_{dAVM}	$T_C = 85^\circ\text{C}$, module	124	A
I_{FSM}	$T_{VJ} = 45^\circ\text{C}$; $V_R = 0$	$t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz), sine	1800 A
		$t = 8.3 \text{ ms}$ (60 Hz), sine	1950 A
i^2t	$T_{VJ} = T_{VJM}$ $V_R = 0$	$t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz), sine	1600 A ² s
		$t = 8.3 \text{ ms}$ (60 Hz), sine	16000 A ² s
T_{VJ}	$T_{VJ} = T_{VJM}$ $V_R = 0$	$t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz), sine	12800 A ² s
		$t = 8.3 \text{ ms}$ (60 Hz), sine	13600 A ² s
T_{VJM}		-40...+150	$^\circ\text{C}$
T_{stg}		150	$^\circ\text{C}$
V_{ISOL}	50/60 Hz, RMS $I_{ISOL} \leq 1 \text{ mA}$	$t = 1 \text{ min}$	2500 V~
		$t = 1 \text{ s}$	3000 V~
M_d	Mounting torque (M5) Terminal connection torque (M5)	5 ±15%	Nm
		44 ±15%	lb.in.
Weight	typ.	5 ±15%	Nm
		44 ±15%	lb.in.
Weight	typ.	225	g

Features

- Package with screw terminals
- Isolation voltage 3000 V~
- Planar passivated chips
- Blocking voltage up to 1800 V
- Low forward voltage drop
- UL registered E 72873

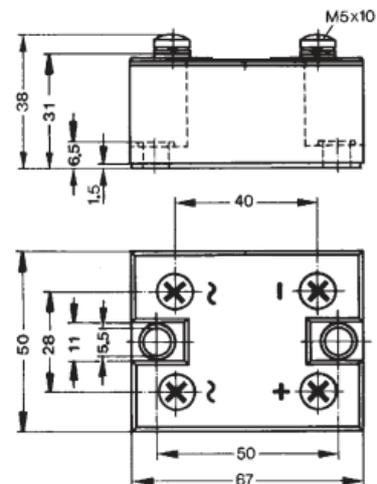
Applications

- Supplies for DC power equipment
- Input rectifiers for PWM inverter
- Battery DC power supplies
- Field supply for DC motors

Advantages

- Easy to mount with two screws
- Space and weight savings
- Improved temperature and power cycling

Dimensions in mm (1 mm = 0.0394")



Symbol	Conditions	Characteristic Values	
I_R	$V_R = V_{RRM}$ $V_R = V_{RRM}$	$T_{VJ} = 25^\circ\text{C}$	≤ 0.3 mA
		$T_{VJ} = T_{VJM}$	≤ 8.0 mA
V_F	$I_F = 150 \text{ A}$;	$T_{VJ} = 25^\circ\text{C}$	≤ 1.3 V
V_{TO}	For power-loss calculations only		0.8 V
r_T	$T_{VJ} = T_{VJM}$		3 mΩ
R_{thJC}	per diode; 180° per module; 180°		0.83 KW
			0.138 KW
R_{thJK}	per diode; 180° per module; 180°		1.13 KW
			0.188 KW

Data according to IEC 60747 refer to a single diode unless otherwise stated.

IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions.