



DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA SUPERCONDUTORA DE FLUXO APRISIONADO EM FITAS 2G EMPILHADAS NO ROTOR

Fernando Jorge Monteiro Dias

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior

Guilherme Gonçalves Sotelo

Alexander Polasek

Rio de Janeiro

Julho de 2020

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA SUPERCONDUTORA DE FLUXO
APRISIONADO EM FITAS 2G EMPILHADAS NO ROTOR

Fernando Jorge Monteiro Dias

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

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior
Guilherme Gonçalves Sotelo
Alexander Polasek

Aprovada por: Prof. Rubens de Andrade Júnior
Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo
D.Sc. Alexander Polasek
Prof. Antonio Carlos Ferreira
Prof. Felipe Sass
Prof. Rafael Zadorosny
Prof. João Miguel Murta Pina

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2020

Dias, Fernando Jorge Monteiro

Desenvolvimento de uma Máquina Supercondutora de fluxo aprisionado em fitas 2G empilhadas no rotor/Fernando Jorge Monteiro Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XVIII, 121 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior

Guilherme Gonçalves Sotelo

Alexander Polasek

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 93 – 105.

1. Máquina supercondutora. 2. Fita supercondutora.
3. Fita 2G HTS empilhada. 4. Aprisionamento de fluxo magnético. I. Andrade Júnior, Rubens de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedico esta tese a minha família,
a minha esposa e aos meus
amigos.*

Agradecimentos

Agradeço ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) que financiou a minha bolsa de estudos e sem o qual seria impossível continuar essa pesquisa. Também agradeço o apoio da CAPES, do CNPq, do INERGE e da FAPERJ. Do CEPEL, gostaria de agradecer especialmente ao meu orientador, Alexander Polasek, por dedicar-se à pesquisa com tanto entusiasmo, o que fez manter o meu empenho ao longo de todo o percurso. Também gostaria de agradecer a todos os amigos do CEPEL, em especial aos do Laboratório de Cerâmicos Avançados, Rodrigo Dias, Luís Micahel e André Thiago, por todo o apoio no desenvolvimento desta tese.

Agradeço também à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) pela oportunidade do doutorado oferecido pelo departamento de Engenharia Elétrica. Da Universidade, um agradecimento especial ao meu orientador Rubens de Andrade Júnior por todos os ensinamentos, pela sabedoria e pela vontade em compartilhar seus conhecimentos, e ainda, aos amigos do Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP), Vina, Edeval, Jonatha, Mateus, Bárbara, Felipe, Richard, Sônia, Gabriel e Elkin por todo o apoio nessa caminhada. Da Universidade, gostaria de agradecer também aos técnicos do Laboratório de Máquinas, Sérgio e André pelo suporte nos testes elétricos.

Ao meu orientador Guilherme Sotelo, que me incentivou desde o começo, e por conseguir inspirar seus alunos a serem pessoas melhores, meu muito obrigado.

Aos amigos, pela motivação e apoio em momentos de dificuldade. Em especial ao Hernani, Victor, Edson, Larissa, Danilda e Laly.

Aos meus pais, Jorge Dias e Claudina Dias que mesmo estando longe, transmitem uma energia tão forte que consigo sentir desse lado do Atlântico. Isso me ajuda a superar todas as dificuldades e alcançar meus objetivos.

A todos os outros familiares, em especial ao meu irmão João Evangelista, minha cunhada Vera Regina e meus sobrinhos João Vitor e Anna Beatriz que me ajudaram quando mais precisava e me trataram como um verdadeiro filho.

À minha esposa Karine Dias que faz tudo ter sentido na minha vida.

Agradeço também à família da minha esposa que me acolheram como um filho, fazendo-me sentir amado e querido como se pertencesse a essa família desde que eu nasci.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA SUPERCONDUTORA DE FLUXO APRISIONADO EM FITAS 2G EMPILHADAS NO ROTOR

Fernando Jorge Monteiro Dias

Julho/2020

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior

Guilherme Gonçalves Sotelo

Alexander Polasek

Programa: Engenharia Elétrica

Esta tese faz uma investigação aprofundada das características de funcionamento de uma máquina elétrica supercondutora que usa fitas de segunda geração empilhadas em formato espiral no rotor. O princípio de operação dessa máquina depende da interação entre o campo magnético gerado no estator convencional e o campo magnético aprisionado no rotor supercondutor. Assim, conforme a carga, a máquina pode operar no regime síncrono ou assíncrono. As fitas supercondutoras empilhadas, são utilizadas como uma alternativa de substituição aos blocos supercondutores. A utilização dessas fitas reduz o tamanho e o peso das máquinas em comparação com aquelas que utilizam blocos. Neste contexto, foram propostas três configurações de núcleo do rotor para os protótipos da máquina supercondutora. Uma com núcleo em fibra de vidro (N-G10), outra com núcleo em aço magnético de alta permeabilidade (N-MAG) e por último uma com núcleo dividido em fibra de vidro e aço magnético (N-G10MAG). Nos protótipos N-G10 e N-MAG foram feitos dois empilhamentos de fita com nove camadas cada e no protótipo N-G10MAG três empilhamentos com dezoito camadas cada. As três configurações foram construídas e testadas em banho de nitrogênio líquido a 77K. Para a realização desses testes também foram desenvolvidas duas mesas de medida e um criostato. Os resultados experimentais mostraram concordância com aqueles obtidos por modelo desenvolvido com um programa de elementos finitos. Os resultados demonstraram o aprisionamento de fluxo magnético e a magnetização do empilhamento supercondutor no rotor, sendo o peso reduzido em 36% e o torque aumentado em 60%, se comparado ao da máquina de indução com rotor gaiola, considerando as suas respectivas temperaturas de operação.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DEVELOPMENT OF A NEW MACHINE TOPOLOGY WITH ROTOR STACKED SECOND GENERATION SUPERCONDUCTING TAPES

Fernando Jorge Monteiro Dias

July/2020

Advisors: Rubens de Andrade Júnior

Guilherme Gonçalves Sotelo

Alexander Polasek

Department: Electrical Engineering

This thesis makes an in-depth investigation of the operating characteristics of a superconducting electrical machine that uses second generation tapes stacked in a spiral shape on the rotor. The operating principle of this machine depends on the interaction between the magnetic field generated in the conventional stator and the magnetic field trapped in the superconducting rotor. Thus, depending on the load, the machine can operate in synchronous or asynchronous regime. The stacks are used as an alternative to replace the bulks. The use of tapes reduces the size and weight of machines compared to those using bulks. In this context, three rotor core configurations have been proposed for the superconducting machine prototypes. One with a fiberglass core (N-G10), another with a high permeability magnetic steel core (N-MAG) and finally one with a fiber glass and magnetic steel core (N-G10MAG). The prototypes N-G10 and N-MAG have two superconducting tape stacks around the core, each one with nine layers, and the prototype N-G10MAG has three superconducting tape stacks around the core, each one with eighteen layers. These configurations were built and tested in a 77K liquid nitrogen bath. To perform these tests, two measurement tables and a cryostat were also developed. The experimental results agreed with the results obtained in a model developed with a finite elements program. The results demonstrated the magnetic flux trapping and magnetization of the superconducting stack in the rotor, being the weight was reduced by 36% and the torque increased by 60%, compared to the squirrel-cage induction machine, considering their respective operating temperatures.

Sumário

Sumário	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvi
Lista de Abreviaturas	xviii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	4
1.2 Objetivo	4
1.3 Contribuições desta Tese	4
1.4 Organização do Texto	5
2 Revisão Bibliográfica e Conceitos de Máquinas Supercondutoras	6
2.1 Apresentação Fenomenológica da Supercondutividade	6
2.1.1 Propriedades Elementares dos Supercondutores	6
2.1.2 Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência	9
2.1.3 Estado Misto e Aprisionamento de Fluxo magnético	11
2.1.4 Materiais Supercondutores - Blocos Maciços e Fitas Supercondutoras 2G	13
2.1.5 Densidade de Corrente Crítica em Supercondutores HTS	15
2.2 Modelos e Formulações para a Simulação da Máquina Supercondutora	17
2.2.1 Formulação A-V-H e a Técnica de Homogeneização	18
2.2.2 Formulação T-A	20
2.3 Máquinas Supercondutoras	20
2.3.1 Histórico	20
2.3.2 Máquinas HTS com Bobinas de Fitas 2G	23
2.3.3 Máquinas HTS com Fitas 2G HTS Empilhadas	25
2.3.4 Técnicas de Magnetização dos Supercondutores	29

2.3.5	Breve Apresentação de Conceitos Teóricos de Máquinas Elétricas	30
3	Projeto e Desenvolvimento da Máquina Supercondutora	37
3.1	Projeto da Máquina Supercondutora com Fitas 2G HTS Empilhadas no Rotor	37
3.1.1	Construção do Protótipo N-G10	39
3.1.2	Construção do Protótipo N-MAG	41
3.1.3	Montagem do Criostato, da Mesa de Medida e Ajustes na Máquina	42
3.1.4	Construção do Protótipo N-G10MAG	44
3.1.5	Ajustes no Criostato e Montagem da Mesa de Medida para Ensaios com o Protótipo N-G10MAG	46
4	Procedimentos Experimentais e Ensaios Realizados	50
4.1	Ensaios com as Fitas 2G Utilizadas nos Empilhamentos	50
4.2	Procedimentos Experimentais e Ensaios Realizados com os Protótipos N-G10 e N-G10	51
4.2.1	Ensaio Quase Estático	52
4.2.2	Ensaios de Rotor Bloqueado e Dinâmico	54
4.3	Procedimentos Experimentais e Ensaios Realizados com o Protótipo N-G10MAG	56
4.3.1	Ensaios com a Máquina de Indução com Rotor Gaiola Convencional	57
4.3.2	Protótipo N-G10MAG Operando como Motor	62
4.3.3	Protótipo N-G10MAG Operando como Gerador	64
5	Resultados e Discussões	68
5.1	Caracterização das Fitas 2G	68
5.2	Resultados de Ensaios dos Protótipos N-G10 e N-MAG	71
5.2.1	Resultados do Ensaio Quase Estático	71
5.2.2	Resultado do Ensaio de Rotor Bloqueado	75
5.2.3	Resultado do Ensaio Dinâmico	76
5.3	Resultados de Ensaios do Protótipo N-G10MAG	77
5.3.1	Ensaio de Torque com a Máquina de Indução com Rotor Gaiola Convencional	78
5.3.2	Resultados do Protótipo N-G10MAG Operando como Motor	79
5.3.3	Resultados do Protótipo N-G10MAG Operando como Gerador	84
6	Conclusões	90
6.1	Trabalhos Futuros	91

Referências Bibliográficas	93
A Projeto dos Protótipos N-G10 e N-MAG	106
B Projeto do Tampo do Dewar	113
C Projeto do Protótipo N-G10MAG	115
D Instrumentos de Medição	121

Lista de Figuras

1.1	Esquema representativo da máquina supercondutora, em que a, b e c indicam as três fases, os números 1 e 2 representam duas bobinas por fase e \times e \bullet são indicações de entrada e saída da corrente, respectivamente.	3
2.1	Ilustração da superfície que separa as regiões normal e supercondutora.	8
2.2	Diagrama de fase para os supercondutores: a) tipo I e b) tipo II.	8
2.3	Classificação dos supercondutores em (a) tipo I e (b) tipo II pelos parâmetros ξ e λ . Adaptada de [48].	10
2.4	Comportamento da magnetização dos supercondutores do tipo I e II quando um campo externo é aplicado. Adaptada de [37].	11
2.5	Rede de Abrikosov em um supercondutor do tipo II	12
2.6	Configuração da fita supercondutora da SuperPower. Adaptada de [61].	15
2.7	(a) Esboço da curva $E-J$ para a determinação das fases de transição supercondutora/normal, (b) Curva em escala logarítmica mostrando os três estágios até atingir a transição completa. Adaptada de [62].	16
2.8	Representação da máquina com a separação das regiões com e sem supercondutor. Adaptada de [75].	19
2.9	Representação da técnica de homogeneização. Adaptada de [72].	19
2.10	Motor supercondutor com fitas retangulares empilhadas como polos no rotor. Adaptada de [11].	26
2.11	Motor supercondutor com fitas 2G HTS empilhadas em espiral no rotor. Adaptada de [13].	27
2.12	Aparato de motor linear supercondutor com fita 2G HTS empilhada. Adaptada de [14].	28
2.13	Rotor do gerador síncrono supercondutor com fita 2G HTS empilhadas na superfície do rotor. Adaptada de [15].	28
2.14	Estator da máquina convencional	31
2.15	Rotores de máquinas síncronas: a) rotor com enrolamento de campo e b) rotor com ímãs permanentes	32

2.16	Rotores de máquina assíncrona: a) rotor bobinado e b) rotor gaiola de esquilo	32
3.1	(a) Máquina síncrona trifásica com ímãs permanentes e (b) Máquina de indução trifásica de rotor gaiola.	37
3.2	(a) Duas fitas 2G HTS empilhadas no rotor e (b) Ilustração da fita 2G HTS enrolada em espiral com cola epóxi entre cada camada para montar a pilha (apenas 4 camadas foram representadas)	39
3.3	(a) Máquina supercondutora com núcleo do rotor em G10 (Protótipo N-G10), (b) Rotor supercondutor	40
3.4	(a) Máquina supercondutora com núcleo do rotor feito em aço SAE-1040 de alta permeabilidade magnética (Protótipo N-MAG), (b) Rotor supercondutor	41
3.5	Criostato com a máquina supercondutora	42
3.6	Mesa de medida para os ensaios com os protótipos N-G10 e N-MAG .	43
3.7	Máquina supercondutora com novos tampos e com o mancal de jóia .	43
3.8	(a) Protótipo N-G10MAG, com estator convencional e rotor supercondutor e (b) Rotor com as três fitas 2G HTS empilhadas no rotor .	44
3.9	Comparação do motor de indução gaiola com a máquina supercondutora	45
3.10	Criostato com ajustes	47
3.11	Mesa de medida para ensaios com o protótipo N-G10MAG	48
4.1	Foto do sistema de medição de torque quase estático.	53
4.2	Esquema do sistema de medição de torque quase estático.	53
4.3	Circuito de alimentação do motor supercondutor por uma fonte CC, sendo a corrente positiva total em uma fase e metade da corrente negativa nas outras duas	54
4.4	Foto do sistema de medição de torque dinâmico e com rotor bloqueado	55
4.5	Esquema do sistema de medição de torque dinâmico e rotor bloqueado	55
4.6	Circuito da alimentação AC do motor supercondutor com a utilização de um inversor para controlar a frequência de acionamento e um Variac para ajustar a tensão e conseqüentemente a corrente de alimentação	56
4.7	Foto do sistema de medição de torque com variações de carga	63
4.8	Esquema do sistema de medição de torque com variações de carga . .	63
4.9	Medições de torque em relação à posição angular, com o motor em condição quase estático, para o ensaio com o protótipo N-G10MAG. .	65
4.10	Esquema do sistema de medição de torque quase estático.	65
4.11	Sistema de medição da máquina supercondutora operando como gerador	66
4.12	Esquema do sistema de medição da máquina operando como gerador	66

5.1	Caracterização das fitas supercondutoras, modelo SF12050 utilizado no empilhamento dos protótipos N-G10 e N-MAG e modelo SF12100 utilizado no empilhamento do protótipo N-G10MAG. V_c e I_c são tensão e corrente crítica, respectivamente.	69
5.2	Comportamento da corrente crítica em função da densidade de fluxo magnético.	70
5.3	Medições de torque em relação à posição angular, com o motor em condição quase estático para os dois protótipos: protótipo N-G10 com o núcleo do rotor em G10 e protótipo N-MAG com o núcleo do rotor em Aço magnético.	71
5.4	Resultados do torque simulado e experimental na condição quase estática com alimentação de 10 A [73].	73
5.5	Distribuição da densidade de corrente por toda a extensão longitudinal da superfície do empilhamento 2G em diferentes momentos [73].	74
5.6	Componente radial da distribuição da densidade do fluxo magnético por toda a extensão longitudinal da superfície do empilhamento 2G em diferentes momentos [73].	74
5.7	Medições de torque com relação à frequência, com o motor em condição bloqueado para os dois protótipos: protótipo N-G10 com o núcleo do rotor em G10 e protótipo N-MAG com o núcleo do rotor em Aço.	75
5.8	Medições de torque com a variação da velocidade de rotação em ensaio dinâmico para os dois protótipos: protótipo N-G10 com o núcleo do rotor em G10 e protótipo N-MAG com o núcleo do rotor em aço.	76
5.9	Medição de torque da máquina de indução com rotor gaiola alimentada com inversor de frequência.	78
5.10	Medições de torque com variações de carga no protótipo N-G10MAG. As potências mostradas são na frequência de 60 Hz. Elas foram exigidas da fonte e representam as variações de carga.	79
5.11	Corrente e tensão de alimentação da máquina supercondutora com inversor de frequência.	80
5.12	Potência e corrente com a variação da carga.	81
5.13	Comparação do torque obtido com o motor de indução gaiola com a máquina supercondutora.	82
5.14	Medições de torque com rotor bloqueado em relação à frequência.	84
5.15	Medição de torque em relação à posição angular, com o gerador em condição quase estática para o ensaio com o protótipo N-G10MAG.	85
5.16	Medições de torque com variações de carga na configuração gerador.	86

5.17	Ilustração da alteração de carga pela variação da impedância do reostato trifásico.	87
5.18	Tensão e corrente em 60Hz sem carga.	87
5.19	Tensão e corrente em 60Hz em carga média.	88
5.20	Tensão e corrente em 60Hz em carga alta.	88
5.21	Tensão e corrente RMS em 60Hz com variação de carga.	89

Lista de Tabelas

3.1	Dados da máquina síncrona de ímãs permanentes	38
3.2	Dados de placa da máquina de indução com rotor gaiola	38
3.3	Dimensões dos protótipos N-G10 e N-MAG.	40
3.4	Especificações da fita supercondutora SF12050 da SuperPower	41
3.5	Dimensões do protótipo N-G10MAG	45
3.6	Especificações da fita supercondutora SF12100 da SuperPower	46
3.7	Dados de placa da máquina de corrente contínua	49
4.1	Características do sensor de torque modelo MKDQ usado nos ensaios	52
4.2	Resistência entre os enrolamentos em temperatura ambiente (R, S e T indicam as três fases)	57
4.3	Dados do ensaio de elevação de temperatura (VT é a variação de temperatura)	58
4.4	Grandezas medidas no ensaio em carga	58
4.5	Medições do ensaio em vazio	59
4.6	Tensão, corrente, torque e potência do ensaio com rotor bloqueado . .	61
D.1	Instrumentos utilizado nos ensaios	121

Lista de Símbolos

B	Densidade de fluxo magnético, p. 2
E	Intensidade de Campo Elétrico, p. 2
E_c	Intensidade de campo elétrico crítico, p. 15
Gd	Gadólíno, elemento químico de terras raras, p. 13
H_c	Intensidade de campo magnético crítico de supercondutores, p. 7
H_{c1}	Primeira Intensidade de Campo Crítico dos supercondutores do tipo II, p. 8
H_{c2}	Segunda Intensidade de Campo Crítico dos supercondutores do tipo II, p. 8
J	Densidade de corrente, p. 2
J_c	Densidade de corrente crítica de supercondutores, p. 13
L_R	Indutância do rotor, p. 29
L_S	Indutância do estator, p. 29
M_{SR}	Indutância mútua entre os enrolamentos, p. 29
P_R	Potência do rotor, p. 29
P_S	Potência do estator, p. 29
P_T	Potência total, p. 29
P_{mec}	Potência mecânica, p. 30
R_R	Resistência do rotor, p. 29
R_S	Resistência do estator, p. 29

Sm	Samário, elemento químico de terras raras, p. 13
T	Torque, p. 30
T_{Carga}	Torque de Carga, p. 3
T_c	Temperatura Crítica do Supercondutor, p. 6
T_{fap}	Torque de aprisionamento ("Pinning Torque"), p. 3
V_R	Tensão no rotor, p. 28
V_S	Tensão no estator, p. 28
Y	Ítrio, elemento químico de terras raras, p. 13
ϕ_0	Quantum de fluxo magnético, p. 11
ρ	Resistividade, p. 15
e	Carga Elementar, p. 11
f_L	Força de Lorentz, p. 2
f_{ap}	Força de aprisionamento ("Pinning Force"), p. 2
h	Constante de Plank, p. 11
i_R	Corrente do rotor, p. 29
i_S	Corrente do estator, p. 29
n	Índice de transição da Lei de Potência, p. 15
u	Velocidade dos fluxóides, p. 2

Lista de Abreviaturas

1G	Supercondutores de primeira geração, p. 13
AMSC	Empresa Americana ("American Superconductor"), p. 18
BSCCO	Óxido de Bismuto-Estrôncio-Cálcio-Cobre, p. 1
DOE	Ministério de pesquisa Americana ("Department of Energy"), p. 18
EAS	Empresa Alemã ("European Advanced Superconductor"), p. 18
EPRI	Instituto de pesquisa Americana ("Electric Power Research Institute"), p. 17
GE	Empresa Americana ("General Electric"), p. 17
IPTH	Instituto Universitário de Jena na Alemanha ("Leibniz Institute of Photonic Technology"), p. 19
KIT	Instituto de Tecnologia de Karlsruhe na Alemanha ("Karlsruhe Institute of Technology"), p. 20
LTS	Supercondutores de Baixa Temperatura crítica ("Low Temperature Superconductors"), p. 1
MAI	Instituto de pesquisa Russa ("Moscow Aviation Institute", p. 19
Nd-Fe-B	Neodímio-Ferro-Boro, p. 23
ONR	Escritório de pesquisa naval dos Estados Unidos ("Office of Naval Research", p. 19
REBCO	Óxido de terras raras Bário-Cobre, p. 1
YBCO	Óxido de Ítrio-Bário-Cobre ("Yttrium Barium Copper Oxide"), p. 2

Capítulo 1

Introdução

Blocos supercondutores maciços e fitas supercondutoras empilhadas de alta temperatura crítica (*High Temperature Superconductors* - HTS) podem ser magnetizados e funcionar como elementos aprisionadores de fluxo magnético, atuando como ímãs que alcançam campos magnéticos mais intensos que os ímãs convencionais [1]. Isso os torna favoráveis para aplicações elétricas onde são exigidos altos campos magnéticos (> 2 T). Os primeiros equipamentos elétricos desenvolvidos com os materiais HTS utilizavam os supercondutores em formato de bloco maciço [2], devido à dificuldade na produção de fitas em grandes quantidades. Entretanto, alguns projetos também foram desenvolvidos com fitas de primeira geração (1G) [3], mas a recente evolução no processo de produção de fitas supercondutoras de segunda geração (2G) está proporcionando diversas aplicações em larga escala. Essas fitas apresentam elevados valores de corrente crítica em nitrogênio líquido (LN₂) a 77K (-196,15 °C), de até 600 A, para uma fita com 0,1 mm de espessura e 12 mm de largura, valores de corrente crítica muito superiores aos obtidos com blocos supercondutores maciços [4]. Quando as fitas 2G são empilhadas [5, 6], apresentam-se como uma alternativa de substituição aos blocos maciços, visto que esses blocos não são produzidos em escala industrial. Alguns trabalhos na literatura demonstraram com sucesso o uso das fitas supercondutoras 2G empilhadas em levitação supercondutora [7–10], e principalmente em máquinas [11–15].

Desde a década de 1960, máquinas tem sido construídas usando materiais supercondutores de baixa temperatura crítica (*Low Temperature Superconductors* - LTS) [16]. No entanto, em 1986 supercondutores de óxido-cerâmicos foram descobertos [17] tendo os compostos Bi-Sr-Ca-Cu-O [18] e RE-Ba-Cu-O (RE= terra rara) [19] exemplares cujas temperaturas críticas (T_c) são acima da temperatura de ebulição do nitrogênio líquido (77 K), aumentando o interesse no desenvolvimento de máquinas utilizando esses materiais [20].

As primeiras máquinas supercondutoras usando materiais HTS foram construídas com fitas 1G e blocos de YBCO [21–24]. Contudo os estudos recentes [11–15]

mostraram que máquinas que empregam fitas 2G HTS de YBCO empilhadas têm maior potencial que os blocos em razão da maior capacidade de corrente, da redução de volume e peso, da flexibilidade mecânica e do aprisionamento de fluxo magnético.

As fitas 2G também apresentam algumas vantagens em relação às 1G. Por exemplo, quando um campo é aplicado, a redução da densidade de corrente crítica é menor nas fitas 2G, considerando-se a temperatura do nitrogênio líquido. Igualmente, nas fitas 2G, os centros de aprisionamento são mais eficazes do que nas 1G [25].

A capacidade das fitas 2G HTS em aprisionar fluxo magnético está relacionada aos centros de aprisionamento (*pinning centers*) [26], que advém das imperfeições inseridas ou inerentes ao material e a dinâmica dos vórtices que funcionam como dipolos magnéticos e circundam os fluxóides [27]. Esses fluxóides são pequenas porções de fluxo magnético quantizadas que penetram os materiais supercondutores do tipo II na presença de um campo magnético externo, como será visto com mais detalhes na seção 2.1.3. Portanto, a operação da máquina supercondutora desenvolvida consiste na interação do campo magnético variável (campo girante) gerado no estator não-supercondutor com o fluxo magnético aprisionado nas fitas 2G HTS empilhadas em formato espiral no rotor. Quando as bobinas do estator são alimentadas, o campo girante produzido gera laços de correntes induzidas nas fitas 2G HTS empilhadas, que espelham os polos do estator no rotor. Desta forma, surge no interior do supercondutor uma densidade de força de Lorentz, descrita pela equação 1.1, em que \mathbf{J} é a densidade de corrente e \mathbf{B} é densidade de fluxo magnético. A densidade de força de Lorentz é fruto da interação entre os fluxóides e os elétrons da corrente induzida.

$$\mathbf{F}_L = \int \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (1.1)$$

Essa densidade de força tende a deslocar os vórtices, que devido aos defeitos e impurezas no material, geram uma densidade de força contrária a essa movimentação, que atua no sentido oposto e é denominada densidade de força de aprisionamento, F_{ap} . Logo, existem essas duas densidades de forças atuando nas fitas supercondutoras. Enquanto $F_{ap} > F_L$, os vórtices são estáticos, caso contrário, $F_L > F_{ap}$, os vórtices começam a se deslocar com velocidade \mathbf{u} . Assim, surge uma dissipação de energia devido a indução de um campo elétrico (\mathbf{E}), determinado pela equação 1.2.

$$\mathbf{E} = \mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (1.2)$$

Neste contexto, com base no princípio apresentado, baseia-se a máquina supercondutora desenvolvida nesta tese. Quando uma carga é adicionada ao eixo da máquina, um torque de carga (T_{Carga}) surge na direção contrária ao do torque gerado pela força de aprisionamento (T_{fap}). Se o torque da carga é menor que o torque gerado pela força de aprisionamento, a rede de vórtices se mantém estática

e o motor opera em regime síncrono, sem apresentar perdas, girando na velocidade síncrona. Do contrário, haverá o deslocamento da rede de vórtices, não permitindo que a máquina alcance a velocidade síncrona [28].

Um melhor entendimento do funcionamento da máquina proposta pode ser obtido observando a figura 1.1.

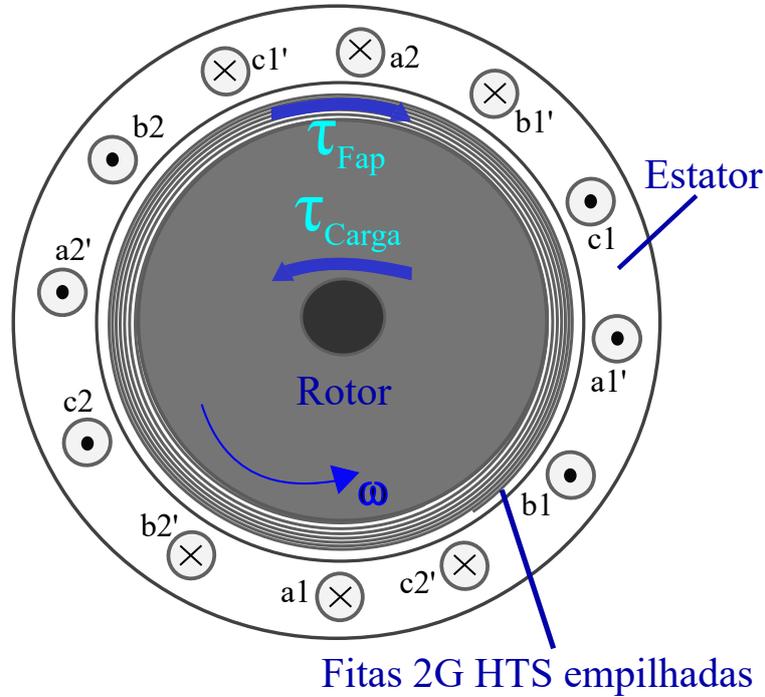


Figura 1.1: Esquema representativo da máquina supercondutora, em que a, b e c indicam as três fases, os números 1 e 2 representam duas bobinas por fase e \times e \bullet são indicações de entrada e saída da corrente, respectivamente.

A máquina supercondutora desenvolvida nesta tese apresenta um rotor construído com fitas 2G empilhadas espiralmente e um estator convencional. Foram realizados testes em laboratório em protótipos de bancada em banho de nitrogênio líquido a 77K. A partir dos ensaios foi possível analisar o comportamento e as características da máquina (conjugado, corrente, tensão e potência) operando tanto como motor quanto como gerador. Essa configuração apresenta um aumento na capacidade de aprisionamento do fluxo no rotor, o que, conseqüentemente, aumenta o torque de operação da máquina.

A configuração de fitas empilhadas dispostas no rotor foi proposta em [13]. Naquele trabalho, através de um ensaio quase estático, foi feita a prova do conceito e o resultado obtido foi promissor. No entanto, esse conceito nunca havia sido estudado de forma aprofundada como está sendo feito nesta tese.

Fazendo uma analogia a uma máquina convencional, a operação dessa desenvolvida se assemelha a de histerese [29]. Em que o conjugado eletromagnético é

gerado pelo efeito da histerese magnética [30]. O rotor é composto por um anel externo de material magnético duro e uma parte interna como suporte desse anel, que pode ser ferromagnética ou não. Os materiais duros retêm fluxo magnético e são difíceis de serem desmagnetizados [31]. Portanto, esses funcionam como ímãs de campo preso em máquinas síncronas de histerese assim como os empilhamentos¹ 2G nas supercondutoras. As vantagens da máquina de histerese também podem ser trazidas de modo análogo para a supercondutora, como por exemplo: não há necessidade de equipamentos auxiliares na partida diferente das outras máquinas síncronas, operação silenciosa e consegue-se torque e aceleração praticamente constantes [32].

1.1 Motivação

Diversas aplicações demandam máquinas que possuam alta densidade de potência, ou seja, máquinas que entreguem uma potência de eixo maior e que possuam um volume e peso menor que as convencionais. Exemplos de aplicações dessas máquinas são: propulsão de navios, aerogeradores e aviões elétricos [33–35]. Neste contexto, as máquinas supercondutoras podem apresentar as características necessárias das aplicações supracitadas. Como as máquinas supercondutoras com fitas 2G empilhadas foram pouco estudadas na literatura, há uma clara lacuna tecnológica, razão pela qual foi desenvolvido o presente trabalho.

1.2 Objetivo

Esta tese tem como objetivo projetar, construir e estudar uma configuração de máquina elétrica supercondutora com fitas supercondutoras de segunda geração dispostas em espiral no rotor. Pretende-se realizar uma investigação aprofundada das características dessa máquina e mostrar que ela apresenta potencial para diversas aplicações que exigem alta densidade de potência. A partir de suas características elétricas, magnéticas e mecânicas, que serão exploradas nesta tese, será possível modelar essa máquina a fim de no futuro escalonar esse conceito para aplicações práticas.

1.3 Contribuições desta Tese

Esta tese foi motivada na possibilidade de uma investigação profunda dessa configuração de máquina com empilhamento 2G em espiral no rotor, em que a ideia foi apresentada em [13], mas que naquele trabalho não foram exploradas as suas

¹São os enrolamentos superpostos.

características de funcionamento. A originalidade desta tese está na exploração aprofundada desse tipo de máquina, apresentando as características de operação dela e abrindo campo para uma nova linha de pesquisa.

A tese desenvolveu três protótipos com núcleo de materiais diferentes com o intuito de investigar a dispersão de fluxo no gap e a redução do volume e do peso da máquina supercondutora em relação à convencional. Na superfície dos rotores foram variadas a quantidade de empilhamento 2G e o número de camadas de fita objetivando examinar o comportamento do fluxo magnético e da densidade de corrente induzida no rotor supercondutor. Junto a isso, foi feito o desenvolvimento de um sistema de medidas para ensaios com protótipos de máquina supercondutora em nitrogênio líquido.

Este foi o primeiro passo para a compreensão desse tipo de máquina, com o intuito de que esse conceito amadureça tecnologicamente e possa ter futuras aplicações. Espere-se que os resultados apresentados nesta tese ajudem neste processo.

1.4 Organização do Texto

Para atingir o objetivo apresentado, este trabalho está dividido em seis capítulos. Neste primeiro, é feita a introdução com o objetivo, a motivação e a apresentação do estudo. No segundo capítulo, é realizada a revisão bibliográfica com os fundamentos da supercondutividade para aplicação em máquinas supercondutoras. Nessa revisão são apresentadas as propriedades e as principais características dos materiais supercondutores, além do histórico e do estado da arte dessa tecnologia. No terceiro capítulo, será apresentado o projeto de máquina supercondutora mostrando os protótipos construídos e os materiais utilizados na sua construção. Além disso, serão apresentados também os projetos do criostato e dos sistemas de medição. No capítulo quatro serão mostrados os procedimentos experimentais e os ensaios realizados. O capítulo 5 relata os resultados obtidos e as respectivas discussões. Por fim, no sexto e último capítulo, encontram-se as conclusões e trabalhos futuros sugeridos para a continuidade dos estudos dessa configuração de máquina supercondutora.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica e Conceitos de Máquinas Supercondutoras

Neste capítulo será feita a apresentação fenomenológica da supercondutividade, acompanhada de uma revisão bibliográfica sobre as máquinas elétricas que utilizam os materiais supercondutores. Os conceitos que serão abordados auxiliarão no entendimento de como a máquina com empilhamentos 2G em espiral no rotor funciona.

2.1 Apresentação Fenomenológica da Supercondutividade

Nesta seção serão apresentados alguns dos principais conceitos referentes à supercondutividade com foco na aplicação em máquinas, abordando de forma breve as propriedades, teorias e os fundamentos que caracterizam os materiais supercondutores comerciais e o potencial deles para a aplicação proposta.

2.1.1 Propriedades Elementares dos Supercondutores

Os materiais supercondutores apresentam duas propriedades específicas que são a resistividade nula (em corrente contínua) e o diamagnetismo perfeito (efeito Meissner). A inexistência de resistividade elétrica em um material supercondutor, quando submetido a uma temperatura abaixo da crítica, T_c , foi a primeira propriedade descrita por Heike Kamerlingh Onnes em 1911 [36, 37]. Além da temperatura, um material pode perder essa característica supercondutora de acordo com o comportamento de outras duas variáveis: (i) o campo magnético e (ii) a densidade de corrente que o material transporta [38]. A segunda propriedade que descreve um supercondutor é o efeito Meissner, apresentado por Walter Meissner e Robert Ochsenfeld,

em 1933 [39], que consiste na exclusão total do campo magnético do interior de um supercondutor. No entanto, na época foi uma grande surpresa para eles, visto que, a exclusão do fluxo magnético independe do estado inicial, isto é, se havia campo ou não antes da transição de fase do estado normal para o supercondutor.

Alguns modelos e teorias se propuseram a explicar o fenômeno da supercondutividade. A primeira teoria foi desenvolvida em 1935 pelos irmãos Fritz e Hans London [40]. Mesmo sem uma interpretação microscópica do fenômeno, eles conseguiram prever o comportamento diamagnético e das correntes no interior do supercondutor. Através de um parâmetro denominado comprimento de penetração de London (λ), foi mostrado que o campo magnético caía exponencialmente no interior do supercondutor. Anos depois, outra contribuição foi dada por Pippard [41] que estabeleceu o comprimento de coerência (ξ) dos superelétrons.

Em seguida, em 1950, Ginzburg e Landau apresentaram uma teoria fenomenológica bem mais ampla, relacionando o comprimento de penetração de London com o comprimento de coerência de Pippard, através de um parâmetro de ordem² ψ que eles introduziram para descrever o estado supercondutor [42]. Na fase supercondutora, que é a fase ordenada, $\psi \neq 0$, enquanto que para temperaturas acima de T_c o $\psi = 0$.

No entanto, o grande progresso na compreensão teórica da supercondutividade foi introduzido em 1957 pela teoria microscópica de John Bardeen, Leon Neil Cooper e John Robert Schrieffer, nomeada de teoria BCS, em homenagem as iniciais dos sobrenomes dos três pesquisadores [26, 43]. Segundo essa teoria, na transição para o estado supercondutor, os elétrons condensam-se formando pares, que são denominados pares de Cooper ou superelétrons [43, 44]. Esses superelétrons podem se mover na rede cristalina sem apresentar perda de energia.

Existem três parâmetros críticos que podem causar dissipação de energia e destruir a supercondutividade do material, que são temperatura crítica (T_c), densidade de corrente crítica (J_c) e campo magnético crítico (H_c) apresentados na figura 2.1.

²Mede a ordem nos limites de uma transição de fase para distinguir se a fase é ordenada ou não.

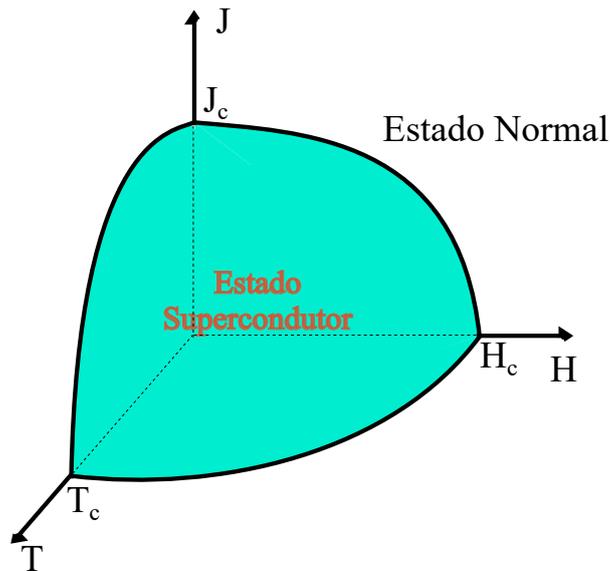


Figura 2.1: Ilustração da superfície que separa as regiões normal e supercondutora.

Como será elucidado ao longo dessa seção os materiais supercondutores podem ser classificados em tipo I e tipo II. A figura 2.1 ilustra bem o comportamento dos supercondutores do tipo I. Para os materiais do tipo II a densidade de corrente J_c provoca dissipação de energia pela movimentação dos vórtices, mas não é a densidade de corrente responsável por quebrar os pares de Cooper e anular o estado supercondutor. Nesses materiais existe um valor teórico de densidade de corrente denominado corrente de deparamento (*Depairing current, J_d*). Essa densidade de corrente é maior que J_c , mas é difícil de ser alcançada na prática, pois exigiria um nível de aprisionamento de fluxo muito alto [45, 46]. O conceito de aprisionamento de fluxo será apresentado na subseção 2.1.3.

Para classificar os supercondutores em tipo I e tipo II, observe o diagrama de fase da figura 2.2.

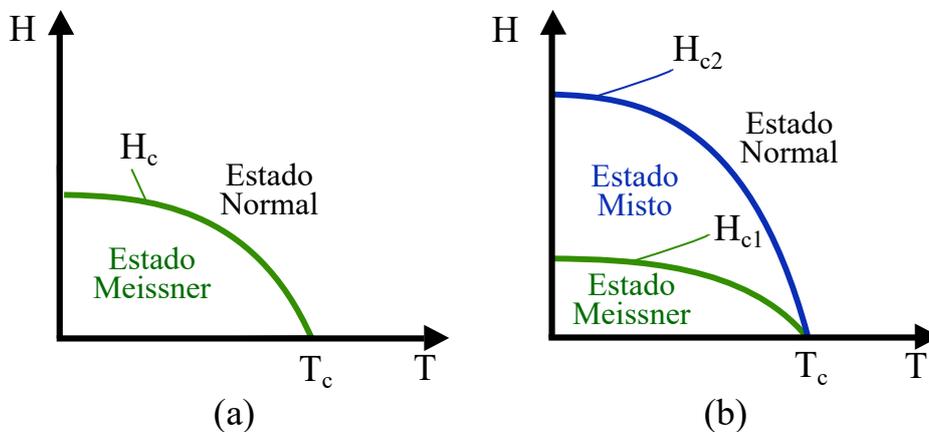


Figura 2.2: Diagrama de fase para os supercondutores: a) tipo I e b) tipo II.

Os supercondutores do tipo I, que geralmente são constituídos por elementos metálicos, não apresentam penetração de fluxo magnético no seu interior, ou seja, apresentam o efeito Meissner pleno [37]. Esses supercondutores apresentam um campo magnético crítico baixo, o que impossibilita a utilização deles em aplicações práticas.

O outro tipo de supercondutor existente é denominado do tipo II, e este apresenta um comportamento diferente, pois, à medida que um campo externo é aplicado no material, o fluxo magnético pode passar a penetrá-lo de forma quantizada. Esses supercondutores dispõem de dois valores de campos críticos, H_{c1} e H_{c2} . Quando o campo externo aplicado está abaixo de H_{c1} , o supercondutor encontra-se no estado Meissner, comportando-se do mesmo modo que os supercondutores do tipo I. Já para o caso de $H_{c1} < H < H_{c2}$, tem-se o estado misto, no qual existe uma penetração parcial do fluxo magnético [37]. Na subseção 2.1.3 será apresentado com mais detalhes o estado misto para melhor entendimento desse conceito. Acima do valor de H_{c2} , há uma transição do estado supercondutor para o estado normal. Os materiais supercondutores do tipo II são ideais para aplicações práticas, pois neles existem “defeitos” que são inseridos ou inerentes e que atuam como centros de aprisionamento de fluxo magnético. Para melhor distinção e classificação dos supercondutores nesses dois tipos, existem dois parâmetros muito importantes que surgiram das teorias mencionadas anteriormente, e que serão discutidos a seguir.

2.1.2 Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência

Os parâmetros relevantes que permitem classificar os supercondutores em tipo I e tipo II são: (i) a profundidade de penetração (λ) e (ii) o comprimento de coerência (ξ). A primeira é definida como a distância média característica no qual o campo magnético externo penetra a região supercondutora a partir da interface com a região normal [37, 47]. A profundidade de penetração depende da temperatura, pois, à medida que a esta aumenta, a densidade pares de Cooper diminui. Deste modo, não existirão esses pares quando a temperatura crítica for atingida, ou seja, acima de T_c o campo magnético preenche o material supercondutor [26].

O segundo pode ser exposto como a distância pela qual a densidade de superelétrons³ aumenta na fronteira entre a região supercondutora e a normal [37]. Esse parâmetro também depende da temperatura, porque, à medida que a temperatura se aproxima do seu valor crítico, os superelétrons diminuem. A figura 2.3 mostra a classificação dos supercondutores com relação aos parâmetros ξ e λ , em que η_s é a

³São pares de elétrons unidos por uma força interativa elétron-fônon positiva, que podem passar pela rede cristalina sem resistência e sem colisões.

densidade de superelétrons.

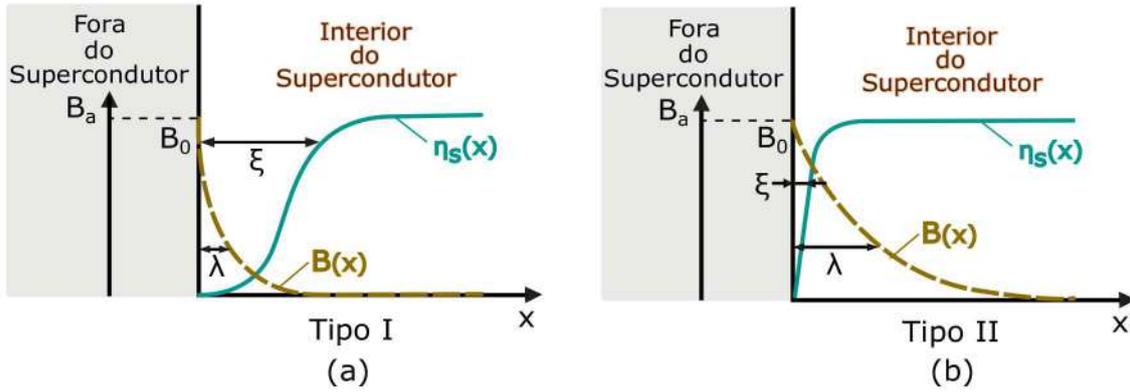


Figura 2.3: Classificação dos supercondutores em (a) tipo I e (b) tipo II pelos parâmetros ξ e λ . Adaptada de [48].

Nos supercondutores do tipo I verifica-se que ξ é maior que λ , acarretando em uma pequena penetração de campo magnético na fronteira do material supercondutor [37]. Já para os supercondutores do tipo II λ é superior à ξ causando maior penetração de fluxo no material.

A partir desses dois parâmetros característicos se define o parâmetro de Ginzburg-Landau [42] como:

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (2.1)$$

Esse parâmetro é relevante para a determinação da densidade de energia de superfície [49]. Quando essa densidade é nula $\kappa = 1/\sqrt{2}$, caso seja positiva $\kappa < 1/\sqrt{2}$ e os supercondutores são classificados do tipo I, na condição negativa $\kappa > 1/\sqrt{2}$ e os supercondutores são denominados do tipo II. Portanto, nesses materiais quando um campo magnético externo é aplicado, há um aumento contínuo na penetração de fluxo, começando no campo magnético crítico H_{c1} até atingir o campo crítico H_{c2} , onde o material transita para o estado normal. A penetração de fluxo nesse intervalo de campo magnético permite a coexistência de regiões supercondutoras e normais, logo o material não se encontra no estado Meissner, mas sim no estado misto como será mostrado na seção 2.1.3. Em razão dessa penetração parcial de fluxo, a energia para aprisionar o campo é menor em H_{c2} e maior em H_{c1} [50]. A figura 2.4 mostra o comportamento dos dois tipos de supercondutores quando submetidos a campo magnético externo.

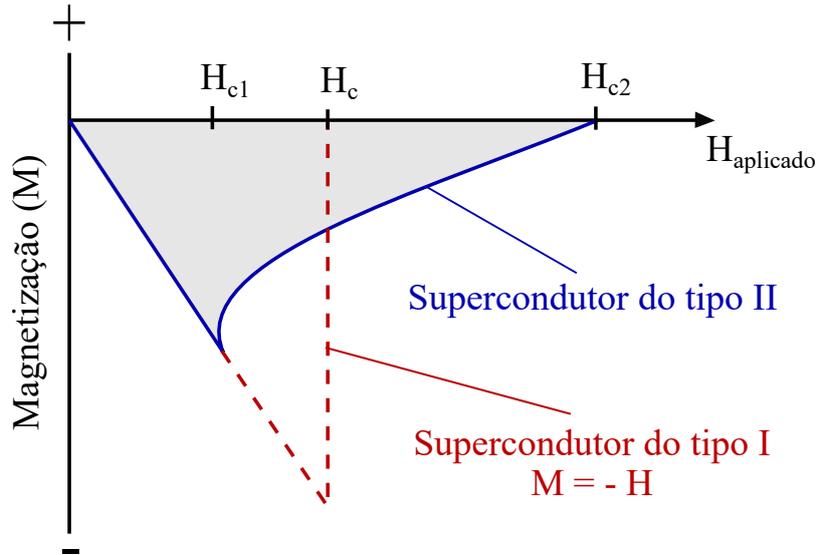


Figura 2.4: Comportamento da magnetização dos supercondutores do tipo I e II quando um campo externo é aplicado. Adaptada de [37].

No supercondutor do tipo I, o fluxo magnético é repellido do interior do material, produzindo uma magnetização que aumenta com o campo magnético até alcançar o campo crítico H_c . Ao atingir H_c , a magnetização cai subitamente para zero como em um condutor normal. Já no supercondutor do tipo II, em que há penetração de fluxo entre os dois campos magnéticos críticos H_{c1} e H_{c2} , o comportamento é diferente. Até H_{c1} o material apresenta um comportamento igual ao do tipo I. Quando esse campo é superado, o fluxo magnético começa a penetrar parcialmente o supercondutor e a magnetização diminui até zerar em H_{c2} . Acima de H_{c2} o material transita para o estado normal [37].

2.1.3 Estado Misto e Aprisionamento de Fluxo magnético

No estado misto coexistem regiões diamagnéticas com outras por onde o fluxo magnético consegue penetrar no material [42]. Essa penetração ocorre de forma quantizada e cada quantum de fluxo é denominado de fluxóide [42]. Cada fluxóide apresenta um fluxo magnético quantizado ϕ_0 , que é determinado pela expressão 2.2:

$$\phi_0 = \frac{h}{2e} = \frac{6,6262 \times 10^{-34}}{2 \times 1,6022 \times 10^{-19}} = 2,068 \times 10^{-15} \text{ Weber}, \quad (2.2)$$

em que h é a constante de Planck e e representa a carga elementar. Os fluxóides encontram-se distribuídos de forma hexagonal na rede, conforme exposto por Abrikosov em 1957 [42]. Por isso, essa rede é denominada rede de Abrikosov e é apresentada na figura 2.5.

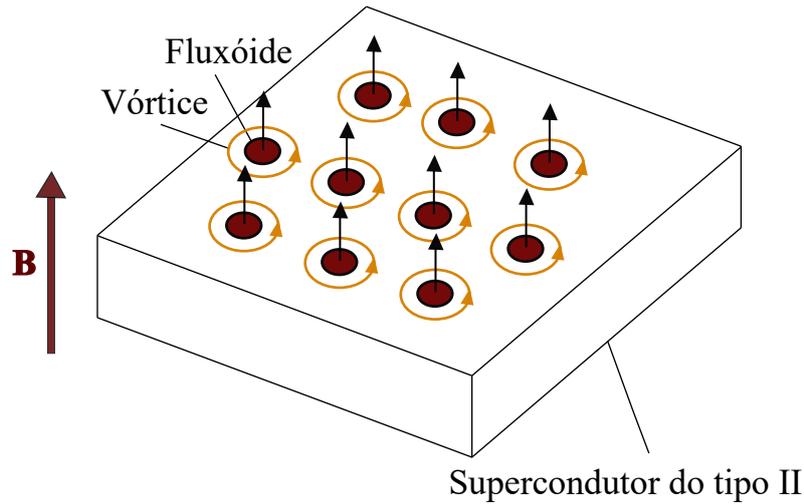


Figura 2.5: Rede de Abrikosov em um supercondutor do tipo II

Nos supercondutores do tipo II, em condições de equilíbrio, quando o campo magnético aumenta atingindo o limite inferior H_{c1} , os fluxóides aparecem. Então, se o campo magnético aumentar, mais fluxóides penetrarão no material. No limite, quando H_{c2} for atingido, as regiões não supercondutoras (núcleos em estado normal) se sobrepõem. Deste modo, os vórtices serão comprimidos e desaparecerão, destruindo a supercondutividade e todo o material passará para o estado normal [37].

Nesses supercondutores, a condução de corrente sem perda é limitada pelo movimento dos vórtices [51]. No entanto, defeitos mecânicos na estrutura cristalina são induzidos ou inerentes a esses materiais para possibilitar o transporte de corrente no supercondutor sem dissipação de energia. A interação de vórtices com as imperfeições no material supercondutor funcionam como centros de aprisionamento, os quais exercem uma força que imobiliza ou fixa os vórtices, de modo que não haja dissipação [27]. A força dessa interação de fixação determina a corrente máxima sem perdas que o supercondutor pode suportar [27].

Esses defeitos são essenciais para o aprisionamento de vórtices em LTS e HTS. Os centros de aprisionamento inseridos artificialmente são empregados em ambos. As principais diferenças entre os LTS e os HTS são que os supercondutores de alta temperatura crítica têm comprimentos de coerência muito menores e são altamente anisotrópicos. Essa anisotropia exige que os HTS sejam altamente texturizados para transportar correntes significativas [52]. O processamento necessário para produzir um fio supercondutor texturizado é feito de modo termomecânico no caso do processo *powder – in – tube*, ou por deposição, no caso dos condutores revestidos (*Coated Conductors*) [52]. Também devido a essa alta anisotropia, a força de aprisionamento em HTS varia bastante com o ângulo do campo magnético aplicado, pois os fluxóides têm diâmetro de poucos nanômetros por causa do pequeno comprimento

de coerência, requerendo centros de aprisionamento nanométricos [53].

Nos materiais HTS, como os de Bi-Sr-Ca-Cu-O e os de RE-Ba-Cu-O, que podem ser refrigerados em nitrogênio líquido, tende a ocorrer movimentação de vórtices por ativação térmica [27]. A introdução de centros de aprisionamento eficazes reduz esses efeitos. Ao longo dos anos o *pinning* dos HTS têm sido aprimorado, proporcionando o aumento da corrente crítica em altos campos [53]. Um exemplo disso são as fitas 2G com *Advanced Pinning* [54]. Mas, quanto maior o campo magnético de operação, menor deve ser a temperatura de refrigeração. Em função disso, quando os materiais HTS são submetidos a altos campos (> 2 T), a temperatura tem que ser menor do que 77K, em torno de 30-40 K ou até menor, dependendo da corrente e do campo magnético aplicado [27].

Apesar da maior capacidade de condução de corrente e o menor custo de refrigeração dos materiais HTS, esses ainda não são utilizados em larga escala. Comercialmente são encontrados em formato de blocos maciços ou fitas supercondutoras.

2.1.4 Materiais Supercondutores - Blocos Maciços e Fitas Supercondutoras 2G

Os primeiros materiais supercondutores HTS produzidos em escala comercial que podiam ser refrigerados com nitrogênio líquido tinham o formato de bloco maciço [55]. Esses blocos são preparados pelos compostos de Bi-Sr-Ca-Cu-O e de RE-Ba-Cu-O. Dos compostos de Bi-Sr-Ca-Cu-O as fases Bi-2212 e Bi-2223 são as mais utilizadas [56]. Já em relação ao RE-Ba-Cu-O, o Ítrio (Y) é o elemento terra rara mais utilizado, mas outros elementos como Gadolínio (Gd) e Samário (Sm) também são usados[57].

Os blocos maciços alcançam altos valores de densidade de corrente crítica (J_c) e tem a capacidade de reter campo magnético. No entanto, o uso deles é restrito pela dificuldade de produção de blocos homogêneos, característica intrínseca da maioria dos materiais cerâmicos. Assim, se um campo magnético acima de 2 T for aplicado aos blocos, grande quantidade deste será retido, gerando uma força eletromagnética considerável, logo a característica heterogênea do cerâmico pode favorecer a formação de fraturas, que em última instância podem danificar o dispositivo [55, 58]. Aliado a isto, também há dificuldade para produção dos blocos maciços em larga escala, já que a produção é ainda artesanal e há excessiva perda de material ao longo do processo. Nos dias de hoje, os blocos ainda são utilizados em dispositivos supercondutores [2], mas devido a esses desafios apresentados, a tendência tem sido a utilização das fitas supercondutoras 2G.

Vários fatores colocam as fitas 2G em vantagem sobre os blocos, como: produção em larga escala, são produtos comerciais e existem vários fabricantes no mundo.

Dentre os fabricantes de fitas 2G, podem ser destacados: SuNam (Coreia), SuperPower (EUA), American Superconductors - AMSC (EUA), Superconductor Technology Inc. - STI (EUA), Superox (Rússia), Bruker (Alemanha), Theva (Alemanha), Fujikura (Japão), Shanghai Superconductor Technology - SST (China) e Innova Superconductor Technology - InnoST (China).

Essas fitas HTS são divididas em duas gerações distintas que, conforme os seus compostos, podem ser denominados de primeira geração (1G) ou de segunda geração (2G).

As fitas supercondutoras de primeira geração são produzidas utilizando a família de compostos BSCCO. Assim como nos *bulks*, para a composição dessas fitas também os compostos mais utilizados são Bi-2212 e Bi-2223, em razão da maior T_c e maior densidade de corrente crítica [59]. Mas, J_c das fitas 1G é muito mais afetada pelo campo magnético do que nas de segunda geração. Quando um campo é aplicado sobre a superfície dessas fitas, a redução da corrente crítica pode ser contrabalançada com a redução da temperatura, ou seja, quanto mais baixa a temperatura, menor será o efeito do campo magnético aplicado na diminuição da corrente crítica. No entanto, para efeito de uso dessas fitas em equipamentos tecnológicos, a redução da temperatura aumentaria os custos de refrigeração, o que também acontece nas fitas 2G.

As fitas supercondutoras de segunda geração HTS são produzidas com materiais REBCO, que representaram uma revolução nas aplicações de supercondutores, visto que esses compostos têm um desempenho superior em campos magnéticos elevados. Essas fitas são produzidas com multicamadas orientadas e depositadas sobre um substrato metálico, com potencial para a produção em larga escala e redução de custos [55].

Além das fitas de BSCCO e de REBCO, existem também os fios de diboreto de magnésio (MgB_2), que apresentam temperatura crítica de 39K em campo zero. Apesar da temperatura alta, difere dos HTS, pois possui comprimento de coerência alto e baixa anisotropia [60]. Uma das aplicações de MgB_2 seria em magnetos supercondutores, mas ainda carece de maior maturidade tecnológica [60].

Nesse trabalho foram utilizadas fitas 2G HTS do fabricante SuperPower para a construção dos protótipos de máquinas supercondutoras. Os custos dessas fitas variam de 60 a 120 euros por metro. Nos dois primeiros protótipos foram utilizados o modelo de fita SF12050 de 2013 e no terceiro protótipo o modelo SF12100 de 2012. A figura 2.6 apresenta um esquema das fitas da SuperPower utilizadas, com o intuito de mostrar as espessuras de cada camada que as constituem. Essas fitas não possuem uma camada externa estabilizadora, como o revestimento de cobre para reduzir a sua espessura.

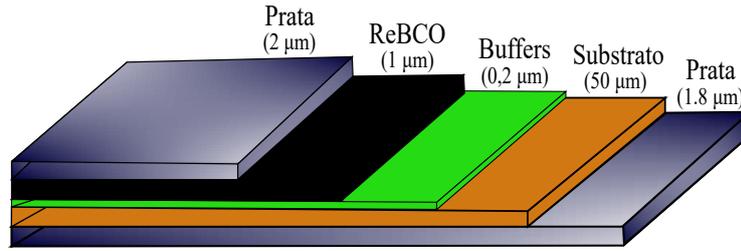


Figura 2.6: Configuração da fita supercondutora da SuperPower. Adaptada de [61].

Essas fitas são comerciais, com espessura entre 30 e 100 µm e com a largura variando de 3 a 12 mm. O esquema da fita mostrado na figura 2.6 apresenta as camadas da fita supercondutora do modelo SF12050. Nesse esquema é importante notar que a camada supercondutora é de 1 µm de espessura e por essa camada flui correntes entre 200 e 600 A, valor muito superior à que um condutor de cobre poderia transportar, respeitando as respectivas dimensões.

A alta qualidade e homogeneidade das fitas 2G HTS asseguram aos empilhamentos algumas vantagens com relação aos blocos maciços. Eles podem apresentar maior densidade de corrente, boas propriedades mecânicas - apesar de serem sensíveis devido à pequena espessura do supercondutor - maior capacidade de aprisionamento de fluxo magnético, maior flexibilidade mecânica e menores volume e peso [11, 12, 14]. Os empilhamentos de fita 2G também são vantajosos comparado com as bobinas usadas como enrolamentos, porque neles não são necessários terminais de corrente, o que reduz a complexidade da construção e os gradientes térmicos [15]. Portanto, em aplicações como máquinas elétricas há a perspectiva de que os blocos maciços e bobinas de fitas supercondutoras possam ser substituídos por empilhamentos de fitas 2G.

2.1.5 Densidade de Corrente Crítica em Supercondutores HTS

A densidade de corrente crítica J_c é definida como a densidade de corrente em que o material supercondutor começa a apresentar dissipação de energia [62, 63].

Quando J_c é atingida, os fluxóides começam a se mover, como citado no item 2.1.3. Nesse momento, surge um campo elétrico crítico, E_c , adotado na literatura como sendo 1 µV/cm. A expressão 2.3 que relaciona o campo elétrico com a densidade de corrente crítica que flui em um supercondutor é dada por uma lei de potência [64], tal que:

$$E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2.3)$$

em que E é o campo elétrico ao longo do supercondutor e J é a densidade de corrente

de transporte. O índice n é denominado de índice de transição e pode variar para os diversos materiais supercondutores HTS existentes [64].

Relacionando a lei de potência com a lei de ohm é possível obter a resistividade (ρ) não linear dos materiais supercondutores 2G HTS, que é dada pela expressão 2.4:

$$\rho(J) = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n-1} \quad (2.4)$$

Deste modo, a caracterização dos materiais supercondutores se baseia no levantamento da curva $E - J$, observada na figura 2.7.

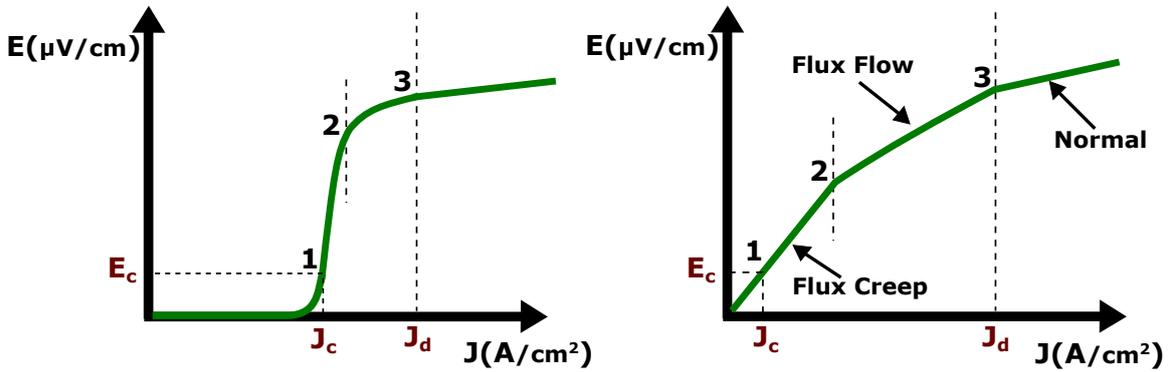


Figura 2.7: (a) Esboço da curva $E-J$ para a determinação das fases de transição supercondutora/normal, (b) Curva em escala logarítmica mostrando os três estágios até atingir a transição completa. Adaptada de [62].

As figuras 2.7 a e 2.7 b mostram o comportamento da curva $E - J$ desde o estado supercondutor até atingir por completo o estado normal, sendo a figura 2.7 b, a curva em escala logarítmica da figura 2.7 a. Analisando ambas as figuras a partir da origem até o ponto 1, o material encontra-se no estado supercondutor, pois a queda de tensão através do material é menor que o campo elétrico crítico E_c especificado na literatura. Geralmente esse campo é convencionado $1 \mu\text{V/cm}$ em auto-campo a 77 K [65]. Acima desse valor de campo elétrico crítico, o material continua supercondutor mas com dissipação de calor, passando por dois estágios de transição antes de atingir por completo o estado normal.

O primeiro estágio, entre os pontos 1 e 2, é denominado de Flux Creep. Nessa etapa, o movimento dos vórtices é lento e a força induzida de Lorentz tem uma magnitude próxima ao da força de aprisionamento, ($n \approx 20$ a 30), em 77K [62, 66–68]. O segundo estágio, entre 2 e 3, é denominado Flux Flow, onde os vórtices se movem livremente pelo supercondutor e a força de Lorentz é bem maior que a força de aprisionamento, ($n \approx 2$ a 4)[62, 66, 68]. A partir do ponto 3, o material passa

por completo para o estado normal resistivo, pois acontece a dissociação dos superelétrons. Nesse momento os vórtices se dispersam, destruindo a rede de Abrikosov, ($n = 1$). Esses estágios podem ser representados por modelos de simulação.

2.2 Modelos e Formulações para a Simulação da Máquina Supercondutora

Para a representação dos estágios mencionados na subseção 2.1.5 (flux creep e flux flow), em ferramentas de simulação, deve ser introduzida a interdependência entre a densidade de corrente, o campo magnético e a temperatura, sendo a densidade de corrente crítica uma função dos outros dois parâmetros. Existem alguns modelos que implementam essa interdependência [69]. Dentre esses pode-se destacar o modelo de Anderson-Kim [70] dado pela seguinte equação empírica:

$$J_c(B, T) = \frac{J_{c0}(T)}{\left(1 + \frac{B}{B_0}\right)^\beta}, \quad (2.5)$$

em que $J_c(B, T)$ é a densidade de corrente crítica local dependente da temperatura e da densidade de fluxo magnético B . B_0 e β dependem do material, e podem ser aproximados como constantes ou depender da temperatura, assim como J_{c0} que é a magnitude da densidade de corrente crítica sem campo magnético local. Esta equação pode ser usada tanto para os blocos supercondutores quanto para as fitas supercondutoras. No entanto, no caso das fitas supercondutoras, a equação 2.5 sofre algumas alterações, se transformando na equação empírica generalizada 2.6, visto que, as fitas exibem maior anisotropia em campo magnético, ou seja, a densidade de corrente crítica depende também do ângulo de incidência do campo magnético em relação a superfície da fita supercondutora [71].

$$J_c(B_\perp, B_\parallel) = J_{c0}(T) \left(1 + \frac{\sqrt{(B_\perp)^2 + k^2(B_\parallel)^2}}{B_0}\right)^{-\beta}, \quad (2.6)$$

em que k é o fator de anisotropia, β é a rapidez que J_c cai com o campo magnético, ambos variam com a temperatura e B_\perp e B_\parallel são a densidade de fluxo magnético perpendicular e paralelo a superfície da fita, respectivamente.

Essa nova configuração de máquina foi modelada em 2D, no programa de elementos finitos *COMSOL Multiphysics*, utilizando a formulação⁴ híbrida A-V-H para a análise do protótipo B e a formulação T-A para a análise do protótipo C [72–74]. O foco da tese é a parte experimental, mas essa modelagem foi importante para entender alguns efeitos e assim dar mais consistência aos resultados experi-

⁴É uma forma de se modelar problemas eletromagnéticos.

mentais. Essa modelagem foi apresentada em uma dissertação de mestrado que foi desenvolvida no LASUP [72] em paralelo com a tese. Os resultados obtidos foram apresentados em parte na dissertação [72] e a outra parte no artigo [73].

Para a análise do protótipo B foi utilizado a formulação A-V-H com os *stacks* 2G representados como blocos através da técnica de homogeneização. Essa formulação e o método de homogeneização foram utilizados pela facilidade de implementação.

2.2.1 Formulação A-V-H e a Técnica de Homogeneização

A formulação A-V-H foi apresentada na literatura pela primeira vez em 2018 [75], e ganhou destaque na análise de máquinas supercondutoras por agrupar as vantagens de duas formulações já conhecidas, A-V e H. A formulação A-V é antiga e muito utilizada para a simulação de máquinas elétricas. A partir das equações de Maxwell, para campos magnéticos variando lentamente no tempo, são feitas combinações para obter uma equação diferencial que é resolvida em termos do vetor potencial magnético \mathbf{A} e da densidade de corrente \mathbf{J} . A formulação H é bastante usada para calcular a densidade de corrente, perfis de campo e perdas AC em supercondutores de alta temperatura. Essa formulação também tem como base as equações de Maxwell para campos magnéticos com pouca variação no tempo. Como ponto de partida para o desenvolvimento do modelo são utilizados a lei de Faraday, a *Power Law* e a lei de Ampère. Nela foi possível dividir a máquina em regiões que contém supercondutores, resolvidas pela formulação H e regiões sem supercondutores determinadas pela formulação A-V. A linha que separa essas regiões é denominada linha tramodal, como mostra a figura 2.8, é ela que garante a continuidade entre elas [75]. Nas regiões H a fonte foi o campo elétrico das regiões A-V enquanto que nas regiões A-V a fonte foi o componente tangencial da intensidade de campo magnético das regiões H [73, 75]. Para lidar com o movimento no COMSOL existem dois sistemas de referências, uma fixa e outra móvel, em que podem incluir modelos A-V ou H [73, 75].

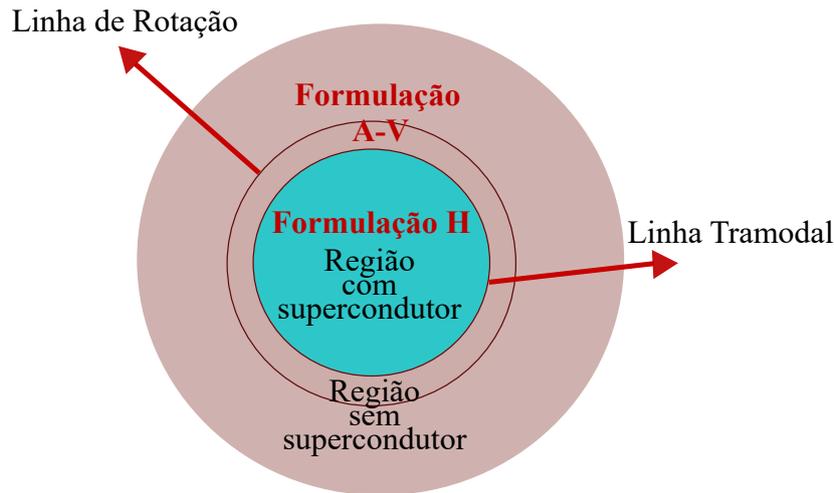


Figura 2.8: Representação da máquina com a separação das regiões com e sem supercondutor. Adaptada de [75].

Para modelar as fitas 2G empilhadas no protótipo B foi utilizada a técnica de homogeneização, que consiste em representar o *stack* como um bloco, como mostrado na figura 2.9, para simplificar o problema, de modo a reduzir o esforço e o tempo computacional. Visto que, as dimensões das fitas são bem reduzidas, como exemplo, as que foram utilizadas no empilhamento 2G do protótipo B, que possuem largura de 12 mm e espessura de 55 μm , bem pequenas se comparadas às dimensões da máquina. Como a resistividade da camada supercondutora é bem menor que a das outras camadas constituintes da fita, nessa técnica é considerada apenas a camada supercondutora [73, 75]. Outra aproximação é considerar que a distância ao longo do empilhamento é constante [73, 75].

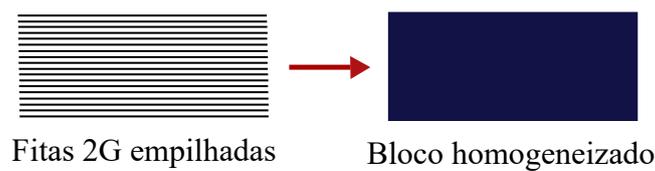


Figura 2.9: Representação da técnica de homogeneização. Adaptada de [72].

Essas aproximações são razoáveis e bons resultados foram obtidos com essa técnica. Para considerar a variação da densidade de corrente crítica com o campo magnético aplicado foi utilizado o modelo de Kim [73]. A grande vantagem da técnica de homogeneização é a facilidade na implementação, contudo, para a análise de empilhamentos 2G ela não leva em consideração os efeitos entre as camadas e por isso há perda de informações em relação a distribuição da corrente e da penetração de fluxo magnético camada por camada.

Com a formulação A-V-H e a técnica de homogeneização foram obtidos resultados

satisfatórios para uma primeira análise da máquina supercondutora [72, 73] que serão usados no capítulo 5 (de resultados) para esclarecer algumas características dos resultados experimentais. No entanto, para discretizar o problema e assim observar o comportamento da penetração de fluxo e a distribuição da densidade de corrente camada por camada do empilhamento 2G surgiu a necessidade de se usar outra formulação. Desta forma, foi considerada a possibilidade de utilizar a formulação T-A, em que a fita supercondutora é aproximada por uma linha de corrente para resolver o problema da alta proporção e assim discretizar o empilhamento 2G [76].

2.2.2 Formulação T-A

Essa formulação correlaciona o potencial vetor corrente \mathbf{T} , que representa a densidade de corrente como o rotacional de um vetor potencial, e o potencial vetor magnético, \mathbf{A} [74, 76]. Todos os domínios foram computados em A-V e a densidade de corrente nos supercondutores foi calculada usando a formulação T-A. [76]. A parte supercondutora foi computada usando a formulação T e a não supercondutora com a formulação A [76]. A densidade de corrente foi calculada pela formulação T e usada como fonte em A e a densidade de fluxo magnético foi calculada em A e usada como fonte em T. Assim foi possível evitar complicações numéricas que são geradas quando do uso da formulação A em supercondutores [74]. No protótipo C, os empilhamentos 2G foram aproximados por uma lâmina de corrente em espiral e o material supercondutor foi modelado com a *Power Law*. Também para introduzir a anisotropia do material foi utilizada a expressão elíptica apresentada na equação 2.6 [74]. A distribuição da densidade de corrente no stack 2G camada por camada e o torque obtido nessas simulações auxiliarão na compreensão e esclarecimento dos resultados experimentais obtidos com o protótipo C e apresentados no capítulo 5.

Na próxima seção serão apresentados alguns dos projetos de máquinas desenvolvidos ao longo da história, tanto com materiais HTS como também com LTS.

2.3 Máquinas Supercondutoras

Esta seção expõe o histórico da aplicação de materiais supercondutores em máquinas, além de apresentar a teoria e os tipos de máquinas supercondutoras existentes.

2.3.1 Histórico

Os primeiros registros de desenvolvimento de máquinas supercondutoras datam da década de 1960, coincidem com o desenvolvimento de compósitos multifilamentares LTS [77–79]. Desde essa data até meados de 1986, foram desenvolvidos vários

projetos de máquinas supercondutoras, todas com a mesma liga metálica nióbio titânio ($NbTi$) [80]. Isso porque o outro material supercondutor disponível na época, Nb_3Sn , era frágil e dificultava a fabricação de bobinas, sendo apropriado somente para aplicações com campos maiores que 8T [80], pois, nesse nível de campo não se usava fios de nióbio titânio. Para aplicações com campos menores o $NbTi$ apresentava um melhor benefício devido às suas excelentes propriedades mecânicas.

A principal aplicação dos fios de $NbTi$ foi em enrolamentos de campo de máquinas síncronas por serem alimentados em corrente contínua [81]. O uso desses fios em máquinas síncronas reduzia as perdas e aumentava a densidade de potência. Alguns desses projetos desenvolvidos com LTS serão apresentados a seguir.

Em 1971, um dos primeiros projetos de máquina utilizando esses fios no rotor foi desenvolvido e testado por um grupo do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) de *Cambridge*, EUA. Era uma máquina trifásica de 2 polos, 3600 rpm e potência de 80 kVA. Um dos grandes desafios desse projeto foi o sistema de refrigeração, uma vez que esse se situava na parte móvel da máquina. Tal projeto comprovou que um criostato rotativo de hélio poderia ser utilizado com sucesso em enrolamentos de campo rotativo supercondutores [77].

Outro projeto utilizando esses materiais data de 1978 e foi fruto de uma cooperação entre duas grandes empresas, a *Westinghouse* e a *General Electric* (GE), sendo financiado pela *Electric Power Research Institute* (EPRI). Ao longo do projeto foi desenvolvido um gerador de baixa tensão com enrolamentos de campo supercondutor com dois polos, 300 MVA e 3600 rpm [78].

Ainda nessa época, um outro projeto foi construído e testado com carga pela GE em 1979 [79]. Era um gerador de dois polos, 20 MVA e 3600 rpm, com os enrolamentos de campo em fios de $NbTi$, resfriado por imersão em hélio líquido e os enrolamentos de armadura, resfriado em água. Essa máquina foi submetida a alguns testes de carga e de análise de desempenho térmico, elétrico e mecânico. Os testes foram bem-sucedidos e proporcionaram a GE conhecimento para futuros projetos com foco na aplicação em propulsão de navios.

Em 1988, iniciou-se o projeto de maior impacto daquela época, um gerador de dois polos e 70 MW, produzido pela SuperGM-Japonês, com o intuito de instalação na rede elétrica. Esse projeto se estendeu por onze anos e diferentes configurações foram testadas. Para a montagem dessas configurações foram desenvolvidos, além de três tipos de rotores com bobinas supercondutoras, um estator convencional. No primeiro modelo, cada um dos rotores foi separadamente instalado no mesmo estator e foram testados em 1997. Já no segundo modelo foram montados e testados dois rotores diferentes no mesmo estator. Essa configuração foi testada em uma rede elétrica de 77 kV em junho de 1999 [82, 83].

Os materiais LTS apresentavam uma capacidade de corrente elevada, porém a

aplicação deles em máquinas elétricas se mostrou inviável devido à complexidade e ao alto custo de refrigeração, por utilizarem hélio líquido, o que impossibilitou a comercialização dessas máquinas [84].

Com a descoberta dos materiais supercondutores de alta temperatura crítica em 1986, nos quais a temperatura de trabalho é mais elevada, foi possível a redução dos custos de refrigeração. Conseqüentemente, os projetos utilizando esses materiais mostraram maior potencial de se tornarem economicamente viáveis e mais eficientes [82]. Isso renovou o interesse dos pesquisadores da época no desenvolvimento de projetos de máquinas utilizando esses materiais supercondutores e diversos projetos foram desenvolvidos, dos quais alguns serão descritos a seguir.

O Departamento de Energia (*Department of Energy* - DOE) em colaboração com empresas como a *Reliance Electric* e *American Superconductor Corporation* (AMSC) trabalharam no desenvolvimento de motores com enrolamentos de campo rotativos com bobinas HTS e estator convencional. As fitas utilizadas nos enrolamentos dos rotores foram de Bi-2223, do fabricante AMSC, com um refrigerador de ciclo fechado na temperatura de aproximadamente 30K.

Diversos motores foram construídos utilizando esses materiais supercondutores e essa técnica de refrigeração. Um dos primeiros protótipos foi construído no ano de 1996 e atingia 150 kW de potência em sua velocidade nominal de rotação de 400 rpm. Ainda nesse mesmo ano foi projetado e construído um outro motor supercondutor com potência de 750 kW e velocidade de rotação de 1800 rpm. O principal objetivo desses projetos era a redução de peso e de tamanho das máquinas para a instalação em navios e submarinos de combate [80].

De 1999 a 2005, a Siemens focou no desenvolvimento de máquinas supercondutoras HTS, também para veículos marinhos. O primeiro projeto foi um gerador com quatro bobinas de fita Bi-2223 no rotor e estator convencional. Esse gerador empregava um criostato rotativo para refrigerar a 25K os enrolamentos HTS, que foram montados em um núcleo ferromagnético no rotor formando quatro polos. O dispositivo foi testado no ano de 2001, o torque foi de 2600 N.m, a potência de 400 kW e velocidade de rotação de 1500 rpm. Esse projeto serviu para avaliar os conceitos e a confiabilidade dos materiais supercondutores HTS aplicadas em máquinas.

Com o sucesso do primeiro projeto da Siemens, um outro foi iniciado em 2002, mas agora seria um gerador com 16 bobinas tipo *pancake* construído a partir de fitas Bi-2223 da *European Advanced Superconductor* (EAS), com potência de 4 MVA em 60Hz, torque de 10600 N.m e velocidade de rotação de 3600 rpm [85]. Essa máquina foi testada em 2005 e utilizava um refrigerador de ciclo fechado para o resfriamento das bobinas em temperatura de operação na faixa entre 30 e 40 K. A eficiência da máquina na potência máxima atingia 98,7 %, percentual considerado superior aos 96 % de eficiência das máquinas convencionais para a mesma faixa de

potência da época [86].

Em 2006, um motor de 5 MW e outro de 36,5 MW (ambos com 120 rpm) foram construídos com bobinas de fitas de Bi-2223 e testados pela AMSC. Todos os testes foram bem sucedidos e o projeto comprovou que a tecnologia poderia ser implementada em veículos marinhos. Portanto, o motor foi entregue para uso em propulsão naval à *Office of Naval Research* (ONR) em março de 2007[3, 33, 87].

Em seguida, a GE construiu um gerador com fitas de Bi-2223 de dois polos e 100 MVA com o apoio do DOE e a Siemens desenvolveu um gerador de 4 MW, ambos com o intuito de uso em navios [82]. Essas máquinas com bobinas de fitas de Bi-2223 foram demonstradas com sucesso para aplicação em veículos marinhos, no entanto, a introdução no mercado industrial ainda dependia da redução dos custos dos materiais supercondutores. A ideia de substituir os Bi-2223 pela nova geração de supercondutores de YBCO se mostrou viável nos anos seguintes e assim essas máquinas poderiam ser introduzidas no mercado.

Alguns projetos com blocos supercondutores de YBCO foram desenvolvidos e testados [88, 89] para uma série de máquinas de histerese na faixa de potência de 1 a 4 kW. Esses projetos foram construídos a partir de uma cooperação entre o *Moscow Aviation Institute* (MAI) da Rússia e o *Leibniz Institute of Photonic Technology* (IPHT) de Jena na Alemanha. Os blocos supercondutores eram em formato cilíndrico e instalados no rotor. Quando aplicada uma corrente trifásica nos enrolamentos do estator, o campo girante magnetizava os blocos supercondutores induzindo polos neles. O torque foi linearmente proporcional às perdas histeréticas totais no rotor supercondutor. A relação de potência por unidade de peso nessas máquinas foi de 3 a 5 vezes melhor do que em máquinas de histerese convencionais [88].

No início dos anos 2000 já se cogitava que ao final da década de 2010 essas máquinas supercondutoras poderiam entrar em operação comercial. Ainda que a tecnologia dos supercondutores tenha avançado consideravelmente ao longo dos anos e grandes projetos terem sido desenvolvidos, continua sendo um campo em desenvolvimento.

A seguir serão apresentados alguns projetos mais recentes de modo a dar uma percepção do estado da arte.

2.3.2 Máquinas HTS com Bobinas de Fitas 2G

Os progressos no desenvolvimento de materiais HTS auxiliaram no desenvolvimento de máquinas supercondutoras com maior potencial no mercado levando em conta os custos competitivos, a confiabilidade desses materiais e a evolução na tecnologia de refrigeração.

Com base na experiência adquirida ao longo dos anos, algumas empresas como a AMSC, a Siemens, e a GE continuaram investindo no desenvolvimento de novos projetos com foco em diversas áreas de aplicação. Uma das grandes áreas de interesse na ocasião foi a de energia eólica, pois havia uma crescente preocupação em reduzir o uso de combustíveis fósseis devido ao efeito estufa [87].

Neste contexto, em 2010, a AMSC mostrou interesse em construir geradores HTS de turbinas eólicas com acionamento direto na classe de 10 MW de potência [87]. O objetivo foi reduzir as perdas, o tamanho e o peso se comparado ao das máquinas convencionais. Além disso, o acionamento direto do gerador HTS evitaria o uso das caixas de engrenagem, o que reduziria consideravelmente os custos de projeto.

Os aerogeradores HTS na classe de potência superior a 10 MW, por usarem supercondutores e possuírem acionamento direto, são compactos e mais leves o que facilita a instalação, operação e manutenção, permitindo turbinas eólicas mais atrativas comercialmente. Assim, essas vantagens trouxeram mais recursos para o desenvolvimento de novos projetos eólicos visando a energia limpa [87].

Inicialmente a AMSC projetou um gerador eólico da marca *Sea Titan*, com capacidade de produzir 10 MW de potência [87, 90]. Os objetivos foram reduzir significativamente o volume e o peso comparado aos aerogeradores convencionais e aumentar o torque em baixas velocidades para melhorar a eficiência do gerador.

Em 2011, a Siemens em conjunto com o *Karlsruhe Institute of Technology* (KIT) desenvolveram um protótipo de um gerador com bobinas planas de formato oval (*racetrack coils*) de fitas 2G HTS com o intuito de futuramente desenvolver um projeto em maior escala para operação diária em grandes usinas. O objetivo era melhorar a eficiência do gerador em torno de 0,5 % e, com isso, grandes usinas apresentariam redução de custos em combustíveis e reduziriam as emissões de dióxido de carbono [91].

Outro projeto com foco em aplicação em aerogeradores e usinas a fio d'água foi desenvolvido e testado com sucesso em abril de 2013 pela GE. O projeto de um gerador HTS Hidrogenie, de 1,7 MW e 214 rpm foi construído com fitas supercondutoras HTS no rotor. A refrigeração foi feita por um refrigerador de ciclo fechado na temperatura de 43K. O sucesso desse projeto estabeleceu uma base para os pesquisadores e engenheiros da GE para a pesquisa e desenvolvimento de futuras máquinas supercondutoras HTS [92].

Em 2015, com o financiamento da União Europeia e a cooperação de várias empresas e instituições, tais como: *University of Denmark*, *Envision Energy* (Dinamarca), *Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology* (Alemanha), *Theva* (Alemanha), *Delta Energy Systems* (Alemanha), *Jeumont Electric* (França), *DNV-GL* (Noruega) e *Universiteit Twente* (Holanda), iniciou-se o projeto *Ecoswing* [93], primeiro projeto de turbina eólica supercondutora em

escala comercial. O projeto foi desenvolvido durante quatro anos e foi instalado recentemente, em maio de 2019, alimentando muitas casas na costa oeste da Dinamarca. Esse projeto utilizou enrolamentos de fita 2G no rotor operando na temperatura de 30 K, com 40 polos, 3,6 MW de potência e 15 rpm de velocidade [34].

Além dos projetos de turbinas eólicas supercondutoras, atualmente há um grande interesse no desenvolvimento de máquinas elétricas para aviões, devido à necessidade de reduzir os impactos ambientais. Assim, alguns estudos na literatura têm demonstrado o potencial da eletrificação de sistemas de energia de aviões usando motores e geradores elétricos [35, 94, 95]. No entanto, o desempenho aerodinâmico da aeronave depende do peso de seus componentes e, portanto, o uso de materiais supercondutores nessas máquinas podem ser uma boa alternativa, uma vez que esses materiais possuem alta ampacidade, o que melhora a relação potência/peso do avião [96, 97].

Neste contexto, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) tem um programa avançado de tecnologia de transporte aéreo chamado "*NASA's Subsonic Fixed Wing Program*" que tem como foco o desenvolvimento de aeronaves com propulsão elétrica de modo a reduzir os gases de efeito estufa, a quantidade de combustível utilizado e o ruído audível [95, 98–100]. Em um dos ramos desse projeto é investigado um sistema de propulsão conhecido como N3-X. Esse sistema de propulsão é composto por geradores e motores supercondutores [35]. Existem três tipos de supercondutores que estão sendo testados, os de MgB_2 , os de BSCCO e os de YBCO [101]. A refrigeração dos materiais supercondutores nesses projetos é realizada através de *Cryocoolers*.

A *Distributed Electrical Aerospace Propulsion* (DEAP) em cooperação com a *Airbus*, *Rolls – Royce*, e *Cranfield University* também tem desenvolvido estudos para o uso de supercondutores de alta temperatura crítica em propulsão de aeronaves, que é conhecida como *Airbus E – Thrust* [94].

Além dos projetos apresentados, vários estudos recentes da literatura [11–14][102–105] têm demonstrado com sucesso a utilização dos materiais supercondutores em enrolamentos de máquinas. Tais enrolamentos são constituídos com bobinas de fita 1G e 2G [102, 103], blocos HTS [104, 105] ou, os mais recentes, com fitas 2G HTS empilhadas [11–14], que têm surgido como uma alternativa aos blocos, e serão apresentados na seção 2.3.3.

2.3.3 Máquinas HTS com Fitas 2G HTS Empilhadas

O desenvolvimento de máquinas que utilizam fitas 2G HTS empilhadas surgiram após a validação experimental efetuada por um grupo de pesquisa da Universidade de Cambridge, que em 2013 mostraram que era possível empilhar pedaços de fita e formar um "bloco", visando a aplicação em máquinas elétricas[5]. Esse bloco de

fita quando magnetizado funciona como um ímã de campo aprisionado [5]. Naquele trabalho a magnetização das fitas empilhadas foi feita com campo pulsado, que foi adotado devido à viabilidade e adaptabilidade na montagem do motor HTS. Eles conseguiram mostrar que os blocos de fita 2G HTS são capazes de aprisionar maior quantidade de fluxo que os blocos maciços. Por isto, em 2015, o mesmo grupo desenvolveu um motor de campo aprisionado utilizando essa tecnologia [11]. O motor síncrono construído tinha seis empilhamentos com as fitas em formato retangular, que foram montadas em torno do núcleo do rotor. Cada empilhamento era constituído por 60 camadas de fita com 12 mm de largura, 120 mm de comprimento e 5,2 mm de altura. A magnetização foi feita com campo pulsado através de seis bobinas de cobre formando os seis polos do motor, como mostra a figura 2.10.

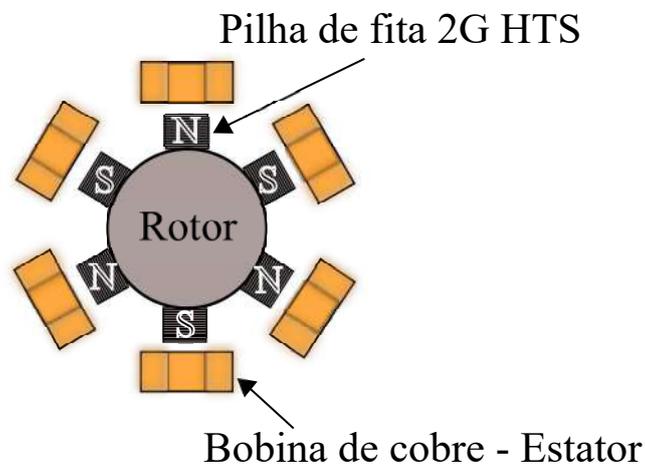
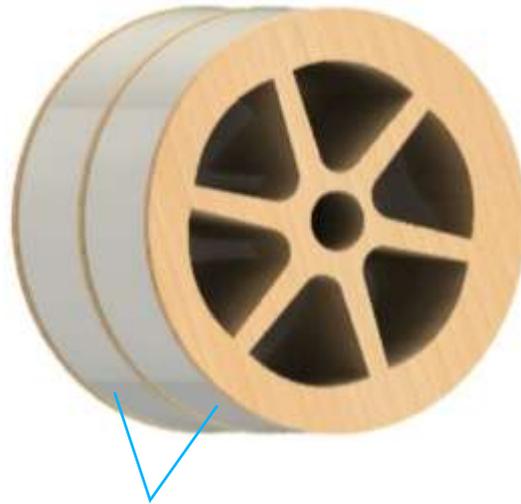


Figura 2.10: Motor supercondutor com fitas retangulares empilhadas como polos no rotor. Adaptada de [11].

Todos os resultados obtidos foram em relação à magnetização das fitas empilhadas. Assim, eles provaram que ao magnetizar as fitas empilhadas a capacidade de retenção de campo é altamente uniforme e bem definida. Por isto, essas pilhas têm um grande potencial para serem implementadas como polos de campo no rotor em motores.

Ainda em 2015, um outro trabalho foi desenvolvido utilizando fitas supercondutoras empilhadas, na Universidade Nova de Lisboa em cooperação com a Universidade de Barcelona. Baseado nos trabalhos recentes do grupo de Cambridge, foi proposto um motor com fitas supercondutoras empilhadas em formato espiral no rotor [13]. Naquele trabalho de dissertação de mestrado, o motor foi composto por um estator com enrolamentos trifásicos de cobre e o rotor com fita 2G HTS empilhadas em espiral ao redor do núcleo não magnético, como mostra a figura 2.11 .



Duas pilhas de fita 2G HTS

Figura 2.11: Motor supercondutor com fitas 2G HTS empilhadas em espiral no rotor. Adaptada de [13].

Com esse protótipo foi realizado apenas o ensaio de torque quase estático. Nesse ensaio, os enrolamentos do estator foram alimentados com corrente contínua e posteriormente o motor foi refrigerado em nitrogênio líquido a 77K. Então, deslocando lentamente o rotor, foi medida a força por um dinamômetro a cada 2 graus. Dado o raio da roda de medição, foi determinado o torque e o valor alcançado foi em torno de 1 N.m.

Em 2018, a Universidade de Barcelona, em cooperação com a Universidade Federal Fluminense, desenvolveu um protótipo de motor linear com fitas supercondutoras 2G HTS empilhadas [14]. Nesse protótipo foi utilizado um estator com ímãs permanentes de Nd-Fe-B, colocados de modo a produzir um campo tráfegante e o rotor constituído por fitas retangulares empilhadas, apresentado na figura 2.12. O objetivo foi estudar a força ao longo do deslocamento das fitas empilhadas em relação aos ímãs, visando a aplicação em veículos Maglev. Por isto, para a refrigeração do empilhamento, foi desenvolvido também um criostato com câmara de vácuo.

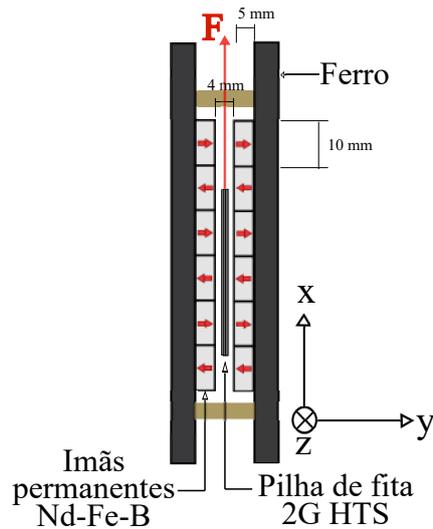


Figura 2.12: Aparato de motor linear supercondutor com fita 2G HTS empilhada. Adaptada de [14].

O empilhamento 2G utilizado possuía nove camadas de fita com 12 mm de largura, 30 mm de comprimento e $510 \mu\text{m}$ de altura. O deslocamento relativo entre os ímãs e a pilha de fita foi controlado por dois motores de passo e a medida da força foi realizada com uma célula de carga [14]. Naquele trabalho a densidade de força obtida foi em torno de 5 N/g que é superior à densidade de força de motores lineares convencionais [14].

Já em 2020, um grupo de pesquisa da Universidade de Cambridge, no Reino Unido, com o apoio financeiro da *European Union's Horizon 2020 research innovation programme*, desenvolveu uma máquina síncrona com fitas supercondutoras empilhadas na superfície do rotor, como ímãs de campo aprisionado [15], como mostra a figura 2.13.

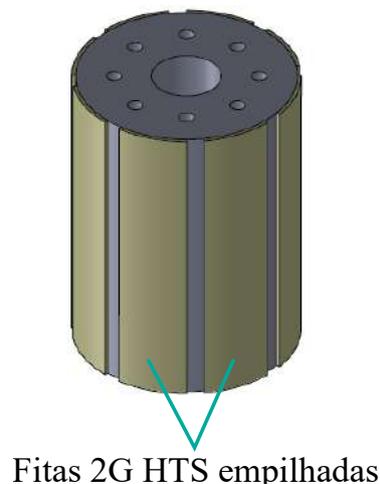


Figura 2.13: Rotor do gerador síncrono supercondutor com fita 2G HTS empilhadas na superfície do rotor. Adaptada de [15].

Essa máquina teve os enrolamentos do estator fabricados em uma configuração não sobreposta de dupla camada e com passo fracionário, enquanto o rotor foi laminado em formato cilíndrico [15]. Os quatro pares de polos foram ajustados em oito pilhas de nove camadas, fixadas ao redor do núcleo do rotor com fita Kapton. Essa máquina funciona como gerador, sendo a tensão induzida nos enrolamentos do estator devida ao campo girante produzido pelas fitas empilhadas no rotor. Através da magnetização por pulso, as correntes foram induzidas nas pilhas com a máquina parada. Posteriormente, o rotor entrou em movimento e a força eletromotriz induzida pelas pilhas foi medida em circuito aberto nos terminais da estator [15].

O propósito daquele trabalho foi analisar a precisão de alguns métodos de simulação em máquinas supercondutoras e investigar a taxa de desmagnetização em condições reais de operação [15]. Assim sendo, eles conseguiram mostrar através de simulações e análise experimental que a taxa de desmagnetização em configurações desse tipo é considerável, mesmo para baixas correntes na armadura. Portanto, será necessária uma análise mais aprofundada em trabalhos futuros para entender como isso afeta o comportamento geral da máquina.

Um ponto importante em relação à configuração de máquina com empilhamentos 2G HTS está relacionada à forma como os empilhamentos supercondutores são magnetizados. Dos trabalhos apresentados anteriormente, em dois deles [13, 14], a magnetização dos empilhamentos foi realizada em *Field cooling*, enquanto que, nos outros dois [5, 15] a magnetização foi feita com campo pulsado. Existem algumas técnicas de magnetização dos supercondutores e elas serão apresentadas na subseção 2.3.4.

2.3.4 Técnicas de Magnetização dos Supercondutores

Em geral, são usadas três técnicas para a magnetização dos empilhamentos 2G HTS: (i) o resfriamento com campo magnético aplicado, (*Field Cooling* - FC), (ii) o resfriamento sem campo magnético aplicado (*Zero Field Cooling* - ZFC) e (iii) a magnetização aplicando pulsos de corrente de curta duração (*Pulse Magnetization* - PM) [1]. Existe um outro método de magnetização, também utilizado em blocos supercondutores, denominado bomba de fluxo (*Flux Pump*) [1, 106], mas não há registros de trabalhos na literatura com empilhamentos magnetizados dessa forma.

Dentro dessas três técnicas usuais os processos FC e ZFC também podem ser designados de magnetização de campo estático, uma vez que a taxa de variação do fluxo nesses métodos é baixa [1].

Nos materiais do tipo II, quando o supercondutor é resfriado em FC vórtices de corrente são induzidos, no mesmo instante, para aprisionar o fluxo que penetra o material, o que acontece mesmo se o valor de campo aplicado for baixo. Se o campo

magnético externo for reduzido, surgirão correntes de blindagem que gerarão um fluxo contrário para preservar o fluxo contido no interior do material [1, 106]. Já no caso ZFC, para que o supercondutor seja magnetizado há a necessidade de superar o campo crítico H_{c1} . Apesar de H_{c1} ser um valor de campo baixo, essa técnica é menos eficiente se comparada ao método FC [1, 106], uma vez que o fluxo será aprisionado até para valores menores que esse H_{c1} . O método de magnetização por pulsos é análogo ao ZFC, porém o dispêndio de energia é menor já que são pulsos de curta duração [106].

Tanto a magnetização por FC quanto por ZFC exige que o campo aplicado seja alto, com pelo menos a mesma magnitude do campo aprisionado para FC ou de duas vezes para o caso de ZFC. Por isto, há a necessidade de grandes bobinas e fontes de alimentação poderosas, o que aumenta o custo e exige configurações enormes [1]. Em razão disso, o método de magnetização por pulsos é considerado na literatura como o método mais eficiente e barato, visto que é possível configurações mais compactas. Assim, com bobinas menores é possível obter campos intensos tal como em FC para magnetizar tanto os blocos quanto os empilhamentos de fita 2G HTS [1, 11, 15]. Entretanto, no método de magnetização por pulso os campos aprisionados são mais baixos que os em FC, pois a temperatura aumenta muito em virtude da movimentação rápida de fluxo [1].

Tudo isso corrobora para o desafio que ainda existe em relação à magnetização dos blocos e empilhamentos de fita 2G HTS.

De modo geral, as máquinas supercondutoras se assemelham às máquinas convencionais, porém apresentam algumas diferenças, conforme serão discutidas na próxima seção.

2.3.5 Breve Apresentação de Conceitos Teóricos de Máquinas Elétricas

Para uma melhor compreensão da teoria dos motores e geradores supercondutores, o princípio de funcionamento das máquinas elétricas convencionais e algumas de suas características deve ser entendido.

O princípio de operação das máquinas convencionais (síncronas e assíncronas) baseia-se na interação entre o campo magnético do estator (campo girante) e do rotor [107]. Geralmente, as máquinas síncronas apresentam dois circuitos para gerar esses campos, (i) o de armadura, posicionado no estator e alimentado por corrente alternada e (ii) o de campo, que está localizado no rotor, sendo este alimentado por corrente contínua. Também, em alguns casos, o campo magnético no rotor pode ser estabelecido por ímãs permanentes. Nesse caso, estas são nomeadas máquinas síncronas de ímãs permanentes. O campo do rotor também pode ser produzido

por materiais com um largo ciclo de histerese, que são aplicados às máquinas de histerese.

Já as máquinas de indução, também conhecidas como máquinas assíncronas, o campo magnético no rotor é criado devido à indução de corrente nas barras curto-circuitadas, no caso de rotor gaiola de esquilo, ou em enrolamentos, no caso de rotor bobinado. Os motores de indução somente operam abaixo da velocidade síncrona, pois as correntes induzidas só circulam enquanto houver escorregamento entre o estator e o rotor. A alimentação é apenas nos enrolamentos do estator para produzir o campo girante. Esses enrolamentos do estator são idênticos aos da máquina síncrona. As bobinas são dispostas de modo a obter um campo magnético proporcional à intensidade de corrente e ao número de espiras. A figura 2.14 apresenta o estator da máquina convencional que é composto por chapas finas de aço magnético ou de aço silício para alojar os enrolamentos. O objetivo é diminuir a dissipação de energia por histerese e por correntes parasitas.



Figura 2.14: Estator da máquina convencional

No estator, quando as bobinas são alimentadas com correntes trifásicas de mesma intensidade e defasadas de 120 graus entre si, elas produzem um campo magnético girante constante. A disposição espacial das bobinas varia de acordo com o número de polos da máquina. No caso de uma máquina com 2 polos, por exemplo, no mínimo são três enrolamentos espaçados de 120 graus elétricos. Para máquinas com múltiplos polos, o mínimo de conjunto de bobinas é dado pela razão do número de polos por dois. Os rotores das máquinas síncronas são compostos por pacotes de lâminas de material ferromagnético envolto por enrolamentos de cobre ou por material ferromagnético maciço no núcleo e ímãs permanentes no seu entorno, como mostra a figura 2.15



Figura 2.15: Rotores de máquinas síncronas: a) rotor com enrolamento de campo e b) rotor com ímãs permanentes

Os rotores de máquinas de indução podem ser bobinados ou em gaiola de esquilo. Os rotores bobinados consistem em chapas de aço magnético e enrolamentos longitudinais, já os rotores em gaiola de esquilo são compostos por barras condutoras acomodadas nas ranhuras do núcleo e curto-circuitadas por anéis condutores, como mostra a figura 2.16

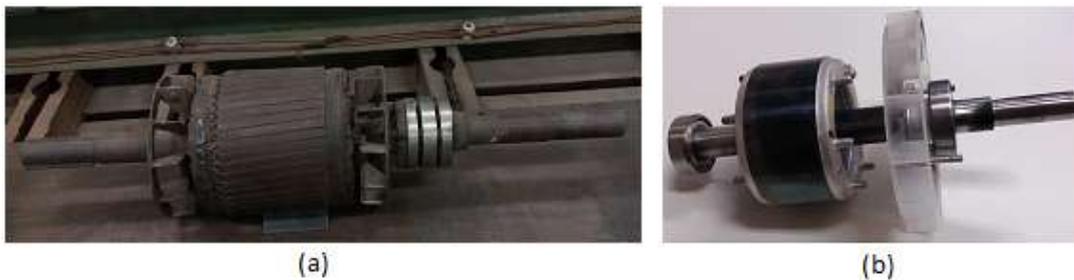


Figura 2.16: Rotores de máquina assíncrona: a) rotor bobinado e b) rotor gaiola de esquilo

Como mencionado anteriormente, os campos magnéticos são gerados por bobinas de cobre com núcleo em aço laminado. Por essa razão, essas máquinas apresentam um valor máximo de densidade de fluxo magnético (B), causado pela saturação do núcleo de aço laminado e pela capacidade de condução de corrente devido à dissipação de calor no material e na isolação.

Com base em [108], neste ponto da tese foi considerado um caso elementar de uma máquina rotativa com dois enrolamentos e foi assumido que somente as indutâncias mútuas dependem da posição angular. As equações de tensões dos enrolamentos do estator e do rotor podem ser definidas, respectivamente, pelas seguintes expressões 2.7 e 2.8 [108]:

$$v_S = R_S \cdot i_S + \frac{d(L_S \cdot i_S)}{dt} + \frac{d(M_{SR}(\theta) \cdot i_R)}{dt}, \quad (2.7)$$

$$v_R = R_R \cdot i_R + \frac{d(L_R \cdot i_R)}{dt} + \frac{d(M_{SR}(\theta) \cdot i_S)}{dt}. \quad (2.8)$$

Em que:

R_S e R_R - são as resistências do estator e do rotor, respectivamente.

L_S e L_R - são as indutâncias próprias dos enrolamentos do estator e do rotor, respectivamente.

M_{SR} - é a indutância mútua entre os enrolamentos, que é dependente do ângulo de defasagem entre os eixos magnéticos devido às relutâncias.

v_S e v_R - são as tensões do estator e do rotor, respectivamente.

i_S e i_R - são as correntes do estator e do rotor, respectivamente.

Resolvendo as derivadas nas expressões 2.7 e 2.8 pode-se obter as seguintes equações 2.9 e 2.10:

$$v_S = R_S \cdot i_S + L_S \cdot \frac{di_S}{dt} + i_R \cdot \frac{d(M_{SR}(\theta))}{dt} + M_{SR}(\theta) \cdot \frac{di_R}{dt}, \quad (2.9)$$

$$v_R = R_R \cdot i_R + L_R \cdot \frac{di_R}{dt} + i_S \cdot \frac{d(M_{SR}(\theta))}{dt} + M_{SR}(\theta) \cdot \frac{di_S}{dt}. \quad (2.10)$$

A partir dessas equações pode-se obter as potências instantâneas fornecidas pelas fontes dos enrolamentos do estator (p_S) e do rotor (p_R), 2.11 e 2.12, sendo cada potência a multiplicação da tensão pela corrente do enrolamento correspondente.

$$p_S = v_S \cdot i_S = R_S \cdot i_S^2 + L_S \cdot i_S \cdot \frac{di_S}{dt} + i_R \cdot i_S \cdot \frac{d(M_{SR}(\theta))}{dt} + M_{SR}(\theta) \cdot i_S \cdot \frac{di_R}{dt}, \quad (2.11)$$

$$p_R = v_R \cdot i_R = R_R \cdot i_R^2 + L_R \cdot i_R \cdot \frac{di_R}{dt} + i_S \cdot i_R \cdot \frac{d(M_{SR}(\theta))}{dt} + M_{SR}(\theta) \cdot i_R \cdot \frac{di_S}{dt}. \quad (2.12)$$

A potência total (p_T), expressão 2.13, é a soma das potências dos dois enrolamentos.

$$p_T = p_S + p_R. \quad (2.13)$$

Com o desenvolvimento das equações 2.11 e 2.12 na 2.13, obtêm-se

$$p_T = R_S \cdot i_S^2 + R_R \cdot i_R^2 + \frac{d(M_{SR}(\theta))}{dt} \cdot i_S \cdot i_R + \frac{d\left(\frac{1}{2}L_S \cdot i_S^2 + \frac{1}{2}L_R \cdot i_R^2 + M_{SR}(\theta) \cdot i_S \cdot i_R\right)}{dt}. \quad (2.14)$$

Nessa expressão, o primeiro e o segundo termo representam a potência dissipada no estator e no rotor, respectivamente, o terceiro termo é a potência convertida (potência mecânica) e o último é a variação temporal da energia armazenada no campo magnético.

Como em qualquer máquina rotativa, motor ou gerador, a potência mecânica no

eixo pode ser dada pela expressão 2.15:

$$p_{mec} = T \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (2.15)$$

em que p_{mec} é a potência mecânica e T é o conjugado.

Então, igualando essas duas expressões de potência mecânica tem-se 2.16:

$$T \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(M_{SR}(\theta))}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot i_S \cdot i_R. \quad (2.16)$$

Assim, torna-se 2.17 que é a expressão do torque da máquina:

$$T = \frac{d(M_{SR}(\theta))}{d\theta} \cdot i_S \cdot i_R. \quad (2.17)$$

O funcionamento de diferentes tipos de máquinas convencionais, tais como motor de indução, motor síncrono com excitação e motor de corrente contínua, é devido a esse torque, designado de torque de excitação [108].

Da equação 2.17, pode-se expressar a indutância mútua de forma simples, como

$$M_{SR}(\theta) = M_0 \cdot \cos(\theta), \quad (2.18)$$

em que ela é máxima em θ igual a zero, nula em θ igual a $\pi/2$ e $3\pi/2$ e mínima em θ igual a π . Sendo M_0 a amplitude da indutância mútua [108].

Assim, o modulo do torque pode ser apresentado pela seguinte expressão [108]:

$$T = M_0 \cdot i_S \cdot i_R \cdot \sin(\theta). \quad (2.19)$$

Esse torque é proporcional às correntes dos enrolamentos do estator, do rotor, e do acoplamento magnético. Portanto, para um determinado nível de potência a magnitude das correntes e do campo magnético é que definem o volume das máquinas [90].

Como os materiais supercondutores transportam corrente elétrica praticamente sem dissipação de energia, eles alcançam níveis de corrente muito maiores. Por essa razão, as bobinas supercondutoras podem ser bem mais compactas e produzirem campos magnéticos mais intensos. Então, considerando a mesma classe de potência, as máquinas supercondutoras são mais leves e menores e podem atingir maiores níveis de torque quando comparadas com as que utilizam materiais convencionais[26].

Devido a essa capacidade dos materiais supercondutores em fornecer campos magnéticos mais intensos, os materiais ferromagnéticos geralmente utilizados em máquinas convencionais, podem ser saturados, fazendo com que se utilizem em máquinas supercondutoras materiais não ferromagnéticos nas estruturas de suporte

das bobinas, levando a uma redução ainda maior dessas máquinas.

Além disso, a troca de materiais ferromagnéticos por materiais não ferromagnéticos diminui a reatância síncrona (X_d) e as correntes parasitas indesejáveis. A diminuição da X_d reduz o ângulo de carga o que leva a um aumento da capacidade de carga e de regulação de tensão [109]. Isso permite a construção de máquinas mais robustas em falhas transitórias, e, assim, podem operar sem se preocupar com a estabilidade estática ou dinâmica do sistema [110]. No entanto, também significa menor acoplamento magnético entre campo e armadura da máquina.

Do ponto de vista de projeto, o estator de uma máquina supercondutora é similar a uma máquina convencional, em que os enrolamentos podem ser de única ou dupla camada. No entanto, como já foi mencionado, os enrolamentos do estator das máquinas supercondutoras podem ser feitos em núcleos não ferromagnéticos e, assim, evitar as limitações dos núcleos convencionais.

Em relação ao rotor, os enrolamentos devem ser capazes de suportar altos níveis de torque e ao mesmo tempo limitar, na região de baixa temperatura, a condução térmica. Sob condições de curto-circuito na rede, simultaneamente ou independentemente, o enrolamento do rotor experimentará mudanças de campo magnético, temperatura e corrente. Portanto, avaliações de campo magnético, temperatura e corrente no supercondutor devem ser realizadas para cada situação de operação, de modo a assegurar uma margem de segurança em relação aos limites críticos e assim evitar a transição do material supercondutor para o estado normal [110].

Como mostrado nessa seção, as máquinas supercondutoras apresentam algumas características semelhantes e outras singulares em comparação com as máquinas convencionais. Isso traz algumas vantagens e desafios para a sua operação em aplicações. As vantagens estão relacionadas (i) à redução da reatância síncrona, (ii) ao aumento da relação potência/peso e (iii) às baixas perdas nos enrolamentos que podem levar a um ganho de eficiência marginal. Os desafios são associados à redução dos custos dos materiais supercondutores e do sistema de refrigeração.

No entanto, com o desenvolvimento da tecnologia de produção em larga escala de fitas supercondutoras e os mais novos sistemas de refrigeração, como os *cryocoolers* de ciclos fechados, esses custos estão reduzindo. Portanto, as máquinas supercondutoras já são consideradas atraentes em algumas aplicações onde há necessidade de máquinas menores e mais leves.

Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi realizada uma breve apresentação da teoria de supercondutividade focando nos principais aspectos necessários para o entendimento da máquina supercondutora desenvolvida. Além disso, foi apresentado também o histórico e

o estado da arte dessa tecnologia em máquinas mostrando os benefícios da sua utilização e os benefícios dessa tecnologia em comparação com o uso de materiais convencionais.

Capítulo 3

Projeto e Desenvolvimento da Máquina Supercondutora

Neste capítulo serão mostradas todas as etapas de projeto e construção dos protótipos dessa configuração de máquina com fitas supercondutoras 2G empilhadas no rotor. Também serão apresentadas a montagem de um criostato a partir de um dewar comercial e duas novas mesas de medidas para a realização de ensaios com os protótipos em nitrogênio líquido.

3.1 Projeto da Máquina Supercondutora com Fitas 2G HTS Empilhadas no Rotor

Os protótipos da máquina supercondutora tiveram como base duas máquinas: (i) uma máquina síncrona de ímãs permanentes com seis polos e potência nominal de 281 W, e (ii) uma máquina de indução trifásica de rotor gaiola com quatro polos e potência de 368 W, apresentadas na figura 3.1.



Figura 3.1: (a) Máquina síncrona trifásica com ímãs permanentes e (b) Máquina de indução trifásica de rotor gaiola.

A máquina síncrona com ímãs permanentes foi utilizada inicialmente porque já

estava disponível no Laboratório de Cerâmicos Avançados do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), tendo já sido utilizada em outro trabalho [111]. Portanto os dados dessa máquina foram retirados desse projeto e serão mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados da máquina síncrona de ímãs permanentes

Potência (W)	281
Corrente (A)	1,6
Tensão (V)	127
Rotação (rpm)	1200
Frequência (Hz)	60
Torque (N.m)	0,47
Nº de fases	3
Nº de polos	6
Rendimento (%)	95

Já a máquina de indução com rotor gaiola foi comprada da WEG e os dados de placa estão registrados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Dados de placa da máquina de indução com rotor gaiola

Modelo	A56C	Potência (CV)	0,5
Rotação (rpm)	1730	Tensão (V)	220
Corrente (A)	1,9	Número do RRE	0043240/2019
Nº de Série	14085669	Classe de isolamento	B
Frequência (Hz)	60	Relação IA/IN	5,8
Regime	S1	Fator de potência	0,73
Grau de proteção	21	Categoria	N
Nº de fases	3	Fator de serviço	1,25
Nº de polos	4	Rendimento (%)	70

Os primeiros protótipos foram desenvolvidos a partir da máquina síncrona, com enrolamentos trifásicos de cobre no estator e com ímãs permanentes de *Nd-Fe-B* no rotor. A partir dessa máquina foram feitas as adaptações para torná-la uma máquina supercondutora. Para isto, o estator foi mantido inalterado, para produzir o campo girante, e o rotor de ímãs permanentes foi substituído por um rotor supercondutor com duas fitas 2G HTS empilhadas em espiral, como mostra a figura 3.2.

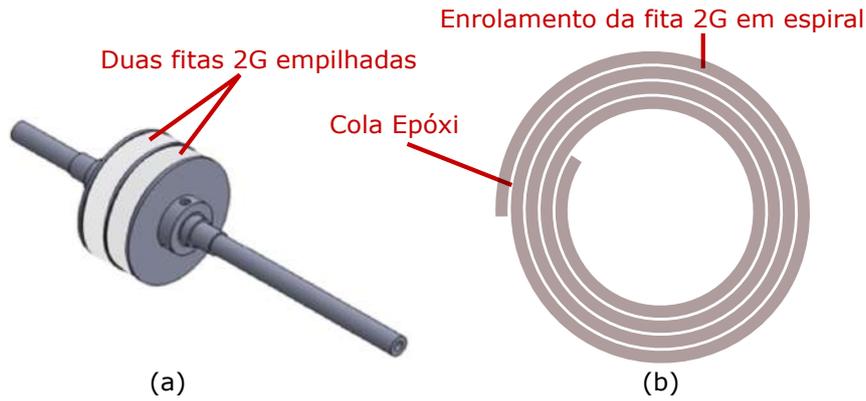


Figura 3.2: (a) Duas fitas 2G HTS empilhadas no rotor e (b) Ilustração da fita 2G HTS enrolada em espiral com cola epóxi entre cada camada para montar a pilha (apenas 4 camadas foram representadas)

Para o empilhamento da fita 2G HTS, uma única fita 2G foi enrolada em espiral da seguinte forma: a primeira camada foi colada diretamente no núcleo com resina epóxi de secagem rápida e um revestimento fino de resina epóxi convencional foi passado entre uma camada e a subsequente de fita 2G. Essa resina é muito utilizada em aplicações com materiais supercondutores devido ao bom desempenho em temperaturas criogênicas. O procedimento de cura foi concluído no forno a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 12 horas. Para efeito de proteção das pilhas de fita 2G espiraladas, revestiu-se o exterior com filme de kapton adesivo. O enrolamento em espiral é uma forma simples de preparar o empilhamento.

Essas alterações permitiram o projeto e a construção de dois protótipos, um com núcleo não ferromagnético (N-G10) e outro com núcleo ferromagnético (N-MAG).

3.1.1 Construção do Protótipo N-G10

No protótipo N-G10 foi substituído o rotor da máquina síncrona de ímãs permanentes por um rotor HTS com o eixo em aço inoxidável e o núcleo em um composto de fibra de vidro (G10), como mostra a figura 3.3.

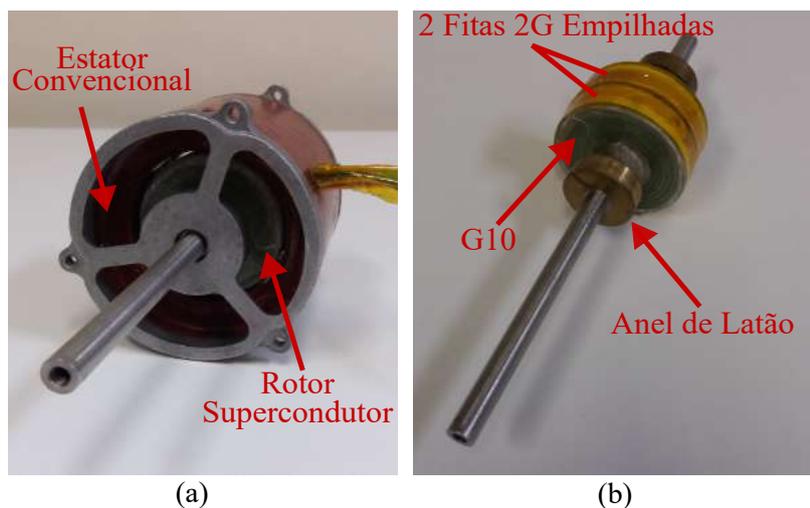


Figura 3.3: (a) Máquina supercondutora com núcleo do rotor em G10 (Protótipo N-G10), (b) Rotor supercondutor

Como pode ser observado na figura 3.3, o eixo da máquina supercondutora tem um novo formato e foi mantido em aço inoxidável. No caso dos mancais mecânicos, os rolamentos de esfera foram substituídos por anéis de latão, os quais deslizam o eixo de aço inoxidável. Essa alteração foi feita para evitar o travamento do mancal em temperaturas criogênicas, uma vez que o óleo lubrificante dos rolamentos de esferas solidificam. As dimensões da máquina supercondutora estão apresentadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Dimensões dos protótipos N-G10 e N-MAG.

Grandeza	Rotor		Estator (Interno e externo)
	Eixo	Núcleo	
Comprimento	232 mm	Stack fita 2G (fita) 7,2 m	79 mm
Diâmetro	12 mm	63,5 mm	65,4 e 98 mm
Espessura		30 mm	1,3 mm

No rotor supercondutor foram empilhadas nove camadas de fitas em torno do núcleo em formato espiral. As especificações da fita supercondutora utilizada estão mostradas na tabela 3.4, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.4: Especificações da fita supercondutora SF12050 da SuperPower

Fita Supercondutora	SuperPower SF12050
Largura	12 mm
Espessura	55 μm
Substrato	Hastelloy
Corrente crítica da fita 77K (auto campo)	369 A

3.1.2 Construção do Protótipo N-MAG

O protótipo N-MAG diferencia do N-G10 apenas no material utilizado para a construção do núcleo do rotor. Em vez do compósito de fibra de vidro foi utilizado aço magnético SAE-1040. A figura 3.4 mostra a máquina e o rotor supercondutor com núcleo de aço de alta permeabilidade magnética.

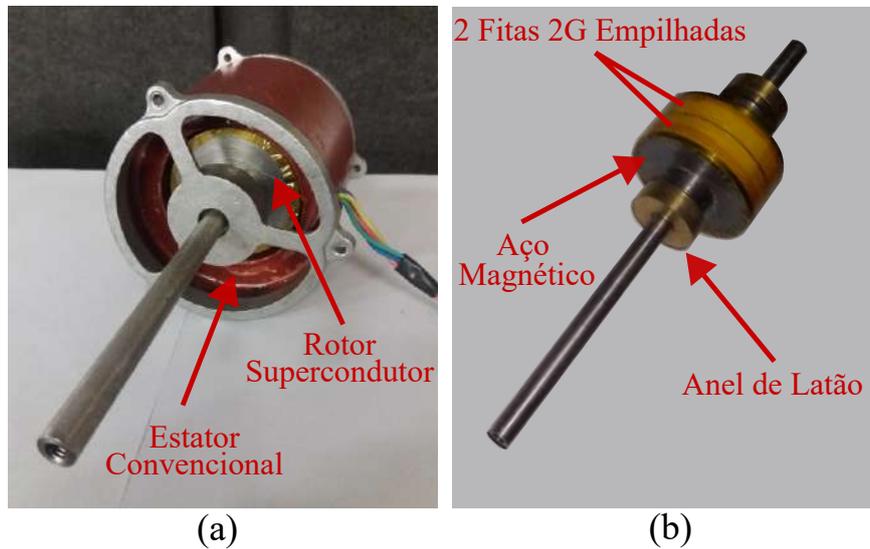


Figura 3.4: (a) Máquina supercondutora com núcleo do rotor feito em aço SAE-1040 de alta permeabilidade magnética (Protótipo N-MAG), (b) Rotor supercondutor

Nos dois protótipos os procedimentos de montagem foram similares. Primeiramente os tarugos de G10 e de aço foram usinados e confeccionados nas dimensões apresentadas nos desenhos do apêndice A, e então as fitas supercondutoras foram montadas nos respectivos suportes.

Além do projeto desses protótipos, também foram desenvolvidos um criostato e uma mesa de medida para a realização dos ensaios com a máquina em nitrogênio líquido.

3.1.3 Montagem do Criostato, da Mesa de Medida e Ajustes na Máquina

O criostato foi desenvolvido utilizando um dewar tubular comercial, com 222 mm de diâmetro externo, 17 mm de espessura, 460 mm de altura e uma tampa projetada e usinada em um compósito de fibra de vidro (G10), detalhes no apêndice B, como mostra a figura 3.5.

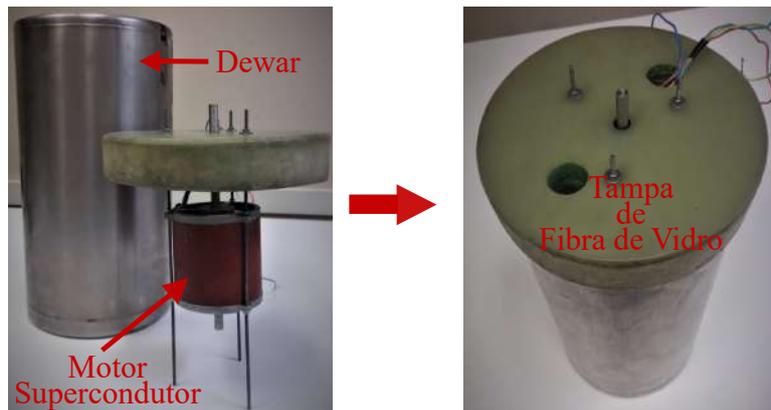


Figura 3.5: Criostato com a máquina supercondutora

Durante os ensaios a máquina supercondutora foi pendurada na tampa com o auxílio de três barras rosqueadas, arruelas e porcas. Como a máquina opera em LN₂ a 1 atm, o criostato não fica totalmente vedado, possibilitando que o vapor de nitrogênio seja exausto.

Já para a montagem da mesa de medida mostrada da figura 3.6, cujas dimensões serão apresentadas no apêndice A, foram utilizados os seguintes materiais: uma base de ferro, perfis de alumínio e uma chapa de aço para o suporte do dewar. Esta mesa de medidas pode se adequar para os diferentes tipos de ensaios de torque realizados, ensaio quase estático, ensaio dinâmico e ensaio de rotor bloqueado.

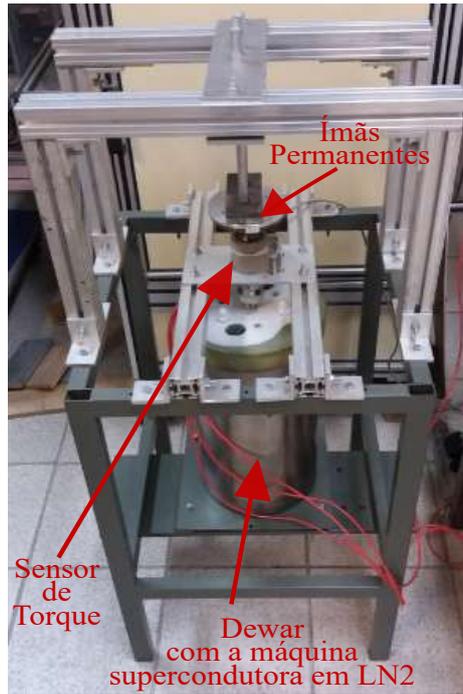


Figura 3.6: Mesa de medida para os ensaios com os protótipos N-G10 e N-MAG

Nos primeiros ensaios realizados ocorreram alguns problemas de alinhamento do eixo do rotor com os equipamentos de medição, e o anel de latão estava gerando bastante atrito com o tampo da carcaça da máquina, o que causava muita vibração do sistema e interferia nas medições.

Para melhorar o sistema, foram projetados novos tampos da máquina, vide apêndice A, com furos maiores para o uso de barras rosqueadas de maior diâmetro e conseqüentemente maior equilíbrio, além de um mancal de jóia apresentado na figura 3.7.

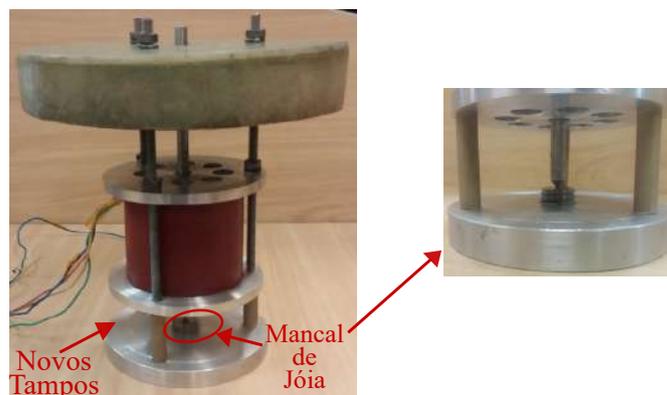


Figura 3.7: Máquina supercondutora com novos tampos e com o mancal de jóia

Os ensaios com máquinas elétricas convencionais geralmente são realizados com o eixo na posição horizontal para facilitar o acoplamento com equipamentos de

medição. No caso da máquina supercondutora, que só atinge o estado supercondutor em temperaturas criogênicas, para facilitar os ensaios com o criostato utilizado, o eixo foi colocado na posição vertical. Deste modo, devido à força de gravidade, os anéis rolantes tendem a gerar atrito com o tampo da carcaça do estator. Com o objetivo de eliminar esse atrito indesejado, foi construído um mancal de jóia para a sustentação do eixo. Esse mancal, além de eliminar o atrito indesejado, também auxiliou no alinhamento do eixo do rotor com os equipamentos de medição, facilitando a realização dos ensaios e, conseqüentemente, a melhoria dos resultados obtidos.

Como o estator da máquina de ímãs permanentes era todo resinado, não foi possível visualizar a disposição dos enrolamentos para conseguir o número de espiras e de ranhuras, o que seria melhor no intuito da modelagem da máquina. Algumas aproximações foram feitas e a modelagem desenvolvida em [72] apresentou resultados em acordo com os resultados experimentais. No entanto, viu-se a necessidade de desenvolver outro protótipo a partir de uma máquina com a disposição dos enrolamentos conhecidos. Assim, foi realizada a compra de um motor de indução, apresentado na figura 3.1 b, com enrolamentos trifásicos de cobre e rotor gaiola. A partir dele foi desenvolvido o protótipo N-G10MAG.

3.1.4 Construção do Protótipo N-G10MAG

Nesse protótipo foram empilhadas três fileiras de fitas 2G no rotor, cada uma com o dobro de camadas (dezoito) dos protótipos N-G10 e N-MAG, como mostra a figura 3.8.

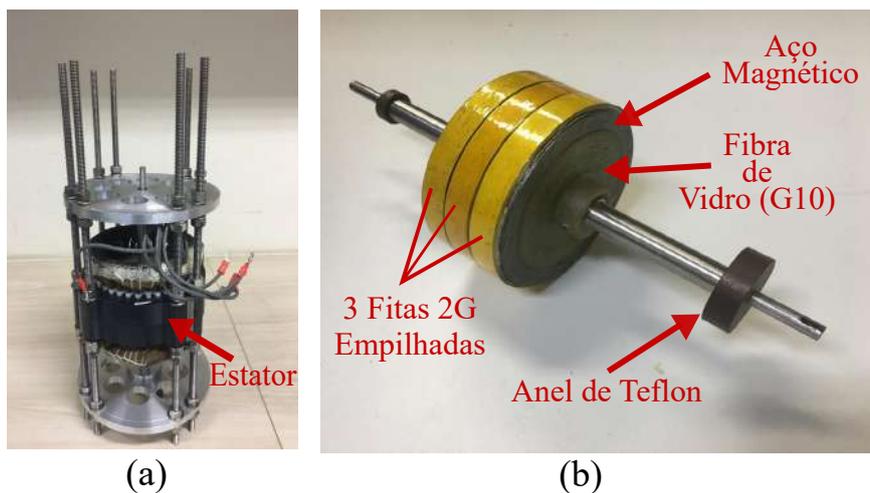


Figura 3.8: (a) Protótipo N-G10MAG, com estator convencional e rotor supercondutor e (b) Rotor com as três fitas 2G HTS empilhadas no rotor

Pode-se observar que da máquina de indução original foram mantidos apenas os enrolamentos do estator, inclusive a carcaça foi retirada. O rotor gaiola foi subs-

tituído por um rotor com núcleo em G10 e aço magnético e com fitas 2G empilhadas em espiral. A espessura de aço magnético foi definida a partir da análise de saturação realizada em um programa de elementos finitos. Essas modificações permitiram uma redução considerável do peso da máquina, de 10,12 kg para 6,47 kg, como mostra a figura 3.9



Figura 3.9: Comparação do motor de indução gaiola com a máquina supercondutora

O protótipo N-G10MAG é uma evolução dos protótipos N-G10 e P-MAG e o rotor é composto por uma parte interna em G10 e a outra parte externa de material ferromagnético, aço SAE-1040, com o intuito de fechar o circuito magnético e reduzir ainda mais o peso da máquina. As dimensões do protótipo N-G10MAG estão apresentadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Dimensões do protótipo N-G10MAG

Grandeza	Rotor			Estator
	Eixo	Núcleo G10/Aço	stack fita 2G	
Comprimento	251 mm	44 mm	(fita) 29,2 m	95 mm
Diâmetro	6 mm	86,4 mm		92,5 e 165 mm
Espessura		9,6 e 26,1 mm	5,1 mm	

Diferente dos protótipos N-G10 e N-MAG, no protótipo N-G10MAG foi utilizado o modelo de fita supercondutora SF12100, da Super Power. As especificações dessa fita serão mostradas na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Especificações da fita supercondutora SF12100 da SuperPower

Fita Supercondutora	SuperPower SF12100
Largura	12 mm
Espessura	105 μm
Substrato	Hastelloy
Corrente crítica da fita 77K (auto campo)	242 A

Como pode ser observada na tabela 3.6, a corrente crítica da fita SF12100 utilizada no protótipo N-G10MAG é de 242 A, que é menor que a da fita SF12050 utilizada nos protótipos N-G10 e N-G10MAG, que foi de 369 A. No protótipo N-G10MAG foi utilizado esse modelo devido a quantidade disponível no Laboratório de Aplicações de Supercondutores.

O processo do empilhamento das fitas foi idêntico ao já descrito anteriormente para os protótipos N-G10 e N-MAG. Em cada empilhamento uma única fita 2G foi enrolada em espiral utilizando resina epóxi para colar a primeira camada no núcleo e as demais entre si. De mesmo modo, para concluir o processo de cura, o rotor, com as fitas 2G HTS empilhadas, foi levado ao forno a 60 °C durante 12 horas. Para efeito de proteção das fitas 2G HTS empilhadas também foram revestidas com fita de kapton.

O eixo também foi confeccionado de modo similar ao dos protótipos N-G10 e N-MAG, porém os mancais foram diferentes. Em vez de anéis de latão foram utilizados anéis de teflon com 60% latão. Todos os detalhes desse protótipo são encontrados no apêndice C.

3.1.5 Ajustes no Criostato e Montagem da Mesa de Medida para Ensaio com o Protótipo N-G10MAG

Além do novo protótipo N-G10MAG, alguns ajustes foram feitos no criostato, como novos furos e a utilização de mais barras rosqueadas, para melhorar a estabilidade mecânica. Esses ajustes podem ser observados na figura 3.10.

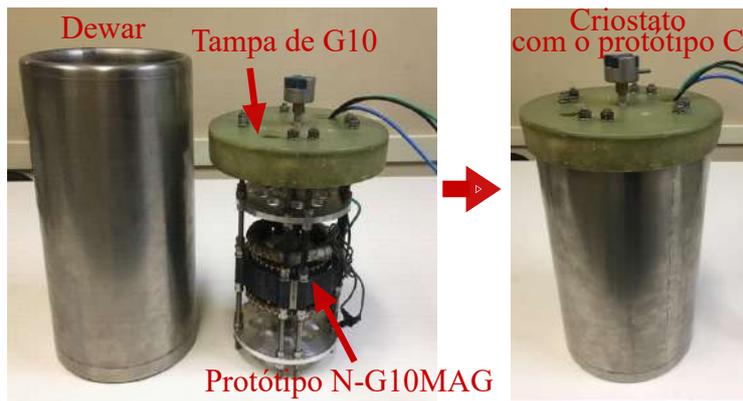


Figura 3.10: Criostato com ajustes

Também uma nova mesa de medida mostrada na figura 3.11 foi montada para a realização dos ensaios com esse protótipo em nitrogênio líquido. Essa nova mesa de medida foi desenvolvida com o propósito de apresentar algumas melhorias mecânicas em relação à mesa elaborada anteriormente. As dimensões estão especificadas no apêndice C.

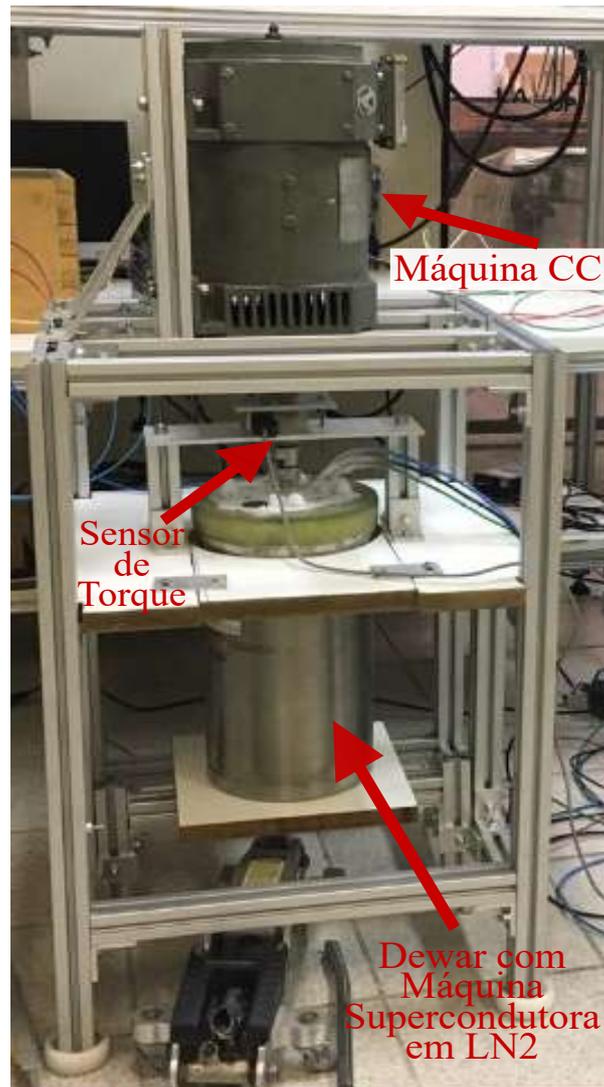


Figura 3.11: Mesa de medida para ensaios com o protótipo N-G10MAG

Nessa nova mesa além da base para sustentar o dewar, uma estrutura intermediária foi montada para manter os eixos o mais alinhado possível. Também para a elevação do dewar com LN2 e o acoplamento do eixo da máquina supercondutora com o sensor de torque, foi utilizado um macaco hidráulico, o que facilita o deslocamento vertical. Por isto, essa nova mesa apresenta algumas melhorias em relação à mesa desenvolvida para a realização dos ensaios com os protótipos N-G10 e N-MAG, tais como: melhor alinhamento dos eixos, menor vibração e maior facilidade no deslocamento do dewar. Como pode ser observado na figura 3.11, também foi utilizada uma máquina de corrente contínua como gerador/motor e os detalhes dessa máquina estão apresentados na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Dados de placa da máquina de corrente contínua

Modelo	BN112S
N ^o de Série	M82095
Classe de isolamento	F
Potência (kW)	3
Rotação (rpm)	3000
Serviço	S1
Tensão (V)	220
Corrente (A)	17,7
Excitação	Independente
Tensão (V)	150
Corrente (A)	0,63

Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os três protótipos de máquina supercondutora desenvolvidos (N-G10, N-MAG e N-G10MAG), sendo os protótipos N-G10 e N-MAG com duas fileiras de fitas 2G empilhadas em paralelo e com núcleos em G10 e aço magnético, respectivamente. Já o protótipo N-G10MAG possui três fileiras de fitas 2G empilhadas paralelamente e com núcleo de G10 (internamente) e aço magnético (externamente). Além dos protótipos, também foram apresentados o criostato, as mesas de medida, os materiais e o processo de montagem das fitas supercondutoras empilhadas no rotor.

Capítulo 4

Procedimentos Experimentais e Ensaio Realizados

Este capítulo descreverá os métodos e procedimentos experimentais para a realização dos ensaios com os protótipos desenvolvidos em duas etapas. A primeira etapa com relação aos ensaios dos protótipos N-G10 e N-MAG e a segunda do protótipo N-G10MAG. Todos os ensaios com os protótipos foram realizados no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da COPPE-UFRJ.

No entanto, antes da realização dos ensaios com os protótipos que serão apresentados na sequência, foram feitos testes com as fitas 2G utilizadas nos empilhamentos.

4.1 Ensaio com as Fitas 2G Utilizadas nos Empilhamentos

Estes ensaios foram feitos no Laboratório de Cerâmicos Avançados do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Um dos principais testes realizados em fitas supercondutoras é a caracterização de amostras para conferir os valores de corrente crítica com aqueles especificados pelo fabricante (neste caso a SuperPower). Nessas medições foi adotado o método de medição a quatro pontas e foram utilizados uma fonte de corrente da Argantix KDC 500 A/30 V, um nanovoltímetro da Keithley 2182A e o programa em LabVIEW [112] para levantar a curva V-I com pulsos de corrente.

Para esse levantamento foram usadas amostras de 10 cm do mesmo carretel de fita supercondutora utilizada nos empilhamentos 2G. No programa em LabView, foram definidos como dados de entrada, a distância de 2,5 cm entre os contatos de tensão, a tensão máxima de 20 μ V e o tempo do pulso de corrente, com 100 ms ligado e 2s desligado. Então, a corrente foi injetada na fita com passos de 2 A, em forma de onda pulsada, e o seu valor foi aumentado até que foi ultrapassado o valor

de tensão máxima definida como critério de parada.

A caracterização das fitas supercondutoras é concedida pelo campo elétrico, que é à queda de tensão dividida pela distância entre os contatos. Assim, o critério usado para a obtenção da corrente crítica adotada nessa tese foi a que produz o campo elétrico de $1\mu\text{V}/\text{cm}$.

Como a corrente crítica é dependente do campo magnético aplicado, também é apresentado o comportamento da corrente crítica em função da intensidade de campo magnético perpendicular à superfície da fita, que é a condição do campo magnético na superfície das fitas empilhadas no rotor. Para essas medições, além do sistema de caracterização foram utilizados um eletromagneto modelo HV-4H/HSV-4H1 da Walker Scientific e uma fonte de corrente contínua da LakeShore modelo 643 de 70 A e 35 V para aplicar o campo na direção das fitas.

Os procedimentos de testes para a caracterização das fitas com campo magnético externo aplicado são similares aos do levantamento da curva V-I, exceto pela inserção do campo magnético na direção perpendicular a fita. Para isto, primeiramente foi feito a calibração do eletromagneto, aplicando corrente com a fonte CC de 5 em 5 até 70 A e medindo o campo magnético entre os seus polos com um gaussímetro. Em seguida, com a amostra de fita refrigerada em nitrogênio líquido dentro do suporte e entre os polos do eletromagneto, a fonte CC injeta corrente no eletromagneto que gera o campo magnético preestabelecido na direção da fita. Por fim, foi feito o levantamento da curva V-I para cada valor de campo magnético entre os polos do eletromagneto. Mais detalhes sobre esses sistemas de medição podem ser encontrados em [113].

4.2 Procedimentos Experimentais e Ensaios Realizados com os Protótipos N-G10 e N-G10

Nesta seção serão apresentados os procedimentos para a realização dos ensaios com os protótipos N-G10 e N-MAG que se configura como a primeira etapa do trabalho onde foram realizados ensaios de torque quase estático, rotor bloqueado e dinâmico.

Para o levantamento da curva de torque em uma máquina existem várias técnicas de medição conforme pode ser encontrado em [114, 115]. Portanto, neste trabalho, utilizou-se um sensor de torque da MK CONTROLE, modelo MKDQ, acoplado entre o eixo da máquina e a carga. Esse sensor utiliza um *straingauge* (extensômetro de resistência elétrica) que mede a deformação do eixo que é proporcional ao torque. As características do sensor estão apresentadas na tabela 4.1.

Em relação à magnetização dos empilhamentos 2G HTS, como citado na subseção

Tabela 4.1: Características do sensor de torque modelo MKDQ usado nos ensaios

Características Técnicas	Unidades
Sensibilidade nominal	2,0 mV/V
Balanco de zero	$\pm 1\%$
Repetibilidade	0,02%
Erro de fluência (20 minutos)	0,03%
Efeito da temperatura no zero	0,002% °C
Efeito da temperatura na sensibilidade	0,002% °C
Temperatura de operação	10°C a 60°C
Compensação de temperatura	10°C a 50°C
Impedância de entrada (25°C)	350 \pm 30 Ω
Impedância de saída (25°C)	350 \pm 3 Ω
Resistência de isolamento	M Ω > 5000
Tensão de excitação	10Vdc/Vac
Tensão de excitação máxima	10Vdc/Vac
Material	Alumínio
Cabo	2 metros

2.3.3, existem três técnicas de magnetização, que são: *Field Cooling*, *Zero Field Cooling* e *Pulse Magnetization*. Nessa tese as técnicas utilizadas foram FC e ZFC, pois a magnetização por pulso em empilhamentos de fita 2G não foi possível de ser realizado na tese, devido ao alto risco associado aos pulsos altos de corrente que poderiam danificar os enrolamentos do estator. Esse método é o mais indicado para uso dos empilhamentos 2G em máquinas, dado que ela é magnetizada com pulsos altos de corrente de curta duração, e assim são atingidos maiores níveis de aprisionamento de fluxo.

4.2.1 Ensaio Quase Estático

Neste ensaio, o sensor de torque foi acoplado ao rotor supercondutor e a um goniômetro que o mantinha travado em diferentes posições angulares para obter a curva de torque em função da posição angular. O estator foi alimentado em temperatura ambiente com corrente contínua de 10 e 12 A de forma a gerar um campo magnético que deve ser aprisionado no *stack* de fitas 2G quando o motor for resfriado a 77 K. Esse é o método de resfriamento na presença de campo ou *Field Cooling*. Esse ensaio foi realizado com essa técnica de magnetização porque é necessária uma intensidade de campo aplicado menor que em ZFC para aprisionar o mesmo fluxo magnético. A configuração experimental e o esquema do sistema estão mostrados nas figuras 4.1, 4.2, respectivamente.

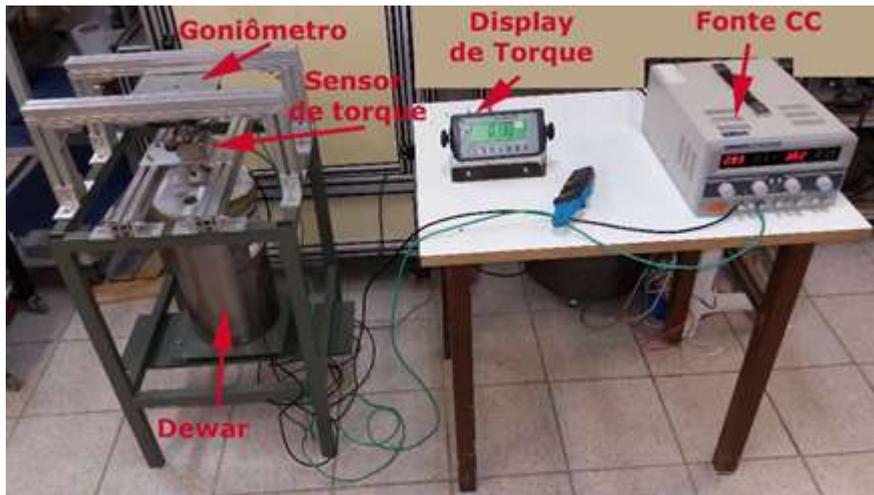


Figura 4.1: Foto do sistema de medição de torque quase estático.

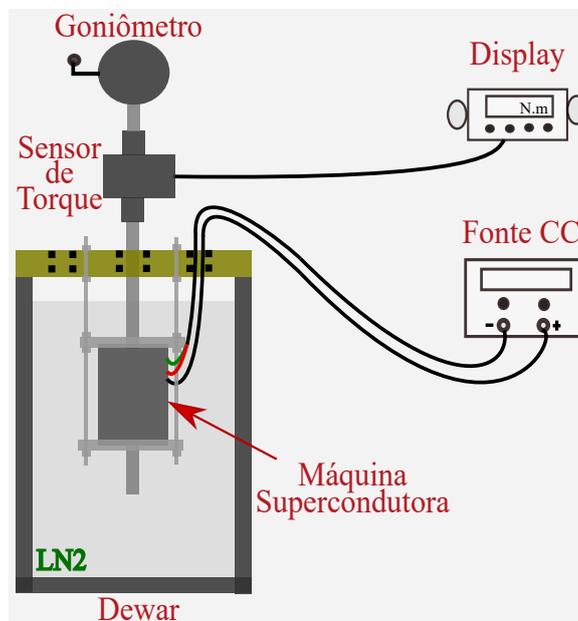


Figura 4.2: Esquema do sistema de medição de torque quase estático.

Nesta configuração é necessário manter o sensor de torque, o eixo da máquina e o goniômetro alinhados. O circuito de alimentação da máquina está mostrado na figura 4.3.

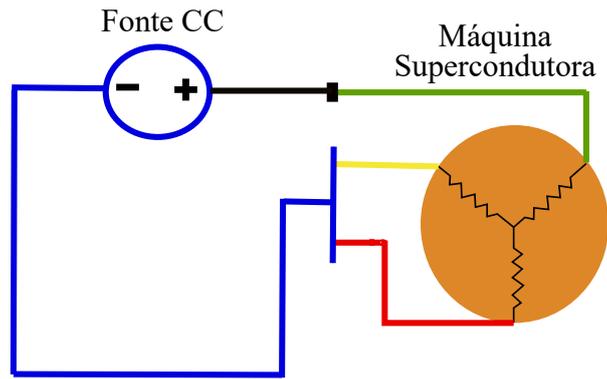


Figura 4.3: Circuito de alimentação do motor supercondutor por uma fonte CC, sendo a corrente positiva total em uma fase e metade da corrente negativa nas outras duas

Duas fases foram curto-circuitadas e ligadas no negativo da fonte e a outra fase ligada no positivo, ou seja, um fase com corrente total positiva e as outras duas com metade da corrente negativa. Esse arranjo é coerente com a alimentação de um sistema trifásico com correntes balanceadas. A ideia foi gerar polos magnéticos fixos no rotor no momento em que a máquina é refrigerada no nitrogênio líquido. Esse ensaio tem como finalidade avaliar a magnetização das fitas 2G HTS empilhadas através da força de aprisionamento atingida quando do deslocamento lento do rotor.

4.2.2 Ensaio de Rotor Bloqueado e Dinâmico

Nos ensaios de rotor bloqueado e dinâmico o goniômetro foi substituído por uma carga. Como carga dinâmica foi utilizado um freio de corrente parasita. O motor supercondutor foi resfriado com corrente nula, ou seja, na ausência de campo magnético, *Zero Field Cooling*. Nesses ensaios em que foi utilizada corrente alternada, por precaução foi usado o método ZFC, visto que, com essa técnica, a corrente é aplicada nos enrolamentos do estator com a máquina em nitrogênio líquido, o que difere do método FC, em que a corrente é aplicada antes de submeter a máquina em temperatura criogênica. As figuras 4.4 e 4.5 mostram o conjunto com o acoplamento da carga e o esquema desse sistema, respectivamente.

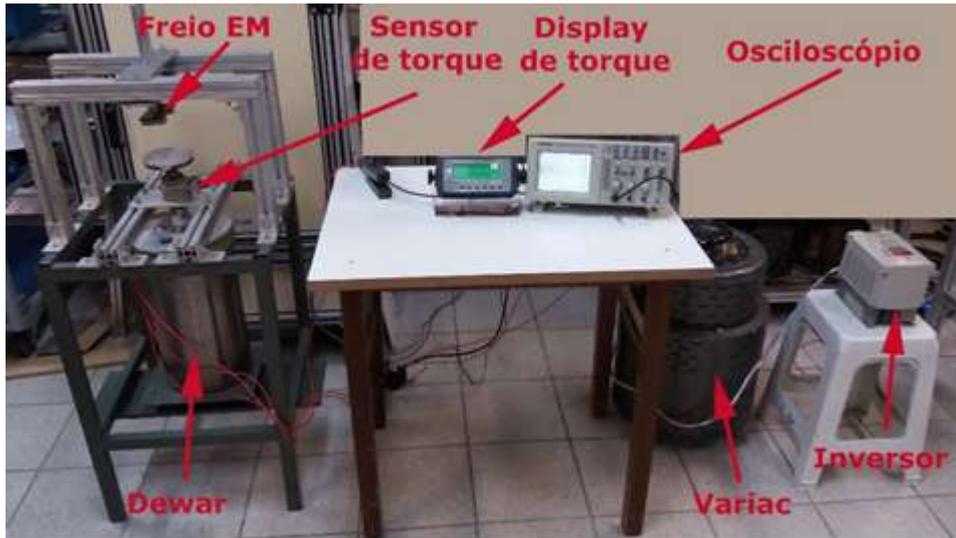


Figura 4.4: Foto do sistema de medição de torque dinâmico e com rotor bloqueado

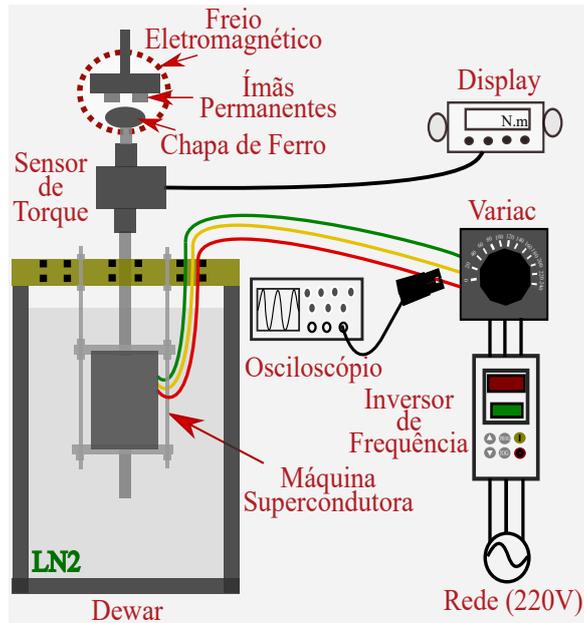


Figura 4.5: Esquema do sistema de medição de torque dinâmico e rotor bloqueado

Neste aparato também é necessário manter todos os eixos alinhados para evitar erros de medição. O circuito de alimentação da máquina está mostrado na figura 4.6.

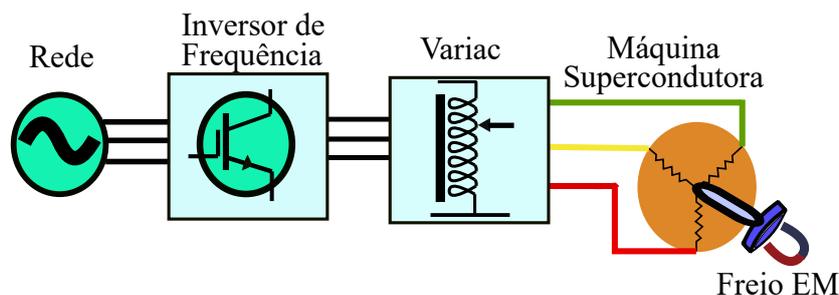


Figura 4.6: Circuito da alimentação AC do motor supercondutor com a utilização de um inversor para controlar a frequência de acionamento e um Variac para ajustar a tensão e conseqüentemente a corrente de alimentação

No primeiro ensaio, o rotor foi bloqueado pelo freio de corrente parasita, que é composto por um conjunto de ímãs permanentes e uma placa de ferro presa ao eixo. Quando os ímãs são movidos até ficarem unidos com a placa, o rotor é totalmente travado. O torque foi medido em função da frequência e corrente de acionamento. O intuito desse ensaio é analisar o torque máximo, que foi atingido quando foram acionadas todas as 10 chaves de corrente do banco de resistores, para cada frequência de alimentação.

No ensaio com carga a máquina supercondutora foi acionada por um inversor trifásico, com frequência variável, e a velocidade de rotação foi medida com um tacômetro direcionado ao eixo da máquina. Para limitar a potência transmitida, foi utilizado um Variac, de modo a alimentar a máquina com uma tensão inferior à da rede. O torque e a velocidade do motor foram medidos em função da corrente e das frequências de acionamento, aplicando-se a carga com o freio de corrente parasita. O objetivo desse ensaio é explorar o comportamento do torque com o aumento da velocidade de rotação da máquina, alimentada com inversor de frequência.

4.3 Procedimentos Experimentais e Ensaio Realizados com o Protótipo N-G10MAG

Como foi mencionado anteriormente o protótipo N-G10MAG teve como base uma máquina de indução com rotor gaiola, portanto, antes de transformá-lo em uma máquina supercondutora, alguns ensaios com essa máquina de indução convencional foram realizados, seguindo a Norma ABNT 17094-3, a fim de se obter os parâmetros e as características dessa máquina.

Alguns ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores na Unidade de Adrianópolis do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica e outros no Laboratório de Aplicações de Supercondutores da UFRJ.

Os ensaios realizados no Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores na Unidade de Adrianópolis tiveram como objetivo determinar as perdas por efeito joule no estator, o escorregamento, o fator de potência e o rendimento do motor. Para motores com potência fracionária é utilizado o método com medição direta da potência de entrada e de saída (método 1 - item 4.3 da Norma ABNT17094-3). Os instrumentos de medição utilizados nos ensaios estão apresentados no apêndice 6.1 D.

4.3.1 Ensaio com a Máquina de Indução com Rotor Gaiola Convencional

Inicialmente, foram feitas medições de resistência entre os enrolamentos do estator, utilizando a Ponte de Kelvin em corrente contínua na temperatura ambiente, como mostra a tabela 4.2, que é um dos métodos mais exatos para medir a resistência.

Tabela 4.2: Resistência entre os enrolamentos em temperatura ambiente (R, S e T indicam as três fases)

	Resistência entre os enrolamentos (Ω)	Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
R-S	13,317	26,6
T-R	13,306	26,6
S-T	13,314	26,6

Posteriormente foi feito o ensaio de elevação de temperatura do motor em tensão, potência e carga nominais. Essa carga foi aplicada por um freio dinamométrico até que o motor atingisse o seu equilíbrio térmico. Para a medição da temperatura ambiente e da carcaça, foram utilizados os termômetros especificados no apêndice 6.1 D que estão em contato com a carcaça da máquina. Pela Norma ABNT 17094-3, a variação de temperatura em intervalos regulares de 1 hora não deverá ser superior a 2°C . Os dados medidos do ensaio de elevação de temperatura estão mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Dados do ensaio de elevação de temperatura (VT é a variação de temperatura)

Horário de Medição	11:46	12:16	12:46	13:16	13:46	14:16
VT - Carcaça lateral direita (°C)	3,0	14,5	16,1	16,1	16,8	17,4
VT - Carcaça lateral esquerda (°C)	3,1	12,3	13,7	13,7	14,3	15
Temperatura ambiente (°C)	26,5	26,4	26,6	26,9	26,2	26,6
Torque (N.m)	0,01	2,002	2,002	2,002	2,038	2,081
Resistência após a elevação (Ω)						15,08

Como pode ser observado na tabela 4.3, a variação de temperatura em 1 hora, tanto na carcaça lateral direita como na lateral esquerda, é menor que 2°C, então o motor foi desligado e preparado para o ensaio em carga.

Assim como no ensaio de elevação de temperatura, no ensaio em carga também foi utilizado um freio dinamométrico para impor a carga e, então, foram aplicados, em tensão e potência nominais, pontos de 25, 50, 75, 100, 125 e 150 por cento da carga nominal. As leituras são mostradas na tabela 4.4:

Tabela 4.4: Grandezas medidas no ensaio em carga

Grandeza medida	150%	125%	100%	75%	50%	25%
Temperatura ambiente (°C)	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6	26,6
Temperatura do enrolamento (°C)	50,9	50,9	50,9	50,9	50,9	50,9
Frequência (Hz)	60	60	60	60	60	60
Velocidade (rpm)	1715	1732	1748	1762	1775	1787
Potência de entrada (W)	741,4	616,9	505,58	398,44	295,38	197,48
Corrente de linha média (A)	2,41	2,16	1,96	1,81	1,71	1,67
Tensão de linha média (V)	220	220	220	220	220	220
Conjugado (N.m)	2,993	2,500	1,995	1,496	0,996	0,496
Resistência antes da realização do ensaio em carga (Ω)						14,758
Resistência após a realização do ensaio em carga (Ω)	14,898					

Após o ensaio em carga, o freio dinamométrico foi desacoplado do eixo do motor e foram aplicadas tensão e frequência nominais de forma a atingir um escorregamento quase nulo, que configura o ensaio em vazio. As medições de tensão, corrente e potência são apresentadas na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Medições do ensaio em vazio

Tensão de linha média (V)	220,61
Tensão R (V)	220,89
Tensão S (V)	220,4
Tensão T (V)	220,55
Corrente de linha média (A)	1,69
Corrente R (A)	1,69
Corrente S (A)	1,71
Corrente T (A)	1,67
Potência consumida (W)	105,54
Potência R (W)	32,14
Potência S (W)	37,32
Potência T (W)	36,08
Resistência antes do ensaio (Ω)	14,490
Resistência após o ensaio (Ω)	14,558

Através dos dados obtidos nesses ensaios foi possível determinar a resistência por fase do estator (R_1), as perdas por efeito joule (P_{es}), a potência de saída (P_m), o fator de potência (FP) e o rendimento do motor (η).

Como as bobinas estavam conectadas em delta, a resistência por fase no estator foi obtida, a partir da média das resistências medidas no ensaio em carga, da seguinte forma:

$$R_{1cc\Delta} = \frac{3}{2} \cdot 14,83 = 22,25 \Omega. \quad (4.1)$$

A transformação dessa resistência na configuração delta ($R_{1cc\Delta}$) para o modelo equivalente em estrela (R_{1ccY}) é obtido conforme a seguinte expressão.

$$R_{1ccY} = \frac{R_{1cc\Delta}}{3} = \frac{22,25}{3} = 7,42 \Omega. \quad (4.2)$$

Esse é um valor aproximado da resistência do estator (R_1), pois não leva em consideração o efeito pelicular que acontece quando uma tensão alternada é usada nos enrolamentos [107]. Contudo, é uma forma simplificada do cálculo da resistência do estator, o que auxilia na determinação das perdas em temperatura ambiente e de outros parâmetros do motor. As perdas por efeito joule no estator (P_{es}) são dadas por:

$$P_{es} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 7,42 \cdot 1,96^2 = 85,51 \text{ W}, \quad (4.3)$$

que são as perdas no estator em 100% de carga.

A potência mecânica (P_m), o escorregamento (s), o fator de potência (FP) e o rendimento (η) foram determinados em carga nominal da seguinte forma:

$$P_m = \tau \cdot \omega = 1,995 \cdot 183 = 365,085 \text{ W}, \quad (4.4)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{1800 - 1748}{1800} \cdot 100 = 2,9 \%, \quad (4.5)$$

$$FP = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I} = \frac{505,58}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1,96} = 0,68, \quad (4.6)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P} \cdot 100 = \frac{365,085}{505,58} \cdot 100 = 72,2 \%, \quad (4.7)$$

em que n_s é a velocidade síncrona de 1800 rpm, τ é o conjugado, ω é a velocidade angular expressa em radianos por segundo (rad/s) e P, V e I são potência de entrada, tensão e corrente, respectivamente.

Como não foi possível realizar o ensaio de rotor bloqueado e o de variações de carga acionado com um inversor de frequência, no laboratório de Adrianópolis, por limitações do sistema para testes com motores de potência fracionária, esses ensaios foram realizados no Laboratório de Aplicações de Supercondutores da UFRJ. O ensaio de variações de carga acionado com inversor de frequência é relevante dado que será feita a comparação direta dessa característica com a máquina supercondutora.

No ensaio de rotor bloqueado o rotor foi impedido de girar e foi aplicada uma tensão de 20% de seu valor nominal para obter a corrente nominal. Como o rotor está travado, não há velocidade relativa entre o fluxo do rotor e do estator, ou seja, escorregamento unitário, o que explica o baixo valor de tensão aplicado. Os valores de tensão, corrente e potência trifásica foram medidos e apresentados na tabela 4.6, sendo a potência de entrada para suprir as perdas por efeito Joule no rotor e no estator.

Tabela 4.6: Tensão, corrente, torque e potência do ensaio com rotor bloqueado

Tensão R (V)	44,38
Tensão S (V)	45,51
Tensão T (V)	44,35
Corrente R (A)	1,871
Corrente S (A)	1,925
Corrente T (A)	1,871
Potência R (W)	69,17
Potência S (W)	71,66
Potência T (W)	68,96
Torque (N.m)	2,17

A partir dos ensaios realizados a vazio e de rotor bloqueado foram determinados os outros parâmetros da máquina, resistência do rotor (R_2), reatância do estator (X_1), reatância do rotor (X_2) e a reatância de magnetização (X_m) da seguinte forma:

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{n_f \cdot \left(\frac{I_{bl}}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{69,93}{3 \cdot \left(\frac{1,889}{\sqrt{3}}\right)^2} = 19,6 \Omega, \quad (4.8)$$

onde n_f é o numero de fases e R_{bl} , P_{bl} e I_{bl} são resistência, potência e corrente, respectivamente, no ensaio de rotor bloqueado. Com a resistência de rotor bloqueado determinada pode-se calcular a resistência R_2 como:

$$R_2 = R_{bl} - R_1 = 19,6 - 7,42 = 12,18 \Omega. \quad (4.9)$$

As reatâncias do estator e do rotor para motores com rotor gaiola de esquilo são dadas de acordo com a tabela de classificação da Norma NEMA MG 1-2014. A partir dessa tabela tem-se que:

$$\frac{X_1}{X_{bl}} = \frac{X_2}{X_{bl}} = 0,5, \quad (4.10)$$

ou seja,

$$X_1 = X_2 = X_{bl} \times 0,5 = 19,6 \times 0,5 = 9,8 \Omega, \quad (4.11)$$

em que X_{bl} é a reatância de rotor bloqueado.

Por fim, a partir do modulo da impedância de entrada equivalente (Z_{eq}), determinada de forma aproximada do ensaio a vazio,

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{\phi vz}}{I_{1vz}} \approx X_1 + X_m, \quad (4.12)$$

foi obtida X_m :

$$X_m = \frac{V_{\phi vz}}{I_{1vz}} - X_1 = \frac{127,37}{1,69} - 9,8 = 75,37 \Omega, \quad (4.13)$$

em que $V_{\phi vz}$ e I_{1vz} são a tensão e corrente de fase do ensaio em vazio, respectivamente.

Como mencionado anteriormente, também houve a necessidade da realização do ensaio com variações de carga com a máquina acionada com um inversor de frequência, de modo a comparar essa característica com a da máquina supercondutora. No ensaio foi utilizada uma máquina CC operando como gerador. O eixo do motor de indução gaiola foi acoplado ao sensor de torque que, por sua vez, foi acoplado ao eixo do gerador CC. O motor de indução foi acionado com um inversor de frequência e como carga foi utilizado o gerador CC, em que seus enrolamentos da armadura foram conectados a um banco de resistores, para variar a sua resistência (ajuste grosso).

Nos enrolamentos de campo foi conectado um retificador e um Variac monofásico, para o ajuste fino. O resultado será apresentado no capítulo 5.

Após a realização dos ensaios com a máquina de indução convencional, ela foi transformada em uma máquina supercondutora, protótipo N-G10MAG, e ensaios com a máquina operando como motor e como gerador foram realizados em banho de nitrogênio líquido. Os procedimentos para a realização desses ensaios serão apresentados a seguir.

4.3.2 Protótipo N-G10MAG Operando como Motor

Com a máquina operando como motor foram realizados ensaios de torque com variações de carga e com rotor bloqueado.

Ensaio Dinâmico com Variações de Carga

Nesse ensaio, assim como no ensaio com a máquina convencional acionada com inversor, como carga foi utilizada uma máquina de corrente contínua operando como gerador. Também para variar a carga foi utilizado um banco de resistores em série com os enrolamentos da armadura do gerador CC, um retificador e um Variac monofásico para variar a tensão no enrolamento de campo e controlar a potência gerada por esse gerador. Assim como no ensaio dinâmico realizado nos protótipos N-G10 e N-MAG, a máquina supercondutora foi resfriada em corrente nula. Além das medições de torque também foram medidos tensão, corrente e potência com o auxílio de um analisador de potência WT 1800 da Yokogawa. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram o conjunto com o acoplamento da carga e o esquema do sistema, respectivamente.

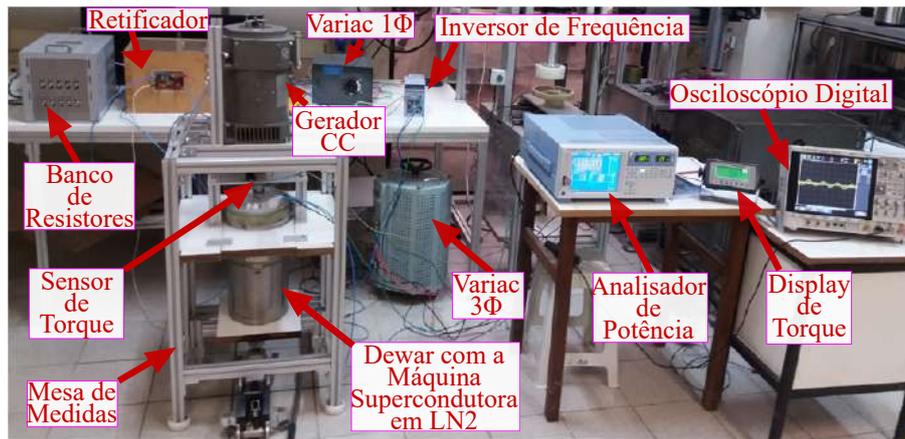


Figura 4.7: Foto do sistema de medição de torque com variações de carga

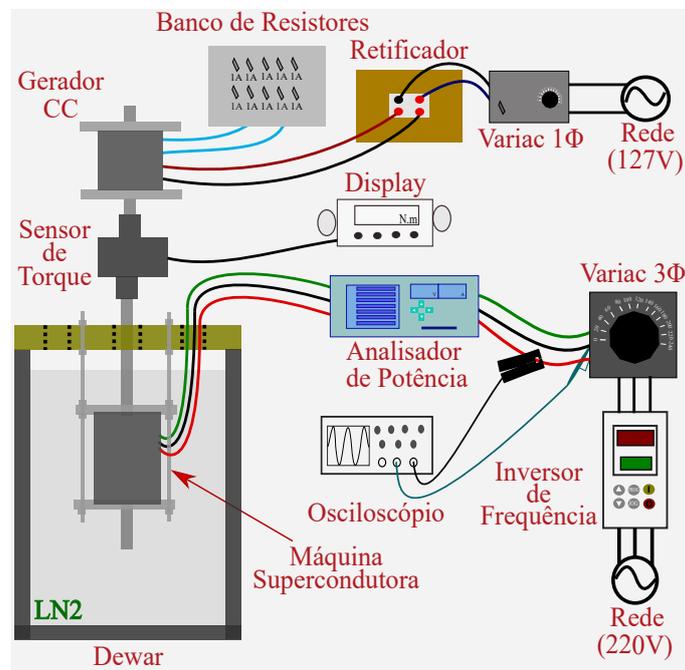


Figura 4.8: Esquema do sistema de medição de torque com variações de carga

Nos ensaios, a máquina supercondutora foi acionada por um inversor trifásico com frequência variável e a velocidade de rotação foi medida com um tacômetro em contato com o eixo do gerador CC. Também para limitar a potência transmitida foi utilizado um Variac trifásico, de modo a alimentar a máquina com uma tensão inferior à da rede. O torque e a velocidade do motor também foram medidos em função da corrente e das frequências de acionamento, variando-se a carga aplicada com o banco de resistores. Esse banco possui 10 degraus de corrente de 1 A e tensão de 220 V, ou seja, à medida que foi adicionadas as chaves de corrente a resistência do banco caiu, e, como o banco é ligado em série com o enrolamento da armadura, à medida que foi reduzida a resistência do banco foi aumentada a carga no eixo do

gerador CC. O ajuste fino da potência foi feito controlando a corrente de campo com o retificador e o Variac monofásico.

Ensaio com o Rotor Bloqueado

Antes da realização deste ensaio foram depurados os resultados da configuração com carga, de modo a obter a corrente em carga máxima. Feito isso, o ensaio de rotor bloqueado foi realizado com o valor da corrente máxima para as diferentes frequências de acionamento. O rotor foi bloqueado com um aparato de aço e, com o auxílio do Variac, foi possível variar a tensão até atingir a corrente máxima da frequência configurada no inversor. O motor supercondutor foi resfriado com corrente nula, ou seja, em ZFC. A cada ensaio o rotor era aquecido por 3 minutos externamente sob influência de uma resistência elétrica, de modo que o material transitasse do estado supercondutor para o estado normal para evitar a influência do fluxo aprisionado anteriormente.

Além dos ensaios com a máquina operando como motor, também foram realizados ensaios com a máquina operando como gerador, como será descrito a seguir.

4.3.3 Protótipo N-G10MAG Operando como Gerador

Com a máquina operando como gerador, foram realizados ensaios de torque quase estático e com variação de carga, e foram medidas a tensão, a corrente e a potência gerada.

Ensaio Quase Estático

Este ensaio foi praticamente idêntico ao ensaio realizado com os protótipos N-G10 e N-MAG, em que o sensor de torque foi acoplado ao rotor supercondutor e a um goniômetro, que o mantinha travado em diferentes posições angulares. De mesmo modo, os enrolamentos do estator foram alimentados com corrente contínua e, posteriormente, a máquina foi submetida à temperatura do nitrogênio líquido. A configuração experimental e o esquema do sistema estão mostrados nas figuras 4.9 e 4.10, respectivamente:

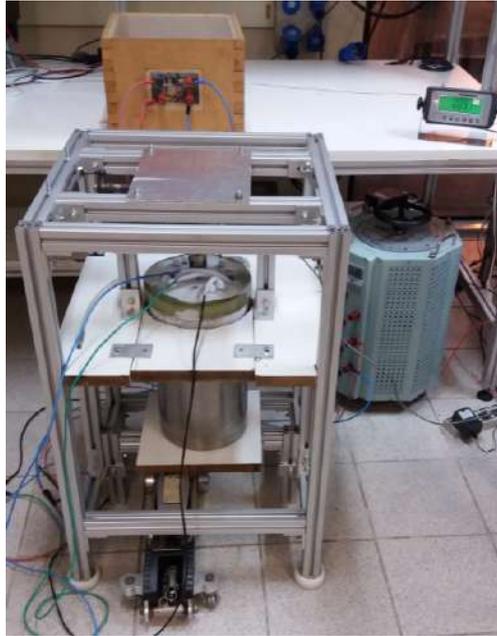


Figura 4.9: Medições de torque em relação à posição angular, com o motor em condição quase estático, para o ensaio com o protótipo N-G10MAG.

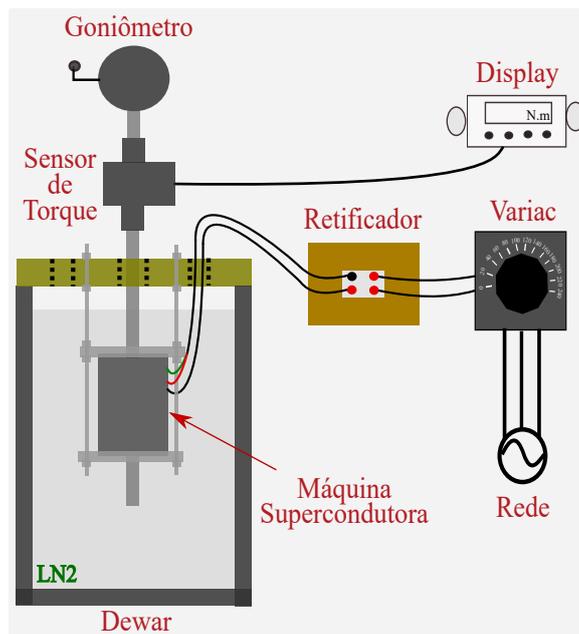


Figura 4.10: Esquema do sistema de medição de torque quase estático.

Nesse ensaio foram utilizados o Variac e o retificador de modo a ajustar o valor da corrente contínua, uma vez que a fonte CC estava apresentando defeito.

Ensaio dinâmico com variações de carga

Pela maneira como foram magnetizados os empilhamentos 2G, em ZFC, a realização desse ensaio depende do fluxo aprisionado no rotor supercondutor antes do

acionamento da máquina com o motor CC. Por isto, anteriormente a esse ensaio, foi realizado o ensaio com a máquina operando como motor em carga máxima. Após esse ensaio, mantendo-se a máquina em estado supercondutor na temperatura de 77K, foram alteradas as conexões e montada a configuração como gerador. Essa configuração experimental e o esquema do sistema estão mostrados nas figuras 4.11 e 4.12, respectivamente.

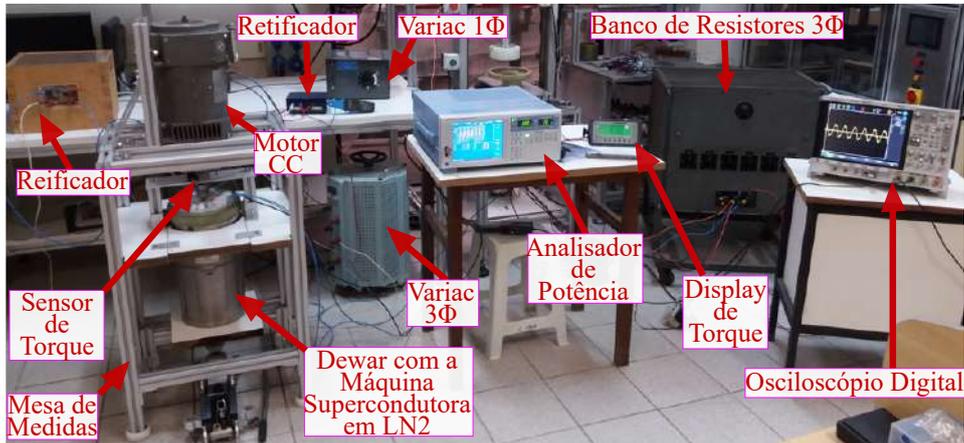


Figura 4.11: Sistema de medição da máquina supercondutora operando como gerador

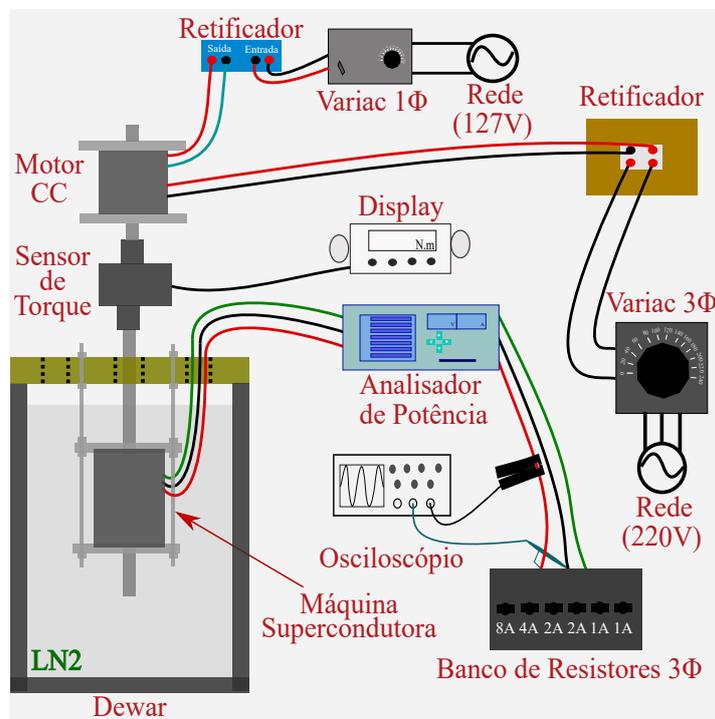


Figura 4.12: Esquema do sistema de medição da máquina operando como gerador

Nessa configuração, para a variação da carga, foi utilizado um banco de resistores trifásico e, para acionar a máquina supercondutora, foi utilizada a máquina CC

operando como motor. Para alimentar o motor CC, foi utilizado o Variac trifásico, sendo na saída utilizada apenas duas fases. Além disso, foi usado também o retificador de maior potência para alimentar os enrolamentos da armadura e o Variac monofásico com um retificador de menor potência para alimentar os enrolamentos de campo. Inicialmente foi ajustada a corrente de campo com o Variac monofásico e então ajustada a corrente da armadura com o Variac trifásico, de modo a atingir a velocidade de rotação condizente com a frequência de acionamento da máquina supercondutora anteriormente pré-estabelecida. Feito isso, cargas foram adicionadas, medindo-se diversas grandezas, como o torque, a tensão, a corrente e a potência pelo analisador WT1800 em tempo real.

Os procedimentos e ensaios com o motor de indução com rotor gaiola seguiram o padrão da Norma ABNT NBR 17094-3 e da Norma NEMA MG 1-2014, mas como ainda não existem normas para os ensaios de máquinas supercondutoras seguiram-se os procedimentos apresentados em [13, 116].

Considerações Finais do Capítulo

O presente capítulo apresentou todos os procedimentos e ensaios realizados com os protótipos supercondutores e com a máquina de indução com rotor gaiola, fazendo-se uma apanhado geral das técnicas, dos instrumentos e dos equipamentos de medição utilizados nesses ensaios.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Este capítulo apresentará todos os resultados obtidos na tese. Inicialmente, serão apresentados aqueles para os modelos de fitas supercondutoras, SF12050 e SF12100, usados nos empilhamentos 2G. Em seguida, os resultados com os dois primeiros protótipos N-G10 e N-MAG, conforme descritos nas subseções 3.1.1 e 3.1.2, e, por fim, os do protótipo N-G10MAG, descrito na subseção 3.1.4. Os protótipos N-G10 e N-MAG possuem duas renques de fitas em espirais de nove camadas cada, tendo o protótipo N-G10 núcleo em fibra de vidro e o protótipo N-MAG em aço magnético. O protótipo N-G10MAG contém três fileiras de fitas empilhadas e cada uma com dezoito camadas, sendo o núcleo composto em sua maior parte em fibra de vidro e envolto por uma camada de aço magnético.

5.1 Caracterização das Fitas 2G

Os primeiros resultados apresentados serão em relação às fitas supercondutoras utilizadas para o empilhamento nos rotores dos três protótipos (N-G10, N-MAG e N-G10MAG). O ensaio mais comum realizado em fitas supercondutoras é o levantamento da curva $V \times I$. Em geral, esse ensaio é feito com uma amostra de fita supercondutora. Como foram utilizados dois tipos de fita 2G, foram caracterizadas amostras de ambas, cujos resultados são apresentados na figura 5.1.

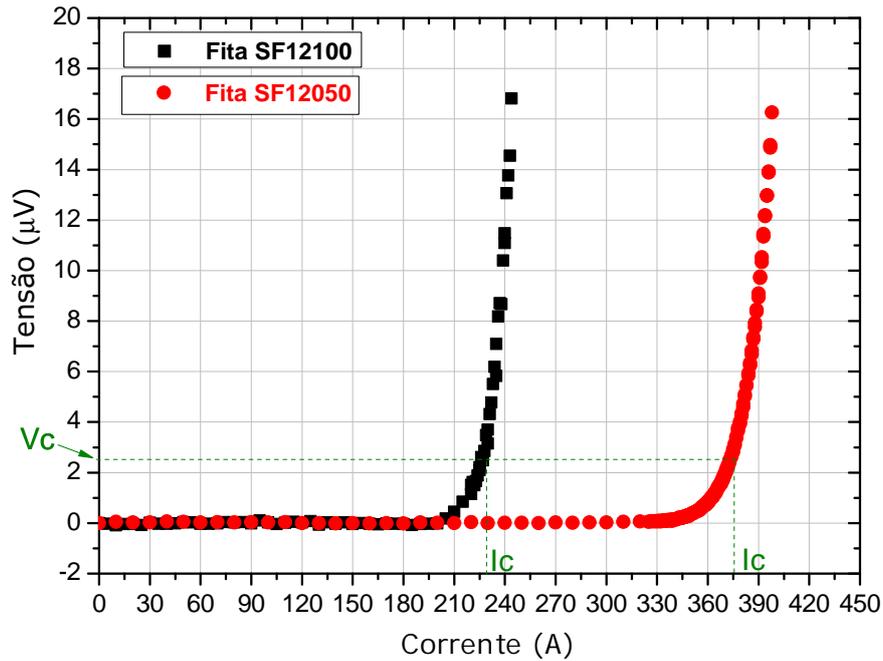


Figura 5.1: Caracterização das fitas supercondutoras, modelo SF12050 utilizado no empilhamento dos protótipos N-G10 e N-MAG e modelo SF12100 utilizado no empilhamento do protótipo N-G10MAG. V_c e I_c são tensão e corrente crítica, respectivamente.

Considerando o critério de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ e a distância entre os contatos de tensão de $2,5 \text{ cm}$, para as amostras de fita supercondutora de 10 cm dos dois modelos: (i) SF12050, utilizado nos protótipos N-G10 e N-MAG e (ii) SF12100, utilizado no protótipo N-G10MAG, apresentaram corrente crítica (I_c) de 377 A e 235 A , respectivamente. Esses valores estão próximos dos valores mínimos de corrente crítica especificados pelo fabricante, que foram de 369 A para o modelo SF12050 e de 242 A para o modelo SF12100.

Como o princípio de operação da máquina se baseia no campo magnético aprisionado pelas fitas 2G, devido ao campo magnético gerado no estator, é necessário avaliar também o comportamento da corrente crítica de amostras dessas fitas sob campo magnético aplicado. A figura 5.2 apresenta o resultado do comportamento da corrente crítica em função da densidade de fluxo magnético, em amostras de fita de 10 cm , com o campo magnético na direção perpendicular à sua face, que é a condição do campo magnético nas fitas empilhadas no rotor.

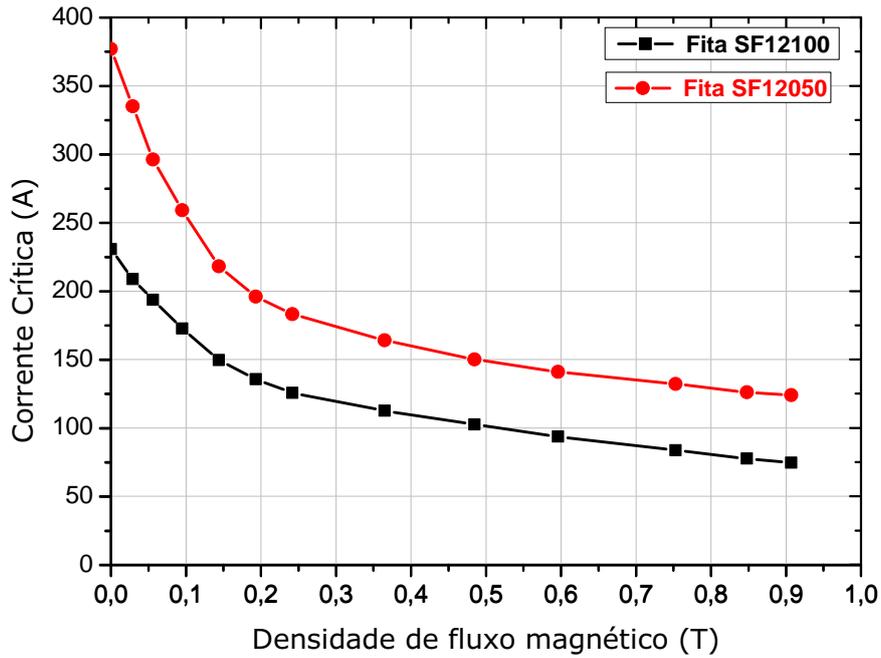


Figura 5.2: Comportamento da corrente crítica em função da densidade de fluxo magnético.

Pela característica das curvas pode-se notar que a redução da corrente crítica é acentuada para baixos campos. Por exemplo, no modelo de fita SF12050, com um campo de apenas 0,144 T, a corrente crítica caiu de 377 A para 218 A. Enquanto que para valores de campo um pouco maiores, a redução é menor, como nos campos de 0,365 T e de 0,485 T, em que a corrente crítica caiu de 164 A para 150 A. De mesmo modo acontece no modelo de fita SF12100, com as curvas tendendo para um patamar quase constante.

Isso mostra que a corrente crítica do empilhamento 2G deve ser considerada nessa região onde a redução é menor, pois mesmo que a densidade de fluxo magnético seja de poucos militeslas, a diminuição inicial é acentuada. O comportamento dessas fitas em campo magnético é bem melhor para temperaturas mais baixas, como 30-40 K [61]. Essas temperaturas são alcançadas com *cryocoolers*, em máquinas de escala real. Para o propósito desta tese, que é explorar a fundo o conceito da máquina com empilhamentos 2G em espiral no rotor, a temperatura do nitrogênio líquido é suficiente. O uso de *cryocoolers* seria uma etapa para trabalhos futuros.

Após apresentar os resultados de caracterização e do comportamento da corrente crítica com campo magnético aplicado, serão apresentados os resultados dos ensaios nos protótipos da máquina supercondutora.

5.2 Resultados de Ensaio dos Protótipos N-G10 e N-MAG

Nesta seção, serão apresentados e debatidos os resultados obtidos com os dois primeiros protótipos desenvolvidos e testados em nitrogênio líquido a 77 K. Esses protótipos foram descritos em 3.1.1 e 3.1.2, respectivamente, em que o protótipo N-G10 possui núcleo em fibra de vidro e o protótipo N-MAG com núcleo em aço magnético de alta permeabilidade. Na superfície do núcleo de ambos foram empilhadas duas fitas 2G com nove camadas cada. Para cada condição de teste nos protótipos N-G10 e N-MAG, dois conjuntos de medidas foram realizados para dois valores de corrente contínua, $I = 10$ A e $I = 12$ A.

5.2.1 Resultados do Ensaio Quase Estático

Esse ensaio foi descrito na subseção 4.2.1. A Figura 5.3 mostra a curva de torque em função da posição angular, na condição de rotor quase estático para os dois protótipos apresentados anteriormente, sendo um com o núcleo em G10 e o outro com o núcleo em aço magnético.

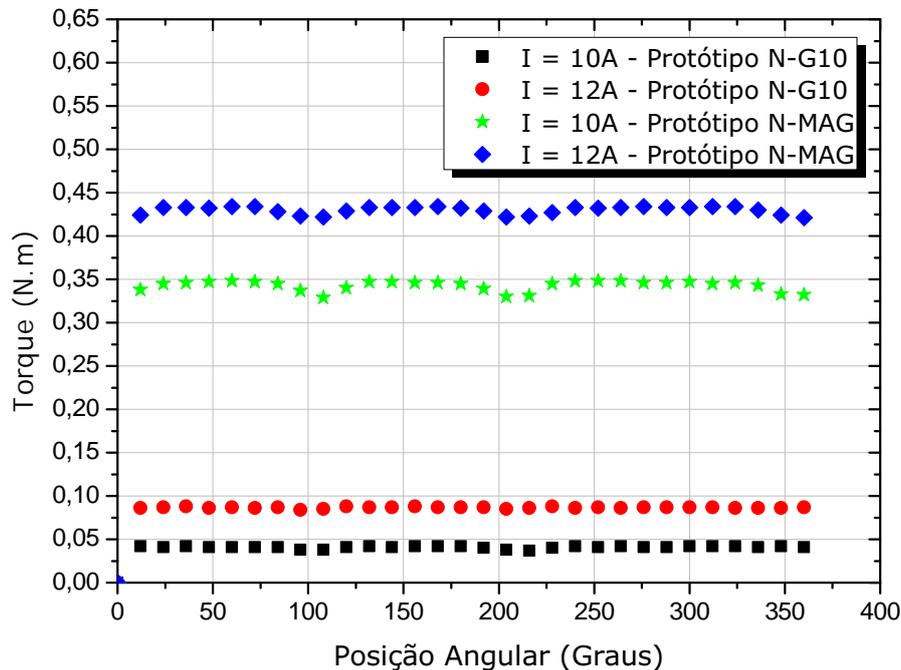


Figura 5.3: Medições de torque em relação à posição angular, com o motor em condição quase estático para os dois protótipos: protótipo N-G10 com o núcleo do rotor em G10 e protótipo N-MAG com o núcleo do rotor em Aço magnético.

Como pode ser observado na figura 5.3, o torque obtido com o protótipo N-MAG é maior do que o de N-G10. Isso pode ser associado a uma maior dispersão de fluxo,

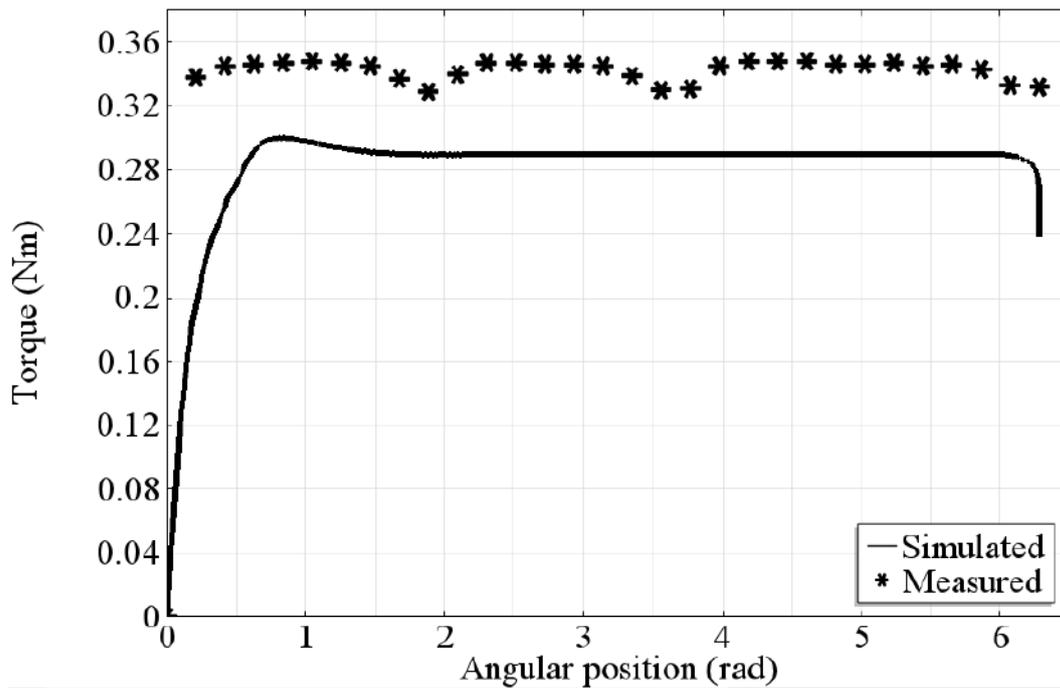
já que há menor penetração do campo magnético nas fitas empilhadas no núcleo de G10, por não ser um material ferromagnético. Os resultados apresentam uma pequena variação de torque em relação à posição angular do rotor, que pode ser associada às várias camadas do empilhamento em espiral, uma vez que a espiral é finita e tem a borda de cima diferente da de baixo, ou seja, a circunferência não é perfeita, com um pequeno degrau de 0,1 mm no início e no final do empilhamento 2G, como mostra a figura 3.2. Além disso, pode interferir também a existência de um pequeno espaço entre os empilhamentos, de 2 mm, o que deixa a distribuição de campo magnético no entreferro não uniforme.

O nível de torque atingido ainda é baixo - mesmo no protótipo com núcleo de aço em nitrogênio líquido - em comparação com a máquina com ímãs permanentes em temperatura ambiente. Ou seja, mesmo a máquina supercondutora sendo alimentada com corrente maior, de 12 A, o torque foi menor, de 0,43 N.m, comparada à máquina convencional em que para a corrente nominal de 1,6 A o torque foi de 0,47 N.m. Isto pode estar associado ao baixo número de camadas supercondutoras empilhadas, pois haviam apenas nove camadas em cada empilhamento com fita 2G. Na seção 5.3, serão analisados os resultados do protótipo N-G10MAG, em que cada empilhamento possui dezoito camadas, o dobro dos protótipos N-G10 e .

Apesar do baixo torque nos protótipos N-G10 e N-MAG, como pode ser observado na figura 5.3, para valores de alimentação CC muito próximos, $I = 10$ A e $I = 12$ A (aumento de 16,6%) passando de 0,35 N.m para 0,45 N.m. Isso sugere que, provavelmente, com maiores magnitudes de corrente poderiam ser obtidos incrementos em maior proporção no torque.

O peso e volume da máquina foram reduzidos, uma vez que os ímãs permanentes são bem mais pesados e volumosos (240 g e $15,8 \text{ cm}^3$) que as fitas 2G empilhadas (24 g e $6,3 \text{ cm}^3$).

O ensaio quase estático com o núcleo do rotor em aço magnético, protótipo N-MAG, também foi simulado em um programa de elementos finitos como apresentado em [72, 73] de modo a analisar o comportamento dessa nova configuração de máquina. No modelo foi usado a formulação A-V-H e a técnica de homogenização, em que os *stacks* são representados como blocos. Essa modelagem se mostrou pertinente para uma primeira análise do comportamento desse tipo de máquina. A figura 5.4 mostra os resultados do torque simulado e experimental para o ensaio quase estático com alimentação de 10 A.

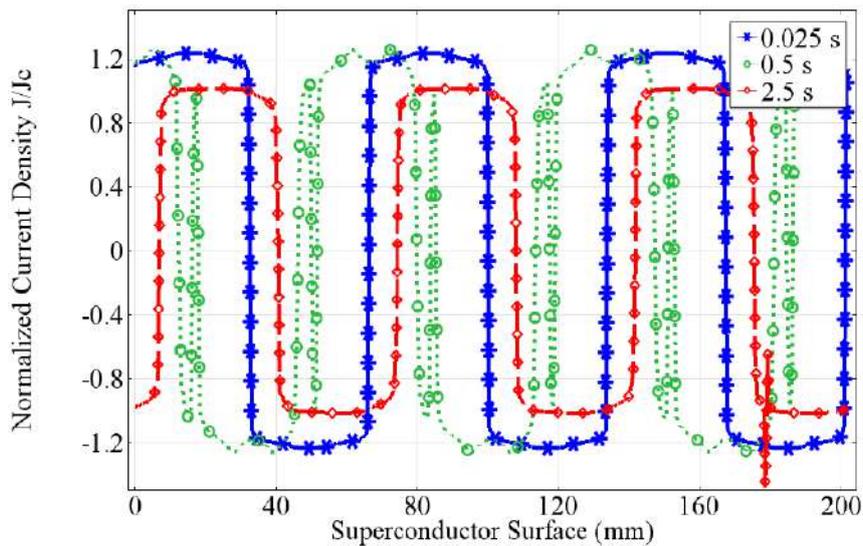


Copyright © 2020, IEEE

Figura 5.4: Resultados do torque simulado e experimental na condição quase estática com alimentação de 10 A [73].

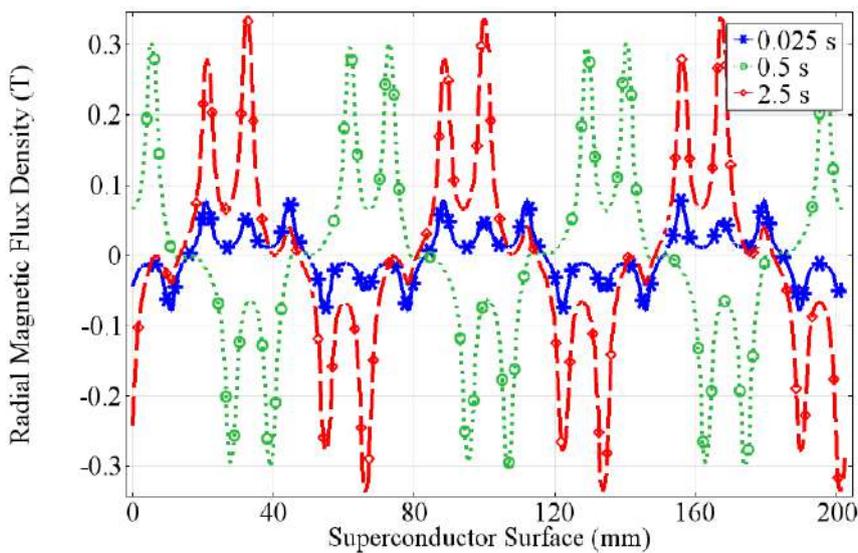
Essas oscilações que ocorram no resultado experimental e não aconteceram na simulação podem ser associadas ao fato de que nos ensaios experimentais o torque é medido após parar o movimento, sendo o tempo estático diferente entre as medições, enquanto que na simulação o movimento e a determinação do torque foram constantes [73]. Existe também uma diferença no início das curvas, pois devido a limitações do sistema, nos ensaios experimentais, só foi possível medir o torque a partir de 6 graus (0,1047 rad).

Através das simulações também foi possível mostrar como se dá a distribuição da densidade de corrente, figura 5.5, e o comportamento do campo magnético na superfície dos empilhamentos 2G, como mostra a figura 5.6.



Copyright © 2020, IEEE

Figura 5.5: Distribuição da densidade de corrente por toda a extensão longitudinal da superfície do empilhamento 2G em diferentes momentos [73].



Copyright © 2020, IEEE

Figura 5.6: Componente radial da distribuição da densidade do fluxo magnético por toda a extensão longitudinal da superfície do empilhamento 2G em diferentes momentos [73].

Quando a máquina é alimentada, são induzidos laços de corrente nos empilhamentos que seguem os polos do estator [73]. Como pode ser observado na figura 5.5, no instante 0,5 s, em que começa o movimento, houve uma alteração na onda quadrada para que acontecesse a indução de corrente, mas como é um deslocamento lento, então não foi o suficiente para modificar a forma de onda[73]. Assim, conforme

figura 5.6, a cada movimento do rotor ocorre uma mudança na magnetização para reproduzir o campo magnético do estator no supercondutor [72, 73]. Portanto, o torque medido é devido à força de aprisionamento e é o suficiente para garantir essa alteração na magnetização. Por isto, praticamente não há mudança no torque com o deslocamento angular, diferente da máquina de síncrona com ímãs permanentes, na qual o deslocamento angular causa uma alteração significativa no conjugado [73].

5.2.2 Resultado do Ensaio de Rotor Bloqueado

Essa metodologia de ensaio está descrita na subseção 4.2.2. A Figura 5.7 mostra o resultado de torque com o rotor bloqueado em função da frequência de alimentação.

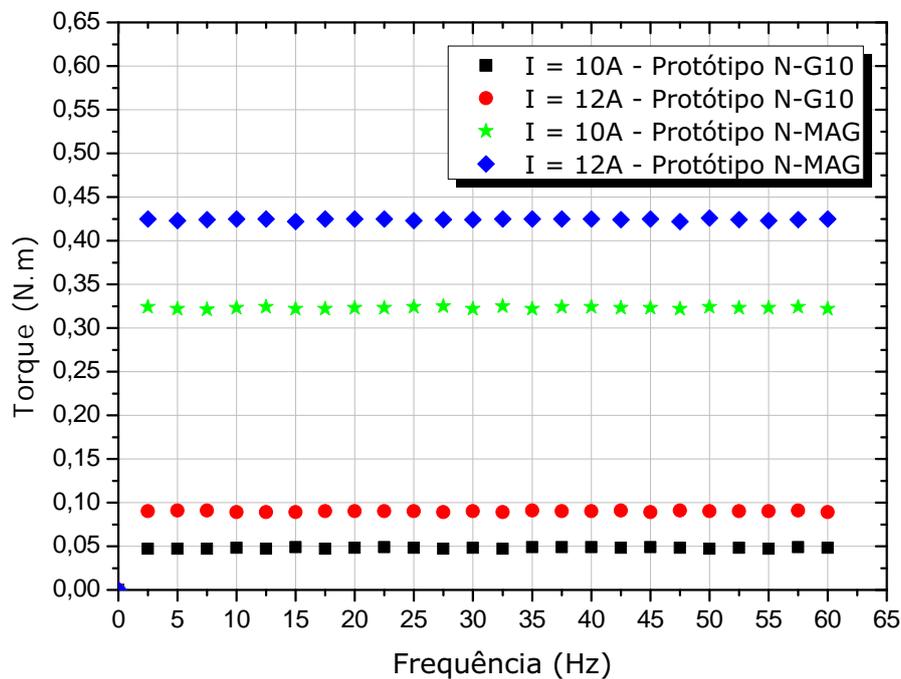


Figura 5.7: Medições de torque com relação à frequência, com o motor em condição bloqueado para os dois protótipos: protótipo N-G10 com o núcleo do rotor em G10 e protótipo N-MAG com o núcleo do rotor em Aço.

Nesta análise, o motor foi alimentado com um inversor de frequência e um Variac, conforme sistema experimental apresentado nas figuras 4.4 e 4.5. As correntes são representadas no gráfico pelos seus valores eficazes. Pelo mesmo motivo apresentado no resultado quase estático, também nesse ensaio o torque é maior no protótipo N-MAG do que no protótipo N-G10. Apesar da alimentação em CA, os valores de corrente eficazes foram equivalentes aos de corrente CC do ensaio quase estático, $I = 10 A$ e $I = 12 A$, para a correlação dos resultados. As curvas apresentadas se assemelham às características das curvas de torque por frequência de máquinas supercondutoras já desenvolvidas [116], em que o torque é praticamente constante.

Também o ensaio de rotor bloqueado foi simulado em um programa de elementos finitos com os resultados apresentados em [72]. Os resultados das simulações mostraram o mesmo comportamento dos ensaios experimentais, em que o torque da máquina não variou com o aumento da frequência [72]. Nas simulações, a amplitude do torque foi de 0,3 N.m para um campo no gap de 0,6 T [72].

5.2.3 Resultado do Ensaio Dinâmico

A configuração do ensaio foi descrita conforme apresentada na subseção 4.2.2. A Figura 5.8 apresenta a curva de torque por velocidade com o motor efetivamente em operação, alimentado por corrente alternada com os mesmos valores RMS da análise do rotor bloqueado, com a frequência variando em passos de 5 Hz até atingir 60 Hz.

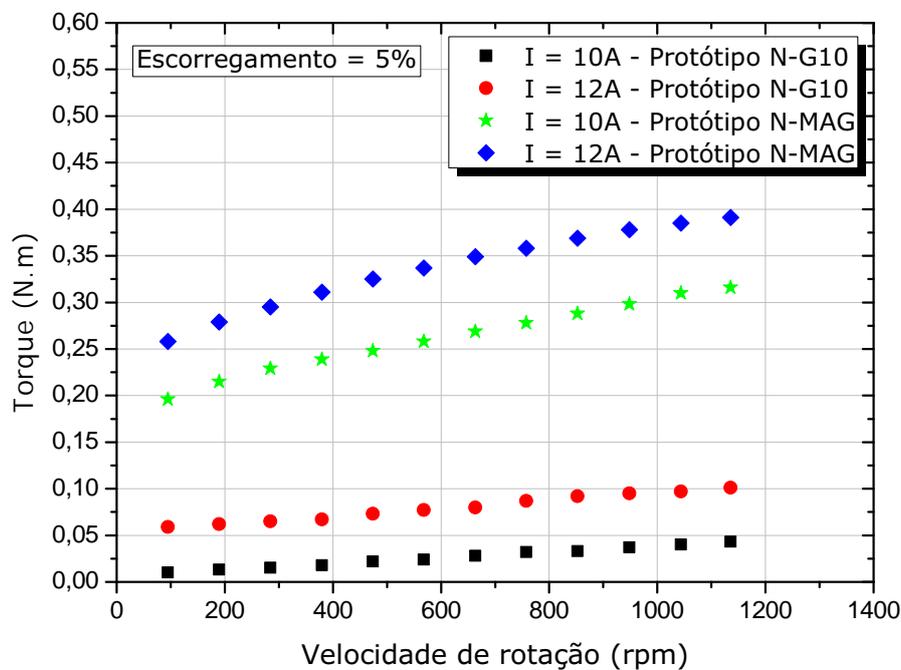


Figura 5.8: Medições de torque com a variação da velocidade de rotação em ensaio dinâmico para os dois protótipos: protótipo N-G10 com o núcleo do rotor em G10 e protótipo N-MAG com o núcleo do rotor em aço.

Este resultado mostra o torque crescente à medida que a velocidade aumenta, comportamento característico da alimentação de máquinas com inversor de frequência, tal como apresentado em [28]. Portanto, os valores máximos de torque alcançados foram na maior velocidade da máquina, sendo esses valores máximos muito próximos aos apresentados no teste de rotor bloqueado. O escorregamento de 5% é na maior velocidade da máquina.

Devido ao tempo altíssimo de simulação, o ensaio com carga não foi simulado. No

entanto, foram realizadas simulações de transitório da máquina sem carga para dar uma percepção de como é a magnetização do empilhamento 2G [72]. Desta forma, a corrente de alimentação foi extrapolada para um valor de 500 A, com o intuito de ultrapassar a corrente crítica e induzir correntes persistentes no empilhamento 2G [72]. Nessa condição, os resultados das simulações apontaram que a magnetização do empilhamento supercondutor acontece de forma rápida, porém a máquina demora a atingir a velocidade nominal, pois, além dos laços de corrente que formam os polos do rotor, existirá laços menores que causam um efeito desmagnetizante, impedindo que a máquina atinja a velocidade síncrona [72].

No ensaio experimental a corrente de alimentação máxima foi de 9,5 A, que é bem menor que os 500 A extrapolado na simulação, o que pode-se supor que a corrente crítica das fitas 2G não foram superadas, ou seja, que só existe corrente induzida enquanto tiver campo aplicado, o que também pode explicar o baixo valor de torque.

Como sugerido em [73], uma forma de trabalhar com essa máquina em regime síncrono seria através da magnetização dos empilhamentos supercondutores pela técnica de carregamento indutivo, uma vez que a máquina é magnetizada com pulsos altos de corrente (acima de I_c das fitas 2G) de curta duração e antes da partida. Com isso, haverá a possibilidade de suavizar a partida e assim atingir a velocidade síncrona [73]. Como citado anteriormente, essa técnica não foi realizado na tese devido ao alto risco relativo aos pulsos altos de corrente que poderiam deteriorar os enrolamentos do estator.

Os resultados experimentais com os protótipos N-G10 e N-MAG apresentados aqui e em [117, 118] e os de simulações exibidos em [72, 73] serviram para provar o conceito da máquina com fluxo aprisionado e analisar a magnetização das fitas empilhadas no rotor. No entanto, para avaliar outras características da máquina operando tanto como motor quanto como gerador, foi desenvolvido um outro protótipo (N-G10MAG) com núcleo em G10 e aço magnético e com o dobro de camadas supercondutoras.

5.3 Resultados de Ensaio do Protótipo N-G10MAG

O protótipo N-G10MAG, descrito em 3.1.4, foi desenvolvido a partir da máquina de indução, em que o rotor gaiola foi substituído por um rotor com núcleo em G10 e aço magnético, e na superfície de aço foram montadas três fileiras de fita 2G com dezoito camadas cada.

Antes de apresentar os resultados do protótipo N-G10MAG, para efeito de com-

paração, foi realizado o ensaio com carga da máquina de indução com rotor gaiola convencional.

5.3.1 Ensaio de Torque com a Máquina de Indução com Rotor Gaiola Convencional

Esse ensaio foi descrito na subseção 4.3.1. A figura 5.9 mostra o torque em função da velocidade de rotação da máquina alimentada com inversor de frequência.

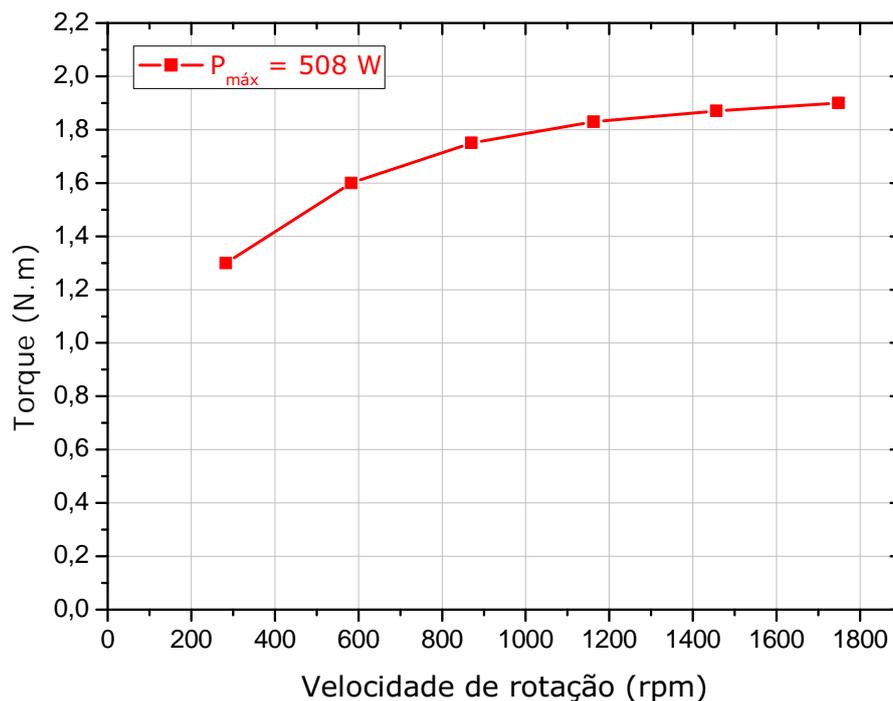


Figura 5.9: Medição de torque da máquina de indução com rotor gaiola alimentada com inversor de frequência.

A potência de alimentação de 508 W é na carga máxima e velocidade nominal. Como já foi mencionado, o comportamento tendendo à saturação é característico da alimentação controlada com inversor de frequência. Nesse ensaio não foi possível ir além da velocidade nominal por limitações do sistema experimental, pois causa muita vibração e as medições ficam imprecisas.

Apresentado o resultado com carga da máquina de indução convencional, serão apresentados os resultados do protótipo N-G10MAG operando como motor e como gerador.

5.3.2 Resultados do Protótipo N-G10MAG Operando como Motor

O protótipo N-G10MAG operando como motor foi descrito na subseção 4.3.2. Nessa condição de operação foram realizados os ensaios com variações de carga e com o rotor bloqueado.

Resultados do Ensaio Dinâmico com Variações de Carga

No ensaio dinâmico, que foi apresentado nas figuras 4.7 e 4.8, a máquina supercondutora foi alimentada com corrente alternada variando a carga para diferentes frequências de alimentação. A figura 5.10 mostra a curva de torque em função da velocidade, com a carga representada pela potência de alimentação exigida da fonte.

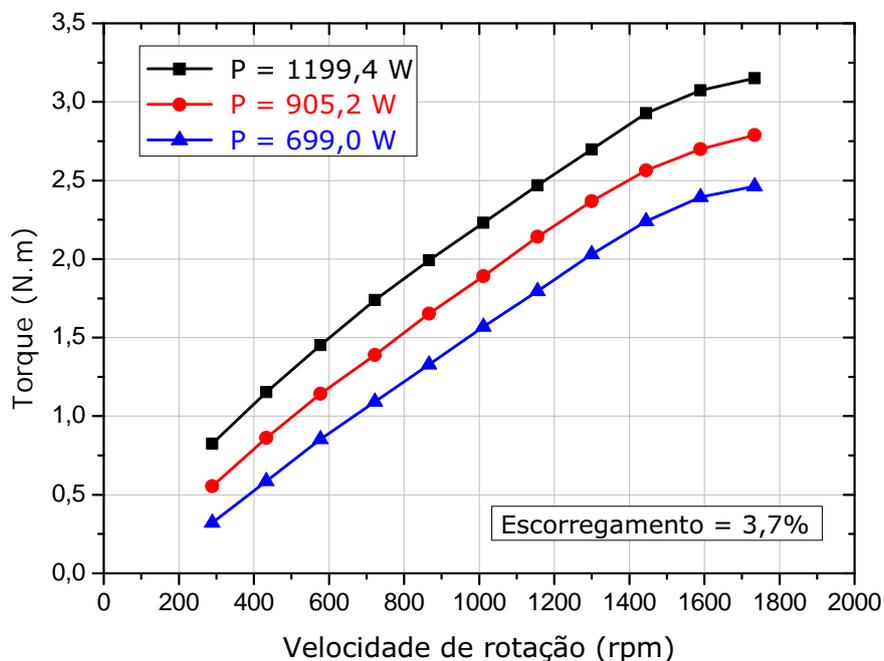


Figura 5.10: Medições de torque com variações de carga no protótipo N-G10MAG. As potências mostradas são na frequência de 60 Hz. Elas foram exigidas da fonte e representam as variações de carga.

Assim como foi elucidado na análise do resultado do ensaio dinâmico com o protótipo N-MAG, no protótipo N-G10MAG também deve existir o efeito desmagnetizante devido aos pequenos laços de corrente induzida que impossibilitam a máquina de atingir a velocidade síncrona. Portanto, como pode ser observado na figura 5.10, esse protótipo também apresenta um escorregamento, que é de 3,7%. Este resultado também mostra o comportamento do torque aumentando à medida que a velocidade aumenta, isso é característico da alimentação da máquina de forma controlada com o inversor de frequência e o Variac. Pelo mesmo motivo apresentado anteri-

ormente, não foi possível ir além da velocidade nominal por limitações do sistema experimental.

No ensaio dinâmico também foram medidas a corrente, a tensão e a potência da máquina operando como motor. A figura 5.11 mostra a curva da corrente e da tensão de alimentação.

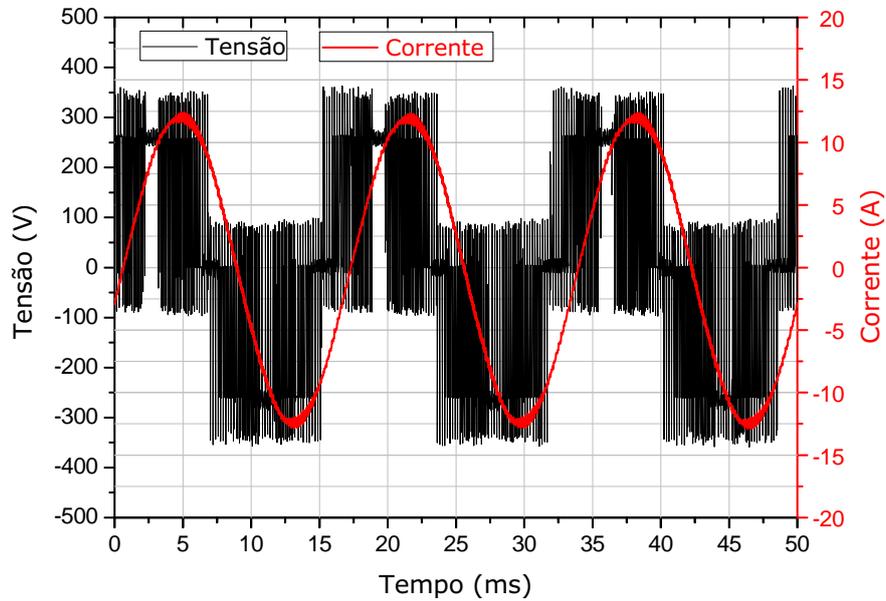


Figura 5.11: Corrente e tensão de alimentação da máquina supercondutora com inversor de frequência.

Como foi utilizado um inversor de frequência, modelo CFW500-WEG, que é uma fonte chaveada, a forma de onda da tensão teve esse comportamento, pois o inversor injeta harmônicos.

Outro resultado relevante para analisar as características dessa máquina é o crescimento acentuado da corrente e da potência no estator à medida que a carga foi aumentada, conforme figura 5.12.

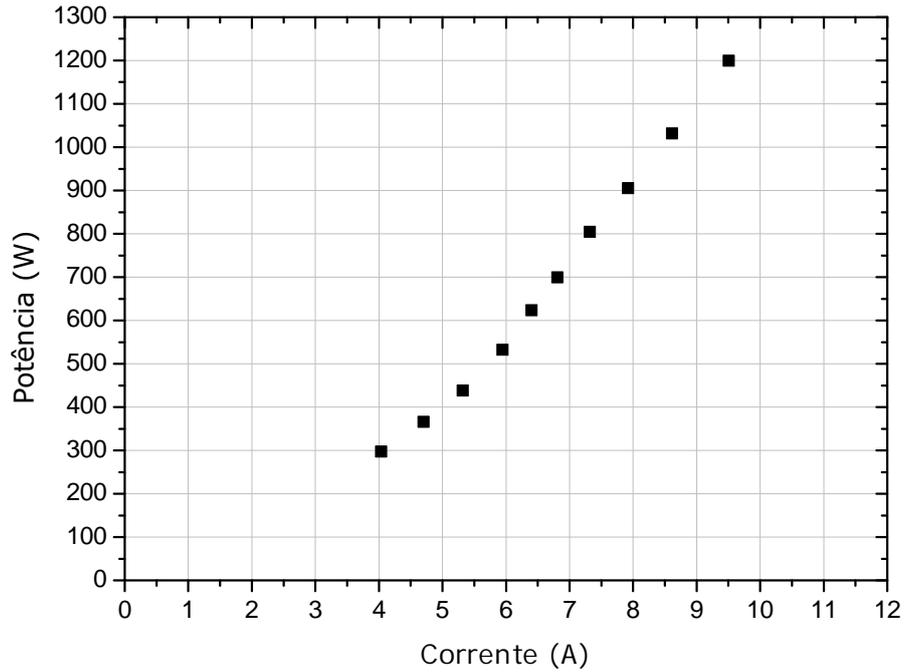


Figura 5.12: Potência e corrente com a variação da carga.

Este resultado mostra que, quanto maior a carga (menor impedância), mais a máquina é exigida em termos de corrente e potência. Em 60 Hz, com tensão nominal, a potência é bem maior do que no resultado da máquina convencional. Um novo modelo de simulação desenvolvido em [74] permitiu a discretização do *stack* de fitas 2G, e, com isso, foi observado que, para uma corrente de 5 A aplicada nos enrolamentos do estator por 0,3 s, houve uma penetração de 11 camadas das 18. Isso mostra a necessidade de uma maior corrente no estator para que a corrente penetre mais rápido as camadas e, assim, aprisione mais fluxo magnético. No caso do experimento, a máquina foi alimentada com corrente de 9,5 A, por isso o rendimento dessa máquina ainda é menor que a máquina convencional. Esse rendimento foi determinado a partir das figuras 5.10 e 5.12 da seguinte forma:

$$P_m = \tau \cdot \omega = 3,2 \cdot 188,4 = 602,88 \text{ W.} \quad (5.1)$$

Como na carga máxima a potência de entrada foi de 1199,4 W, então temos que:

$$\eta = \frac{P_m}{P} \cdot 100 = \frac{602,88}{1199,4} \cdot 100 = 50,26 \%. \quad (5.2)$$

A potência foi medida em tempo real pelo analisador de potência WT 1800 da YOKOGAWA. O analisador utiliza o método da integração da tensão e corrente na taxa de amostragem do conversor analógico-digital. É determinado o valor da potência ativa instantânea e aplicada a média, cujo tempo de duração depende do intervalo da taxa de atualização de dados do instrumento.

O rendimento foi baixo em razão do número alto de camadas em cada empilhamento - o que dificulta a penetração de fluxo magnético em todas as camadas - do nível baixo de potência (368 W) e da técnica de magnetização utilizada na tese, em que o fluxo magnético no entreferro está vinculada a corrente nos enrolamentos do estator convencional. Assim, para aumentar esse rendimento, será necessário o desenvolvimento de novos protótipos no futuro, pensando em fitas mais largas, de modo a enlaçar mais fluxo e reduzir o número de camadas do empilhamento supercondutor. Além disso, o escalonamento da máquina com estator de maior corrente e a magnetização por pulsos de curta duração poderiam facilitar a magnetização dos empilhamentos 2G e também aumentar a eficiência.

Com os resultados de torque com o motor operando em carga, na configuração convencional e na supercondutora, é possível compará-los considerando as condições de operação.

Comparação em termos de Torque da Máquina de Indução com a Máquina Supercondutora

Fazendo uma comparação do resultado de torque, obtido com o protótipo N-G10MAG e com a máquina convencional, foi possível observar algumas características dessas duas máquinas, como mostra a figura 5.13.

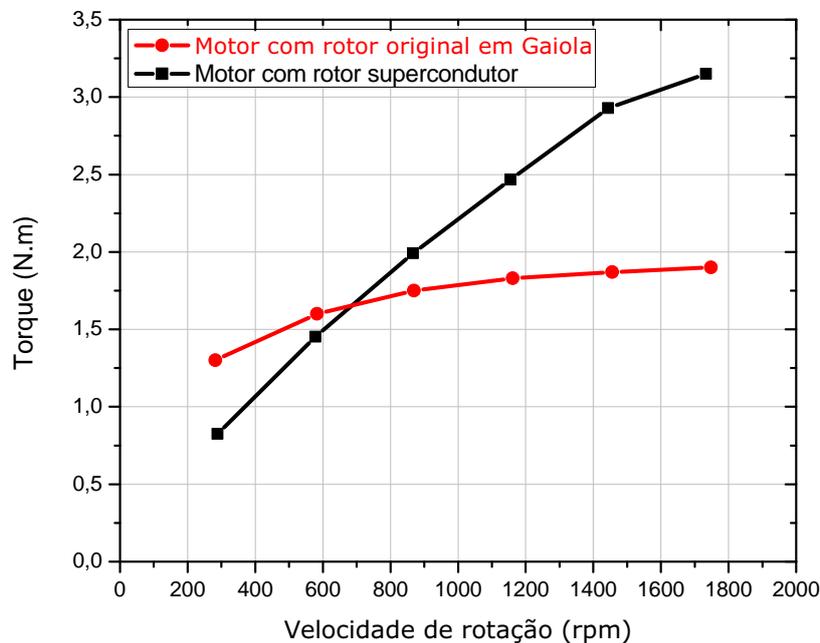


Figura 5.13: Comparação do torque obtido com o motor de indução gaiola com a máquina supercondutora.

Neste resultado pode ser observado que, até a velocidade de 650 rpm, o torque obtido com a máquina convencional é maior que no supercondutor, o que está

relacionado ao formato e ao material utilizado no rotor das máquinas para induzir corrente. No caso da máquina convencional, como são utilizadas barras de alumínio, que é um material permeável pelo campo magnético, a corrente é induzida nele como um todo. Já nos empilhamentos 2G, como são camadas de fitas, o efeito acaba sendo discretizado, não acontecendo de forma contínua. Ou seja, para campos de menor magnitude a primeira camada não permite que a corrente elétrica seja induzida nas demais camadas mais profundas do *stack* [74]. Logo, com uma corrente induzida pequena o conjugado também é baixo.

A partir do momento que aumenta a magnitude do campo girante, mais e mais camadas internas vão sendo penetradas pelo fluxo, até que todas elas estejam induzindo corrente elétrica [74]. Para tal, é necessário um aumento considerável na corrente da armadura. Essa comparação de torque não é direta, pois a corrente nominal da máquina de indução é de 1,9 A, enquanto que, a corrente do protótipo N-G10MAG é de 9,5 A. Como citado anteriormente, foi feito uma análise de saturação a fim de definir a espessura de aço magnético no rotor, para que essa corrente de 9,5 A não saturasse o núcleo.

No entanto, é válida uma comparação relativa às condições de operação das duas máquinas, em que a corrente nominal da máquina de indução com rotor gaiola é em temperatura ambiente e a corrente nominal da máquina supercondutora é na temperatura do nitrogênio líquido. Dessa forma, pode-se dizer que o torque obtido em velocidade nominal é maior na máquina supercondutora do que na máquina convencional.

Isso é interessante porque, se a máquina fosse totalmente supercondutora, o que será desenvolvido futuramente, os enrolamentos da armadura também estariam na temperatura do nitrogênio líquido. Assim, apesar da máquina supercondutora possuir enrolamentos de cobre no estator e estar submetida à temperatura do nitrogênio líquido, foi possível um aumento de 60% no torque, o que sugere que, se a máquina fosse totalmente supercondutora o aumento no torque seria ainda maior.

Para uma comparação mais direta foi tentado a realização de ensaios com o motor de indução convencional em nitrogênio líquido, mas não foi possível porque os rolamentos de esferas travaram em temperatura criogênica.

Resultado do Ensaio Rotor Bloqueado

O outro ensaio realizado com o protótipo N-G10MAG operando como motor foi com o rotor bloqueado, como apresentado nas figuras 4.7 e 4.8, que foi feito a partir dos valores de corrente do ensaio com carga. O objetivo desse ensaio foi determinar o torque máximo da máquina. A figura 5.14 apresenta a curva do torque de rotor bloqueado em função da frequência de alimentação.

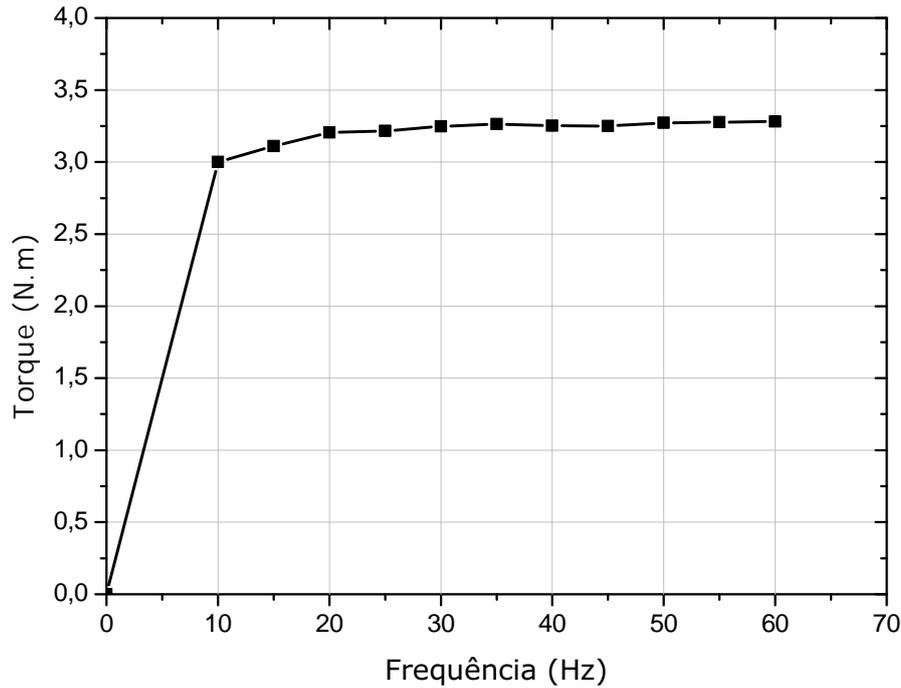


Figura 5.14: Medições de torque com rotor bloqueado em relação à frequência.

As correntes de alimentação da máquina nesse ensaio foram as mesmas do ensaio dinâmico em carga máxima e em corrente nominal. O torque foi praticamente constante, atingindo o valor máximo de 3,2 N.m na corrente nominal de 9,5 A, com a máquina em nitrogênio líquido. Assim como foi analisado no resultado do ensaio dinâmico, essa corrente é maior que a corrente nominal do motor de indução, que é de 1,6 A, mas esse valor de torque é significativo se considerada a condição de operação de ambas as máquinas.

Os resultados da máquina como motor mostram o potencial dessa configuração, principalmente em termos de torque que essa máquina pode alcançar, considerando a condição de operação na temperatura do nitrogênio líquido. Mas, para analisar de forma mais efetiva o fluxo aprisionado no rotor, foi feito também o ensaio quase estático e o ensaio em carga com a máquina operando como gerador.

5.3.3 Resultados do Protótipo N-G10MAG Operando como Gerador

O protótipo N-G10MAG operando como gerador foi descrito na subseção 4.3.3. Nessa condição de operação foram realizados os ensaios quase estático e com variações de carga.

Resultado do Ensaio Quase Estático

Assim como nos protótipos N-G10 e N-MAG, no ensaio de torque quase estático com o protótipo N-G10MAG, sendo a configuração experimental apresentada nas figuras 4.9 e 4.10, foi aplicada corrente contínua, que no caso do protótipo N-G10MAG, foi de 9,5 A. O resultado de torque em função da posição angular é mostrada na figura 5.15.

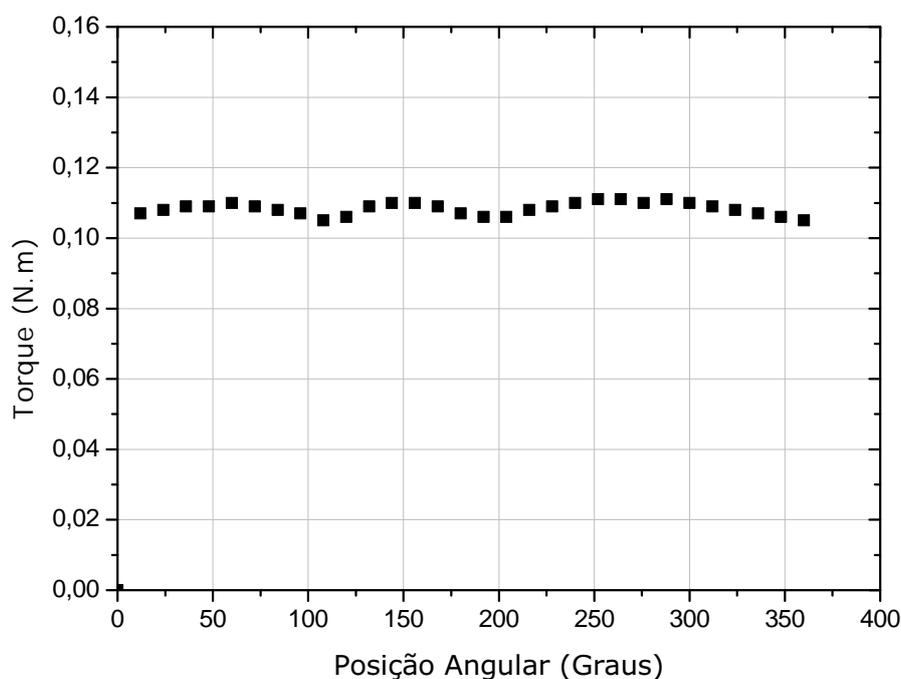


Figura 5.15: Medição de torque em relação à posição angular, com o gerador em condição quase estática para o ensaio com o protótipo N-G10MAG.

Como pode ser observado na figura 5.15, o torque obtido com o protótipo N-G10MAG é baixo, em torno de 0,10 N.m, isso porque, com o movimento lento do rotor, aquele torque foi suficiente para garantir uma pequena alteração na magnetização do empilhamento de modo a espelhar os polos do estator no rotor, do mesmo modo que no protótipo N-MAG [72]. O resultado também apresenta uma pequena variação de torque em relação à posição angular do rotor, que também pode ser associado ao empilhamento em espiral com várias camadas de fita, pois a espiral é finita e existe no início e no final do empilhamento um pequeno relevo de 0,1 mm, como mostra a figura 3.2.

O outro ensaio realizado foi com variações de carga com a máquina operando como gerador.

Resultados do Ensaio com Variações de Carga

Para analisar o fluxo aprisionado, também foi realizado o ensaio com variações de carga com a configuração experimental apresentada nas figuras 4.11 e 4.12, sendo o resultado de torque nessa configuração apresentado na figura 5.16.

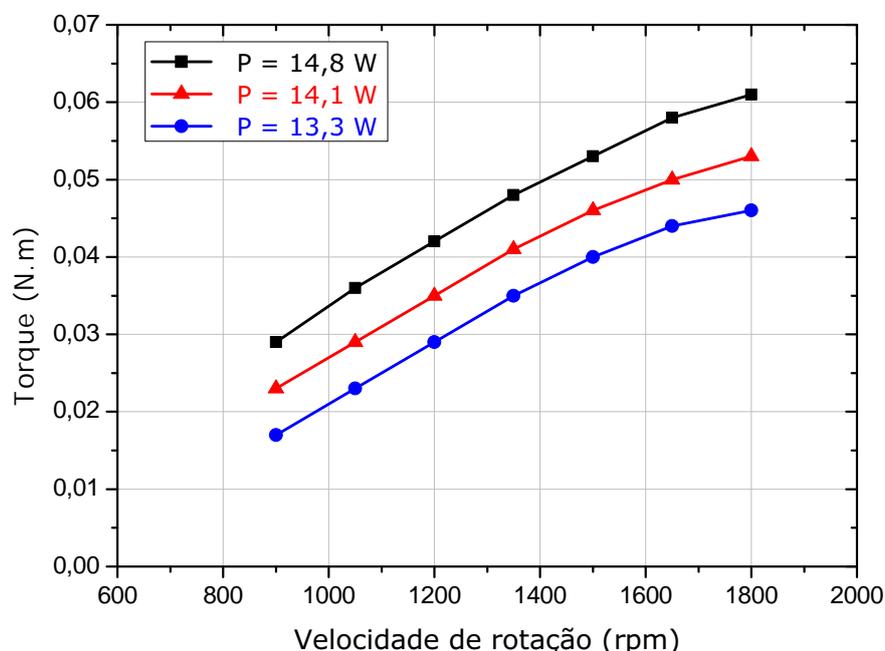


Figura 5.16: Medições de torque com variações de carga na configuração gerador.

Esse é o torque na máquina supercondutora quando a carga trifásica é ligada em série com os enrolamentos do estator. O torque atingido nessa configuração é baixo porque a maneira como a máquina foi magnetizada no ensaio como gerador, apresentado em 4.3.3, não é a mais adequada. A magnetização é condicionada à corrente máxima que os enrolamentos do estator suportam. Dentre as opções de magnetização de supercondutores existentes, apresentadas na subseção 2.3.4, a melhor forma seria magnetização pulsada, em que a máquina é magnetizada com pulsos de corrente na bobina de campo, que produzirá uma densidade de fluxo magnético externo ao *stack* de fita 2G, capaz de aprisionar fluxo magnético neste. Assim, seria possível induzir correntes persistentes capazes de manter quase todo o fluxo no interior do material supercondutor após a remoção do campo externo, como mostrado nas simulações em [72]. Isso sugere que, nesse ensaio, a corrente induzida não atinge a corrente crítica da fita 2G e, por isso, haverão apenas pequenas correntes persistentes quando o campo magnético externo for zerado. Sendo assim, o campo aprisionado é baixo e a tensão induzida nos enrolamentos do estator nessa configuração como gerador também é baixo.

Para aperfeiçoar a análise da máquina como gerador, além da magnetização dos empilhamentos de fita 2G por pulsos, existe a hipótese de que, se forem feitos peque-

nos furos ao longo do *stack* de fita 2G, este poderia aprisionar mais fluxo magnético, porque esses defeitos aumentariam a força de aprisionamento. No entanto, é um trabalho mais delicado e o autor prefere deixar isto como sugestão para ser explorado em trabalhos futuros.

Além do torque, também foram feitas medidas da corrente e da tensão nos terminais da máquina 60 Hz, sem carga e com carga média e alta. As cargas média e alta foram definidas a partir da quantidade de chaves de corrente contidas na carga trifásica utilizada, mostrada nas figuras 4.11 e 4.12, sendo a metade a carga média e o total a carga alta. Essa alteração de carga foi feita através da variação da impedância do reostato trifásico, como mostra a figura 5.17.



Figura 5.17: Ilustração da alteração de carga pela variação da impedância do reostato trifásico.

As curvas sem carga, com carga média e alta em 60 Hz são apresentadas nas figuras 5.18 , 5.19 e 5.20, respectivamente.

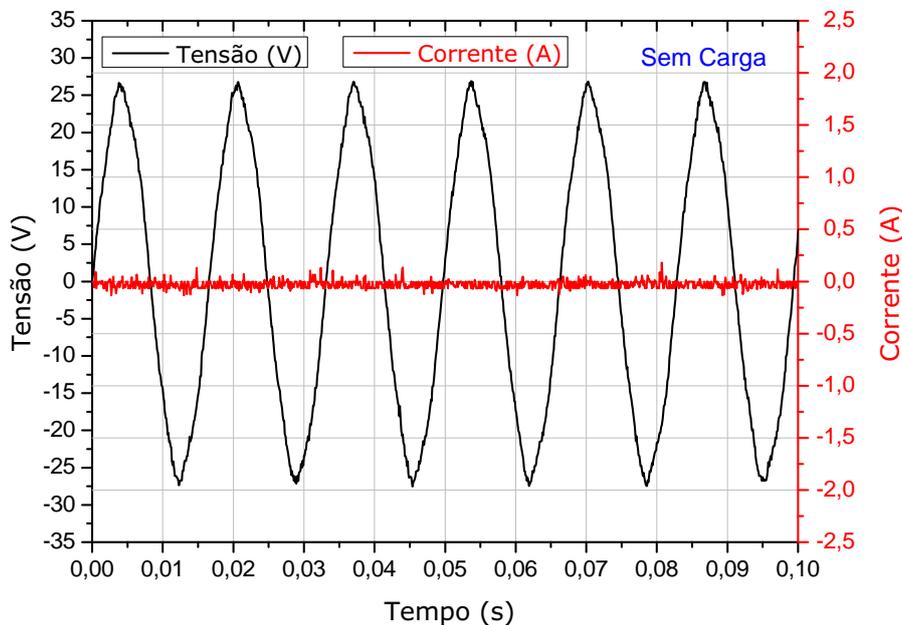


Figura 5.18: Tensão e corrente em 60Hz sem carga.

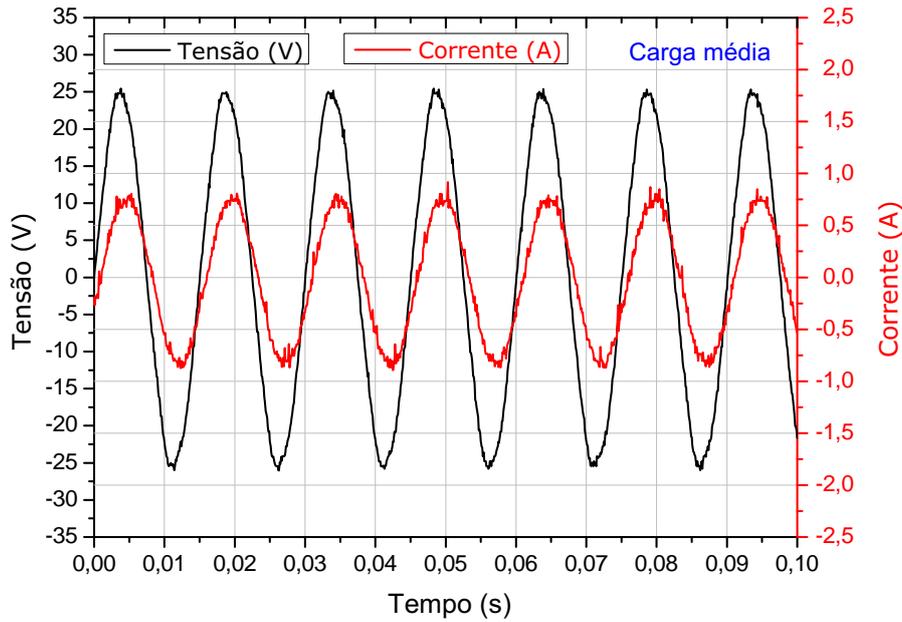


Figura 5.19: Tensão e corrente em 60Hz em carga média.

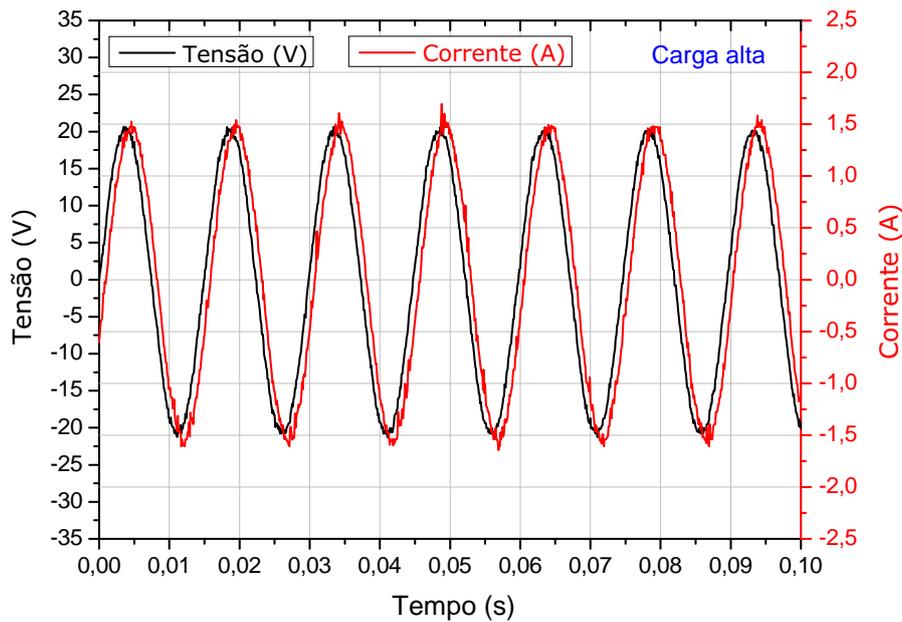


Figura 5.20: Tensão e corrente em 60Hz em carga alta.

Como o estator da máquina se configura como um grande indutor, a corrente foi atrasada em relação à tensão e o fator de potência foi de 0,86.

Apesar da baixa corrente imposta nos enrolamentos do estator, 9,5 A, comparada à corrente crítica das fitas 2G empilhadas, apresentada na seção 5.1, por essas curvas fica evidente o aprisionamento de fluxo no empilhamento de fita no rotor, aumentando a corrente que circula nos enrolamentos do estator e diminuindo a tensão nos terminais da máquina à medida que a carga aumenta. Isso fica mais perceptível

na figura 5.21 com os valores RMS.

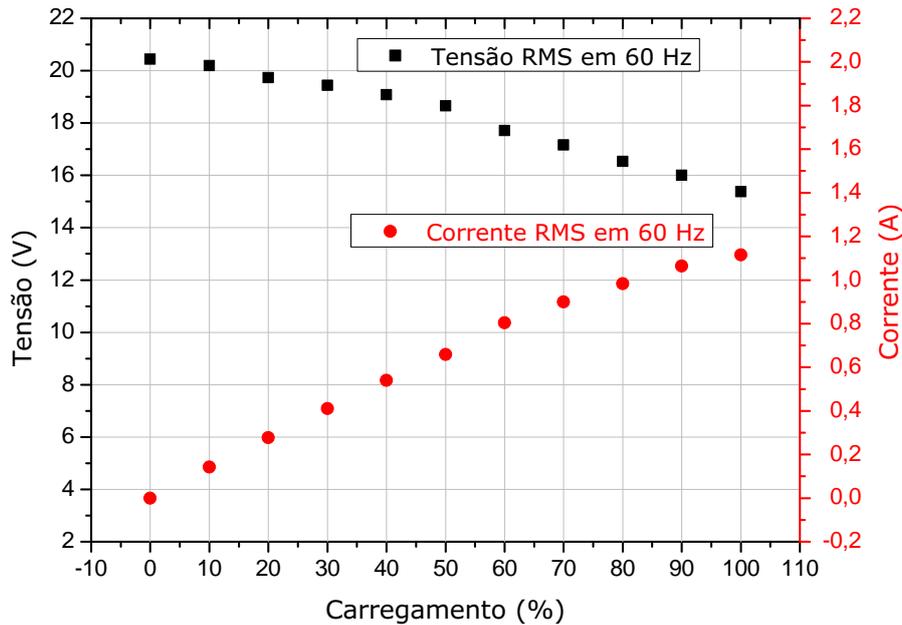


Figura 5.21: Tensão e corrente RMS em 60Hz com variação de carga.

A tensão nos terminais da máquina foi baixa, porquê o campo magnético sobre os empilhamentos 2G não foi o suficiente para gerar correntes persistentes e aprisionar quase todo o fluxo. Por isto, com o intuito de aumentar o campo sobre os empilhamentos, e conseqüentemente aumentar o fluxo aprisionado e a tensão nos terminais da máquina, será desenvolvido futuramente a técnica de magnetização por pulsos.

Além dos resultados experimentais apresentados nesta tese e em [117–119], os primeiros passos para a modelagem dessa máquina já podem ser encontrados em [72–74].

Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou todos os resultados obtidos nesta tese. Primeiramente, foram apresentados os resultados de caracterização das fitas supercondutoras utilizadas nos empilhamentos e, em seguida, foram apresentados os resultados de torque com os protótipos N-G10 e N-MAG. Por fim, foram apresentados os resultados com o protótipo N-G10MAG operando como motor e como gerador.

Capítulo 6

Conclusões

O objetivo desta tese foi investigar a fundo a configuração de máquina com empilhamentos 2G em espiral no rotor e analisar suas características mecânicas, elétricas e magnéticas. Para alcançar esse objetivo, três protótipos (N-G10, N-MAG e N-G10MAG) foram concebidos, projetados, construídos e testados em banho de nitrogênio líquido.

Com os dois primeiros protótipos (N-G10 e N-MAG) foi feita a prova do conceito da máquina operando pelo princípio do fluxo magnético aprisionado nas fitas empilhadas.

O torque medido no ensaio quase estático é devido à força de aprisionamento e é praticamente constante porque, com o movimento lento do rotor, há uma alteração na magnetização do empilhamento para espelhar os polos do estator no rotor.

O torque obtido no ensaio de rotor bloqueado em função da frequência também foi praticamente constante, pois, como a máquina está imóvel, a diferença na corrente de uma frequência para outra não deve ter quase incremento nenhum na corrente induzida nos empilhamentos 2G. Por isso, o fluxo magnético aprisionado no rotor supercondutor deve variar muito pouco.

O valor de torque da máquina supercondutora com núcleo ferromagnético (N-MAG), com apenas 9 camadas em cada empilhamento, ficou em torno de 0,43 N.m, próximo ao valor nominal da máquina síncrona com ímãs permanentes (0,47 N.m) considerando as condições de operação das máquinas, máquina síncrona de ímãs permanentes em temperatura ambiente e máquina supercondutora em temperatura do nitrogênio líquido. O torque obtido com as fitas HTS empilhadas no protótipo B pode ser considerado promissor devido ao pequeno número de camadas supercondutoras usadas em cada empilhamento e ao entreferro consideravelmente grande de 2 mm, que pode limitar a densidade do fluxo magnético no rotor. Esse amplo entreferro foi devido a contração do material no núcleo do rotor nos protótipos N-G10 e N-MAG. Por isso, no projeto do protótipo N-G10MAG isso foi levado em consideração.

O torque do motor HTS com o núcleo do rotor em fibra de vidro (N-G10) foi consideravelmente menor (abaixo de 0,10 N.m) devido à alta dispersão do fluxo magnético. Máquinas com núcleo não ferromagnético seriam possíveis se todas as bobinas fossem supercondutoras.

O protótipo N-G10MAG foi desenvolvido com mais camadas supercondutoras e menor entreferro, de 1 mm, comparado aos protótipos N-G10 e N-MAG. Esse protótipo apresentou menor peso (6,47 kg) em comparação com a máquina de indução convencional (10,12 kg) e como tem menor entreferro a dispersão de fluxo deve ter sido menor em comparação com os protótipos N-G10 e N-MAG.

O valor de torque atingido com o protótipo N-G10MAG foi de 3,2 N.m em frequência nominal, valor superior ao da máquina de indução convencional, que foi de 2 N.m, considerando as condições de operação de ambas as máquinas.

O rendimento do protótipo N-G10MAG foi de 50,3%, que ainda é menor que o do motor de indução com rotor gaiola de esquilo, 72,2%, mas o projeto tem potencial para melhorar o rendimento.

A potência gerada com o protótipo N-G10MAG foi baixa porque a forma de magnetização do rotor supercondutor, realizada na tese, não é a mais indicada, pois a magnetização foi vinculada à corrente máxima nos enrolamentos de cobre do estator. Isso limita as correntes persistentes no empilhamento 2G, o que reduz a sua capacidade de manter o fluxo no interior do material quando o campo externo é extinto.

Através da investigação feita nesta tese, algumas características de torque, corrente e potência dessa configuração de máquina supercondutora, operando tanto como motor quanto como gerador, foram apresentadas e elas podem ser aprimoradas visando a aplicação desse conceito em aplicações práticas.

6.1 Trabalhos Futuros

Desenvolvimento de um outro protótipo com fitas 2G de fabricação mais recente e que apresentam largura superior a 12 mm, de modo a aprisionar mais fluxo e a induzir maiores laços de corrente, que levariam a um aumento do conjugado e da densidade de potência.

Desenvolver uma máquina para atingir velocidades maiores objetivando aplicações aéreas e navais no futuro, que estão entre as áreas mais promissoras.

Automatizar o sistema de medição através de um programa em Labview.

Desenvolvimento de um modelo 3D dessa nova configuração de máquina em um programa de elementos finitos, para aprimorar o entendimento de seu comportamento.

Este foi só o ponto de partida nessa nova linha de pesquisa que foi iniciada.

Investigações mais profundas precisam ser realizadas para que a máquina proposta evolua em sua maturidade tecnológica.

Referências Bibliográficas

- [1] ZOU, S. *Magnetization of High Temperature Superconducting Trapped-Field Magnets*. Tese de Doutorado, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), nov. 2017. 37.06.02; LK 01.
- [2] SRPČIČ, J.; ZHOU, D.; HUANG, K.; SHI, Y.; DENNIS, A.; AINSLIE, M.; CAMPBELL, A.; BAUSE, R.; BOLL, M.; FILIPENKO, M.; CARDWELL, D.; DURRELL, J. “Demagnetization Study of Pulse-Field Magnetized Bulk Superconductors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 4, jun. 2018. doi: 10.1109/TASC.2018.2808400.
- [3] KALSI, S.; GAMBLE, B.; SNITCHLER, G.; IGE, S. “The status of HTS ship propulsion motor developments”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2016. doi: 10.1109/PES.2006.1709643.
- [4] ZHANG, Y.; YAMANO, S; HAZELTON, D.; FUKUSHIMA, T. *ReBCO HTS Wire Manufacturing and Continuous Development at SuperPower*. Mini-workshop on high temperature superconducting materials and magnets, The Hong Kong University of Science and Technology, jan. 2018.
- [5] PATEL, A.; HOPKINS, S. C.; GLOWACKI, B. A. “Trapped fields up to 2 T in a 12 mm square stack of commercial superconducting tape using pulsed field magnetization”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 26, n. 3, jan. 2013. doi: stacks.iop.org/SUST/26/032001.
- [6] PATEL, A., BASKYS, A., MITCHELL-WILLIAMS, T., et al. “A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape”, *Superconductor Science and Technology*, v. 31, n. 9, pp. 09LT01, jul 2018. doi: 10.1088/1361-6668/aad34c. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aad34c>>.
- [7] SASS, F.; ANDRADE, R.; SOTELO, G.; SIROIS, F. “H-formulation for simulating levitation forces acting on hts bulks and stacks of 2G coated conductors”, *Superconductor Science and Technology*, v. 28, n. 12, 2015.

- [8] SASS, F.; DIAS, D.; SOTELO, G.; ANDRADE, R. “Coated Conductors for the Magnetic Bearing Application”, *Physics Procedia*, v. 36, n. 12, pp. 108,1013, 2012.
- [9] ABIN, D.; OSIPOV, M.; POKROVSKII, S.; RUDNEV, I. “Relaxation of Levitation Force of a Stack of HTS Tapes 4”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 26, n. 3, abr. 2016. doi: 10.1109/TASC.2016.252592.
- [10] OSIPOV, M.; ABIN, D.; POKROVSKII, S.; RUDNEV, I. “Levitation Force of Magnetized HTS Tape Stacks”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, jun. 2017. doi: 10.1109/TASC.2017.2668070.
- [11] PATEL, A.; BASKYS, A.; HOPKINS, S.; KALITKA, V.; MOLODYK, V.; GLOWACKI, B. “Pulsed-Field magnetization of superconducting tape stacks for motor applications”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, jun. 2015. doi: 10.1109/TASC.2015.2389142.
- [12] BAGHDADI, M.; RUIZ, H.; FAGNARD, J.; ZHANG, M.; WANG, W.; COMBS, A. “Investigation of Demagnetization in HTS Stacked Tapes Implemented in Electric Machines as a Result of Crossed Magnetic Field”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, jun. 2014. doi: 10.1109/TASC.2014.2372873.
- [13] SILVA, J. M. M. *Application of superconducting bulks and stacks of tapes in electrical machines*. Tese de Mestrado, University Nova de Lisboa, mar. 2015.
- [14] SOTELO, G.; SASS, F.; LOPEZ, M.; GRANADOS, X. “Proposal of a Novel Design for Linear Superconducting Motor Using 2G Tape Stacks”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 65, n. 99, jan. 2018. doi: 10.1109/TIE.2018.2793252.
- [15] CLIMENTE-ALARCON, V.; SMARA, A. T. L. G. B. A., REIS, T. “Testing of Surface Mounted Superconducting Stacks as Trapped-Flux Magnets in a Synchronous Machine”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Early Access)*, pp. 1–1, fev. 2020. ISSN: 2378-7074. doi: 10.1109/TASC.2020.2976603.
- [16] QIANG, L. *Superconducting Rotating Machines*. Relatório técnico, USA Department of ENERGY, set. 2015.
- [17] BEDNORZ, J. G., MÜLLER, K. A. “Perovskite-type Oxides -the New Approach to High-*t_c* Superconductivity”, *IBM Research Division*, dez. 1987.

- [18] MAEDA, H., TANAKA, Y., FUKUTOMI, M., et al. “A New High-TcOxide Superconductor without a Rare Earth Element”, *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 27, n. Part 2, No. 2, pp. L209–L210, feb 1988. doi: 10.1143/jjap.27.l209. Disponível em: <<https://doi.org/10.1143%2Fjjap.27.l209>>.
- [19] WU, M. K.; ASHBURN, J. R.; TORNG, C. J.; HOR, P. H.; MENG, R. L.; GAO, L.; HUANG, Z. J.; WANG, Y. Q.; CHU, C. W. “Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-0 Compound System at Ambient Pressure”, *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, v. 58, n. 9, mar. 1987. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.908>.
- [20] LARBALESTIER, D.; GUREVICH, A.; FELDMANN, D.; POLYANSKII, A. “High Tc Superconducting Materials for Electric Power Applications”, *Nature Research*, maio 2001. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1505.01150>>.
- [21] SNITCHLER, G.; GAMBLE, B.; KALSI, S. “The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, jun. 2012.
- [22] ZHANG, Y.; ZHOU, D.; IDA, T.; MIKI, M.; IZUMI, M. “Melt-growth bulk superconductors and application to an axial-gap-type rotating machine”, *Superconductor Science and Technology*, v. 29, 2016.
- [23] TIXADOR, P.; TEMPE, A.; GAUTIER-PICARD, P.; CHAUD, X.; BEAUGNON, E. “Electrical motor with bulk Y-Ba-Cu-O Pellets”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 7, n. 2, jun. 1997.
- [24] FENG, X.; DAVEY, K.; WERST, M.; HEBNER, R.; WEINSTEIN, R.; PARKS, D.; SAWH, R. “Radial flux high temperature superconductor motor using bulk trapped field magnets”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, jun. 2009.
- [25] SYTNIKOV, V. E., VYSOTSKY, V. S., RADCHENKO, I. P., et al. “1G versus 2G-comparison from the practical standpoint for HTS power cables use”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 97, pp. 012058, feb 2008. doi: 10.1088/1742-6596/97/1/012058. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F97%2F1%2F012058>>.
- [26] BUCKEL, W.; KLEINER, R. *Superconductivity: Fundamentals and applications*. Weinheim, 2004.

- [27] KWOK, W.-K., WELP, U., GLATZ, A., et al. “Vortices in high-performance high-temperature superconductors”, *Reports on Progress in Physics*, v. 79, n. 11, pp. 116501, sep 2016. doi: 10.1088/0034-4885/79/11/116501. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/11/116501>>.
- [28] OHSAKI, H.; TSUBOI, Y. “Study on electric motors with bulk superconductors in the rotor”, *Journal of materials processing technology*, v. 108, n. 2, jan. 2001.
- [29] SCHEUFELE, R. L. *Análise de um Motor de Histerese Cilíndrico Bifásico com Fluxo Circunferencial via Circuito Equivalente*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Florianópolis.
- [30] DHANAGARE, A.; THOSAR, A. G. “Modeling of Hysteresis Motor”, *International Journal of Engineering Research and Development*, v. 12, n. 5, pp. 76–83, maio 2016.
- [31] RODRIGUES, A. L. “Teria e Cálculo do Motor de Histerese”, *Universidade Nova de Lisboa*, , n. 2825 - 114, 2018.
- [32] DAS, J.; RAY, R. N. “Design and Modeling of Hysteresis Motor with High Temperature Superconducting Material in the Rotor using Finite Element Method”, *Innovative Systems Design and Engineering*, v. 3, n. 6, 2012. ISSN: 2222-1727.
- [33] GAMBLE, B.; SNITCHLER, G; MACDONALD, TIM. “Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3, jun. 2011.
- [34] SONG, X., BÜHRER, C., MØLGAARD, A., et al. “Commissioning of the World’s First Full-scale MW-class Superconducting Generator on a Direct Drive Wind Turbine”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 1–1, 2020. ISSN: 1558-0059. doi: 10.1109/TEC.2020.2982897.
- [35] ARMSTRONG, M. “Superconducting Turboelectric Distributed Aircraft Propulsion”. In: & E. W. E. C. (Ed.), *Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic Materials Conference*, Exhibition, jul. 2015.
- [36] ONNES, H. K. “Further experiments with Liquid Helium. G. On the Electrical Resistance of Pure Metals, etc. VI. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears”, In: *Gavroglu K., Gou-daroulis Y. (eds) Through Measurement to Knowledge. Boston Studies in*

the Philosophy of Science., v. 124, n. 1911-1912, pp. 818–821, 1911. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-009-2079-8_17.

- [37] ROSE-INNES, A.; RHODERICK, E. *Introduction to Superconductivity*. Pergamon Press, 1994.
- [38] KES, P.; DELFT, V. “The discovery of superconductivity”, *Physics Today*, 2008.
- [39] PIPPARD, A. “Early Superconductivity research (Except Leiden)”, *IEE Transactions on Magnetic*, v. 23, n. 2, 1987.
- [40] LONDON, F., LONDON, H., LINDEMANN, F. A. “The electromagnetic equations of the supraconductor”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*, v. 149, n. 866, pp. 71–88, 1935. doi: 10.1098/rspa.1935.0048. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1935.0048>>.
- [41] PIPPARD, A. B., BRAGG, W. L. “An experimental and theoretical study of the relation between magnetic field and current in a superconductor”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, v. 216, n. 1127, pp. 547–568, 1953. doi: 10.1098/rspa.1953.0040. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1953.0040>>.
- [42] GINZBURG, V. *On the Theory of superconductivity*. 1950.
- [43] BARDEEN, J., COOPER, L. N., SCHRIEFFER, J. R. “Theory of Superconductivity”, *Phys. Rev.*, v. 108, pp. 1175–1204, Dec 1957. doi: 10.1103/PhysRev.108.1175. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.108.1175>>.
- [44] COOPER, L. N. “Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas”, *Phys. Rev.*, v. 104, pp. 1189–1190, Nov 1956. doi: 10.1103/PhysRev.104.1189. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.104.1189>>.
- [45] SASS, F. *Modelagem do comportamento de mancais magnéticos utilizando fitas e blocos maciços supercondutores*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, fev. 2015.
- [46] XU, K.; CAO, P.; HEATH, J. R. “Achieving the Theoretical Depairing Current Limit in Superconducting Nanomesh Films”, *American Chemical Society*, v. 65, n. 99, jan. 2010. doi: 10.1109/TIE.2018.2793252.

- [47] DIAS, D. H. N. *Modelagem de mancais lineares supercondutores considerando o resfriamento na presença de campo magnético*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [48] SOTELO, G. G. *Modelagem de supercondutores aplicada ao projeto de mancais magnéticos*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, maio 2007.
- [49] ZADOROSNY, R.; PRESOTTO, A; DUARTE, E. C. S.; SARDELLA, E. “Phenomenology of the superconductivity and mesoscopic superconductors”, *Physics & History and Philosophy of Physics*, maio 2015.
- [50] CYROT, M. “Ginzburg-Landau theory for superconductors”, *Reports on Progress in Physics*, v. 36, n. 2, pp. 103–158, feb 1973. doi: 10.1088/0034-4885/36/2/001.
- [51] GRIMALDI, G., LEO, A., CIRILLO, C., et al. “Non-linear Flux Flow Resistance of Type-II Superconducting Films”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, v. 24, n. 1, pp. 81–87, jan. 2011. ISSN: 1557-1947. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10948-010-0902-x>>.
- [52] DEW-HUGHES, D. “Flux Pinning and Critical Currents in LTS and HTS Conductors”. In: Yamashita, T., Tanabe, K.-i. (Eds.), *Advances in Superconductivity XII*, pp. 15–21, Tokyo, 2000. Springer Japan.
- [53] KHAN, M. Z., ZHAO, Y., WU, X., et al. “Improving the Flux Pinning With Artificial BCO Nanodots and Correlated Dislocations in YBCO Films Grown on IBAD-MgO Based Template”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 29, n. 5, pp. 1–5, Aug 2019. ISSN: 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2019.2897433.
- [54] DREW W. HAZELTON. “2G HTS Wire Development at SuperPower”. In: WAMHTS-4 – Barcelona, S. (Ed.), *SuperPower Inc. is a subsidiary of Furukawa Electric Co. Ltd*, fev. 2017.
- [55] TANAKA, S. “Status and future perspective of applications of high temperature superconductors”, *Physica C: Superconductivity*, v. 341–348, pp. 31–35, nov. 2000. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)00382-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)00382-8).
- [56] ZIMMERMAN, G. O., NEGM, Y. Z., POWERS, R. E. “High current and pulse response of YBCO and BSCCO junctions”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 7, n. 2, pp. 367–370, June 1997. ISSN: 1558-2515. doi: 10.1109/77.614505.

- [57] ZHAO, W. *Improvement in the Growth and Superconducting Properties of Bulk Sm-Ba-Cu-O Superconductors Fabricated in Air*. Tese de Mestrado, University of Cambridge, 2017.
- [58] MIYAMOTO, T.; NAGASHIMA, K; SAKAI, N.; MURAKAMI, M. “Mechanical properties of bulk superconductors”, *Superconductor Science and Technology*, v. 6, n. 3, jan. 2000. doi: 10.1088/0953-2048/13/6/339.
- [59] KING, C. G., GREY, D. A., MANTONE, A., et al. “Mechanical stabilization of BSCCO-2223 superconducting tapes”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 7, n. 2, pp. 2046–2050, June 1997. ISSN: 1558-2515. doi: 10.1109/77.620993.
- [60] VINOD, K., KUMAR, R. G. A., SYAMAPRASAD, U. “Prospects for MgB₂superconductors for magnet application”, *Superconductor Science and Technology*, v. 20, n. 1, pp. R1–R13, dec 2006. doi: 10.1088/0953-2048/20/1/r01.
- [61] *Site da SuperPower*. Disponível em: <<http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>>. Acesso em Abril de 2018.
- [62] SOUSA, W. T. B. *Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters*. Tese de Doutorado, COOPE/UFRJ, 2015.
- [63] FOSSHEIN, K.; SUDBO, A. *Superconductivity - Phisicc and Application*. West Sussex, 2004.
- [64] BRANDT, E. H. “Universality of Flux Creep in Superconductors with Arbitrary Shape and Current-Voltage Law”, *Phys. Rev. Lett.*, v. 76, pp. 4030–4033, May 1996. doi: 10.1103/PhysRevLett.76.4030. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.76.4030>>.
- [65] GLOWACKI, B., ROBINSON, E., ASHWORTH, S. “An apparatus for the transport current versus magnetic field measurements in LN₂ in the temperature range 77–124 K”, *Cryogenics*, v. 37, n. 3, pp. 173 – 175, 1997. ISSN: 0011-2275. doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(96\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(96)00111-7). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011227596001117>>.
- [66] PAUL, W.; CHEN, M.; LAKNER, M. “Fault Current Limiter Based on High Temperature Superconductors - Different Concepts, Test Results, Simulations, Applications”, *Physics C Superconductivity*, v. 354, n. 14, pp. 27,33, maio 2001.

- [67] DURON, J.; DUTOIT, B.; GRILLI, F. “Computer Modeling of YBCO Fault Current Limiter Strips Lines in Over-Critical Regime With Temperature Dependent Parameters”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 1839–1842, jun. 2007.
- [68] SCHMITZ, G.; RETTELBACH, T. “3D Simulation of Temperature, Electric Field and Current Density Evolution in Superconducting Components”, *Superconducting Science Tecnology*, v. 16, n. 5, pp. 645,653, maio 2003.
- [69] NAVAU, C.; DEL-VALLE, N.; SANCHEZ, A. “Macroscopic Modeling of Magnetization and Levitation of Hard Type-II Superconductors: The Critical-State Model”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 1, fev. 2013. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2012.2232916.
- [70] AINSLIE, M. D.; FUJISHIRO, H. “Modelling of bulk superconductor magnetization”, *Superconductor Science and Technology*, v. 28, jun. 2015. doi: 10.1088/1361-6668/aa5a7d.
- [71] GÖMÖRY, F., ŠOUC, J., VOJENČIAK, M., et al. “Phenomenological description of flux pinning in non-uniform high-temperature superconductors in magnetic fields lower than the self-field”, *Superconductor Science and Technology*, v. 20, n. 9, pp. S271–S277, aug 2007. doi: 10.1088/0953-2048/20/9/s23.
- [72] SANTOS; B. M. O. *Simulação de máquinas supercondutoras de fluxo aprisionado com fitas de segunda geração*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPE/UFRJ, fev. 2019.
- [73] SANTOS, B. M. O.; DIAS, F. J. M.; SASS, F.; SOTELO, G. G.; POLASEK, A. AND RUBENS DE ANDRADE JR. . “Simulation of Superconducting Machine With Stacks of Coated Conductors Using Hybrid A-H Formulation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Early Access)*, pp. 1–1, abr. 2020. doi: 10.1109/TASC.2020.2990377.
- [74] SANTOS, B. M. O., ANDRADE JR., RUBENS. “Simulação de Máquina Supercondutora com Fitas 2G Usando a Formulação T-A”. In: *Submetido ao MOMAG2020*. UFF, 2020.
- [75] BRAMBILLA, R., GRILLI, F., MARTINI, L., et al. “A Finite-Element Method Framework for Modeling Rotating Machines With Superconducting Windings”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 5, pp. 1–11, 2018.

- [76] ZHANG, H., ZHANG, M., YUAN, W. “An efficient 3D finite element method model based on the T–A formulation for superconducting coated conductors”, *Superconductor Science and Technology*, v. 30, n. 2, pp. 024005, dec 2016. doi: 10.1088/1361-6668/30/2/024005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/30/2/024005>>.
- [77] THULLEN, P.; DUDLEY, J. C.; GREENE, D. L.; SMITH, J. L.; WOODSON, H. H. “An Experimental Alternator With A Superconducting Rotating Field Winding”, pp. 611 – 619, mar. 1971. doi: 10.1109/TPAS.1971.293065.
- [78] YING, A.; ECKELS, P.; LITZ, D.; MOORE, W. “Mechanical and thermal design of the epri/westighthouse 300 mva superconducting generator”, *IEEE Transactions on Applied superconductivity*, v. 17, n. 1, jan. 1981.
- [79] KEIM, T.; LASKARIS, T.; FEALEY, J.; RIOS, P. “Design and manufacture of a 20 mva superconducting generator”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 104, n. 6, jun. 1985.
- [80] TIXADOR, P. “Superconducting Motors, Generators, and Alternators”, *Wiley Online Library*, dez. 1999. doi: 10.1002/047134608X.W1330.
- [81] MCFEE, R. “Applications of superconductivity to the generation and distribution of electric power”. pp. 122 – 129. *Electrical Engineering*, fev. 1962. doi: 10.1109/EE.1962.6446738.
- [82] KALSI, S.; WEBBER, K.; TAKESUE, H.; LEWIS, C.; NEUMUELLER, H.; BLAUGHER, R. “Development Status of Rotating Machines Employing Superconducting Field Windings”, *Proceedings of the IEEE*, v. 92, n. 10, out. 2004.
- [83] 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.
- [84] MICHAEL, P.; HENSLEY, S.; GALEA, C.; CHEN, E.; KARMAKER, H.; BROMBERG, L. “Noncontact High-Torque Magnetic Coupler for Superconducting Rotating Machines”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 26, n. 4, jun. 2016.
- [85] KLAUS, GUNAR; NICK, WOLFGANG; NEUMÜLLER, HEINZ-WERNER ; NEROWSKI, GEORG; MCCOWN, WILLIAM. “Advances in the Deve-

lopment of Synchronous Machines with High-Temperature Superconducting Field Winding at Siemens AG”. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, jun. 2006. doi: 10.1109/PES.2006.1709648.

- [86] FRANK, M.; VAN HASSELT, P.; KUMMETH, P.; MASSEK, P.; NICK, W.; ROTHFISCHER, H.; SCHMIDT, H.; WACKER, B.; NEUMÜLLER, H.; NEROWSKI, G; FRAUENHOFER, J; HARTIG, R; RZADKI, W. “High temperature superconducting rotating machine for ship application”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 16, n. 2, jun. 2006.
- [87] SNITCHLER, G.; GAMBLE, B.; KING, C.; WINN, P. “10 MW Class Superconductor Wind Turbine Generators”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3, jun. 2011.
- [88] KOVALEV, L.; IIUSHIN, K.; KONEEV, S.; KOVALEV, K.; PENKIN, V.; POLTAVETS, V.; GAWALEK, W.; HABISREUTHER, T.; OSWALD, B.; BEST, K. “Hysteresis and reluctance electric machines with bulk HTS rotor elements”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 9, n. 2, pp. 1261 – 1264, jun. 1999. doi: 10.1109/77.783530.
- [89] KOVALEV, L.; IIUSHIN, K.; PENKIN, V.; KOVALEV, K.; LARIONOFF, A.; KONEEV, S.; MODESTOV, K.; LARIONOFF, S.; POLTAVETS, V.; AKIMOV, I.; ALEXANDROV, V.; GAWALEK, W.; OSWALD, B.; KRABBES, G. “High output power reluctance electric motors with bulk HTS elements”, *ICEMS’2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems*, ago. 2001. doi: 10.1109/ICEMS.2001.971831.
- [90] BECH, J.; NENAND, M.; BECH, A. “Development of Superconducting Wind Turbine Generators”. In: Exhibition (Ed.), *Scientific Proceedings of EWEA 2012 - European Wind Energy Conference &*, 2012.
- [91] *Site da Siemens*, . Disponível em: <<https://www.siemens.com>>. Acesso em Abril de 2018.
- [92] *Site da GE*, . Disponível em: <<https://www.gepowerconversion.com>>. Acesso em Maio de 2018.
- [93] *Site da Ecoswing*. Disponível em: <<https://ecoswing.eu/>>. Acesso em Abril de 2020.

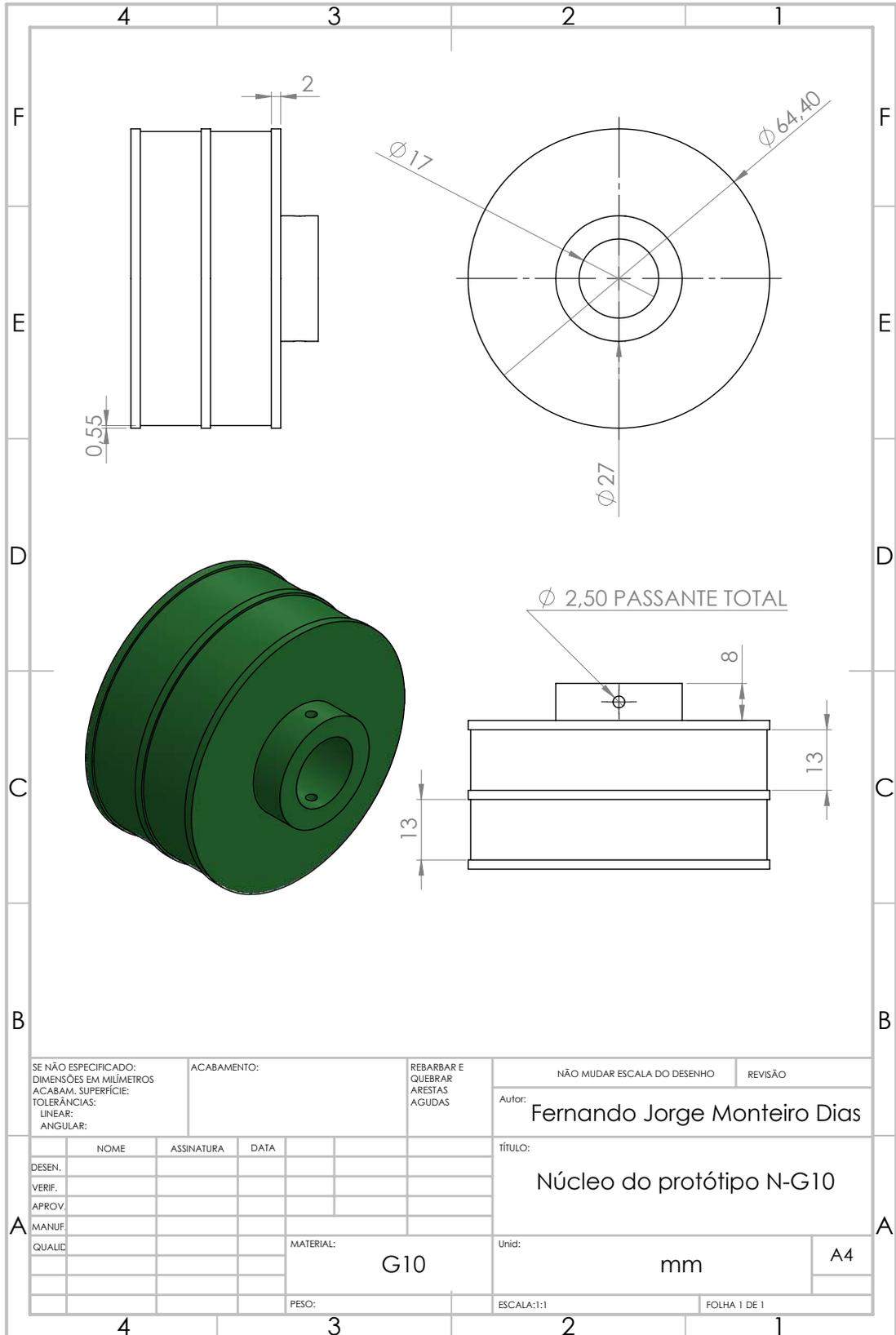
- [94] BRELJE, B. J., MARTINS, J. R. “Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches”, *Progress in Aerospace Sciences*, v. 104, pp. 1 – 19, 2019. ISSN: 0376-0421. doi: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.06.004>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042118300356>.
- [95] BOWMAN, C. L., MARIEN, T. V., FELDER, J. L. “Turbo- and Hybrid-Electrified Aircraft Propulsion for Commercial Transport”. In: *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium*, jul. 2018. doi: 10.2514/6.2018-4984. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2018-4984>.
- [96] MASSON, P. J., BROWN, G. V., SOBAN, D. S., et al. “HTS machines as enabling technology for all-electric airborne vehicles”, *Superconductor Science and Technology*, v. 20, n. 8, pp. 748–756, jun 2007. doi: 10.1088/0953-2048/20/8/005. Disponível em: <https://doi.org/10.1088%2F0953-2048%2F20%2F8%2F005>.
- [97] JIWEI, C.; ZHENGNAN, H. Y. S., LIUI, L. “Design and Test of a High-speed Double-winding High Temperature Superconducting Synchronous Motor”, *IEEE Access*, set. 2019. ISSN: 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2944635.
- [98] JANSEN, R., BOWMAN, C., JANKOVSKY, A., et al. “Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion (EAP) Research for Large Subsonic Transports”. In: *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, jul. 2017. doi: 10.2514/6.2017-4701. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2017-4701>.
- [99] ROSARIO, R., K. J. W. R., MADAVAN, N. “NASA Fixed Wing Project: Green Technologies for Future Aircraft Generations Project: Green Technologies for Future Aircraft Generations”. National Aeronautics and Space Administration Aeronautics and Space Administration, jan. 2014. doi: 10.2514/6.2017-4701. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140012552.pdf>.
- [100] SCHEIDLER, J. J. “Preliminary Design of the Superconducting Rotor for NASA’s 1.4 MW High-Efficiency Electric Machine”. In: *2018 Joint Propulsion Conference*, jul. 2018. doi: 10.2514/6.2018-4617. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2018-4617>.

- [101] HARAN, K. S., KALSI, S., ARNDT, T., et al. “High power density superconducting rotating machines—development status and technology road-map”, *Superconductor Science and Technology*, v. 30, n. 12, pp. 123002, nov 2017. doi: 10.1088/1361-6668/aa833e.
- [102] FUKUDA, S.; YUN, K.; IWAKUMA, M.; MIURA, S.; SATO, S.; YOSHIDA, K.; TOMIOKA, A.; KONNO, M.; IZUMI, T. “Design Study of 2-MW Fully Superconducting Synchronous Motors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 4, jun. 2018. doi: 10.1109/TASC.2018.2821718.
- [103] BRAMBILLA, R.; GRILLI, F.; MARTINI, L.; BOCCHI, M.; ANGELI, G. “A Finite-Element Method Framework for Modeling Rotating Machines with Superconducting Windings”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 5, ago. 2018. doi: 10.1109/TASC.2018.2812884.
- [104] HUANG, Z.; ZHANG, M.; WANG, W.; COOMBS, T. “Trial Test of a Bulk-Type Fully HTS Synchronous Motor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 24, n. 2, ago. 2014. doi: 10.1109/TASC.2013.2296142.
- [105] ALHASAN, R.; LUBIN, T.; MAKEYEVICH, Z.; LÉVÊQUE, J. “A New Kind of Superconducting Machine”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 26, n. 3, abr. 2014. doi: 10.1109/TASC.2016.2531003.
- [106] SANTOS DA CRUZ, V. *Carregamento indutivo de corrente em laços supercondutores*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, jun. 2018.
- [107] CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 2013. ISBN: 978-85-8055-207-2.
- [108] BARBI, I. *Teoria Fundamental de um Motor de Indução*. 1985.
- [109] MARTINS, F. G. *Projeto de um Motor Linear Supercondutor com Fios de Segunda Geração*. Tese de Mestrado, COOPE/UFRJ, 2014. Rio de Janeiro.
- [110] ZOBRIST, R. ABARI M. EL-HAWARY S. NAHAVANDI J. ANDERSON B. M. HAMMERLI W. REEVE F. CANAVERO M. LANZEROTTI T. SAMAD T. G. CRODA O. MALIK G. *Applications Of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*. A JOHN WILEY & SONS, INC., 2011.

- [111] BEZERRA, M. B. *Implementação de uma bancada para o controle eletrônico de motores síncronas de ímã permanente utilizando um DSP*. Tese de Mestrado, COOPE/UFRJ, mar. 2004. Rio de Janeiro.
- [112] RIBEIRO, L. F. S. S. *Aprimoramento de sistema de caracterização de fitas supercondutoras*. Tese de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, fev. 2017.
- [113] DIAS; F. J. M. *Avaliação das Características Elétricas e Magnéticas de Bobinas Supercondutoras, Levando em Consideração Algumas Configurações de Isolamento*. Tese de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, nov. 2015.
- [114] PFISTER, P. D.; PERRIARD, Y. “Torque measurement methods for very high speed synchronous motors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, set. 2008.
- [115] DIBLÍK, M.; BERAN, L.; PODRAPSKÝ, J. “On the accuracy of indirect torque measurement using frequency converter”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, jul. 2017.
- [116] SHU, S. D.; TORII, S. “Torque-Speed Characteristics of Superconducting Synchronous Reluctance Motors With DyBCO Bulk in the Rotor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, jun. 2008.
- [117] DIAS, F. J. M.; POLASEK, A.; ANDRADE JR., RUBENS; RODRIGUEZ, E.; COSTA, F.; SOTELO, G. G. “Synchronous-hysteresis superconducting machine with stacks of second generation tapes”. SBSE, maio 2018. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395656.
- [118] DIAS, F. J. M., SANTOS, B. M. O., SOTELO, G. G., et al. “Development of a Superconducting Machine With Stacks of Second Generation HTS Tapes”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 29, n. 5, pp. 1–5, Aug 2019. ISSN: 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2019.2898252.
- [119] DIAS, F. J. M., SOTELO, G. G., POLASEK, A. AND ANDRADE JR., RUBENS. “Novo conceito de máquina supercondutora para uso em aviões elétricos”. In: *Submetido ao MOMAG2020*. UFF, 2020.

Apêndice A

Projeto dos Protótipos N-G10 e N-MAG



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Autor:

Fernando Jorge Monteiro Dias

TÍTULO:

Núcleo do protótipo N-G10

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

MATERIAL:

G10

Unid:

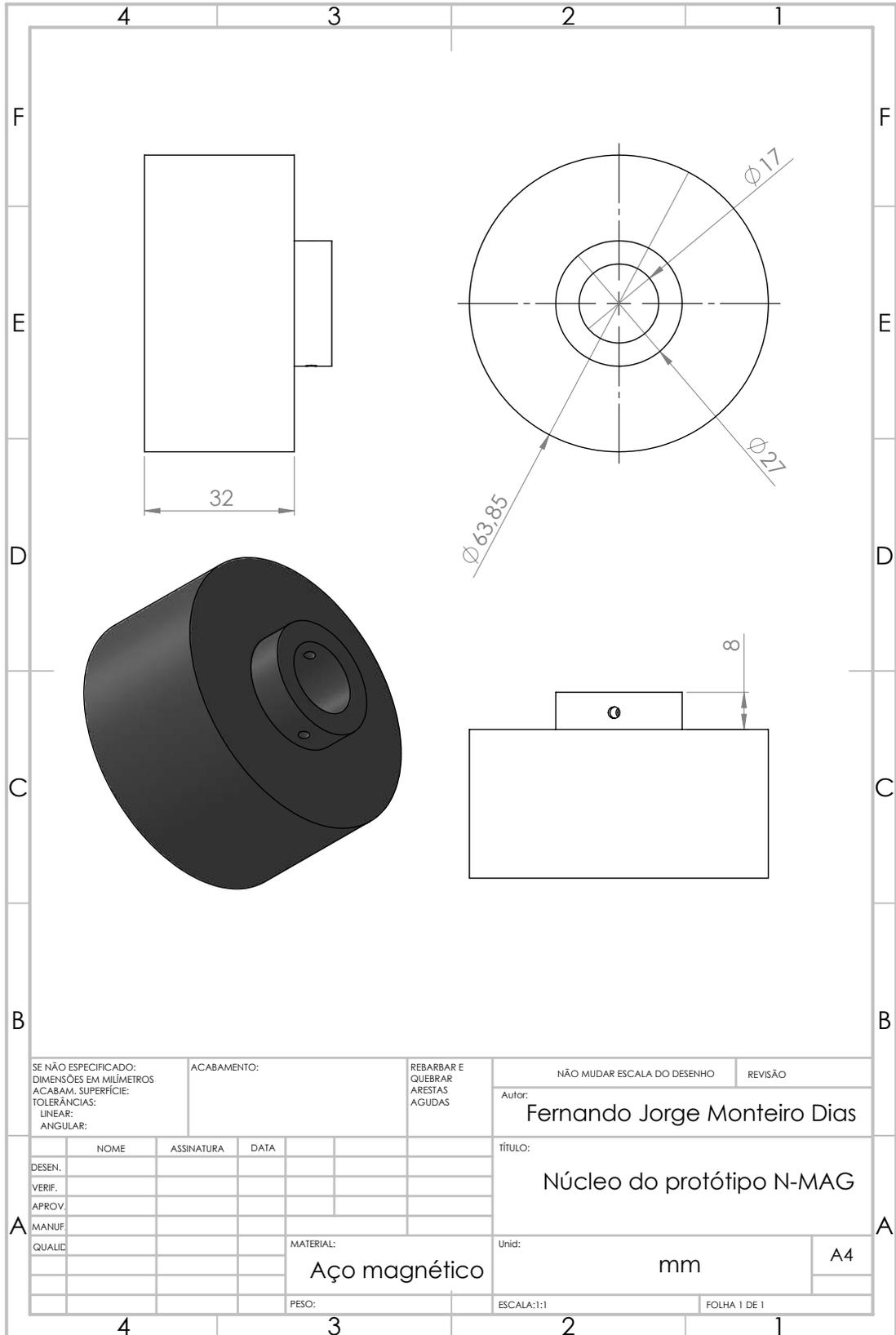
mm

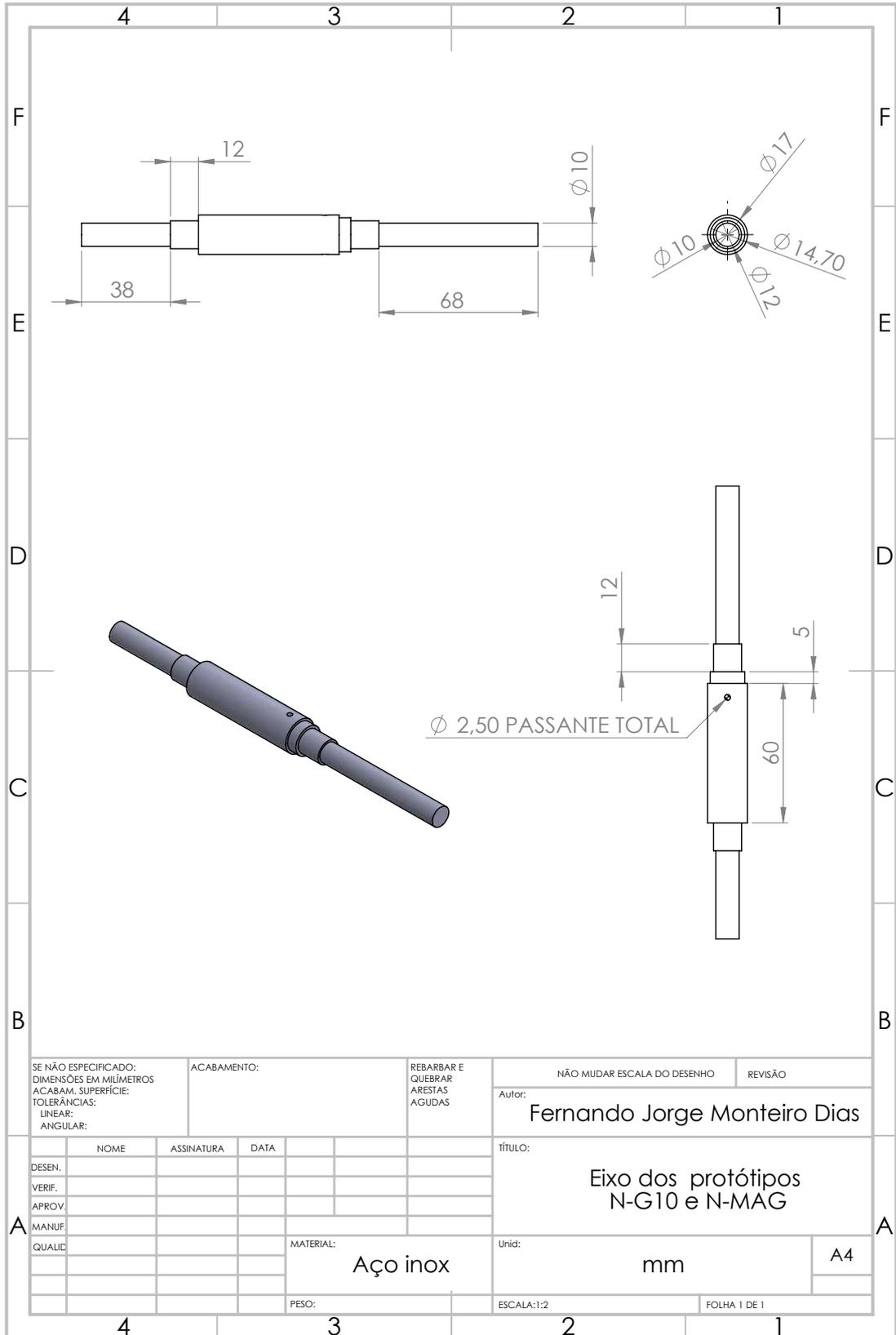
A4

PESO:

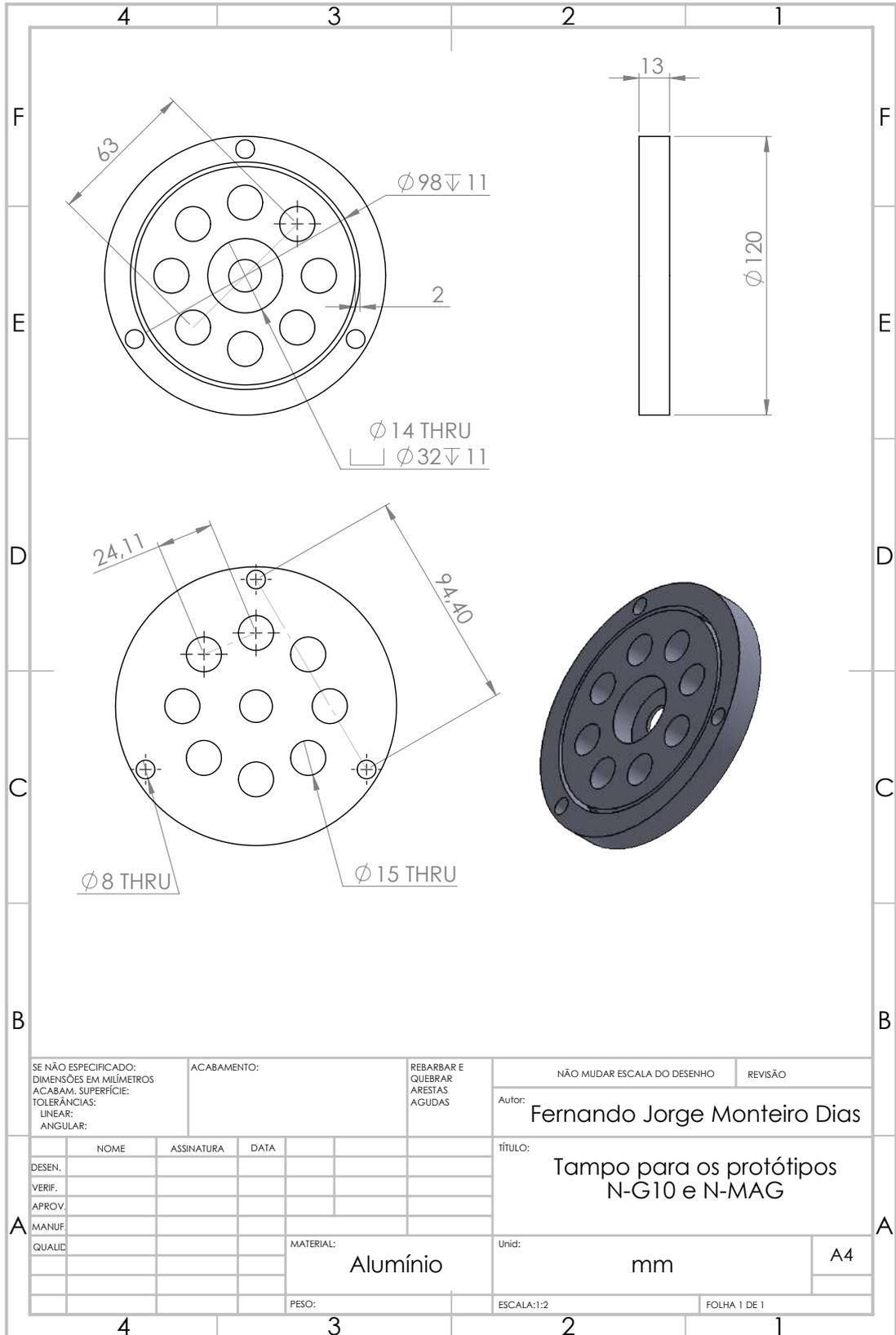
ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1





SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
				Autor: Fernando Jorge Monteiro Dias	
				TÍTULO: Eixo dos protótipos N-G10 e N-MAG	
				Unid: mm	A4
MATERIAL: Aço inox				ESCALA:1:2	FOLHA 1 DE 1
PESO:					



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Autor:

Fernando Jorge Monteiro Dias

TÍTULO:

Tampo para os protótipos
N-G10 e N-MAG

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

MATERIAL:
Alumínio

Unid:

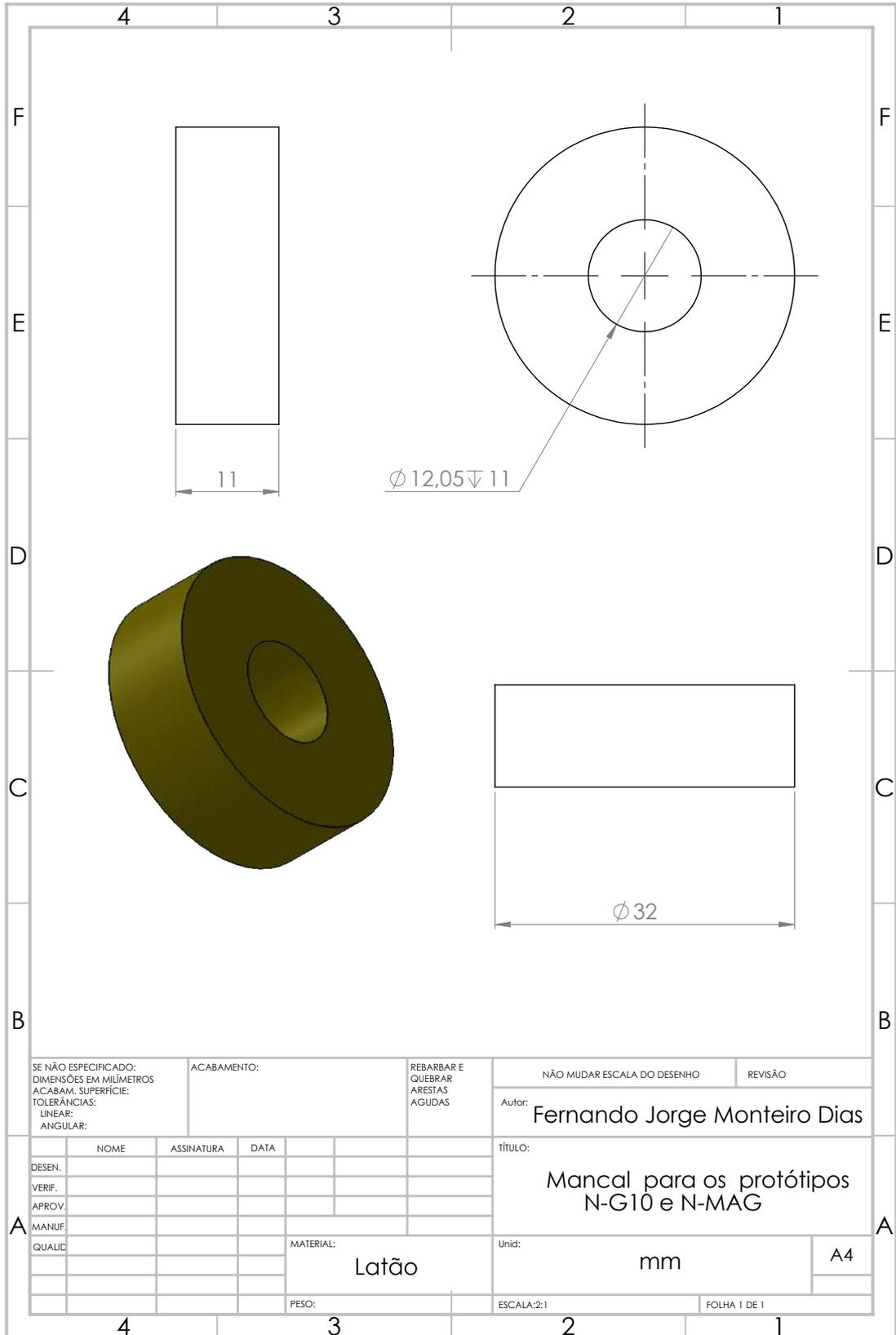
mm

A4

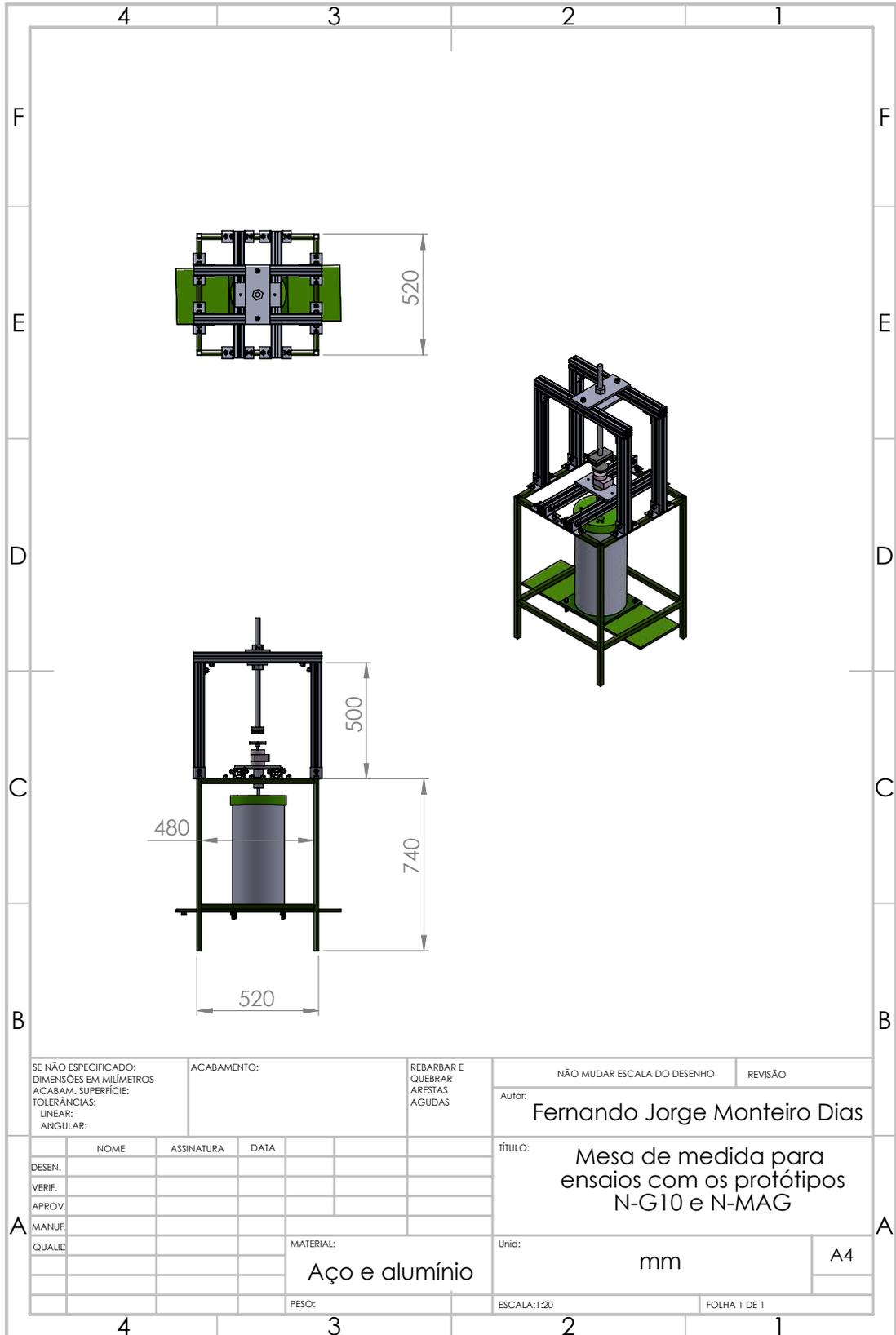
PESO:

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
				Autor: Fernando Jorge Monteiro Dias	
				TÍTULO: Mancal para os protótipos N-G10 e N-MAG	
			MATERIAL: Latão	Unid: mm	A4
			PESO:	ESCALA:2:1	FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Autor: **Fernando Jorge Monteiro Dias**

TÍTULO: **Mesa de medida para
ensaios com os protótipos
N-G10 e N-MAG**

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

MATERIAL:
Aço e alumínio

Unid: **mm**

A4

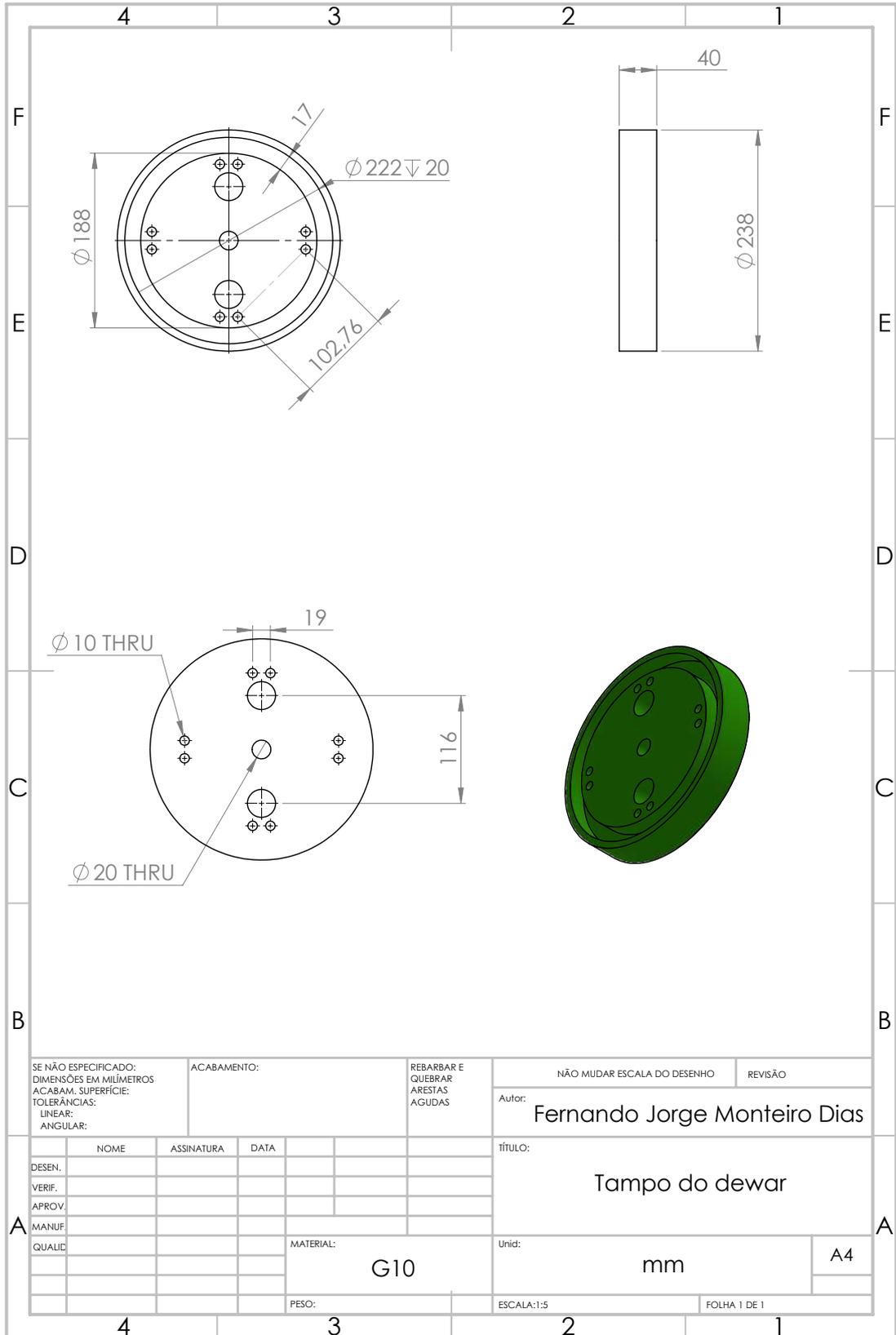
PESO:

ESCALA: 1:20

FOLHA 1 DE 1

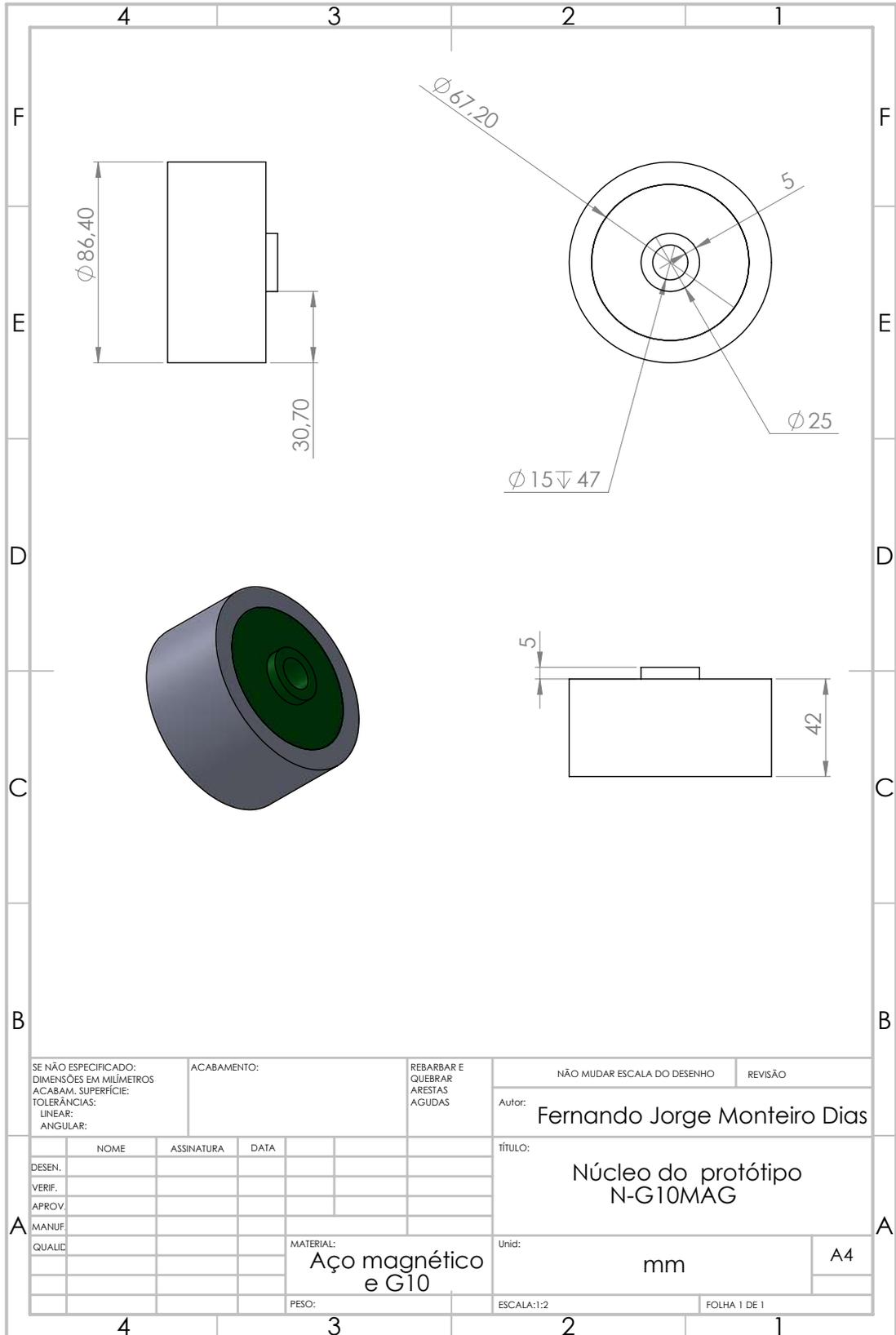
Apêndice B

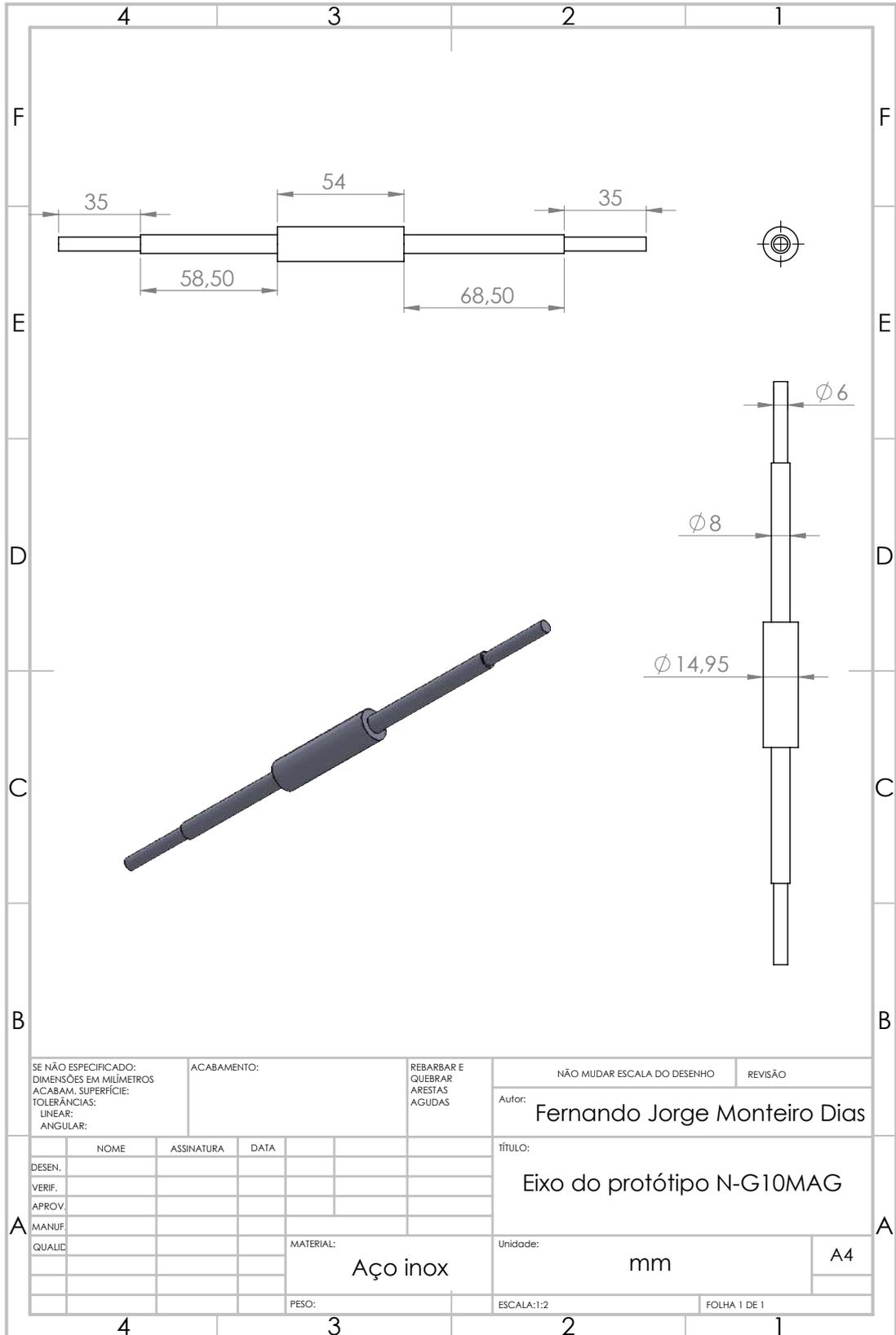
Projeto do Tampo do Dewar



Apêndice C

Projeto do Protótipo N-G10MAG





SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Autor: **Fernando Jorge Monteiro Dias**

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

TÍTULO:

Eixo do protótipo N-G10MAG

MATERIAL: **Aço inox**

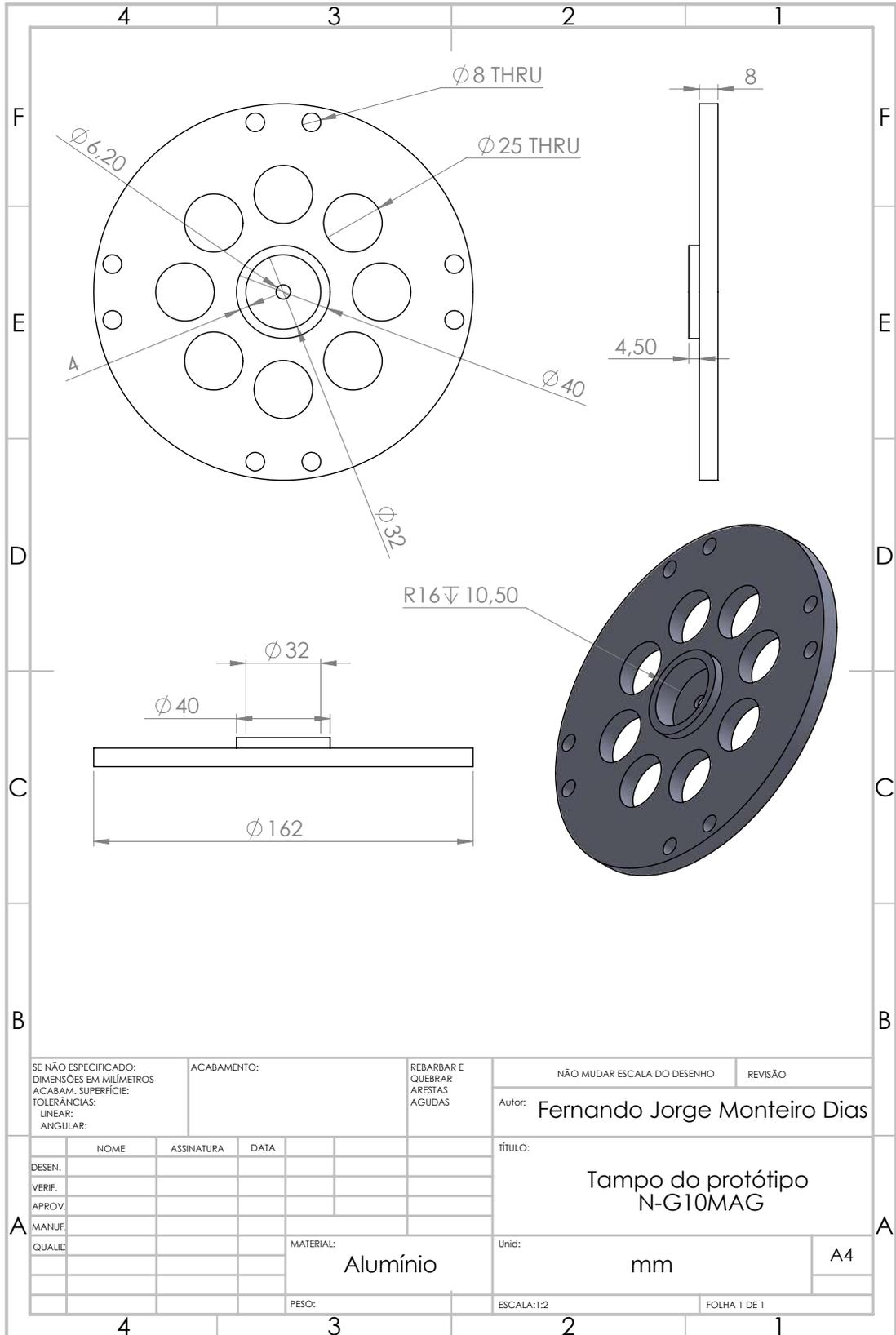
Unidade: **mm**

A4

PESO:

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Autor: Fernando Jorge Monteiro Dias

TÍTULO:

Tampo do protótipo
N-G10MAG

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

MATERIAL:
Alumínio

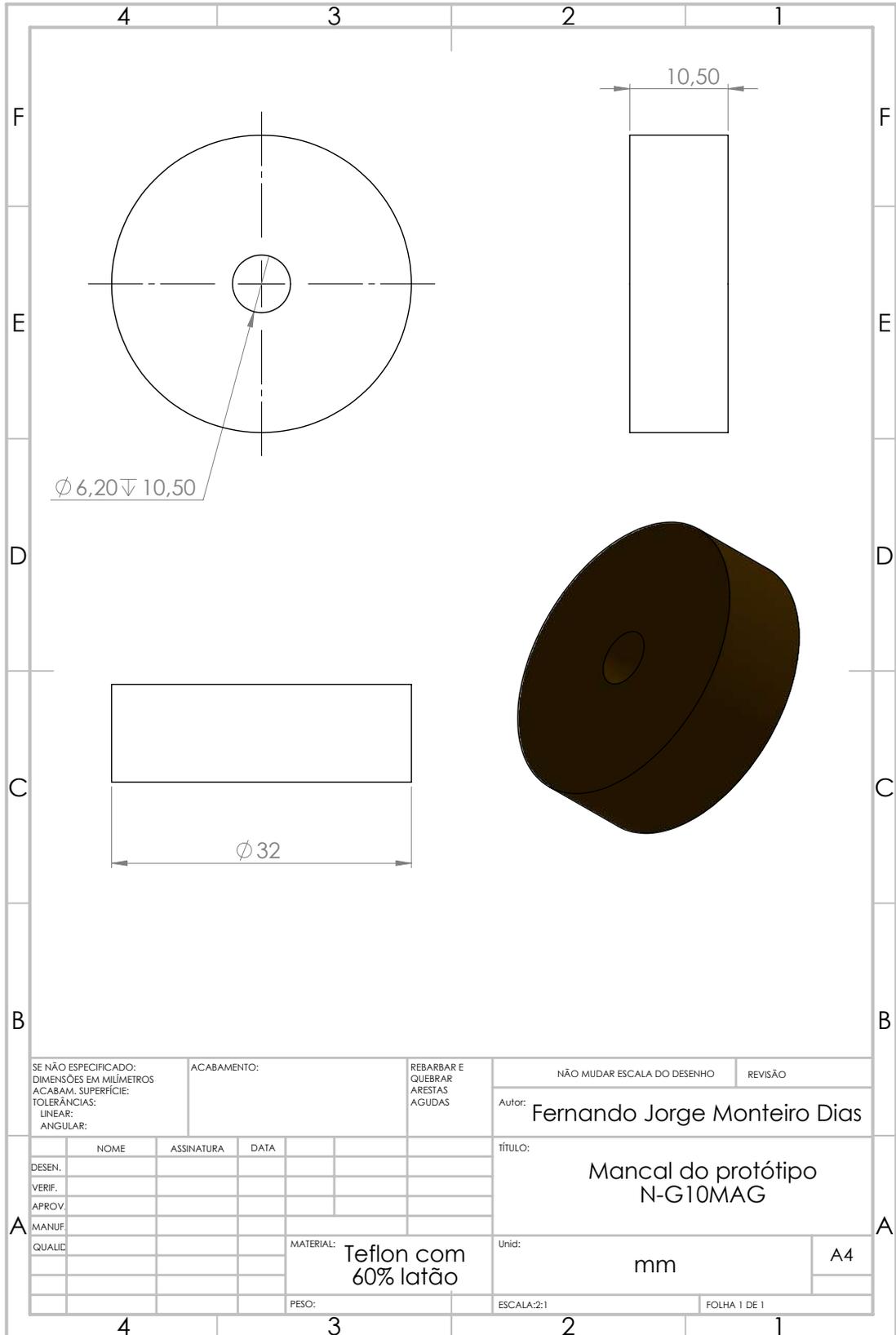
Unid: mm

A4

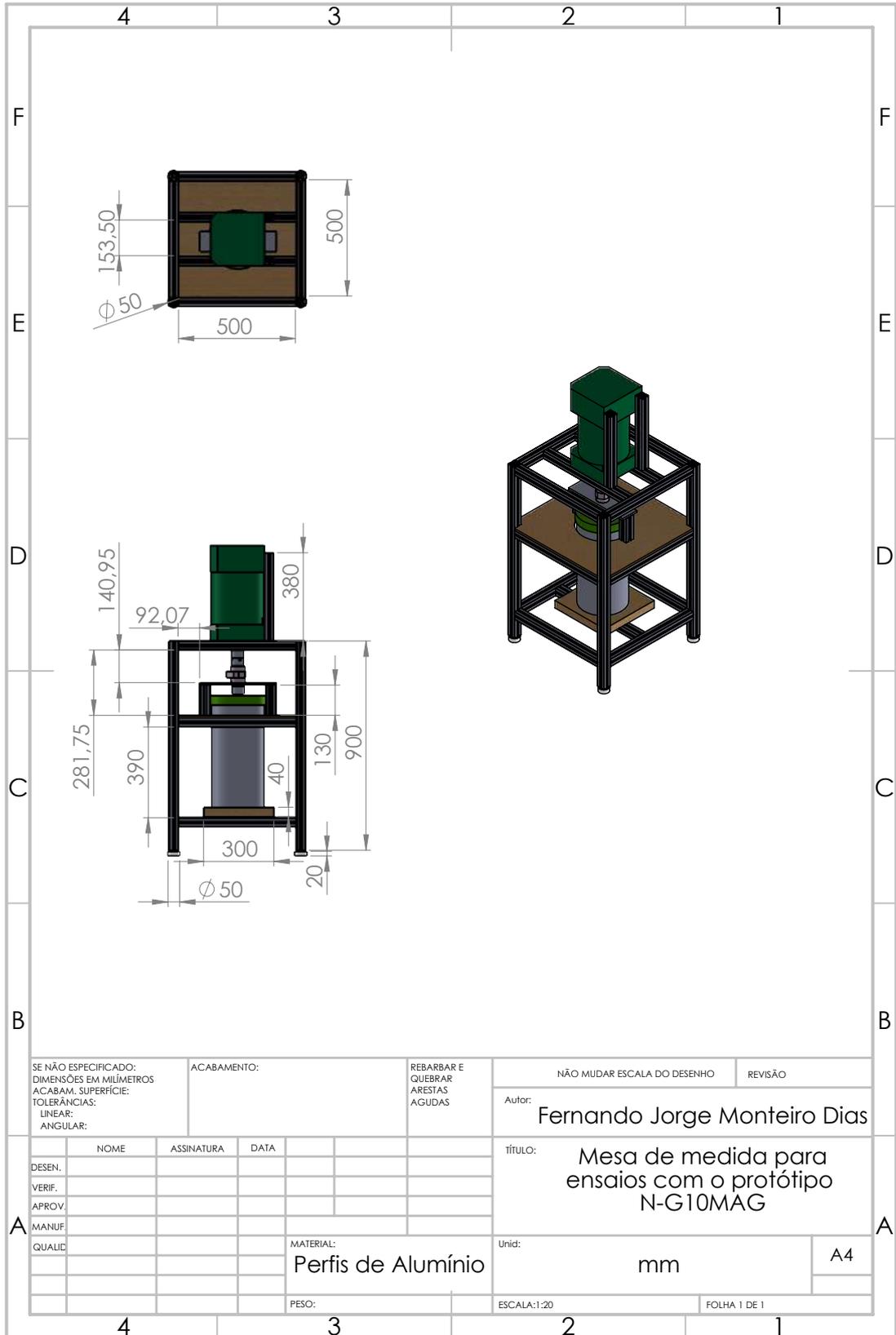
PESO:

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
				Autor: Fernando Jorge Monteiro Dias	
				TÍTULO: Mancal do protótipo N-G10MAG	
				Unid: mm	A4
				ESCALA:2:1	FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Autor: **Fernando Jorge Monteiro Dias**

título: **Mesa de medida para
ensaios com o protótipo
N-G10MAG**

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID.			

MATERIAL:
Perfis de Alumínio

Unid: **mm**

A4

PESO:

ESCALA:1:20

FOLHA 1 DE 1

Apêndice D

Instrumentos de Medição

Tabela D.1: Instrumentos utilizado nos ensaios

Instrumentos	Fator de abrangência	Incerteza	Desvio	Certificado
NP: 06-10254-R-Ponte de Kelvin-NS: 226320	2,00	0,33	0,00	CA1-334/2018
NP: 06-18354-V-Wattímetro digital trifásico-NS: 91HA43971	2,00	0,07	-0,07	CA1-225/2018
NP: 06-18354-A-Wattímetro digital trifásico-NS: 91HA43972	2,00	0,80	0	CA1-295/2018
NP: 06-18354-W-Wattímetro digital trifásico-NS: 91HA43973	2,00	0,07	0	CA1-214/2018
06-20612_142-Termômetro digital-NS: 003D39	2,01	0,43	0,38	2803-2018
06-20612_141-Termômetro digital-NS: 003D39	2,01	0,43	0,17	2802-2019
06-20612_147-Termômetro digital-NS: 003D39	2,01	0,43	0,25	2808-2020
NP: AP4-220-Md-Transdutor de torque-NS: 602116734	2,01	0,7	-0,21	CA1-71/2019
NP: 014767-S-Eixo de torção-NS: 53064	2	0,12	0,06	4XX28R19