



MODELAGEM E ANÁLISE DE EQUIPAMENTOS COM INDUÇÃO DE CORRENTE EM FITAS 2G USANDO A FORMULAÇÃO T-A

Bárbara Maria Oliveira Santos

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 Junior
Felipe Sass

Rio de Janeiro
Setembro de 2022

MODELAGEM E ANÁLISE DE EQUIPAMENTOS COM INDUÇÃO DE
CORRENTE EM FITAS 2G USANDO A FORMULAÇÃO T-A

Bárbara Maria Oliveira Santos

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 Junior
Felipe Sass

Aprovada por: Prof. Rubens de Andrade Junior
Prof. Felipe Sass
Prof. João Murta Pina
Prof. Flávio Goulart dos Reis Martins
Prof. Elkin Ferney Rodriguez Velandia
Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2022

Santos, Bárbara Maria Oliveira

Modelagem e análise de equipamentos com indução de corrente em fitas 2G usando a formulação T-A/Bárbara Maria Oliveira Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XVI, 115 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Rubens de Andrade Junior

Felipe Sass

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 96 – 115.

1. Fitas 2G. 2. Formulação T-A. 3. Supercondutividade. I. de Andrade Junior, Rubens *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Esta obra é dedicada aos meus
orientadores, Professor Rubens e
Professor Felipe.*

Agradecimentos

Nas aulas de Literatura, aprendi que, ao ler e analisar uma obra, devemos fazer uma reflexão sobre o contexto em que ela foi escrita. Em geral, para obras científicas, como uma tese, a própria obra fornece uma revisão bibliográfica que auxilia o leitor no processo de contextualização e entendimento do trabalho e, em geral, essa revisão é suficiente. No caso de obras escritas no período entre 2020 e 2022, no entanto, acredito que isso somente não é suficiente. É necessário olhar para além da literatura científica em que a obra se insere e revisar todos os macro-eventos que definiram este conturbado período histórico para o mundo todo.

Esta tese foi escrita no ano de 2022, mas o período de doutorado se iniciou bem antes, em 2019, antes da pandemia. Esta pesquisa, portanto, foi feita dentro do período de tempo que caracterizou a pandemia. Ela foi feita em isolamento, ela foi feita antes e depois de vacinação em massa, ela foi feita também depois, quando o retorno começou a ocorrer. Ela foi feita quando no país dezenas morriam por semana, depois centenas, depois milhares, depois centenas e dezenas de novo. É necessário lembrar disso e honrar todos os que se foram, todos os que estão presentes com sequelas, todos nós que passamos por este momento.

Agradeço às agências de fomento que permitiram que este trabalho fosse feito, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Agradeço à UFRJ, aos Professores e funcionários do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE e do Departamento de Engenharia Elétrica da POLI, por todo apoio e conhecimento passado a mim. Agradeço aos Professores, colegas e funcionários que trabalham ou trabalharam no LASUP/UFRJ e no NITEE/UFF, pela amizade e parceria.

Agradeço aos meus orientadores, Professores Rubens e Felipe, por me guiarem e acompanharem por tanto tempo, por serem excelentes orientadores e amigos. Agradeço ao meu grande amigo e colega de doutorado Gabriel pela incrível parceria e por todo apoio durante esses tempos tão complicados. Agradeço aos meus alunos pelo excelente trabalho que fizeram e fazem e por sempre me inspirarem.

Agradeço à minha mãe, Margareth, ao meu pai, Gilson, e ao meu irmão, Filipe, por estarem ao meu lado o tempo todo. Amo vocês. Agradeço às minhas amigas, aos

meus amigos e familiares pelo apoio. Agradeço aos profissionais da Saúde que me ajudam a manter a mente e o corpo saudáveis. Agradeço às filósofas, aos filósofos, às pensadoras e aos pensadores cujas teorias tanto me ajudam a crescer e desenvolver meu intelecto.

Agradeço ao Destino por me permitir chegar até aqui.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001.

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

MODELAGEM E ANÁLISE DE EQUIPAMENTOS COM INDUÇÃO DE CORRENTE EM FITAS 2G USANDO A FORMULAÇÃO T-A

Bárbara Maria Oliveira Santos

Setembro/2022

Orientadores: Rubens de Andrade Junior

Felipe Sass

Programa: Engenharia Elétrica

Esta tese de doutorado tem como objetivos: desenvolver modelo computacional em duas dimensões para simulações e análises de equipamentos elétricos com fitas supercondutoras atuando somente com correntes induzidas e aplicar o modelo desenvolvido em simulações de mancal magnético supercondutor com laços duplos cruzados e em simulações de máquina supercondutora de indução com gaiolas. O modelo desenvolvido é baseado em uma formulação que usa os potenciais vetor magnético (A) e vetor corrente (T) como variáveis principais, chamada formulação T-A, na aproximação da fita por lâmina de corrente e no uso de circuito elétrico para calcular a distribuição de corrente. Neste trabalho, propõe-se que o acoplamento entre a formulação T-A e o circuito se dê através do cálculo do potencial escalar elétrico médio da fita. O modelo computacional proposto foi validado pela comparação dos resultados da simulação de mancais magnéticos supercondutores com medidas experimentais obtidas em trabalhos anteriores. Foram analisadas as dinâmicas de indução fita a fita nos laços duplos cruzados com simulações de ensaios de força de levitação e de ensaios de força lateral. Demonstrou-se a aplicação do modelo em máquinas elétricas com gaiolas com barras feitas de fitas 2G com simulações de magnetização por pulsos e simulações com movimento de malha. O efeito da solda na gaiola foi discutido. A máquina com gaiola foi comparada à máquina supercondutora de fluxo aprisionado com fitas 2G em formato em espiral, também simulada com formulação T-A.

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

MODELING AND ANALYSIS OF EQUIPMENT WITH CURRENT INDUCTION IN 2G TAPES USING THE T-A FORMULATION

Bárbara Maria Oliveira Santos

September/2022

Advisors: Rubens de Andrade Junior

Felipe Sass

Department: Electrical Engineering

This doctoral thesis aims to develop a computational model in two dimensions to simulate and analyze electrical equipment with superconducting tapes with induced current and to apply it in simulations of a superconducting magnetic bearing with double crossed loops and simulations of a superconducting induction machine with a cage. The developed model is based on a formulation that computes the magnetic vector potential (A) and current vector potential (T), namely T-A formulation. This formulation is applied to the thin-film approximation for tapes, and electric circuits are used to compute the current distribution. This work proposes an electric potential average to couple the T-A formulation and the circuit. The computational model was validated by comparing superconducting magnetic bearing simulation results with measurements performed in previous works. The induction dynamic of the double-crossed loops was analyzed tape by tape in simulations of both levitation and lateral displacement cases. The application of the proposed model to an electric machine with superconducting tape bars was demonstrated with pulsed-field magnetization simulations and simulations with mesh movement. The effect of soldering in the cage is discussed. The induction machine was compared with the trapped-flux machine with spiral tapes, also simulated with the T-A formulation.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivações	1
1.1.1 Motivações gerais	1
1.1.2 Motivações específicas	2
1.2 Objetivos e contribuições	4
1.3 Organização do texto	5
2 Máquinas rotativas e mancais magnéticos supercondutores	6
2.1 Supercondutividade	6
2.1.1 Supercondutores de alta temperatura crítica	7
2.1.2 O estado misto	8
2.2 Mancais magnéticos supercondutores	11
2.2.1 Descrição geral	11
2.2.2 História e estado-da-arte	12
2.3 Máquinas elétricas supercondutoras	17
2.3.1 Descrição	17
2.3.2 História e estado-da-arte	18
2.4 Resumo do capítulo	22
3 Modelagem computacional de equipamentos supercondutores	23
3.1 Modelagem de empilhamentos de fitas 2G	23
3.1.1 Homogeneização	23
3.1.2 Aproximação fita-lâmina	25
3.2 Formulações eletromagnéticas	25
3.2.1 Formulação A-V	26
3.2.2 Formulação H	27
3.2.3 Formulação T- Ω	28
3.2.4 Método de Equações Integrais	29

3.2.5	Formulação T-A	31
3.3	Outros aspectos	32
3.3.1	Modelos de ímãs permanentes e materiais ferromagnéticos . .	32
3.3.2	Modelagem de movimento	34
3.3.3	Condições de fronteira e condições iniciais	35
3.4	Resumo do capítulo	37
4	Metodologia e validação	38
4.1	Uso de fitas 2G e laços sem emenda em equipamentos	38
4.2	Representação de continuidade na formulação T-A	41
4.2.1	Vantagens da formulação T-A	41
4.2.2	O problema da continuidade de corrente na formulação T-A .	42
4.3	Proposta de uso de circuitos para representação de continuidade . . .	45
4.3.1	Representação das fitas e laços como elementos de circuito . .	45
4.3.2	Validação da proposta com simulações	46
4.4	Validação da metodologia em simulações de mancais magnéticos com laços sem emenda	49
4.4.1	Descrição geral da modelagem computacional	50
4.4.2	Validação da proposta com medidas	53
4.5	Resumo do capítulo	55
5	Resultados das simulações de mancais magnéticos	56
5.1	Apresentação e análise dos resultados das simulações dos ensaios de força de levitação	56
5.1.1	Análise de força de levitação	57
5.1.2	Análise das grandezas locais	58
5.2	Apresentação e análise dos resultados das simulações dos ensaios de perturbação lateral	64
5.2.1	Análise da densidade de força lateral	65
5.2.2	Análise das grandezas locais	66
5.3	Resumo do capítulo	71
6	Resultados das simulações de máquinas	74
6.1	Descrição das topologias de máquina	74
6.1.1	Máquina supercondutora de indução com gaiola de esquilo . .	75
6.1.2	Máquina supercondutora de fluxo aprisionado com enrolamen- tos em espiral	76
6.2	Descrição dos parâmetros de simulação e dos ensaios simulados	77
6.2.1	Dimensões geométricas e configurações de materiais	77
6.2.2	Descrição dos ensaios simulados	79

6.3	Resultados das simulações dos ensaios de magnetização	81
6.4	Resultados das simulações dos ensaios com movimento	83
6.5	Resumo do capítulo	89
7	Conclusão	91
7.1	Síntese do trabalho	91
7.2	Contribuições	93
7.3	Trabalhos futuros	95
	Referências Bibliográficas	96

Lista de Figuras

2.1	Estrutura cristalina do HTS $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	7
2.2	Ilustração da rede de Abrikosov e da distribuição de fluxo e densidade de supercorrente ao longo do comprimento de material supercondutor.	8
2.3	Ilustração da força de Lorentz resultante da interação entre fluxo magnético e corrente de condução.	9
2.4	Ilustração de um <i>bulk</i> levitando acima de uma ímã. A figura mostra situações de equilíbrio e de desequilíbrio, quando forças restaurativas agem.	12
2.5	Ilustração do recipiente com nitrogênio líquido contendo os <i>bulks</i> e do trilho de ímãs permanentes do primeiro veículo de levitação magnética supercondutora com seres humanos a bordo, desenvolvido pela Southwest Jiaotong University, na China.	13
2.6	Ilustração do recipiente com nitrogênio líquido contendo os <i>bulks</i> e do trilho de ímãs permanentes do projeto Maglev Cobra.	14
2.7	Ilustração do empilhamento de fitas e do trilho de ímãs permanentes do projeto Maglev Cobra.	15
2.8	Ilustração dos tipos de laços sem emenda estudados no LASUP. O primeiro, à esquerda, é o laço simples e o segundo, à direita, é o laço duplo cruzado.	16
2.9	Ilustração dos tipos de laços duplos cruzados sobre o trilho do MagLev Cobra.	17
2.10	Ilustração do enrolamento em espiral usado em proposta de máquina da parceria UFRJ/UFF/CEPEL. Figura fora de escala.	21
3.1	Ilustração comparando blocos e fitas 2G. Figura em escala.	24
3.2	Ilustração do processo de homogeneização.	24
3.3	Ilustração do processo de aproximação da fita por uma lâmina ou plano.	25
3.4	Ilustração do desenvolvimento do método de equações integrais para fitas.	30
3.5	Ilustração do processo de acoplamento da formulação T-A.	31
3.6	Ilustração das curvas B-H de materiais magnéticos.	33

3.7	Ilustração de um exemplo de periodicidade e de antiperiodicidade com domínio circular.	36
3.8	Ilustração da definição da condição de Dirichlet da formulação T. . .	37
4.1	Ilustração dos laços de corrente em <i>bulks</i> e fitas.	39
4.2	Ilustração da resposta de densidade de fluxo magnético gerada pelo trilho sobre os laços duplos cruzados.	40
4.3	Ilustração do acoplamento de fitas com circuito. Ilustração fora de escala.	47
4.4	Domínios de simulação do sistema simples usado na validação dos métodos T-A-circuito e T-A-Neumann em comparação com a formulação A-V. Há duas bobinas, B1, formada de fios de cobre; e B2, formada de filmes finos de alta condutividade.	47
4.5	Validação dos métodos T-A circuito e T-A-Neumann em comparação das correntes induzidas com a formulação A-V.	49
4.6	Validação dos métodos T-A circuito e T-A-Neumann em comparação da densidade laminar de corrente nas duas partes da bobina B2 com a formulação A-V. Instante de tempo referente aos dados: 0,02 s. . .	50
4.7	Mancal magnético supercondutor com laços duplos cruzados em aproximação 2D. Partes do mesmo laço são denominadas por letras. Números em vermelho indicam a divisão das malhas: 1 é malha totalmente estática e 2 é malha em que movimento é permitido.	51
4.8	Força de levitação do mancal com laços duplos cruzados, comparação entre medidas de [15] e o resultado da formulação T-A-circuito. . . .	54
4.9	Correntes totais em cada região dos laços duplos cruzados durante simulação do ensaio de levitação com deslocamento de ± 30 mm. . . .	54
5.1	Resultados de simulações de força de levitação com vários deslocamentos diferentes comparados às medidas da referência [15].	57
5.2	Componente horizontal da densidade de fluxo magnético (B_x), resultado do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.	59
5.3	Componente vertical da densidade de fluxo magnético (B_y), resultado do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.	60
5.4	Densidade de corrente crítica normalizada por J_{c0} , resultado do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.	60
5.5	Densidade de corrente crítica normalizada por J_{c0} , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento de ± 15 mm.	61

5.6	Densidade de corrente induzida normalizada por J_c , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.	62
5.7	Densidade de corrente induzida normalizada por J_c , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento de ± 15 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.	62
5.8	Densidade de corrente normalizada por J_{c0} , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.	63
5.9	Densidade de corrente crítica normalizada por J_{c0} , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento de ± 15 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.	64
5.10	Resultados de simulações de força lateral. Hmax se refere ao deslocamento vertical.	65
5.11	B_x , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm. . .	67
5.12	B_x , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm. . .	67
5.13	B_y , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm. . .	68
5.14	B_y , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm. . .	68
5.15	J_c/J_{c0} , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm. . .	69
5.16	J_c/J_{c0} , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm. . .	70
5.17	J/J_c , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm. . .	70
5.18	J/J_c , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm. . .	71
5.19	J/J_{c0} , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm. . .	72
5.20	J/J_{c0} , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm. . .	72
6.1	Ilustração da gaiola de esquilo com fitas 2G em suas barras.	75
6.2	Ilustração do enrolamento em espiral usado em proposta de máquina da parceria UFRJ/UFF/CEPEL. Figura fora de escala.	76
6.3	Ilustração do estator escolhido com os raios de suas camadas destacados por cores.	78
6.4	Ilustração do rotor com gaiola de esquilo com barras de fitas 2G, os raios de suas camadas estão destacados por cores.	78
6.5	Ilustração do rotor com fita em espiral, dimensões gerais são as mesmas do rotor com gaiola.	79
6.6	Circuito equivalente da gaiola do rotor da máquina supercondutora síncrona/de indução.	81
6.7	Densidade de corrente normalizada pela densidade de corrente crítica na gaiola do rotor da máquina supercondutora de indução/síncrona, simulação do ensaio de magnetização.	82

6.8	Resultados de correntes totais nas barras da gaiola da simulação do ensaio de magnetização. (a), (b) e (c) mostram os resultados para soldas nula, com 25 nΩ e com 50 nΩ, respectivamente. (d) mostra a corrente normalizada pela corrente crítica apenas para a barra 1. . . .	83
6.9	Resultados de densidade de campo magnético na geometria da máquina, simulações do ensaio de magnetização. (a) mostra a densidade de fluxo durante o pulso. (b), (c) e (d) mostram a densidade de fluxo no último instante de tempo simulado para diferentes resistências de solda.	84
6.10	Densidade de corrente induzida normalizada pela densidade de corrente crítica no enrolamento em espiral, simulação do ensaio de magnetização.	85
6.11	Densidade de corrente induzida normalizada pela densidade de corrente crítica no enrolamento em espiral, simulação do ensaio de magnetização. (a) mostra o resultado da espiral, com dois eixos separados; o da direita se refere ao resultado durante o pulso aplicado ao estator e o da esquerda se refere ao resultado após o pulso aplicado ao estator, em que a densidade de corrente é cerca de 100 vezes menor. (b) mostra o resultado na barra 1. (c) mostra o resultado em todas as barras no instante 10 s.	86
6.12	Densidade de fluxo magnético da máquina supercondutora de indução/síncrona durante simulação de ensaio com movimento, instantes 0 s, 0,2 s, 0,4 s e 0,6 s, respectivamente.	87
6.13	Densidade de fluxo magnético da máquina de fluxo aprisionado com enrolamento em espiral durante simulação de ensaio com movimento, instantes 0 s, 0,2 s, 0,4 s e 0,6 s, respectivamente.	87
6.14	Densidade de corrente normalizada pela densidade de corrente crítica da máquina supercondutora de indução/síncrona durante simulação de ensaio com movimento.	88
6.15	Densidade de corrente normalizada pela densidade de corrente crítica da máquina de fluxo aprisionado durante simulação de ensaio com movimento.	88
6.16	Correntes induzidas em cada barra da gaiola durante a simulação do ensaio com movimento.	89
6.17	Conjugado desenvolvido durante as simulações do ensaio com movimento para ambas as topologias de máquinas.	90

Lista de Tabelas

4.1	Formulações usadas na modelagem T-A-circuito para acoplamentos em 2D.	46
4.2	Parâmetros dos ímãs permanentes e dos aços-carbono.	52
5.1	Análise da histerese dos resultados das simulações de força de levitação para várias alturas através da diferença entre forças de subida e descida no ponto 45 mm.	58

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, faz-se a contextualização do trabalho. São apresentadas as motivações gerais e específicas, os objetivos, as contribuições pretendidas e a organização do texto.

1.1 Motivações

Esta seção trata das motivações do trabalho. Elas são divididas em motivações gerais, relacionadas ao cenário ambiental, econômico e tecnológico geral, e motivações específicas, vindas das questões tecnológicas da pesquisa em aplicações de fitas supercondutoras de segunda geração em equipamentos elétricos.

1.1.1 Motivações gerais

Nos últimos três séculos, o mundo tem experimentado uma fase de forte crescimento econômico [1]. O crescimento drástico está associado às inúmeras transformações tecnológicas vividas nestes três séculos, passando pela introdução das máquinas à vapor na indústria até a internet das coisas. Essas inovações transformaram muitos aspectos fundamentais da vida humana, como as noções de tempo, de espaço e as interações sociais.

Essas mudanças também ocorrem no meio ambiente. O crescimento econômico teve, como um de seus efeitos, aumento da degradação do meio natural. Um exemplo disso é o aumento da anomalia de temperatura [2], que é a diferença entre uma determinada temperatura e a temperatura média, em geral calculada a partir de dados de coletados ao longo de várias décadas [3]. Nos últimos 70 anos, ela saiu da casa dos 0 °C, para a casa de 1 °C. O aumento subsequente da temperatura média pode ameaçar diversas espécies de seres vivos e causar alterações nas dinâmicas das sociedades. Por isso, países e organismos internacionais têm promovido políticas públicas para conter o aumento de temperatura e reduzir outros efeitos nocivos à vida,

como a poluição. O grande desafio é conseguir implementar essas políticas mantendo ou incentivando o crescimento econômico, tão importante para o desenvolvimento social.

Há, portanto, a necessidade de mais inovações tecnológicas, sobretudo no setor energético, para atingir esses objetivos. Uma dessas inovações é a tendência crescente de eletrificação parcial ou total de setores industriais que são dependentes de combustíveis fósseis, como o setor de transportes [4]. A energia elétrica entra como meio de transformar energia de fontes diversas em trabalho. Com a diversidade de fontes, pode-se dar preferência a fontes renováveis com ciclo econômico e ambiental menos poluente.

Os materiais supercondutores são considerados boas alternativas para o processo de eletrificação [5]. Esses materiais apresentam efeitos de resistividade nula e expulsão e/ou aprisionamento de campo magnético quando submetidos a condições especiais de temperatura, campo magnético e corrente elétrica [6]. Esses efeitos podem ser aplicados a equipamentos elétricos de forma a aumentar sua eficiência, sua potência específica ou densidade de potência por massa e volume. Por isso, sua aplicação em máquinas elétricas, cabos e limitadores de corrente é investigada em centros de pesquisa por todo o mundo.

Além disso, os efeitos físicos dos estados supercondutores possibilitam a levitação magnética, viabilizando sua aplicação em mancais magnéticos para elementos rotativos, como máquinas rotativas [7], e em mancais magnéticos para elementos lineares, como veículos com levitação magnética [8].

Logo, o domínio dos processos de fabricação e de modelagem e *design* de aplicações práticas de supercondutores é estratégico para todos os países. Esse domínio é estratégico em especial para o Brasil, onde está boa parte das reservas mundiais de terras raras [9], materiais usados na fabricação de supercondutores do tipo II de alta temperatura crítica, chamados de *High Temperature Superconductors* (HTS) - aqueles usados nas aplicações práticas.

1.1.2 Motivações específicas

Os materiais HTS podem ser encontrados no formato de filmes finos, fios e blocos [10]. Desses, os filmes finos são fabricados em escala industrial por diversos fornecedores e possuem capacidade de aprisionamento de campo compatível com níveis de campo magnético atingidos nas aplicações práticas. Trabalhos comparando-os aos blocos evidenciam que os filmes finos levam o sistema a ter maior densidade de força por massa [11]. Configuram, assim, um formato interessante para propostas de aplicações em que essas características são relevantes, tais como as indústrias aeronáutica e naval.

A representação matemática e computacional das fitas supercondutoras de segunda geração, que são filmes finos, tem sido um desafio desde que as primeiras propostas de aplicações práticas desse material foram feitas no início dos anos 2000. A capacidade de representar as fitas computacionalmente é primordial para fazer simulações dos equipamentos elétricos, elementos que auxiliam tanto no *design* dos sistemas como nas análises de previsão de falhas.

Duas correntes de representação das fitas ganharam destaque ao longo dos anos. A primeira é uma aproximação de um empilhamento de fitas por um bloco equivalente, modelo chamado de homogeneização [12]. A segunda é a representação da fita como uma linha em simulações 2D, e como um plano em simulações 3D, de forma que sua altura não é levada em consideração. Esse modelo é chamado de aproximação por filme-fino ou aproximação fita por lâmina de corrente [13].

A homogeneização tem como vantagem a facilidade que a simplificação por blocos traz ao sistema de geração de malhas do método numérico escolhido. Tal modelo já foi usado com o método de elementos finitos e com o método de diferenças finitas. No entanto, por tornar as fitas um bloco equivalente, a homogeneização não possibilita representar todo tipo de continuidade entre fitas ou pedaços da mesma fita.

Já o método de aproximação por filme-fino elimina essa desvantagem, tornando possível representar todo tipo de continuidade. Ele é aplicado no método de elementos finitos com dois conjuntos de equacionamentos eletromagnéticos usados em simulações com supercondutores: o método de equações integrais (MEI) [13] e a formulação T-A [14]. O MEI usa de equações integrais para calcular a densidade de corrente nas fitas, enquanto o restante do sistema é modelado por outro método. Ele foi aplicado na simulação de mancais magnéticos supercondutores lineares com laços duplos cruzados de fitas de segunda geração [15], em que os laços são entidades totalmente curto-circuitadas e toda corrente que circula neles é induzida. Embora o método tenha sido aplicado com sucesso, foram observados limites no seu uso:

- não foi possível simular todo o sistema acoplado, ou seja, os trilhos sob o mancal foram simulados à parte;
- o sistema de equações era complicado de ser montado;
- relações de simetria foram usadas para reduzir o custo computacional, limitando os tipos de ensaios que poderiam ser simulados apenas àqueles que usam dessa simetria.

Alternativa ao MEI, a formulação T-A é mais simples e versátil. Ela se baseia em conjuntos de equações diferenciais que calculam o potencial vetor corrente (T) e o potencial vetor magnético (A). Sua proposta de uso em simulações de supercondutores é mais recente, e desde 2017, quando os primeiros trabalhos foram

publicados, ela vem sendo estudada e aplicada largamente por pesquisadores da área de simulações de supercondutores. Com ela é possível representar uma larga gama de diferentes materiais, como supercondutores, materiais ferromagnéticos, ímãs permanentes, além de ser facilmente acoplada com configurações de mudanças de malha que emulam movimento entre componentes de um mesmo equipamento [16], fator importante para mancais e máquinas elétricas.

No entanto, como boa parte das aplicações práticas estudadas na literatura lida com imposição de correntes nas fitas, pouca atenção foi dada a sistemas com indução de corrente, como os laços duplos cruzados, laços simples e gaiolas de esquilo. Em aproximações 2D, largamente usadas em simulações de equipamentos por permitirem a obtenção de resultados razoáveis com custo computacional mais baixo, é necessário indicar ao sistema de equações como ocorre a continuidade entre as fitas ou pedaços de uma mesma fita, para que o método numérico possa fazer a divisão de corrente corretamente e o equipamento possa ser simulado como um todo. É nesse contexto em que se insere esta tese de doutorado.

1.2 Objetivos e contribuições

Os objetivos gerais e específicos desta tese de doutorado, intitulada **Modelagem e análise de equipamentos com indução de corrente em fitas 2G usando a formulação T-A**, são:

1. desenvolver modelo matemático e computacional para simular sistemas com fitas supercondutoras com correntes induzidas;
 - (a) aplicar novos métodos à formulação T-A em elementos finitos para permitir a representação de acoplamentos entre fitas ou pedaços da mesma fita;
 - (b) acoplar ao modelo os métodos de representação de curva B-H de materiais magnéticos, dos efeitos de ímãs permanentes e de movimento entre domínios de simulação;
2. aplicar o modelo desenvolvido em simulações de mancais magnéticos supercondutores com laços duplos cruzados de fitas 2G e contribuir com o conhecimento desse equipamento;
 - (a) fazer a validação do método computacional com dados experimentais de força de levitação de mancal magnético supercondutor com laços duplos cruzados medidos em trabalhos anteriores;

- (b) aumentar o conhecimento sobre o equipamento simulando os ensaios de deslocamento lateral, contribuindo com sua análise;
- 3. aplicar o modelo desenvolvido em máquinas supercondutoras de indução/síncronas e contribuir com o conhecimento desse equipamento;
 - (a) demonstrar a aplicabilidade do mesmo método para representação de gaiolas de esquilo construídas com fitas 2G nas barras, fitas 1G ou 2G nos anéis de curto-circuito, com barras e anéis conectados com solda;
 - (b) aumentar o conhecimento sobre o equipamento analisando os efeitos de:
 - (i) solda fita a fita; (ii) processos de magnetização por pulso e indução de corrente persistente; (iii) movimento.

1.3 Organização do texto

Este texto está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 faz a introdução ao trabalho, destacando as motivações e objetivos gerais e específicos;
- Capítulo 2 faz a revisão bibliográfica do fenômeno da supercondutividade, de mancais magnéticos supercondutores e de máquinas elétricas supercondutoras;
- Capítulo 3 faz a revisão bibliográfica dos métodos de modelagem computacional de equipamentos supercondutores;
- Capítulo 4 discute a metodologia do trabalho, a proposta de modelo matemático e computacional para simular sistemas com fitas supercondutoras com correntes induzidas e sua validação com comparações com outros métodos de simulação e com medidas;
- Capítulo 5 analisa os resultados das simulações do mancal magnético;
- Capítulo 6 analisa os resultados das simulações de máquinas elétricas supercondutoras;
- Capítulo 7 faz a conclusão do trabalho, com síntese, lista de contribuições e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Máquinas rotativas e mancais magnéticos supercondutores

Este capítulo apresenta as principais teorias e características de mancais magnéticos supercondutores (MMS) e máquinas elétricas rotativas supercondutoras (MES) que incluem fitas de segunda geração (2G).

2.1 Supercondutividade

A supercondutividade foi descoberta no início do século XX e tem sido estudada desde então. Quando um material supercondutor está submetido a condições físicas abaixo de uma temperatura crítica T_c , de um campo magnético crítico H_c e de uma corrente crítica I_c , sua resistividade cai a zero e o material apresenta diamagnetismo perfeito (efeito Meissner-Ochsenfeld). Existem dois tipos de supercondutores. Aqueles do tipo I apresentam dois estados estáveis, um estado supercondutor, em que resistividade nula e efeito Meissner-Ochsenfeld são observados, e um estado normal, em que essas propriedades não são observadas. Valores típicos de T_c estão na ordem de alguns K e os de H_c na ordem de algumas dezenas de mT/ μ_0 [6, 17].

Já os supercondutores do tipo II apresentam um terceiro estado estável entre o estado puramente supercondutor e o estado normal: o estado misto. Quando submetidos a campos magnéticos maiores que um campo magnético crítico H_{c1} mas menores que um segundo campo magnético crítico, H_{c2} , esses materiais podem apresentar resistividade nula ou muito baixa (em comparação a materiais condutores mais comuns). H_{c2} é geralmente alto o suficiente para permitir que supercondutores de tipo II sejam usados em aplicações práticas, como magnetos de alto campo, cabos, limitadores de corrente de curto-circuito, máquinas elétricas e mancais magnéticos. Valores típicos de H_{c2} estão na ordem de dezenas de T/ μ_0 . Valores típicos de T_c dos supercondutores de tipo II variam de acordo com seu subtipo. Esses materiais

são comumente divididos em supercondutores de baixa temperatura crítica, ou *low-temperature superconductors* (LTS) e supercondutores de alta temperatura crítica, ou *high-temperature superconductors* (HTS). T_c para LTS estão na faixa de 10 K, enquanto que, para os HTS, esse número está na região de dezenas de K [6, 17].

Neste trabalho, o foco está nos materiais HTS. Os principais aspectos de sua teoria e modelagem física estão resumidos na próxima seção.

2.1.1 Supercondutores de alta temperatura crítica

Supercondutores de alta temperatura crítica foram sintetizados pela primeira vez no fim dos anos 1980. Esses materiais apresentam anisotropia nas suas propriedades eletromagnéticas. A densidade de corrente crítica, J_c , e seu campo magnético crítico mudam de acordo com os ângulos entre as grandezas eletromagnéticas e o plano de incidência, Figura 2.1, sendo maiores ao longo do plano $\hat{a} - \hat{b}$ e menores na direção \hat{c} [6].

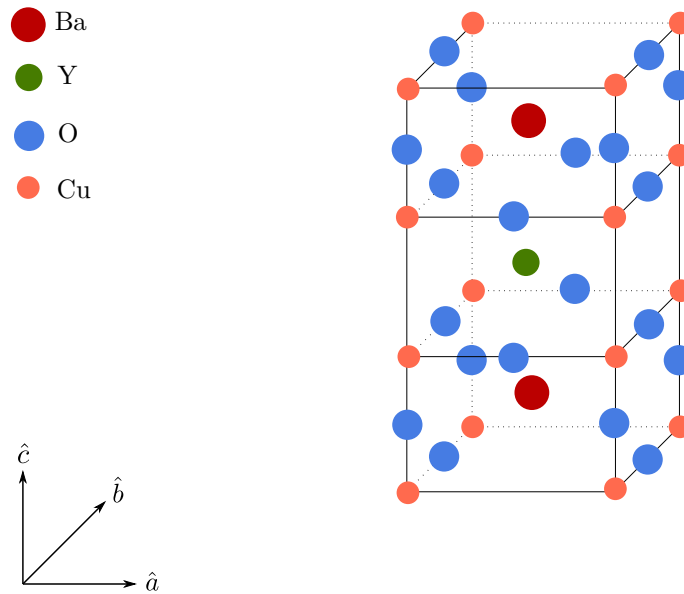


Figura 2.1: Estrutura cristalina do HTS YBa₂Cu₃O₇.

Os materiais podem ser divididos em duas categorias: aqueles com terras raras, tais como YBa₂Cu₃O₇, e aqueles sem elas, tais como Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O₁₀. Neste trabalho, a primeira categoria é chamada de (RE)BCO, com (RE) representando os elementos de terra rara, e a segunda categoria é chamada de BSCCO. Os HTS também podem ser divididos de acordo com formato: *bulks* ou blocos, filmes finos e fios ou fitas. Enquanto BSCCO são geralmente encontrados em formato de fios/fitas de primeira geração (1G), (RE)BCO podem ser comumente encontrados no formato de *bulks* ou fitas de segunda geração (2G). Fitas 2G tipicamente têm densidades de corrente críticas maiores que as fitas 1G para campos magnéticos na ordem de

1 T [18], o que as torna mais atraentes para aplicações como máquinas elétricas, por exemplo, além de ter menor custo potencial por kA/m, uma vez que as fitas 1G são feitas com prata [18].

2.1.2 O estado misto

Quando usado em aplicações práticas, os materiais HTS estão no estado misto. Como mencionado brevemente nas seções anteriores, tais materiais apresentam dois campos magnéticos críticos, H_{c1} e H_{c2} . Se há campo magnético, tanto aplicado quanto auto-campo, entre H_{c1} e H_{c2} , fluxo magnético consegue penetrar o material, ao contrário do comportamento geral do estado Meissner. Entretanto, o fluxo entra no material em pequenos pacotes, ou *quanta*, chamados de fluxoides. Eles estão circundados por vórtices de corrente e formam uma rede, chamada rede de Abrikosov em homenagem ao ganhador do prêmio Nobel Alexei Abrikosov [17], ver Figura 2.2. Os elétrons presentes nos núcleos, representados nos picos de fluxo magnético *versus* comprimento no gráfico, são elétrons normais, aqueles que não passam por efeito de resistividade nula. Os outros elétrons são chamados de superelétrons, passam pelo efeito de resistividade nula e são representados pelo gráfico de densidade de superelétrons *versus* comprimento.

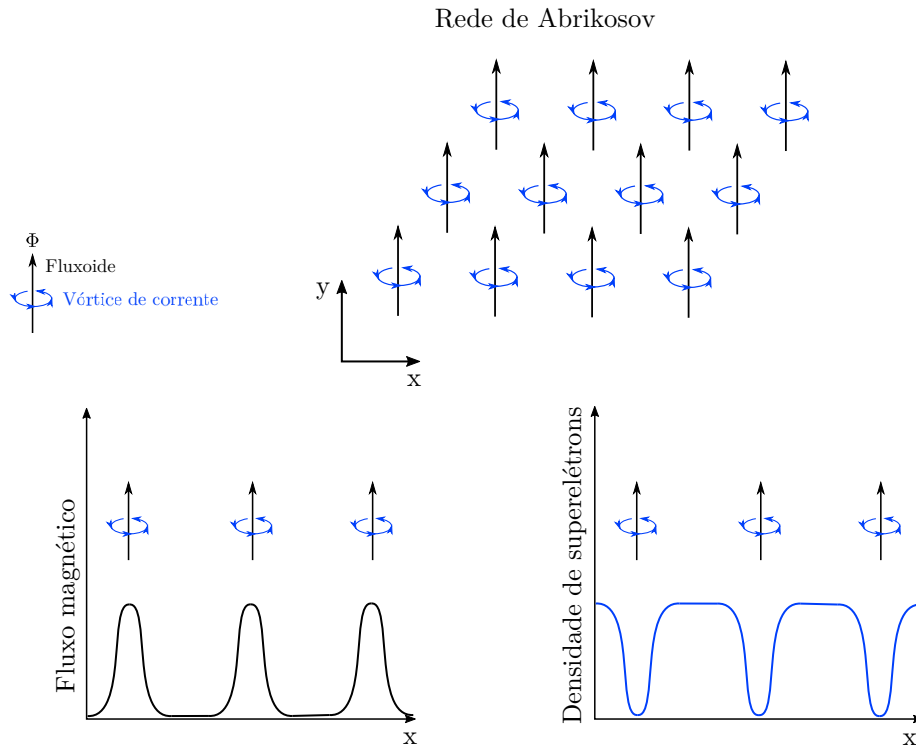


Figura 2.2: Ilustração da rede de Abrikosov e da distribuição de fluxo e densidade de supercorrente ao longo do comprimento de material supercondutor.

Corrente de transporte é a corrente resultante que percorre o material. A interação entre ela e os fluxoides gera uma componente de densidade de força de Lorentz,

ver Figura 2.3,

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (2.1)$$

em que \mathbf{f}_L é a densidade volumétrica de força de Lorentz, \mathbf{J} é a densidade de corrente e \mathbf{B} é a densidade de fluxo magnético. Em um material perfeito, essa força atuaria para mover a rede, criando campo elétrico,

$$\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v}, \quad (2.2)$$

com \mathbf{v} como a velocidade das linhas de fluxo em relação ao material e \mathbf{E} como campo elétrico. Isso levaria ao surgimento de perdas, uma vez que há campo elétrico e densidade de corrente no material, ou seja,

$$p = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \quad (2.3)$$

tal que p é a densidade volumétrica de potência.

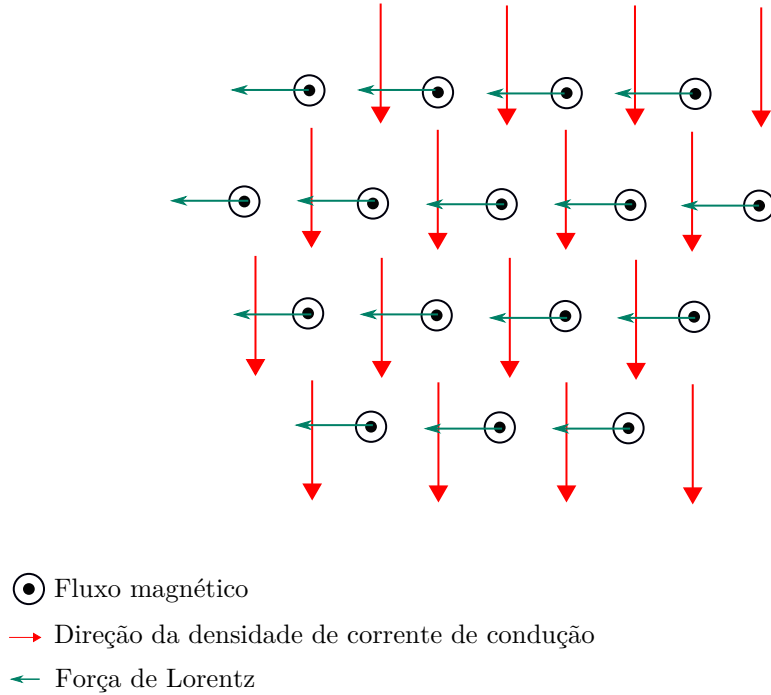


Figura 2.3: Ilustração da força de Lorentz resultante da interação entre fluxo magnético e corrente de condução.

No entanto, o material supercondutor tem defeitos na sua composição cristalográfica. Linhas de fluxo que coincidem com esses defeitos estão sujeitas a uma energia potencial, criada pelos defeitos, que restringem seu movimento, limitando o movimento da rede, que está também restrita pelas forças das interações entre fluxoides. Portanto, os defeitos são chamados centros de *pinning* e a força resultante, força de *pinning*, \mathbf{F}_p . Outra força que age neste sistema é a força de viscosidade, \mathbf{F}_v ,

gerada pelo movimento das linhas de fluxo [17]. A terceira força que age no sistema é a força de Lorentz, \mathbf{F}_L , resultante de

$$\mathbf{F}_L = \int_{V_0} \mathbf{f}_L dv, \quad (2.4)$$

com V_0 como o volume e dv como o diferencial de volume. \mathbf{F}_p é influenciada pela quantidade de defeitos e seus tipos, pelo campo magnético e pela temperatura, e \mathbf{F}_v depende do campo magnético, da velocidade das linhas de fluxo e do coeficiente de viscosidade [17].

O comportamento das linhas de fluxo pode ser dividido em três estágios. No primeiro, a força de Lorentz é totalmente bloqueada pelo potencial de *pinning* e a força de viscosidade é nula. Nesse caso, não há perdas geradas pela passagem de corrente de transporte.

No segundo estágio, existe movimento termicamente ativado dos conjuntos de fluxoides, chamado de *flux creep*. A energia necessária para impedir o conjunto de se mover decai, levando ao desprendimento dos fluxoides, ou *depinning*. Outro jeito de atingir esse estágio é aumentar a densidade de corrente a um ponto em que alguns conjuntos ganham energia para se desprender, mas não a rede toda. Se a rede toda está envolvida, o material se encontra no terceiro estágio, chamado *flux flow*. Nele, a rede se move em relação ao material. Já que a velocidade média é não nula, a força de viscosidade está presente. Nesse estágio, as perdas são maiores que as observadas no estágio *flux creep*.

A relação entre campo elétrico e densidade de corrente, $\mathbf{E}(\mathbf{J})$, depende, portanto, do campo magnético, da densidade de corrente, da temperatura, da qualidade do *pinning* e do coeficiente de viscosidade. Na modelagem de equipamentos para aplicações práticas, frequentemente é usada uma lei de potência, ou *power law*, para descrever $\mathbf{E}(\mathbf{J})$,

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

com E_c sendo o campo elétrico base para a definição de J_c , geralmente adotado como 1 uV/cm na literatura, e n sendo o índice de transição da lei de potência. Valores comuns de n para *flux creep* estão entre 20 e 40 e para regime de *flux flow*, entre 3 e 5.

Como mencionado anteriormente, os HTS têm comportamento anisotrópico. Esse efeito é incluído na *power law* no cálculo de $J_c(|\mathbf{B}|, \theta, T)$ e de $n(|\mathbf{B}|, \theta, T)$, em que T é a temperatura e θ é o ângulo de incidência do campo magnético com o plano $\hat{a} - \hat{b}$. Neste trabalho, a temperatura é considerada constante, então apenas o campo magnético é levado em consideração. Diversos modelos matemáticos foram propostos na literatura para representar a anisotropia. O modelo elíptico [19] é o

usado neste trabalho,

$$J_c = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{(kB_{\parallel})^2 + B_{\perp}^2}}{B_0}\right)^b}. \quad (2.6)$$

com J_{c0} , k , b , B_0 sendo parâmetros que podem ser ajustados de acordo com dados experimentais de caracterização das fitas, B_{\parallel} é a densidade de fluxo paralela ao plano e B_{\perp} é a densidade de fluxo normal ao plano.

2.2 Mancais magnéticos supercondutores

Nesta seção, os mancais magnéticos supercondutores são discutidos e sua história e estado-da-arte são apresentados.

2.2.1 Descrição geral

Mancais magnéticos têm sido usados em uma gama de aplicações, como para estabilização de movimentos rotativos e viabilização de levitação magnética [20], em especial para trens. Em relação a essa última aplicação, existem três tecnologias predominantes: levitação eletrodinâmica, levitação eletromagnética e levitação magnética supercondutora [20], foco deste trabalho.

A levitação para essa tecnologia é resultado da interação entre ímãs, em geral ímãs permanentes, e supercondutores. Existem basicamente duas possibilidades em que material pode atingir os estados supercondutores: resfriamento a campo zero, ou *zero field cooling* (ZFC), e resfriamento na presença de campo magnético, ou *field cooling* (FC). No ZFC, a temperatura do material é reduzida a valores menores que T_c sem a presença de campo magnético, o que significa que, ao atingir o estado crítico, não há fluxoides aprisionados no material. Já no FC, o supercondutor é resfriado na presença de fontes de campo magnético e chega ao estado misto com fluxoides aprisionados. A explicação segue partindo do princípio de que o material foi resfriado em FC por simplicidade.

Supondo essa condição, define-se a distância entre supercondutor e ímã em que a condição FC foi atingida como z_0 . Nessa distância, o campo magnético aprisionado no supercondutor interage com o campo magnético do ímã resultando em uma força magnética, que pode ser alta o suficiente para estabelecer equilíbrio com a força peso, Figura 2.4. Estabelece-se a levitação magnética. Perturbações na distância entre supercondutor e ímã geram correntes de blindagem no supercondutor, mudando a força magnética para tentar reestabelecer o equilíbrio [20]. Isso pode acontecer tanto no aumento quanto na redução da distância, como ilustra a Figura 2.4.

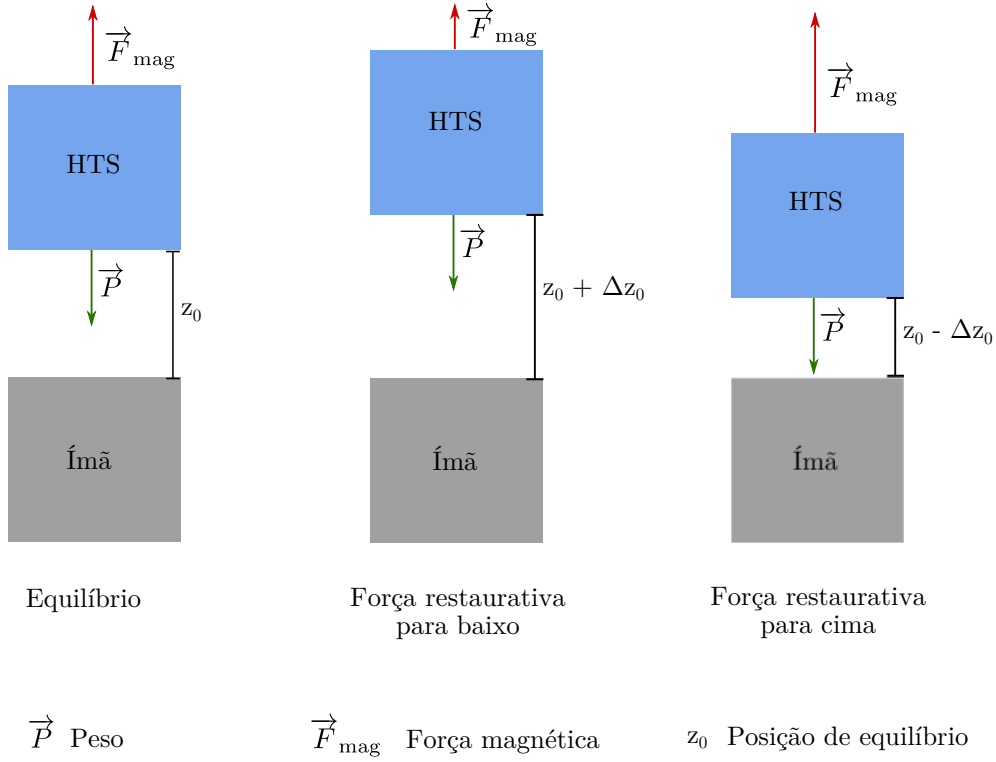


Figura 2.4: Ilustração de um *bulk* levitando acima de uma ímã. A figura mostra situações de equilíbrio e de desequilíbrio, quando forças restaurativas agem.

Um cuidado especial deve ser tomado em relação ao *flux creep* e ao possível aumento de temperatura, já que esses dois efeitos atuam para reduzir a magnitude da força de levitação. Outro parâmetro importante é a força lateral, que atua nos deslocamentos laterais entre supercondutor e ímã. Essa característica influencia como os trens se comportam diante de curvas no seu trajeto. Além disso, como qualquer mancal, o comportamento dinâmico, em especial o amortecimento, é crucial para o *design* dos veículos.

2.2.2 História e estado-da-arte

Nesta seção, os principais projetos de MMS são descritos e seu estado-da-arte é discutido.

MMS com *bulks*

As primeiras discussões sobre o uso de materiais HTS em mancais magnéticos começou no final dos anos 1990, tão logo esses materiais foram sintetizados [21, 22]. A primeira demonstração de um veículo com levitação magnética supercondutora com seres humanos a bordo aconteceu na Southwest Jiatong University (SWJTU), na China, no começo dos anos 2000 [23]. O sistema era composto por *bulks* de YBaCuO na parte móvel e ímãs de NdFeB no trilho, como ilustra a Figura 2.5. Os

bulks eram resfriados com nitrogênio líquido. O veículo tinha 3,5 m de comprimento e 1,2 m de largura e, para carga total de 530 kg, a distância entre ímã e o recipiente contendo nitrogênio líquido, também chamada de *gap*, foi de cerca de 20 mm.

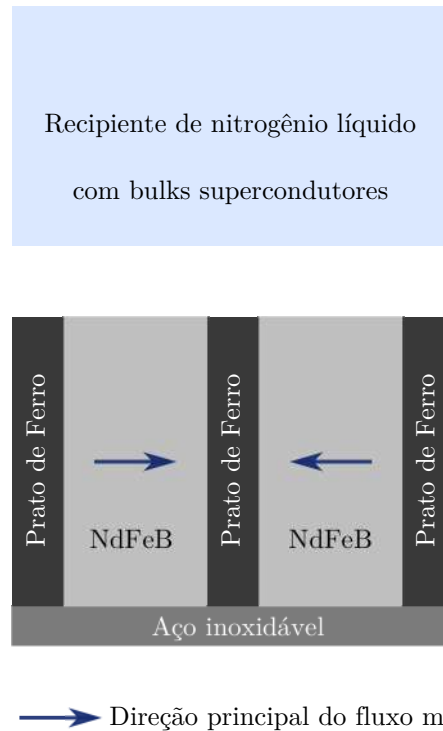


Figura 2.5: Ilustração do recipiente com nitrogênio líquido contendo os *bulks* e do trilho de ímãs permanentes do primeiro veículo de levitação magnética supercondutora com seres humanos a bordo, desenvolvido pela Southwest Jiaotong University, na China.

Desde então, o grupo de pesquisa da SWJTU tem publicado diversos estudos sobre seu sistema de levitação. Muitos deles focam nos estudos de estabilidade e de modelagem dinâmica do veículo, desde modelagem computacional até estudos sobre acoplamento entre a força de levitação e a força lateral do veículo [24, 25]. Também foram publicados estudos sobre a força lateral, como por exemplo seu comportamento em trilhos em curvatura [26].

Em 1998, foi criado na UFRJ o projeto de pesquisa Maglev. Seu objetivo é desenvolver sistemas de levitação magnética com supercondutores. Os primeiros passos do projeto foram focados no desenvolvimento de mancais magnéticos para máquinas de indução [27]. Entre 2002 e 2003, foram publicados os primeiros estudos da relação entre os *gaps* e as curvas de força de levitação e dos possíveis tipos de ímãs permanentes para os trilhos [28]. Em 2004, os princípios de levitação foram aplicados em estudos sobre *flywheel* [29] e o primeiro protótipo de veículo de levitação foi apresentado [30]. Nascia o projeto Maglev Cobra. Entre 2008 e 2012, um módulo de 1,5 m foi desenvolvido e suas características de levitação foram estudadas com o uso de um trilho em escala real de 12 m. Em 2014, foi finalizado o veículo com

quatro módulos. Ele é testado em um trilho em escala real de 200 m que liga o Centro de Tecnologia 1 ao Centro de Tecnologia 2 na UFRJ.

Estudos de exame e otimização de trilhos com ímãs permanentes foram feitos, focando na redução de custos e na maximização da força de levitação [31]. Foi escolhida uma configuração Halbach com ímãs 35 M NdFeB com campo remanente (B_r) of 1.198 T e seis barras ferromagnéticas SAE 1020, mostradas na Figura 2.6.

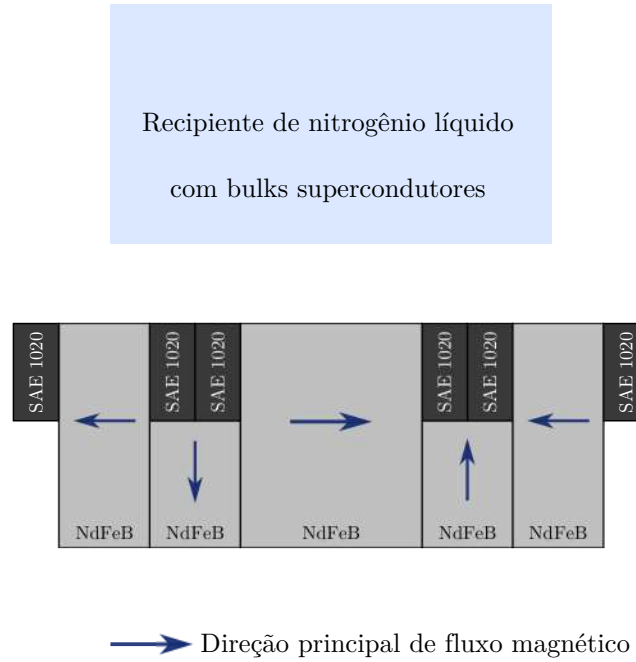


Figura 2.6: Ilustração do recipiente com nitrogênio líquido contendo os *bulks* e do trilho de ímãs permanentes do projeto Maglev Cobra.

Em meados da década de 2000, o instituto IFW-Dresden, a Universidade de Tecnologia de Dresden e a Universidade de Ciências Aplicadas de Dresden, em parceria com empresas privadas e com o sistema de transporte da cidade de Dresden, na Alemanha, deram início ao projeto SupraTrans. O projeto tratava da construção de um veículo com levitação magnética supercondutora para demonstração [32]. O objetivo era investigar todos os aspectos técnicos referentes à levitação magnética supercondutora para transporte de passageiros. Foi construído um trilho de 7 m de comprimento. Os materiais supercondutores escolhidos foram os *bulks*. Com 40 deles, distribuídos em quatro criostatos, o veículo poderia suportar até 800 kg.

Outros trabalhos relacionados ao SupraTrans focaram no estudo e na modelagem de efeitos dinâmicos do mancal [33] e no desenvolvimento de regiões de comutação nos trilhos [34–36].

MMS com fitas 2G

Enquanto isso, em 2011, os primeiros estudos incluindo a aplicação de fitas 2G do LASUP foram publicados [37]. Inicialmente, tanto levitação passiva quanto ativa

foram consideradas. O sistema de levitação ativa continha uma bobina de fita 2G e uma fonte de corrente controlada alimentando a bobina através dos seus terminais. O sistema passivo incluía a mesma bobina curto-circuitada. Nesse caso, a junção dos terminais tinha resistência na ordem de $n\Omega$. Como o sistema passivo demonstrou resultados interessantes, a pesquisa continuou com foco nele.

Na próxima fase, entre 2012 e 2014, explorou-se uma geometria composta por um empilhamento de fitas 2G em formato de bloco, mostrado na Figura 2.7. Seus resultados foram comparados diretamente aos dos *bulks* [11, 38, 39]. Mesmo que o mancal com empilhamento de fitas tenha atingido forças de levitação menores que o mancal com *bulks*, a densidade de força por kg de material supercondutor foi muito maior para o mancal com fitas. Foram investigadas as melhores posições dos empilhamentos em relação ao trilho de ímãs permanentes para força de levitação e força lateral. Foi provado que os empilhamentos têm melhor desempenho se forem colocados nas regiões de maior intensidade da componente de campo magnético normal ao trilho [38] e de menor intensidade da componente paralela [39], ver posição B na Figura 2.7. A posição A é aquela com maior componente paralela e menor componente normal de campo magnético.

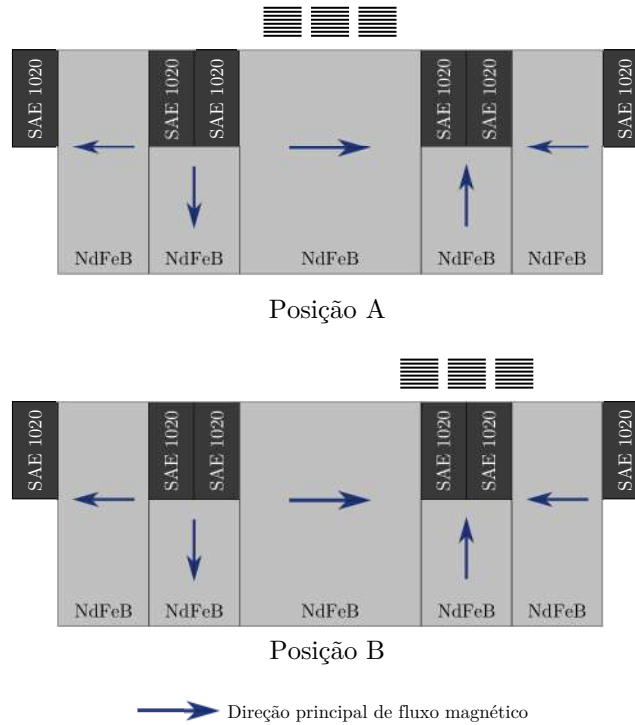


Figura 2.7: Ilustração do empilhamento de fitas e do trilho de ímãs permanentes do projeto Maglev Cobra.

Posicionamentos de empilhamentos de fitas supercondutoras em mancais para levitação também foram estudados por outros grupos de pesquisa [40], incluindo um trilho semelhante ao do MagLev Cobra. Observou-se força de levitação de arranjos de três empilhamentos dispostos de forma longitudinal e transversal em relação ao

trilho. Além dessa diferença, também foram observadas diferenças na orientação das fitas em relação ao trilho, com empilhamentos alternando entre estarem com as fitas na posição normal ou paralela em relação ao trilho. Foi comprovada a hipótese de que quando as fitas estão arranjadas de forma que sua superfície está perpendicular à componente predominante de campo magnético, a força de levitação produzida é maior.

Em 2015, foram publicados os primeiros trabalhos investigando as características eletromagnéticas de laços de fitas 2G sem emenda, ilustrados na Figura 2.8. A grande vantagem dessa configuração em relação às fitas simplesmente empilhadas é o estabelecimento de um caminho determinado para a corrente induzida na fita, aumentando a capacidade de aprisionamento de fluxo do conjunto. O primeiro trabalho focou na comprovação da existência de correntes persistentes no laço diante de variação de campo magnético [41].

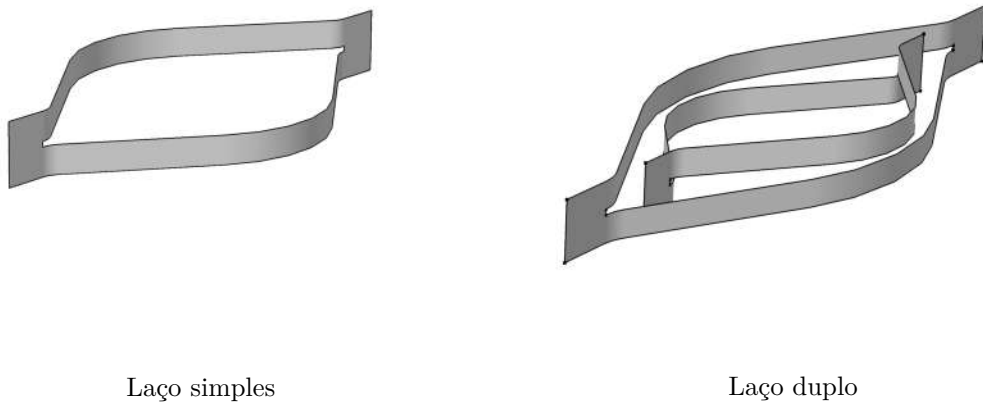
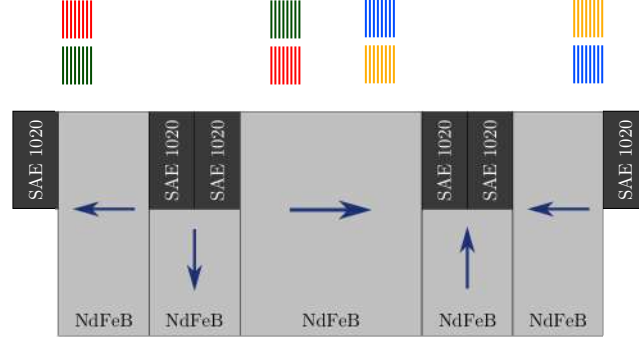


Figura 2.8: Ilustração dos tipos de laços sem emenda estudados no LASUP. O primeiro, à esquerda, é o laço simples e o segundo, à direita, é o laço duplo cruzado.

A pesquisa seguiu para estudos do processo de magnetização desses laços por pulso [42]. O grande interesse no uso dos laços é transformá-los em ímãs *quasi*-permanentes, ou seja, gerar corrente persistente o suficiente para que a operação do equipamento seja confiável. Esse estudo progrediu para a análise do processo de magnetização sob o ponto de vista dos estados pelos quais o material passa para se magnetizar de fato. Foi comprovado que, para a geração de corrente persistente, é necessário que o laço atinja o estado resistivo [43].

Outro ramo da pesquisa seguiu para a análise direta da aplicação de laços sem emenda em mancais. Notou-se que os laços cortados sem emenda são geometricamente assimétricos, o que poderia gerar assimetria na força de levitação e na força

lateral. Para contornar essa dificuldade, foi proposto o laço duplo cruzado [44], também ilustrado na Figura 2.8. Verificou-se que a configuração do mancal com laços duplos cruzados, ver Figura 2.9, apresentava força de levitação suficiente para se tornar viável economicamente.



As cores indicam as continuidades gerais entre laços simples

→ Direção principal de fluxo magnético

Figura 2.9: Ilustração dos tipos de laços duplos cruzados sobre o trilho do MagLev Cobra.

2.3 Máquinas elétricas supercondutoras

Nesta seção, as motivações para a investigação de máquinas com materiais supercondutores são destacadas e é feito um breve histórico do desenvolvimento de máquinas elétricas supercondutoras. Em seguida, apresenta-se o estado da arte do *design* de tais máquinas.

2.3.1 Descrição

A principal motivação para a aplicação de supercondutores em máquinas é a possibilidade de aumento da densidade de potência. Materiais supercondutores, quando operam nos estados Meissner ou misto, apresentam resistividade nula ou muito baixa para densidades de corrente elevadas. Ou seja, os supercondutores têm alta capacidade de carregamento de corrente. Isso permite que a quantidade de material ferromagnético nas máquinas, que têm alta densidade de massa, seja reduzida ou até mesmo eliminada [45], o que torna as máquinas mais leves e potencialmente menores, aumentando a densidade de potência.

A aplicação de supercondutores em máquinas pode ser feita tanto substituindo diretamente as bobinas de materiais convencionais por bobinas supercondutoras, o

que indica magnetização ativa através de alimentação com corrente, ou pode ser feita substituindo ímãs permanentes por *bulks* ou por fitas supercondutoras, o que indica magnetização passiva através de indução de laços de corrente. O primeiro estilo de aplicação se baseia nas baixas perdas pela condutividade elevada e o segundo na capacidade de aprisionamento de campo e de geração de correntes persistentes.

2.3.2 História e estado-da-arte

Os estudos de máquinas supercondutoras podem ser divididos em duas fases. A primeira cobre o período de 1960 até 1990, indo das primeiras propostas, cujo material supercondutor único era LTS, até a primeira síntese de materiais HTS. A segunda fase se inicia na década de 1990, estende-se até os dias atuais e cobre o período do auge dos materiais HTS e do MgB_2 . Os projetos dessa fase podem ser divididos em projetos com fitas 1G, blocos de (RE)BCO, fitas 2G e fios de MgB_2 . O foco deste trabalho está apenas em máquinas rotativas.

Fase LTS

O desenvolvimento de máquinas supercondutoras esteve, desde as primeiras propostas, diretamente associado a interesses militares. Os primeiros estudos, publicados no início da década de 1960 [46, 47], tinham como foco aplicações em aeronaves. Eles se dedicaram a explorar as possibilidades proporcionadas pelo uso de material supercondutor em uma máquina.

A discussão inicial focou nos possíveis tipos ou topologias de máquina mais viáveis do ponto de vista da aplicação dos supercondutores. Os materiais em foco eram o Nb-Zr, Nb_3Sn e depois o NbTi [48], que funcionavam muito bem com corrente contínua mas apresentavam altas perdas em corrente alternada. As topologias em foco eram:

- máquina síncrona com material supercondutor no enrolamento de campo da máquina, ou seja, máquina síncrona parcialmente supercondutora;
- máquina síncrona com material supercondutor nos enrolamentos de campo e de armadura da máquina, ou seja, máquina síncrona totalmente supercondutora.

Em ambas as topologias, o enrolamento de campo é diretamente alimentado com corrente contínua. Diante das limitações de eficiência observadas na máquina totalmente supercondutora, optou-se no período pelo investimento na máquina parcialmente supercondutora [49–51]. Outra topologia que obteve atenção foi a máquina homopolar de corrente contínua com enrolamento de excitação supercondutor [52–54]. Tal máquina era considerada ótima candidata para atuar na propulsão de

navios, pois considerava-se que elas garantiam o conjugado em todas as velocidades, além de terem eficiência adequada para a aplicação [53].

O amadurecimento das pesquisas levou à conclusão de que máquinas supercondutoras com materiais LTS não eram viáveis economicamente, pelo alto preço do sistema de refrigeração necessário para manter os materiais em temperaturas de menos de uma dezena de K, além dos problemas de estabilidade dos LTS, originados principalmente da pequena margem de temperatura que o material tem para operar em estado supercondutor [45]. Inicialmente, a solução para os problemas de estabilidade foi o desenvolvimento dos cabos com micro-filamentos de NbTi encaixados em uma matriz de material condutor, essencialmente cobre, substituindo os cabos de Nb-Zr [54], usados inicialmente. Esse passo foi importante para aumentar a capacidade térmica dos cabos e fornecer um caminho alternativo para correntes no caso de uma transição do supercondutor para o estado normal, cuja resistividade é mais elevada.

Outro ponto de desvantagem das máquinas LTS estava na necessidade de proteção dos enrolamentos de NbTi contra campos magnéticos alternados. Isso era feito com camadas de material condutor em torno do enrolamento de campo da máquina, adicionando complexidade aos sistemas eletromagnético, térmico e mecânico da máquina, já que as placas de material condutor poderiam sofrer forças, produzidas pela interação entre a corrente induzida nelas e o campo magnético, capazes de danificar a máquina.

Fase HTS e MgB_2

A fase HTS começa na década de 1990, logo após a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica. Seu desenvolvimento pode ser dividido em função dos quatro tipos de materiais mais estudados para aplicação em máquinas: as fitas 1G, os blocos, fitas 2G e MgB_2 . É importante destacar que os estudos para aplicações desses materiais se sobrepõem ao longo da história, principalmente das fitas 1G e dos blocos. As fitas 2G e o MgB_2 são as tecnologias mais novas.

Fitas 1G As primeiras propostas de uso de materiais HTS em máquinas foram feitas baseadas na substituição do NbTi por fios [55]. Os fios de BSCCO-2223 foram os escolhidos, tanto em aplicações de máquinas síncronas [56–58] quanto em máquinas homopolares em corrente contínua [59, 60].

A partir dos anos 2000, as propostas de uso de fitas 1G passaram por seu auge e pico de diversificação, abrangendo máquinas síncronas parcialmente supercondutoras [61–65], motor de indução com gaiola supercondutora [66, 67], máquina de indução totalmente supercondutora [67], máquina síncrona totalmente supercondutora [68], dentre outras propostas menos convencionais, como máquinas com ímã

permanente e enrolamento de armadura supercondutor [69], máquina homopolar sem mancais [70] e máquina de Vernier [71].

Blocos e discos A aplicação de blocos e discos supercondutores de materiais do tipo (RE)BCO seguiu um caminho diferente das de BSCCO. As topologias que incluem blocos supercondutores propostas até os dias atuais são as mais diversas, praticamente todas com foco no funcionamento das máquinas como motores, uma vez que os blocos são usados em geral com magnetização induzida e não com aplicação direta de corrente.

Uma das mais discutidas até o tempo presente é a máquina supercondutora de histerese [72–74]. Nelas, o que gera o conjugado da máquina é o efeito histerético da interação entre as correntes induzidas no material supercondutor, histerese essa modelada como a variação da corrente crítica com o campo magnético, e o campo girante do estator. É importante notar que para essas máquinas a influência do campo girante é útil, não cabendo qualquer tipo de proteção do material supercondutor em relação ao campo da armadura.

Outra topologia discutida é a máquina supercondutora de relutância [72, 73, 75, 76]. Essa máquina apresenta um rotor híbrido, composto em parte por material supercondutor e em parte por material ferromagnético.

Uma das topologias mais promissoras é a máquina de fluxo aprisionado [77, 78]. O princípio dessa máquina é baseado no aprisionamento de fluxo magnético no material supercondutor, que se torna um ímã *quasi*-permanente. Essa denominação é dada porque esse material pode se desmagnetizar na presença de campos alternados.

Foram também propostas máquinas de indução [79], máquinas síncronas com blocos de Bi-2223 [80], máquinas síncronas [81, 82], máquinas híbridas com heteroestruturas de material ferromagnético [83] e até mesmo máquinas híbridas com blocos de YBCO e de NbTi [84].

Fitas 2G O uso de fitas 2G começou a ser analisado no início dos anos 2000, mas só surgiram propostas mais concretas depois da metade da década, quando a tecnologia já havia amadurecido. Assim como na passagem da tecnologia LTS para HTS 1G, as topologias de máquina com aplicação de fitas 2G são, em sua maioria, topologias convencionais em que se substituiu o material condutor pela fita 2G ou mesmo a fita 1G pela fita 2G. Exemplos disso são as propostas de máquinas síncronas [81, 85–90] e máquinas de indução [91, 92].

Um das propostas menos convencionais estudadas é a máquina supercondutora com enrolamentos em espiral no rotor [93], Figura 2.10, investigada atualmente na UFF em parceria com a UFRJ e o CEPEL [94, 95]. Esta máquina pode ser interpretada a princípio como uma máquina de indução parcialmente supercondutora sem

Enrolamento em espiral

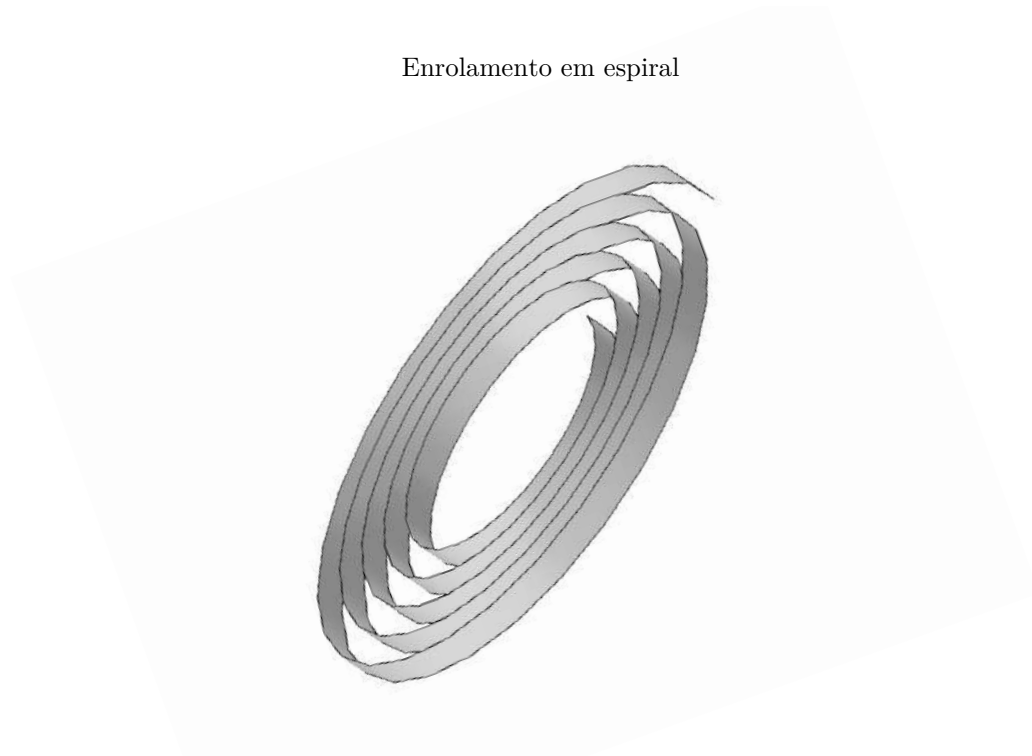


Figura 2.10: Ilustração do enrolamento em espiral usado em proposta de máquina da parceria UFRJ/UFF/CEPEL. Figura fora de escala.

caminhos de corrente definidos, se comparada à máquina de indução mais convencional. O funcionamento dessa máquina é descrito no capítulo 6.

MgB₂ Mais recente dos materiais supercondutores usados em aplicações práticas, o MgB₂ se destaca no número de propostas de uso em máquinas e no curto espaço de tempo entre a descoberta de sua supercondutividade [96] e os primeiros estudos de sua aplicação prática em máquinas [97]. O grande entusiasmo a respeito do material vem principalmente de seu preço, muito mais baixo se comparado aos outros HTS, e do fato de que ele é menos anisotrópico que (RE)BCO, tendo assim comportamento mais previsível [98]. Como desvantagem, há o fato de que sua temperatura crítica é de 39 K, mais baixa que as dos outros HTS, o que significa custos mais altos de refrigeração.

Grande parte das máquinas com MgB₂ analisadas até o presente momento são máquinas totalmente supercondutoras, tanto síncronas [98–100] quanto indução [97]. Em algumas das máquinas, o MgB₂ foi o material escolhido para ser usado na armadura da máquina [99, 100]. Isso ocorre pelas baixas perdas em corrente alternada [100]. Máquinas parcialmente supercondutoras com o supercondutor no enrolamento de campo também foram propostas [101], embora sejam minoria.

2.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram descritas as principais características dos supercondutores e de sua modelagem, o princípio geral e um breve histórico dos equipamentos estudados nesta tese: os mancais magnéticos supercondutores e as máquinas supercondutoras. O próximo capítulo trata da descrição e do histórico da modelagem computacional de equipamentos com supercondutores.

Capítulo 3

Modelagem computacional de equipamentos supercondutores

Neste capítulo, são apresentados os diversos modelos matemáticos que representam os efeitos eletromagnéticos da supercondutividade de tipo II em fitas 2G e sua aplicação em simulações em elementos finitos de dispositivos que usam tais materiais, como cabos, limitadores de corrente, mancais magnéticos e máquinas.

3.1 Modelagem de empilhamentos de fitas 2G

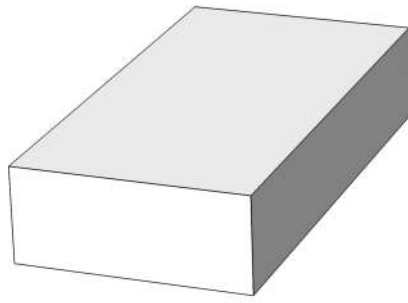
Em contraste com os blocos supercondutores, as fitas supercondutoras têm grandes diferenças de ordem de grandeza em suas dimensões, com espessura na ordem de centena de micrômetros, largura na ordem de dezena de milímetros e comprimento na ordem de metros, como ilustra a Figura 3.1. Isso cria problemas graves em simulações com elementos finitos por gerar matrizes mal condicionadas. Algumas soluções têm sido exploradas na literatura. Neste trabalho, destacam-se duas: o processo de homogeneização e a aproximação fita-lâmina.

3.1.1 Homogeneização

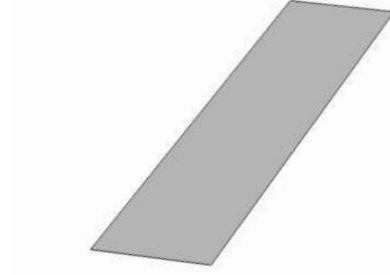
Na homogeneização, os empilhamentos de fitas supercondutoras são substituídos por blocos maciços equivalentes [12, 102]. Há um escalonamento da densidade de corrente crítica,

$$J_{ce} = \gamma J_c, \tag{3.1}$$

tal que J_{ce} é a densidade de corrente crítica de engenharia e γ a razão entre o volume de material supercondutor e o volume do bloco homogeneizado. Nesse método, como a resistividade do supercondutor é muito menor que as resistividades dos



Bloco de YBCO
(Bulk)

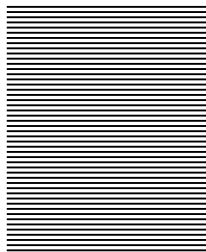


Fita 2G

Figura 3.1: Ilustração comparando blocos e fitas 2G. Figura em escala.

outros materiais que compõem a fita, somente a camada supercondutora é levada em consideração na distribuição de corrente. A Figura 3.2 ilustra o processo de homogeneização.

Processo de homogeneização



Empilhamento de fitas



Bloco homogeneizado

Figura 3.2: Ilustração do processo de homogeneização.

A vantagem dessa aproximação é que, ao reduzir um empilhamento de fitas a um único domínio, economiza-se em tempo de simulação e alocação de memória, já que as matrizes são reduzidas. Duas desvantagens precisam ser consideradas. A primeira é que perdem-se informações de corrente e campo magnético fita a fita. A segunda é que existem condições de contorno para continuidade de corrente que são matematicamente impossíveis de serem representadas por homogeneização. Um exemplo é a continuidade 2D dos laços duplos cruzados. A continuidade de corrente nesse caso é direcional, ou seja, ela ocorre somente na direção perpendicular ao plano do corte, e não nas direções laterais. Esse efeito é discutido com mais detalhes

em [15].

3.1.2 Aproximação fita-lâmina

A aproximação fita-lâmina propõe que se use, no lugar da fita supercondutora, elementos de lâmina de corrente [13], ou seja, segmentos de reta para simulações 2D e superfícies em simulações 3D. A Figura 3.3 ilustra a aproximação.

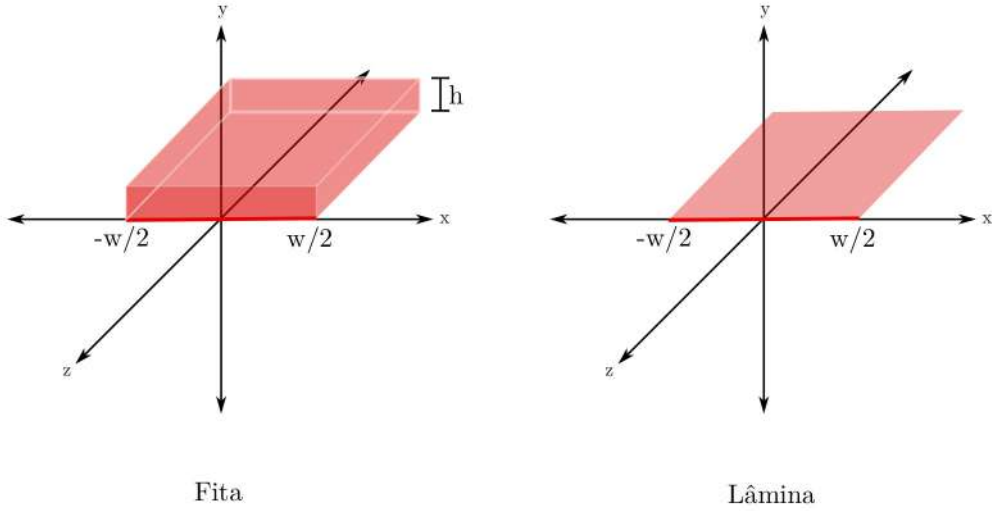


Figura 3.3: Ilustração do processo de aproximação da fita por uma lâmina ou plano.

Ao se usar essa aproximação, ignoram-se efeitos de campo magnético e de corrente na espessura h da fita, além dos efeitos eletromagnéticos nas bordas. Somente a densidade de corrente paralela à lâmina e o campo magnético perpendicular são considerados. As vantagens desse método são que todas as informações eletromagnéticas fita a fita estão disponíveis e é possível representar todo tipo de condições de acoplamento entre fitas ou pedaços da mesma fita. A desvantagem é que, como todas as linhas são simuladas, o número de graus de liberdade tende a aumentar em relação ao método de homogeneização [103].

3.2 Formulações eletromagnéticas

As simulações em elementos finitos são modeladas com formulações, ou seja, com equações diferenciais ou íntegro-diferenciais montadas a partir das equações de

Maxwell. A escolha das formulações depende da natureza do problema que se quer resolver e também do *software* usado para resolvê-lo. A seguir, são apresentadas as descrições e os principais usos na literatura de simulações de supercondutores das formulações A-V (ou A- ϕ)¹, H, T- Ω , método de equações integrais e T-A.

Começa-se pela recordação das equações de Maxwell,

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial_t \mathbf{D}; \quad (3.2) \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}; \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0; \quad (3.4) \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = q; \quad (3.5)$$

e a equação da continuidade, derivada da Lei de Ampère,

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\partial_t \nabla \cdot \mathbf{D}. \quad (3.6)$$

Neste trabalho, usa-se a letra q como notação para densidade de carga livre para evitar confusão com a resistividade (ρ). São também definidas relações entre esses campos vetoriais referentes ao estado da matéria envolvida no sistema físico considerado. Elas são, para sistemas 3D,

$$\mathbf{B} = \mu(x, y, z, t)\mathbf{H}; \quad (3.7)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon(x, y, z, t)\mathbf{E}; \quad (3.8)$$

$$\mathbf{E} = \rho(x, y, z, t)\mathbf{J}, \quad (3.9)$$

tal que μ é a permeabilidade magnética e ϵ é a permissividade elétrica. Pela natureza dos sistemas estudados, tais grandezas são sempre tratadas como escalares neste trabalho.

3.2.1 Formulação A-V

Pela característica de campo solenoidal da densidade de fluxo magnético (ou seja, todas as linhas de campo se fecham), define-se o potencial vetor magnético (\mathbf{A}),

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad \therefore \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (3.10)$$

Define-se também o potencial escalar elétrico (V),

¹Na literatura de Eletromagnetismo, encontra-se o potencial escalar elétrico representado pelas letras V e ϕ . Neste trabalho, opta-se pela letra V, por ter uso mais comum em Engenharia Elétrica.

$$\mathbf{E} + \partial_t \mathbf{A} = -\nabla V. \quad (3.11)$$

Nas aplicações às simulações de dispositivos supercondutores, é usada a aproximação magnetoquasiestática, que despreza a corrente de deslocamento $\partial_t \mathbf{D}$, levando a

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}, \quad (3.12)$$

tal que \mathbf{J} inclua tanto a componente induzida quanto a componente imposta da densidade de corrente,

$$\mathbf{J} = -\sigma \partial_t \mathbf{A} + \begin{cases} J_{ext} & \text{ou,} \\ -\sigma \nabla V, \end{cases} \quad (3.13)$$

abrindo a possibilidade de se impor corrente, com a densidade de corrente externa J_{ext} ou tensão, com $-\nabla V$, nos condutores.

A formulação A-V já foi usada para simular blocos supercondutores [76, 104], filamentos [105], empilhamentos de fitas [106], cabos [107], mancais magnéticos [106] e máquinas elétricas supercondutoras [76, 108], para citar alguns exemplos de sua aplicação. Muitas vezes, a formulação A-V foi usada no método de diferenças finitas [106], pela facilidade de sua implementação. A técnica de homogeneização é usada, já que a aproximação fita-lâmina só é viável com uma formulação auxiliar nessa situação. Em relação a simulações em elementos finitos, existem alguns problemas numéricos que podem surgir devido ao uso direto da condutividade dos materiais e não da resistividade. Isso ocorre pelos valores que a condutividade atinge, já que, para supercondutores, ela tende ao infinito. Essa dificuldade tornou a simulação dinâmica de máquinas elétricas supercondutoras praticamente inviável por muito tempo, já que usar a formulação A-V para simular malhas em movimento é extremamente vantajoso. Recentemente, propostas de solução para esse problema foram publicadas e são discutidas adiante no texto.

3.2.2 Formulação H

A formulação usa a intensidade de campo magnético como variável a ser calculada. Com a aproximação magnetoquasiestática e a relação de permeabilidade, Equação (3.7), chega-se a

$$\nabla \times \rho \nabla \times \mathbf{H} = -\mu \partial_t \mathbf{H}. \quad (3.14)$$

A excitação do sistema pode ser dada com a imposição de um campo magnético

na fronteira ou com a imposição de uma corrente,

$$I = \int_S (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} dS, \quad (3.15)$$

em que S representa a área de um condutor e \mathbf{n} é o vetor normal à superfície, usando multiplicadores de Lagrange. Outra maneira comum de se usar a formulação H é, no caso de aproximações 2D, com a solução de duas equações diferenciais de primeira ordem [109],

$$\partial_y E_z = -\mu \partial_t H_x; \quad (3.16) \quad -\partial_x E_z = -\mu \partial_t H_y; \quad (3.17)$$

em conjunto com a definição de densidade de corrente,

$$\partial_x H_y - \partial_y H_x = J_z. \quad (3.18)$$

A formulação H foi uma das formulações mais usadas em simulações de supercondutores na última década, sendo aplicada em simulações de blocos supercondutores [106, 110], bobinas e empilhamentos de fitas [12, 102, 111–115], mancais magnéticos [106, 110, 116] e máquinas elétricas [117]. Sua vantagem vem da característica de usar como parte da definição do material supercondutor a resistividade, o que elimina os problemas numéricos da formulação A-V. A grande desvantagem da formulação H é a dificuldade de se implementar movimento entre malhas ou distorções de malha no método de elementos finitos, o que torna simulações de mancais e máquinas bem mais trabalhosas. A homogeneização é a aproximação escolhida pela inviabilidade de se usar aproximação fita-lâmina de corrente sem uma formulação auxiliar.

3.2.3 Formulação T- Ω

Além do potencial vetor magnético, outros potenciais podem ser derivados das equações de Maxwell e da equação da continuidade. Em um sistema em que não há acúmulo de carga, ou seja,

$$\partial_t q = 0, \quad (3.19)$$

o vetor densidade de corrente torna-se solenoidal,

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (3.20)$$

o que permite, usando o mesmo raciocínio aplicado ao desenvolvimento do potencial vetor magnético, a definição de outro potencial vetor, chamado potencial vetor

corrente, \mathbf{T} ,

$$\nabla \times \mathbf{T} = \mathbf{J}. \quad (3.21)$$

O potencial vetor corrente pode ser interpretado como uma intensidade de campo magnético generalizada definida para sistemas em que as linhas de corrente sempre se fecham. Como sempre, tal potencial não é único, podendo ser escrito como

$$\nabla \times \mathbf{T} = \nabla \times (\mathbf{T}' - \nabla \cdot \Omega) = \mathbf{J}, \quad (3.22)$$

com Ω definido como potencial escalar magnético. Aplicando a Equação (3.22) na Equação (3.3) em conjunto com a definição de material da Equação (3.9), tem-se

$$\nabla \times \rho \nabla \times (\mathbf{T}' - \nabla \cdot \Omega) = -\partial_t \mathbf{B}. \quad (3.23)$$

A formulação T- Ω tem sido explorada na literatura de simulações de supercondutores, sendo aplicada principalmente em simulações de fitas e filamentos [105, 114, 118]. Sua principal vantagem é associar a vantagem da formulação H de usar a resistividade ao uso de um potencial e não do campo magnético em si. Isso traz flexibilidade às simulações. No entanto, a mesma desvantagem da formulação H aparece: a dificuldade em implementar movimento.

3.2.4 Método de Equações Integrais

O uso do Método de Equações Integrais (MEI) para simulações de supercondutores [13] foi proposto para lidar diretamente com a modelagem de filmes finos, em especial fitas supercondutoras 2G, através da aproximação fita-lâmina. O método parte das Leis de Faraday e Ampère e usa a densidade laminar de corrente como variável, o que torna esse modelo algo próximo de uma formulação baseada em densidade de corrente, como a formulação T.

Define-se a densidade laminar de corrente,

$$K_z = \int_{-h/2}^{h/2} J_z(x, y, t) dy, \quad (3.24)$$

tal que h é a espessura da região supercondutora.

Considerando a lâmina uma soma de fios de largura infinitesimal, ver Figura 3.4, aplica-se a lei de Ampère para calcular o campo de um fio, gerando a expressão final,

$$K_z = \frac{\mu_0 h}{\rho} \left[\int_{-w/2}^x \frac{\partial H_{y0}}{\partial t} dx' + \int_{-w/2}^{w/2} \frac{1}{2\pi} \frac{\partial K_z}{\partial t} \ln |u - x| du \right. \\ \left. - \int_{-w/2}^{w/2} \frac{1}{2\pi} \frac{\partial K_z}{\partial t} \ln |u - w/2| du \right], \quad (3.25)$$

tal que H_{y0} é o campo externo.

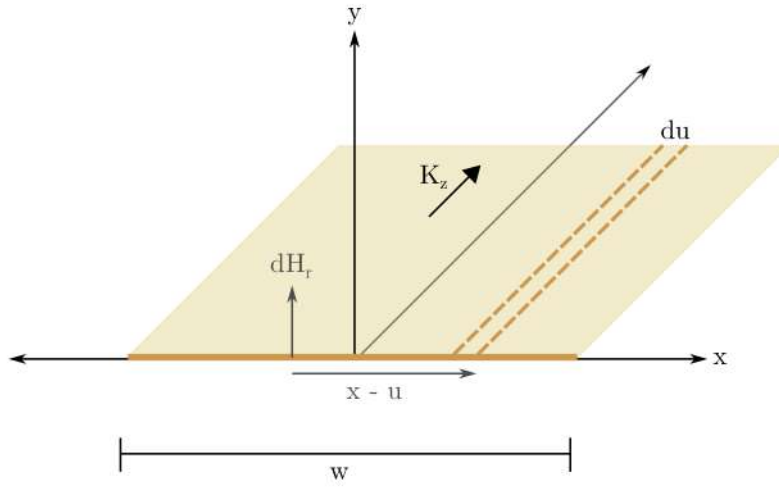


Figura 3.4: Ilustração do desenvolvimento do método de equações integrais para fitas.

A primeira parcela de 3.25 é a contribuição do campo externo, a segunda se refere à reação gerada pelas correntes induzidas e a última é um termo que pode ser ajustado para modelar imposição de correntes de transporte.

O MEI foi expandido para sistemas com geometrias circulares [119] e usado principalmente em simulações de mancais supercondutores com empilhamentos de fitas supercondutoras [15, 106, 120, 121]. A primeira vantagem dessa formulação está no uso da aproximação fita-lâmina, que permite que grandezas eletromagnéticas sejam calculadas fita a fita e também ajuda na modelagem de diferentes continuidades. A segunda vem do uso de equações integrais, que tendem a ser mais estáveis numericamente que as equações diferenciais. As grandes desvantagens da formulação são a dificuldade de implementação, frente a outras formulações, e a necessidade de uso

de outras formulações acopladas, já que essa calcula as grandezas somente na região supercondutora.

3.2.5 Formulação T-A

Aplicada principalmente em simulações de empilhamentos de fitas de segunda geração em duas e três dimensões [14, 122], a formulação T-A usa os vetores \mathbf{T} e \mathbf{A} como variáveis principais. As formulações são acopladas pelas fontes de suas equações diferenciais. O domínio de simulação é modelado em sua totalidade com a formulação A-V e, no lugar no uso da condutividade, usa-se a formulação T para cálculo da densidade de corrente na região supercondutora, como ilustrado na Figura 3.5.

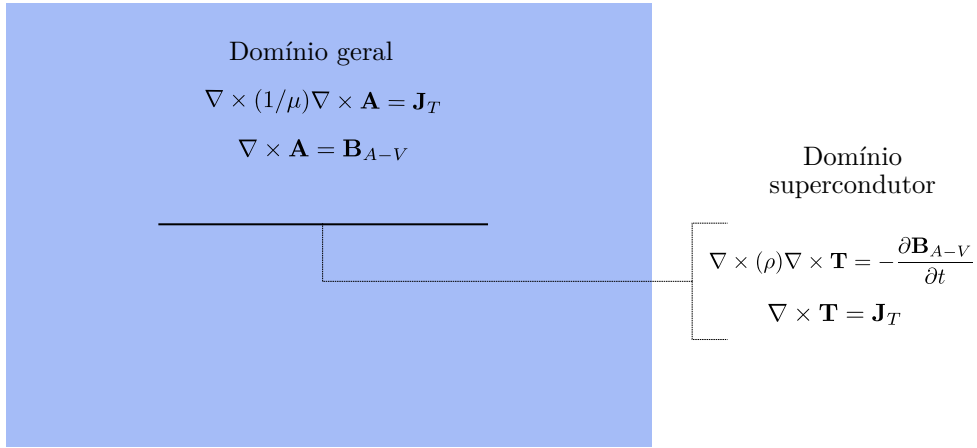


Figura 3.5: Ilustração do processo de acoplamento da formulação T-A.

A formulação A é representada por

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_T \quad (3.26)$$

e

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}_{A-V} \quad (3.27)$$

e a formulação T é modelada por

$$\nabla \times \mathbf{T} = \mathbf{J}_T, \quad (3.28)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{J}) \quad (3.29)$$

e

$$(\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \mathbf{n} + (\partial_t \mathbf{B}_{A-V}) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (3.30)$$

tal que os subscritos T e $A - V$ indicam a origem do cálculo do vetor. Nota-se que são calculadas apenas as componentes normais à superfície supercondutora.

Por usar a formulação A em todo o domínio, esse conjunto de equações também permite a modelagem de movimento de malhas e o uso de modelos não-lineares de permeabilidade magnética. Isso torna essa formulação perfeita para aplicação em máquinas elétricas com empilhamentos de fitas supercondutoras. Recentemente, houve a proposta de expansão da formulação $T-A$ para modelagem 2D total [123], ou seja, usar o potencial vetor em 2D com suas duas componentes ao invés de usar apenas a componente normal à superfície do supercondutor, para assim substituir a aproximação fita-lâmina por homogeneização. Essa abordagem é interessante para sistemas cujos empilhamentos têm um número muito significativo de fitas ou voltas de fita, o que torna a simulação fita-lâmina bastante cara e pode gerar matrizes mal condicionadas. Grande esforço tem sido feito na literatura para expandir e adequar a formulação $T-A$ para simulações de equipamentos, principalmente de máquinas [16, 124, 125].

3.3 Outros aspectos

Nesta seção, outros aspectos importantes da modelagem de equipamentos com materiais supercondutores são abordados: a modelagem de materiais magnéticos, o movimento dentro da simulação e as diferentes condições de fronteira que podem ser exploradas.

3.3.1 Modelos de ímãs permanentes e materiais ferromagnéticos

Os materiais magnéticos podem ser tipicamente divididos em duas categorias: materiais magnéticos 'moles', ou *soft magnetic materials*, SMM, e materiais magnéticos 'duros', ou *hard magnetic materials*, HMM. As curvas B-H caracterizam os materiais quanto ao seu comportamento magnético e possuem alguns pontos importantes. Há os pontos de saturação, H_{sat} , em que o material sai do comportamento histerético e passa a ter permeabilidade próxima a do espaço livre; há a magnetização remanente, B_r , que é a densidade de fluxo no material quando a intensidade de campo magnético é nula; e há a intensidade de campo coercitiva, H_{co} , região em que a densidade de fluxo magnético é nula. A Figura 3.6 ilustra esses pontos para os dois tipos de materiais.

Os SMM são majoritariamente usados como concentradores de fluxo magnético, por terem ciclos de magnetização e desmagnetização simples, ou seja, suas curvas de histerese tendem a cobrir uma área menor da região B-H. Os aços elétricos, parte

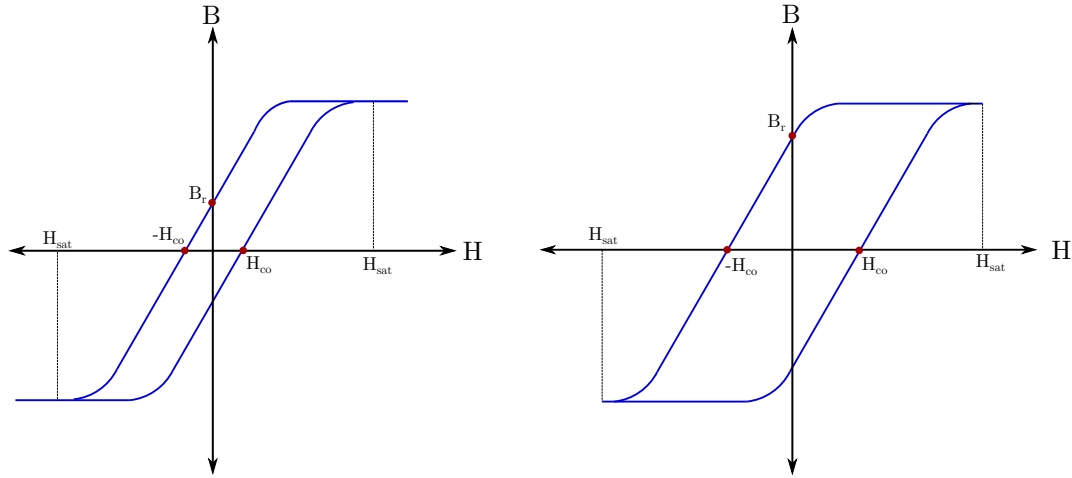


Figura 3.6: Ilustração das curvas B-H de materiais magnéticos.

significativa dessa gama de materiais, são usados em núcleos de transformadores e máquinas elétricas em geral. Esses materiais são usados em aplicações práticas em formato laminado para diminuir as perdas por correntes parasitas. Eles podem ser divididos em aço de baixo teor de carbono, aços-silício de grão não orientado e aços-silício de grão orientado [126]. Neste trabalho, são usados o aço de baixo teor de carbono e o aço-silício de grão não-orientado.

A modelagem matemática desses materiais pode ser feita através do uso direto da curva de magnetização com métodos numéricos para encontrar o ponto de operação na curva, como o método de Newton-Raphson, para os casos em que a área da curva B-H é muito estreita, ou seja, há baixa histerese, caso explorado neste trabalho. Nos casos de histerese significativa, é necessário usar métodos numéricos próprios para modelagem de histerese, como os modelos de Preisach [127] e Jiles-Atherton [128, 129], por exemplo.

Os HMMs são usados como ímãs permanentes em geral e por isso têm uma gama enorme de aplicações. Há muitos materiais diferentes no mercado para esta aplicação, com destaque para o Al-Ni-Co, uma família de materiais composta por ferro, níquel ou cobalto, da parte ferromagnética, e por alumínio e outros elementos; Samário-cobalto (SmCo), uma família de materiais com diferentes proporções desses elementos; as Ferrites, tanto de Bário ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$) quanto de Estrôncio ($SrO \cdot 6Fe_2O_3$); e o Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) [126], ímã usado neste trabalho.

O princípio da magnetização permanente é usado na modelagem desses materiais. Além da curva B-H, usa-se também a curva de linha de carga do circuito. A curva de carga é traçada no segundo quadrante, onde o ímã deve operar. O lugar em que a curva B-H e a linha de carga se encontram é o ponto de operação preferencial do ímã.

Como as curvas de desmagnetização dos ímãs de NdFeB, presentes no mancal estudado nesta tese, estão muitas vezes próximas de comportamentos lineares no segundo quadrante, usam-se aproximações lineares para modelar os ímãs permanentes quando há a suposição de que, durante a operação, o material não se desmagnetizará completamente ou não passará para os outros quadrantes. Há classicamente dois métodos para representação de ímãs permanentes nessa região de operação [130]:

- método do vetor de magnetização: é usada a magnetização do ímã, \mathbf{M} , ou seu \mathbf{B}_r ,

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.31)$$

ou

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mu_r \mathbf{H}) + \mathbf{B}_r \quad (3.32)$$

e

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{H}} = \mu_0 \mu_r = \mu \quad (3.33)$$

- método da lâmina de corrente: mais fácil se aplicado em ímãs de formato retangular. Neste método, criam-se duas lâminas retangulares com densidades laminares de corrente, \mathbf{K} , de tal forma a gerar o campo magnético equivalente do ímã.

3.3.2 Modelagem de movimento

A modelagem de movimento de equipamentos elétricos em elementos finitos tem sido estudada desde os primórdios das propostas de uso do método no *design* e na análise desses equipamentos. No COMSOL Multiphysics, existem diversas maneiras de se modelar movimento entre malhas ou movimento intra-malha. O foco deste texto é a implementação para sistemas elétricos em baixa frequência.

O movimento entre malhas é em geral usado em simulação de máquinas elétricas, tanto rotativas quanto lineares. Neste caso, os domínios de simulação são divididos em macro-domínios, de acordo com as regiões do sistema que se movem ou que ficam estáticas. Por exemplo, em uma máquina rotativa, cria-se um macro-domínio para o rotor e outro para o estator. Então, é criada uma malha para cada uma dessas macro-regiões. Então, através de configurações do programa, é possível fazer com que uma malha gire em relação à outra ou se mova linearmente em relação à outra.

O intra-malha é em geral aplicado quando um domínio ou uma série de domínios se move em relação a outros, mas todos estão na mesma malha. Esse é o caso de sistemas de levitação, por exemplo, como é explicado no próximo capítulo.

3.3.3 Condições de fronteira e condições iniciais

A solução das equações diferenciais parciais exige que sejam definidas condições iniciais e de fronteira para que sejam encontradas as soluções únicas desejadas. Neste trabalho, são usadas condições iniciais nulas para máquinas nas simulações de ensaios com pulsos e de simulações estáticas nas simulações com movimento. Já para os sistemas de levitação, como levam em consideração ímãs permanentes com magnetização prévia, usam-se como condições iniciais as respostas de simulações estáticas dos sistemas.

Condições de fronteira de \mathbf{A}

Este trabalho foca no uso da formulação T-A. Para as equações diferenciais da parte em \mathbf{A} , são usadas condições de Dirichlet nulas, condições de periodicidade e anti-periodicidade e condições de continuidade entre malhas. As condições de Dirichlet nulas são condições de isolamento magnético, ou seja, $\mathbf{A} = 0$ na fronteira.

O desenvolvimento de periodicidade do potencial vetor magnético segue a periodicidade da densidade de fluxo magnético e da densidade de corrente [131]. Se o domínio e os campos são periódicos ou anti-periódicos, divide-se a fronteira em duas partes Γ_a e Γ_b , como mostra a Figura 3.7,

$$\mathbf{B}_{\Gamma_a} = \mathbf{B}_{\Gamma_b} \quad \text{and} \quad \mathbf{J}_{\Gamma_a} = \mathbf{J}_{\Gamma_b} \quad (3.34)$$

para condições periódicas e

$$\mathbf{B}_{\Gamma_a} = -\mathbf{B}_{\Gamma_b} \quad \text{and} \quad \mathbf{J}_{\Gamma_a} = -\mathbf{J}_{\Gamma_b} \quad (3.35)$$

para condições anti-periódicas.

Como analisado em [131], \mathbf{A} e \mathbf{J} são equivalentes em suas componentes vetoriais (para sistemas isotrópicos em condutividade),

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}_{ext} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (3.36)$$

Logo, se \mathbf{J} é periódico em sua distribuição espacial, \mathbf{A} também é. As condições de continuidade entre malhas são baseadas na imposição

$$\mathbf{A}_{\text{fonte}} = \mathbf{A}_{\text{destino}}, \quad (3.37)$$

e as de antiperiodicidade são

$$\mathbf{A}_{\text{fonte}} = -\mathbf{A}_{\text{destino}}. \quad (3.38)$$

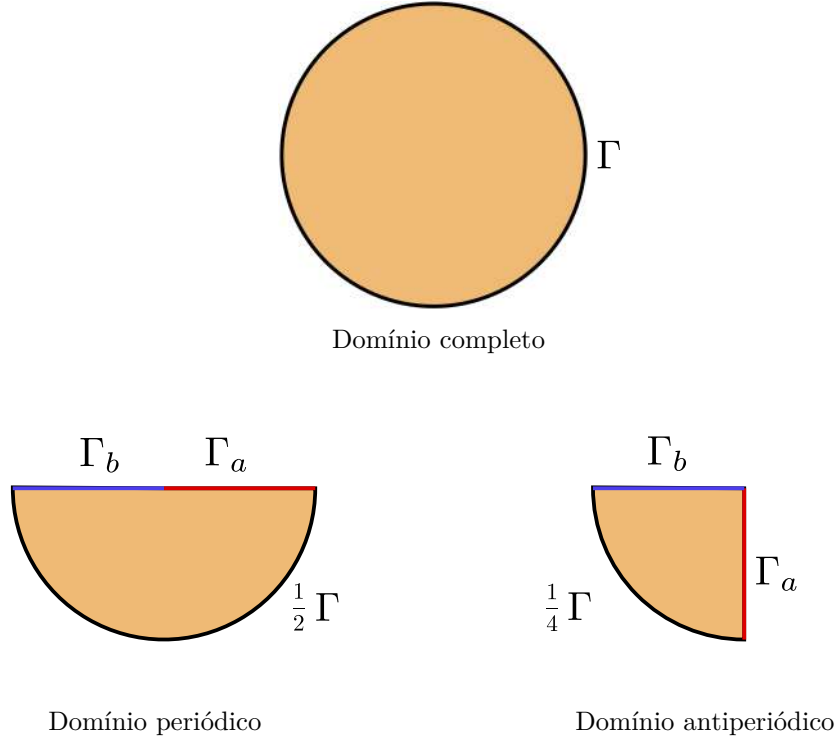


Figura 3.7: Ilustração de um exemplo de periodicidade e de antiperiodicidade com domínio circular.

Condições de fronteira em \mathbf{T}

A condição de fronteira mais comum na parte T da formulação T-A é a condição de Dirichlet. Para desenvolvê-la, parte-se da definição de corrente elétrica,

$$I_{\text{total}} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \nabla \times \mathbf{T} \cdot d\mathbf{S}, \quad (3.39)$$

com \mathbf{S} como a superfície do sistema. Chama-se a fronteira de \mathbf{S} o contorno \mathbf{L} . Então, é possível aplicar o Teorema de Stokes,

$$I_{\text{total}} = \int_S \nabla \times \mathbf{T} \cdot d\mathbf{S} = \oint_L \mathbf{T} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{total}}. \quad (3.40)$$

Se o sistema em questão é uma fita supercondutora, supõe-se que, pela aproximação por filmes finos, apenas a componente de \mathbf{T} normal à fita existe, como ilustra a Figura 3.8. A solução do produto escalar na integral de linha aplicada ao contorno da fita mostra que contribuem apenas os pontos das extremidades. Essa aproximação define a imposição de corrente elétrica como uma diferença de potencial,

$$I_{\text{total}} = (T_1 - T_2)h. \quad (3.41)$$

Até então, pouco se discutiu na literatura sobre uso de diferentes condições de fronteira para T, sua periodicidade e acoplamento entre fitas. Este trabalho inclui

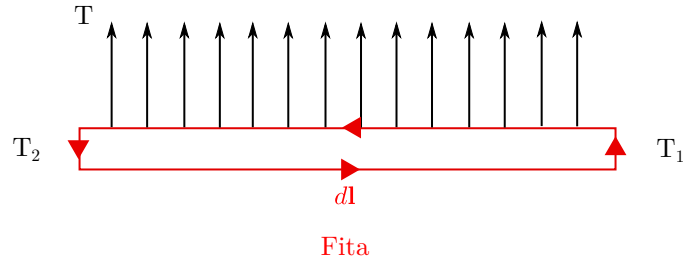


Figura 3.8: Ilustração da definição da condição de Dirichlet da formulação T.

contribuições na área, que são descritas com mais detalhes no próximo capítulo.

3.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados um resumo das maneiras de se representar computacionalmente os empilhamentos de fitas, com homogeneização e aproximação da fita por lâmina de corrente, e as principais formulações de equações diferenciais envolvidas na simulação de equipamentos supercondutores, as formulações A-V, H, T- Ω , o método de equações integrais e a formulação T-A. Também foram apresentadas configurações de modelagem de ímãs permanentes e materiais ferromagnéticos, do movimento e as condições de fronteira necessárias para simulações de equipamentos. No próximo capítulo, são apresentadas as linhas de pesquisa desta tese e a metodologia aplicada.

Capítulo 4

Metodologia e validação

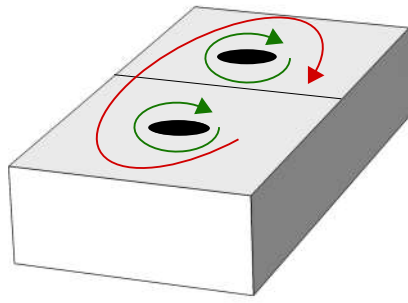
Neste capítulo, é apresentada a metodologia do trabalho. A discussão começa pela reflexão sobre o uso de fitas 2G e laços sem emenda em equipamentos e segue pela explicação sobre a representação de continuidade na formulação T-A e qual é o desafio em sua modelagem. A proposta de modelagem desta tese, focada no uso de circuito para modelagem de continuidade, é então analisada e validada por meio de simulações e comparações com medidas.

4.1 Uso de fitas 2G e laços sem emenda em equipamentos

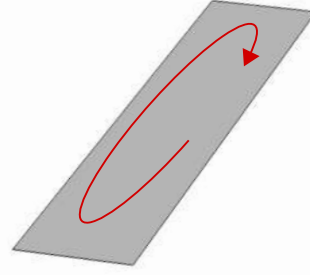
Em tese de doutorado desenvolvida no LASUP [106], foram estudadas duas possibilidades de aplicações de fitas 2G em mancais magnéticos supercondutores, comparando-as aos *bulks*, já bastante usados nesse tipo de equipamento. A primeira possibilidade estudada, como descrita no Capítulo 2, são os empilhamentos de fitas 2G. Nessa configuração, as fitas são dispostas uma acima da outra, verticalmente, formando um bloco. Vários blocos são dispostos lado a lado. Em [110], foi provado que tais blocos têm uma relação entre força máxima de levitação e quantidade de material supercondutor melhor que os *bulks*, mesmo que estes atinjam maior força máxima de levitação para volumes equivalentes.

Foi observado, no entanto, que, ao contrário dos *bulks*, a disposição dos laços em formato de bloco apresenta limitações quanto ao tamanho máximo dos laços (ou caminhos) de corrente possíveis. Os *bulks* permitem surgimento de duas componentes de corrente, uma intra-grão, ou seja, em torno da semente geradora do *bulk*, e outra inter-grãos, percorrendo várias regiões de grãos diferentes. Já as fitas limitam o laço máximo de corrente à sua largura máxima, que comercialmente está frequentemente limitada a no máximo 12 mm. A Figura 4.1 ilustra as duas situações.

Diante dessa limitação, propôs-se o laço de corrente sem emenda, ou *HTS join-*



Bloco de YBCO
(Bulk)



Fita 2G

- Laço de corrente inter-grão ou majoritário
- Laço de corrente intra-grão

Figura 4.1: Ilustração dos laços de corrente em *bulks* e fitas.

tless loop em [41]. Tal laço, por ter o corte interno, delimita melhor o caminho que a corrente induzida percorre, aumentando a área delimitada por esse caminho, aumentando o fluxo total que perpassa por ele, melhorando a indução de corrente. Foi verificado em [41] que o laço de corrente sem emenda tem performance de força de levitação máxima igual ou melhor que o bloco de fitas contendo bem menos material supercondutor.

A pesquisa sobre o uso de laços sem emenda avançou com dois outros trabalhos desenvolvidos no LASUP [42, 43], cujo foco era o estudo da magnetização dos laços. Foi feito o carregamento indutivo dos laços usando um transformador com primário comum, com 100 espiras, e tendo como secundário um único laço sem emenda. O carregamento foi feito através de pulsos de corrente no primário. Há necessidade do surgimento de um estado dissipativo no supercondutor, com correntes próximas à corrente crítica do material, para que corrente persistente seja induzida. Correntes induzidas abaixo disso durante o pulso não resultam em correntes persistentes. Acima de I_c , quanto maior o tempo do pulso ou a intensidade dele, maior a corrente persistente, que será aproximadamente a diferença entre a corrente atingida e a corrente crítica.

Durante os pulsos, é importante que o supercondutor não atinja temperaturas maiores que sua temperatura crítica, para que não saia do estado supercondutor ou não provoque o surgimento de pontos quentes ou *hot spots*, que podem danificar o material. Quanto à eficiência do processo de magnetização, foi observado que o aumento do tempo dos pulsos, do número de pulsos e do intervalo entre os pulsos

diminuía a eficiência do processo de magnetização.

A proposta dos laços sem emenda nasceu ligada à ideia de sua aplicação em mancais magnéticos supercondutores. Como mencionado no Capítulo 2, a assimetria da geometria do laço sem emenda poderia gerar desbalanço nas forças de levitação e lateral. Para contornar esse problema, foi proposto o laço duplo cruzado [44], que consiste em dois laços sem emenda simples, com um laço maior e outro laço menor, encaixados de forma a corrigir a assimetria na região útil do laço, ou seja, os lados de maior comprimento. Desta forma, preenche-se o mesmo volume com mais material supercondutor, aumentando a eficiência do *design*. Os laços estão dispostos de forma que seus centros coincidem com as regiões em que a componente vertical da densidade de fluxo magnético é máxima, como mostra a Figura 4.2.

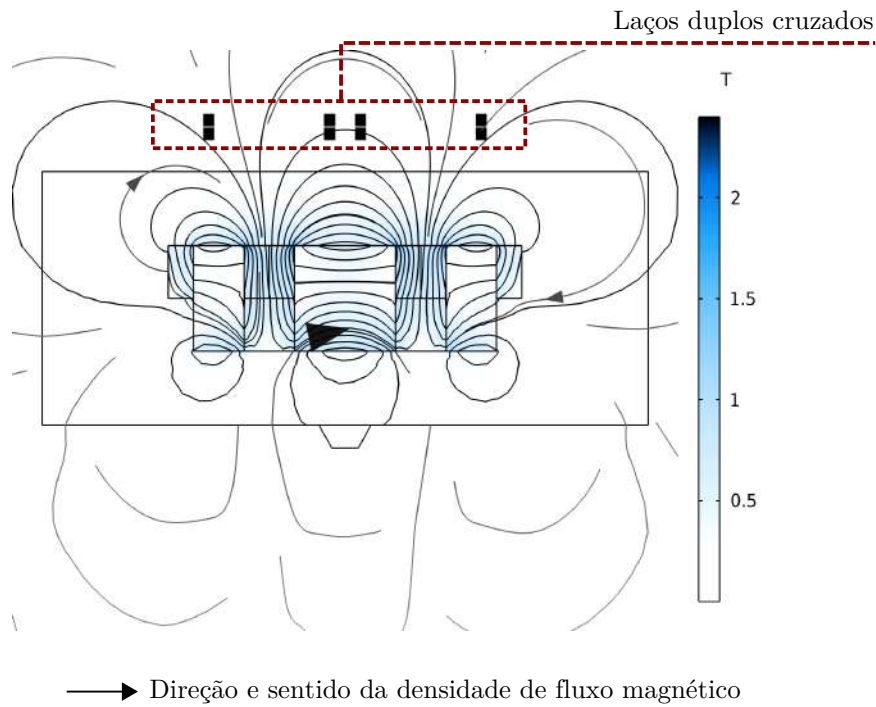


Figura 4.2: Ilustração da resposta de densidade de fluxo magnético gerada pelo trilho sobre os laços duplos cruzados.

Várias medidas de força foram feitas e apresentadas em [15, 44], comprovando que os laços podem ser adequados para aplicação em mancais. Nesses mesmos trabalhos, foi também apresentado o modelo de simulação usado para estudo dos laços. O modelo é baseado em elementos finitos e método de equações integrais em 2D. Esse método foi escolhido especificamente pois, à época, foi o único em que foi possível implementar de forma adequada o acoplamento entre partes de uma mesma fita em 2D, com aproximação fita-lâmina. O método de homogeneização, predominante na época, não reproduz de forma adequada a continuidade dos laços [15].

Outro ponto de modelagem usado à época foi a opção de simular o trilho e as fitas de forma separada e usar a resposta magnética dos trilhos ao longo do tempo

como fonte para o método de equações integrais. Isso foi feito pois usar o método de equações integrais com modelagem dos trilhos já necessitaria de outra formulação auxiliar, uma vez que as equações integrais são aplicadas somente nas fitas. Além disso, usar movimento entre malhas com essa configuração significaria um custo computacional elevado. Por exemplo, as tentativas de simulação desse modelo com cinco fitas demoraram cerca de 10 horas para terminar [121]. Verificou-se que seria necessário desenvolver outro modelo de simulação que pudesse reproduzir os ensaios com todos os equipamentos de forma integrada e eficiente. Esta tese propõe o uso da formulação T-A como opção de modelo de simulação que atende às especificidades dos mancais com fitas.

4.2 Representação de continuidade na formulação T-A

Esta seção discute o problema computacional de representação de continuidade de corrente entre fitas ou pedaços de uma mesma fita na formulação T-A. Primeiro, as vantagens da aplicação da formulação T-A na modelagem desses equipamentos são apresentadas. Então, é discutido o problema da representação de continuidade de corrente.

4.2.1 Vantagens da formulação T-A

Conforme a descrição da seção 3.2.5, a formulação T-A usa dois potenciais vetores, o magnético e o corrente, para simular sistemas com materiais supercondutores. Nesse arranjo, o potencial vetor magnético é calculado em todo o sistema, disponibilizando os dados de densidade de fluxo magnético, enquanto o potencial vetor corrente é calculado somente na região supercondutora, gerando os dados de densidade de corrente no supercondutor. Apesar de ter sido estendida e aplicada a sistemas homogêneos, a principal aplicação dessa formulação é em sistemas com fitas 2G representadas como filmes finos.

Nesse sentido, é uma das modelagens mais eficientes, por permitir o cálculo de campo magnético e densidade de corrente fita a fita, ou volta a volta de fita, nos casos em que há bobinas. Isso permite observar com mais detalhes, em termos de localização e dimensão, o processo de mudança de estado das fitas e o cálculo de perdas em corrente alternada. O uso do cálculo do potencial vetor magnético em todo o sistema facilita implementações como simulações de movimento e de materiais ferromagnéticos, cujos métodos usando A são bem estabelecidos e de amplo uso em simulações de equipamentos de sistemas de potência, como máquinas e transformadores. E, por permitir o uso da aproximação por filme fino, essa formulação

torna possível o estabelecimento de divisores de corrente, neste trabalho chamados de acoplamentos, entre diversas fitas, fita a fita. Em casos como o laço duplo cruzado, em que essa continuidade precisa ser estabelecida entre trechos de uma mesma fita de forma assimétrica, tal característica é interessante.

4.2.2 O problema da continuidade de corrente na formulação T-A

Entretanto, a implementação de divisores de corrente não se provou ser tão simples quanto o é em outras formulações, como a H, por exemplo, em que são usadas restrições integrais, conforme a Equação (3.15), aqui repetida,

$$I = \int_S (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} dS, \quad (3.15)$$

em que S é a área do supercondutor e \mathbf{n} é o vetor normal à superfície. Nota-se que a imposição de corrente ou de divisões de corrente na formulação H não é feita com condições de fronteira, como ocorre com a parte em T da formulação T-A.

Em geral, conforme discutido na seção 3.3.3, a imposição de corrente é feita em T com o estabelecimento de diferença de potencial entre as duas extremidades da fita em questão, ou seja, através de condições de fronteira de Dirichlet. Isso se torna um problema em casos de divisores de corrente em que se conhece a corrente total que circula por um conjunto de fitas, mas não se sabe, *a priori*, qual é a corrente que percorre cada fita a cada instante de tempo. Ou seja, as condições de fronteira não são conhecidas.

Duas propostas foram feitas na literatura recente para superar este problema, e ambas se baseiam no campo elétrico induzido, \mathbf{E}_{ind} ,

$$\mathbf{E}_{\text{ind}} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (4.1)$$

Em [132], os autores provam, através da análise da forma fraca em elementos finitos¹ da formulação T-A, que o potencial vetor magnético afeta divisões de corrente tanto através da densidade de campo magnético, \mathbf{B}_{A-V} , quanto de \mathbf{E}_{ind} . Sua proposta é incluir \mathbf{E}_{ind} através de condições de fronteira de Neumann na forma fraca em elementos finitos,

$$\int_{\Gamma} (\mathbf{E}_{\text{ind}} \times N_i \mathbf{n}) \cdot d\mathbf{A}, \quad (4.2)$$

¹A forma fraca da equação diferencial é usada na implementação do método de elementos finitos. Ela é obtida através de integrações por partes da grandeza de solução mapeada em uma outra função, chamada função de forma ou função teste. A explicação completa está além do escopo desta tese. No entanto, leitores interessados podem encontrar mais informações em livros e em artigos mais antigos, como [133].

com N_i como a função de forma de Lagrange. Com a condição de Neumann definida, pode-se usar a restrição integral da mesma forma como é usada na formulação H.

Já [134], trabalho parte da pesquisa desta tese, propõe o uso de \mathbf{E}_{ind} para incluir o acoplamento indutivo nos cálculos de campo elétrico ao observar que a formulação T-A clássica só leva o campo elétrico próprio da dinâmica de resistividade nos seus cálculos, sem incluir o componente indutivo. A proposta aqui é usar circuitos elétricos para calcular as correntes de cada fita ou trecho de fita e, então, aplicar condições de fronteira de Dirichlet apropriadas. Com essa abordagem, o estudo em elementos finitos é acoplado a um simulador de circuitos. Foram estudados casos com imposição de corrente em bobinas acopladas nas extremidades.

Proposta semelhante foi feita em [135], que usou cálculo da resistência equivalente da fita e das indutâncias próprias e mútuas. Essas informações foram incluídas no circuito elétrico e aplicadas para calcular distribuição de corrente em cabos supercondutores. Ao invés de usar essa metodologia, Santos et al [134] usou o potencial escalar elétrico médio da fita, calculado a partir da soma do campo elétrico da resistividade do supercondutor, \mathbf{E} , a \mathbf{E}_{ind} , no circuito elétrico,

$$v = \text{média}(\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{ind}}) = \text{média}(\rho \mathbf{J} + \partial_t \mathbf{A}). \quad (4.3)$$

Desse modo, não é necessário calcular indutâncias próprias e mútuas, uma vez que \mathbf{E}_{ind} já inclui ambas as contribuições, como se prova em seguida.

Parte-se da definição de indutância em relação ao potencial escalar elétrico induzido, v_{ind} ,

$$v_{\text{ind}} = L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \quad (4.4)$$

com L como a indutância própria, M como indutância mútua, i_1 como a corrente elétrica do circuito e i_2 como a corrente do outro circuito acoplado magneticamente. Para casos com materiais lineares ou linearizados e cuja indutância não varia com o tempo e com a corrente, tem-se que

$$v_{\text{ind}} = L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \rightarrow v_{\text{ind}} = \frac{d(Li_1 + Mi_2)}{dt} \quad (4.5)$$

$$v_{\text{ind}} = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4.6)$$

com Φ como o fluxo magnético. Φ é definido como

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \quad (4.7)$$

em que \mathbf{S} é uma superfície aberta. Chama-se o caminho que a delimita \mathbf{C} . Usando a definição do potencial vetor magnético, tem-se

$$v_{\text{ind}} = \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \frac{d}{dt} \int_S \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S}. \quad (4.8)$$

Com o Teorema de Stokes, a expressão se torna

$$v_{\text{ind}} = \frac{d}{dt} \int_S \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \frac{d}{dt} \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}. \quad (4.9)$$

Relacionando v_{ind} a \mathbf{E}_{ind} ,

$$v_{\text{ind}} = \oint_C \mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot d\mathbf{l} = \frac{d}{dt} \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (4.10)$$

Considerando um sistema de coordenadas em que o sistema está estático, as ordens das operações podem ser alternadas,

$$\oint_C \mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot d\mathbf{l} = \oint_C \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \cdot d\mathbf{l} \quad (4.11)$$

Portanto,

$$\mathbf{E}_{\text{ind}} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (4.12)$$

O equacionamento foi feito com a convenção de circuitos. Com a convenção de Eletromagnetismo²,

$$v_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (4.13)$$

logo, ao final, tem-se

$$\mathbf{E}_{\text{ind}} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (4.14)$$

Portanto, o método usado em [134], se comparado ao de [135], é mais geral e mais adequado para sistemas com um número elevado de fitas ou sistemas assimétricos, em que calcular cada indutância própria e as indutâncias mútuas aumenta a complexidade da modelagem. A comparação entre os métodos de inclusão da condição de fronteira de Neumann, a partir deste ponto chamada T-A-Neumann, e o método com o uso de circuitos para cálculos de divisão de corrente, chamado T-A-circuito, é parte dos resultados e conclusões desta tese e será abordada ao longo do texto. A seguir, o método T-A-circuito é apresentado de forma mais detalhada e a validação do método é feita.

²O sinal sinaliza apenas a diferença nos sinais de corrente e tensão que definem potência positiva, se é a potência tipo fonte ou a potência tipo carga.

4.3 Proposta de uso de circuitos para representação de continuidade

Nesta seção, a proposta de uso de circuitos elétricos como meio de representação de acoplamentos, sobretudo os acoplamentos do tipo continuidade, é discutida e validada através de simulações, comparando sua resposta com a da formulação A-V comum e da formulação T-A-Neumann.

4.3.1 Representação das fitas e laços como elementos de circuito

O método T-A-circuito adiciona um passo a mais no cálculo da formulação T-A. Reproduzindo aqui as Equações do passo-a-passo da formulação T-A, inicia-se a descrição com o cálculo do campo magnético com o potencial vetor magnético,

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_T \quad (3.26)$$

com \mathbf{J}_T calculada pela formulação T. Usa-se a densidade laminar de corrente, \mathbf{K}_T , com a aproximação por filme fino. O cálculo da densidade de fluxo é dado por

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}_{A-V}. \quad (3.27)$$

A formulação T é modelada por

$$\nabla \times \mathbf{T} = \mathbf{J}_T, \quad (3.28)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{J}), \quad (3.29)$$

$$(\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \mathbf{n} + (\partial_t \mathbf{B}_{A-V}) \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (3.30)$$

$$\text{Condições de Dirichlet: } T_{\text{esquerda}} = -\frac{I_{\text{circuito}}}{d}, \quad T_{\text{direita}} = 0, \quad (4.15)$$

com \mathbf{B}_{A-V} calculado pela formulação A, d a espessura da fita e I_{circuito} determinado pelo circuito elétrico, cujo equacionamento deve incluir

$$v = \frac{\int (\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) L d\mathbf{l}}{\int 1 d\mathbf{l}}, \quad (4.16)$$

com L como o comprimento da fita e $d\mathbf{l}$ seu diferencial de largura. Escolhe-se a média da tensão como método de acoplamento por se observar, em sistemas em

que necessita-se calcular uma grandeza para representar a fita, por exemplo casos de busca de corrente crítica por métodos de simulação [136], que médias tendem a melhores resultados do que os valores máximos. Essa aproximação está de acordo com aquela feita para sistemas com condutores em baixa frequência, sendo o método usado pelo COMSOL em sua física *Magnetic fields*, específica para sistemas eletromagnéticos em baixa frequência. A Tabela 4.1 resume as formulações, suas fontes e sua função na simulação.

Tabela 4.1: Formulações usadas na modelagem T-A-circuito para acoplamentos em 2D.

Formulação	Fontes	Função
T	De A: $-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ Do circuito: $T_{\text{fronteira}} = \frac{I}{d}$	Cálculo da distribuição de \mathbf{J} nas fitas
Circuito	De A: $V_A = \int_1 \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} d\mathbf{l}$ De T: $V_T = -\int_{\text{fita}} \mathbf{E} d\mathbf{l}$	Cálculo das correntes totais em cada fita
A	De T: $\mathbf{K} = \mathbf{J}d$	Cálculo do campo magnético das fitas e de todas as grandezas do restante do sistema

Os sistemas estudados nesta tese são sistemas em que o material supercondutor não é submetido a fontes diretamente, ou seja, sua corrente e sua tensão são induzidas por fontes externas. Neste caso, de acordo com a Lei de Kirchhoff dos nós e das malhas,

$$\sum_{j=1}^N I_j = 0, \quad (4.17)$$

$$\sum_{j=1}^N v_j = 0, \quad (4.18)$$

tal que I_j e v_j são as correntes e tensões do circuito.

Essas restrições levam à implementação ilustrada na Figura 4.3 para um par de trechos de fita. Os potenciais têm sinais contrários, mas a mesma magnitude, enquanto as tensões totais se anulam. As parcelas referentes a \mathbf{E}_{ind} agem como fontes e cargas e as parcelas referentes a \mathbf{E} agem como cargas.

4.3.2 Validação da proposta com simulações

Um modelo de simulação simples foi usado como base para a validação dos métodos T-A-circuito e T-A-Neumann para sistemas com correntes induzidas. Esse sistema é composto por um quadrado de ar de 500 mm de lado; em torno do centro do quadro, há duas bobinas com uma volta. A primeira (B1), de cobre, tem fios

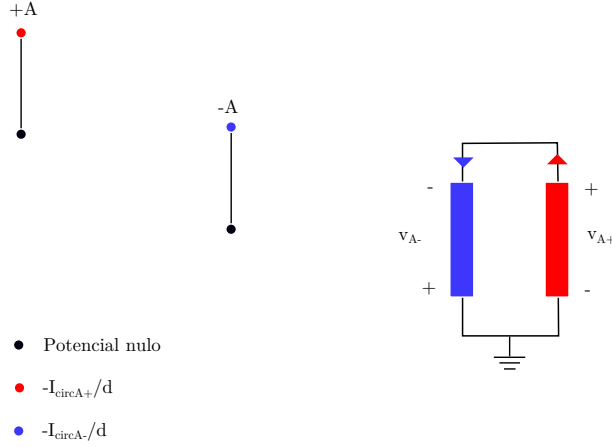


Figura 4.3: Ilustração do acoplamento de fitas com circuito. Ilustração fora de escala.

com raio 2 mm e espaçados 20 mm um do outro, é acoplada a uma fonte de corrente de 40 A pico, senoidal com frequência 60 Hz. O sentido da corrente é tal que ela entra no fio da esquerda e sai pelo fio da direita. A segunda (B2) é composta por um material condutor com $\sigma = 6 \times 10^7$ S/m e é modelada como um filme fino de 12 mm de altura, com seu ponto mais baixo a 10 mm dos centros dos fios. Há dois segmentos de reta, de mesmo espaçamento da bobina anterior. B2 é configurada para que sua densidade de corrente seja calculada a partir da densidade de corrente laminar com uma altura de $1 \mu\text{m}$ e é totalmente curto-circuitada. A Figura 4.4 ilustra o sistema.

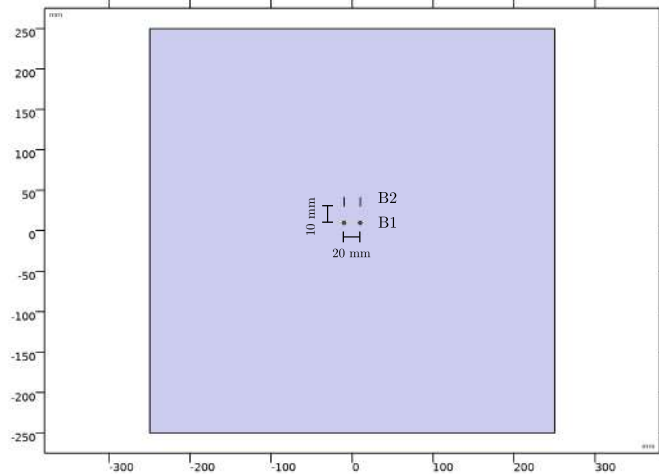


Figura 4.4: Domínios de simulação do sistema simples usado na validação dos métodos T-A-circuito e T-A-Neumann em comparação com a formulação A-V. Há duas bobinas, B1, formada de fios de cobre; e B2, formada de filmes finos de alta condutividade.

Espera-se comparar as correntes induzidas e as densidades laminares de corrente de B2 calculadas nos três métodos citados. Escolheu-se a formulação A-V como base de comparação por ser uma formulação bem estabelecida na literatura de simula-

ção de equipamentos em baixa frequência e por ser possível montar a modelagem, incluindo a configuração dos filmes finos, usando a física *Magnetic Fields* (MF) do simulador COMSOL Multiphysics.

A configuração da bobina B1 é a mesma em todas as formulações, mudando apenas a configuração de B2. Na formulação A-V, a bobina B2 é configurada com o modo *Coil* para fronteiras com tensão total $V = 0$ V. Para ambas as formulações T-A, a densidade de corrente nas fitas é calculada pela equação diferencial da formulação T. No modelo T-A-circuito, há um circuito elétrico montado de forma que a tensão da parte esquerda, ou trecho esquerdo de B2, somada à tensão da parte direita levam à tensão zero, da mesma forma como ilustrado na Figura 4.3. Esse circuito alimenta as condições de Dirichlet de T, também de acordo com a Figura 4.3.

Já no modelo T-A-Neumann, a configuração do sistema totalmente curto-circuitado inclui o estabelecimento de uma origem de potencial vetor corrente zero em uma das extremidades de cada fita, das condições de Neumann que, para sistemas 2D com aproximações para filmes finos, são

$$-\text{test}(T)E_{t\text{ind}z}, \quad (4.19)$$

aplicado aqui para os mesmos pontos em que $T = 0$, e

$$+\text{test}(T)E_{t\text{ind}z} \quad (4.20)$$

aplicado nos pontos em que T é desconhecido, com $E_{t\text{ind}z}$ como a projeção tangencial da componente z do campo elétrico induzido. A função test acessa a função de forma da variável. Essas condições são adicionadas na forma fraca do equacionamento. Para completar, é necessário adicionar uma restrição integral tal que a soma das correntes das partes esquerda e direita de B2 somem zero.

A Figura 4.5 mostra a corrente da bobina B1 como a corrente da fonte e a corrente na bobina B2 nas três formulações estudadas, A-V, T-A-circuito e T-A-Neumann. As correntes se sobrepõem totalmente, o que valida os dois métodos de T-A para o cálculo total de corrente.

Para validação total, no entanto, é necessário observar o que ocorre ponto a ponto na densidade de corrente ou na densidade laminar de corrente. Esse resultado está resumido na Figura 4.6, que mostra a distribuição de densidade laminar de corrente ao longo das duas partes de B2 no mesmo instante de tempo. Comparando a formulação A-V a ambas as simulações em T-A, o que se nota é que a distribuição de densidade laminar de corrente em A-V é totalmente contínua, enquanto as respostas em T-A têm formato discretizado.

A equação diferencial em A-V é resolvida com funções de forma de ordem qua-

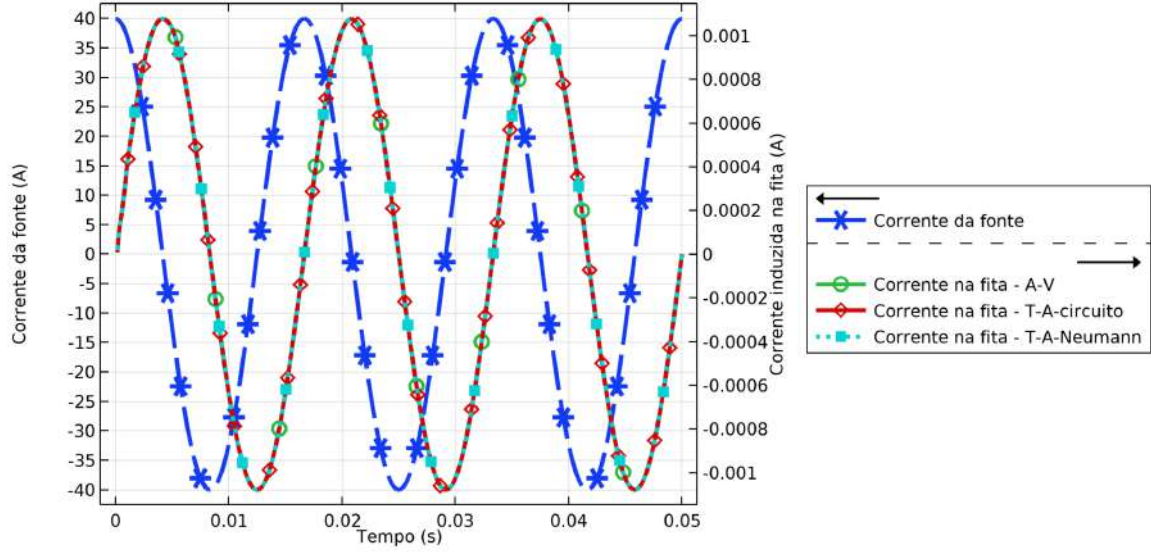


Figura 4.5: Validação dos métodos T-A circuito e T-A-Neumann em comparação das correntes induzidas com a formulação A-V.

drática. A densidade laminar de corrente é formalmente uma condição de fronteira do campo magnético, podendo ser calculada com a diferença entre campos magnéticos de um lado e do outro do filme fino, $\mathbf{K} = \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2)$. Se \mathbf{A} é quadrático, \mathbf{H} , como resultado de $\nabla \times \mathbf{A} = \mu \mathbf{H}$, é linear. Outra opção de cálculo é usar um equivalente a partir da densidade de corrente, $\mathbf{K} = -\sigma \partial_t \mathbf{A} d$, com d sendo a altura do filme fino. Neste caso, como resultado de uma derivada no tempo, \mathbf{K} é quadrático.

Já a formulação T-A, embora \mathbf{A} seja quadrático, \mathbf{T} é calculado com funções de forma lineares. Como $\nabla \times \mathbf{T} = \mathbf{J}$, a derivação no espaço da função de forma linear leva a densidade de corrente constante em cada elemento, ou seja, à interpolação dentada. Nota-se, portanto, que as possibilidades de cálculo para \mathbf{K} na formulação A-V (forma quadrática e forma linear) geram interpolações mais suaves que a interpolação disponível na T-A.

Apesar dessa diferença em ordens de interpolação, as distribuições de densidade laminar de corrente nos filmes finos são totalmente compatíveis nas três formulações estudadas, validando de forma completa os dois métodos de uso da formulação T-A para acoplamentos. Os dois métodos, T-A-circuito e T-A-Neumann são compatíveis.

4.4 Validação da metodologia em simulações de mancais magnéticos com laços sem emenda

Nesta seção, segue-se com a validação do método T-A-circuito comparando-o a dados medidos. O sistema escolhido é o principal sistema em que laços de fitas 2G

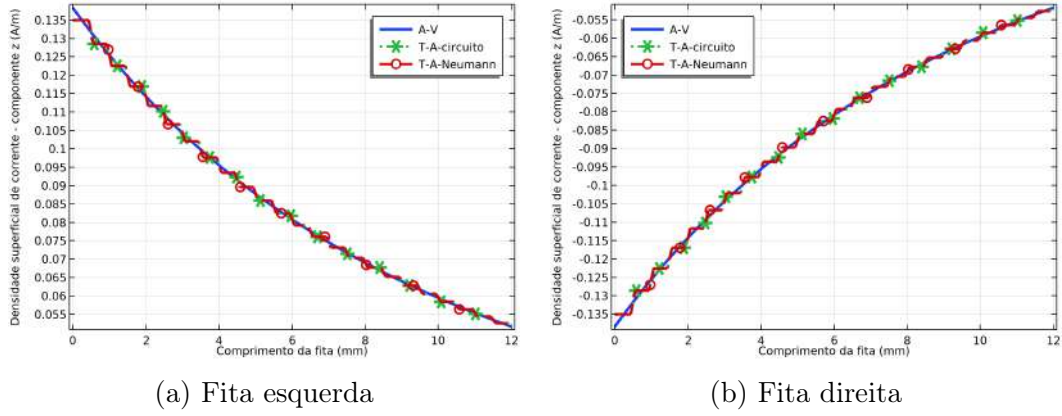


Figura 4.6: Validação dos métodos T-A circuito e T-A-Neumann em comparação da densidade laminar de corrente nas duas partes da bobina B2 com a formulação A-V. Instante de tempo referente aos dados: 0,02 s.

sem emenda são aplicados até o presente momento na literatura: mancal magnético supercondutor com laços duplos cruzados. A medição usada como parâmetro de comparação foi feita em trabalhos anteriores no LASUP [15, 121] e não foi parte desta tese, que foca somente na modelagem computacional do sistema usando a formulação T-A. A contribuição desta tese para a modelagem de mancais magnéticos supercondutores com laços duplos cruzados é oferecer modelos de simulação mais gerais que o anterior, o Método de Equações Integrais, simulando trilho e laços em conjunto, com relação B-H não-linear dos materiais ferromagnéticos e movimento de malha.

4.4.1 Descrição geral da modelagem computacional

O domínio de simulação é composto de duas partes. Na parte 1, há um domínio de ar quadrado de 500 mm de lado e os segmentos de reta que formam dois laços duplos cruzados (LDC), dispostos lado a lado. Cada LDC é composto de 25 laços maiores e 25 laços menores, totalizando 200 segmentos de reta no total. A parte 2 é composta pelo trilho, formado por cinco ímãs permanentes N38 e seis peças de aço carbono 1020, e por um domínio de ar no entorno do trilho. As duas partes estão ligadas por uma fronteira retangular. A Figura 4.7 mostra o sistema com as dimensões e distâncias entre os domínios, as mesmas simuladas com MEI em [15]. A distância entre os segmentos de reta que representam as partes das fitas é de 0,2 mm e a distância entre os conjuntos superior e inferior de segmentos de reta é 0,5 mm.

O equacionamento segue o que foi definido anteriormente para o método T-A-circuito. A formulação A é usada através da física *Magnetic Fields*, do COMSOL, com discretização quadrática, contando com configurações especiais para:

- os ímãs, modelados com o método do vetor de magnetização, com definição

vetores normais às superfícies das fitas, \mathbf{n} . As condições de fronteira para cada segmento de reta são as condições de Dirichlet do tipo

$$T_1 = -I_{circ}/d, \quad T_2 = 0, \quad (4.24)$$

sendo o índice 1 relacionado ao ponto extremo de cima do segmento de reta e o índice 2 o ponto extremo de baixo. A formulação T é calculada com elementos lineares de Lagrange.

A corrente é calculada pelo circuito. Com as informações das formulações T e A, calcula-se a queda de tensão de cada fita através da média,

$$V_i = \left(\frac{\int_w -E_{HTS} - \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial t} dl}{\int_w 1 dl} \right) L, \quad (4.25)$$

e esta queda de tensão é acoplada a cada segmento de reta de acordo com a continuidade entre as fitas, como ilustra a Figura 4.3. O método *ExternalIvsU* da física de circuitos permite incluir cada V_i no circuito como uma fonte controlada. A Tabela 4.2 resume as propriedades dos materiais que foram usadas na simulação, exceto as das fitas supercondutoras, que são apresentadas na próxima seção.

Tabela 4.2: Parâmetros dos ímãs permanentes e dos aços-carbono.

Propriedades	Valores
\mathbf{B}_r - ímãs	1,1 T
μ - ímãs	μ_0
σ - ímãs	$7,14 \times 10^5$ S/m
σ - aços	$8,41 \times 10^6$ S/m
$\mathbf{B}_{\text{saturação}}$ - aços	1 T
σ - ar	0 S/m
μ - ar	μ_0

A parte 1 do domínio de simulação é estática, enquanto a parte 2 é configurada com malha móvel, ou *Moving Mesh*, que permite o movimento do trilho através de deformações da malha. Para evitar grandes deformações e, assim, a redução na qualidade dos resultados da simulação, estabeleceu-se configuração de novas gerações de malhas a cada 5 s. A simulação total dura 60 s. Durante os primeiros 30 s, o trilho é movido com velocidade 1 mm/s para cima, aproximando-se dos laços, chegando a 20 mm de distância dos laços. Nos 30 s seguintes, o trilho retorna à sua posição inicial com a mesma velocidade. A principal grandeza avaliada é a força vertical, chamada de força de levitação, que é a força desenvolvida entre supercondutores e trilho e que permite a levitação do mancal.

4.4.2 Validação da proposta com medidas

O processo de validação do método foi feito para seguir de forma próxima o de [15, 121], em que as medidas foram estudadas. O modelo elíptico de anisotropia da fita é o escolhido, Equação (2.6), aqui reproduzida,

$$J_c = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{(kB_{\parallel})^2 + B_{\perp}^2}}{B_0}\right)^b}. \quad (2.6)$$

Devem-se escolher os parâmetros da equação (2.6) que melhor representam o comportamento médio do conjunto de fitas diante da aproximação 2D e do método de simulação escolhido. Os parâmetros inicialmente usados foram os do conjunto de parâmetros B de [15], que melhor se ajustaram à curva de força naquele trabalho. No entanto, $J_{c0} = 3 \times 10^{10}$ A/m², do conjunto B, provou ser alto demais durante as investigações do sistema simulado com o método T-A-circuito. O melhor ajuste provou ser aquele com $J_{c0} = 2,2 \times 10^{10}$ A/m² e com os outros parâmetros do conjunto B, $n = 20$, $E_c = 1$ μV/cm, $k = 0,6$, $B_c = 0,015$ T e $b = 0,37$. A redução de J_{c0} impacta a força máxima e o tamanho dos laços de histerese da força, o que indica que o modelo apresentado aqui calcula mais força por densidade de corrente que o modelo com o Método de Equações Integrais com as simulações de trilho e laços separadas.

O comprimento médio escolhido dos laços em [15] foi o comprimento retilíneo dos laços menores, 100 mm. Um fator de 1,67 foi usado em [15] para adequar o cálculo de força, levando em consideração as diferenças de tamanho entre os laços menores e maiores e os efeitos de força de cabeça de bobina. Tais efeitos só podem ser observados em simulações em 3D. Neste trabalho, a necessidade de um fator multiplicativo também foi observada, porém, assim como a densidade de corrente crítica para campo zero, J_{c0} , o fator também precisou ser reduzido para que a curva simulada mostrasse força compatível com a medida. O fator usado neste trabalho foi 1,4.

A simulação é composta de duas etapas. Na primeira, é feito um estudo estático somente da formulação A, para que o campo magnético gerado pelos ímãs seja calculado e usado para iniciar a Equação (2.6). Então, é executado o estudo no tempo. A simulação completa durou exatamente 7 horas e 30 minutos, executada em um computador com sistema operacional Ubuntu 20.04, 64 bits, 16 GB de memória RAM, processador Intel i7 de 9^a geração, com o COMSOL 6.0. O resultado de força de levitação está na Figura 4.8.

Nota-se que a simulação consegue reproduzir a força de levitação do mancal com boa concordância com as medidas. A região do gráfico de maior diferença entre medidas e simulação está no afastamento do trilho em relação aos laços, entre

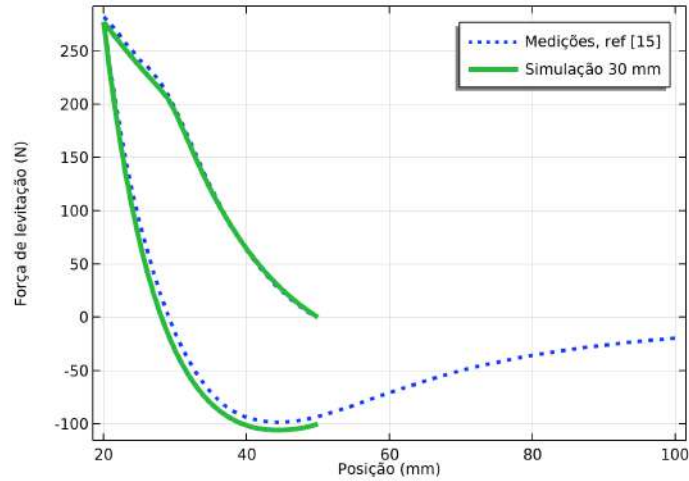


Figura 4.8: Força de levitação do mancal com laços duplos cruzados, comparação entre medidas de [15] e o resultado da formulação T-A-circuito.

30 mm e 50 mm. O mesmo efeito foi observado nas simulações com Método de Equações Integrais em [15]. As simulações calculam força vertical com maior módulo em relação às medições nessas regiões, o que indica que a equação elíptica leva a um subdimensionamento da densidade de corrente crítica nessa região. Mesmo assim, a formulação T-A-circuito teve menor diferença entre simulação e medida se comparada ao MEI [15].

Para finalizar a verificação, é necessário observar se as correntes estão, de fato, acopladas. Faz-se isso analisando as correntes por conjunto de segmentos de reta que compõem os laços, com $\pm A$, $\pm B$, $\pm C$ e $\pm D$, de acordo com a Figura 4.7. Esse resultado, resumido na Figura 4.9, mostra que os conjuntos estão com correntes em direções opostas corretamente. Com isso, o processo de validação proposto está completo.

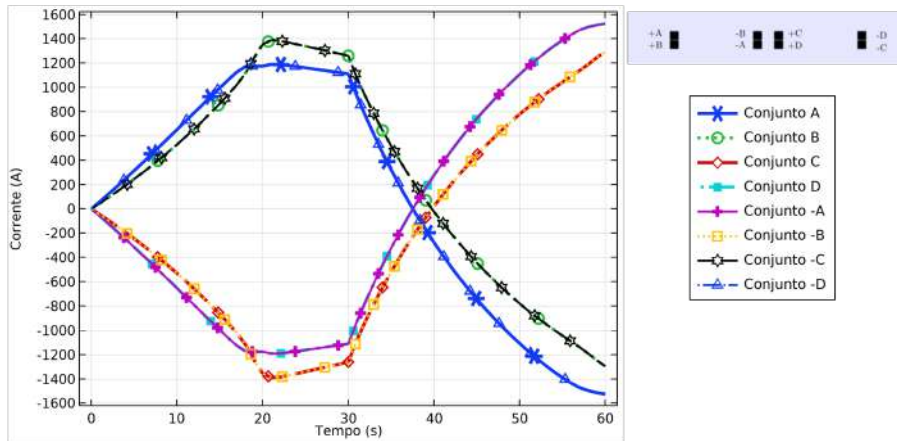


Figura 4.9: Correntes totais em cada região dos laços duplos cruzados durante simulação do ensaio de levitação com deslocamento de ± 30 mm.

4.5 Resumo do capítulo

Este capítulo apresentou a metodologia do trabalho, focada no uso da formulação T-A com acoplamentos modelados com circuitos elétricos e no método de acoplamento com uso de restrições integrais com condições de Neumann, alternativo ao método T-A-circuito. Os dois métodos foram validados através de simulações. O método T-A-circuito foi validado com comparação com medidas experimentais em um mancal magnético supercondutor com laços duplos cruzados. O próximo capítulo trata da expansão do conhecimento sobre o mancal magnético supercondutor com LDC com uso de simulações com o método T-A-circuito.

Capítulo 5

Resultados das simulações de mancais magnéticos

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações dos mancais magnéticos com laços duplos cruzados. Com a validação do método T-A-circuito estabelecida, contribui-se com o conhecimento dos mancais com:

1. a análise do comportamento da força de levitação e das grandezas locais, como densidade de corrente e campo magnético, fita a fita, com simulações do ensaio de força de levitação para várias alturas;
2. a análise do comportamento da força lateral e das grandezas locais fita a fita no ensaio de perturbação lateral.

5.1 Apresentação e análise dos resultados das simulações dos ensaios de força de levitação

Nesta seção, os resultados das simulações dos ensaios de força de levitação com o método T-A-circuito são demonstrados e analisados. A investigação começa da observação feita em [41, 121] sobre a mudança de comportamento da força durante a subida, referente à parte superior da curva da Figura 4.8 entre 50 mm e 20 mm. Entre 50 mm e 30 mm, o comportamento da força é não-linear, enquanto entre 30 mm e 20 mm, o crescimento da força é linear. A hipótese levantada em [121] é a de que há uma mudança na densidade de corrente crítica das fitas com a mudança de campo magnético e com a posição relativa das fitas dentro do LDC. O primeiro efeito é o decaimento da densidade de corrente crítica com o aumento da magnitude da densidade de fluxo magnético. O segundo efeito é a diferença na indução das fitas mais externas no LDC em relação às mais internas.

Em [121], foi sugerida uma análise de sensibilidade da densidade de corrente crítica em relação ao campo magnético. Para contribuir nessa investigação, esta tese analisa o que ocorre fita a fita ao longo do tempo com:

1. as componentes x (horizontal) e y (vertical) da densidade de fluxo magnético fita a fita, para analisar o aumento de cada grandeza ao longo do tempo;
2. a densidade de corrente crítica, para verificar seu decaimento fita a fita ao longo do tempo;
3. a densidade de corrente induzida normalizada por J_c local, para analisar o processo de perdas e os estados de cada fita ao longo do tempo;
4. a densidade de corrente induzida normalizada por J_{c0} , para fazer comparação entre fitas em diferentes posições, já que J_{c0} é uma grandeza uniforme para todas as fitas;

5.1.1 Análise de força de levitação

A Figura 5.1 mostra os resultados de simulações de força de levitação para cinco deslocamentos diferentes: ± 10 mm, ± 15 mm, ± 20 mm, ± 25 mm e ± 30 mm. Nota-se que as curvas referentes a ± 10 mm, ± 15 mm e ± 20 mm não apresentam mudança de comportamento, ou seja, as três curvas têm o formato de histerese não-linear. A partir de ± 25 mm, no entanto, a mudança de comportamento passa a ocorrer, saindo de não-linear para comportamento aproximadamente linear. Fica estabelecido um limite, que no caso deste sistema, encontra-se na distância de 30 mm entre laços e o trilho, ou seja, para deslocamentos maiores que ± 20 mm.

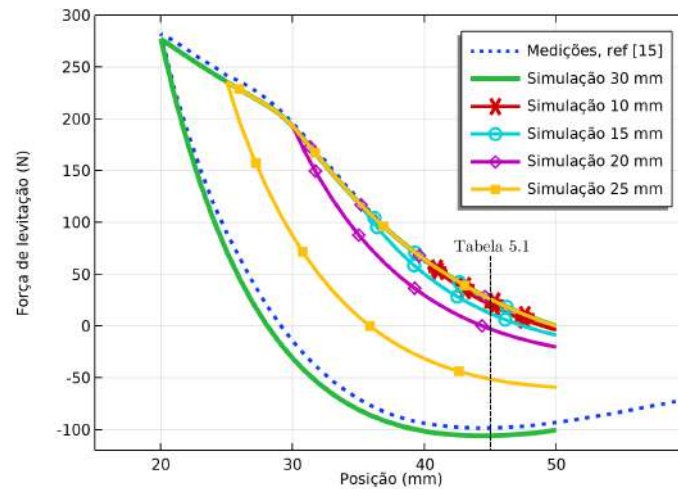


Figura 5.1: Resultados de simulações de força de levitação com vários deslocamentos diferentes comparados às medidas da referência [15].

Isso indica que a quebra de comportamento não ocorre tão somente pela configuração geométrica dos laços e pelo fato de que as fitas são filmes finos, mas pela dinâmica de perdas e mudanças de comportamento dos laços em campos magnéticos mais intensos. Esse efeito só é observado por se tratar de sistema com correntes induzidas em caminhos longos, diferentemente do que é observado em mancais com fitas empilhadas [110] e com *bulks* [23, 110].

A histerese da força de levitação aumenta com o deslocamento vertical entre trilho e laços. Para quantificar esse aumento, escolheu-se um ponto comum de todas as curvas, a posição 45 mm, e avaliou-se a diferença entre as forças durante a subida e a descida para cada deslocamento. Os valores, resumidos na Tabela 5.1, demonstram que entre ± 10 mm e ± 15 mm o aumento da diferença de força é praticamente linear em relação ao aumento de deslocamento. A partir de ± 20 mm, o aumento passa a ter comportamento não-linear expressivo, chegando a uma diferença de mais de 2300% de comparação entre os casos ± 10 mm e ± 30 mm.

Tabela 5.1: Análise da histerese dos resultados das simulações de força de levitação para várias alturas através da diferença entre forças de subida e descida no ponto 45 mm.

Deslocamento	(Subida - descida) em 45 mm
± 10 mm	5,627 N
± 15 mm	13,774 N
± 20 mm	28,765 N
± 25 mm	77,13 N
± 30 mm	131,959 N

A histerese aparece como resultado da capacidade do material supercondutor de aprisionar campo. O campo interno aprisionado muda a trajetória da força de levitação ao mudar tanto a distribuição de campo magnético interna quanto a densidade de corrente crítica e, portanto, a densidade de corrente induzida nas fitas.

5.1.2 Análise das grandezas locais

A análise segue então com a observação das grandezas locais para verificar os estágios de operação, fita a fita, dos laços duplos cruzados. Para comparar efeitos de histerese, dois casos são analisados: ± 30 mm, caso validado que apresenta alta histerese, e ± 15 mm, caso com menos histerese.

Densidade de fluxo magnético

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram as componentes nas direções \hat{x} e \hat{y} do eixo de coordenadas, respectivamente, da densidade de fluxo magnético fita a fita na simulação do caso ± 30 mm. B_x é a componente com maior magnitude nas fitas durante

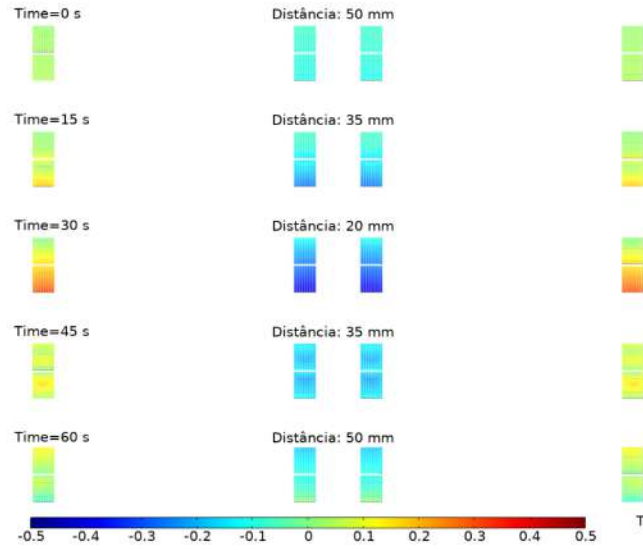


Figura 5.2: Componente horizontal da densidade de fluxo magnético (B_x), resultado do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.

boa parte do movimento, o que está de acordo com o posicionamento dos laços em relação aos ímãs e concentradores de fluxo, como mostra a Figura 4.2. Iniciando em valores próximos de zero, mas não zero puro por efeito do uso da distribuição de campo magnético dos ímãs como condições iniciais, B_x aumenta sua influência, chegando a cerca de $\pm 0,3$ T no ponto máximo, em 30 s. O efeito de aprisionamento de campo fica evidente na comparação entre os instantes 15 s e 45 s, em que a posição do trilho era a mesma, 45 mm em relação aos laços. No instante 15 s, a distribuição de B_x está de acordo com a posição das fitas, com as regiões das fitas na parte baixa com maior intensidade de campo que as da parte alta, por estarem mais próximas do trilho. Já no instante 45 s, além de contar com o campo externo com essa configuração, a distribuição de B_x mostra campo aprisionado nos centros dos laços. B_y tem comportamento semelhante ao de B_x , em que sua influência aumenta com a proximidade entre laços e trilho, embora seja menor em termos de magnitude.

Densidade de corrente crítica

O resultado de densidade de corrente crítica instantânea e local normalizada pela densidade de corrente crítica de campo zero está mostrado para a simulação com deslocamento ± 30 mm na Figura 5.4 e para a simulação com deslocamento ± 15 mm na Figura 5.5, apenas no instante de tempo da descida, quando a trajetória de movimento das duas simulações muda.

As simulações se iniciam com J_c abaixo de J_{c0} , por influência das condições

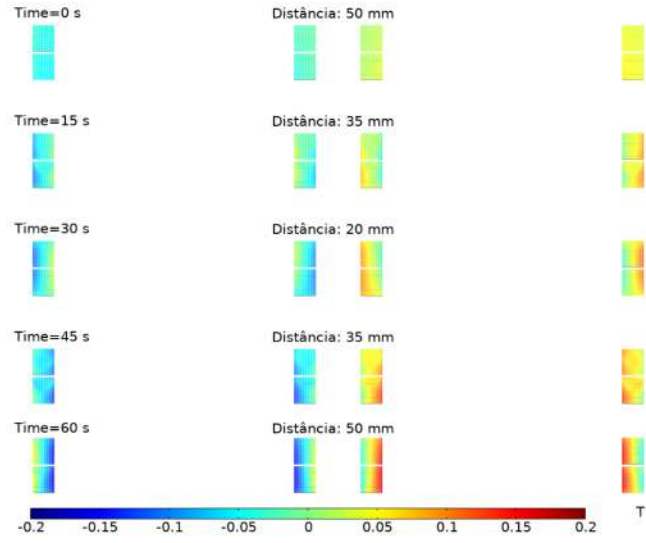


Figura 5.3: Componente vertical da densidade de fluxo magnético (B_y), resultado do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.

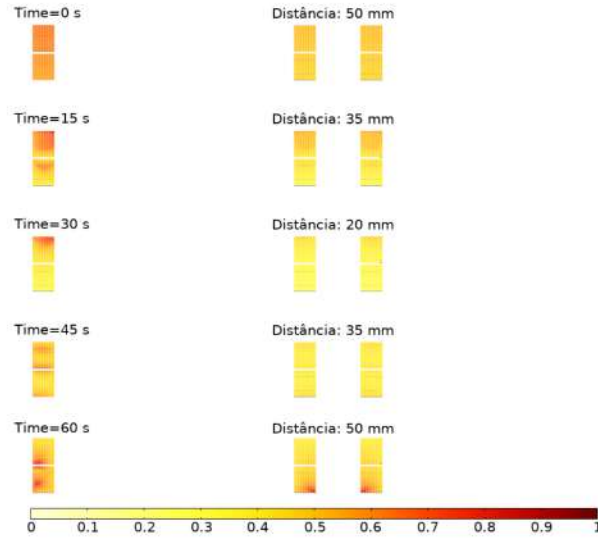


Figura 5.4: Densidade de corrente crítica normalizada por J_{c0} , resultado do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.

iniciais, e com diferenças entre as regiões mais externas, em que J_c está cerca de $0,7 J_{c0}$, e as mais internas, em que J_c está mais próximo de $0,5 J_{c0}$. Isso ocorre pelo posicionamento dos trechos dos laços em relação ao trilho. Tanto B_x quanto B_y são mais intensos nessa região, como mostram as Figuras 5.2 e 5.3, e eles atuam reduzindo J_c . As regiões com menor J_c atuam como limitantes às correntes máximas que circulam em cada fita.

A partir de 15 s, a trajetória de J_c segue aquela traçada por B_x e B_y . Na medida em que trilho e laços se aproximam, os campos aumentam e J_c diminui, respeitando a distribuição dos campos: J_c é menor nas regiões mais interiores, onde o campo magnético é mais intenso, e nas regiões na parte baixa, mais próximas do trilho. A partir de 45 s, é possível ver o efeito do campo aprisionado em J_c . Nas regiões mais interiores dos laços, onde o campo aprisionado é mais forte, J_c é menor.

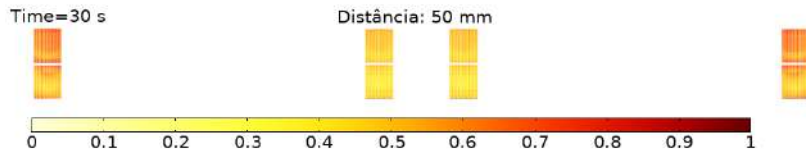


Figura 5.5: Densidade de corrente crítica normalizada por J_{c0} , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento de ± 15 mm.

Comparando os casos de deslocamento ± 30 mm e ± 15 mm, nota-se que, durante a descida, no instante 30 s, J_c é maior no caso ± 15 mm, tanto nas regiões mais internas quanto nas regiões mais externas. Isso evidencia a menor histerese desse caso em relação com o primeiro. A distribuição de J_c na descida está mais próxima da experimentada na subida para ± 15 mm.

Densidade de corrente induzida normalizada pela densidade de corrente crítica local e instantânea

Com a trajetória de B_x , B_y e J_c examinadas, pode-se seguir para a análise da densidade de corrente induzida, iniciando pela densidade de corrente induzida normalizada por J_c local e instantâneo, Figuras 5.6, para o deslocamento ± 30 mm, e 5.7, para região da descida do trilho no caso com deslocamento ± 15 mm. Essa normalização fornece a informação do estado das fitas a cada ponto e a cada instante de tempo. Quanto mais próxima a densidade de corrente induzida estiver de J_c , mais perdas os laços sofrem.

No instante inicial, como esperado, não há indução de corrente. A partir do instante 15 s, pode-se observar a dinâmica de indução conforme a aproximação e o afastamento seguinte do trilho. A densidade de corrente atinge seu valor crítico de forma mais acentuada na parte baixa, mais próxima do trilho. Como é a parte baixa que tem menor J_c , ela atua como limitante, ou seja, nos laços cruzados, com uma

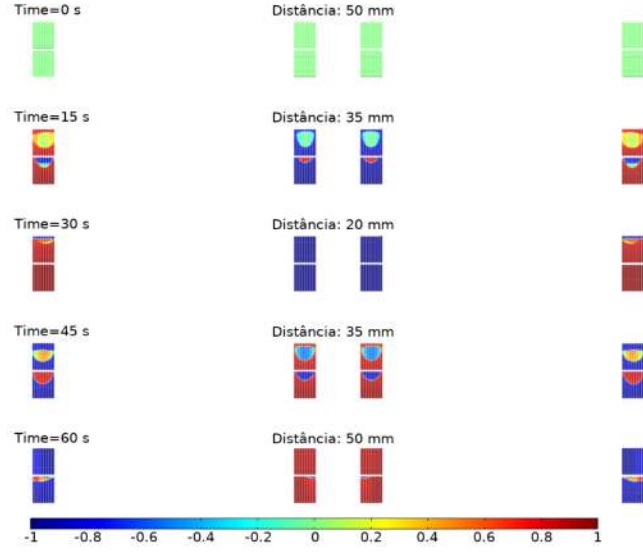


Figura 5.6: Densidade de corrente induzida normalizada por J_c , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.

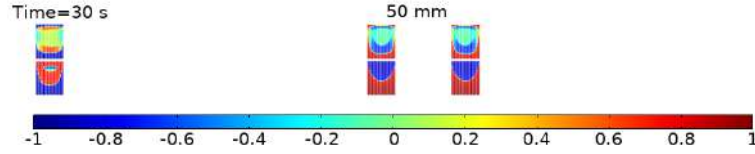


Figura 5.7: Densidade de corrente induzida normalizada por J_c , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento de ± 15 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.

parte baixa e outra alta, como a parte baixa está em $J = J_c$, a parte alta está com a mesma corrente induzida, mas com densidade de corrente induzida normalizada mais baixa. No caso ± 30 mm, quando o trilho chega na sua proximidade máxima, 20 mm, praticamente todas as regiões de todos os laços estão com densidade de corrente $\pm J_c$, ou seja, em região com altas perdas de energia.

A reversão do movimento leva o supercondutor a induzir corrente de forma a rejeitar a mudança de fluxo. A densidade de corrente induzida muda de sentido de forma direcional, das regiões mais externas das fitas às regiões mais internas das fitas, como mostra o instante 45 s da Figura 5.6. A reversão no sentido é completada em 60 s, ao final da simulação. A densidade de corrente circulante, $\pm J_c$ mantém o campo magnético aprisionado.

O caso com deslocamento ± 15 mm tem comportamento distinto. O ponto de maior aproximação é a posição 35 mm, instante 15 s, em que ainda há regiões nos laços em que a densidade de corrente induzida é muito menor que J_c , ou seja, os

laços não foram completamente preenchidos com a corrente crítica. Nesse caso, a reversão não chega à situação linear com $J = \pm J_c$ em todos os laços, permanecendo com variações não-lineares, como mostra a Figura 5.7.

Densidade de corrente induzida normalizada pela densidade de corrente crítica de campo zero

A segunda análise de densidade de corrente induzida é referente à sua normalização por J_{c0} . As Figuras 5.8 e 5.9 resumem os resultados para os casos de deslocamento ± 30 mm e ± 15 mm, respectivamente. O contraste entre este resultado e o anterior, com normalização por J_c local e instantâneo, reforça que a densidade de corrente crítica de trabalho do mancal é menor que J_{c0} , chegando a máximos em torno de $\pm 0,6J_{c0}$.

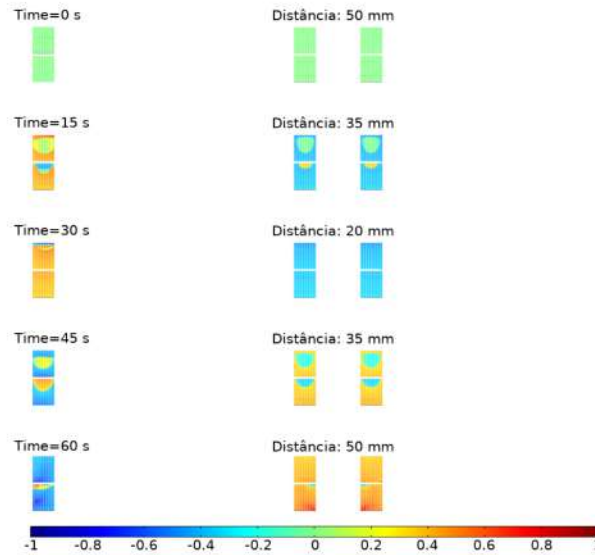


Figura 5.8: Densidade de corrente normalizada por J_{c0} , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento ± 30 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.

A indução de densidade de corrente ocorre primeiro nas regiões mais externas dos laços, do exterior para o interior das fitas, como esperado. No deslocamento com ± 30 mm, todos os laços são totalmente preenchidos por corrente durante subida e descida, mantendo valores quase uniformes de densidade de corrente nos instantes 30 s, na distância mínima entre trilho e laços, e 60 s, ao final da simulação. Já o caso com deslocamento menor, ± 15 mm, tanto na subida, instante 15 s, quanto na descida mostrada na Figura 5.9, há regiões dos laços, na parte mais interna das fitas, em que praticamente não circula corrente.

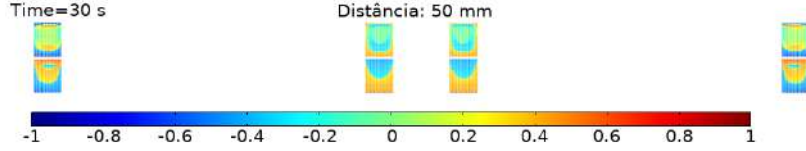


Figura 5.9: Densidade de corrente crítica normalizada por J_{c0} , resultado da simulação do ensaio de levitação com deslocamento de ± 15 mm. A distância vertical entre trilho e laços é indicada.

5.2 Apresentação e análise dos resultados das simulações dos ensaios de perturbação lateral

Até o presente momento da publicação desta tese, não foram encontrados trabalhos publicados com medições e simulações de ensaio de perturbação lateral para mancais magnéticos supercondutores com laços duplos cruzados. A observação do comportamento de força lateral foi citado em [44] como trabalho futuro.

Esta tese contribui nessa investigação ao apresentar as simulações do ensaio de força lateral com o método T-A-circuito. São analisadas as forças laterais para diferentes distâncias entre trilho e laços para perturbações laterais de ± 10 mm, deslocamento comumente aplicado em pesquisas dessa natureza com mancais magnéticos supercondutores com *bulks* [39].

Assim como na análise dos resultados das simulações do ensaio de força de levitação, nessa análise também são observadas, fita a fita, ao longo do tempo:

1. as componentes x (horizontal) e y (vertical) da densidade de fluxo magnético;
2. a densidade de corrente crítica;
3. a densidade de corrente induzida normalizada por J_c local;
4. a densidade de corrente induzida normalizada por J_{c0} ;

além da densidade de força lateral. A densidade de força é a grandeza escolhida pois, como não há dados medidos da força lateral de mancais magnéticos supercondutores com laços duplos cruzados, não há como validar a constante de proporcionalidade da componente lateral da força. A constante de proporcionalidade entre 3D e 2D depende da distribuição das componentes vetoriais de \mathbf{J} e \mathbf{B} na cabeça de bobina. Como \mathbf{J} depende de J_c , que é anisotrópico, e \mathbf{B} é não uniforme (há espraimento no enlace de fluxo nas bobinas), é possível que ela seja diferente da constante de proporcionalidade da força de levitação.

São apresentados resultados de simulações de ensaios de força lateral em que o mancal inicia seu movimento em distância de 50 mm entre trilho e laços, desloca-se

verticalmente e, nessa posição vertical movimenta-se lateralmente entre posições de ± 10 mm em relação ao ponto central $x = 0$ mm, primeiro em direção à direita e depois à esquerda, retornando a $x = 0$ mm. Três deslocamentos verticais são investigados: 10 mm, 20 mm e 30 mm, ou seja, distâncias de 40 mm, 30 mm e 20 mm entre trilho e laços. O deslocamento vertical de 10 mm é aquele em que a histerese da força de levitação é mínima; o de 20 mm é a região de transição entre comportamento não-linear e linear da força de levitação; e o de 30 mm é o deslocamento máximo estudado na análise de força de levitação.

5.2.1 Análise da densidade de força lateral

Iniciando a discussão pela densidade de força lateral, Figura 5.10, nota-se que, quanto maior for o deslocamento vertical máximo, H_{\max} , mais significativo é o efeito de histerese da força lateral. Com H_{\max} em 10 mm, a densidade de força lateral tem valores de -84 N/m e $+74$ N/m nas posições ± 10 mm com o módulo de força reduzindo-se com efeito do campo aprisionado durante o movimento lateral. Esse efeito está em linha com o que se observa na literatura de mancais magnéticos supercondutores com *bulks* e empilhamentos de fitas [39]. O deslocamento vertical máximo de 20 mm apresenta magnitude de forças máximas maior que o caso anterior, -370 N/m e $+298$ N/m, o que também está em linha com discussões na literatura recente [137], demonstrando que a força lateral aumenta com a redução da distância entre supercondutores e trilho, ou seja, aumento do deslocamento máximo.

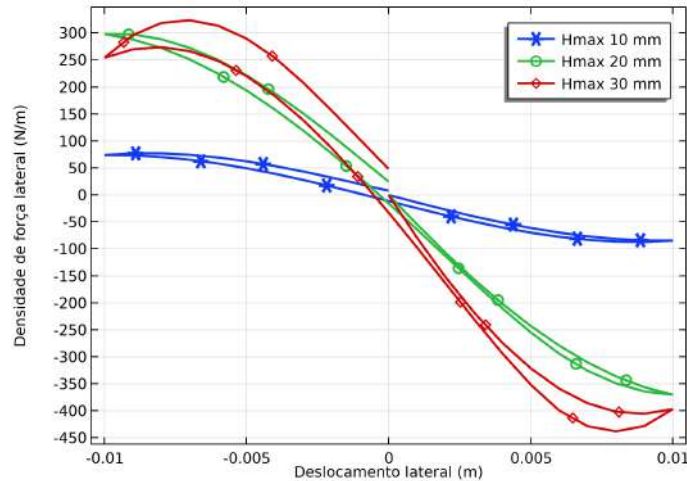


Figura 5.10: Resultados de simulações de força lateral. H_{\max} se refere ao deslocamento vertical.

Já o caso mais extremo, com H_{\max} em 30 mm, apresenta densidades de forças com módulo máximo em pontos mais interiores da curva de deslocamento (em $x \approx +7$ e -8 mm), ao contrário dos outros casos, em que os pontos máximos ocorrem no deslocamento lateral máximo (± 10 mm). Esse é o efeito da região de altas perdas,

com $J = \pm J_c$, descrito anteriormente. No entanto, para aprofundar as discussões, é necessário observar o que ocorre com as grandezas locais fita a fita.

5.2.2 Análise das grandezas locais

Na análise de grandezas locais fita a fita, são escolhidos para comparação o caso mais simples, com deslocamento máximo vertical de 10 mm, e o mais extremo, com 30 mm de deslocamento. Nas figuras, estão presentes os instantes de tempo e a posição lateral do trilho em relação aos laços.

Densidade de fluxo magnético

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram a distribuição da componente horizontal da densidade de fluxo magnético, B_x , ao longo dos laços para os casos em que a altura é 10 mm e 30 mm, respectivamente. A densidade de fluxo máxima para 10 mm fica em torno de 0,1 T em módulo, e para 30 mm, acima de 0,3 T em módulo. Assim como no caso das simulações dos ensaios de levitação, os trechos de fita mais próximos do trilho sofrem maior influência do campo magnético externo. As distribuições ficam mais intensas no laço da direita quando a posição horizontal é +10 mm e mais intensas do lado esquerdo quando a posição é -10 mm, devido à mudança da distância lateral do trilho a cada laço. Sendo B_x a componente que tem maior influência na queda da densidade de corrente crítica, e portanto na densidade de corrente induzida e nas perdas, o esperado é que J_c e J sigam dinâmica semelhante de forma oposta. Ou seja, J_c deve ser menos intenso no laço direito na posição +10 mm e no laço esquerdo na posição -10 mm.

O resultado de B_y está mostrado nas Figuras 5.13, para a altura 10 mm, e 5.14 para a altura 30 mm. Por causa do aumento da magnitude de B_y , a influência dele no sistema com altura 30 mm é mais significativa que no sistema com altura 10 mm, principalmente nas posições $x = \pm 10$ mm. Nelas, o campo magnético chega a magnitude similar a B_x para os laços esquerdo e direito, respectivamente. Essa influência deve afetar a distribuição de J_c e J nesses instantes de tempo e a capacidade de aprisionamento nos instantes seguintes.

Densidade de corrente crítica

A densidade de corrente crítica, cujos resultados estão resumidos nas Figuras 5.15, altura 10 mm, e 5.16, altura 30 mm, afetada pela densidade de fluxo, é maior no deslocamento com altura 10 mm, como é previsto pela análise de B_x e B_y . As regiões dos laços no centro do domínio de simulação são as mais afetadas em ambos os casos. Como são laços cruzados, o efeito resultante é que essas regiões limitam a densidade de corrente total que circula por cada fita. As partes superiores

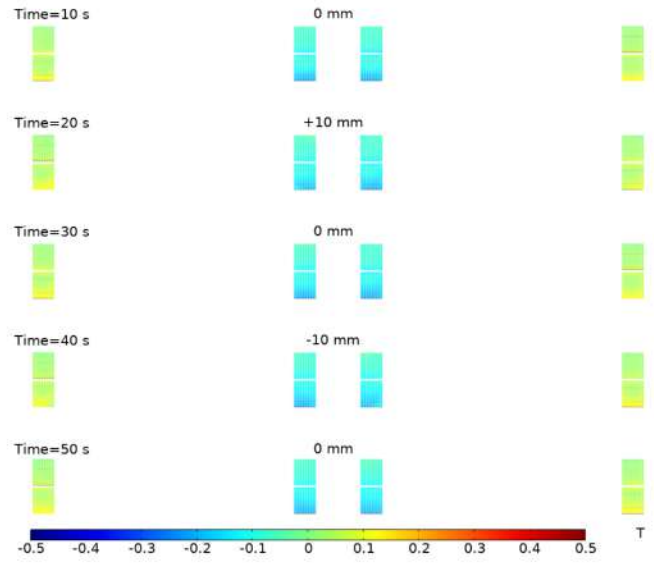


Figura 5.11: B_x , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm.

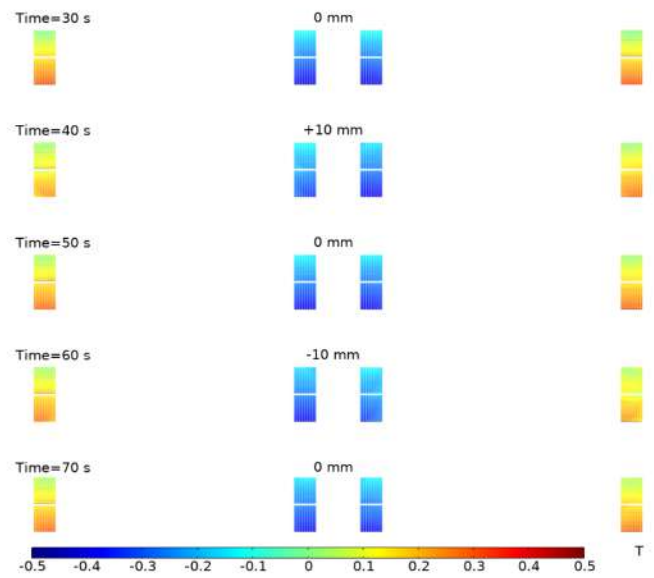


Figura 5.12: B_x , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm.

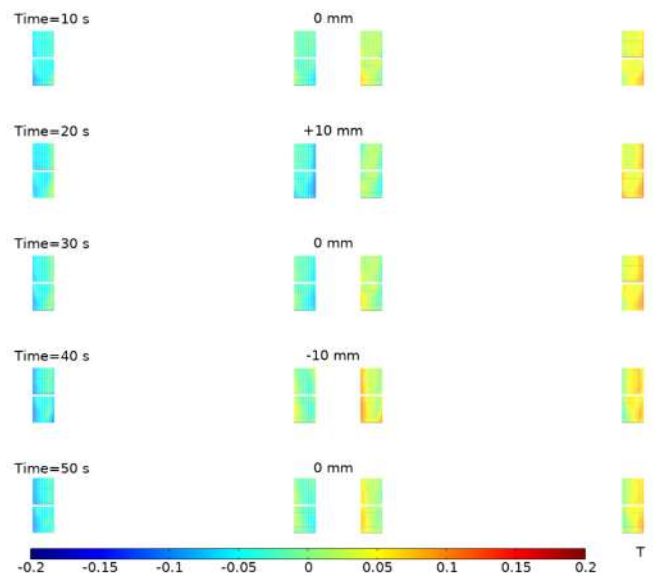


Figura 5.13: B_y , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm.

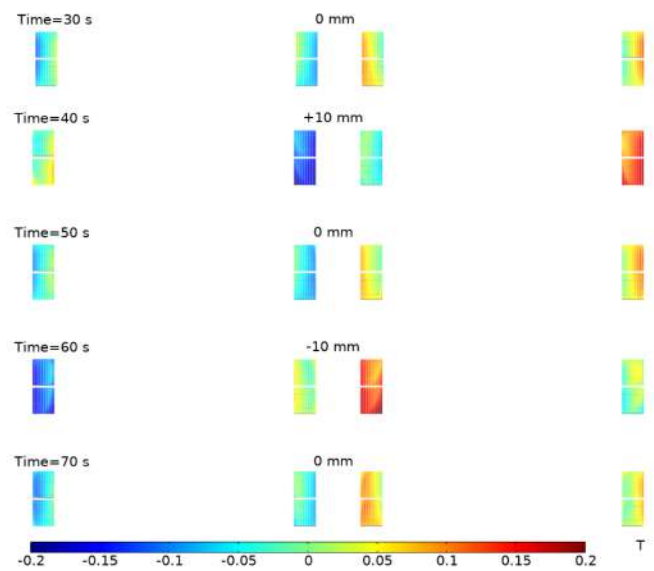


Figura 5.14: B_y resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm.

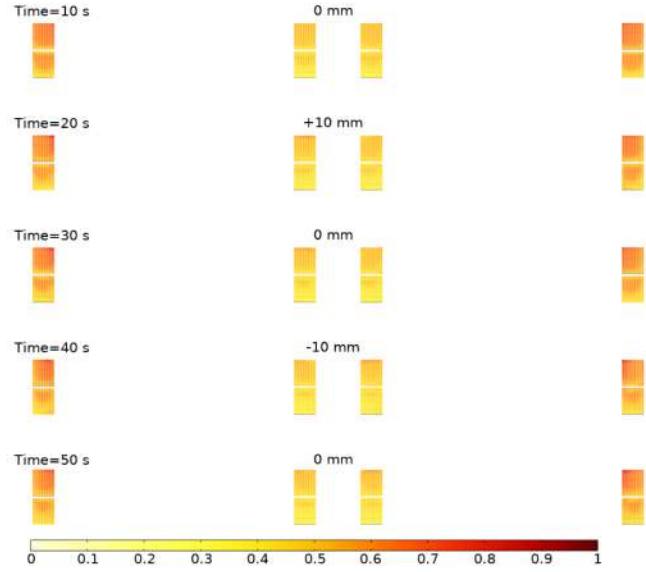


Figura 5.15: J_c/J_{c0} , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm.

dos laços apresentam J_c maior, em torno de $0,8 J_{c0}$, que as outras regiões, com J_c em torno de $0,3 J_{c0}$.

Densidade de corrente induzida normalizada pela densidade de corrente crítica local e de campo zero

A dinâmica de aprisionamento de campo e de histerese da força lateral fica mais evidente quando se observa a densidade de corrente induzida, tanto a normalizada por J_c local e instantâneo quanto por J_{c0} . As Figuras 5.17 e 5.18 resumem os resultados de $\frac{J}{J_c}$ para as alturas de 10 mm e 30 mm, respectivamente.

No primeiro caso, altura 10 mm, os laços nunca são totalmente preenchidos por densidade de corrente induzida. A corrente induzida resultante do processo de levitação nos laços como um todo preserva seu sinal durante a perturbação lateral. As correntes induzidas fita a fita, no entanto, sofrem mudanças de sinais, sobretudo as fitas mais externas na parte central do sistema de laços. Nos instantes 20 s e 40 s, em que as posições horizontais são ± 10 mm, nota-se o surgimento de frentes de indução de densidade de corrente no sentido contrário ao majoritário no mesmo formato curvado em L observado na distribuição de B_y (mais evidente em termos de magnitude para o caso com altura 30 mm). A corrente induzida na dinâmica de movimento lateral persiste quando o movimento chega ao fim, no instante 50 s.

Já no caso com altura 30 mm, o sistema parte de um estado com preenchimento total de densidade de corrente nos laços, instante 30 s. A influência de B_y , principalmente, leva à indução de densidades de corrente em sentido contrário, posições ± 10 mm, seguindo a curvatura de B_y de forma mais pronunciada que o caso an-

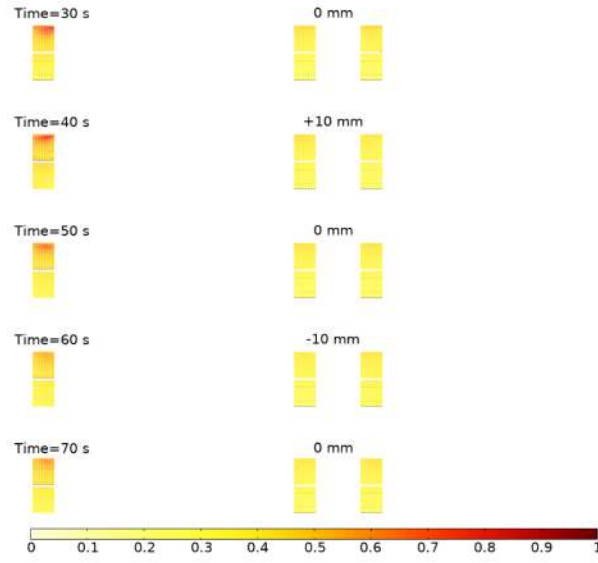


Figura 5.16: J_c/J_{c0} , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm.

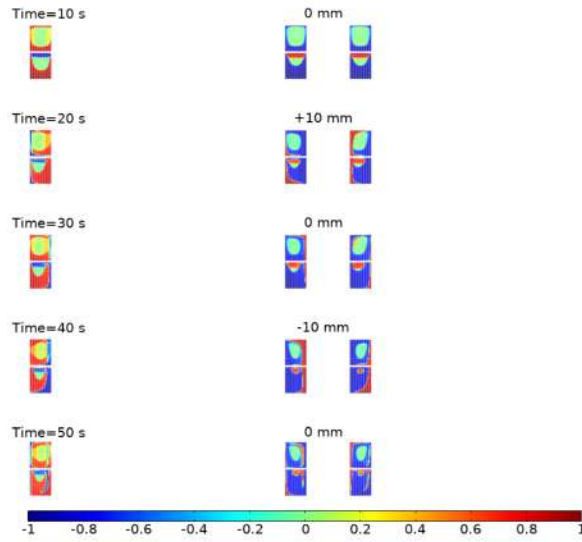


Figura 5.17: J/J_c , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm.

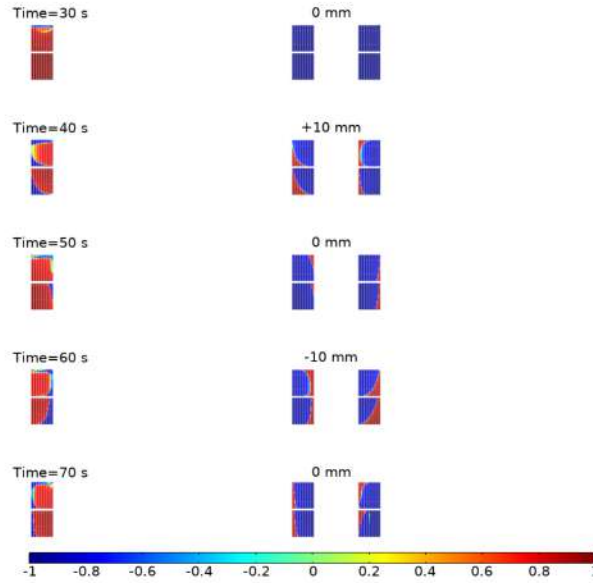


Figura 5.18: J/J_c , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm.

terior, primeiro o laço na esquerda, em $+10$ mm, e depois o laço da direita, em -10 mm. No instante final, há densidades de corrente persistentes em sentido contrário circulando ainda pelos laços. Durante todo o movimento, as densidades de corrente se mantiveram próximas a $\pm J_c$, indicando que este caso está com perdas quase resistivas nos laços.

Os mesmos efeitos podem ser observados nas Figuras 5.19 e 5.20, com os resultados de $\frac{J}{J_{c0}}$ para as alturas 10 mm e 30 mm, respectivamente.

5.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas as contribuições desta tese para a análise do comportamento de mancais magnéticos supercondutores com laços duplos cruzados. Dois ensaios do mancal foram simulados com o método T-A-circuito: ensaio de levitação e ensaio de perturbação lateral. No ensaio de levitação, foram explorados cinco deslocamentos verticais diferentes, ± 10 , ± 15 , ± 20 , ± 25 e ± 30 mm. Avançando a partir das discussões de [121], a histerese e a mudança de regime da força de levitação foram examinadas a partir da observação das grandezas locais nas fitas, fita a fita. Conclui-se que há um limite de deslocamento a partir do qual o sistema de fitas entra no limite do estado misto, o que leva à mudança de comportamento não-linear para linear. As correntes persistentes induzidas durante essa mudança de estado geram a histerese na força.

O ensaio de perturbação lateral para mancais com laços duplos cruzados ainda não havia sido explorado na literatura. Na falta de dados experimentais, optou-se

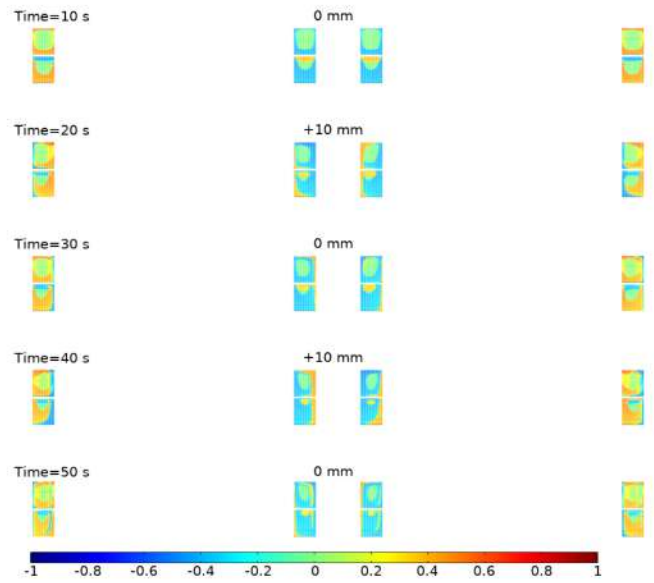


Figura 5.19: J/J_{c0} , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 10 mm.

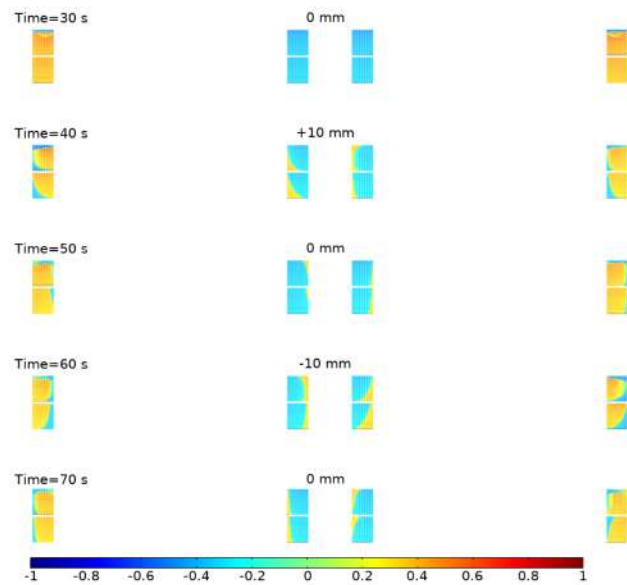


Figura 5.20: J/J_{c0} , resultado da simulação de perturbação lateral, caso ± 30 mm.

por analisar a densidade de força lateral, no lugar da força. O ensaio é composto por um deslocamento vertical e um deslocamento horizontal de ± 10 mm. Foram simulados três deslocamentos verticais, 10 mm, na região não linear da força de levitação, 20 mm, no limite de troca de estado de não-linear para linear, e 30 mm, no estado linear. Observou-se que há ganho na força lateral máxima até o deslocamento vertical de 20 mm, em que a força de levitação é não-linear. O máximo de força nesses casos ocorre nos pontos mais extremos do deslocamento lateral, ± 10 mm. No caso mais extremo, deslocamento vertical de 30 mm, a força lateral teve máximos em regiões mais internas, próximos de ± 7 mm, e maior histerese na força. As grandezas locais dos casos com deslocamento 10 mm e 30 mm foram analisadas, o que permitiu observar a influência do deslocamento horizontal na distribuição dessas ao longo das fitas. Conclui-se que o limite de deslocamento vertical também interfere na força lateral. O movimento lateral também leva à indução de correntes persistentes dentro dos laços.

Com a finalização das discussões sobre mancais, o capítulo 6 demonstra a aplicação do método T-A-circuito a máquinas elétricas supercondutoras com gaiolas de esquilo e sua comparação com as máquinas de fluxo aprisionado com enrolamentos em espiral.

Capítulo 6

Resultados das simulações de máquinas

Neste capítulo, demonstra-se que os mesmos passos de modelagem podem ser aplicados às máquinas supercondutoras com gaiola de esquilo formada por barras de fitas 2G. São apresentados e discutidos os resultados das simulações das máquinas estudadas: máquina supercondutora de indução com gaiola de esquilo e máquina supercondutora com enrolamentos em espiral. Inicia-se o capítulo com a discussão sobre o método de magnetização por pulsos, mostrando o efeito da resistência da solda. Então, investigam-se as respostas das máquinas a movimentos.

As contribuições desta tese para a análise de máquinas supercondutoras com fitas 2G são:

1. aplicação da formulação T-A na modelagem da topologia de máquina supercondutora de fluxo aprisionado com enrolamentos em espiral;
2. aplicação da formulação T-A com método T-A-circuito na modelagem da topologia de máquina supercondutora de indução com gaiola de esquilo;
3. a comparação entre as duas topologias de máquinas no processo de magnetização por pulsos e nos estados atingidos com movimento relativo entre estator e rotor.

6.1 Descrição das topologias de máquina

Nesta seção, as topologias de máquinas são apresentadas, primeiro a máquina supercondutora com gaiola de esquilo e então a máquina supercondutora com enrolamentos em espiral. Ambas fazem uso de fitas 2G no rotor da máquina como elemento onde correntes são induzidas.

6.1.1 Máquina supercondutora de indução com gaiola de esquilo

Máquinas supercondutoras com gaiolas de esquilo são máquinas total ou parcialmente supercondutoras com gaiolas de esquilo na região do rotor. As gaiolas de esquilo são formadas por fitas 2G como barras e fitas 1G ou 2G como anéis de curto-circuito, com solda ligando anéis e barras, como ilustra a Figura 6.1. As barras estão ligadas em suas pontas aos pontos de soldagem, que se conectam aos anéis de curto-circuito. Ou seja, as barras estão ligadas às soldas e os conjuntos barras-soldas estão ligados entre si nas pontas, curto-circuitados. A corrente que circula é induzida pelo movimento relativo entre campo do estator e o rotor.

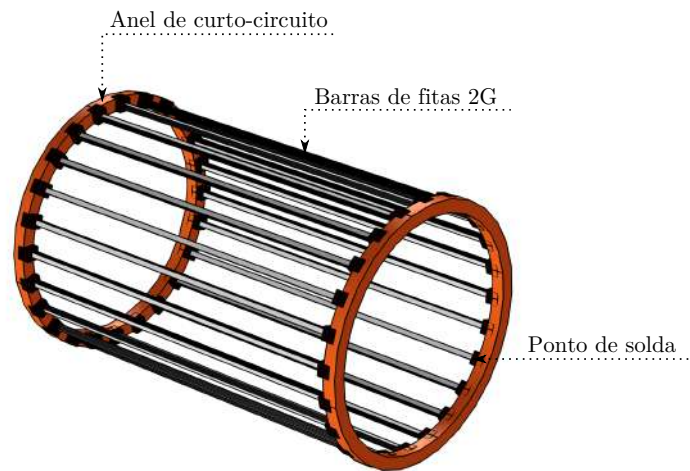


Figura 6.1: Ilustração da gaiola de esquilo com fitas 2G em suas barras.

Esta configuração de gaiola vem sendo estudada desde a década de 2000 [80, 138, 139], com muitas das aplicações propondo uso de fitas 1G para barras e anéis. Em 2008, propôs-se o uso de fitas 2G para as barras [140]. Nessa máquina, as barras fornecem a variação de resistividade, passando pelos três estágios: supercondutor, *flux creep* e *flux flow*, em alguns casos. Já os anéis são projetados para estarem sempre em estado puramente supercondutor, sem perdas. Portanto, não contribuem com variação de resistividade. As soldas trazem pontos de resistência à passagem de corrente e devem ser representadas.

Recentemente, foram estudadas modelagens em elementos finitos de máquinas de indução/síncronas [141], com o uso de homogeneização para modelar as barras da gaiola. Embora esse modelo tenha a vantagem de ser de simples implementação, conforme argumentado no Capítulo 3, informações sobre a magnetização fita a fita são perdidas. Ou seja, existe espaço para contribuição nesta área com uma maneira alternativa de modelar a gaiola, usando a formulação T-A com aproximação fita-lâmina.

6.1.2 Máquina supercondutora de fluxo aprisionado com enrolamentos em espiral

As máquinas supercondutoras de fluxo aprisionado com enrolamentos em espiral também podem ser máquinas total ou parcialmente supercondutoras. Os enrolamentos em espiral, cuja ilustração foi apresentada na Figura 2.10, aqui repetida na Figura 6.2, são colocados ao longo do eixo da máquina, sobre material ferromagnético.



Figura 6.2: Ilustração do enrolamento em espiral usado em proposta de máquina da parceria UFRJ/UFF/CEPEL. Figura fora de escala.

Essa máquina vem sendo estudada no LASUP, em parceria com a UFF e o CEPEL [94, 95] e seu princípio de funcionamento é bastante semelhante ao da máquina supercondutora de indução. O campo girante da máquina interage com o rotor induzindo correntes elétricas no enrolamento em espiral. Essas correntes geram campo magnético, e, conseqüentemente, movimento. Por usar material supercondutor, o processo de indução permite a sincronização da máquina. Ou seja, a resistividade muito baixa leva ao surgimento de correntes persistentes, que permitem a sustentação de conjugado em velocidade síncrona. A grande diferença da máquina com espirais em relação à máquina com a gaiola de esquilo é o formato dos laços de correntes induzidas que se formam no rotor. Enquanto na gaiola os laços seguem os traços dos trechos retilíneos de fita e do anel curto-circuitado, na espiral os laços se formam livremente, sendo restritos pela largura da fita usada.

Essa topologia já foi simulada com a formulação híbrida A-H [142], em que a espiral foi aproximada por um bloco homogeneizado. Essa abordagem permitiu cálculo de conjugado e observação do comportamento geral da máquina. Para permitir

melhor investigação do comportamento da espiral ponto a ponto da fita, aplica-se a formulação T-A com aproximação fita-lâmina [143].

6.2 Descrição dos parâmetros de simulação e dos ensaios simulados

Nesta seção, são descritos os parâmetros de simulação, como dimensões geométricas e dados de representação das fitas supercondutoras. São também apresentados os ensaios simulados: ensaio de magnetização por pulso e ensaios com movimento imposto. Nesta tese, pretende-se demonstrar a aplicação do método de simulação às topologias de máquina, e não fazer o *design* ou otimização das máquinas. Portanto, as geometrias simuladas são simples, usadas para evidenciar as partes que compõem os métodos de simulação estudados. Escolheu-se simular uma única camada de barras na gaiola de esquilo e uma única camada da espiral. Os outros parâmetros geométricos foram ajustados de acordo com essa restrição.

6.2.1 Dimensões geométricas e configurações de materiais

Como o objetivo é, além de aplicar a formulação T-A às topologias de máquina, compará-las na resposta do seu enrolamento de campo, optou-se por fazer as simulações de ambas com o mesmo estator. Escolheu-se uma configuração de estator simples, adaptada de [108], sem ranhuras, para que fosse observada força magneto-motriz com o mínimo possível de harmônicos. As adaptações se deram:

1. na redução das dimensões, uma vez que a máquina proposta em [108] tem raio na ordem de metros;
2. no passo da alocação das fases, para facilitar a modelagem do corte por periodicidade aplicado na máquina com gaiola.

O estator resultante está ilustrado na Figura 6.3, que mostra 1/4 da máquina. Ela tem oito polos e três fases. Ao todo, a região dos enrolamentos do estator é dividida em 96 seções, com 32 seções por fase e 12 seções por polo. O núcleo do estator é modelado como ferro sem perdas, com condutividade nula e saturação em 1 T, por simplicidade. Ao ar no entorno também é aplicada condutividade nula. As seções equivalentes que representam os enrolamentos têm condutividade 6×10^7 S/m.

O rotor com a gaiola tem uma única camada de fitas com quatro barras retilíneas por polo, oito barras a cada dois polos, como ilustra a Figura 6.4. As barras são formadas por fitas supercondutoras com 12 mm de largura, 1 μ m de espessura, não representado no desenho mas usado como fator numérico nas equações diferenciais,

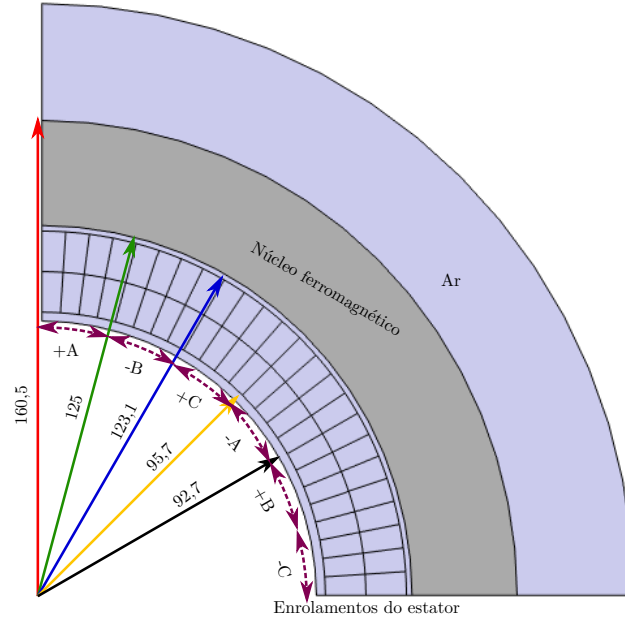


Figura 6.3: Ilustração do estator escolhido com os raios de suas camadas destacados por cores.

J_c fixo em 2.2×10^{10} A/m² e índice $n = 20$. Nenhuma mudança de J_c com campo magnético foi considerada neste modelo. O núcleo ferromagnético e o ar têm as mesmas características usadas no estator para os respectivos domínios de mesmo material. A simulação da gaiola conta com redução de domínios por periodicidade. Supõe-se que a máquina opera sem desbalanços e que, portanto, a cada dois polos a corrente total induzida é nula. Isso permite o uso de condições de periodicidade do tipo continuidade. Nota-se que, por estarem totalmente contidas dentro do domínio de ar, as condições de fronteira das barras não mudam com essa consideração.

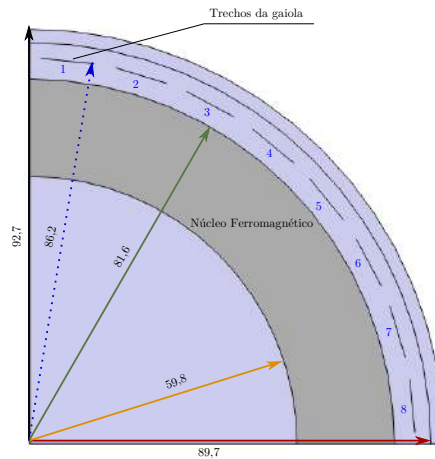


Figura 6.4: Ilustração do rotor com gaiola de esquilo com barras de fitas 2G, os raios de suas camadas estão destacados por cores.

Já a simulação do rotor com espiral não pode ser reduzida da mesma forma, uma

vez que a espiral, representada como lâmina de corrente, leva à falta de simetria total. O rotor com a espiral é mostrado na Figura 6.5, e é composto por uma única fita com 540,36 mm, enrolados em 1 volta, de forma a se aproximar ao máximo dos 384 mm totais de fita supercondutora do rotor com gaiola. As mesmas propriedades de materiais são consideradas. Nesse caso, como a corrente total é zero, as condições de fronteira da formulação T aplicadas nas extremidades da espiral são $T = 0$.

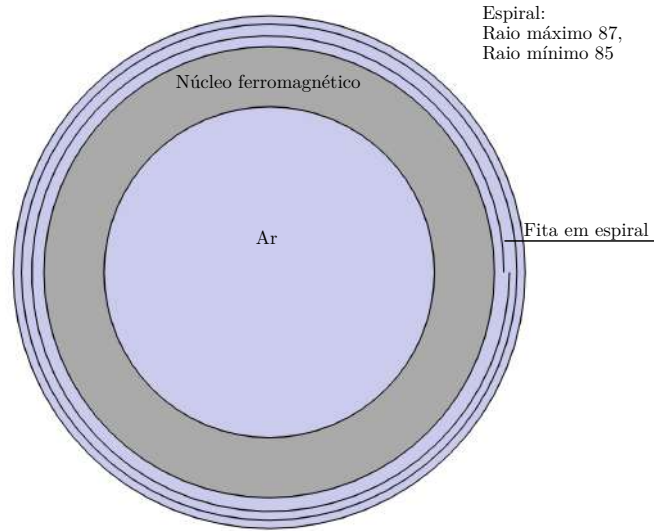


Figura 6.5: Ilustração do rotor com fita em espiral, dimensões gerais são as mesmas do rotor com gaiola.

6.2.2 Descrição dos ensaios simulados

A avaliação e comparação das topologias neste trabalho são feitas com base nas simulações de dois tipos de ensaios:

- O primeiro é o ensaio de magnetização por pulsos. Nele, são aplicados pulsos de corrente nos enrolamentos do estator de forma a induzir corrente persistente nas fitas supercondutoras que compõem o rotor. O princípio desse ensaio se baseia nos conhecimentos desenvolvidos em [43], em que se estuda a indução de correntes persistentes com base em pulsos de corrente que gerem correntes induzidas pouco acima da corrente crítica da fita. No caso das máquinas, os pulsos são aplicados de acordo com a configuração:
 1. corrente máxima nos enrolamentos que compõem a fase A, I_{max} ;
 2. metade da corrente máxima circulando no sentido contrário nos enrolamentos que compõem as fases B e C, $-\frac{I_{max}}{2}$.

São formados, então, os oito polos da máquina, induzindo correntes na gaiola e na espiral que gerem campo próprio também em oito polos. Nesse ensaio, são observados a densidade de corrente induzida persistente nas fitas supercondutoras e o campo magnético gerado por elas nas duas topologias de máquina. Os pulsos têm 100 ms de duração e ocorrem a partir do instante 0,1 s. O tempo total de simulação é de 10 s, com registo de resultados a cada 1 ms. A topologia de máquina de indução deve contar necessariamente com a presença de pontos de solda na gaiola, que são incluídos na modelagem no circuito elétrico. A influência da solda também é investigada, tanto na densidade de corrente e no campo magnético quanto nas correntes totais em cada barra. Para isso, a simulação dessa topologia é feita de forma paramétrica, com variação da resistência de solda em três casos: $R_{\text{solda}} = 0 \, \Omega$, $R_{\text{solda}} = 25 \, \text{n}\Omega$ e $R_{\text{solda}} = 50 \, \text{n}\Omega$. I_{max} é 72 A-espira.

- O segundo ensaio simulado é o ensaio com movimento. Os objetivos dessa simulação são: mostrar a aplicação do método de simulação em situações com rotação de malhas e observar as características eletromagnéticas da máquina operando com velocidade nula, com velocidade crescente e na velocidade síncrona. As características eletromagnéticas demonstram as regiões de operação síncrona e assíncrona das topologias de máquina. As entradas são as correntes trifásicas aplicadas ao estator, com valor RMS 36 A-espira, escolhido para induzir correntes com valor máximo na ordem de grandeza de I_c , e frequência 60 Hz, e a variação da posição relativa entre estator e rotor em rotação, aplicada à região do estator, que gira no sentido contrário ao sentido que o rotor giraria. Isso é feito para evitar mudanças de coordenadas na região em que os supercondutores se encontram, o que poderia tornar sua modelagem mais complexa e mais suscetível à ocorrência de divergências numéricas, devido à lei de potência. A velocidade é zero até 0,005 s, quando é imposta, variando linearmente até 95 rad/s, velocidade síncrona, em 0,51 s. O tempo total de simulação é 2 s, com passos de registo dos resultados de 0,1 ms.

Nas simulações dos dois ensaios, a formulação A é modelada a partir da física *Rotating Machinery, Magnetics*, própria para simulações de máquinas rotativas. A formulação T é modelada com a física *General Form Boundary PDE*, com as mesmas configurações descritas na seção 4.4.1. O circuito elétrico, Figura 6.6, é usado apenas nas simulações da topologia de máquina de indução, incluindo as barras conectadas em série com as resistências de solda nas duas pontas, ou seja, $2R_{\text{solda}}$, e com os ramos barra-solda em paralelo. Por haver movimento, no segundo ensaio é necessário que sejam criadas duas malhas separadas para estator e rotor. A condição de continuidade do potencial vetor magnético é imposta na região de contato entre

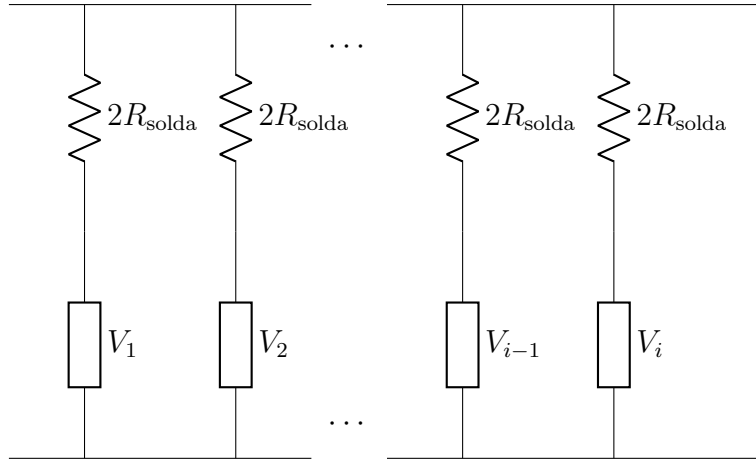


Figura 6.6: Circuito equivalente da gaiola do rotor da máquina supercondutora síncrona/de indução.

as malhas.

6.3 Resultados das simulações dos ensaios de magnetização

Inicia-se a análise dos resultados das simulações dos ensaios de magnetização observando a densidade de corrente nas barras da máquina com gaiola normalizada pela densidade de corrente crítica, Figura 6.7, que mostra a grandeza no instante 0,15 s, ou seja, durante o pulso do estator. Conforme esperado, a distribuição de densidade de corrente entre as barras segue os dois polos aplicados no 1/4 de máquina simulado. A força magnetomotriz do estator, durante o pulso, induz densidades de corrente que chegam a $\pm J_c$ em valores máximo e mínimo.

Tal distribuição de densidade de corrente leva às correntes totais para cada barra mostradas na Figura 6.8 para diferentes valores de resistência de solda. Vê-se que durante os pulsos, a influência da resistência de solda é muito pequena. Após a finalização dos pulsos, a corrente persistente decai, tendo decaimento mais acelerado conforme o aumento da resistência de solda, como esperado. Os tempos de decaimento, na ordem de segundo, são muito maiores que o ciclo da rede de alimentação da máquina, 60 Hz. Isso indica que usar magnetização como etapa do acionamento da máquina pode ajudar na sincronização, uma vez que, a depender do projeto, a máquina pode atingir a sincronização com as correntes persistentes induzidas durante o processo de magnetização ainda presentes na gaiola, auxiliando na produção de conjugado.

O efeito observado nas correntes também pode ser observado na distribuição de densidade de fluxo magnético na geometria da máquina, Figura 6.9. Durante o pulso,

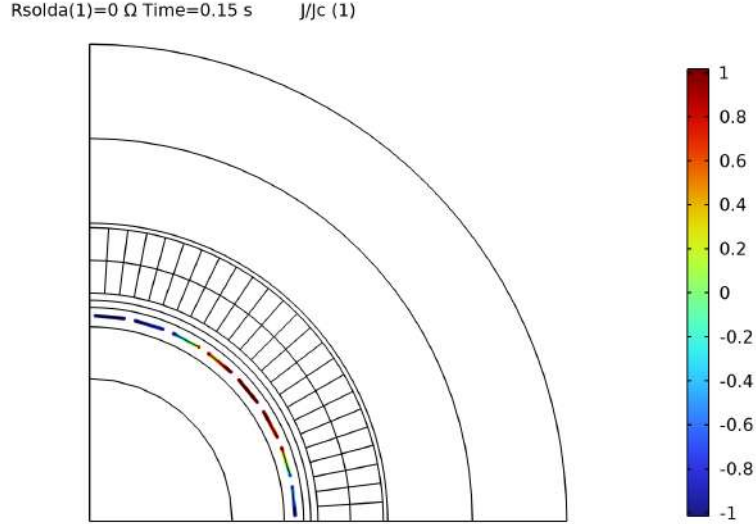


Figura 6.7: Densidade de corrente normalizada pela densidade de corrente crítica na gaiola do rotor da máquina supercondutora de indução/síncrona, simulação do ensaio de magnetização.

as correntes induzidas na gaiola blindam o núcleo ferromagnético do rotor. Após os pulsos, o campo magnético é originado apenas pelas correntes induzidas no rotor, e a blindagem deixa de acontecer. O campo magnético persistente naturalmente diminui com o aumento da resistência de solda.

A Figura 6.10 mostra a densidade de corrente induzida normalizada pela densidade de corrente crítica do enrolamento espiral durante o pulso, no instante 0,15 s. A densidade de corrente reflete em seus valores máximos e mínimos os oito polos da máquina. Os valores de densidade de corrente crítica ficam próximos a $\pm 0,8 J_c$, valor menor, se comparado ao resultado nas barras da gaiola. Isso ocorre porque, por geometria, a máquina com enrolamentos em espiral, caso as fitas tenham a mesma largura do comprimento útil da máquina, tem mais material supercondutor que a máquina com as gaiolas. A maior quantidade de material supercondutor reduz, para mesmo campo magnético externo, a densidade de corrente induzida. Na montagem real de uma máquina com enrolamentos em espiral, há restrição imposta pela largura das fitas, que muda a relação de quantidade de material supercondutor, além de mudar a configuração do enlace de fluxo e, portanto, dos laços de densidade de corrente que se formam na espiral. Esse caso não é considerado aqui pois esse tipo de comparação só pode ser possível em 3D, o que está fora do escopo deste trabalho.

Na Figura 6.11, são comparadas as magnitudes de densidade de corrente induzida normalizada ao longo da espiral e das barras. Além das magnitudes máximas atingidas durante o pulso ($1 J_c$ para a gaiola e $0,8 J_c$ para a espiral), observa-se também o comportamento da densidade de corrente no instante 10 s. Nas barras, mesmo após 10 s, há distribuição de densidade de corrente com pontos máximos por

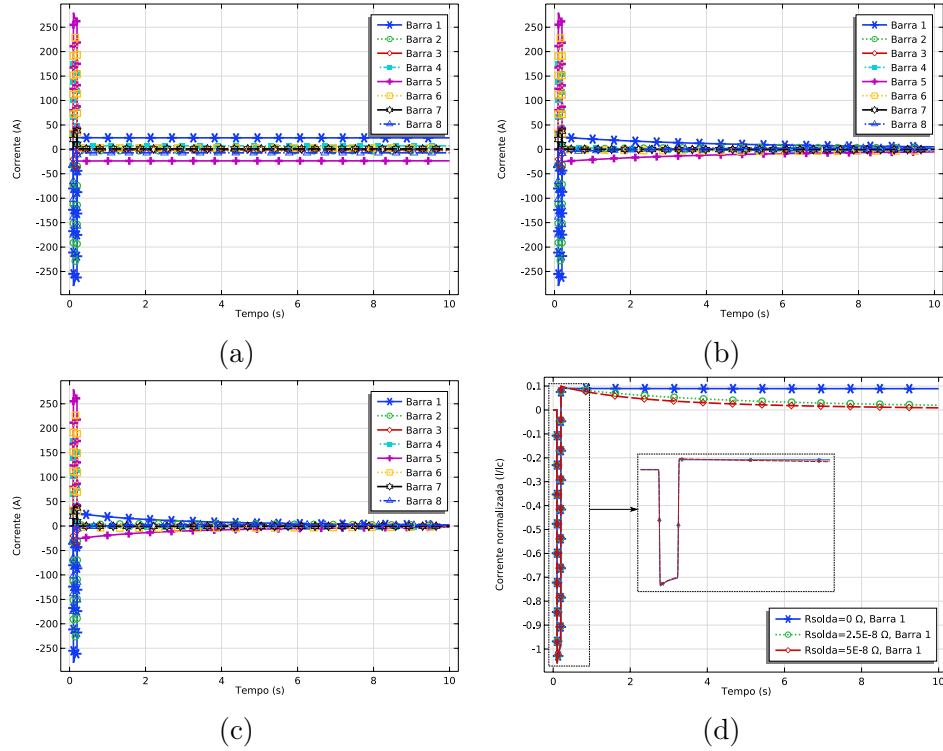


Figura 6.8: Resultados de correntes totais nas barras da gaiola da simulação do ensaio de magnetização. (a), (b) e (c) mostram os resultados para soldas nula, com 25 nΩ e com 50 nΩ, respectivamente. (d) mostra a corrente normalizada pela corrente crítica apenas para a barra 1.

volta de $\pm 0,8 J_c$. Já na espiral, a densidade de corrente cai a valores muito mais baixos ao longo da fita após o processo de magnetização por pulsos, Figura 6.11, com densidade de corrente acumulada na descontinuidade da espiral. Esse efeito tem relação com o fato de que enrolamentos em espiral não são totalmente simétricos. É importante notar que a espiral simulada tem somente uma volta. Na medida em que voltas de fita são adicionadas à espiral, o efeito de descontinuidade é menos relevante, como mostram os resultados medidos em [95].

6.4 Resultados das simulações dos ensaios com movimento

Os resultados das simulações dos ensaios com movimento são apresentados e analisados em seguida, começando pela observação da densidade de campo magnético, Figuras 6.12 e 6.13, para a simulação do rotor com gaiola e com a espiral, respectivamente. A Figura 6.12 conta com as divisões lineares pois apenas um setor angular com 1/4 da máquina é simulado. Os outros são repetidos na Figura por simetria. Nos instantes iniciais, 0 s, a distribuição dos polos não apresenta distorções - o movimento é nulo. A partir de 0,005 s, o movimento se inicia. Nos instantes 0,2 s

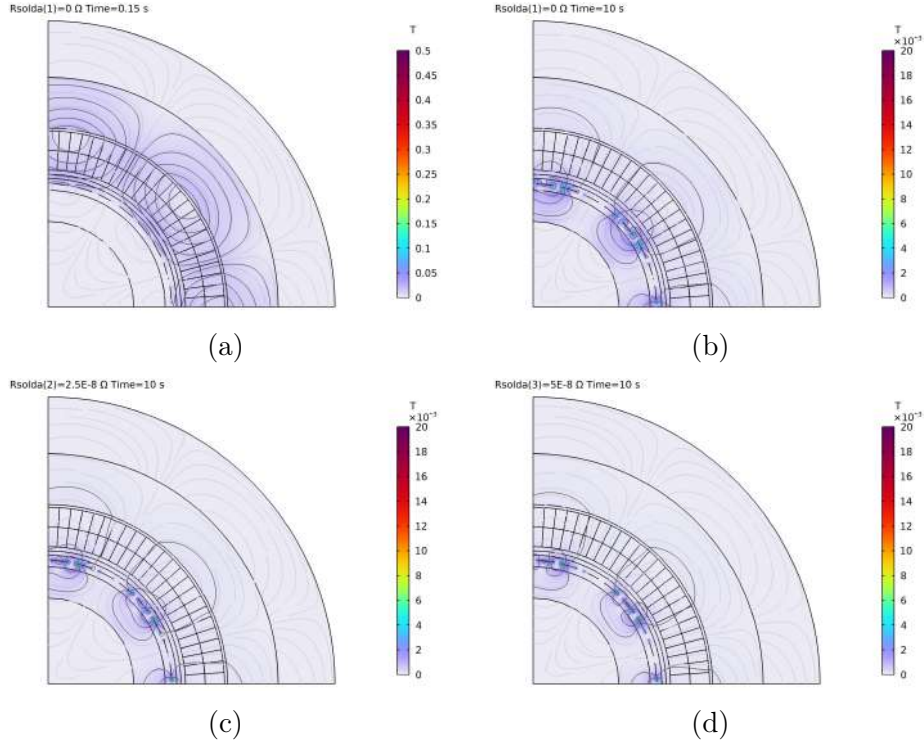


Figura 6.9: Resultados de densidade de campo magnético na geometria da máquina, simulações do ensaio de magnetização. (a) mostra a densidade de fluxo durante o pulso. (b), (c) e (d) mostram a densidade de fluxo no último instante de tempo simulado para diferentes resistências de solda.

e 0,4 s, a máquina está acelerando. A distorção do campo magnético causada pelo movimento fica evidente na distribuição das linhas de campo por estator e rotor. A distorção evidencia o efeito das correntes induzidas na gaiola e na espiral frente ao campo do estator. Aos 0,6 s, já com sincronização, a distorção permanece, indicando a diferença entre os ângulos do eixo magnético dos enrolamentos do rotor e do estator, diferença essa ligada à existência de conjugado síncrono. Com os resultados analisados instante a instante de tempo, há pouca diferença entre a distribuição de campo da máquina com enrolamento em espiral e a máquina com a gaiola.

As densidades de corrente normalizadas pela densidade de corrente crítica da gaiola e da espiral estão mostradas, respectivamente, nas Figuras 6.14 e 6.15. Nota-se que, para ambas as máquinas, a densidade de corrente induzida esteve próxima a $\pm J_c$ durante todo o processo de aceleração e sincronização. Ou seja, durante o processo de aceleração da máquina, a resistividade das fitas esteve próxima a

$$\rho = \frac{E_c}{J_c}, \quad (6.1)$$

indicando a proximidade do estado resistivo. Sabe-se que esse estado leva à indução de correntes persistentes na máquina durante o processo de magnetização por pulsos. A submissão às correntes alternadas com máximos próximos de J_c deve ter efeito

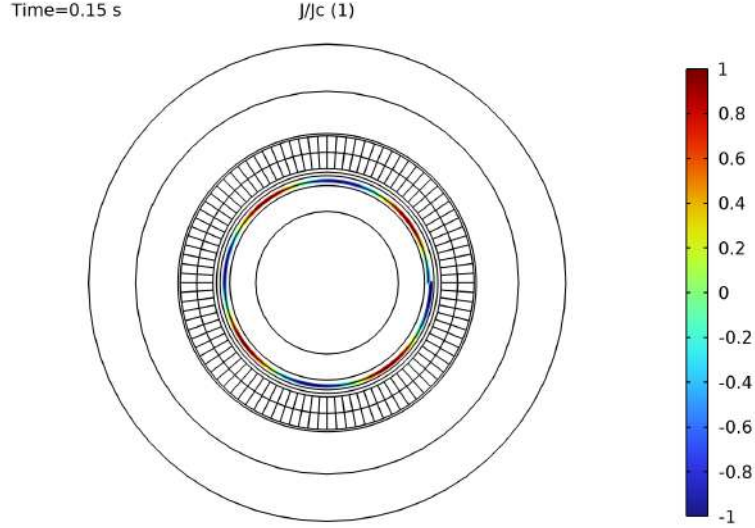


Figura 6.10: Densidade de corrente induzida normalizada pela densidade de corrente crítica no enrolamento em espiral, simulação do ensaio de magnetização.

semelhante. Espera-se, então, que o processo de aceleração da máquina permita indução de correntes persistentes tais que a máquina consiga sincronizar quando sua velocidade se equiparar à velocidade síncrona.

É exatamente o que se observa nas correntes totais por barra, Figura 6.16. Durante a aceleração, as correntes induzidas na gaiola podem ser decompostas em duas correntes. A primeira é a componente alternada, produzida pelo campo girante e seu arrasto enquanto há movimento relativo entre estator e campo do rotor. Ela está presente enquanto a máquina acelera e cessa quando a máquina sincroniza. A segunda componente é uma corrente contínua do tipo persistente, originada da interação dos campos e do estado resistivo a que os enrolamentos são submetidos durante a aceleração. Essa componente se altera ao longo do tempo, gerando as condições necessárias para a sincronização, ocorrida no instante 0,5 s.

Os resultados dos conjugados, resumidos na Figura 6.17, evidenciam os efeitos de sincronização e mostram as diferenças entre as duas topologias de máquinas. Os conjugados foram calculados com o método de Arkkio [144], de acordo com a expressão

$$\tau = N_{\text{setores}} \int_V \frac{B_r B_\phi |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{(r_{\text{ext}} - r_{\text{int}}) \mu_0} dV, \quad (6.2)$$

calculada de forma automática pelo COMSOL, tal que N_{setores} é o número de setores simulados, B_r é o campo magnético radial, B_ϕ é o campo magnético azimutal, $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ é distância entre os pontos mapeados pela integral e o raio mais interno, r_{ext} e r_{int} são os raios mais externos e mais internos da região de ar onde o conjugado é calculado. Neste trabalho, o conjugado foi calculado na metade do entreferro pertencente à

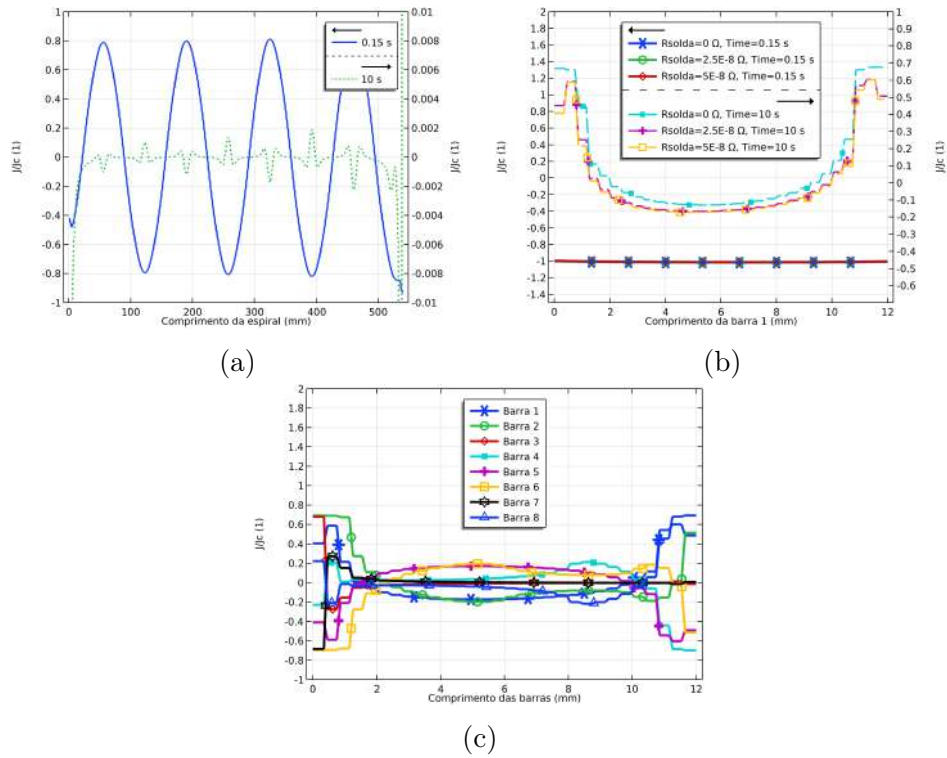


Figura 6.11: Densidade de corrente induzida normalizada pela densidade de corrente crítica no enrolamento em espiral, simulação do ensaio de magnetização. (a) mostra o resultado da espiral, com dois eixos separados; o da direita se refere ao resultado durante o pulso aplicado ao estator e o da esquerda se refere ao resultado após o pulso aplicado ao estator, em que a densidade de corrente é cerca de 100 vezes menor. (b) mostra o resultado na barra 1. (c) mostra o resultado em todas as barras no instante 10 s.

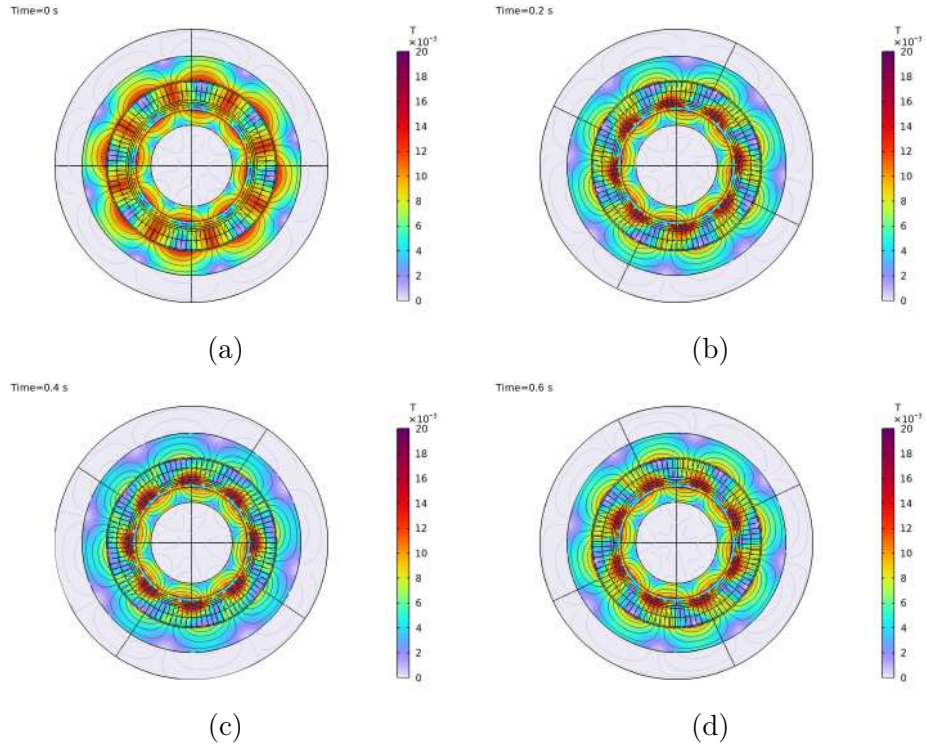


Figura 6.12: Densidade de fluxo magnético da máquina supercondutora de indução/síncrona durante simulação de ensaio com movimento, instantes 0 s, 0,2 s, 0,4 s e 0,6 s, respectivamente.

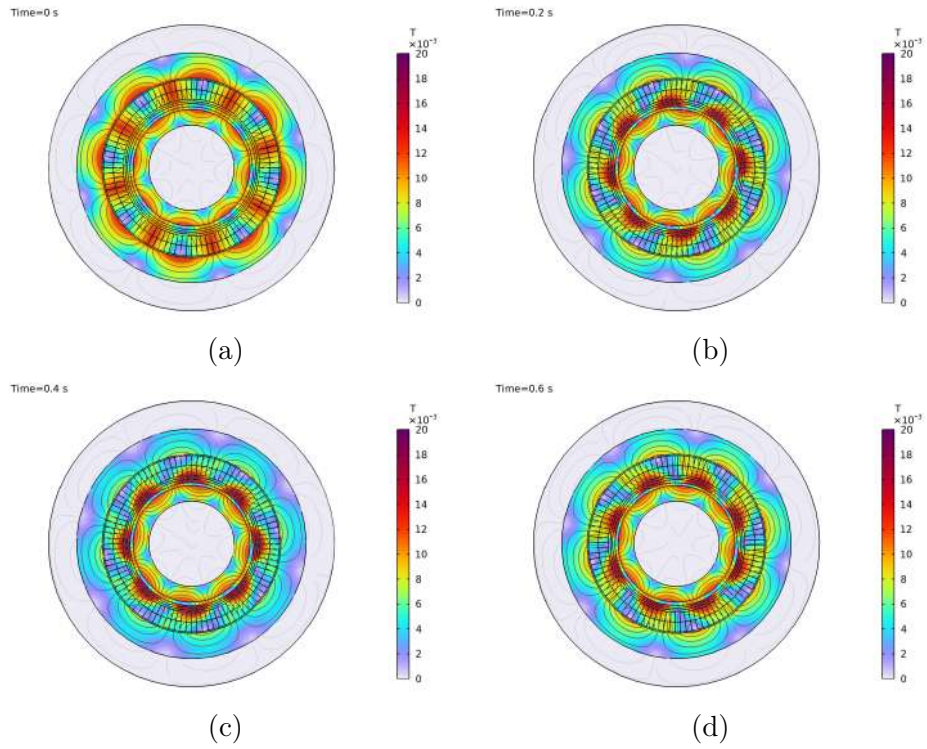


Figura 6.13: Densidade de fluxo magnético da máquina de fluxo aprisionado com enrolamento em espiral durante simulação de ensaio com movimento, instantes 0 s, 0,2 s, 0,4 s e 0,6 s, respectivamente.

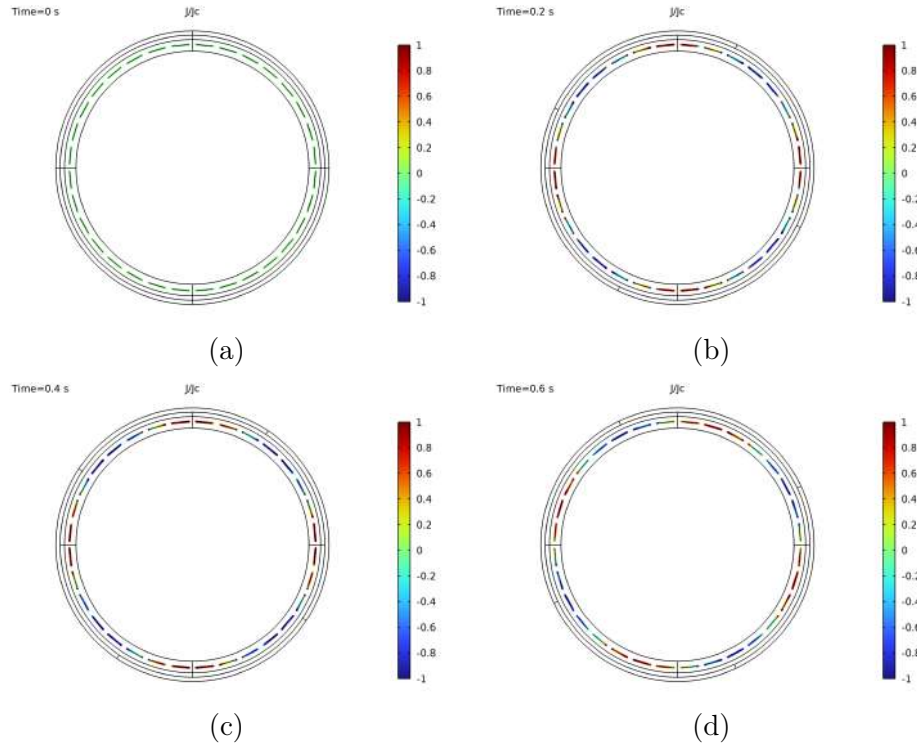


Figura 6.14: Densidade de corrente normalizada pela densidade de corrente crítica da máquina supercondutora de indução/síncrona durante simulação de ensaio com movimento.

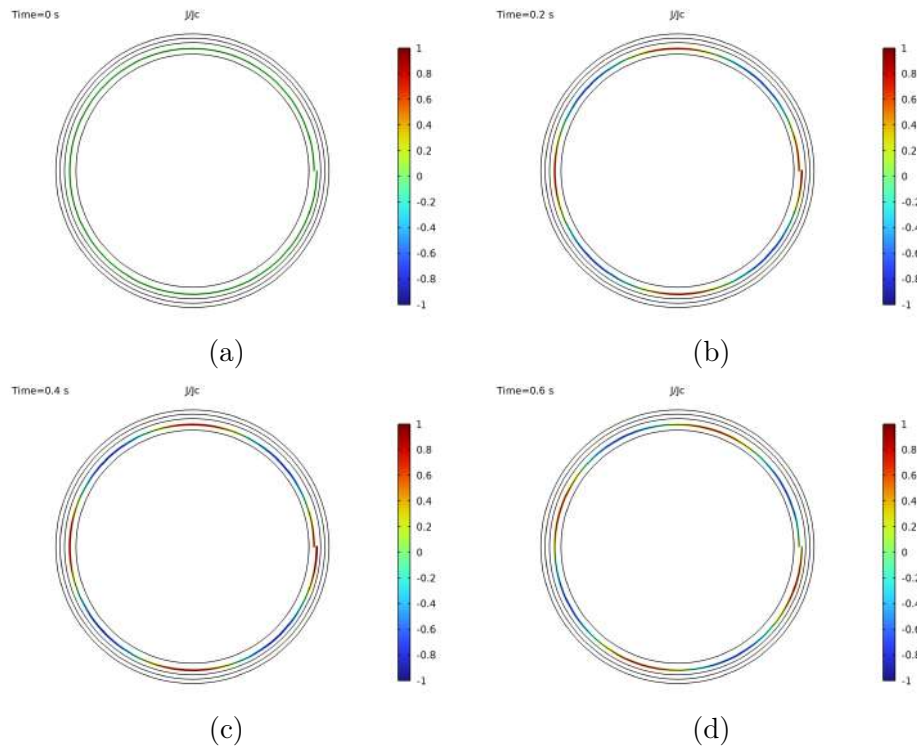


Figura 6.15: Densidade de corrente normalizada pela densidade de corrente crítica da máquina de fluxo aprisionado durante simulação de ensaio com movimento.

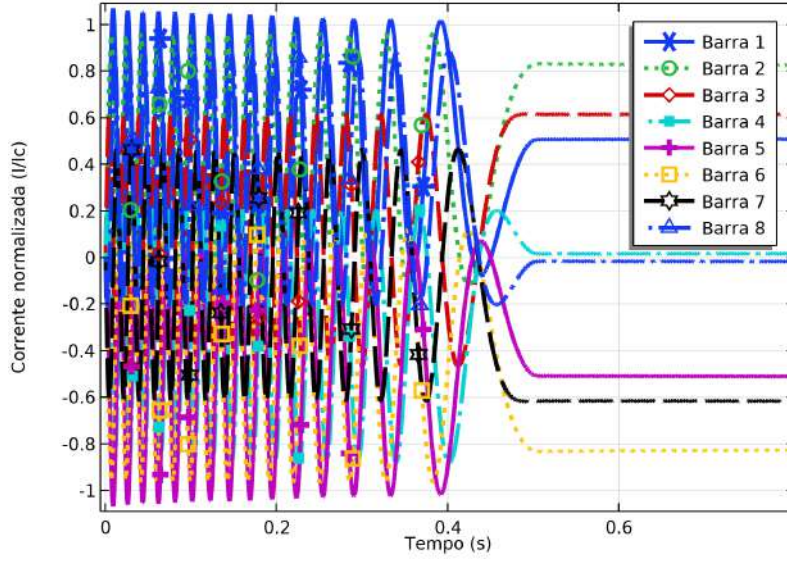


Figura 6.16: Correntes induzidas em cada barra da gaiola durante a simulação do ensaio com movimento.

malha do estator. São comparados os resultados da máquina com a espiral e com a gaiola sem solda, cujos resultados foram discutidos no texto, e com a gaiola com soldas de 50 nΩ. Vê-se que o conjugado da máquina com espiral é maior durante a aceleração e durante o regime síncrono. Isso ocorre porque esta máquina contém maior área coberta por supercondutores. O caso intermediário é a gaiola com a solda desconsiderada e o caso com menor conjugado é o da gaiola com solda. Nota-se, no entanto, que, embora tenha cerca de 40% mais material supercondutor, a máquina com a espiral conta com apenas cerca de 20% de ganho no conjugado. Tal resultado indica que a eficiência em termos de uso de material pode ser menor para essa topologia.

6.5 Resumo do capítulo

Este capítulo apresentou as contribuições desta tese para a aplicação da formulação T-A em máquinas supercondutoras, focando na máquina supercondutora de indução/síncrona com gaiola formada por barras feitas de fitas 2G e na máquina supercondutora de fluxo aprisionado com enrolamento em espiral. Os princípios de funcionamento de ambas as topologias de máquina foram discutidos e os modelos simulados foram descritos. Dois tipos de ensaio foram simulados. O primeiro é o ensaio de magnetização por pulsos, em que pulsos de corrente foram aplicados no estator das máquinas, produzindo corrente persistente na gaiola e no enrolamento em espiral. As duas máquinas foram comparadas em sua capacidade de aprisionamento de campo com pulsos e verificou-se que, ao menos para máquinas com espirais com poucas voltas, a assimetria provocada pelo formato espiral pode provocar distorções

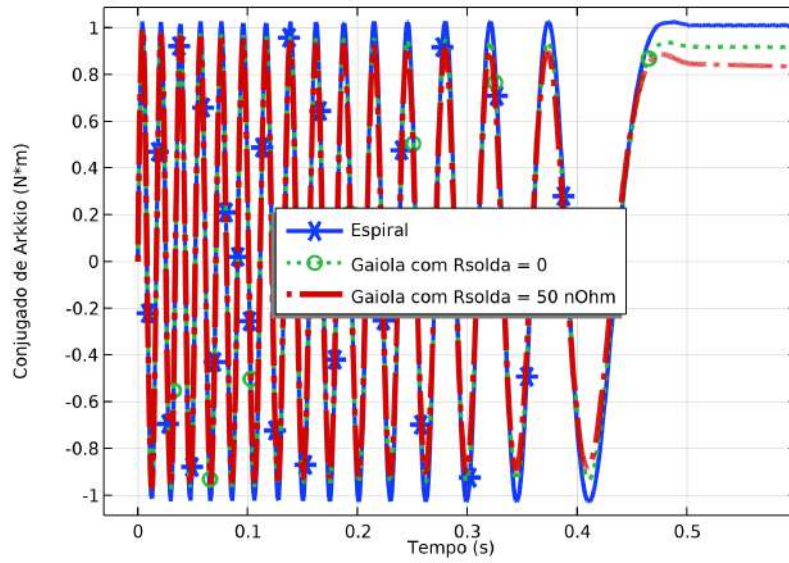


Figura 6.17: Conjugado desenvolvido durante as simulações do ensaio com movimento para ambas as topologias de máquinas.

de campo. Analisou-se também o efeito da presença de pontos de solda na gaiola, inclusão que é facilmente feita com o uso do método T-A-circuito, parte das contribuições desta tese. Verificou-se que a presença de solda provoca decaimento na corrente persistente, como esperado.

O segundo ensaio simulado foi o ensaio com movimento. Nesse ensaio, aplicaram-se correntes alternadas no estator da máquina, gerando campo girante. Então, aos 0,005 s, aplica-se movimento entre estator e rotor, partindo de velocidade nula até a velocidade síncrona da máquina. Foi possível, com essas simulações, observar o comportamento de ambas as topologias em suas regiões assíncronas e síncronas de operação. Verificou-se que a máquina com enrolamento espiral pode gerar mais conjugado, com menos eficiência em termos da quantidade de material supercondutor, a depender de seu *design* e otimização.

O capítulo 7, em seguida, faz uma síntese do trabalho e das contribuições apresentadas e discute trabalhos futuros, dando assim conclusão a esta tese.

Capítulo 7

Conclusão

Neste capítulo, é feita a conclusão da tese de doutorado, destacando as contribuições deste trabalho e suas possibilidades de trabalhos futuros.

7.1 Síntese do trabalho

Este trabalho se dedica a estudar métodos computacionais com elementos finitos para simular equipamentos elétricos compostos por fitas supercondutoras de segunda geração com magnetização induzida. Esses equipamentos têm sido estudados na literatura recente como maneiras de aproveitar as características do material supercondutor, ou seja, a capacidade de ter resistividade nula e de aprisionar campo magnético, gerando correntes persistentes, sem a necessidade de impor corrente diretamente ao material. Isso significa reduzir a complexidade do sistema como um todo, eliminando uma fonte de alimentação.

O desafio é superar em desempenho os métodos computacionais usados anteriormente para simular tais sistemas, como o método de equações integrais e a formulação H. O método escolhido foi a formulação T-A, um conjunto de equações diferenciais acopladas que usa o potencial vetor corrente, T , e o potencial vetor magnético, A , como grandezas primárias. Essa formulação tem a vantagem de permitir a modelagem computacional de supercondutores e outros materiais de forma totalmente integrada, ou seja, com todos os domínios simulados simultaneamente, em um único sistema de equações. A formulação T-A também torna mais simples a implementação de movimento.

Até então, poucos trabalhos na literatura de simulações de supercondutores se dedicaram a estudar a formulação T-A em sistemas com magnetização induzida em aproximações 2D. Esse tipo de aproximação tem valor estratégico pois, se comparada à modelagem 3D, ela torna possível a obtenção de resultados factíveis com custo computacional menor.

Este trabalho apresentou uma metodologia que usa do acoplamento de circuitos

com a formulação T-A para representar corretamente as continuidades entre fitas no corte 2D. Neste sistema, a densidade de corrente nas fitas é calculada pela formulação T, o campo magnético é calculado pela formulação A e a distribuição de corrente entre fitas ou entre partes de uma mesma fita é calculada pelo circuito. Movimento de malha foi implementado, assim como modelos não-lineares para os materiais magnéticos. Isso torna possível as simulações de uma gama enorme de sistemas com fitas com magnetização induzida. Duas aplicações foram exploradas no trabalho: mancais com laços duplos cruzados e máquinas de indução/síncronas com gaiola de esquilo com fitas 2G.

Os mancais com laços duplos cruzados haviam sido representados em trabalhos anteriores com o método de equações integrais, de forma desacoplada entre supercondutores e trilho e com uso de simetria para redução do custo computacional. Essa modelagem permitiu estudos aprofundados da força de levitação do mancal, mas trouxe restrições, principalmente para simulações de ensaios de deslocamento lateral, que não têm simetria. Neste trabalho, dados experimentais obtidos em trabalhos anteriores foram usados para validação do método de simulação proposto. Com o método estabelecido, o trabalho contribuiu para a extensão do conhecimento sobre este mancal com as simulações de ensaios de deslocamento lateral. Foram exploradas grandezas que ainda não haviam sido analisadas em trabalhos anteriores, como a densidade de corrente e a densidade de fluxo magnético nas fitas. A dependência entre força de levitação e força lateral para laços duplos cruzados também foi demonstrada.

A segunda aplicação do método T-A-circuito explorada neste trabalho foi a topologia de máquinas de indução/síncronas supercondutoras com gaiolas de esquilo formadas por fitas 2G. Tais máquinas, em simulações em elementos finitos, são em geral representadas na literatura com o método de homogeneização. Este método reduz o custo computacional, mas não permite observar o processo de magnetização fita a fita, além de, sem circuito, ser mais difícil demonstrar os efeitos dos pontos de solda que ajudam na montagem da gaiola. Neste trabalho demonstrou-se que a modelagem dessas máquinas com formulação T-A 2D e circuitos permite a inclusão dos efeitos da solda, tornando essas simulações mais próximas da realidade da máquina. Essa topologia foi comparada à topologia de máquina de fluxo aprisionado com enrolamentos em espiral, cujo funcionamento é semelhante, em dois aspectos: magnetização por pulsos, que ajuda a avaliar a capacidade de aprisionamento, e comportamento quando há movimento relativo.

O ensaio de magnetização se baseia em trabalhos anteriores na literatura que exploraram a capacidade de indução de corrente persistente em sistemas com laços sem emenda, provando que é necessário que a fita atinja estado dissipativo para que a corrente persistente surja. Esse conceito foi aplicado às máquinas, e demonstrou-se

a capacidade dessas máquinas de ter correntes induzidas e a duração média de tais correntes com soldas na faixa de $n\Omega$.

Os ensaios de dinâmica demonstram os três estágios pelos quais máquinas de fluxo aprisionado e de indução/síncrona passam: dissipativo, arrasto de fluxo e síncrono. Verificou-se a capacidade da máquina de se sincronizar e permanecer síncrona, fato também observado experimentalmente. A distribuição de corrente entre as várias barras de fitas 2G foi demonstrada, assim como a densidade de corrente por barra.

7.2 Contribuições

Este trabalho contribui em três setores na área de simulações de equipamentos supercondutores. O primeiro se refere à proposição de uma modelagem incluindo duas equações diferenciais, uma para o potencial vetor magnético e outra para o potencial vetor corrente, e um circuito elétrico, cuja função é fornecer as condições de fronteira necessárias ao cálculo da equação diferencial do potencial vetor corrente. Em sistemas com corrente induzida ou com divisores de corrente, as condições de fronteira de Dirichlet não são conhecidas *a priori*, o que indica falta de informações no sistema de equações. O circuito atua calculando a distribuição de correntes correta, deixando à formulação T a tarefa de calcular a distribuição de densidade de corrente entre as fitas. A proposta desta tese é a de que o supercondutor seja modelado no circuito com a tensão média na fita calculada pela soma do campo elétrico que surge do efeito de resistividade do supercondutor ao campo elétrico induzido, calculado pela derivada temporal do potencial vetor magnético. Essa proposta foi publicada em [134], explorando a continuidade de corrente em cabos formados por conjuntos de fitas, em que se conhece a corrente total mas não a corrente que passa em cada trecho, formando um divisor de corrente. Outro trabalho oriundo desta tese, a ser submetido, demonstra a aplicação da proposta a sistemas somente com corrente induzida, foco desta tese.

O segundo setor é a aplicação da metodologia proposta em mancais magnéticos supercondutores com laços duplos cruzados. Essa aplicação serviu como validação experimental do método T-A-circuito. A partir desta validação, seguiu-se a análise do equipamento contribuindo com simulações de ensaios de força de levitação com deslocamentos verticais com amplitudes entre ± 10 mm e ± 30 mm. As grandezas locais foram analisadas fita a fita em vários instantes de tempo, o que permite observar a maneira como as fitas se magnetizam com o movimento, como as correntes são induzidas e como se dá a transição entre regimes do ponto de vista das fitas. Contribuiu-se também com simulações de ensaios de força lateral, que não haviam sido simulados ainda. Demonstrou-se como a magnetização obtida com movimento

vertical altera a dinâmica de ganho da força lateral.

O terceiro setor de contribuição é a aplicação da metodologia proposta a máquinas de indução/síncrona supercondutoras com gaiolas de esquilo formadas por fitas 2G e sua comparação com máquina de fluxo aprisionado com enrolamento em espiral, simulada com a formulação T-A, metodologia também estudada nesta tese e publicada em [143]. Dois ensaios foram simulados, o ensaio de magnetização por pulsos e o ensaio com movimento imposto. O processo de carregamento indutivo de laços de fitas supercondutoras sem emenda é pesquisado no LASUP [43] e seu estudo contribui na compreensão das regiões de operação de ambas as topologias de máquinas estudadas neste trabalho. A simulação do ensaio contribui na avaliação da capacidade de carregamento indutivo de cada tipo de enrolamento de campo. Quanto maior for essa capacidade, maior é a região síncrona de trabalho da máquina. Neste trabalho, são analisadas a influência da existência de solda na máquina de indução-síncrona e as diferenças entre as duas topologias no processo de magnetização. Nota-se que, com a metodologia de T-A-circuito, a inclusão da solda como ponto de interferência na distribuição de correntes e nos cálculos de perdas é simples e direta. O ensaio com movimento imposto é simulado para que se possa observar as regiões assíncrona e síncrona das máquinas em conjunto com sua capacidade de gerar e sustentar conjugado. Os resultados são parte de outro artigo, ainda a ser submetido.

As publicações feitas durante o período desta tese são:

1. **Simulation of Superconducting Machine With Stacks of Coated Conductors Using Hybrid A-H Formulation** [142], trabalho publicado na revista *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*.
2. **Study of the Voltage Behavior of Jointless Superconducting 2G Loops during Pulse Magnetization** [43], trabalho publicado na revista *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*.
3. **Simulação de Máquina Supercondutora com Fitas 2G Usando a Formulação T-A** [143], trabalho apresentado na conferência "19^o Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14^o Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2020), 2020, Niterói - RJ. Anais 19^o Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14^o Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2020). São Caetano do Sul: Editora SBMO, 2020".
4. **An integrated methodology to assess AC losses in kHz range using FEM and Partial Element Equivalent Circuit** [145], publicado na revista *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*.

5. **2D Modeling of HTS Coils with T-A Formulation: How to Handle Different Coupling Scenarios** [134], publicado na revista *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*

7.3 Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros podem ser divididos em três áreas: aplicações do método de acoplamento com circuitos, estudos sobre mancais magnéticos supercondutores com laços sem emenda e estudos sobre máquinas supercondutoras de indução/síncrona.

Como mencionado anteriormente, a metodologia de se usar circuitos para promover o acoplamento entre fitas em cortes 2D pode ter uma gama grande de aplicações. Como projeto futuro de alto impacto, cita-se o modelo expandido para frequências mais altas, ao se trocar os parâmetros concentrados por parâmetros distribuídos com o uso de equações de linhas de transmissão. Isso tornaria possível o cálculo de harmônicos em altas frequências, o que pode ser interessante em aplicações como cabos e máquinas. Outro ponto de contribuição futura é a inclusão do modelo de representação das outras camadas de fita, desenvolvido e estudado durante o período desta tese [145], nas divisões de corrente com múltiplas fitas ou trechos de mesma fita.

Os estudos sobre laços duplos cruzados, com o uso da metodologia descrita neste trabalho, podem explorar a aplicação deste tipo de laço em outros equipamentos, como máquinas, além de expandir o conhecimento sobre os próprios mancais. A validação total dos ensaios de deslocamento lateral ainda precisa ser feita, além de estudos sobre o efeito de conjugado causado pelas cabeças de bobina. Outras configurações de laços sem emenda, como o laço com três seções [146], foram propostas e sua aplicação em mancais, até onde o conhecimento desta tese vai, ainda não foram exploradas.

O modelo de acoplamento aplicado a máquinas proporciona uma plataforma de auxílio ao *design* dessas máquinas, ajudando a prever a distribuição de densidade de corrente ao longo dos condutores, a densidade de fluxo, a possibilidade de surgimento de pontos quentes que podem danificar a máquina, dentre outros parâmetros. Um possível trabalho futuro é, portanto, a fabricação própria de um protótipo de máquina de indução/síncrona para que se possa aumentar o conhecimento sobre essas máquinas, sobretudo sobre a influência da solda.

Referências Bibliográficas

- [1] “Gross domestic product measured in international US\$ using 2011 prices to adjust for price changes over time (inflation) and price differences between countries. Calculated by multiplying GDP per capita with population.” Our World in Data; The Madison Project, 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/gdp-world-regions-stacked-area?country=Sub-Saharan+Africa~Latin+America~Middle+East~South+and+South-East+Asia~East+Asia~Western+Offshoots~Eastern+Europe~Western+Europe>>. "Online; acessado em 24 de Março de 2022".
- [2] “Global warming: monthly temperature anomaly”. Our World in Data; NASA, 2022. Disponível em: <https://ourworldindata.org/explorers/climate-change?tab=table&facet=none&country=~OWID_WRL&Metric=Temperature+anomaly&Long-run+series%3F=false>. "Online; acessado em 24 de Março de 2022".
- [3] “Anomalies vs. Temperature”. National Centers For Environmental Information; NOAA - Estados Unidos, 2022. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/dyk/anomalies-vs-temperature>>. "Online; acessado em 23 de Setembro de 2022".
- [4] BARZKAR, A., GHASSEMI, M. “Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft: A Review”, *IEEE Access*, v. 8, pp. 169314–169332, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024168.
- [5] GOHARDANI, A. S., DOULGERIS, G., SINGH, R. “Challenges of future aircraft propulsion: A review of distributed propulsion technology and its potential application for the all electric commercial aircraft”, *Progress in Aerospace Sciences*, v. 47, n. 5, pp. 369–391, 2011. ISSN: 0376-0421. doi: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.09.001>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042110000497>>.
- [6] KRESIN, V. Z., WOLF, S. A. *Fundamentals of Superconductivity*. New York, Springer, 1992.

- [7] SOTELO, G. G., DE ANDRADE, R., FERREIRA, A. C. “Magnetic Bearing Sets for a Flywheel System”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 2150–2153, 2007. doi: 10.1109/TASC.2007.899268.
- [8] SOTELO, G. G., DIAS, D. H. N., DE ANDRADE, R., et al. “Experimental and Theoretical Levitation Forces in a Superconducting Bearing for a Real-Scale Maglev System”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 5, pp. 3532–3540, 2011. doi: 10.1109/TASC.2011.2159114.
- [9] “Sumário mineral de 2017”. 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 27 de Setembro de 2022.
- [10] SUBRAMANYAM, G., BOOLCHAND, P. “Engineering Superconductivity”. cap. HTS Processing: Bulk, Thin Film, and wires, New York, Wiley-Interscience, 2001.
- [11] SASS, F., DIAS, D. H. N., SOTELO, G. G., et al. “Coated Conductors for the Magnetic Bearing Application”, *Physics Procedia*, v. 36, pp. 1008–1013, 2012. ISSN: 1875-3892. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.097>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212020342>>. SUPERCONDUCTIVITY CENTENNIAL Conference 2011.
- [12] ZERMENO, V. M. R., ABRAHAMSEN, A. B., MIJATOVIC, N., et al. “Calculation of alternating current losses in stacks and coils made of second generation high temperature superconducting tapes for large scale applications”, *Journal of Applied Physics*, v. 114, n. 17, pp. 173901, 2013. doi: 10.1063/1.4827375. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4827375>>.
- [13] BRAMBILLA, R., GRILLI, F., MARTINI, L., et al. “Integral equations for the current density in thin conductors and their solution by the finite-element method”, *Superconductor Science and Technology*, v. 21, n. 10, pp. 105008, jul 2008. doi: 10.1088/0953-2048/21/10/105008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/10/105008>>.
- [14] 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>>.

- [15] MARTINS, F. G. R., SASS, F., DE ANDRADE, R. “Simulations of REBCO tape jointless double crossed loop coils with an integral equations method”, *Superconductor Science and Technology*, v. 32, n. 4, pp. 044002, feb 2019. doi: 10.1088/1361-6668/aafd08. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aafd08>>.
- [16] BENKEL, T., LAO, M., LIU, Y., et al. “T-A Formulation to Model Electrical Machines with HTS Coated Conductor Coils”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, pp. 1–1, 2020. ISSN: 2378-7074. doi: 10.1109/TASC.2020.2968950.
- [17] MATSUSHITA, T. *Flux Pinning in Superconductors*. Berlin, Springer, 2007.
- [18] LARBALESTIER, D., GUREVICH, A., FELDMANN, D. M., et al. “High-Tc superconducting materials for electric power applications”, *Nature*, v. 414, pp. 368–377, 2001. ISSN: 1476-4687. doi: 10.1038/35104654. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/35104654>>.
- [19] 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/9/s23>>.
- [20] BERNSTEIN, P., NOUDEM, J. “Superconducting magnetic levitation: principle, materials, physics and models”, v. 33, n. 3, pp. 033001, jan 2020. doi: 10.1088/1361-6668/ab63bd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab63bd>>.
- [21] YOO, S., HIGUCHI, T., SAKAI, N., et al. “RE-Ba-Cu-O for high functional superconducting permanent magnet”, *Materials Science and Engineering: B*, v. 53, n. 1, pp. 203–210, 1998. ISSN: 0921-5107. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(97\)00328-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(97)00328-0). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510797003280>>.
- [22] FUJIMOTO, H., KAMIJO, H., HIGUCHI, T., et al. “Preliminary study of a superconducting bulk magnet for the Maglev train”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 9, n. 2, pp. 301–304, 1999. doi: 10.1109/77.783295.
- [23] WANG, J., WANG, S., ZENG, Y., et al. “The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world”, *Phy-*

- sica C: Superconductivity*, v. 378-381, pp. 809–814, 2002. ISSN: 0921-4534. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)01548-4](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)01548-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453402015484>.
- [24] ZHENG, J., HUANG, H., ZHANG, S., et al. “A General Method to Simulate the Electromagnetic Characteristics of HTS Maglev Systems by Finite Element Software”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 5, pp. 1–8, 2018. doi: 10.1109/TASC.2018.2807758.
- [25] WANG, L., DENG, Z., LI, Y., et al. “Vertical–Lateral Coupling Force Relation of the High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation System”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 31, n. 1, pp. 1–6, 2021. doi: 10.1109/TASC.2020.3015022.
- [26] LI, H., DENG, Z., JIN, L., et al. “Lateral motion stability of high-temperature superconducting maglev systems derived from a nonlinear guidance force hysteretic model”, *Superconductor Science and Technology*, v. 31, n. 7, pp. 075010, jun 2018. doi: 10.1088/1361-6668/aac860. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aac860>.
- [27] NICOLSKY, R., PEREIRA, A., DE ANDRADE, R., et al. “Development of hybrid bearing system with thrust superconducting magnetic bearing and radial active electromagnetic bearing”, *Physica C: Superconductivity*, v. 341-348, pp. 2509–2512, 2000. ISSN: 0921-4534. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)01298-3](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)01298-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453400012983>. Proceedings of the International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature Superconductors VI.
- [28] DE ANDRADE, R., CARDOSO, J., DOS SANTOS, G., et al. “Performance of Nd-Fe-B and ferrite magnets in superconducting linear bearings with bulk YBCO”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 13, n. 2, pp. 2271–2274, 2003. doi: 10.1109/TASC.2003.813063.
- [29] DE ANDRADE, R., FERREIRA, A., SOTELO, G., et al. “A superconducting high-speed flywheel energy storage system”, *Physica C: Superconductivity*, v. 408-410, pp. 930–931, 2004. ISSN: 0921-4534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2004.03.168>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092145340400574X>. Proceedings of the International Conference on

- [30] STEPHAN, R., NICOLSKY, R., NEVES, M., et al. “A superconducting levitation vehicle prototype”, *Physica C: Superconductivity*, v. 408-410, pp. 932–934, 2004. ISSN: 0921-4534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2004.03.169>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453404005751>>. Proceedings of the International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity. High Temperature Superconductors VII – M2SRIO.
- [31] MOTTA, E. S., DIAS, D. H. N., SOTELO, G. G., et al. “Optimization of a Linear Superconducting Levitation System”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 5, pp. 3548–3554, 2011. doi: 10.1109/TASC.2011.2161986.
- [32] SCHULTZ, L., DE HAAS, O., VERGES, P., et al. “Superconductively levitated transport system - the SupraTrans project”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, pp. 2301–2305, 2005. doi: 10.1109/TASC.2005.849636.
- [33] KUEHN, L., MUELLER, M., SCHUBERT, R., et al. “Static and Dynamic Behavior of a Superconducting Magnetic Bearing Using YBCO Bulk Material”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 2079–2082, 2007. doi: 10.1109/TASC.2007.897196.
- [34] BEYER, C., DE HAAS, O., VERGES, P., et al. “Guideway and turnout switch for the SupraTrans project”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 43, pp. 991–994, jun 2006. doi: 10.1088/1742-6596/43/1/242. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/43/1/242>>.
- [35] ESPENHAHN, T., BERGER, D., HAMEISTER, S., et al. “Design and Validation of Switchable Tracks for Superconducting Levitation Systems”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, pp. 1–5, 2017. doi: 10.1109/TASC.2017.2652542.
- [36] ESPENHAHN, T., BERGER, D., SCHULTZ, L., et al. “Levitation force measurement on a switchable track for superconducting levitation systems”, *Superconductor Science and Technology*, v. 31, n. 12, pp. 125007, oct 2018. doi: 10.1088/1361-6668/aae45f. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aae45f>>.

- [37] SASS, F., SOTELO, G. G., POLASEK, A., et al. “Application of 2G-Tape for Passive and Controlled Superconducting Levitation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3, pp. 1511–1514, 2011. doi: 10.1109/TASC.2010.2103539.
- [38] SASS, F., NOGUEIRA DIAS, D. H., GONÇALVES SOTELO, G., et al. “Superconducting Levitation Using Coated Conductors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, pp. 3600905–3600905, 2013. doi: 10.1109/TASC.2012.2234172.
- [39] SASS, F., DIAS, D. H. N., SOTELO, G. G., et al. “Lateral Displacement Influence on the Levitation Force of YBCO Coated Conductor Linear Bearings”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 24, n. 3, pp. 1–5, 2014. doi: 10.1109/TASC.2013.2289300.
- [40] LIU, K., YANG, W., MA, G., et al. “Experiment and simulation of superconducting magnetic levitation with REBCO coated conductor stacks”, v. 31, n. 1, pp. 015013, dec 2017. doi: 10.1088/1361-6668/aa987b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa987b>>.
- [41] SASS, F., RAMOS DE CASTRO, A., GONÇALVES SOTELO, G., et al. “Persistent currents in a magnetic bearing with coated conductors”, *Journal of Applied Physics*, v. 118, n. 20, pp. 203901, 2015. doi: 10.1063/1.4936178. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4936178>>.
- [42] SANTOS DA CRUZ, V., TELLES, G. T., FERREIRA, A. C., et al. “Pulse Magnetization of Jointless Superconducting Loops for Magnetic Bearings Height Control”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 4, pp. 1–4, 2018. doi: 10.1109/TASC.2018.2816105.
- [43] DA CRUZ, V. S., TELLES, G., SANTOS, B. M. O., et al. “Study of the Voltage Behavior of Jointless Superconducting 2G Loops During Pulse Magnetization”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 30, n. 5, pp. 1–6, 2020. doi: 10.1109/TASC.2020.2968919.
- [44] MARTINS, F. G. R., SASS, F., FERREIRA, A. C., et al. “A Novel Magnetic Bearing Using REBCO Double Crossed Loop Coils”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 4, pp. 1–5, 2018. doi: 10.1109/TASC.2018.2813371.
- [45] HARAN, K. S., KALSI, S., ARNDT, T., et al. “High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap”, *Superconductor Science and Technology*, v. 30, n. 12, pp. 123002,

2017. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0953-2048/30/i=12/a=123002>>.

- [46] STEKLY, Z. J. J., WOODSON, H. H. “Rotating Machinery Utilizing Superconductors”, *IEEE Transactions on Aerospace*, v. 2, n. 2, pp. 826–842, April 1964. ISSN: 0536-1516. doi: 10.1109/TA.1964.4319673.
- [47] MUELLER, P. M. “Rotating Electric Power Equipment with Superconducting Elements”, *IEEE Transactions on Aerospace*, v. 2, n. 2, pp. 843–850, April 1964. ISSN: 0536-1516. doi: 10.1109/TA.1964.4319674.
- [48] OBERLY, C. “Air force applications of lightweight superconducting machinery”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 13, n. 1, pp. 260–268, January 1977. ISSN: 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.1977.1059255.
- [49] WOODSON, H., J. STEKLY, Z., HALAS, E. “A Study of Alternators with Superconducting Field Windings: I - Analysis”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-85, n. 3, pp. 264–274, mar. 1966. ISSN: 0018-9510. doi: 10.1109/TPAS.1966.291667. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4073020/>>.
- [50] STEKLY, Z., WOODSON, H., HATCH, A., et al. “A Study of Alternators with Superconducting Field Windings: II - Experiment”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-85, n. 3, pp. 274–280, mar. 1966. ISSN: 0018-9510. doi: 10.1109/TPAS.1966.291668. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4073021/>>.
- [51] WOODSON, H. H., SMITH, J. L., THULLEN, P., et al. “The Application Of Superconductors In The Field Windings Of Large Synchronous Machines”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-90, n. 2, pp. 620–627, March 1971. ISSN: 0018-9510. doi: 10.1109/TPAS.1971.293066.
- [52] MOLE, C. J., BRENNER, W. C., HALLER, H. E. “Superconducting electrical machinery”, *Proceedings of the IEEE*, v. 61, n. 1, pp. 95–105, Jan 1973. ISSN: 0018-9219. doi: 10.1109/PROC.1973.8976.
- [53] STEVENS, H., SUPERCZYNSKI, M., DOYLE, T., et al. “Superconducting machinery for naval ship propulsion”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 13, n. 1, pp. 269–274, January 1977. ISSN: 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.1977.1059460.

- [54] Foner, S., Schwartz, B. B. (Eds.). *Superconducting Machines and Devices*. Boston, MA, Springer US, 1974. ISBN: 978-1-4684-2786-8 978-1-4684-2784-4. doi: 10.1007/978-1-4684-2784-4. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4684-2784-4>>.
- [55] EDICK, J. D., SCHIFERL, R. F., JORDAN, H. E. “High temperature superconductivity applied to electric motors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 2, n. 4, pp. 189–194, Dec 1992. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/77.182730.
- [56] JOSHI, C. H., PRUM, C. B., SCHIFERL, R. F., et al. “Demonstration of two synchronous motors using high temperature superconducting field coils”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 5, n. 2, pp. 968–971, June 1995. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/77.402711.
- [57] MIKKONEN, R., SODERLUND, L., ERIKSSON, J. . “The design and construction of a 1500 W HTS superconducting synchronous machine”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 32, n. 4, pp. 2377–2380, July 1996. ISSN: 0018-9464. doi: 10.1109/20.511351.
- [58] ERIKSSON, J.-T., MIKKONEN, R., PAASI, J., et al. “A HTS synchronous motor at different operating temperatures”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 7, n. 2, pp. 523–526, jun. 1997. ISSN: 10518223. doi: 10.1109/77.614556. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/614556/>>.
- [59] WALTMAN, D., SUPERCZYNSKI, M. “High-temperature superconducting magnet motor demonstration”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 5, n. 4, pp. 3532–3535, dez. 1995. ISSN: 10518223. doi: 10.1109/77.482146. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/482146/>>.
- [60] SUPERCZYNSKI, M., WALTMAN, D. “Homopolar motor with high temperature superconductor field windings”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 7, n. 2, pp. 513–518, jun. 1997. ISSN: 10518223. doi: 10.1109/77.614554. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/614554/>>.
- [61] NICK, W., NEROWSKI, G., NEUMÜLLER, H.-W., et al. “380 kW synchronous machine with HTS rotor windings—development at Siemens and first test results”, *Physica C: Superconductivity*, v. 372-376, pp. 1506–1512, ago. 2002. ISSN: 09214534. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01069-9.

Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921453402010699>>.

- [62] HYUN-MAN JANG, MUTA, I., HOSHINO, T., et al. “Design and electrical characteristics analysis of 100 HP HTS synchronous motor in 21st century frontier project, Korea”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 13, n. 2, pp. 2197–2200, jun. 2003. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2003.813034. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1212055/>>.
- [63] AL-MOSAWI, M., BEDUZ, C., YANG, Y. “Construction of a 100 kVA High Temperature Superconducting Synchronous Generator”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, pp. 2182–2185, jun. 2005. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2005.849607. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1440096/>>.
- [64] BAILEY, W., WEN, H., AL-MOSAWI, M., et al. “Testing of a Lightweight Coreless HTS Synchronous Generator Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3, pp. 1159–1162, jun. 2011. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2010.2093486. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5675703/>>.
- [65] ABRAHAMSEN, A., JENSEN, B., SEILER, E., et al. “Feasibility study of 5MW superconducting wind turbine generator”, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, v. 471, n. 21-22, pp. 1464–1469, nov. 2011. ISSN: 09214534. doi: 10.1016/j.physc.2011.05.217. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921453411003042>>.
- [66] JUNGWOOK SIM, KWANGYOUN LEE, GUESSO CHA, et al. “Development of a HTS squirrel cage induction motor with HTS rotor bars”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 14, n. 2, pp. 916–919, 2004.
- [67] SEKIGUCHI, D., NAKAMURA, T., MISAWA, S., et al. “Trial Test of Fully HTS Induction/Synchronous Machine for Next Generation Electric Vehicle”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 3, pp. 5200904–5200904, jun. 2012. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2011.2176094. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6081900/>>.
- [68] SUGIMOTO, H., TSUDA, T., MORISHITA, T., et al. “Design of an Axial Flux Inductor Type Synchronous Motor With the Liquid Nitrogen Coo-

led Field and Armature HTS Windings”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 1571–1574, 2007.

- [69] QU, T., SONG, P., YU, X., et al. “Development and testing of a 2.5 kW synchronous generator with a high temperature superconducting stator and permanent magnet rotor”, *Superconductor Science and Technology*, v. 27, n. 4, pp. 044026, abr. 2014. ISSN: 0953-2048, 1361-6668. doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044026. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/27/4/044026>>.
- [70] LI, W., CHAU, K., CHING, T., et al. “Design of a High-speed Superconducting Bearingless Machine for Flywheel Energy Storage Systems”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, pp. 1–1, 2014. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2014.2367008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6945852/>>.
- [71] LI, W., CHING, T. W., CHAU, K. T. “A New High-Temperature Superconducting Vernier Permanent-Magnet Machine for Wind Turbines”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 27, n. 4, pp. 1–5, jun. 2017. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2017.2669138. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7855721/>>.
- [72] MCCULLOCH, M., DEW-HUGHES, D. “Brushless ac machines with high temperature superconducting rotors”, *Materials Science and Engineering: B*, v. 53, n. 1-2, pp. 211–215, maio 1998. ISSN: 09215107. doi: 10.1016/S0921-5107(97)00329-2. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921510797003292>>.
- [73] KOVALEV, L. K., ILUSHIN, K. V., KONEEV, S. M. ., et al. “Hysteresis and reluctance electric machines with bulk HTS rotor elements”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 9, n. 2, pp. 1261–1264, June 1999. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/77.783530.
- [74] INÁCIO, D., PINA, J. M., MARTINS, J., et al. “Lumped Parameters Equivalent Circuit of a Superconducting Hysteresis Motor”, *Physics Procedia*, v. 36, pp. 975–979, 2012. ISSN: 1875-3892. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.091>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212020287>>. SUPERCONDUCTIVITY CENTENNIAL Conference 2011.
- [75] OSWALD, B., KRONE, M., SOLL, M., et al. “Superconducting reluctance motors with YBCO bulk material”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 9, n. 2, pp. 1201–1204, jun. 1999. ISSN: 10518223.

doi: 10.1109/77.783515. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/783515/>>.

- [76] BARNES, G., MCCULLOCH, M., DEW-HUGHES, D. “Computer modelling of type II superconductors in applications”, *Superconductor Science and Technology*, v. 12, n. 8, pp. 518–522, jul 1999. doi: 10.1088/0953-2048/12/8/308. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/12/8/308>>.
- [77] HULL, J., SENGUPTA, S., GAINES, J. “Trapped-flux internal-dipole superconducting motor/generator”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 9, n. 2, pp. 1229–1232, jun. 1999. ISSN: 10518223. doi: 10.1109/77.783522. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/783522/>>.
- [78] STOREY, R., COOMBS, T., CAMPBELL, A., et al. “Development of superconducting DC machines using bulk YBCO”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 9, n. 2, pp. 1253–1256, jun. 1999. ISSN: 10518223. doi: 10.1109/77.783528. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/783528/>>.
- [79] SUNG-HOON KIM, SONG-YOP HAHN. “Analysis and design of a induction generator with a superconducting bulk magnet rotor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 10, n. 1, pp. 931–934, mar. 2000. ISSN: 10518223. doi: 10.1109/77.828384. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/828384/>>.
- [80] NAKAMURA, T., JUNG, H. J., MUTA, I., et al. “Synchronization of an axial-type Bi-2223 bulk motor operated in liquid nitrogen”, *Superconductor Science and Technology*, v. 17, n. 11, pp. 1319–1323, aug 2004. doi: 10.1088/0953-2048/17/11/013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/11/013>>.
- [81] JIANG, Q., MAJOROS, M., HONG, Z., et al. “Design and AC loss analysis of a superconducting synchronous motor”, *Superconductor Science and Technology*, v. 19, n. 11, pp. 1164–1168, oct 2006. doi: 10.1088/0953-2048/19/11/012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/19/11/012>>.
- [82] MIKI, M., TOKURA, S., HAYAKAWA, H., et al. “Development of a synchronous motor with Gd–Ba–Cu–O bulk superconductors as pole-field magnets for propulsion system”, *Superconductor Science and Technology*,

- v. 19, n. 7, pp. S494–S499, jul. 2006. ISSN: 0953-2048, 1361-6668. doi: 10.1088/0953-2048/19/7/S14. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/19/7/S14>>.
- [83] GRANADOS, X., BARTOLOMÉ, E., OBRADORS, X., et al. “Iron-YBCO heterostructures and their application for trapped field superconducting motor”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 43, pp. 788–791, jun 2006. doi: 10.1088/1742-6596/43/1/192. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F43%2F1%2F192>>.
- [84] AILAM, E. H., NETTER, D., LEVEQUE, J., et al. “Design and Testing of a Superconducting Rotating Machine”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 1, pp. 27–33, mar. 2007. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2006.887544. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4120212/>>.
- [85] HSIEH, M.-F., LIN, C.-K., LIN, I.-H. “Design and Analysis of High Temperature Superconducting Generator for Offshore Wind Turbines”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 49, n. 5, pp. 1881–1884, maio 2013. ISSN: 0018-9464, 1941-0069. doi: 10.1109/TMAG.2013.2246146. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6514712/>>.
- [86] DEZHIN, D., ILYASOV, R., KOZUB, S., et al. “Synchronous motor with HTS-2G wires”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 507, n. 3, pp. 032011, maio 2014. ISSN: 1742-6588, 1742-6596. doi: 10.1088/1742-6596/507/3/032011. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/507/3/032011>>.
- [87] HASSANNIA, A., DARABI, A. “Design and Performance Analysis of Superconducting Rim-Driven Synchronous Motors for Marine Propulsion”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 24, n. 1, pp. 40–46, fev. 2014. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2013.2280346. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6607210/>>.
- [88] XU, Y., MAKI, N., IZUMI, M. “Electrical Design Study of 10-MW Salient-Pole Wind Turbine HTS Synchronous Generators”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 24, n. 6, pp. 1–6, dez. 2014. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2014.2338300. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6862028>>.
- [89] SARUWATARI, M., YUN, K., IWAKUMA, M., et al. “Design Study of 15-MW Fully Superconducting Generators for Offshore Wind Turbine”, *IEEE*

Transactions on Applied Superconductivity, v. 26, n. 4, pp. 1–5, jun. 2016. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2016.2535315. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7423707/>>.

- [90] SUGOUCHI, R., KOMIYA, M., MIURA, S., et al. “Conceptual Design and Electromagnetic Analysis of 2 MW Fully Superconducting Synchronous Motors With Superconducting Magnetic Shields for Turbo-Electric Propulsion System”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 30, n. 4, pp. 1–5, jun. 2020. ISSN: 1051-8223, 1558-2515, 2378-7074. doi: 10.1109/TASC.2020.2974705. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9001263/>>.
- [91] LIU, B., BADCOCK, R., SHU, H., et al. “Electromagnetic Characteristic Analysis and Optimization Design of a Novel HTS Coreless Induction Motor For High-Speed Operation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 28, n. 4, pp. 1–5, jun. 2018. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2018.2793666. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8259244/>>.
- [92] OZAKI, K., DOI, Y., YOSHIDA, K., et al. “Conceptual Design of Superconducting Induction Motors Using REBa₂Cu₃O_y Superconducting Tapes for Electric Aircraft”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 30, n. 4, pp. 1–5, jun. 2020. ISSN: 1051-8223, 1558-2515, 2378-7074. doi: 10.1109/TASC.2020.2971671. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8984315/>>.
- [93] SILVA, J. M. M. *Application of superconducting bulks and stacks of tapes in electrical machines*. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, Março 2015.
- [94] DIAS, F. J. M., POLASEK, A., DE ANDRADE, R., et al. “Synchronous-hysteresis superconducting machine with stacks of second generation tapes”. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, pp. 1–5, May 2018. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395656.
- [95] 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*, - 2019. doi: 10.1109/TASC.2019.2898252.
- [96] NAGAMATSU, J., NAKAGAWA, N., MURANAKA, T., et al. “Superconductivity at 39 K in magnesium diboride”, *Nature*, v. 410, n. 6824, pp. 63–64,

mar. 2001. ISSN: 0028-0836, 1476-4687. doi: 10.1038/35065039. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/35065039>>.

- [97] KAJIKAWA, K., NAKAMURA, T. “Proposal of a Fully Superconducting Motor for Liquid Hydrogen Pump With MgB_2 Wire”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 1669–1673, jun. 2009. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2009.2017840. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5067125/>>.
- [98] KALSI, S. S. “Superconducting Wind Turbine Generator Employing MgB_2 Windings Both on Rotor and Stator”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 24, n. 1, pp. 47–53, fev. 2014. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2013.2291275. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6670049/>>.
- [99] TERAOKA, Y., SEKINO, M., OHSAKI, H. “Electromagnetic Design of 10 MW Class Fully Superconducting Wind Turbine Generators”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 3, pp. 5201904–5201904, jun. 2012. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2011.2177628. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6092460/>>.
- [100] SONG, X., MIJATOVIC, N., JENSEN, B. B., et al. “Design Study of Fully Superconducting Wind Turbine Generators”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, pp. 1–5, jun. 2015. ISSN: 1051-8223, 1558-2515. doi: 10.1109/TASC.2015.2396682. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7036124/>>.
- [101] MARINO, I., PUJANA, A., SARMIENTO, G., et al. “Lightweight MgB_2 superconducting 10 MW wind generator”, *Superconductor Science and Technology*, v. 29, n. 2, pp. 024005, fev. 2016. ISSN: 0953-2048, 1361-6668. doi: 10.1088/0953-2048/29/2/024005. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/29/2/024005>>.
- [102] ZERMEÑO, V. M. R., GRILLI, F. “3D modeling and simulation of 2G HTS stacks and coils”, *Superconductor Science and Technology*, v. 27, n. 4, pp. 044025, mar 2014. doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/4/044025>>.
- [103] YAN, Y., QU, T., GRILLI, F. “Numerical Modeling of AC Loss in HTS Coated Conductors and Roebel Cable Using T-A Formulation and Comparison With H Formulation”, *IEEE Access*, v. 9, pp. 49649–49659, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3067037.

- [104] RUIZ-ALONSO, D., COOMBS, T., CAMPBELL, A. M. “Computer modelling of high-temperature superconductors using an A–V formulation”, *Superconductor Science and Technology*, v. 17, n. 5, pp. S305–S310, apr 2004. doi: 10.1088/0953-2048/17/5/042. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/5/042>>.
- [105] GRILLI, F., STAVREV, S., LE FLOCH, Y., et al. “Finite-element method modeling of superconductors: from 2-D to 3-D”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 1, pp. 17–25, March 2005. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2004.839774.
- [106] SASS, F. *Modelagem do Comportamento de Mancais Magnéticos Utilizando Fitas e Blocos Supercondutores*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Fevereiro 2015.
- [107] RUIZ-ALONSO, D., COOMBS, T. A., CAMPBELL, A. M. “Numerical analysis of high-temperature superconductors with the critical-state model”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 14, n. 4, pp. 2053–2063, Dec 2004. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2004.838316.
- [108] SHAFARIE, R., KALANTAR, M. “Design of a 10-MW-Class Wind Turbine HTS Synchronous Generator With Optimized Field Winding”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 4, pp. 5202307–5202307, Aug 2013. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2013.2256421.
- [109] BRAMBILLA, R., GRILLI, F., MARTINI, L. “Development of an edge-element model for AC loss computation of high-temperature superconductors”, *Superconductor Science and Technology*, v. 20, n. 1, pp. 16–24, nov 2006. doi: 10.1088/0953-2048/20/1/004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/1/004>>.
- [110] SASS, F., SOTELO, G. G., DE ANDRADE JUNIOR, R., et al. “H-formulation for simulating levitation forces acting on HTS bulks and stacks of 2G coated conductors”, *Superconductor Science and Technology*, v. 28, n. 12, pp. 125012, nov 2015. doi: 10.1088/0953-2048/28/12/125012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/12/125012>>.
- [111] AINSLIE, M. D., RODRIGUEZ-ZERMENO, V. M., HONG, Z., et al. “An improved FEM model for computing transport AC loss in coils made of RABiTS YBCO coated conductors for electric machines”, *Superconductor Science and Technology*, v. 24, n. 4, pp. 045005, jan 2011. doi: 10.1088/

0953-2048/24/4/045005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/2F0953-2048/24/4/045005>>.

- [112] LAHTINEN, V., PARDO, E., ŠOUC, J., et al. “Ripple field losses in direct current biased superconductors: Simulations and comparison with measurements”, *Journal of Applied Physics*, v. 115, n. 11, pp. 113907, 2014. doi: 10.1063/1.4868898. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.4868898>>.
- [113] AINSLIE, M. D., HU, D., ZOU, J., et al. “Simulating the In-Field AC and DC Performance of High-Temperature Superconducting Coils”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, pp. 1–5, June 2015. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2014.2373514.
- [114] ESCAMEZ, G., SIROIS, F., BADEL, A., et al. “Numerical Impact of Using Different E – J Relationships for 3-D Simulations of AC Losses in MgB₂ Superconducting Wires”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 52, n. 3, pp. 1–4, March 2016. ISSN: 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2015.2480960.
- [115] SOTELO, G. G., CARRERA, M., LOPEZ-LOPEZ, J., et al. “H-Formulation FEM Modeling of the Current Distribution in 2G HTS Tapes and Its Experimental Validation Using Hall Probe Mapping”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 26, n. 8, pp. 1–10, Dec 2016. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2016.2591825.
- [116] GRILLI, F., MORANDI, A., SILVESTRI, F. D., et al. “Dynamic modeling of levitation of a superconducting bulk by coupled H-magnetic field and arbitrary Lagrangian–Eulerian formulations”, *Superconductor Science and Technology*, v. 31, n. 12, pp. 125003, oct 2018. doi: 10.1088/1361-6668/aae426. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aae426>>.
- [117] AINSLIE, M., JIANG, Y., XIAN, W., et al. “Numerical analysis and finite element modelling of an HTS synchronous motor”, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, v. 470, n. 20, pp. 1752 – 1755, 2010. ISSN: 0921-4534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.05.200>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453410004569>>. Proceedings of the 22nd International Symposium on Superconductivity (ISS 2009).
- [118] ENOMOTO, N., AMEMIYA, N. “Electromagnetic field analysis of rectangular high T_c superconductor with large aspect ratio”, *Physica*

- C: Superconductivity*, v. 412-414, pp. 1050 – 1055, 2004. ISSN: 0921-4534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2003.12.079>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453404008366>>. Proceedings of the 16th International Symposium on Superconductivity (ISS 2003). Advances in Superconductivity XVI. Part II.
- [119] BRAMBILLA, R., GRILLI, F., MARTINI, L. “Integral Equations for Computing AC Losses of Radially and Polygonally Arranged HTS Thin Tapes”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n. 4, pp. 8401006–8401006, Aug 2012. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2012.2191405.
- [120] MARTINS, F. G. R., SASS, F., BARUSCO, P., et al. “Using the integral equations method to model a 2G racetrack coil with anisotropic critical current dependence”, *Superconductor Science and Technology*, v. 30, n. 11, pp. 115009, oct 2017. doi: 10.1088/1361-6668/aa892b. Disponível em: <https://doi.org/10.1088%2F1361-6668%2Faa892b>>.
- [121] DOS REIS MARTINS, F. G. *Mancal Magnético Supercondutor com Fitas de Segunda Geração*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Maio 2018.
- [122] LIANG, F., VENUTURUMILLI, S., ZHANG, H., et al. “A finite element model for simulating second generation high temperature superconducting coils/stacks with large number of turns”, *Journal of Applied Physics*, v. 122, n. 4, pp. 043903, 2017. doi: 10.1063/1.4995802. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4995802>>.
- [123] GRILLI, F., PARDO, E., MORANDI, A., et al. “Electromagnetic Modeling of Superconductors With Commercial Software: Possibilities With Two Vector Potential-Based Formulations”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 31, n. 1, pp. 1–9, 2021. doi: 10.1109/TASC.2020.3013028.
- [124] BERROSPE-JUAREZ, E., ZERMEÑO, V. M. R., TRILLAUD, F., et al. “Real-time simulation of large-scale HTS systems: multi-scale and homogeneous models using the iT-A/i formulation”, *Superconductor Science and Technology*, v. 32, n. 6, pp. 065003, apr 2019. doi: 10.1088/1361-6668/ab0d66. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab0d66>>.
- [125] VARGAS-LLANOS, C. R., LENGSELD, S., GRILLI, F. “T-A Formulation for the Design and AC Loss Calculation of a Superconducting Generator

for a 10 MW Wind Turbine”, *IEEE Access*, v. 8, pp. 208767–208778, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038058.

- [126] CULLITY, B. D., GRAHAM, C. D., JOHN WILEY & SONS. *Introduction to magnetic materials*. 2015. ISBN: 9780470386323 9780470653449 9781118211496 9781282136939 9786612136931 9780471477419. OCLC: 1164466581.
- [127] MAYERGOYZ, I. D. *Mathematical Models for Hysteresis*. New York, Springer-Verlag, 1991.
- [128] JILES, D., ATHERTON, D. “Theory of ferromagnetic hysteresis”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 61, n. 1, pp. 48 – 60, 1986. ISSN: 0304-8853. doi: [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(86\)90066-1](https://doi.org/10.1016/0304-8853(86)90066-1). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304885386900661>>.
- [129] HOFFMANN, K., BASTOS, J. P. A., LEITE, J. V., et al. “A Vector Jiles–Atherton Model for Improving the FEM Convergence”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 53, n. 6, pp. 1–4, June 2017. ISSN: 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2017.2660303.
- [130] SALON, S. J. *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. Power Electronics and Power Systems. New York, NY, Springer US, 1995. ISBN: 9781461359968 9781461523499. doi: 10.1007/978-1-4615-2349-9. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-2349-9>>.
- [131] NAKATA, T., TAKAHASHI, N., FUJIWARA, K., et al. “Periodic boundary condition for 3-D magnetic field analysis and its applications to electrical machines”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 24, n. 6, pp. 2694–2696, 1988. doi: 10.1109/20.92216.
- [132] WANG, S., YONG, H., ZHOU, Y. “Calculations of the AC losses in superconducting cables and coils: Neumann boundary conditions of the T–A formulation”, *Superconductor Science and Technology*, v. 35, n. 6, pp. 065013, may 2022. doi: 10.1088/1361-6668/ac6a52. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac6a52>>.
- [133] MAYERGOYZ, I., BEDROSIAN, G. “On calculation of 3-D eddy currents in conducting and magnetic shells”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 31, n. 3, pp. 1319–1324, 1995. doi: 10.1109/20.376271.

- [134] SANTOS, B. M. O., SANTOS, G. D., SIROIS, F., et al. “2-D Modeling of HTS Coils With T - A Formulation: How to Handle Different Coupling Scenarios”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 32, n. 5, pp. 1–4, 2022. doi: 10.1109/TASC.2022.3160512.
- [135] WANG, Y., ZHENG, J., ZHU, Z., et al. “Quench behavior of high-temperature superconductor (RE)Ba₂Cu₃O x CORC cable”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 52, n. 34, pp. 345303, jun 2019. doi: 10.1088/1361-6463/ab1e2c. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab1e2c>>.
- [136] XUE, W., WANG, B., YANG, Q., et al. “A Numerical Method for Determining Critical Current of ReBCO Coils: Modelling Details, Validation, and Comparison With T - A Formulation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 32, n. 6, pp. 1–7, 2022. doi: 10.1109/TASC.2022.3166467.
- [137] WANG, L., DENG, Z., LI, Y., et al. “Vertical–Lateral Coupling Force Relation of the High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation System”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 31, n. 1, pp. 1–6, 2021. doi: 10.1109/TASC.2020.3015022.
- [138] SIM, J., LEE, K., CHA, G., et al. “Development of a HTS squirrel cage induction motor with HTS rotor bars”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 14, n. 2, pp. 916–919, 2004. doi: 10.1109/TASC.2004.830317.
- [139] NAKAMURA, T., ITOH, Y., YOSHIKAWA, M., et al. “Tremendous Enhancement of Torque Density in HTS Induction/Synchronous Machine for Transportation Equipments”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, pp. 1–4, June 2015. ISSN: 1051-8223. doi: 10.1109/TASC.2014.2382337.
- [140] NAGAO, K., NAKAMURA, T., NISHIMURA, T., et al. “Development and fundamental characteristics of a YBCO superconducting induction/synchronous motor operated in liquid nitrogen”, *Superconductor Science and Technology*, v. 21, n. 1, pp. 015022, dec 2007. doi: 10.1088/0953-2048/21/01/015022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/01/015022>>.
- [141] ARISH, N., ARDESTANI, M., HEKMATI, A. “Optimum Structure of Rotor Slot for a 20 kW HTS Induction Motor”, *Physica C: Superconductivity and*

- its Applications*, v. 582, pp. 1353829, 2021. ISSN: 0921-4534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2021.1353829>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453421000125>>.
- [142] SANTOS, B. M. O., DIAS, F. J. M., SASS, F., et al. “Simulation of Superconducting Machine With Stacks of Coated Conductors Using Hybrid A-H Formulation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 30, n. 6, pp. 1–9, 2020. doi: 10.1109/TASC.2020.2990377.
- [143] SANTOS, B. M. O., DE ANDRADE JUNIOR, R. “Simulação de Máquina Supercondutora com Fitas 2G Usando a Formulação T-A”. In: *Anais 19^o Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14^o Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2020)*, 2020.
- [144] SADOWSKI, N., LEFEVRE, Y., LAJOIE-MAZENC, M., et al. “Finite element torque calculation in electrical machines while considering the movement”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 28, n. 2, pp. 1410–1413, 1992. doi: 10.1109/20.123957.
- [145] SANTOS, G. D., SANTOS, B. M. O., MARTINS, F. G. D. R., et al. “An Integrated Methodology to Assess AC Losses in the kHz Range Using the FEM and Partial Element Equivalent Circuit”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 32, n. 2, pp. 1–8, 2022. doi: 10.1109/TASC.2021.3129440.
- [146] ALI, M. Z., ZHENG, J., HUBER, F., et al. “4.6 T generated by a high-temperature superconducting ring magnet”, *Superconductor Science and Technology*, v. 33, n. 4, pp. 04LT01, mar 2020. doi: 10.1088/1361-6668/ab794a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab794a>>.