

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

GABRIEL DOS SANTOS

SIMULAÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DE
NÚCLEO SATURADO USANDO A FORMULAÇÃO T-A

NITERÓI, RJ

2021

GABRIEL DOS SANTOS
MATRÍCULA: M054.119.010

SIMULAÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DE
NÚCLEO SATURADO USANDO A FORMULAÇÃO T-A

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

Área de concentração: Máquinas, Equipamentos e Aplicações de Novos Materiais.

Orientador: Prof. Felipe Sass, D.Sc.

Orientador: Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense
NITERÓI, RJ

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

D722s Dos santos, Gabriel
SIMULAÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DE
NÚCLEO SATURADO USANDO A FORMULAÇÃO T-A / Gabriel Dos santos ;
Felipe Sass, orientador ; Guilherme Gonçalves Sotelo,
coorientador. Niterói, 2021.
96 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.15297604702>

1. Modelagem de Supercondutores. 2. Limitadores de corrente
de curto-circuito. 3. Método de Elementos Finitos. 4.
Produção intelectual. I. Sass, Felipe, orientador. II.
Gonçalves Sotelo, Guilherme, coorientador. III. Universidade
Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

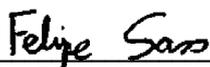
CDD -

GABRIEL DOS SANTOS

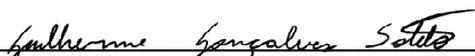
SIMULAÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO DE
NÚCLEO SATURADO USANDO A FORMULAÇÃO T-A

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

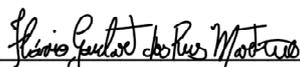
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Felipe Sass - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo - Coorientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Flávio Goulart dos Reis Martins
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. João Murta Pina
Universidade Nova de Lisboa - UNL

Niterói
(fevereiro/2021)

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, em segundo lugar dedico esse trabalho aos meus pais, Egídio e Rosângela e em terceiro lugar e não menos importante dedico esse trabalho a Rebeca, meu amor.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por me dar resiliência, força, esperança e coragem para que mesmo num tempo tão turbulento, eu fosse capaz de dar mais um passo em direção ao grande sonho da minha vida.

Gostaria de agradecer à Rebeca, minha namorada, que pacientemente vem me apoiando com todo seu amor e carinho, nunca me deixando desanimar e sempre me fazendo ver o melhor da vida. Agradeço aos meus pais, Egídio e Rosângela que através de suas sábias palavras sempre me confortam e me renovam o fôlego necessário para continuar.

Gostaria de agradecer a minha tia Lila, meu tio Celso, meus primos Lucas, Vinícius, meus tios Marcelos, Rosilane e minha amada madrinha Sônia. Muito obrigado por todas as orações, ações, amor, carinho e ensinamentos que vocês me dão e me deram. Amo muito todos vocês.

Agradeço ao meu grande amigo e professor Flávio G. R. Martins, muito obrigado por todas as conversas, ensinamentos e principalmente por acreditar em mim desde o começo, jamais esquecerei tudo que fez por mim.

Agradeço aos meus orientadores Felipe Sass e Guilherme G. Sotelo, muito obrigado por confiarem na minha capacidade, por sempre estarem comigo nesta caminhada e por todo o conhecimento que vocês compartilharam comigo.

Gostaria também de agradecer ao CNPq e a CAPES por todo o apoio financeiro sem o qual está pesquisa não poderia ser realizada.

Meu muito obrigado a todos vocês!

*"Não me renderei a escuridão
do desconhecimento nem as
trevas do conformismo. A fé e
a ciência serão minhas guias"*
Gabriel dos Santos

Resumo

Com o surgimento da geração distribuída e o aumento do consumo de energia ao longo tempo os níveis de curto-circuito se apresentam maiores a cada ano, tanto em sistemas de transmissão como em sistemas de distribuição. Os dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (LCC) são uma solução potencial para esse problema. Dentre as várias soluções, os limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores (LCCS) têm se apresentado como uma opção na literatura. Entre suas diversas topologias, o limitador de corrente de curto-circuito supercondutor de núcleo saturado (LCCS-NS) tem sido muito estudado. Alguns protótipos desta topologia têm apresentado resultados promissores, incluindo a construção de unidades piloto de 35 kV/90 MVA, 220 kV/300 MVA em subestações de média e alta tensão. Além disso, um protótipo de 500 kV está sendo projetado, mostrando que os LCCS-NS podem ser aplicados em diferentes nichos. Para esta topologia, a literatura apresenta modelos de simulação que representam bem o comportamento eletromagnético do equipamento. Nestas modelagens o método dos elementos finitos (MEF) é aplicado para simular o LCCS-NS. No entanto, um estudo mais detalhado com foco na modelagem da bobina supercondutora considerando as características do material supercondutor neste limitador ainda não foi apresentado. Nesse contexto, este trabalho propõe um método para considerar as não-linearidades intrínsecas do problema: supercondutora e ferromagnética. Além disso, esta dissertação apresenta uma metodologia de acoplamento de dispositivos supercondutores modelados através do MEF a parâmetros concentrados que compõem o sistema de potência. Por fim, este trabalho apresenta uma otimização multi-objetivo utilizando o algoritmo de Nelder-Mead para encontrar uma geometria ótima para a bobina supercondutora. Para otimização, as funções de objetivos são: maximizar a densidade de corrente crítica no supercondutor, minimizar a queda de tensão no enrolamento de cobre, minimizar a corrente através do enrolamento supercondutor e minimizar o custo do material supercondutor. Os resultados deste trabalho foram comparados com os experimentos e apresentaram boa concordância, validando desta forma a modelagem proposta. Além disso, os resultados da otimização mostram que construir a bobina supercondutora usando o menor fator de preenchimento possível pode não ser a melhor escolha para otimizar a bobina supercondutora.

Palavras-chave: Modelagem de Supercondutores; Limitadores de corrente de curto-circuito; Método de Elementos Finitos

Sumário

	Lista de ilustrações	vi
	Lista de tabelas	x
	Lista de Abreviaturas	xi
	Lista de Símbolos	xii
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.1.1	Contribuições Originais	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	FUNDAMENTOS BÁSICOS DA SUPERCONDUTIVIDADE	4
2.1	Propriedades dos Supercondutores	5
2.1.1	Diamagnetismo Perfeito - Efeito Meissner	6
2.1.2	Supercondutores do tipo II	8
2.1.3	Comprimento de Coerência e Profundidade de penetração de London	9
2.1.4	Densidade de Corrente Crítica	9
2.1.5	Formulações e modelos fenomenológicos para simulação dos materiais supercondutores	11
2.2	Fita supercondutora	13
2.3	Resumo do Capítulo	14
3	LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	16
3.1	Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado	18
3.2	Conclusão do Capítulo	26
4	MODELOS MATEMÁTICOS EM ELEMENTOS FINITOS	27

4.1	Formulação A-V	28
4.2	Formulação T-A	29
4.3	Conclusão do Capítulo	32
5	METODOLOGIA	33
5.1	Detalhes Construtivos e Experimentais do Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado Simulado	34
5.2	Modelagem do Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado	35
5.2.1	Modelagem do LCCS-NS na formulação A-V	36
5.2.2	Modelagem do LCCS-NS na Formulação T-A	39
5.3	Desenvolvimento do Método de Acoplamento entre dispositivos supercondutores e circuitos elétricos modelados a parâmetros concentrados	41
5.3.1	Modelo de acoplamento para o caso 2D e sua aplicação no trabalho	42
5.3.2	Modelo de acoplamento para o caso 3D e sua aplicação no trabalho	46
5.4	Processo de Otimização do Enrolamento Supercondutor	48
5.5	Modelagem do Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado em 3D	50
5.5.1	Modelagem na formulação T-A	50
5.6	Conclusão do Capítulo	53
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
6.1	Resultados e Discussões da formulação T-A 2D	55
6.1.1	Resultados da Otimização do Enrolamento Supercondutor	57
6.2	Resultados e Discussões da formulação T-A 3D	65
6.2.1	Condição de regime permanente	68
6.2.2	Curto-Circuito monofásico na fase A para validação	69
6.2.3	Curto-Circuito monofásico na fase A	72
6.2.4	Curto-Circuito Bifásico	74
6.2.5	Curto-Circuito Trifásico	75
6.2.6	Comparação e discussão sobre os resultados.	77

6.3	Conclusão	79
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	81
7.1	Conclusões	81
7.2	Trabalhos Futuros	82
	REFERÊNCIAS	83

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução da descoberta dos materiais e compostos supercondutores	5
Figura 2 – Ilustração do efeitos Meissner e da diferença entre matérias condutores perfeitos e materiais supercondutores.	7
Figura 3 – Formação da rede de Abrikosov	8
Figura 4 – Diagrama de fases do supercondutor do tipo II	9
Figura 5 – Força de Lorentz devido a uma corrente de transporte e a penetração quantizado de fluxo magnético no material supercondutor do tipo II	10
Figura 6 – Estratificação da fita supercondutora de 2 ^a geração.	13
Figura 7 – Tipo de Limitadores Supercondutores	18
Figura 8 – Limitador de Núcleo Saturado Aberto.	19
Figura 9 – Esquemático monofásico do LCCS-NS	22
Figura 10 – Curva B-H para exemplificar os dois pontos de operação do LCCS-NS	24
Figura 11 – Aproximação fita lâmina aplicada à fita supercondutora	31
Figura 12 – Acoplamento entre as formulações T e A	32
Figura 13 – Limitador de núcleo saturado construído	34
Figura 14 – Parâmetros geométricos do limitador ensaiado.	35
Figura 15 – Esquemático Elétrico do ensaio realizado com o Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado.	36
Figura 16 – Domínios de Simulação	37
Figura 17 – Curva B-H do material ferro magnético	38
Figura 18 – Esquemático para as simulações realizadas em 2D. Este esquemático de ligações é usado em todas as simulações pertinentes a modelagem 2D.	39
Figura 19 – Modelo da formulação T-A em 2D	40
Figura 20 – Perfil de corrente aplicada ao enrolamento de CC	41
Figura 21 – Modelo da formulação T-A em 2D	41

Figura 22 – Ideia Central do Método de Acoplamento entre o enrolamento supercondutor modelado em MEF com o modelo de circuitos a parâmetros concentrados	42
Figura 23 – Seção transversal de um bobina supercondutora	43
Figura 24 – Processo para o acoplamento entre o modelo de circuitos e a formulação T-A	45
Figura 25 – Esquemático elétrico das ligações do sistema simulado em MEF acoplado ao circuito elétrico de potência.	46
Figura 26 – Enrolamento Supercondutor em 3D com N espiras	47
Figura 27 – Parâmetros de Otimização Utilizados	49
Figura 28 – Limitador de curto-circuito Supercondutor modelado em 3D	52
Figura 29 – Modelo de circuito implementado para a realização das simulações em 3D	52
Figura 30 – Modelo de circuito implementado para a realização das simulações em 3D	53
Figura 31 – Imposição da Corrente no modelo 3D	54
Figura 32 – Densidade de Fluxo Magnético para diferentes corrente CC aplicadas analisadas em regime permanente (lado esquerdo das figuras) e em curto-circuito (lado direito das figuras)	56
Figura 33 – Densidade de Corrente Normalizada (J/J_{c0}) para diferentes correntes CC aplicadas.	57
Figura 34 – Queda de tensão nos terminais CA em regime permanente.	58
Figura 35 – Densidade de corrente crítica normalizada ($J_c(\mathbf{B})/J_{c0}$) para várias configurações de camadas.	59
Figura 36 – (a) Densidade de corrente normalizada para várias camadas e empilhamentos (b) Destaque na densidade de corrente normalizada entre 0 e 8 minutos	60
Figura 37 – Comparação entre a densidade de fluxo magnético (em Tesla) usando a bobina supercondutora e a bobina de cobre. Para o gráfico da bobina supercondutora a densidade de corrente normalizada é apresentada.	61

Figura 38 – Densidade de Fluxo Magnético e a densidade de corrente normalizada para I_{ap} igual à 250 A	63
Figura 39 – (a) Corrente através da bobina supercondutora (b) destaque da corrente através da bobina supercondutora no instante do primeiro pico do curto-circuito.	64
Figura 40 – Correntes da bobina supercondutora, diodo e da chave de acionamento rápido.	64
Figura 41 – Média da densidade de corrente crítica normalizada vs o tempo para diferentes correntes CC.	65
Figura 42 – (a) Comparação entre a formulação A-V, T-A e Medidas.(b) Zoom do primeiro no da corrente de falta.	66
Figura 43 – Corrente prospectivas para os curtos-circuitos monofásico, bifásico e trifásico.	67
Figura 44 – Densidade de fluxo magnético em 2ms	68
Figura 45 – Corrente nos nós do circuito CC em regime permanente.	69
Figura 46 – Densidade de corrente normalizada em 2ms	69
Figura 47 – Corrente de curto-circuito monofásico com a apenas a fase A ligada.	70
Figura 48 – Corrente e tensão do enrolamento supercondutor no curto-circuito monofásico	71
Figura 49 – Densidade de Corrente Normalizada em 18 ms para a condição de curto-circuito monofásico na fase A com as outras fases desligadas.	71
Figura 50 – Densidade de fluxo magnético e densidade de corrente (setas verdes e azuis) em 18 ms no curto-circuito monofásico	72
Figura 51 – Corrente de curto-circuito monofásico com todas as bobinas de cobre ligadas.	73
Figura 52 – Corrente no enrolamento supercondutor no curto-circuito monofásico.	73
Figura 53 – Densidade de Fluxo Magnético e densidade de corrente (setas verdes e azuis) em 18 ms para o curto-circuito monofásico.	74
Figura 54 – Densidade de corrente normalizada em 18 ms para o curto-circuito monofásico.	74
Figura 55 – Corrente do curto-circuito bifásico	75

Figura 56 – Corrente do enrolamento supercondutor para o curto-circuito bifásico.	76
Figura 57 – Densidade de fluxo magnético e a densidade de corrente (setas verdes e azuis) em 18 ms no curto-circuito bifásico.	76
Figura 58 – Densidade de corrente normalizada em 18 ms para o curto-circuito bifásico.	77
Figura 59 – Corrente de curto-circuito trifásico	77
Figura 60 – Corrente e tensão do enrolamento supercondutor para o curto-circuito trifásico.	78
Figura 61 – A densidade de Fluxo magnético e densidade de corrente (setas verdes e azuis) em 18 ms para o curto-circuito trifásico.	78
Figura 62 – Densidade de corrente normalizada em 18 ms para o curto-circuito trifásico.	79
Figura 63 – Comparação entre as correntes no enrolamento supercondutor em diferentes tipos de curto-circuito.	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela com o resumo das formulações para modelar os materiais supercondutores.	11
Tabela 2 – Limitadores de curto-circuito de Núcleo Saturado.	21
Tabela 3 – Propriedades dos materiais para formulação $A - V$	37
Tabela 4 – Descrição de cada parâmetro de controle e otimização.	51
Tabela 5 – Comparação entre a média dos valores normalizada da densidade de corrente crítica ($J_{c_{normalizada}}$) para diversas corrente aplicadas. . .	58
Tabela 6 – Parâmetros geométricos ótimos	61
Tabela 7 – Erros nos P_i pontos	67
Tabela 8 – Erros nos P_i pontos máximos	70
Tabela 9 – Comparação entre os diferentes tipos de curto-circuito.	79

Lista de Abreviaturas

C

CA Corrente Alternada. 16, 22, 24, 29, 36–38, 50

CC Corrente Contínua. vi, 16, 22, 24, 25, 29, 33, 36–39, 41, 52

L

LCC Limitador de Corrente de Curto-Circuito. 25, 26

LCC-NS Limitador de Corrente de Curto-Circuito de Núcleo Saturado. 18–20

LCCS Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor. 17

LCCS-NS Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor de Núcleo Saturado. 1–3, 19, 21, 23–26, 33, 35, 38

M

MDF Método de Diferenças Finitas. 42, 45

MEF Método de Elementos Finitos. 27, 29, 45

Lista de Símbolos

Símbolos

V Potencial escalar Elétrico. 29

ϵ Permissividade elétrica. 28

μ Permeabilidade magnética do meio. 28, 36

μ_0 Permeabilidade magnética no vácuo. 24

μ_r Permeabilidade magnética relativa. 24, 37

ω Frequência elétrica angular. 38

ϕ_{CA} Fluxo magnético devido ao enrolamento de corrente alternada. 24

ϕ_{CC} Fluxo do campo magnético devido ao enrolamento de corrente contínua. 24

σ Condutividade elétrica do meio. 28, 36, 37

θ Angulo Elétrico. 38

\vec{A} Vetor potencial Magnético total. 28

\vec{B} Densidade de fluxo magnético. 28

\vec{E} Campo elétrico. 28

\vec{J} Densidade de corrente elétrica. 28

\vec{T} Vetor potencial Corrente. 30

n_{ciclos} Número do ciclo que ocorrerá o curto-circuito. 38

t_{curto} Angulo Elétrico. 38

1 Introdução

Nesta seção serão apresentadas a contextualização, a motivação e os objetivos deste trabalho.

1.1 Contextualização

Ao longo dos anos as subestações têm presenciado curto-circuitos cada vez mais severos. Com isso, equipamentos como transformadores e disjuntores estão ficando subdimensionados para suportar os níveis de curto-circuito na atualidade. Os dispositivos pirotécnicos, transformadores de alta impedância e reatores de ar são as únicas soluções comerciais disponíveis para limitar esta corrente de curto. Porém, os recentes avanços tecnológicos permitiram a implementação de soluções mais eficientes que as tradicionais para resolver a questão dos curtos-circuitos no sistema. Desta forma, novos equipamentos devem ser propostos para resolver a questão dos curto-circuitos. Além disso, no caso dos dispositivos pirotécnicos, quando a proteção é acionada, exige-se uma troca manual dos elementos explosivos, dificultando o reestabelecimento automático da energia e elevando o custo de manutenção da rede elétrica. Sendo assim, o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes que mitiguem os efeitos da corrente de curto e tenham um menor impacto sobre a continuidade do sistema torna-se atrativo para a melhora da qualidade do serviço da rede elétrica. Dentro deste contexto, os limitadores de corrente de curto-circuito vêm sendo estudados pela academia. Diversas topologias já foram propostas, como por exemplo, limitadores baseados em eletrônica de potência [1, 2] e também limitadores supercondutores [3]. No grupo de limitadores supercondutores, diversas linhas de pesquisa foram abertas, como por exemplo o estudo de limitadores de núcleo blindado [4, 5], limitadores supercondutores resistivos [6, 7, 8, 9] e os limitadores de núcleo saturado [10, 11, 12].

1.1.1 Contribuições Originais

No presente trabalho, um limitador de curto-circuito supercondutor de núcleo saturado (LCCS-NS) será estudado através do método de elementos finitos(MEF)

usando a formulação híbrida formada pelo vetor potencial corrente (\vec{T}) e pelo vetor potencial magnético (\vec{A}) (conhecida como formulação T-A) e o método de acoplamento de circuitos elétricos modelados a parâmetros concentrados. No conhecimento do autor, esta forma de resolver o problema é original e representa uma das principais contribuições deste manuscrito.

1.2 Motivação

Dentro do grupo dos limitadores de curto-circuito supercondutores, os LCCS-NS vêm sendo amplamente estudados e já possuem protótipos de grande porte. Como exemplo, o limitador de 35 kV/90MVA desenvolvido na China por Xin et al [13]. Logo em seguida mesmo grupo desenvolveu um protótipo da mesma configuração para uma escala de 220 kV/300MVA [14]. Mais recentemente grupos de pesquisadores têm estudado uma ampliação do nível de tensão desta topologia para 500 kV [15, 16, 17]. Desta forma, observa-se uma grande capacidade deste tipo de configuração tornar-se um equipamento produzido em escala comercial. Com isso, modelos numéricos que representem muito bem os materiais supercondutores e ferromagnéticos, bem como ajudem no processo de otimização do design deste, são de interesse acadêmico e industrial.

1.3 Objetivos

Nos estudos apresentados na literatura do LCCS-NS, o material supercondutor é geralmente modelado como uma resistência muito baixa (ou muitas vezes nula), desprazendo-se as perdas provocadas pelo campo proveniente da corrente alternada (CA) incidente sobre o material. Além disso, os processos de otimizações divulgados na literatura deste tipo de equipamento, não vêm apresentando um modelo que considere os efeitos do campo magnético disperso do núcleo ferromagnético sobre a bobina supercondutora. Visto isso, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de simulação que possibilite considerar os efeitos do campo disperso sobre o enrolamento supercondutor. Desta forma, é proposto um modelo de otimização para a geometria da bobina supercondutora, levando em consideração as características do

material supercondutor utilizado, bem como os efeitos do campo magnético sobre o mesmo [10]. Além disso, o modelo em elementos finitos é acoplado ao modelo de circuitos elétricos representados como parâmetros concentrados. Para isso uma metodologia para acoplar a bobina supercondutora ao circuito elétrico é proposta. Por fim, um modelo em 3D é desenvolvido para o estudo de diversos tipos de curto-circuito.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em uma introdução, onde é feita uma contextualização do trabalho, bem como os aspectos mais gerais desta dissertação são apresentados. Em seguida, no capítulo 2, os fundamentos básicos da supercondutividade são apresentados. Cabe destacar que toda a metodologia está baseada na modelagem fenomenológica dos materiais supercondutores. Por tanto, modelos quânticos que representam a supercondutividade não são considerados. No capítulo 3 são discutidos os tipos de limitadores, dando enfoque ao Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor de Núcleo Saturado (LCCS-NS). No capítulo 4 uma breve revisão sobre os modelos matemáticos usados para simular dispositivos eletromagnéticos em elementos finitos é apresentada, bem como a formulação T-A, que é usada para a modelagem de materiais supercondutores em MEF [18]. Já no capítulo 5 são discutidas as metodologias deste trabalho, os modelos usados e as considerações realizadas para este trabalho. No capítulo 6 são apresentados os resultados desta dissertação e por fim o capítulo 7 apresenta as conclusões.

2 Fundamentos Básicos da Supercondutividade

Nesta seção serão apresentados um breve histórico da supercondutividade, seus fundamentos básicos e suas principais aplicações nos sistemas de energia elétrica.

Com o desenvolvimento do processo de liquefação do Hélio em 1908 por K.H. Onnes [19], iniciaram-se os estudos das propriedades dos materiais em temperaturas criogênicas. Após dois anos de pesquisa, estudando as propriedades elétricas do mercúrio em temperaturas criogênicas, H.K. Onnes pôde então observar que abaixo da temperatura de 4.2 K a resistência deste material tornava-se imensuravelmente pequena [20]. Desta forma foi descoberto um novo estado da matéria, a supercondutividade [21]. Além disso, em 1933, Meissner e Ochsenfeld descobriram outra propriedade dos materiais supercondutores, o diamagnetismo perfeito [22]. Já em 1957, os pesquisadores Bardeen, Cooper, e Schrieffer desenvolveram através da mecânica quântica uma teoria para explicar fenômeno da supercondutividade, a chamada teoria BCS [23].

Com a teoria BCS fundamentando as argumentações, acreditava-se que o fenômeno da supercondutividade só poderia ser observado em temperaturas extremamente baixas. Contudo, já em 1986, Bednorz e Müller descobriram um material supercondutor baseado em óxido de cobre (La-Ba-Cu-O) [24]. Desde então, desencadearam-se diversos estudos sobre materiais supercondutores a base de óxido de cobre. Como por exemplo, S. Tanaka reproduziu o mesmo resultado obtido por Bednorz e Müller e apenas algumas semanas depois, M.K. Wu *et al* apresentaram um novo composto de Y-Ba-Cu-O que apresenta o fenômeno da supercondutividade a 93 K [25]. A partir desta descoberta, com o fenômeno da supercondutividade apresentando-se em temperaturas acima do ponto de ebulição do nitrogênio (77 K), muitas aplicações práticas foram viabilizadas. Atualmente, diversos materiais supercondutores baseados nos elementos Ba, Cu e O são encontrados na literatura, sendo denominados de forma mais genérica como Re-Ba-Cu-O. Onde, a sigla Re remete ao termo terra rara (*Rare earth*). O estudo dos Re-Ba-Cu-O ainda se encontra em desenvolvimento, até o presente momento. Os compostos mais estudados dentro da literatura são $YBa_2Cu_3O_7$

(ou YBCO ou ainda Y123) e $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (BSCCO ou ainda Bi2212).

Próximo ao ano 2000, J. Nagamatsu *et al* descobriram que o composto diboreto de magnésio também apresenta as propriedades supercondutoras quando submetido à temperaturas abaixo de 39 K [26]. Já em 2008 a supercondutividade foi observada em compostos contendo ferro, quando a temperatura destes materiais encontra-se abaixo de 43 K [27]. A figura 1 apresenta um resumo da discussão acima. Nas seções seguintes serão discutidos os aspectos e propriedades intrínsecas dos supercondutores.

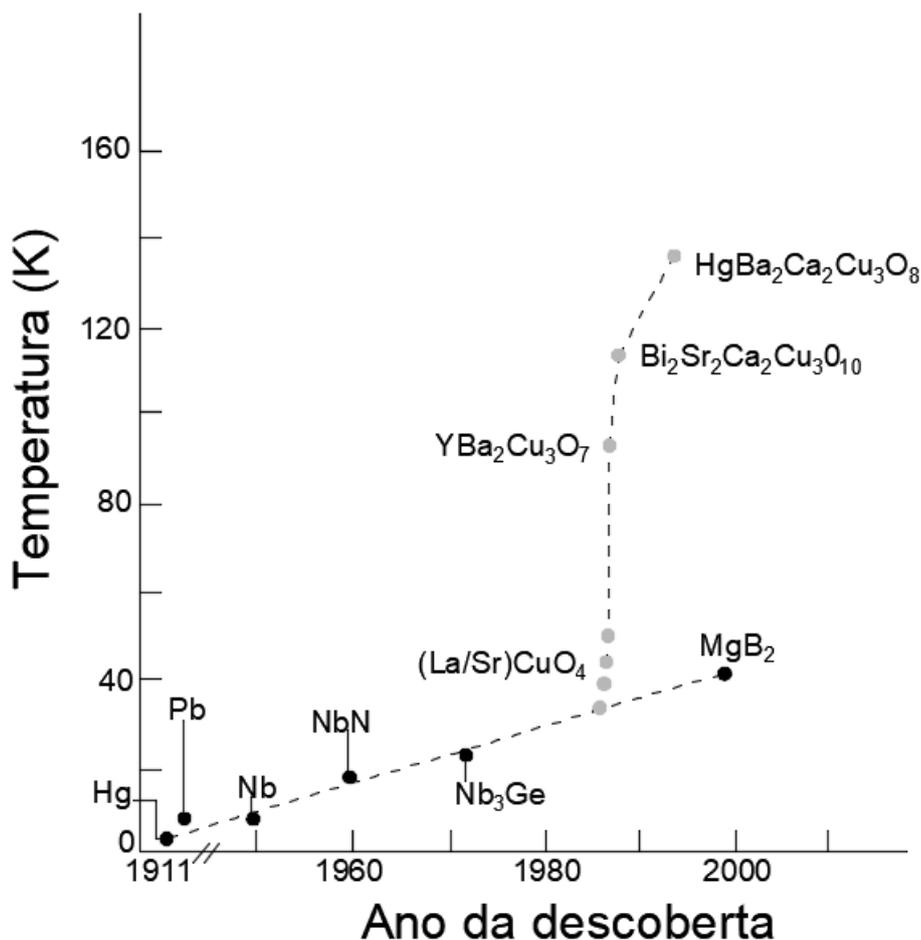


Figura 1 – Evolução da descoberta dos materiais e compostos supercondutores

2.1 Propriedades dos Supercondutores

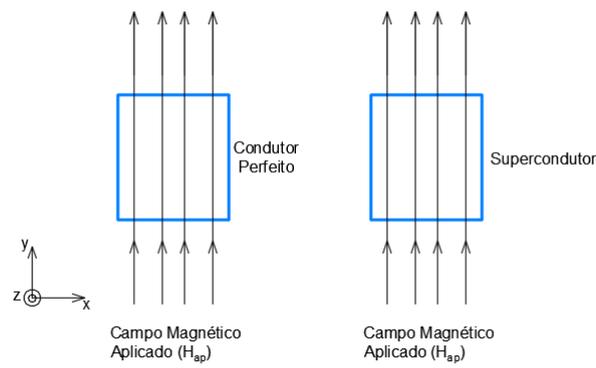
Neste tópico, de forma breve serão apresentadas as propriedades intrínsecas dos materiais supercondutores. Onde, para o bom entendimento do texto são definidos os seguintes termos: Temperatura Crítica - caso o material supercondutor esteja abaixo

da temperatura crítica, o mesmo apresentará a fenômeno da supercondutividade. Densidade de corrente crítica - caso o material presencie uma corrente acima da densidade de corrente crítica, o mesmo deixará o estado supercondutor. Campo Magnético Crítico - O material encontra-se no estado supercondutor se o mesmo estiver abaixo do valor de campo magnético crítico. Além disso, destaca-se que para o material esteja no estado supercondutor, este deverá atender as três condições (temperatura crítica, densidade de corrente crítica e campo magnético crítico) simultaneamente.

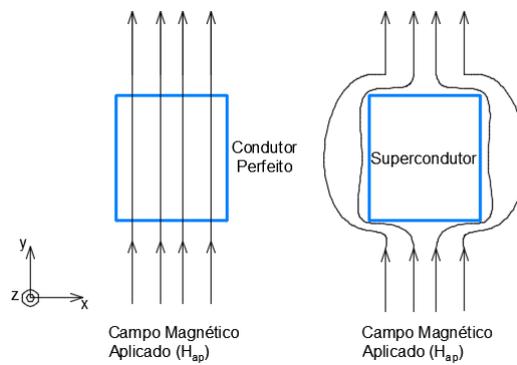
2.1.1 Diamagnetismo Perfeito - Efeito Meissner

Para o melhor entendimento entre a diferença do material supercondutor e o material condutor perfeito, bem como o efeito Meissner, propõe-se um exercício com auxílio da figura 2, onde encontra-se, respectivamente, do lado direito uma amostra de material supercondutor e do lado esquerdo uma amostra de material condutor perfeito. Para este exercício ambos os materiais iniciarão na presença de campo magnético (H_{ap}) na direção y e numa temperatura acima da temperatura crítica (temperatura na qual a supercondutividade começa a ser observada), conforme na figura 2(a). Após resfriar as amostras abaixo da temperatura crítica. Observa-se na figura 2(b) que a amostra supercondutora expulsou o campo magnético do seu interior a menos de um camada fina na borda do supercondutor (supondo que $H_{ap} < H_c$, onde H_c é o campo magnético crítico para se manter o material no estado supercondutor). Já a amostra condutora perfeita, não altera o campo magnético que a atravessa. Por fim, cessa-se o campo magnético aplicado sobre as amostras. Desta forma, observa-se que a amostra condutora perfeita aprisiona o campo magnético aplicado inicialmente, conforme previsto pela teoria eletromagnética. Já a amostra supercondutora não aprisiona o campo magnético no seu interior figura 2(c). Pois, neste caso, o campo magnético não varia no interior do supercondutor e por isso nenhuma corrente é induzida.

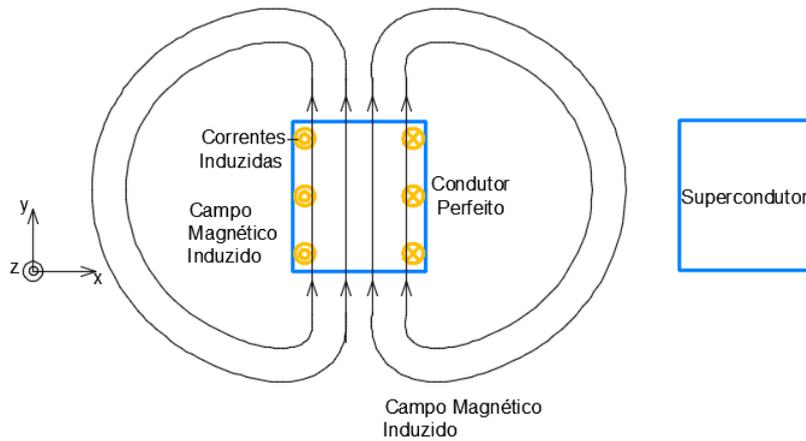
Outra descoberta de grande importância foi a existência de dois tipos de materiais supercondutores, tipo I e tipo II. Os materiais supercondutores do tipo I são apenas de interesse teórico, pois possuem um campo magnético crítico (H_c) muito baixo e portanto sua aplicação na prática é descartada. Este tipo de supercondutor possui apenas o estado Meissner e o estado normal. Já os supercondutores do tipo II são



(a) Condutor Perfeito e Supercondutor antes de serem resfriados



(b) Condutor Perfeito e Supercondutor após de serem resfriados abaixo da temperatura crítica



(c) Condutor Perfeito e Supercondutor após de serem resfriados abaixo da temperatura crítica e o campo magnético aplicado ser retirado

Figura 2 – Ilustração do efeitos Meissner e da diferença entre matérias condutores perfeitos e materiais supercondutores.

aplicados na prática em diversas soluções de engenharia. Por este motivo, a próxima seção explicará em mais detalhes este tipo.

2.1.2 Supercondutores do tipo II

Os supercondutores do tipo II possuem o estado Meissner, o estado normal e o estado misto. O estado misto é caracterizado pela penetração quantizada de fluxo magnético no material supercondutor. Este fenômeno foi teoricamente previsto por A. Abrikosov em 1957 [28]. Quando uma amostra de material supercondutor do tipo II encontra-se no estado misto, as regiões normais (também conhecidas como fluxóides) e supercondutoras coexistirão no material. A distribuição desses domínios de estado normal se dá através de uma rede trigonal, conforme apresentado na figura 3.

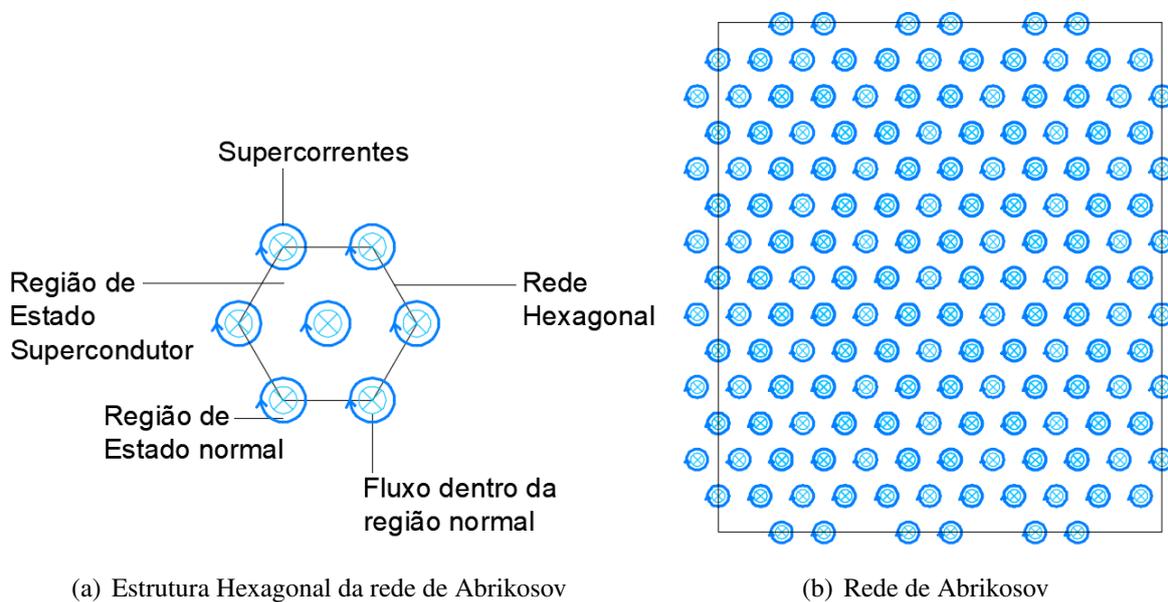


Figura 3 – Formação da rede de Abrikosov

Destaca-se que o fluxo magnético aprisionado em cada fluxóide é igual à $\phi_0 = 2.068 \times 10^{-15}$ Wb. A primeira imagem da rede de A. Abrikosov foi gerada por U. Essmanne and H. Trauble em [29], onde neste trabalho foi comprovada a estrutura hexagonal proposta. Desta forma, os supercondutores do tipo II possuem dois campos magnéticos críticos, tipicamente chamados de H_{c1} e H_{c2} . Quando o valor do campo magnético externo é igual ou menor que o valor de H_{c1} o material estará no estado Meissner e expelirá por completo o campo magnético do seu interior. Porém, caso o campo magnético esteja entre H_{c1} e H_{c2} o supercondutor estará no estado misto apresentando uma penetração de fluxo de forma quantizada. Por fim, caso o campo magnético aplicado seja maior que H_{c2} o material estará no estado normal. A figura 4

apresenta o diagrama de fases do supercondutor do tipo II. Todo os supercondutores que são utilizados em aplicações práticas são do Tipo 2, possuindo H_{c2} elevado.

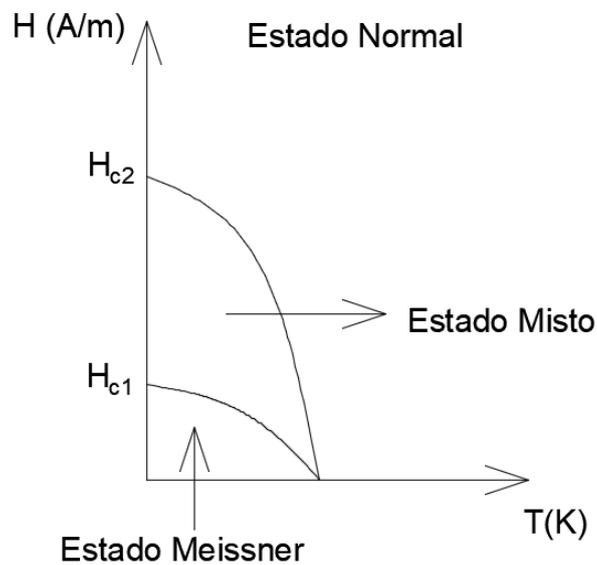


Figura 4 – Diagrama de fases do supercondutor do tipo II

2.1.3 Comprimento de Coerência e Profundidade de penetração de London

O comprimento de coerência e a profundidade de penetração de London são funções da temperatura e são usados para caracterizar os tipos de supercondutores. A profundidade de penetração de London é a distância média que o fluxo magnético externo penetra no material supercondutor. Já o comprimento de coerência é a distância necessária para que a densidade de superelétrons na fronteira entre as regiões normais e supercondutora suba de zero para a sua quantidade normal no interior do supercondutor [30, 31].

2.1.4 Densidade de Corrente Crítica

Assim como a temperatura crítica e o campo magnético crítico, os materiais supercondutores possuem uma densidade de corrente crítica. Ou seja, há uma capacidade máxima de corrente que pode ser transportada ou induzida no supercondutor sem que o material transite para o estado normal.

Considerado as condições para o supercondutor do tipo I: a) sendo resfriado à uma temperatura abaixo da temperatura crítica, b) carregando uma corrente e c)

considerando uma seção transversal circular com uma espessura muito menor que o comprimento de penetração de London. Neste cenário, o material supercondutor do tipo I encontra-se no estado Meissner e por isso todo o campo magnético externo é expulso do seu interior. Desta forma, para que as equações de Maxwell sejam atendidas não deve haver circulação de corrente no interior do material. Sendo assim, toda a corrente deverá fluir através de uma fina camada nas bordas do supercondutor. Conforme proposto por Silsbee em 1916 [32], o valor da corrente crítica é atingido quando o valor da densidade de campo magnético na borda do supercondutor é igual ao valor da densidade de campo magnético crítico termodinâmico (B_{cth}).

Já os supercondutores do tipo II, como apresentam o estado de Meissner e também o estado Misto, possuem características diferentes no que concerne os conceitos da densidade de corrente crítica do material. No caso em que material experimente um campo magnético menor que H_{c1} , este estará no estado Meissner, apresentando o mesmo comportamento do supercondutor do Tipo I. Porém, caso em que o material esteja na região do estado misto, a corrente não fluirá apenas nas bordas do supercondutor e irá distribuir-se por toda a seção transversal do material. Desta forma, com a penetração quantizada do fluxo magnético no supercondutor e a corrente de transporte fluindo no interior do material, forças de Lorentz irão surgir nos fluxóides. Estas forças provocarão uma movimentação dos vórtices e consequentemente uma resistência elétrica aparecerá no material, oriunda desta movimentação. Este comportamento está representado na figura 5.

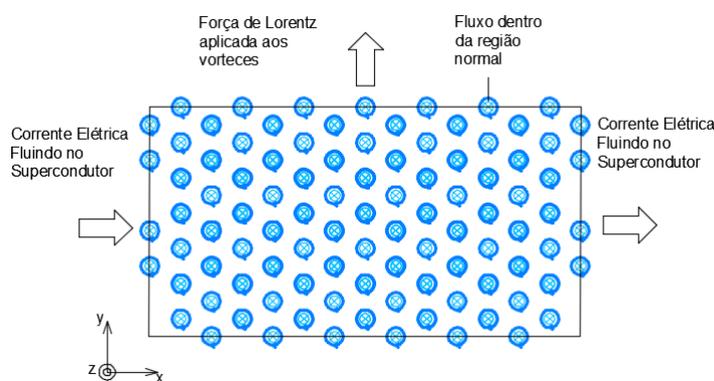


Figura 5 – Força de Lorentz devido a uma corrente de transporte e a penetração quantizado de fluxo magnético no material supercondutor do tipo II

2.1.5 Formulações e modelos fenomenológicos para simulação dos materiais supercondutores

Ao longo do tempo, para modelagem fenomenológica dos materiais supercondutores muitas formulações foram sendo desenvolvidas. As mais recentemente usadas estão resumidas na tabela 1¹.

Formulações	Referências
Formulação H	[33, 34]
Formulação A-H	[35, 36]
Formulações T-A	[18, 10]
Formulação Equação Integral	[37, 38]
Formulação MEMEP	[39]
Formulação VIE	[40]

Tabela 1 – Tabela com o resumo das formulações para modelar os materiais supercondutores.

Dentre estas, as formulações H e T-A apresentam uma ampla literatura, sendo usadas para modelar diversas aplicações, como por exemplo, Máquinas Elétricas [36, 41], Limitadores de Curto-Circuito [10], Mancais Magnéticos [31, 42] e Armazenadores de Energia Magnética Supercondutores (*Superconducting Magnetic Energy Storage* -SMES) [43]. Neste trabalho, a formulação T-A é usada para modelar o material supercondutor e seu comportamento. Todos os detalhes desta formulação estarão explicados nas seções seguintes.

Além disso, independentemente das diversas possibilidades de formulações para modelar os materiais supercondutores, existem também, algumas leis constitutivas que podem ser aplicadas no modelo dos materiais supercondutores, são estas: modelo de estado crítico [30, 44], modelo da lei de potência (ou "*Power-Law*" em inglês) [45] e modelo de percolação (ou "*Percolation Model*" em inglês) [46]. Para o modelo de estado crítico apenas a densidade de corrente crítica (J_c) é utilizada para representar a relação E-J que é dada pelas equações 2.1, onde o modelo assume uma resistividade igual à zero até a densidade de corrente atinja o valor de J_c , deste valor em diante a resistividade do material supercondutor torna-se infinita. Desta forma, o estado crítico possui uma descontinuidade em J_c . Já o modelo da *Power-Law* possui dois parâmetros (n e J_c) e uma relação E-J modelada por uma função contínua, conforme

¹ VIE - Volume integral equation-based equivalent circuit
MEMEP - Minimum Electromagnetic Entropy Production

apresentada na equação 2.2. Onde, o n é chamado de índice de transição. Por fim, *Percolation Model* é um modelo que possui três parâmetros (n e J_c e $J_{c_{min}}$). Segundo F. Sirois *et al* [47], este modelo pode ser considerado com uma expansão do modelo da *power-law* e é dado pela equação 2.3. Neste modelo, caso o valor de densidade de corrente seja menor que $J_{c_{min}}$ então o valor do campo elétrico será igual à 0. Porém, no caso em que o valor da densidade de corrente crítica é maior que $J_{c_{min}}$ o campo elétrico será modelado por uma função com o mesmo formato da *power-law*, porém deslocado de $J_{c_{min}}$. No presente trabalho o material supercondutor será modelado usando a *power-law*, pois este modela de forma apropriada a não linearidade E-J dos materiais supercondutores.

$$J = \begin{cases} 0 & J < J_c \\ J_c & J \geq J_c \end{cases} \quad (2.1)$$

$$E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2.2)$$

$$E(J) = \begin{cases} 0 & J \leq J_{c_{min}} \\ E_c \left(\frac{J - J_{c_{min}}}{J_c - J_{c_{min}}} \right)^n & J \geq J_{c_{min}} \end{cases} \quad (2.3)$$

Por fim, para modelar a dependência da densidade da corrente crítica em função do campo magnético e da temperatura, alguns modelos são apresentados na literatura. Para representar a dependência de J_c em função da temperatura utiliza-se a equação 2.4 [9], onde J_{c0} representa a densidade de corrente crítica para a temperatura de transição do estado supercondutor para o estado normal (T_c) e T_r representa a temperatura de ebulição do meio em que o material supercondutor está inserido². Neste trabalho será considerado que o material supercondutor irá operar em um regime isotérmico. Portanto, a temperatura do não irá variar. Deste modo, pode-se desconsiderar a variação da densidade de corrente crítica em função da temperatura. Neste trabalho, para a representação matemática da dependência de J_c em função do campo magnético utiliza-se o modelo de Anderson-Kim adaptado, conforme apresentado na equação

² Geralmente T_r é igual à 77K, temperatura de ebulição do nitrogênio líquido para 1 atm.

2.5 [48].

$$J_c(T) = \frac{T_c - T}{T_c - T_r} \cdot J_{c0} \quad (2.4)$$

$$J_c(B_{\perp}, B_{//}) = \frac{J_{c0}}{\left[1 + \left(\frac{k^2 \cdot B_{//}^2 + B_{\perp}^2}{B_0^2} \right)^{0.5} \right]^{\alpha}}, \quad (2.5)$$

onde,

J_{c0} é a Densidade de Corrente crítica a 77K sem a presença de campo magnético.

k é o fator de anisotropia do supercondutor.

α é o fator expoente da função determinado experimentalmente.

2.2 Fita supercondutora

Devido ao processo de fabricação em escala industrial, as fitas supercondutoras, em especial a fita de segunda geração, surgem como um bom custo-benefício. A fita supercondutora, possui melhores estabilidade térmica, resistência mecânica quando comparada os blocos de material supercondutores maciços. Além disso, as fitas são compostas de elementos estratificados, conforme figura 6.

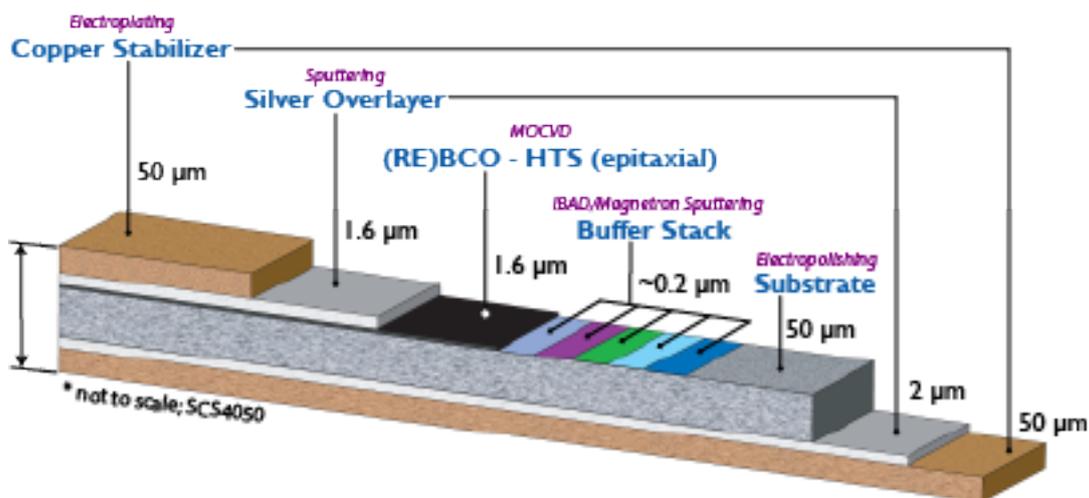


Figura 6 – Estratificação da fita supercondutora de 2ª geração.

A camada de prata proporciona uma baixa resistividade facilitando o contato elétrico. Bem como, fornece a função da estabilidade química e térmica para a

camada de alta temperatura. Além disso, a camada de prata aumenta a resistência mecânica do conjunto e proporciona também a estabilidade térmica. Já o substrato tem a função de base orientando os grãos no processo de recobrimento com supercondutor. Para os substratos as ligas mais usadas podem ser:

- Tungstênio
- Níquel
- Hastelloy

Em 2000 as primeiras fitas supercondutoras são fabricadas usando-se filamentos de óxido de Bismuto, Cálcio, Estrôncio e Cobre (*BSCCO*) (Bi-2223). Neste caso, a densidade de corrente crítica da fita possuía uma alta dependência com o campo magnético, limitando assim suas aplicações.

Em 2005 foi desenvolvida a segunda geração das fitas supercondutoras. Esta possuía camadas de YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$) que foi desenvolvido através da técnica de deposição, o que ajudou no processo de produção da fita em escala industrial. Cada vez mais as fitas supercondutoras vêm ganhando espaço no mercado, através de diversas aplicações. O processo de fabricação garantiu ao mercado regularidade de fornecimento e de estoques. Abaixo cita-se alguns dos fabricantes que trabalham no processo de fabricação das bobinas supercondutoras: SuperPower, American Superconductors, Shanghai Superconductor, Bruker, SuNAM e SuperOX.

Como desvantagens, as fitas de segunda geração apresentam o comportamento de J_c não-linear e sensível à direção de incidência do campo magnético na fita. Essa fato advém da forma que a estrutura cristalina da composição YBCO é organizada.

2.3 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os aspectos básicos da supercondutividade. Foram discutidos o efeito Meissner, a Rede de Abrikosov, o comprimento de coerência e a profundidade de penetração, a densidade de corrente crítica, bem como foram apresentadas as formulações e os modelos fenomenológicos usados para modelar

os materiais supercondutores. Por fim, a estrutura das fitas supercondutoras são apresentadas.

3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

Como consequência do crescente aumento na demanda de energia ao longo dos anos e da geração distribuída cada vez mais presente, o aumento da corrente de curto circuito é observado. Na atualidade, os equipamentos comerciais usados para mitigar este problema são: reatores de núcleo de ar, dispositivos pirotécnicos, resistores de aterramento de neutro e transformadores de alta impedância. Contudo, esses equipamentos apresentam desvantagens para o sistema elétrico. Por exemplo, o reator de núcleo de ar e os transformadores de alta impedância apresentam dissipação de energia visto sua inserção em série com o sistema. Já no caso dos dispositivos pirotécnicos, há a necessidade de troca manual do equipamento cada vez que o mesmo atua. Os resistores de aterramento só são capazes de mitigar as faltas que tenham seu retorno de corrente pelo terra. Além destas soluções comerciais, um equipamento que vem sendo estudado na literatura para mitigar o problema das faltas no sistema são os limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores e os de eletrônica de potência. As características desejadas para um limitador de curto-circuito são [3];

- a) baixas perdas de potências e queda de tensão em regime permanente.
- b) elevada capacidade de limitação da corrente de curto-circuito, seja esta CA ou CC.
- c) tempo de resposta em uma situação de curto-circuito na ordem de dezenas de micro-segundos.
- d) tempo de recuperação menor que o tempo de fechamento dos disjuntores da Subestação em que o limitador está alocado.
- e) capacidade de múltiplas atuações consecutivas.
- f) manter a capacidade de limitação do curto circuito independentemente dos fatores do sistema de potência, por exemplo, tipo de falta e localização da falta.
- g) não atuar indevidamente em partidas de máquinas elétricas, correntes *inrush* de transformadores.

- h) possuir falha segura. Ou seja, mesmo com a falha do equipamento a corrente de curto-circuito não colocará em riscos os sistema à montante do limitador.
- i) possuir baixa influência no ajuste da proteção onde o equipamento está instalado.

Como já mencionado, dentro das soluções deste limitadores apresentadas na literatura existem: os limitadores de curto-circuito baseados em eletrônica de potência [49, 50, 51], os limitadores de curto-circuito supercondutores [6, 10, 13, 52] e os limitadores híbridos que são limitadores que unem as duas topologias anteriores. Focando nos limitadores supercondutores, estes ainda podem ser subdivididos em categorias como limitadores resistivos [8, 53, 54] e os indutivos, como por exemplo os limitadores de núcleo blindado [52, 55, 56] e os limitadores de núcleo saturado [11, 57].

Além disso os LCCS podem ser divididos em três grandes grupos: o primeiro grupo trabalha em um sistema sem a transição do estado supercondutor, já o segundo grupo trabalha com a transição de estado do material supercondutor e o terceiro grupo sofre a transição de estado dependendo do tipo de falta ocorrida. Atualmente o interesse pelo terceiro grupo é muito baixo e apenas pesquisas e protótipos laboratoriais foram feitos [3].

Os limitadores de estado de transição são caracterizados por mudarem do estado supercondutor para o normal quando uma das variáveis críticas (temperatura crítica, densidade de corrente crítica e campo magnético crítico) é atingida. Neste momento o material deixa o estado supercondutor e apresenta-se para o sistema como uma alta impedância. Já os limitadores sem transição de estado são usados com o propósito de redução do tamanho das bobinas e na redução de perdas de energia nos enrolamentos de cobre. Estes equipamentos sempre trabalham no estado supercondutor, independentemente do momento em que o sistema se encontra (normal ou curto-circuito).

A Figura 7 apresenta um resumo dos tipos de limitadores supercondutores estudados na literatura [3]. Neste trabalho será estudado um limitador de núcleo saturado que se encontra no grupo de limitadores sem transição de estado. Sendo assim, no próximo tópico serão apresentados os detalhes deste equipamento destacando-se,

principalmente, suas vantagens, desvantagens e principais aplicações.

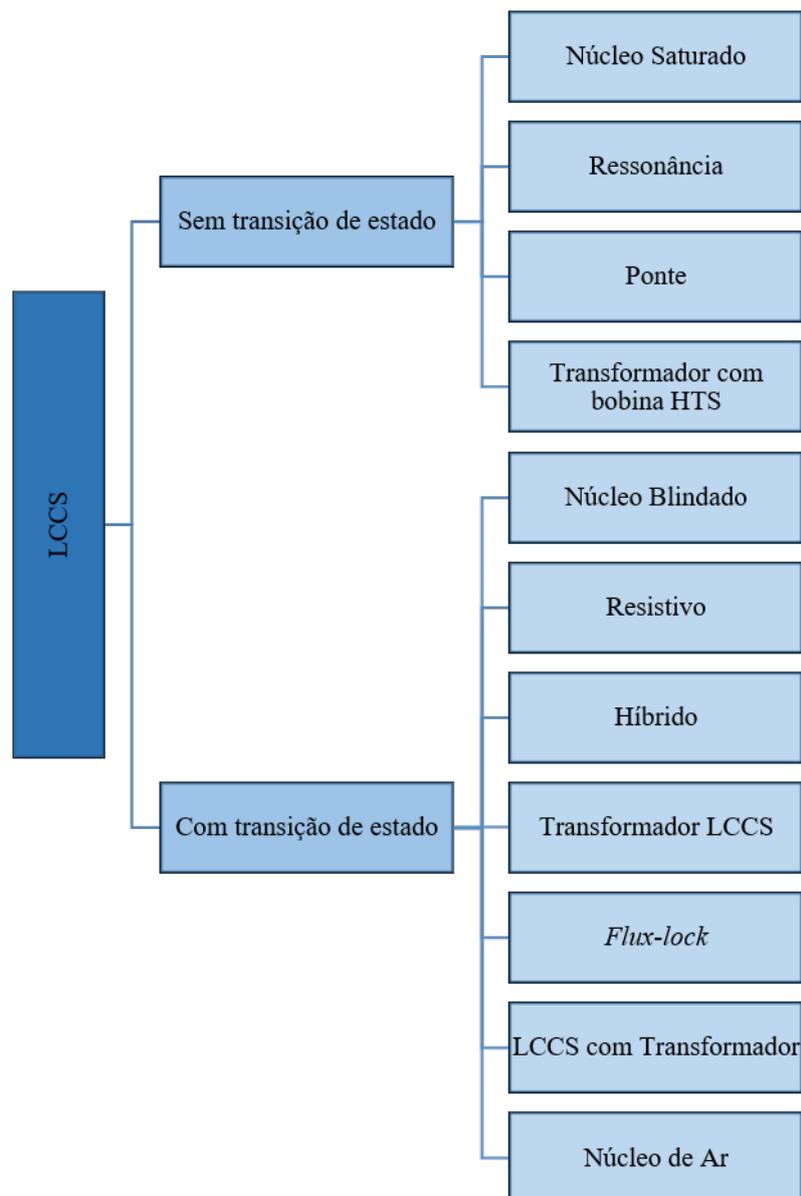


Figura 7 – Tipo de Limitadores Supercondutores

3.1 Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado

A partir de 1980, limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores de núcleo saturado começaram a ser estudados [58, 59, 60]. Ao longo dos anos, diversas topologias LCC-NS foram desenvolvidas. Como, por exemplo, os LCC-NS de núcleo aberto [61], nesta topologia o limitador possui seis núcleos ferromagnéticos abertos,

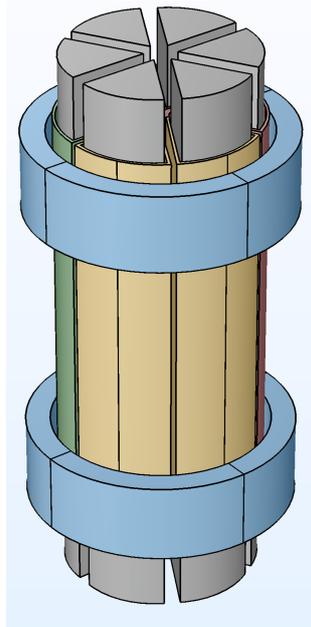


Figura 8 – Limitador de Núcleo Saturado Aberto.

com dois núcleos por fase, conforme na figura 8. Além disto, dois enrolamentos CC envolvem todos os núcleos ferromagnéticos. Para esta topologia também existem proposta de limitadores monofásicos [62, 63, 64].

Outra topologia bastante estudada na literatura é o LCC-NS de ímã permanente. Neste caso, o enrolamento CC é substituído pelos ímãs. Dentro desta topologia muitas propostas de geometria do núcleo ferromagnético são feitas [65], bem como são apresentadas diversas análises numéricas e experimentais desta topologia [66, 67, 68, 69]. Além disso, um modelo de otimização é proposto para sistemas de HVDC nesta topologia [70]. Há também os LCC-NS híbridos que apresentam topologias com ímãs permanentes ou com enrolamento CC [71, 72, 73, 74]. Por fim existem os LCC-NS de núcleo fechado, que vêm sendo estudado pela literatura. Na topologia LCC-NS de núcleo fechado na maior parte dos estudos apresentados o enrolamento CC é construído com material supercondutor para reduzir as perdas do material e o volume do enrolamento.

Para esta topologia, diversas propostas de modelos, análises e otimizações foram apresentadas. Por exemplo, em [75], N. Vilhena *et al* propõe uma metodologia para modelar e simular o LCC-NS e compara com resultados de simulações em MEF. Já em [76], N. Vilhena *et al* propõe uma metodologia para otimização do limitador LCC-NS. Neste caso, um algoritmo genético é usado para o processo de otimização. Já em

[77], M.Ahmadvand *et al* propõe uma nova topologia para o limitador, sua vantagem é a redução do uso de material ferromagnético. Por outro lado, sua desvantagem é a incapacidade de atuar em todos os tipos de curto-circuitos. Em [78], M.Baferani *et al* apresenta uma nova configuração com formato circular, o autor também apresenta resultados experimentais da proposta. Em [79], M. Eladawy *et al* apresenta uma nova configuração de 5- pernas para o limitador de núcleo saturado. Além disso, uma revisão bibliográfica é feita apresentando-se diversas topologias para LCC-NS.

Já em [80] um limitador de 35 kV/90 MVA é desenvolvido por Y. Xin *et al*. Em [81] é apresentado o sistema criogênico do enrolamento CC deste protótipo, em [82] a fabricação e proteção do enrolamento supercondutor CC são discutidos, bem como o transitório da corrente de no supercondutor no momento do curto-circuito é apresentado. Por fim, exibe-se a reenergização da bobina CC após o curto-circuito. Já em [83] o processo de magnetização da bobina supercondutora é apresentado em detalhes. São discutidos neste artigo o tempo para energização da bobina, os sistemas de proteção e o controle para energização do enrolamento CC. Em [84], é apresentado um modelo para o sistema de controle do limitador proposto em [80]. As simulações para o projeto do limitador com a topologia de [80] são apresentadas em [85]. Por fim, em [86] são apresentados os testes de campo do protótipo.

Em [11], Y. Xin *et al* apresenta um protótipo de LCC-NS de núcleo de 220 kV/300 MVA. Neste trabalho são discutidos a fabricação do enrolamento supercondutor, o esquemático do *dewar*, o esquemático dos tanques de óleo do equipamento e por fim é apresentado o sistema de magnetização da bobina CC. Em [87], os autores apresentam um modelo para analisar o transitório de sobretensão do limitador de 220 kV. Em [88], os autores apresentam o projeto, a fabricação e a operação do sistema criogênico para o limitador de 220 kV. Por fim em [89], o teste de campo deste limitador é apresentado.

Mais recentemente um limitador de 500 kV está sendo desenvolvido. Em [90] são apresentados os resultados das simulações de um limitador de 500 kV. Neste trabalho são apresentados os resultados de tensão e corrente na entrada e saída do limitador, a queda de tensão no lado CC e CA, as correntes no lado CC e CA, a potência dissipada pelo equipamento, bem como a reatância do equipamento. Em

[91] os autores apresentam a tecnologia de bobinamento e o estudo experimental do enrolamento supercondutor para o protótipo de 500 kV. Neste caso para fabricação deste enrolamento usam-se dois tipos de materiais supercondutores, o YBCO e o Bi-2223. Em [92] os autores apresentam um estudo eletromagnético do protótipo. Neste trabalho conclui-se que o material YBCO é necessário para superar o efeito adverso da anisotropia do supercondutor. Além disso, as bobinas de YBCO e Bi-2223 são alimentadas por duas fontes independentes. Mais ainda, alcança-se com o uso do YBCO um aumento de 20% na força magnetomotriz do enrolamento CC. Em [93] os autores apresentam um estudo do transitório eletromagnético do limitador de 500 kV. Em regime permanente a corrente do limitador é igual a 300 A pico, já em curto-circuito uma corrente máxima de 150 kA pico pode ser observada. Por fim em [94] os autores apresentam o sistema criogênico do limitador de 500 kV.

A tabela 2 resume os protótipos de maior relevância em relação a níveis de tensão e corrente estudados na literatura:

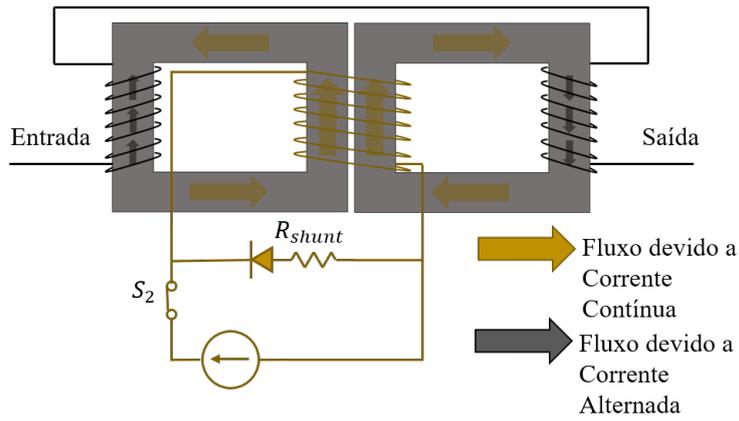
Tabela 2 – Limitadores de curto-circuito de Núcleo Saturado.

Ano	Empresa/Autor	País	Componente	Tensão(kV)	Corrente(kA)	Fases
1982	B. P. Raju[95]	UK	Nb-Ti	3	0.556	1
2011	Innopower [80, 12, 96, 86]	CN	1G wire	35	1.5	3
2014	Innopower [88, 14]	CN	1G wire	220	0.8	3
2013	Zenergy[97, 98]	UK	1G wire	12	0.8	3
2016	D. Klaus [99, 61]	UK	MgB_2	36	0.8	3
2018	T. Ma & C. Liang [92, 91]	CN	Bi-2223 & YBCO	500	-	1

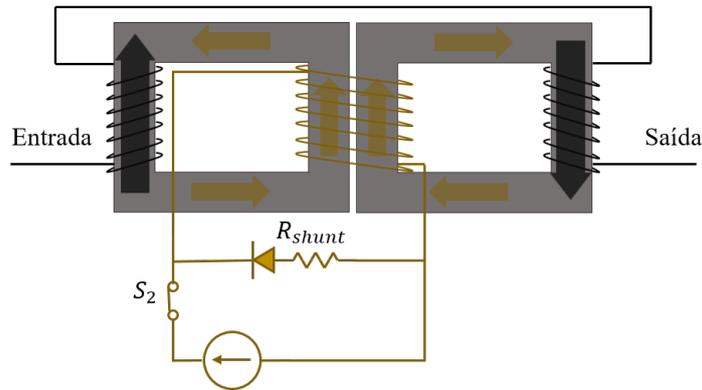
Dentre as diversas topologias de LCCS-NS apresentadas, a que será estudada neste trabalho será a LCCS-NS. Através das referências acima observa-se a relevância deste protótipo no cenário atual de limitadores de curto-circuito.

A figura 3.1 apresenta o LCCS-NS com dois núcleos. Os enrolamentos das bobinas de corrente alternada (enrolamentos em preto) são colocados um em cada núcleo ferromagnético, enrolados em direções contrárias e estão ligados em série em uma ligação subtrativa. Nas pernas mais internas do LCCS-NS, abraçando os dois núcleos, encontra-se o enrolamento CC (em dourado) que está ligado a uma fonte de corrente por uma chave normalmente fechada (S_2). O circuito de dissipação de potência é apresentado através do resistor paralelo e o diodo de roda livre, como pode ser observado na figura 3.1.

O funcionamento deste LCCS-NS é da seguinte forma: em regime permanente



(a) Limitador LCCS-NS em regime permanente



(b) Limitador LCCS-NS em curto-circuito

Figura 9 – Esquemático monofásico do LCCS-NS

o limitador trabalha em saturação, pois de acordo com as equações 3.1 e 3.2 a força magnetomotriz produzida pelo enrolamento CC supera a força magnetomotriz produzida pelo enrolamento CA. Onde, N_{cc} , I_{cc} , N_{ca} , I_{ca} , H_{1ca} , H_{2ca} e l são o número de espiras do enrolamentos da bobina CC, a corrente do enrolamento CC, o número de enrolamento CA, a corrente do enrolamento CA, o campo magnético CA do núcleo 1, o campo magnético CA do núcleo 2 e o comprimento médio dos núcleo, respectivamente.

$$N_{cc}I_{cc} - N_{ca}I_{ca} = H_{1ca}l, \tag{3.1}$$

$$N_{cc}I_{cc} + N_{ca}I_{ca} = H_{2ca}l, \tag{3.2}$$

Sendo a força magnetomotriz CC muito maior que a CA e de acordo com as equações 3.3, 3.4 e 3.5, em regime permanente, a permeabilidade do núcleo será

próxima da do ar e, portanto, a indutância, e conseqüentemente a impedância, do limitador será baixa. Onde, V_{1ca} , A , V_{2ca} , μ_1 , μ_2 e μ_0 são a tensão do enrolamento CA do núcleo ferromagnético 1, a área da seção transversal do núcleo ferromagnético, a tensão do enrolamento CA do núcleo ferromagnético 2, a permeabilidade do núcleo 1, a permeabilidade do núcleo 2 e a permeabilidade no vácuo, respectivamente.

$$V_{1ca} = \frac{N_{ca}^2 A \mu_1}{l} \frac{dI_{ca}}{dt}, \quad (3.3)$$

$$V_{2ca} = -\frac{N_{ca}^2 A \mu_2}{l} \frac{dI_{ca}}{dt}, \quad (3.4)$$

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_0, \quad (3.5)$$

Sendo assim, o equipamento apresenta uma baixa queda de tensão, conforme pode ser observado na equação 3.6.

$$V_{totalca} = V_{1ca} + V_{2ca} + R_{carga} \cdot I_{ca} \quad (3.6)$$

onde, $V_{totalca}$ e R_{carga} são a tensão total e a resistência total dos enrolamentos CA, respectivamente.

Porém, no instante do curto-circuito a força magnetomotriz devido ao enrolamento de corrente alternada iguala-se a força magnetomotriz devido ao enrolamento de corrente contínua, desmagnetizando o núcleo ferromagnético. Neste instante o ponto de operação da curva B-H do material é alterado para a região linear. Desta forma, as permeabilidades magnéticas dos núcleos ferromagnéticos serão regidas pelas equações 3.7 e 3.8. Onde, μ_{curto} representa a permeabilidade do núcleo ferromagnético que é desmagnetizado. Percebe-se que μ_{curto} é muito maior que μ_0 . Sendo assim, o equipamento apresenta uma alta impedância proveniente da desmagnetização dos núcleos do limitador. Então, no momento do curto, a corrente de falta presenciara uma impedância do LCCS-NS e será limitada.

$$\mu_1 = \mu_0 \quad (3.7)$$

$$\mu_2 = \mu_{curto} \quad (3.8)$$

A figura 3.1 (a) mostra o limitador no estado normal em um dado instante de tempo. Nota-se que no núcleo ferromagnético da esquerda, o fluxo magnético do enrolamento CC (ϕ_{CC}) está em sentido oposto ao fluxo magnético do enrolamento CA (ϕ_{CA}). Já no núcleo da direita os dois fluxos estão no mesmo sentido. Porém, como $\phi_{CC} \gg \phi_{CA}$ os dois núcleos encontram-se saturados. Contudo, observando a figura 3.1(b), no momento do curto-circuito $\phi_{CA} > \phi_{CC}$, conforme a figura 10 exemplifica. Então, o núcleo da esquerda entra na região linear da curva de saturação do material ferromagnético. Desta forma, o valor de μ_r altera-se para um valor muito maior que μ_0 . Logo, o valor da indutância do limitador aumenta rapidamente, limitando a corrente de curto.

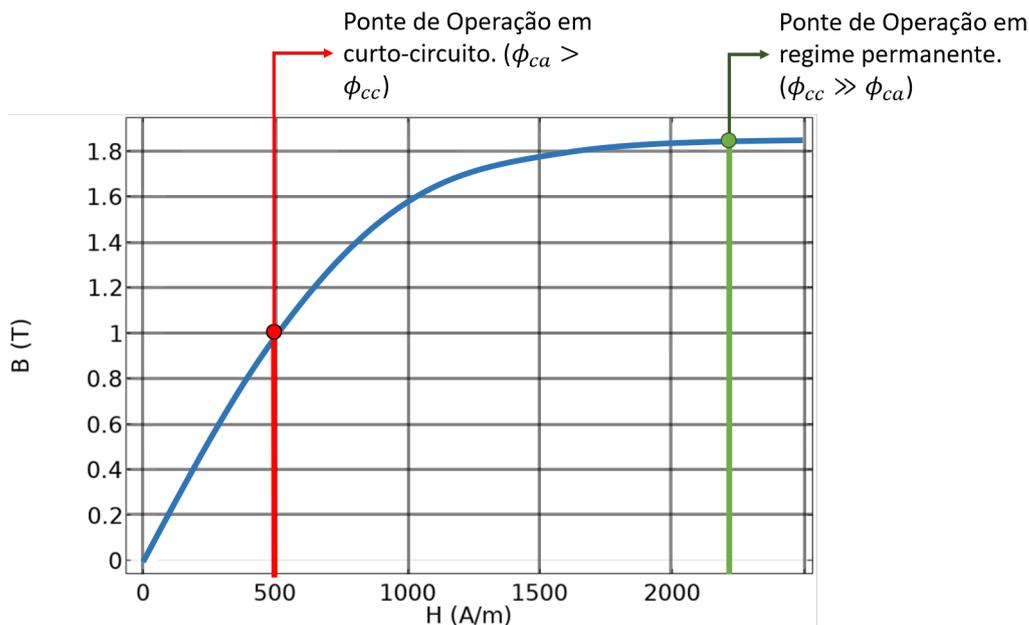


Figura 10 – Curva B-H para exemplificar os dois pontos de operação do LCCS-NS

Outro ponto importante é que, como o material supercondutor não sofre transição para o estado normal, este pode atuar diversas vezes em um pequeno intervalo de tempo. Desta forma, para um defeito permanente na rede onde haja a necessidade de atuações simultâneas, o LCCS-NS tem uma vantagem sobre os outros tipos de limitadores que não possuem essa característica. Outra vantagem deste limitador é a

a sua capacidade de aplicação em uma larga faixa de tensão, sendo capaz de atuar em média ou alta tensão [11, 100].

Contudo, as desvantagens desta topologia são o peso e espaço utilizado, devido ao volume de material ferromagnético usado para construção do equipamento. Além disso, um custo é somado ao projeto, para atender ao sistema de refrigeração. Uma importante característica que deve ser observada no LCCS-NS é a baixa dissipação de energia nos enrolamentos CC. Devido as propriedades do material supercondutor as perdas no enrolamento CC serão provenientes apenas da variação do fluxo magnético gerados pelos enrolamentos CA [101].

Segundo [102], quanto maior o valor da corrente contínua aplicada ao enrolamento CC, maiores serão as perdas no núcleo ferromagnético. Além disso, para uma maior saturação do núcleo ferromagnético, existirá uma maior quantidade de fluxo magnético disperso sobre a fita supercondutora, aumentando as perdas na mesma. Sendo assim, um pode-se supor que há um ponto ótimo entre alimentação da corrente contínua e as perdas geradas no núcleo e no material supercondutor.

Outra característica do enrolamento CC a ser observada é sua tensão induzida no instante do curto circuito. Em determinados casos a severidade do curto pode provocar uma tensão induzida maior que a tensão da fonte que alimenta o enrolamento CC.

Consequentemente, o fluxo da corrente é revertido e como muitas fontes de alimentação não são capazes de absorver corrente reversas, acabam sendo danificadas. Maneiras de contornar essa questão vem sendo estudas na literatura. Soluções como uma abertura de chave controlada e novas topologias que mitiguem esse problema vem sendo estudadas [100, 103, 104].

Uma consequência da aplicação de LCCs em linhas de transmissão, é a modificação nos ajustes do relés de proteção. Estudos sobre o efeito do LCCS-NS sobre a coordenação da proteção têm sido realizados. Em [105] é mostrado através de simulações os impactos adversos deste tipo de limitador. Além disso, é proposta uma solução para mitigar esse problema.

Dos projetos do LCCS-NS que podem ser encontrados na literatura, dois que merecem destaque são os projetos desenvolvidos pela *Innopower* [106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 12, 115, 13, 116, 117, 118] e pela *Zenergy* [119, 120, 121,

122]. Nestes projetos podem ser observados os modelos de simulações usados, as metodologias implementadas para simulação, além dos processos de fabricação dos limitadores.

3.2 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo é realizada uma breve revisão sobre LCC. As diversas topologias são apresentadas. O enfoque maior foi dado no LCCS-NS, onde é apresentado o funcionamento deste tipo de limitador e seus pormenores. As vantagens e desvantagens mais relevantes deste equipamento são ressaltados, levando em consideração os trabalhos apresentados na literatura.

4 Modelos matemáticos em elementos finitos

Inicialmente o método de elementos finitos (MEF) foi utilizado para resolver problemas mecânicos e termodinâmicos [123, 124, 125]. No entanto, o avanço desta técnica de simulação possibilitou a modelagem de elementos eletromagnéticos em elementos finitos desenvolvidos [126, 127, 128, 129]. Neste capítulo serão abordadas as formulações matemáticas mais usadas para representação de equipamentos elétricos em elementos finitos, destacando-se as formulações implementadas para modelar elementos supercondutores pelo MEF.

Em todos os casos, as formulações abordadas neste trabalho tem como o ponto de partida as equações de Maxwell, que estão representadas nas equações 4.1-4.4 que são analisadas em baixa frequência.

$$\nabla \cdot \vec{D} = q. \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = \vec{0}. \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (4.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J}. \quad (4.4)$$

Além das equações de Maxwell, para a solução dos problemas eletromagnéticos em elementos finitos é necessário definir as equações constituintes do meio, conforme mostrado nas equações 4.5-4.7:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (4.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (4.6)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (4.7)$$

sendo:

- a) \vec{E} é o Campo Elétrico;
- b) \vec{B} é a Densidade de Fluxo Magnético;
- c) \vec{J} é a Densidade de Corrente Elétrica;
- d) σ é a Condutividade Elétrica do Meio;
- e) μ é a Permeabilidade Magnética do Meio;
- f) ϵ é a Permissividade Elétrica do Meio.

Em um caso mais geral, as quantidades que caracterizam o meio (ϵ , μ e σ) podem depender da posição e também do tempo. Ou seja, $\epsilon = \epsilon(x, y, z, t)$, $\mu = \mu(x, y, z, t)$ e $\sigma = \sigma(x, y, z, t)$. Em um caso onde o meio apresente uma anisotropia em algumas destas quantidades discutidas, o modelo tensorial é exigido para representar este fenômeno. Desta forma são definidas todas as variáveis necessárias para as formulações que serão apresentadas a seguir.

4.1 Formulação A-V

A formulação $A - V$ é a mais usada para modelar equipamentos elétricos em geral. A maior parte dos simuladores comerciais de elementos finitos estão baseados nela. Sua modelagem parte da equação 4.2, onde através da igualdade na equação afirmar-se que \vec{B} é uma grandeza solenoidal. Desta forma este campo pode ser definido com o rotacional de um vetor potencial \vec{A} [130]. O modelo final desta formulação parte das equações de Maxwell e da definição do vetor potencial magnético, que é apresentada a seguir:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (4.8)$$

sendo \vec{A} é o vetor potencial magnético

Rearranjando as equações 4.3-4.8, tem-se as equações 4.9, 4.10 e 4.11. Aplicando-se a identidade do cálculo vetorial para \vec{A} e usando o calibre de Coloumb ($\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$), a formulação $A - V$ tem sua forma final apresentada na equação 4.12. Observa-se

pela equação 4.10 que a densidade de corrente engloba tanto as parcelas da densidade de corrente induzida como imposta.

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (4.9)$$

Onde, V é o potencial escalar elétrico

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \quad (4.10)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \mu \sigma \nabla V \quad (4.11)$$

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \mu \sigma \nabla V \quad (4.12)$$

Com a formulação $A - V$ muitos problemas de simulações eletromagnéticas são resolvidos, como por exemplo simulações de máquinas elétricas, transformadores, reatores, chaves estáticas entre outros. No entanto, para os materiais supercondutores a formulação $A - V$ não é muito adequada, isto é devido ao fato da não linearidade na curva E-J, conforme apresentado no capítulo 2.

A relação E-J que modela o comportamento do material supercondutor nestes trabalho é dada através do modelo da *Power Law*, conforme a equação 2.2 explicada no capítulo 2. A formulação $A - V$ faz uso da condutividades dos meios para realizar seus cálculos. Para o estado supercondutor a condutividade do material é muito alta em CA e mais alta ainda em sistemas CC. Desta forma, pode-se observar através da equação 4.12 que a matriz de solução do problema ficará mal condicionada, ocasionando uma divergência numérica do problema. Portanto, na próxima seção será apresentada a formulação utilizada para modelar o material supercondutor.

4.2 Formulação T-A

Recentemente uma nova formulação foi proposta para simular o efeito da supercondutividade em Método de Elementos Finitos (MEF)[131]. Neste caso, parte-se da equação 4.13 e considera-se que não há variação de carga no tempo, sendo assim o divergente da densidade de corrente é igual à zero (Lei de Ampère). Portanto, a

densidade de corrente é um campo solenoidal e desta forma pode ser reescrita através de um vetor potencial (\vec{T}). O vetor \vec{T} é denominado vetor potencial corrente e é apresentado na equação 4.14 abaixo.

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (4.13)$$

$$\nabla \times \vec{T} = \vec{J} \quad (4.14)$$

Combinando as equações 4.5 e 4.14 tem-se a equação 4.15. Substituindo a equação 4.15 na equação 4.3, obtém-se a equação 4.16.

$$\vec{E} = \rho \nabla \times \vec{T} \quad (4.15)$$

$$\nabla \times \rho \nabla \times \vec{T} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.16)$$

Na equação 4.16 tem-se a expressão geral da formulação $T - A$.

Supondo que apenas o material supercondutor seja resolvido pela formulação T , logo a equação 2.2 será aplicada em 4.16:

$$\nabla \times \left(\frac{E_c}{J_c} \left| \frac{\vec{J}}{J_c} \right|^{n-1} \right) \nabla \times \vec{T} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.17)$$

Em [131] e em [132] são feitas considerações para o problema em que se trabalha com uma fita supercondutora. A primeira aproximação é devido relação entre a espessura e a largura da fita supercondutora. Desta forma, a corrente fluirá apenas na direção tangencial ao comprimento da fita. Além disso, devido o comprimento da fita ser muito maior que a largura e a espessura da mesma, considera-se a fita um plano infinito, portanto a corrente está restringida a fluir apenas no material supercondutor. Desta forma, o vetor potencial corrente só poderá ser normal a superfície da fita supercondutora, conforme apresentado na figura 11.

Com isso, o vetor potencial corrente pode ser escrito como em 4.18:

$$\vec{T} = T(n_x, n_y, n_z) \quad (4.18)$$

onde n_x , n_y e n_z são os vetores normais às superfícies da fita.

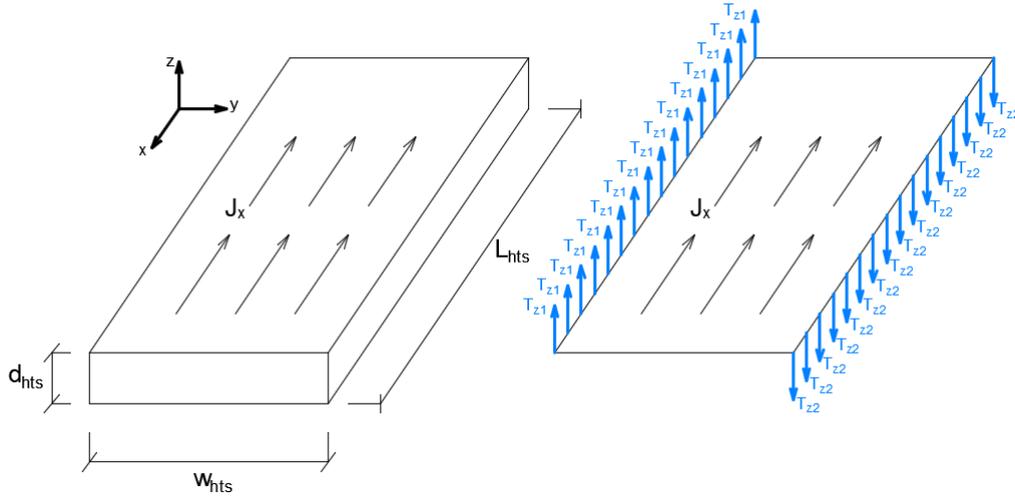


Figura 11 – Aproximação fita lâmina aplicada à fita supercondutora

Sendo assim, aplicando 4.18 em 4.17 tem-se que:

$$\nabla \times \left(\frac{E_c}{J_c} \left| \frac{\vec{J}}{J_c} \right|^{n-1} \right) \nabla \times (T.n_x, T.n_y, T.n_z) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.19)$$

onde agora, T é apenas uma quantidade escalar.

Desenvolvendo de forma matricial a equação 4.14 para aproximação feita na equação 4.18 tem-se que:

$$\begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \partial_x & \partial_y & \partial_z \\ n_x & n_y & n_z \end{bmatrix} T \quad (4.20)$$

$$\vec{J} = T(\partial_y n_z - \partial_z n_y, \partial_z n_x - \partial_x n_z, \partial_x n_y - \partial_y n_x) \quad (4.21)$$

Como no caso 2D $J_x = 0$ e $J_y = 0$, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\partial n_y}{\partial x} - \frac{\partial n_x}{\partial y} \end{bmatrix} T \quad (4.22)$$

O acoplamento entre a formulação T com a formulação A é dado através de imposições de fontes nos modelos. Em T a densidade de fluxo magnético calculado em A é imposta como fonte magnética. Já em A uma densidade de corrente laminar

é imposta como fonte de corrente laminar, acoplando-se assim os dois modelos. Aqui se introduz as notações $\vec{B}^{(A)}$ e $\vec{J}^{(T)}$, onde o sobrescrito "(A)" e "(T)" indicam a densidade de fluxo magnético \vec{B} calculada pela formulação A e a densidade de corrente \vec{J} calculada pela formulação T, respectivamente. A figura 12 sumariza o processo de acoplamento entre as formulações. Desta forma pode-se definir as equações 4.23 e 4.24. Ressalta-se também que neste modelo, para uma imposição de corrente sobre a fita supercondutora, necessita-se aplicar uma condição de Dirichlet nas fronteiras ou bordas do problema. Esta imposição de corrente está apresentada na equação 4.25.

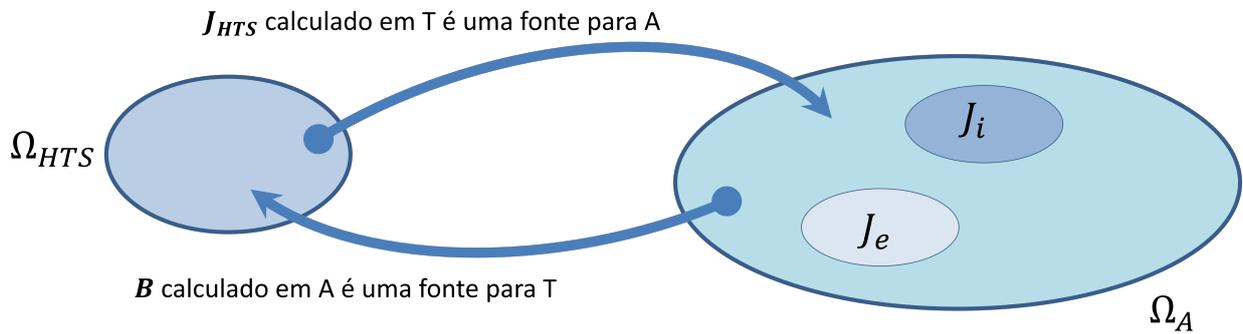


Figura 12 – Acoplamento entre as formulações T e A

$$\nabla \times \rho \left(\nabla \times \vec{T} \right) = -\frac{\partial \vec{B}^{(A)}}{\partial t} \quad (4.23)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{J}^{(T)} \quad (4.24)$$

$$I_{aplicada} = \iint_{\partial\Omega} \vec{J} \cdot d\vec{S} = \iint_{\partial\Omega} \nabla \times \vec{T} \cdot d\vec{S} = \oint_L \vec{T} d\vec{l} \quad (4.25)$$

4.3 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as formulações para modelar sistemas eletromagnéticos no geral. Em especial foi apresentada a formulação T-A que é usada para modelagem de materiais supercondutores. Além disso, foram discutidas as vantagens e desvantagens de cada modelo. Sendo assim, na próxima seção será apresentada a implementação dos modelos A – V e T – A no problema proposto para ser estudado.

5 Metodologia

Neste Capítulo serão explicados os pormenores do desenvolvimento do modelo do limitador de curto-circuito supercondutor de núcleo saturado (LCCS-NS), onde as formulações apresentadas no Capítulo 4 são aplicadas. Neste trabalho o objeto de estudo é um LCCS-NS.

Para tanto, neste capítulo serão apresentados os dados de simulação e modelos usados para representar este equipamento na simulação de elementos finitos. Inicialmente foi estudado o limitador que foi construído por Fernando Fajoni em [133], com todos seus enrolamentos em cobre. Após, as simulações são confrontadas com os resultados experimentais obtidos em [133].

Em seguida, o enrolamento CC de cobre é substituído por um enrolamento CC supercondutor e novas simulações são realizadas. Onde, neste caso, uma geometria otimizada é proposta ao final do projeto, baseando-se em parâmetros geométricos e construtivos da fita supercondutora. Na primeira simulação a formulação A-V foi suficiente para modelar todo o problema. Para as simulações com supercondutor foi usada a formulação $T - A$. Nesta abordagem, para a região do enrolamento supercondutor aplica-se a formulação T e para os materiais não supercondutores deve ser utilizada a formulação $A - V$. As simulações apresentadas aqui foram desenvolvidas, inicialmente, em um modelo 2D. Em seguida, para uma análise de outros curto-circuitos (bifásico, bifásico-terra e trifásico), um modelo 3D foi desenvolvido.

O programa escolhido para a implementação destes modelos foi o COMSOL. Neste *software* há a possibilidade de se implementar equações diferenciais parciais genéricas, dando ao usuário versatilidade para construir seus próprios modelos. Além disso, o *software* vem com algumas formulações preestabelecidas, como a formulação A-V e a formulação H.

5.1 Detalhes Construtivos e Experimentais do Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado Simulado

O protótipo desenvolvido possui a mesma topologia apresentada em [134]. Para este limitador são usados 6 núcleos ferromagnéticos, onde os enrolamentos de corrente alternada são colocados nas pernas externas do núcleo. Já as pernas mais internas são todas envolvidas por um único enrolamento de corrente contínua. Cada uma das fases do limitador usa dois núcleos ferromagnéticos diametralmente opostos, bem como dois enrolamentos de corrente alterna. Além disso, os enrolamentos CA são bobinados em direções opostas e conectados em série. A figura 13 apresenta uma imagem do limitador construído indicando cada uma das partes do equipamento.

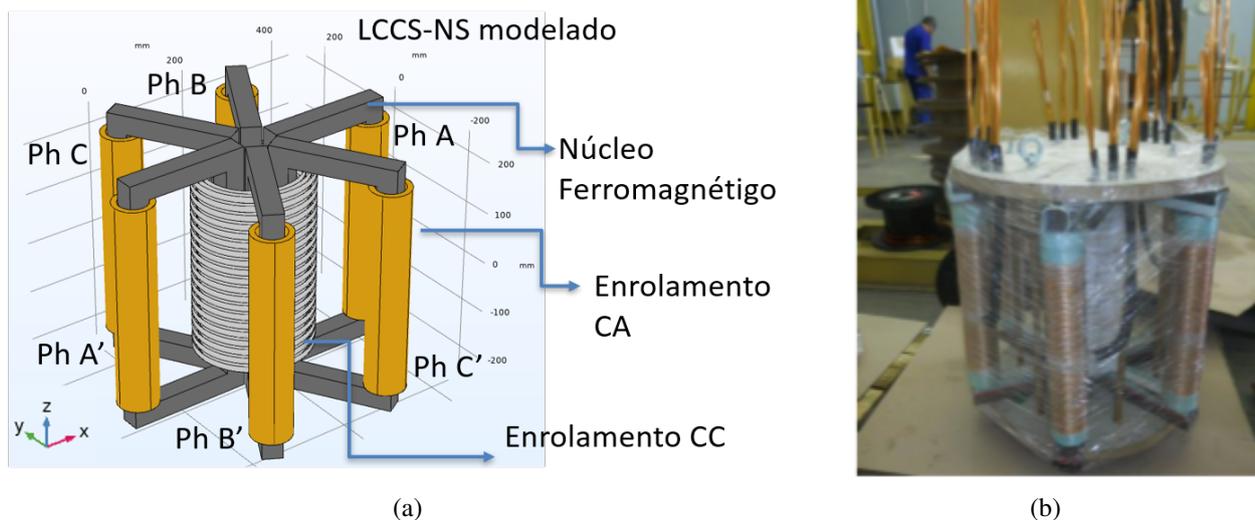


Figura 13 – Limitador de núcleo saturado construído

Conforme apresentado pela figura 14, na fabricação deste limitador foram usados fios de cobre esmaltado com 5.2 mm de diâmetro. Para construção do enrolamento CA apenas uma camada foi utilizada, já o enrolamento CC foi fabricado com duas camadas, totalizando uma espessura de 10.4 mm. Os enrolamentos CA e CC foram feitos com 70 e 300 espiras, respectivamente. Além disso a tensão fase-fase e a corrente nominal, deste limitador são iguais à 380 V e 30 A, respectivamente. O enrolamento de corrente contínua é alimentado por uma fonte CC ligada em série com uma chave de estado sólido. Já o sistema de proteção da bobina CC é constituído

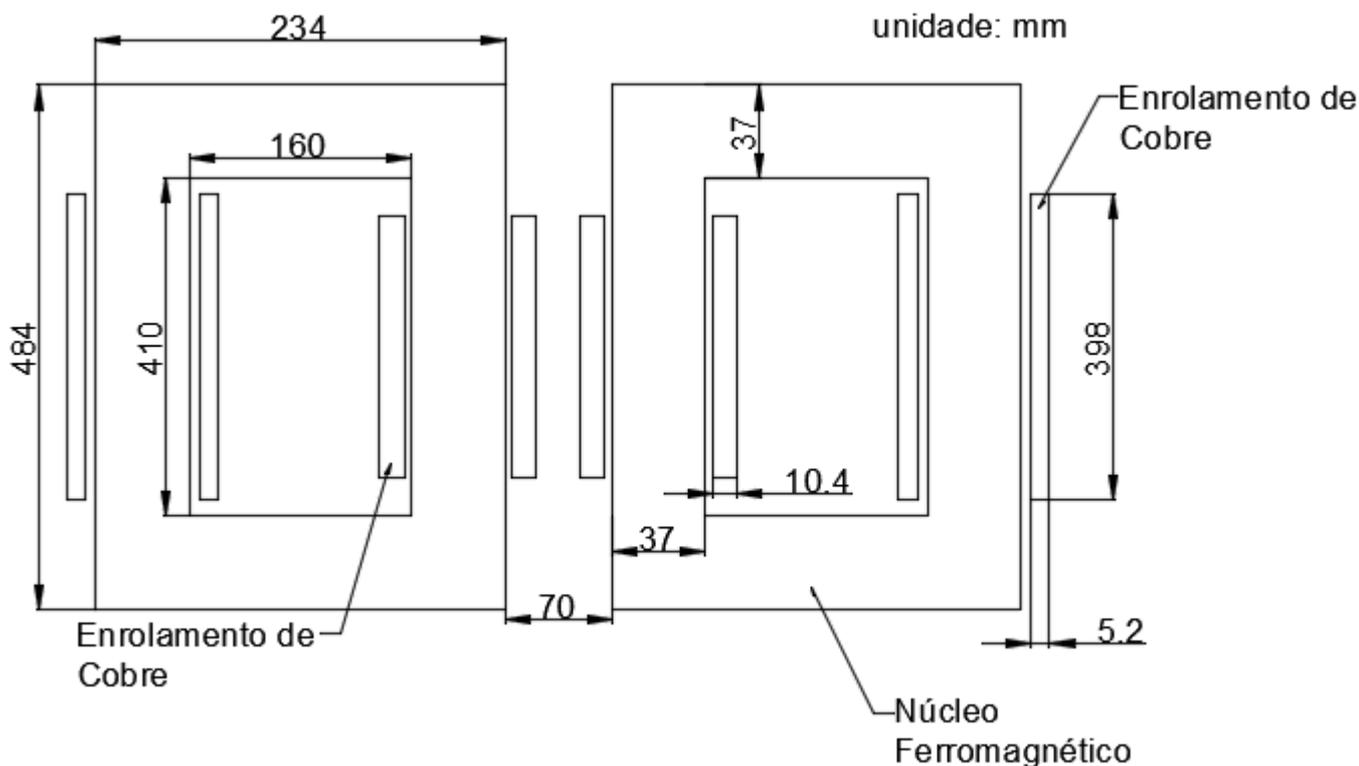


Figura 14 – Parâmetros geométricos do limitador ensaiado.

de um diodo de potência e de um resistor paralelo de 2Ω para limitação da corrente induzida no enrolamento CC no instante do curto-circuito.

Os dados dos ensaios utilizados aqui para a comparação com as simulações realizadas vieram de [133]. Nos testes apresentados, foi utilizada apenas uma das fases do limitador, aplicando um curto-circuito monofásico e deixando os outros enrolamentos em aberto. O curto-circuito prospectivo programado foi igual à 1.6 kA de pico e foi realizado através de um gerador síncrono 96 kVA/380 V. Para a medição da corrente de fase foram usados transformadores de corrente conectados à resistores de precisão de 0.33Ω . A figura 15 apresenta um diagrama trifásico do ensaio realizado.

5.2 Modelagem do Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado

Nas seções seguintes serão apresentadas as metodologias para modelagem do LCCS-NS utilizando as formulações A-V e T-A.

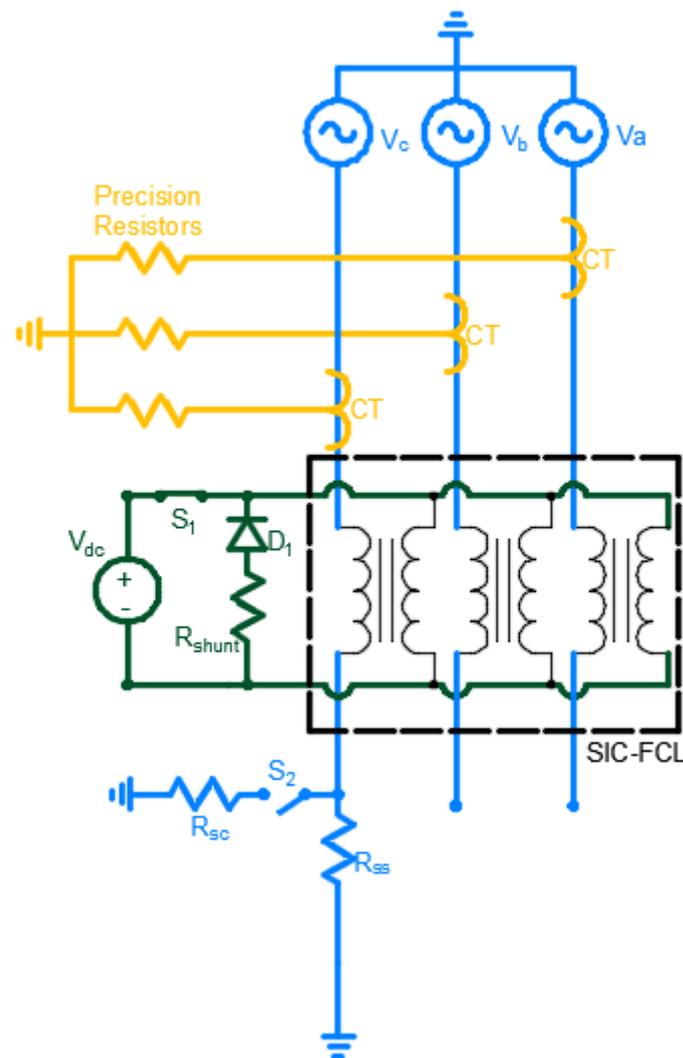


Figura 15 – Esquema Elétrico do ensaio realizado com o Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado.

5.2.1 Modelagem do LCCS-NS na formulação A-V

A figura 16 apresenta os domínios de simulação na formulação A-V. Neste caso, como mencionado anteriormente, apenas uma fase do limitador é modelada, possuindo dois núcleos ferromagnéticos, dois enrolamentos CA e um enrolamento CC que envolve os dois núcleos.

Para modelar todos os domínios de simulação é necessária a atribuição da permeabilidade magnética (μ) e da condutividade elétrica (σ) de cada material. Portanto, a discriminação de cada material é apresentada na tabela 3.

O material ferromagnético foi modelado com uma curva B-H medida experi-

mentalmente no trabalho [133], apresentada na figura 17. Nota-se que a saturação do material magnético ocorre em aproximadamente 1,7 T, ou seja, valores acima deste campo fazem com que o material ferromagnético tenha uma permeabilidade magnética muito próxima da do ar.

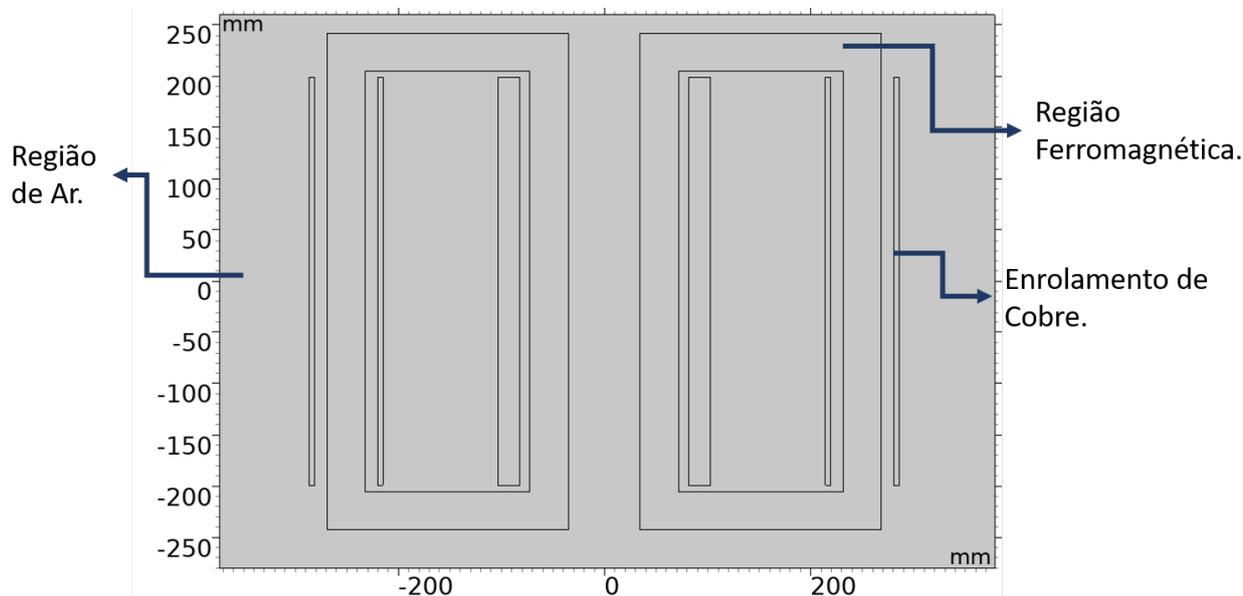


Figura 16 – Domínios de Simulação

Tabela 3 – Propriedades dos materiais para formulação A – V

Ar	
σ	$1S/m$
μ_r	1
Cobre	
σ	$6 \cdot 10^7 S/m$
μ_r	1
Material Ferromagnético	
σ	$1S/m$
μ_r	Curva B-H (figura 17)

Os enrolamentos de cobre são divididos em dois grupos: enrolamentos CA e enrolamento CC. Os enrolamentos CA são conectados entre a fonte e a carga. Já o enrolamento CC é alimentado através de uma fonte de corrente contínua.

Para simular o comportamento do LCCS-NS na rede foi modelado um sistema elétrico equivalente que apresenta os mesmos resultados do ensaio realizado. O sistema adotado está esquematizado na figura 18. Os parâmetros elétricos concentrados (ou seja, fontes, resistências, impedâncias, diodo e chaves ideais) que representam o

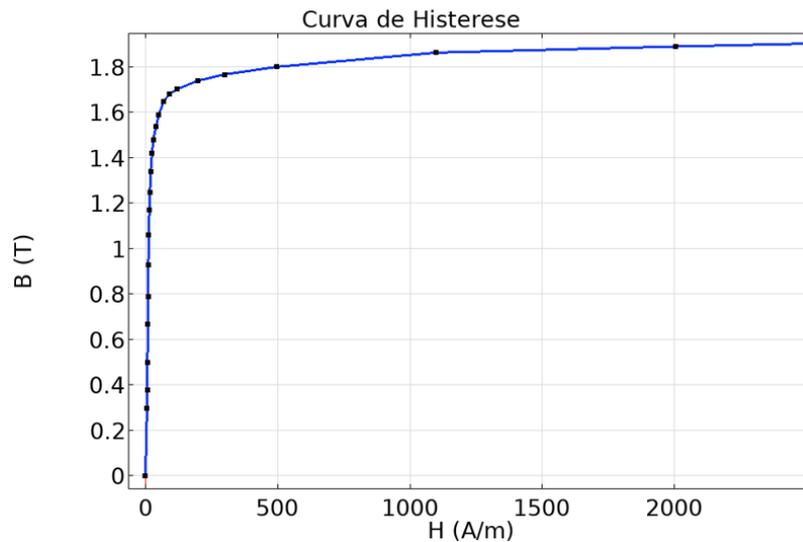


Figura 17 – Curva B-H do material ferro magnético

sistema são acoplados ao modelo de elementos finitos do problema estudado. Nesta figura observa-se uma fonte de tensão CA ideal ligada ao LCCS-NS que representa a tensão do sistema no ponto em que o LCC será instalado. Além disso, uma fonte de corrente contínua alimenta o enrolamento CC. Em geral, esta alimentação é realizada através da retificação da própria tensão de rede ajustando-se o valor de tensão desejada com um transformador de tap variável [135]. No entanto, no caso simulado aplica-se uma fonte de Norton que fornecerá a corrente necessária para o enrolamento CC. A carga é representada pela impedância Z_{ss} , já o curto-circuito é modelado por uma impedância Z_{sc} e o instante da falta é controlado pelo fechamento da chave S_1 . Este instante de fechamento da chave é modelado pela equação 5.1.

$$t_{curto} = n_{ciclos} \cdot \frac{2\pi}{\omega} + \frac{\theta_e}{\omega} \quad (5.1)$$

onde,

n_{ciclos} é o número de ciclos que o curto-circuito levará para ocorrer.

ω é a frequência elétrica angular.

θ é o ângulo elétrico.

t_{curto} é o instante do curto-circuito

Já a fonte CC deve ser desconectada do enrolamento por uma chave S_2 quando o curto-circuito ocorrer, evitando, desta forma, uma reversão na corrente devido ao

aumento de tensão induzida nos terminais do enrolamento CC. No momento em que a chave S_2 é aberta a energia armazenada no enrolamento CC é dissipada na resistência R_{shunt} que pode ser calculada através da equação 5.2 [133].

$$R_{shunt} = \frac{V_{max}^{CC}}{I_{max}^{CC}} \quad (5.2)$$

onde,

V_{max}^{CC} é a tensão máxima desejada nos terminais da bobina CC.

I_{max}^{CC} é a corrente máxima desejada nos terminais da bobina CC.

R_{shunt} é a resistência em paralelo com a bobina CC

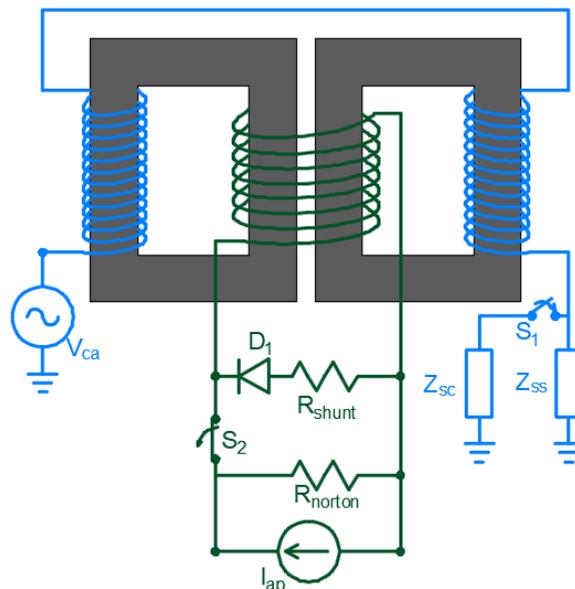


Figura 18 – Esquemático para as simulações realizadas em 2D. Este esquemático de ligações é usado em todas as simulações pertinentes a modelagem 2D.

Todo o modelo foi construído no COMSOL usando a ferramenta de circuitos presente no simulador. O acoplamento entre o equipamento modelado em elementos finitos e a modelagem do sistema de potência para o curto é feita através da função *External U Vs I*.

5.2.2 Modelagem do LCCS-NS na Formulação T-A

Para a formulação $T - A$ o enrolamento CC de cobre é substituído por um enrolamento de fitas supercondutoras. A fita modelada é do fabricante AMSC modelo 8502 [136] e possui 12 mm de largura. A densidade de corrente crítica (em auto-campo)

e o valor do expoente da *power-law* (n em auto-campo), são iguais à 389,75 A e 29,22, respectivamente. Na figura 19 apresentam-se as regiões de cada domínio da simulação.

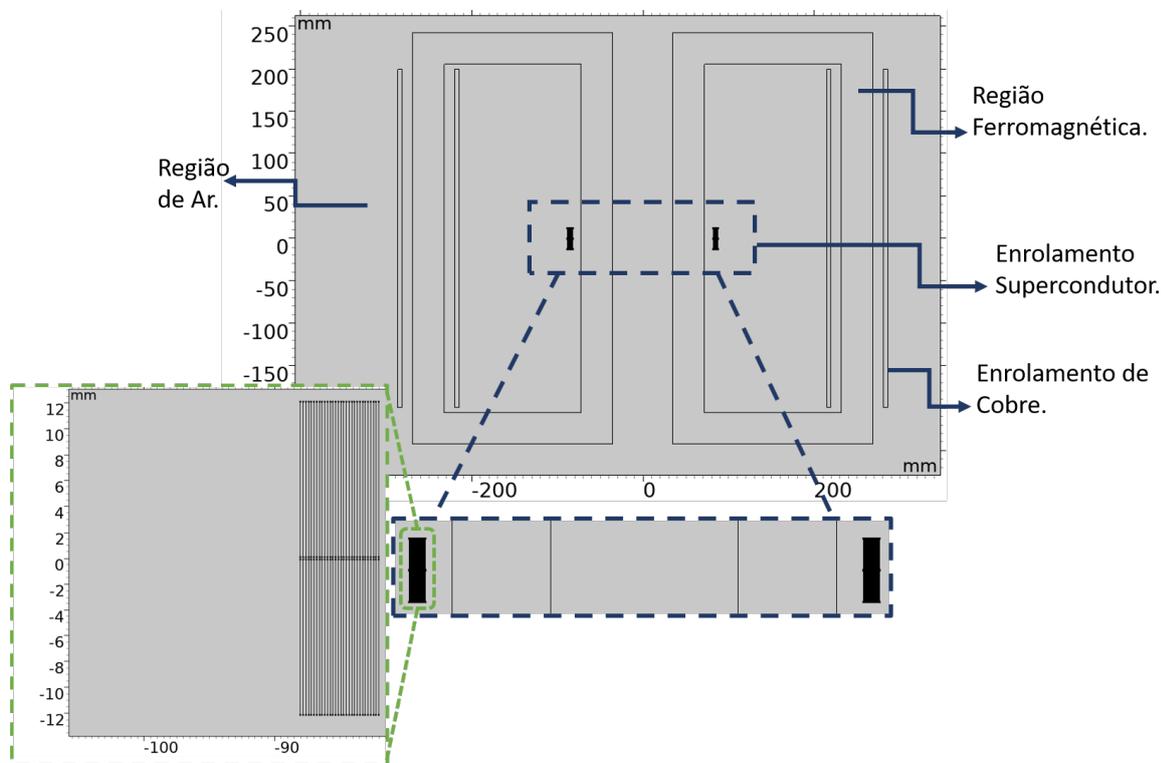


Figura 19 – Modelo da formulação T-A em 2D

No problema 2-D, a formulação T-A modela cada uma das fitas, representando-as por uma aproximação fita-lâmina [18]. A imposição de corrente na fita supercondutora possui o perfil mostrado na figura 20, e é realizada através de uma condição de Dirichlet apresentada na equação 4.25. Importante ressaltar que nos estudos realizados pelo autor, a imposição de corrente deve iniciar com o valor nulo, garantindo a convergência inicial do problema. Os valores de correntes aplicados no enrolamento CC são: 350, 250, 150 e 50 A.

A figura 21 apresenta uma ilustração desta imposição de corrente e da aproximação fita-lâmina [18]. Partindo da equação 4.25, resolvendo a integral de linha para os 4 caminhos percorridos pelo vetor T , encontra-se a equação 5.3 [131]. Onde, δ é a espessura da camada supercondutora da fita. Neste trabalho, esta camada é igual a $1 \mu m$. Cabe ressaltar que o circuito elétrico modelado na seção 5.2.1 também é aplicado no problema usando a formulação T-A. Desta forma, desenvolve-se um

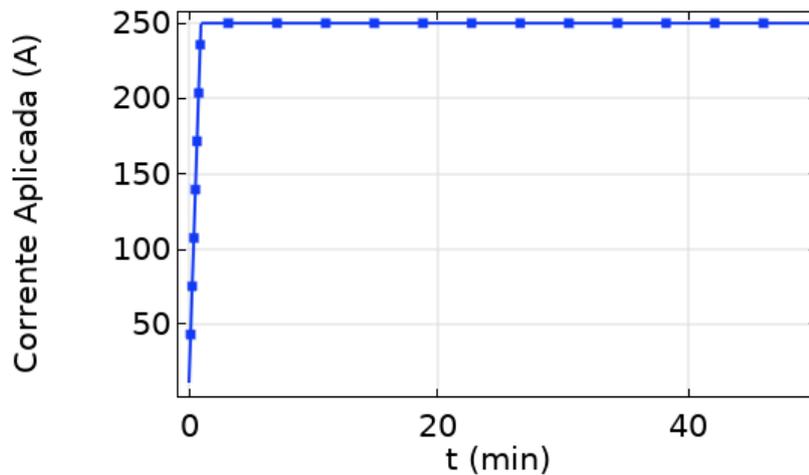


Figura 20 – Perfil de corrente aplicada ao enrolamento de CC

método para acoplar o enrolamento supercondutor ao circuito elétrico. Este método será explicado na seção 5.3.

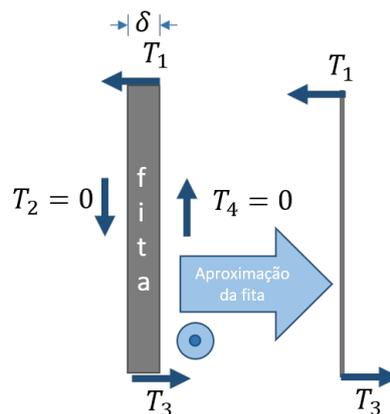


Figura 21 – Modelo da formulação T-A em 2D

$$(T1 - T3)\delta = I_{app} \tag{5.3}$$

5.3 Desenvolvimento do Método de Acoplamento entre dispositivos supercondutores e circuitos elétricos modelados a parâmetros concentrados

Para simular o enrolamento supercondutor e o circuito elétrico de potência juntos, foi desenvolvida neste trabalho uma metodologia de acoplamento entre a formulação

T-A e o modelo de circuitos elétricos do programa COMSOL. A figura 22 apresenta a ideia central deste acoplamento. Através do MEF serão calculados os parâmetros elétricos dos dispositivos supercondutores, bem como os parâmetros elétricos dos dispositivos não supercondutores. Em seguida, estes parâmetros serão aplicados no circuito elétrico modelado. No que lhe concerne, o circuito elétrico será resolvido pelo Método das Diferenças Finitas (MDF) e a corrente calculada através dos elementos supercondutor e não-supercondutores serão aplicados no modelo do MEF.

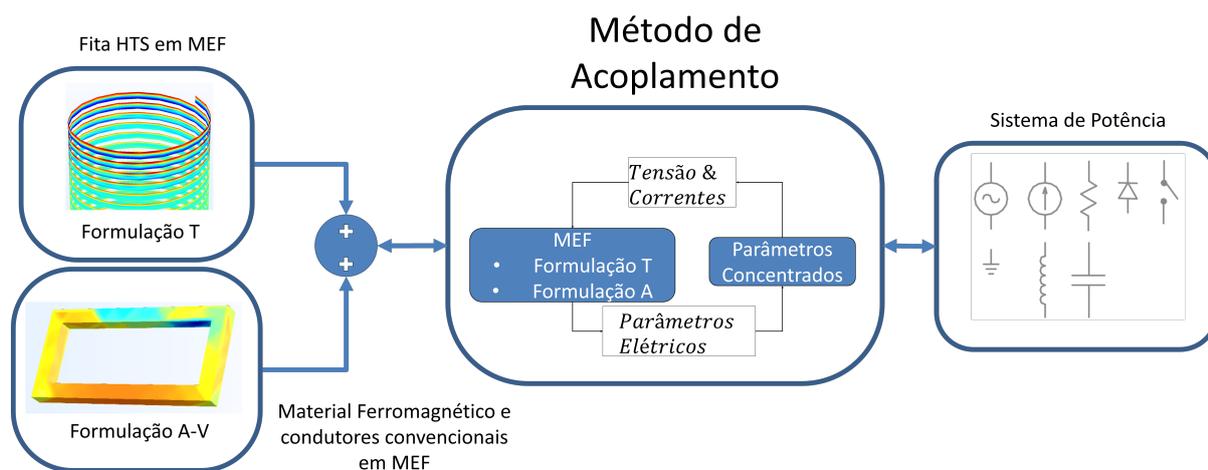


Figura 22 – Ideia Central do Método de Acoplamento entre o enrolamento supercondutor modelado em MEF com o modelo de circuitos a parâmetros concentrados

5.3.1 Modelo de acoplamento para o caso 2D e sua aplicação no trabalho

Para que se entenda inicialmente o caso 2D, em um contexto mais geral, o exemplo da figura 23 será utilizado. Neste caso, tem-se um corte do plano infinito em um modelo cartesiano xy, onde uma bobina supercondutora com N espiras é representada. Com isso, a resistividade pontual de cada elemento pode ser calculada usando a equação 5.4.

$$\rho(\mathbf{J}, \mathbf{B}) = \frac{E_c}{J_c(\mathbf{J}, \mathbf{B})} \left| \frac{\mathbf{J}}{J_c(\mathbf{J}, \mathbf{B})} \right|^{n-1} \quad (5.4)$$

Como mencionado no capítulo 2, para este trabalho consideram-se as fitas supercondutoras num processo isotérmico. Sendo assim, a sua temperatura não irá variar, mantendo-se sempre num valor igual à 77 K. Após se considerar o cálculo da resistividade pontualmente, uma média ponderada é feita para se calcular a resistividade

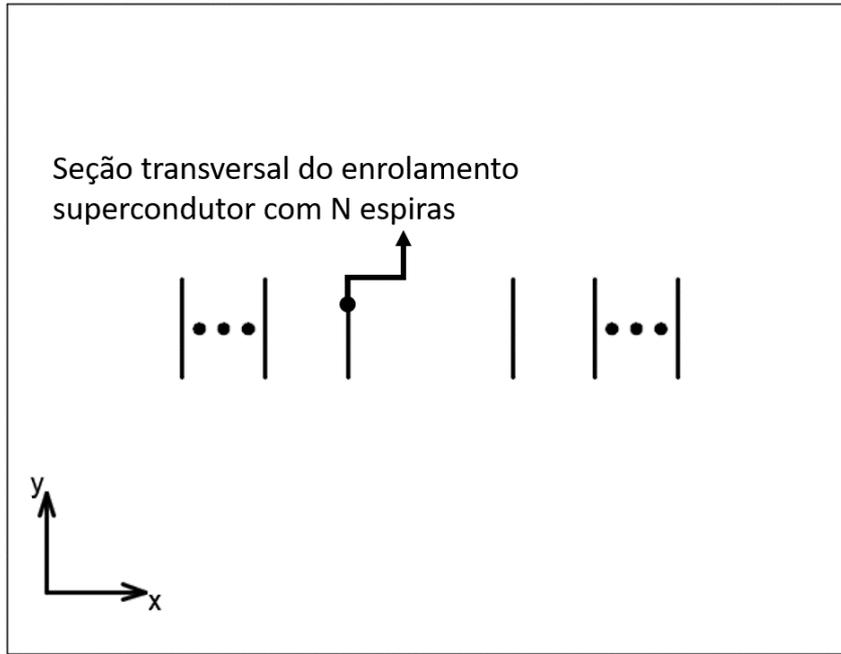


Figura 23 – Seção transversal de um bobina supercondutora

do material supercondutor, como apresentado na equação 5.5. Ressalta-se que esta média já considera a aproximação fita-lâmina, que neste exemplo está orientada na direção y. Além disto, a resistividade média é atualizada a cada passo de iteração através das variações de J_k e de B_k .

$$\langle \rho_k \rangle = \frac{\int_w \rho(J_k, B_k) dy}{\int_w dy} \quad (5.5)$$

Com a resistividade média, a resistência de uma espira pode ser calculada através da equação 5.6, onde $l_{HTS_{esp}}$, w_{HTS} e d_{HTS} são respectivamente, o comprimento, a largura e a espessura da fita supercondutora. Logo após o cálculo das resistências das N espiras, calcula-se a resistência total do enrolamento supercondutor, de acordo com 5.7. Por fim, multiplicando-se a corrente que flui através do enrolamento supercondutor (I_{HTS}) pela resistência total (R_{HTS}), obtém-se a parte resistiva da tensão da bobina supercondutora, conforme apresentado na equação 5.8.

$$R_{HTS_{esp}} = \langle \rho_k \rangle \frac{l_{HTS_{esp}}}{w_{HTS} \cdot d_{HTS}}, \quad (5.6)$$

$$R_{HTS} = \sum_{v=1}^{v=N} R_{HTS_{esp}^v}. \quad (5.7)$$

$$V_{r_{HTS}} = R_{HTS} \cdot I_{HTS} \quad (5.8)$$

Destaca-se que apenas a resistência da camada supercondutora está sendo considerada no problema. Pois, entende-se que devido a baixíssima resistividade apresentada pelo material supercondutor ¹. Praticamente toda corrente circulará através desta camada, portanto, apenas ela precisa ser considerada.

Após o cálculo da tensão da parte resistiva do material supercondutor, deve-se considerar a tensão induzida no enrolamento ($V_{ind_{HTS-esp}}$). Através da lei de Faraday, a tensão induzida em uma bobina é igual à taxa de variação do fluxo magnético por ela enlaçado em relação ao tempo multiplicado pelo número de espiras do enrolamento. Recordando da lei de Gauss do magnetismo e também que a densidade de fluxo magnético é expressa como o rotacional do vetor potencial magnético, então a tensão induzida em um enrolamento com dimensão infinitesimal pode ser expresso de acordo com a equação 5.9:

$$V_{ind} = -\frac{d}{dt} \left(\oint \vec{A} \cdot d\mathbf{l} \right) \quad (5.9)$$

Contudo, ao considerar-se uma bobina com dimensões em que o vetor potencial magnético varia ao longo do enrolamento, necessita-se calcular uma média para o vetor potencial magnético para cada uma das espiras. Desta forma, realiza-se uma média ponderada no cálculo do vetor potencial magnético para o caso 2D. Em seguida a taxa de variação desta média em relação ao tempo é calculada e por fim multiplica-se este cálculo pelo comprimento da fita supercondutora. Desta forma a tensão induzida no enrolamento supercondutor pode ser calculada, conforme apresentado na equação 5.10, onde A_{z+} e A_{z-} são respectivamente, os vetores potenciais magnéticos na direção z orientados no sentido positivo e negativo. Em seguida, somando-se todas as tensões induzidas de cada uma das espiras do enrolamento supercondutor chega-se na tensão induzida total da bobina, conforme a equação 5.11. Por fim, para considerar a tensão total, soma-se a tensão induzida dada pela equação 5.10 com a queda de

¹ Aqui esta baixíssima resistividade dos materiais supercondutores está comparada à resistividade das camadas em paralelo com o material. Por exemplo, as camadas de cobre, prata e o substrato.

tensão resistiva dada pela equação 5.8, obtendo-se então 5.12.

$$V_{ind_{HTS-esp}} = \left(-\frac{d}{dt} \left[\frac{\int_{w_{fita}} A_{z+} dy}{\int_{w_{fita}} dy} - \frac{\int_{w_{fita}} A_{z-} dy}{\int_{w_{fita}} dy} \right] \right) l_{HTS-esp} \quad (5.10)$$

$$V_{ind_{HTS}} = \sum_{\Gamma=1}^{\Gamma=N} V_{ind_{HTS-esp}}^{\Gamma} \quad (5.11)$$

$$V_{HTS_{total}} = V_{ind_{HTS}} + V_{r_{HTS}} \quad (5.12)$$

Finalizando o método de acoplamento em 2D, a tensão total calculada é imposta no circuito através da função *External U Vs I*. Por sua vez, o circuito calculará o valor das correntes em cada um dos nós através do MDF. Sendo assim, a corrente calculada através do enrolamento supercondutor será aplicada no MEF através da equação 5.3. Neste caso, a corrente I_{app} será a corrente através do dispositivo supercondutor calculada no circuito elétrico. Além disto, para garantir uma boa convergência do problema é prudente que as variáveis usadas para acoplar o circuito tenham seu erro relativo também verificado pelo programa. Portanto, deve-se atribuir às variáveis I_{HTS} e V_{HTS} ao conjunto de variáveis de estado. Para se implementar isto no programa, usa-se uma equação global e então declara-se as variáveis desejadas. A figura 24 resume o processo iterativo. Onde, as variáveis R_{htsk+1} , R_{htsk} , I_{htsk+1} , I_{htsk} , V_{htsk+1} e V_{htsk} são, respectivamente, a resistência, a corrente e a tensão das iterações $k + 1$ e k .

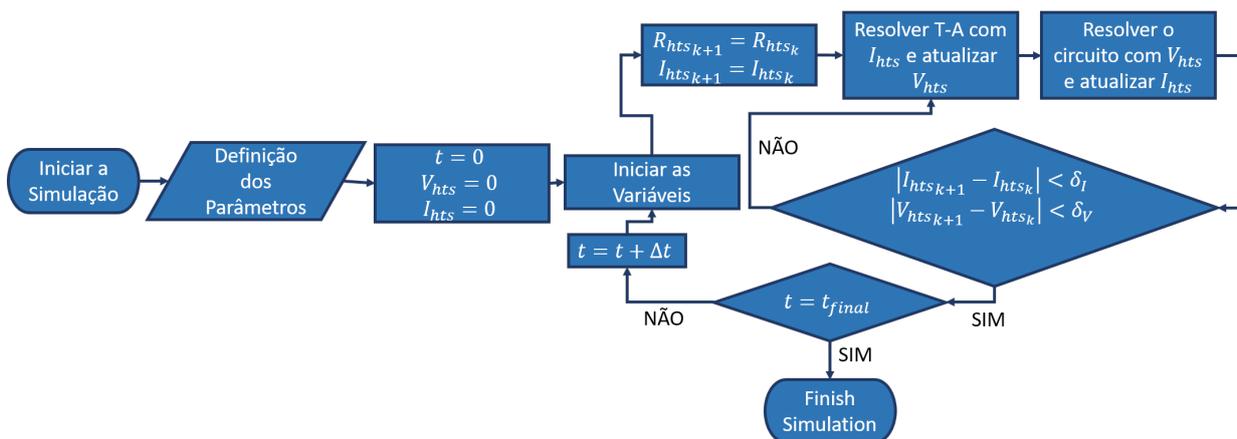


Figura 24 – Processo para o acoplamento entre o modelo de circuitos e a formulação T-A

No caso 2D este método foi validado simulando o acoplamento da bobina supercondutora do limitador LCCS-NS ao circuito elétrico CC. A figura 25 apresenta o

esquemático elétrico das ligações do modelo simulado em 2D. Neste caso, observa-se que em regime permanente como R_{norton} e R_{shunt} são muito maiores que R_{HTS} . Sendo assim, a corrente I_{HTS} será igual a I_{ap} em regime permanente. Além disto, destaca-se que, em regime, o diodo D_1 evita qualquer fuga de corrente para o ramo em derivação. Contudo, no momento do curto a chave S_2 é aberta e então uma tensão induzida surgirá no enrolamento supercondutor. Desta forma, quando a tensão induzida da bobina for maior que a tensão de depleção do diodo, uma corrente fluirá através do ramo paralelo e a resistência R_{shunt} limitará o valor da corrente.

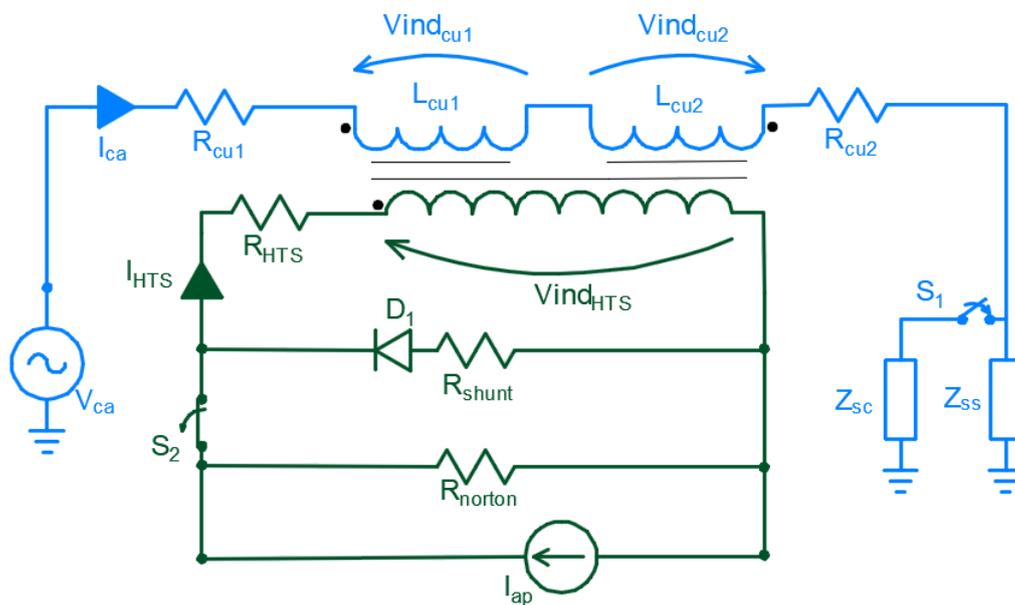


Figura 25 – Esquemático elétrico das ligações do sistema simulado em MEF acoplado ao circuito elétrico de potência.

5.3.2 Modelo de acoplamento para o caso 3D e sua aplicação no trabalho

Já para o caso 3D, a figura 26 é usada como exemplo. Pode-se observar, novamente, uma bobina supercondutora construída com fita 2G e imersa em nitrogênio líquido. Contudo, neste caso, a bobina possui uma forma helicoidal com N espiras. Observa-se, também, que a aproximação fita-lâmina novamente foi usada. Por isso o modelo da fita será formado por uma superfície.

Neste caso, a média ponderada para a resistividade é calculada em uma superfície através da equação 5.13. Já a resistência total pode ser calculada através da equação 5.14. Onde, agora I_{HTS} é calculado através da integral de linha da fita. Assim como

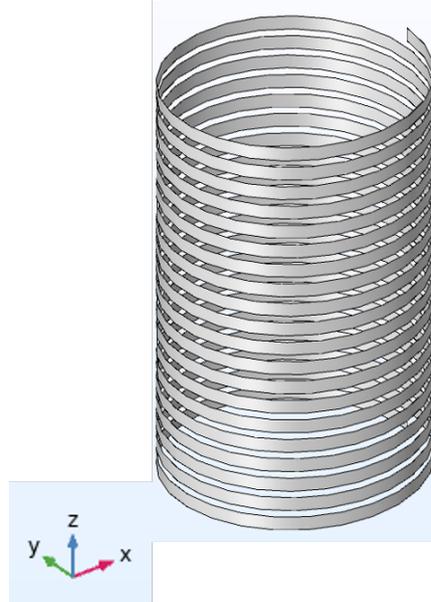


Figura 26 – Enrolamento Supercondutor em 3D com N espiras

em 5.8 a tensão da parte resistiva da fita é calculada. Já a tensão induzida em 3D é calculada através da integral de linha do vetor potencial magnético, conforme apresentado em 5.15, sendo o caminho desta integral as bordas da superfície da fita supercondutora. Por fim, a tensão total em 3D é calculada da mesma forma que em 5.12. Com isso, para se acoplar a bobina supercondutora no circuito usa-se, novamente, a função *External U Vs I*.

$$\langle \rho_k \rangle = \frac{\int_{\Omega} \rho(J_k, B_k) d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} \quad (5.13)$$

$$R_{HTS} = \langle \rho_k \rangle \frac{l_{HTS}}{w_{HTS} \cdot d_{HTS}} \quad (5.14)$$

$$V_{ind_{HTS}} = \left(-\frac{d}{dt} \int_{c_{HTS}} \vec{A} \cdot d\mathbf{l} \right) \quad (5.15)$$

Como estudo de caso para o método de acoplamento 3D, o LCCS-NS foi modelado e teve sua bobina supercondutora aplicada no circuito CC estudado. A modelagem do limitador em 3D será explicada em detalhes na seção 5.5. Além disso, neste trabalho também é proposto um método de otimização para a bobina supercondutora de forma a minimizar os impactos do fluxo magnético disperso e da corrente I_{HTS} imposta ao enrolamento. Este método de otimização é desenvolvido em 2D e será abordado na

seção 5.4. Após a otimização da bobina, é desenvolvido o modelo 3D do limitador de corrente de curto-circuito.

5.4 Processo de Otimização do Enrolamento Supercondutor

Na literatura existem modelos do limitador LCCS-NS que propõem estudos de otimização para o material ferromagnético do limitador. Contudo, em todos os casos estudados, as características do material supercondutor não são consideradas. Desta forma, nesta seção será explicado o modelo usado para otimizar a bobina supercondutora considerando as não linearidades dos materiais ferromagnéticos e supercondutores. Os objetivos desta otimização estão listados abaixo:

- a) Minimizar os efeitos do campo magnético sobre a bobina supercondutora. Consequentemente maximizar a densidade de corrente crítica da bobina,
- b) Minimizar a corrente aplicada no enrolamento supercondutor,
- c) Minimizar a queda de tensão nos enrolamentos CA,
- d) Minimizar o custo da fita supercondutora.

O processo de otimização foi realizado em duas etapas. No primeiro processo as funções objetivos foram a maximização da densidade de corrente crítica no supercondutor e a minimização da queda de tensão nos enrolamentos CA. Onde, neste caso, a variável de saída é a corrente ótima para ser imposta no enrolamento supercondutor. Nestas otimizações, restrições são aplicadas para que a força magnetomotriz do enrolamento CC projetado em [133, 137] seja mantida. Além disso, aplicam-se as restrições para evitar que a corrente imposta no enrolamento CC ultrapasse o valor da corrente crítica da fita supercondutora. Estas restrições estão apresentadas nas equações 5.16-5.18 [10].

$$50 \leq I_{app} \leq 350 \quad (5.16)$$

$$N_{st}N_{layer} = 60 \quad \forall N_{st} \text{ and } N_{layer} \in \mathbb{N} \quad (5.17)$$

$$N_{layer} = \{\eta \in \mathbb{N} : 3 \leq \eta \leq 60\} \quad (5.18)$$

No segundo processo de otimização, as variáveis de otimização são: a densidade de corrente crítica e normalizada, bem como o preço do material supercondutor utilizado para construir a bobina. Neste processo, a variável de saída é o posicionamento da bobina supercondutora. Para os dois processos de otimização as funções objetivos são conflitantes, desta forma uma otimização multi-objetivo é necessária. O algoritmo utilizado para a otimização foi o Nelder-Mead [138]. A figura 27 e a tabela 4 apresentam os parâmetros de controle usados para otimizar a geometria da bobina supercondutora. A relação entre os parâmetros utilizados é dada pelas equações 5.20-5.19:

$$Preco = l_{HTS} \cdot \Gamma. \tag{5.19}$$

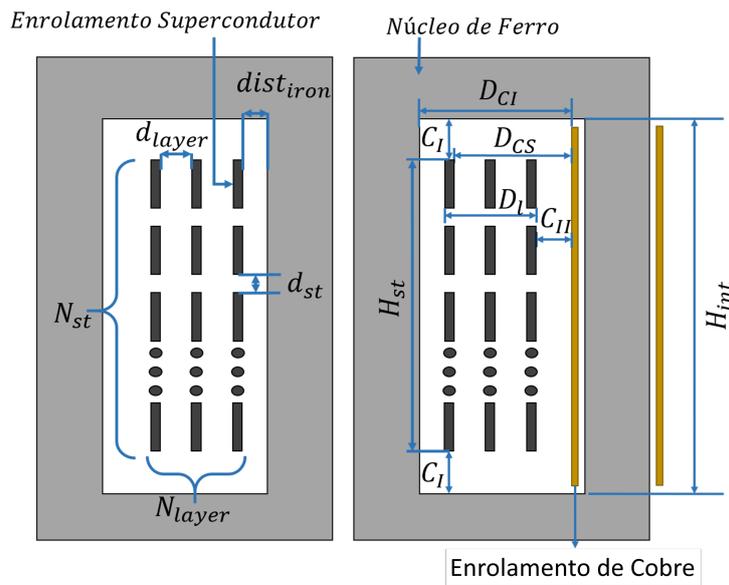


Figura 27 – Parâmetros de Otimização Utilizados

$$N_{coil} = N_{st} N_{layer}, \tag{5.20}$$

$$D_{CS} = D_{CI} - dist_{iron}, \tag{5.21}$$

$$D_l \leq D_{cs} - C_{II}, \tag{5.22}$$

$$D_{l_{max}} = D_{CS} - C_{II}, \quad (5.23)$$

$$d_{layer_{max}} = \frac{D_{l_{max}}}{N_{layer} - 1}, \quad (5.24)$$

$$H_{st} \leq H_{int} - 2C_I, \quad (5.25)$$

$$H_{st_{max}} = H_{int} - 2C_I, \quad (5.26)$$

$$d_{st_{max}} = \frac{H_{st_{max}}}{N_{st} - 1}, \quad (5.27)$$

$$l_{HTS} = N_{st} \sum_{i=1}^{N_{layer}} 2\pi[r_1 + (i-1)d_{layer}], \quad (5.28)$$

5.5 Modelagem do Limitador de Curto-Circuito de Núcleo Saturado em 3D

Nesta seção será explicado a metodologia para o estudo do LCCS-NS modelado em 3D através da formulação T-A.

5.5.1 Modelagem na formulação T-A

Para formulação T-A em 3D o modelo da figura 28 é construído, neste caso, o limitador é modelado representando todos os núcleos ferromagnéticos do limitador, os seis enrolamentos em cobre CA e o enrolamento supercondutor CC. As ligações dos enrolamentos CA seguem a mesma lógica apresentada na subseção 5.2.1. Sendo assim, para cada fase do sistema há dois enrolamentos CA ligados em série e de forma subtrativa. O esquemático da figura 29 apresenta as ligações do limitador com o sistema.

No caso da modelagem em 3D são explorados diversos curto-circuitos, incluindo o trifásico, o bifásico e o monofásico. Para a realização dos curtos-circuitos as chaves S_1 , S_2 , S_3 e S_5 são fechadas no instante de falta desejado.

Tabela 4 – Descrição de cada parâmetro de controle e otimização.

Parâmetros	Descrição	Classificação
$J_{c_{normalized}}$	Densidade de Corrente Crítica Normalizada	Parâmetro de Otimização
Δv_{SFCL}	Tensão entre os enrolamentos de cobre	Parâmetro de Otimização
$J_{z_{normalized}}$	Densidade de corrente Normalizada	Parâmetro de Otimização
Preco	Preço do enrolamento supercondutor	Parâmetro de Otimização
N_{st}	Número de empilhamentos	Variável de controle
d_{st}	Distância entre os empilhamentos	Variável de Controle
H_{st}	Altura da bobina supercondutora	Variável de Controle
N_{layer}	Número de camadas	Variável de Controle
d_{layer}	Distância entre as camadas	Variável de Controle
$dist_{iron}$	Distâncias entre o núcleo ferromagnético e a primeira camada do enrolamento supercondutor	Variável de Controle
H_{int}	Distancia interna do núcleo ferromagnético	Variável de Controle
C_I	Distância máxima permitida entre o último empilhamento e o material ferroamagnético	Variável de Controle
C_{II}	Máxima distância permitida entre a última camada supercondutora e o material ferromagnético	Variável de Controle
D_{CS}	Distância ente os enrolamentos de cobre e supercondutor	Variável de Controle
D_{CI}	Distância entre o enrolamento de cobre e o material ferromagnético	Variável de Controle
D_I	Distância entre o primeiro e último camada supercondutora	Variável de Controle
N_{coil}	Número de espiras no enrolamento supercondutor	Variável de Controle
$d_{layer_{max}}$	Máxima distância permitida entre dois empilhamentos	Variável de Controle
$d_{st_{max}}$	Máxima distância permitida entre duas camadas	Variável de Controle

- a) Curto monofásico a chave S_1 é fechada no momento da falta, enquanto as chaves S_2 , S_3 e S_5 permanecem abertas.
- b) Curto bifásico as chaves S_1 , S_2 e S_5 são fechadas, no entanto, a chave S_3 permanece aberta. Para o curto bifásico o nó de terra é desacoplado da impedância de curto.
- c) Curto trifásico as fases S_1 , S_2 e S_3 são fechadas e a chave S_5 permanece aberta. A modelagem de elementos finitos dos enrolamentos segue a mesma metodologia

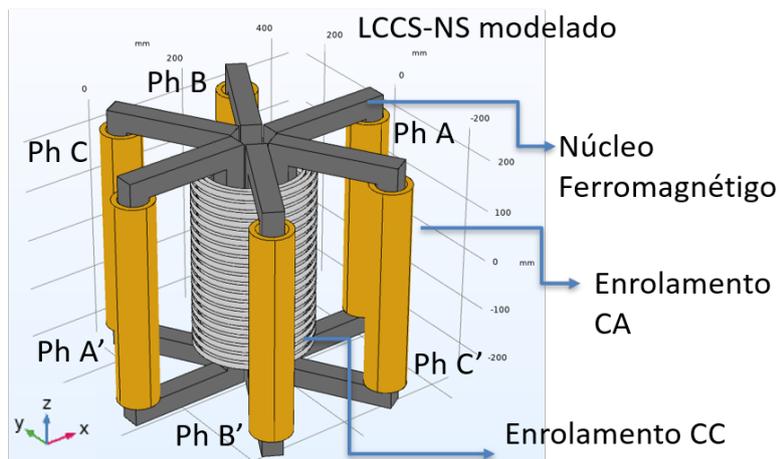
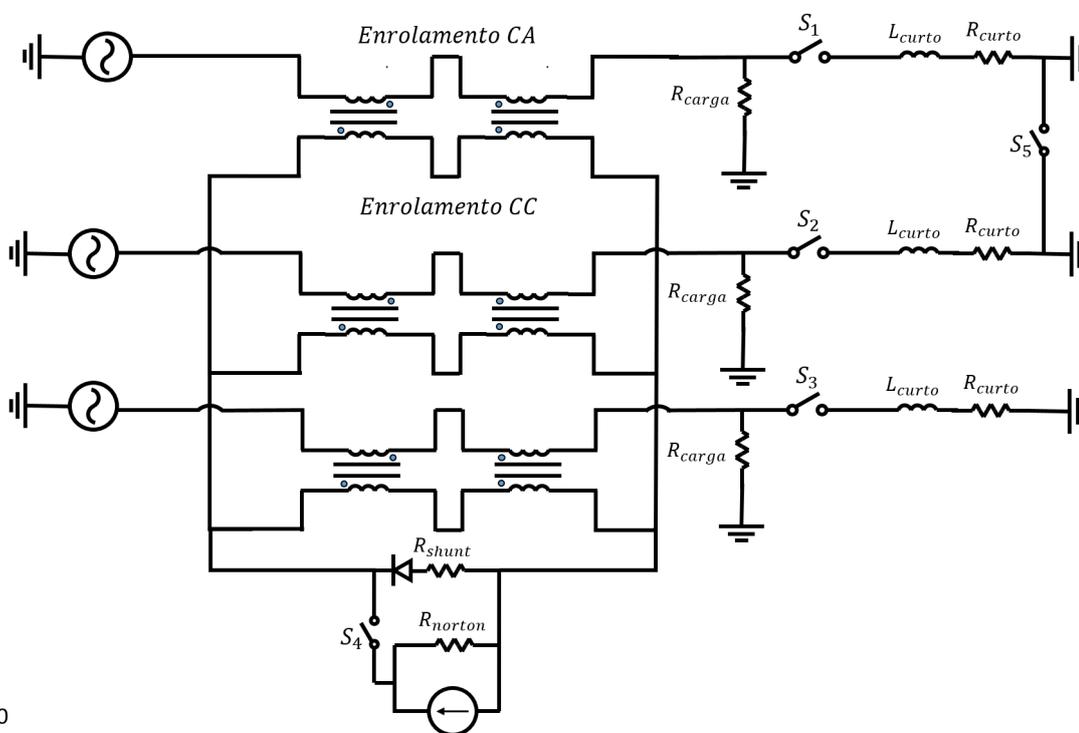


Figura 28 – Limitador de curto-circuito Supercondutor modelado em 3D



13/30

Figura 29 – Modelo de circuito implementado para a realização das simulações em 3D

apresentada no subtópico 5.2.1, onde os enrolamentos são modelados através da função *Coil* que é acoplada ao circuito elétrico do sistema. Já a modelagem do enrolamento supercondutor e o seu acoplamento com o circuito elétrico são apresentados na seção 5.3.1.

Para a formulação T-A novamente a bobina CC é substituída por uma bobina supercondutora projetada com fita 2G com as características já mencionadas na subseção 5.2.2. Neste caso a geometria modelada é baseada no resultado da otimização

do enrolamento estudado na subseção 5.4 e pode ser observada na figura 30. A fita supercondutora é modelada como uma superfície em forma de um solenoide. Três solenoides são circunscritos para representar as três camadas da fita supercondutora.

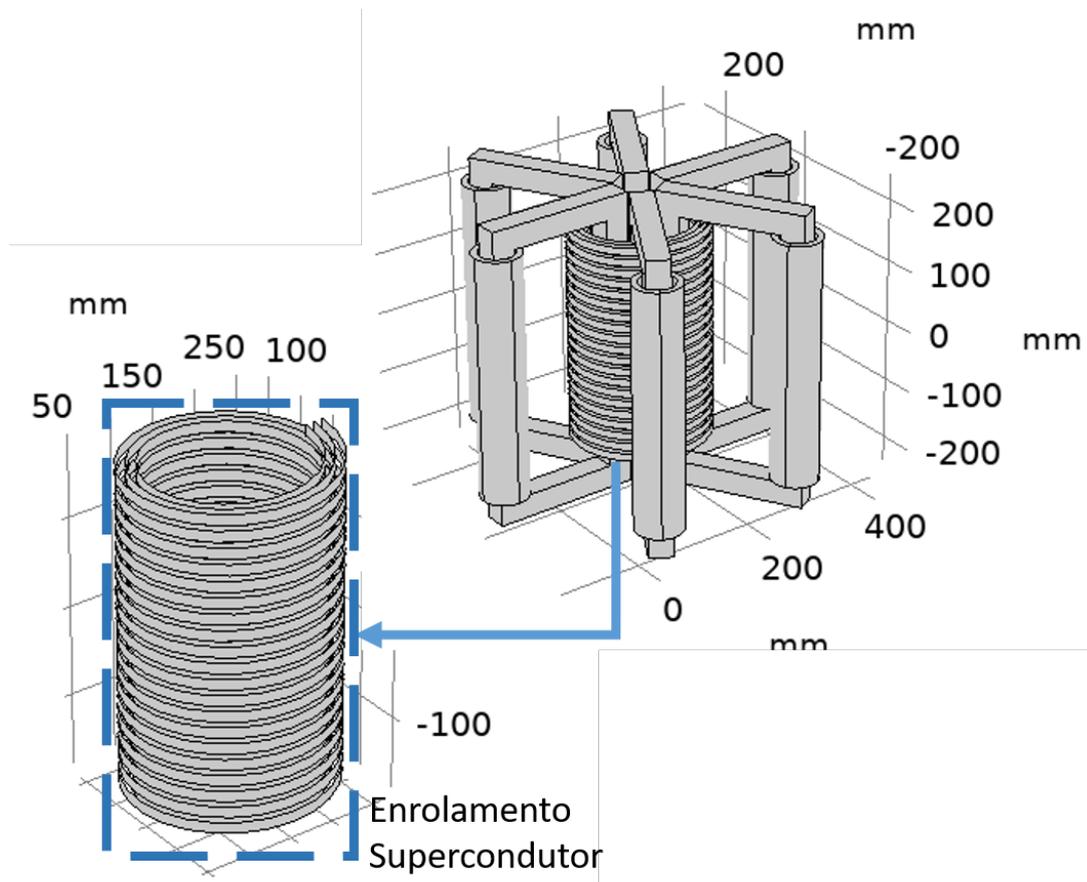


Figura 30 – Modelo de circuito implementado para a realização das simulações em 3D

A imposição de corrente nestes modelos segue a mesma metodologia apresentada na seção 5.2.2, porém neste caso a imposição é na linha da superfície da fita. A figura 31 apresenta a imposição de corrente na formulação T-A, a equação usada para implementar esta metodologia é a 5.3. O circuito modelado e seu acoplamento são apresentados na figura 29.

5.6 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias para a implementação dos modelos 2D e 3D de um limitador de curto-circuito de núcleo saturado. Além disso, foi apresentado um modelo de acoplamento entre a formulação T-A e o modelo de circuitos elétricos do software utilizado. No conhecimento do autor esta tarefa ainda

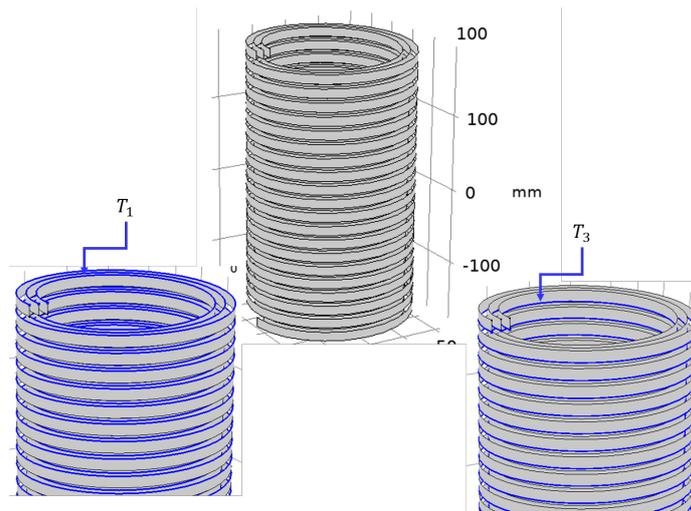


Figura 31 – Imposição da Corrente no modelo 3D

não havia sido realizada antes na literatura. Com este desenvolvimento, o acoplamento entre elementos do sistema de potência e o modelo de supercondutores em elementos finitos pode ser feito. Por fim um modelo de otimização em 2D é usado para se encontrar uma geometria ideal dentre os parâmetros de projeto configurados. Este modelo é usado para a construção da geometria da bobina supercondutora em 3D.

6 Resultados e Discussões

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos nas formulações A-V e T-A para os modelos 2D e 3D. Cabe aqui ressaltar que os resultados da formulação A-V são usados apenas como meio de comparação com os resultados da formulação T-A. Desta forma, esta seção está dividida da seguinte forma: Na seção 6.1 serão discutidos os resultados da formulação T-A. Além disso, na subseção 6.1.1 são apresentados os resultados da otimização do enrolamento supercondutor comparando os modelos com os resultados obtidos na tese de Fernando Fajoni [133] e com os resultados da formulação A-V. Por fim, na seção 6.2 são apresentados os resultados da formulação T-A modelada em 3D que também serão comparados com a tese do F. Fajoni [133].

6.1 Resultados e Discussões da formulação T-A 2D

A figura 32 mostra uma comparação entre os resultados do estado estacionário (lado esquerdo) e curto-circuito (lado direito) da densidade de fluxo magnético obtida nas formulações T-A no tempo de 4ms e 51 ms, respectivamente. A figura 32 no instante de 4ms mostra que em todos os casos a força magnetomotriz fornecida pela bobina supercondutora é suficiente para saturar o núcleo ferromagnético LCCS-NS. Por outro lado, no instante de curto-circuito (figura à direita), a força magnetomotriz AC supera a força magnetomotriz CC, desmagnetizando o material ferromagnético. A direção e a intensidade da densidade do fluxo magnético são também observadas através das setas pretas apresentada em detalhes nos destaques das figuras. Desta forma, observa-se que para o mesmo instante de curto-circuito a densidade de fluxo magnético é maior para a corrente CC igual a 350 A e menor para a corrente de 50 A. Sendo assim, espera-se uma maior capacidade de limitação do primeiro pico quando uma corrente de 50 A for aplicada ao enrolamento CC.

A Figura 33 está apresentando a densidade de corrente normalizada nos regimes de estado estacionário (figura (a)) e curto-circuito (figura (b)). Essas imagens de estado estacionário e curto-circuito são exibidas em um tempo igual a 4 ms e 51 ms, respectivamente. Para o regime permanente, o perfil de corrente observado se mantém

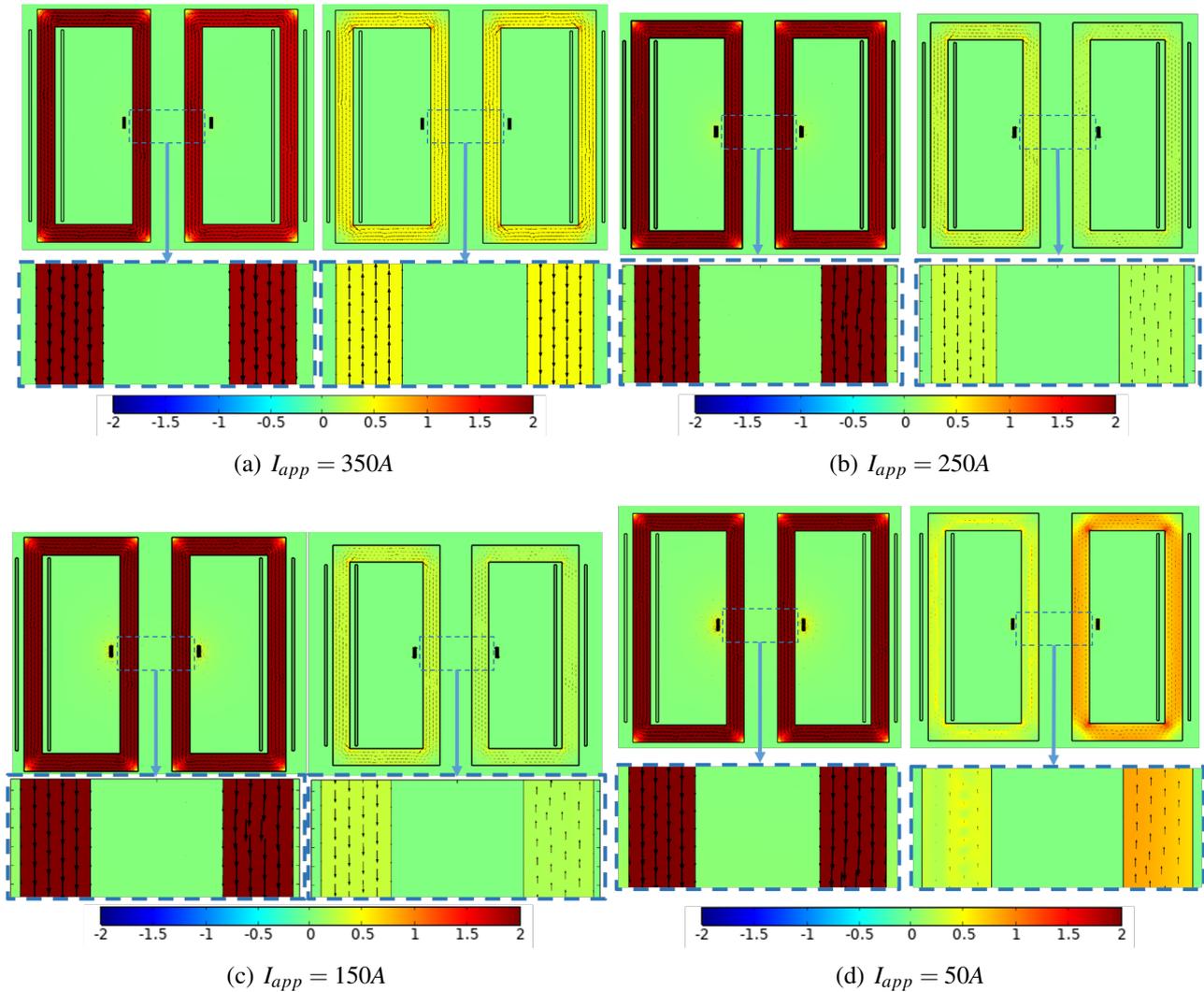
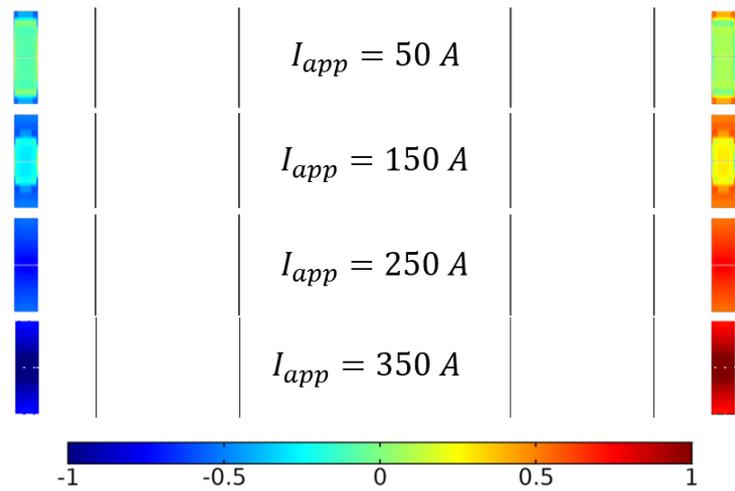


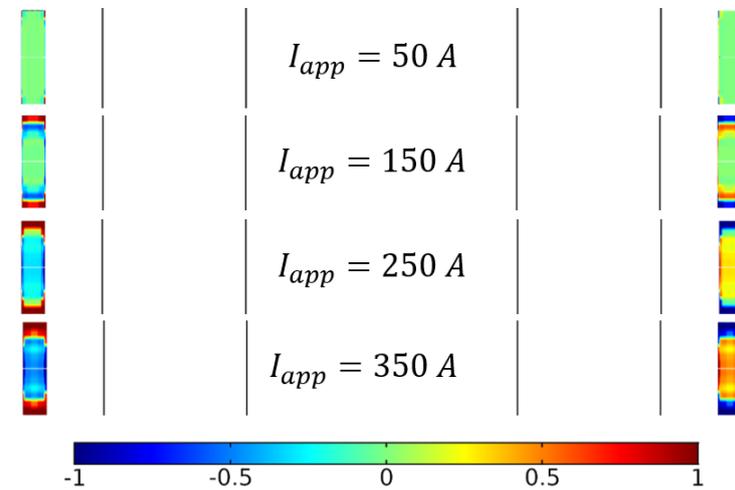
Figura 32 – Densidade de Fluxo Magnético para diferentes corrente CC aplicadas analisadas em regime permanente (lado esquerdo das figuras) e em curto-circuito (lado direito das figuras)

até o momento da falta. Já no instante 51 ms a bobina supercondutora presenciara uma tensão induzida devido à abertura da chave S_2 apresentada na figura 25. Por isso, uma corrente induzida circulará no enrolamento supercondutor no momento da falta. Como já mencionado esta corrente é limitada por uma resistência R_{shunt} .

A figura 33 (a) indica que a corrente aplicada igual a 350 A deve ser evitada, pois, neste cenário a densidade de corrente ultrapassa o limite operacional de densidade de corrente crítica. Por outro lado, a figura 33 (b) mostra o instante de tempo igual à 51ms no período transitório da descarga da bobina supercondutora. É necessária atenção para evitar um alto valor de densidade de corrente na fita supercondutor neste transitório.



(a) Perfil da densidade de corrente no instante de regime permanente (4 ms)



(b) Perfil da densidade de corrente no instante de curto-circuito (51 ms)

Figura 33 – Densidade de Corrente Normalizada (J/J_{c0}) para diferentes correntes CC aplicadas.

6.1.1 Resultados da Otimização do Enrolamento Supercondutor

Esta seção apresenta os resultados da otimização da geometria da bobina, cuja explicação foi apresentada na seção 5.4. A tabela 5 resume os resultados das densidades de correntes críticas normalizadas encontradas na formulação T-A para a corrente contínua igual a 350 A, 250 A, 150 A e 50 A. Já a figura 34 apresenta a queda de tensão calculada pela formulação T-A entre os terminais CA do LCCS-NS em regime permanente. Para os valores de corrente contínua aplicada (I_{ap}) de 50 A e 150 A, o comportamento de queda de tensão LCCS-NS indica a presença de harmônicos no regime de estado estacionário. Este fato indica a necessidade de otimizar o projeto da bobina supercondutora para melhorar o desempenho do limitador.

Tabela 5 – Comparação entre a média dos valores normalizada da densidade de corrente crítica ($J_{c_{normalizada}}$) para diversas corrente aplicadas.

$I_{ap}(A)$	$J_{c_{normalizada-T-A}}$
350	73%
250	85%
150	93.2%
50	98%

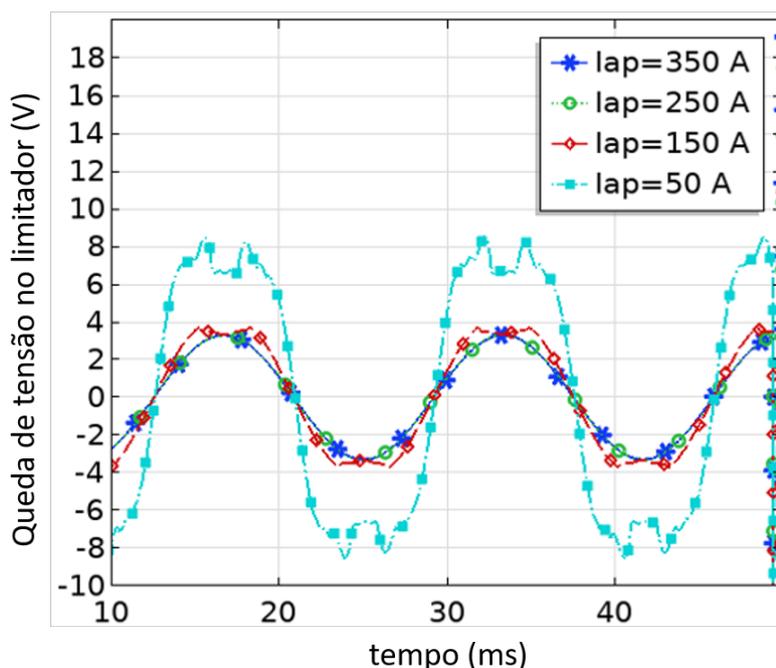


Figura 34 – Queda de tensão nos terminais CA em regime permanente.

Como resultado da primeira otimização, a corrente ideal dentre os valores restritos é igual a 250 A. O valor de corrente contínua forneceu o ponto de operação ótimo. A geometria da bobina foi dividida em 2 pilhas com 30 camadas cada. A distância entre as camadas adjacentes e as pilhas foi definida como 0,2 mm. Esta primeira otimização diminui a queda de tensão de 8 V pico para 3 V pico entre os terminais limitador e otimiza a densidade de corrente crítica normalizada.

A segunda otimização forneceu a geometria ideal da bobina. Conforme explicado na seção 5.4, as funções objetivo na segunda otimização visam maximizar a densidade de corrente crítica normalizada, minimizar a densidade de corrente normalizada e minimizar o preço da fita supercondutora. A figura 35 mostra a densidade de corrente crítica para várias camadas e empilhamento, onde o número de voltas foi mantido

constante, e a corrente aplicada foi obtida na otimização anterior (250 A).

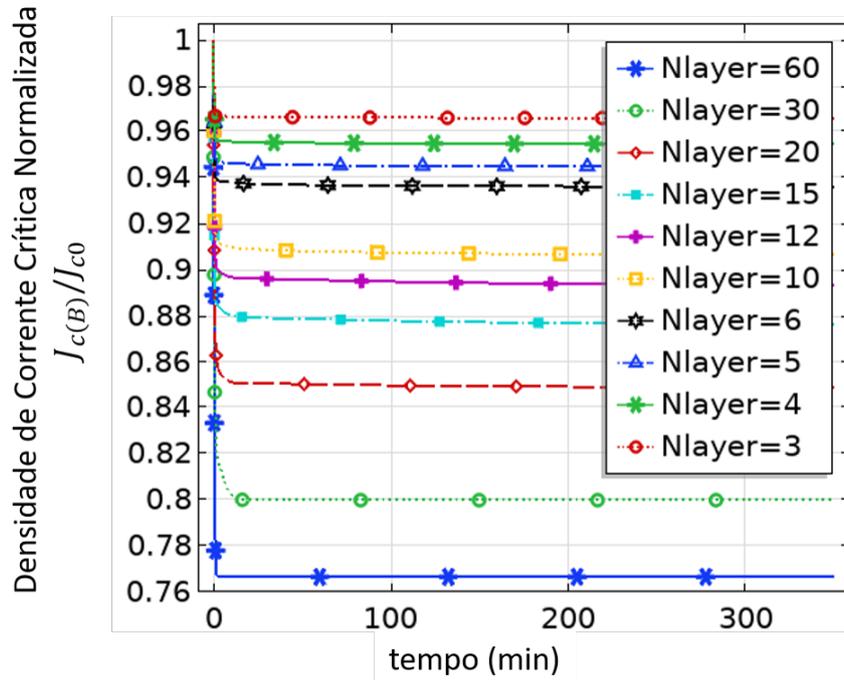
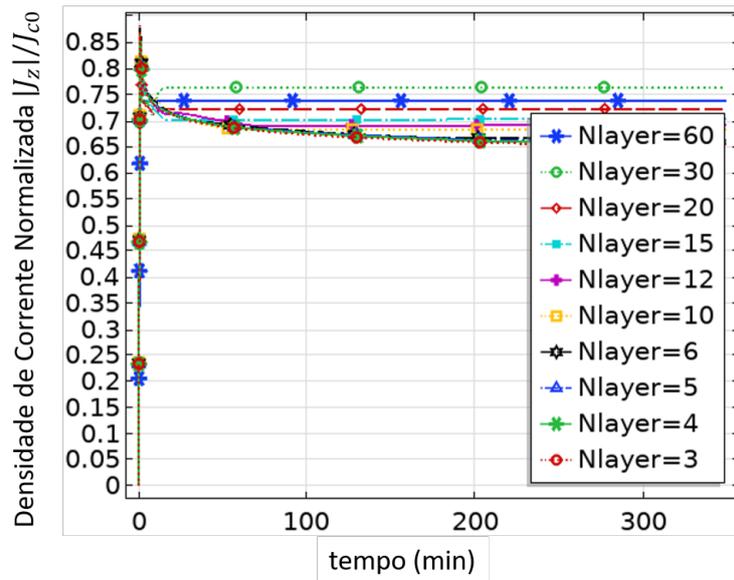


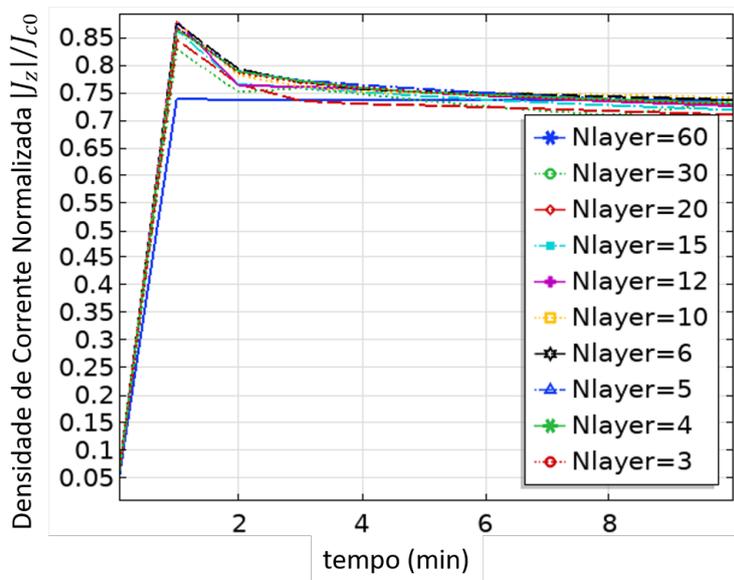
Figura 35 – Densidade de corrente crítica normalizada ($J_c(\mathbf{B})/J_{c0}$) para várias configurações de camadas.

A figura 36 mostra a densidade de corrente normalizada para vários empilhamentos e camadas. Todos os casos têm seu valor de densidade de corrente normalizado menor que 1, como esperado, o que significa que o supercondutor não transita para o estado normal. Então, comparando os resultados das figuras 35 e 36, o algoritmo de otimização indica que o melhor é ter menos camadas e mais empilhamentos para o projeto da bobina. A figura 36 (b) mostra que conforme o número de empilhamentos aumenta (mais empilhamentos e menos camadas para manter o número de espiras constante), um sistema de segunda ordem aparece no transitório da bobina supercondutora. Neste caso, é importante prestar atenção ao *overshot* da densidade de corrente durante este período. Considerando isso, uma restrição pode ser adicionada nos processos de otimização, conforme apresentado pela equação 6.1, onde κ é a densidade máxima de corrente normalizada permitida.

$$\frac{J}{J_{c0}} \leq \kappa \tag{6.1}$$



(a)



(b)

Figura 36 – (a) Densidade de corrente normalizada para várias camadas e empilhamentos (b) Destaque na densidade de corrente normalizada entre 0 e 8 minutos

O processo de otimização final consiste em determinar a geometria ótima da bobina e, neste caso, os valores dos parâmetros explicados na seção 5.4 foram variados para rastrear este ponto. A figura 37 mostra o projeto otimizado obtido e o compara com os resultados da formulação A-V. Além disto, os resultados mostram que o fator de preenchimento mínimo no enrolamento supercondutor nem sempre será o mais adequado para minimizar a sua densidade de corrente crítica. Os parâmetros

geométricos que otimizam este problema estão resumidos na tabela 6:

Tabela 6 – Parâmetros geométricos ótimos

	N_{st}	N_{layer}	$d_{st}(mm)$	$d_{layer}(mm)$	$dist_{iron}(mm)$
Parâmetros Iniciais	1	60	0.2	5	20
Parâmetros Finais	20	3	5	10	10

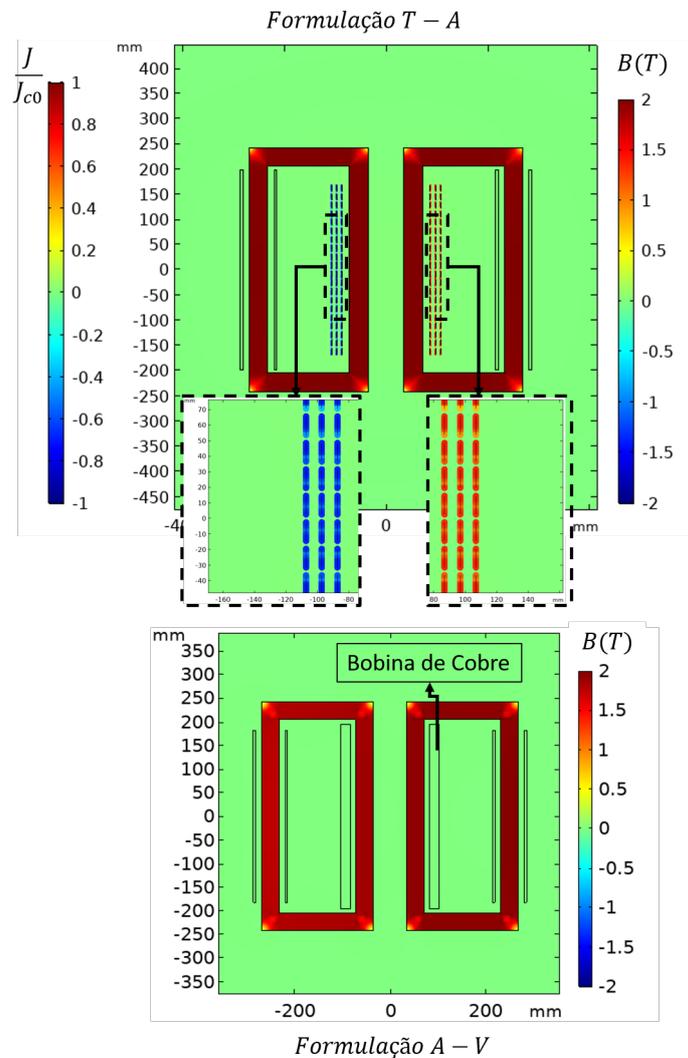


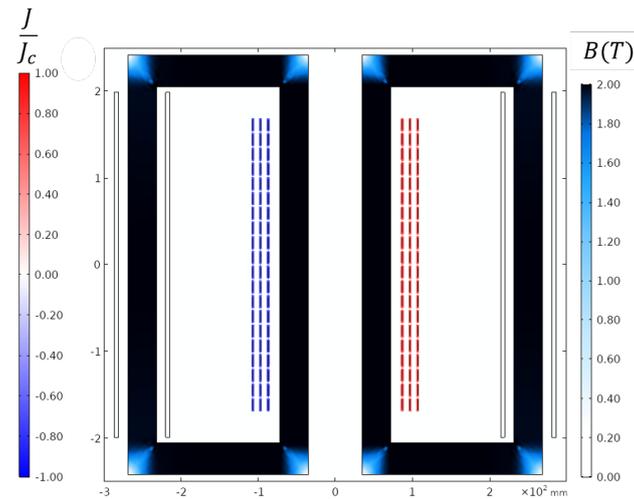
Figura 37 – Comparação entre a densidade de fluxo magnético (em Tesla) usando a bobina supercondutora e a bobina de cobre. Para o gráfico da bobina supercondutora a densidade de corrente normalizada é apresentada.

A figura 38 mostra a densidade do fluxo magnético no núcleo ferromagnético e mapeia a densidade da corrente na bobina supercondutora durante a operação normal em ($t = 4$ ms) e durante o evento de falha ($t = 51$ ms). Esta figura mostra que a força magnetomotriz fornecida pela bobina supercondutora é suficiente para manter o núcleo ferromagnético do limitador em um estado profundamente saturado

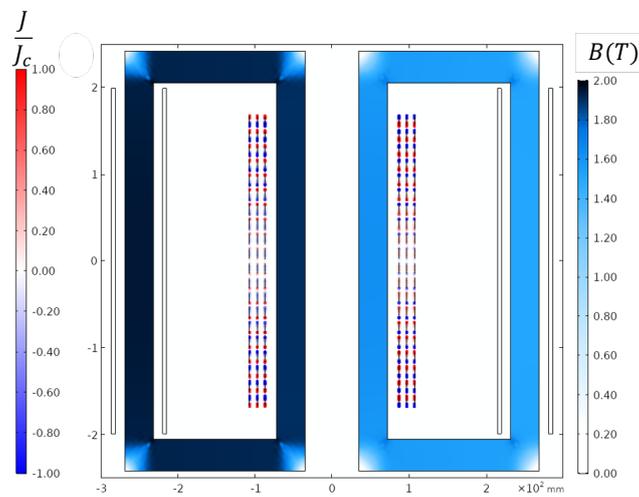
durante a operação normal. Uma densidade de fluxo magnético acima de 2 T pode ser observada na maior parte do núcleo, que está muito além do valor de saturação que pode ser detectado na figura 17. Em $t = 51\text{ms}$, a força magnetomotriz CA supera a força magnetomotriz CC, desmagnetizando o material ferromagnético do limitador do lado direito. Na figura 38 uma corrente uniforme na bobina supercondutora também pode ser observada durante a operação normal ($t = 0$). Já no instante de curto circuito com a chave de acionamento rápido aberta, uma corrente é induzida na bobina supercondutora. Esta corrente é provocada pela variação temporal do vetor potencial magnético sobre a bobina supercondutora. Com a chave de acionamento rápido aberta o único caminho para a corrente induzida é através do ramo paralelo. Onde, encontra-se o resistor R_{shunt} que limita a corrente induzida a um valor para não danificar o enrolamento supercondutor.

A figura 39 mostra a evolução temporal da corrente através da bobina supercondutora para diferentes valores da corrente I_{ap} . Quando ocorre o curto-circuito, o controle detecta a falha e abre a chave rápida S_1 . Nesse instante, uma tensão induzida parece evitar a mudança da densidade do fluxo magnético. Consequentemente, uma corrente induzida fluirá através da bobina supercondutora, como é mostrado na figura 39 (b).

Para analisar o acoplamento entre o modelo MEF da bobina supercondutora e os parâmetros concentrados no modelo do circuito elétrico, as correntes através da bobina supercondutora no MEF e circuito elétrico, as correntes na chave ideal e no diodo são plotadas na figura 40. Em regime permanente, praticamente toda a corrente da fonte vai para a bobina supercondutora devido à sua menor resistência. Como a chave rápida está fechada, então a corrente flui por ela. Desta forma, as correntes da bobina supercondutora e da chave rápida são iguais. Por outro lado, quando ocorre a falta e a chave rápida abre, toda a corrente da fonte vai para a resistência de Norton. Consequentemente, nenhuma corrente passará pela chave rápida. No entanto, uma tensão induzida aparecerá na bobina supercondutora. Quando esta tensão é maior que a tensão através da camada de depleção do diodo, ele vai para a região ativa e uma corrente passa pelo ramo de derivação. Em seguida, o resistor *shunt* dissipa a energia acumulada pela bobina supercondutora. A figura 40 mostra a corrente através da bobina supercondutora calculada pelo MEF e pelo circuito elétrico. Desta forma, é



(a) $I_{ap} = 250A$ regime permanente



(b) $I_{ap} = 250A$ curto-circuito

Figura 38 – Densidade de Fluxo Magnético e a densidade de corrente normalizada para I_{ap} igual à 250 A

possível verificar que este acoplamento foi alcançado com sucesso.

A figura 41 mostra a densidade de corrente crítica normalizada média da fita supercondutora em função do tempo, para diferentes valores da corrente operacional da bobina supercondutora durante as condições normais de operação e durante o curto-circuito. É importante notar que a geometria da bobina supercondutora influencia na distribuição do campo no condutor e, conseqüentemente, na redução da densidade crítica de corrente.

Para comparar os resultados obtidos das formulações $A - V$ e $T - A$ com testes

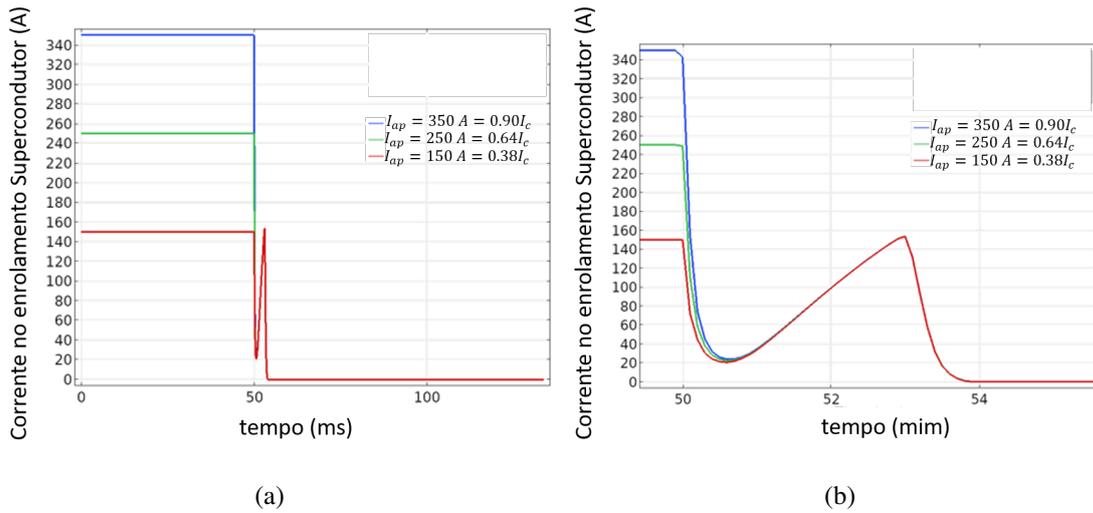


Figura 39 – (a) Corrente através da bobina supercondutora (b) destaque da corrente através da bobina supercondutora no instante do primeiro pico do curto-circuito.

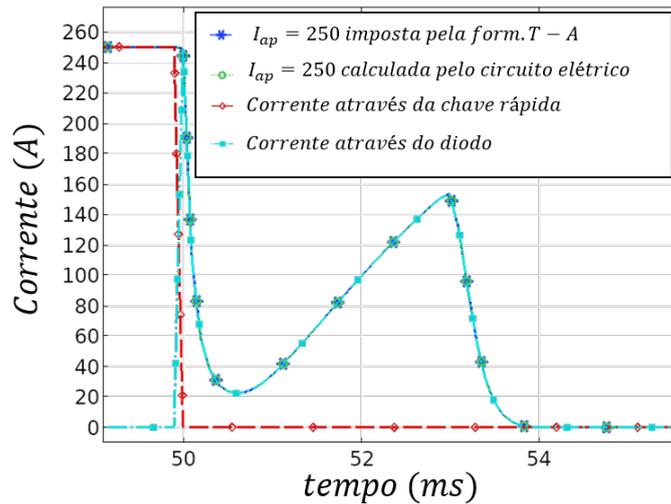


Figura 40 – Correntes da bobina supercondutora, diodo e da chave de acionamento rápido.

experimentais as equações 6.2 e 6.3 foram usadas.

$$Erro_{MS} = \frac{Dados_{medidos} - Dados_{simulados}}{\max(Dados_{medidos})} \tag{6.2}$$

$$Erro_S = \frac{Dados_{T-A} - Dados_{A-V}}{\max(Dados_{T-A})} \tag{6.3}$$

onde $Erro_{MS}$ é o erro entre o teste de bancada medido e a formulação T-A ou A-V, $Erro_S$ é o erro entre as formulações T-A e A-V, $Dados_{medido}$ são os dados medidos, $Data_{simulao}$ são os dados simulados (T-A ou A-V), $\max(Dados_{medidos})$ é o valor

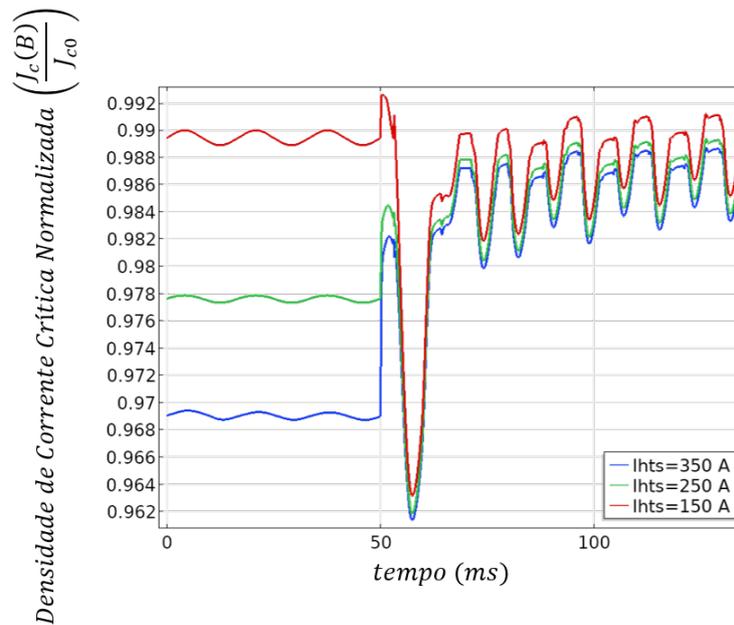


Figura 41 – Média da densidade de corrente crítica normalizada vs o tempo para diferentes correntes CC.

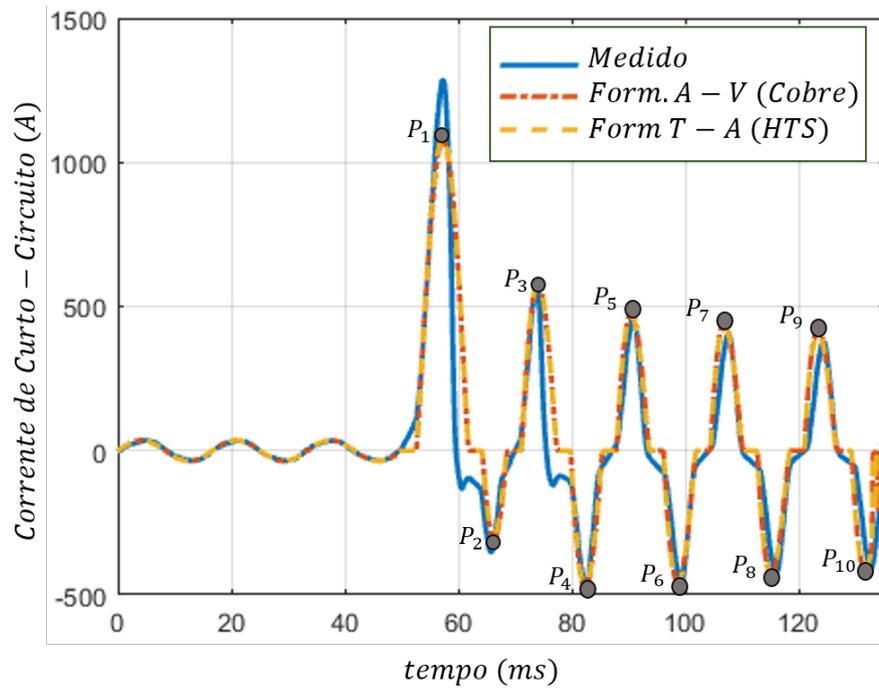
máximo do teste de bancada medido, $Dados_{T-A}$ são os dados de formulação T-A, $Dados_{A-V}$ são os dados da formulação A-V e $\max(Dados_{T-A})$ é o valor máximo dos dados da formulação T-A. Nesse caso, todas as variáveis mencionadas acima são vetores.

A figura 42 (a) mostra a comparação entre os resultados obtidos nas formulações T-A e A-V e o sistema de bancada. A figura 42 (b) apresenta o erro entre as simulações e as medições em 57,2 ms, que é igual a 15%. Nos regimes de estado estacionário, o erro é inferior a 1%. A tabela 7 resume os erros nos pontos 1 a 10 (ver figura 42) no período de curto-circuito.

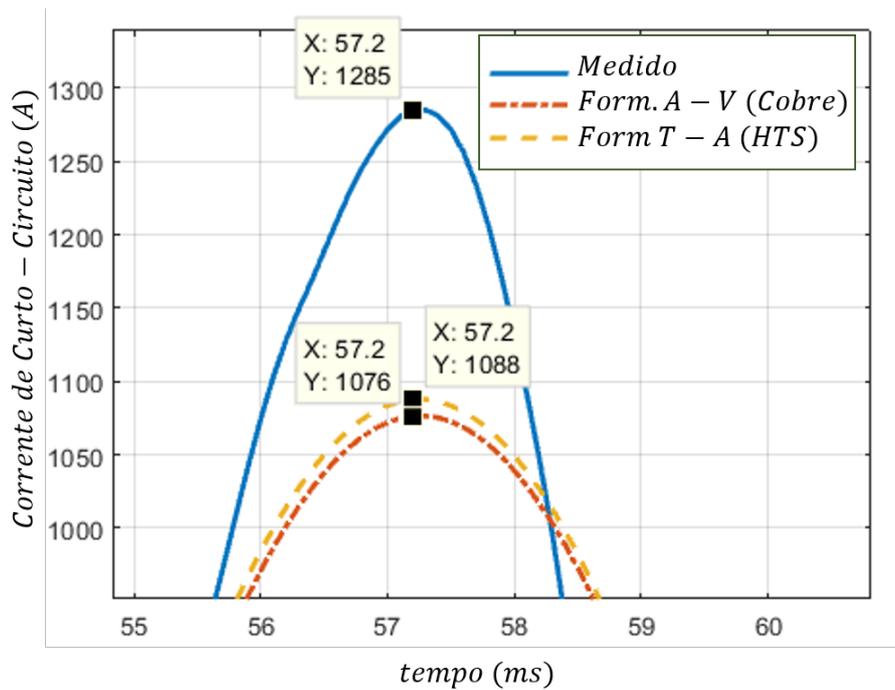
6.2 Resultados e Discussões da formulação T-A 3D

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações T-A em 3D. Como mencionado na seção 5.2.2, neste caso são modelados 3 curtos-circuitos: monofásico, bifásico e trifásico. Os resultados de suas respectivas prospectivas estão apresentados na figura 43.

Inicialmente serão apresentados os resultados em regime permanente. Após, o curto-circuito monofásico de validação é apresentado, onde neste caso, apenas umas



(a)



(b)

Figura 42 – (a) Comparação entre a formulação A-V, T-A e Medidas.(b) Zoom do primeiro no da corrente de falta.

dos enrolamentos de cobre é considerado. Este modelo é comparado com os ensaios para validação do modelo em 3D. Em seguida, os resultados das simulações do curto monofásico, bifásico e trifásico considerando todos os enrolamentos de cobre ligados

Tabela 7 – Erros nos P_i pontos

Point	$Erro_{MS_{T-A}}$	$Erro_{MS_{A-V}}$	$Erros$
1	15 %	16%	1%
2	18 %	12%	6%
3	1 %	1%	1%
4	1 %	2%	2%
5	3 %	5%	1%
6	1 %	1%	1%
7	7 %	10%	2%
8	1 %	1%	1%
9	8 %	11%	2%
10	1%	1%	1%

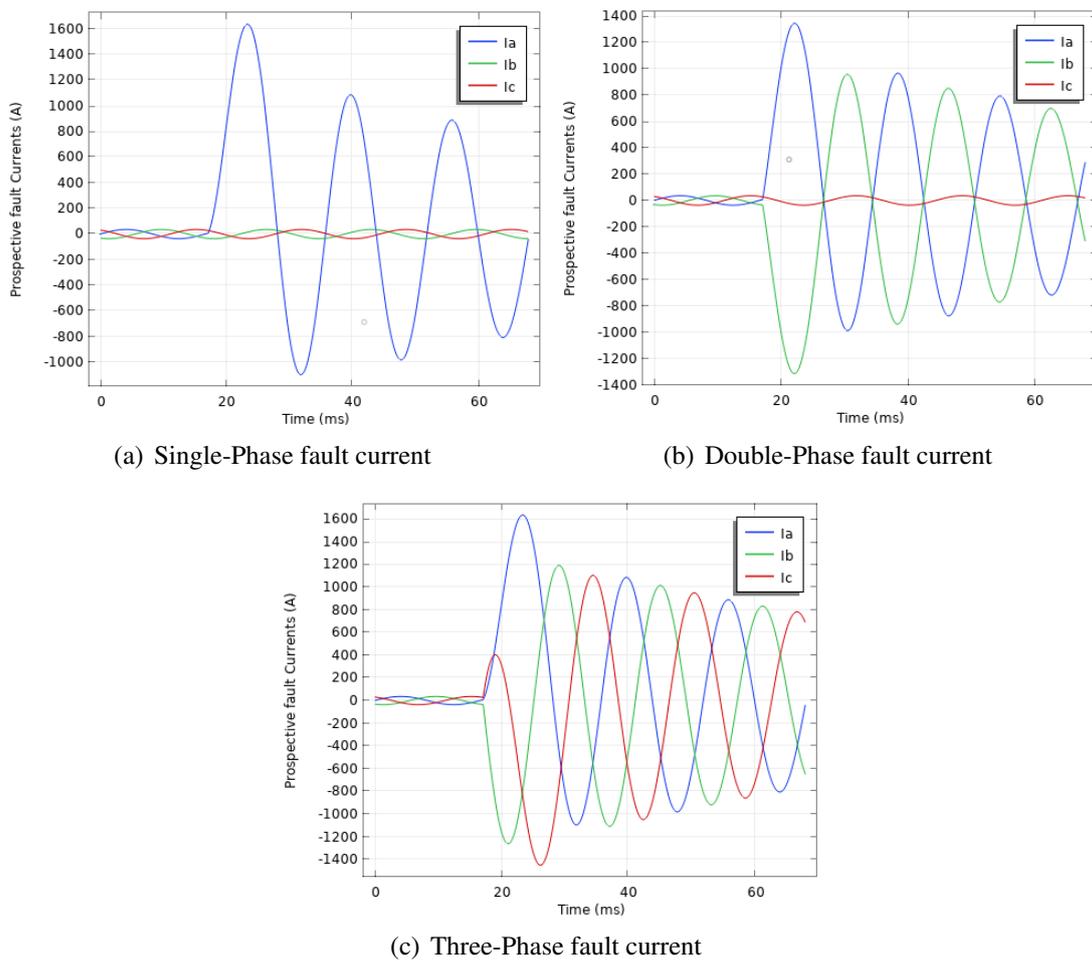


Figura 43 – Corrente prospectivas para os curtos-circuitos monofásico, bifásico e trifásico.

são apresentados. Por fim, estes resultados são comparados e uma discussão sobre os diferentes curtos-circuitos é feita.

6.2.1 Condição de regime permanente

A Figura 44 mostra a densidade do fluxo magnético no núcleo e a densidade da corrente na bobina supercondutora durante a operação normal em $t = 2\text{ms}$. Nesta figura é possível observar que a força magnetomotriz proporcionada pela bobina supercondutora é suficiente para manter o núcleo ferromagnético do LCCS-NS em um estado profundamente saturado, durante a condição normal. Uma densidade de fluxo magnético superior a 2 T é observada na maior parte do núcleo, que está além do valor de saturação que pode ser identificado na figura 17.

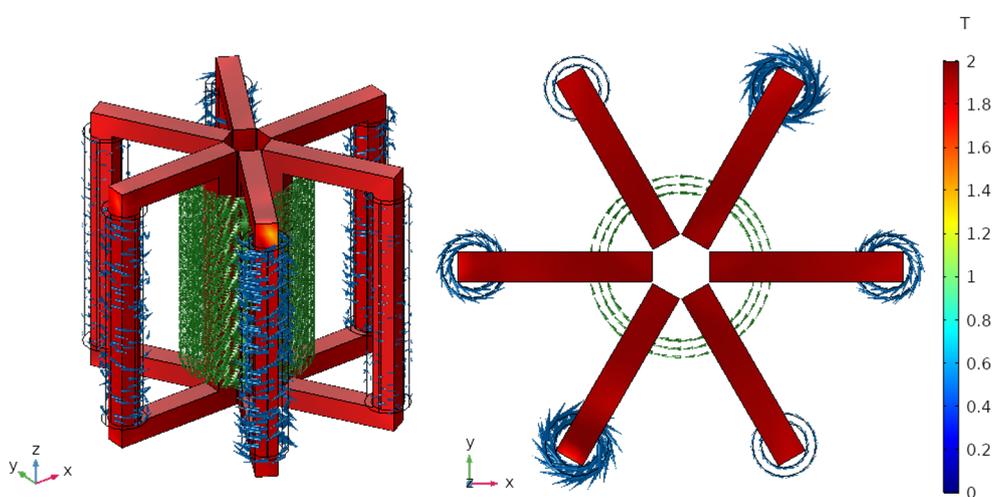


Figura 44 – Densidade de fluxo magnético em 2ms

Com o LCCS-NS saturado a sua impedância vista pelo sistema é baixa e então a queda de tensão entre os terminais do equipamento é pequena. Olhando a figura 29 no lado CC, a chave S_4 fecha o circuito e a corrente da fonte alimenta a bobina supercondutora. Como a resistência R_{norton} é muito maior que a resistência da bobina supercondutora, a maior parte da corrente da fonte vai para a bobina. O diodo evita o fluxo de corrente pelo ramo de derivação. A figura 45 mostra a corrente nestes elementos em regime permanente. Na figura 46 é possível ver a densidade de corrente normalizada, onde as setas pretas indicam a direção da corrente (sentido horário) e o gráfico colorido mostra que a densidade de corrente normalizada está próxima de 0,6 como esperado (para uma corrente de 250 A aplicada no enrolamento CC).

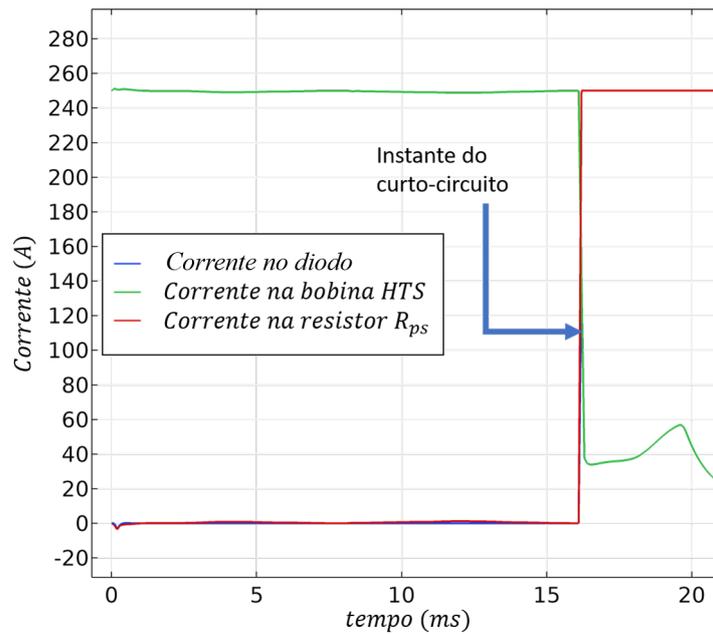


Figura 45 – Corrente nos nós do circuito CC em regime permanente.

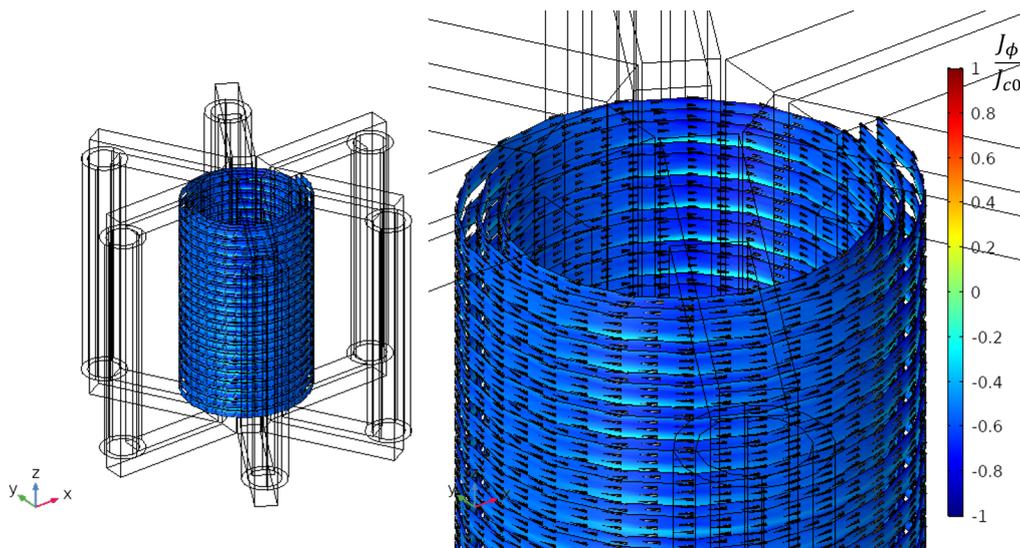


Figura 46 – Densidade de corrente normalizada em 2ms

6.2.2 Curto-Circuito monofásico na fase A para validação

Esta seção compara os resultados do teste de bancada com os resultados de curto-circuito monofásico, onde uma das bobinas de cobre é conectada ao sistema. A figura 47 mostra a comparação entre a formulação T-A e o teste de bancada. A tabela 8 apresenta os erros entre as duas curvas nos seis pontos máximos absolutos da curva simulada. O maior erro na condição de curto-circuito é igual a 15% e o erro no estado estacionário é menor que 1%. Desta forma, a simulação eletromagnética é validada.

A equação 6.3 foi aplicada para avaliar a diferença relativa entre esses resultados.

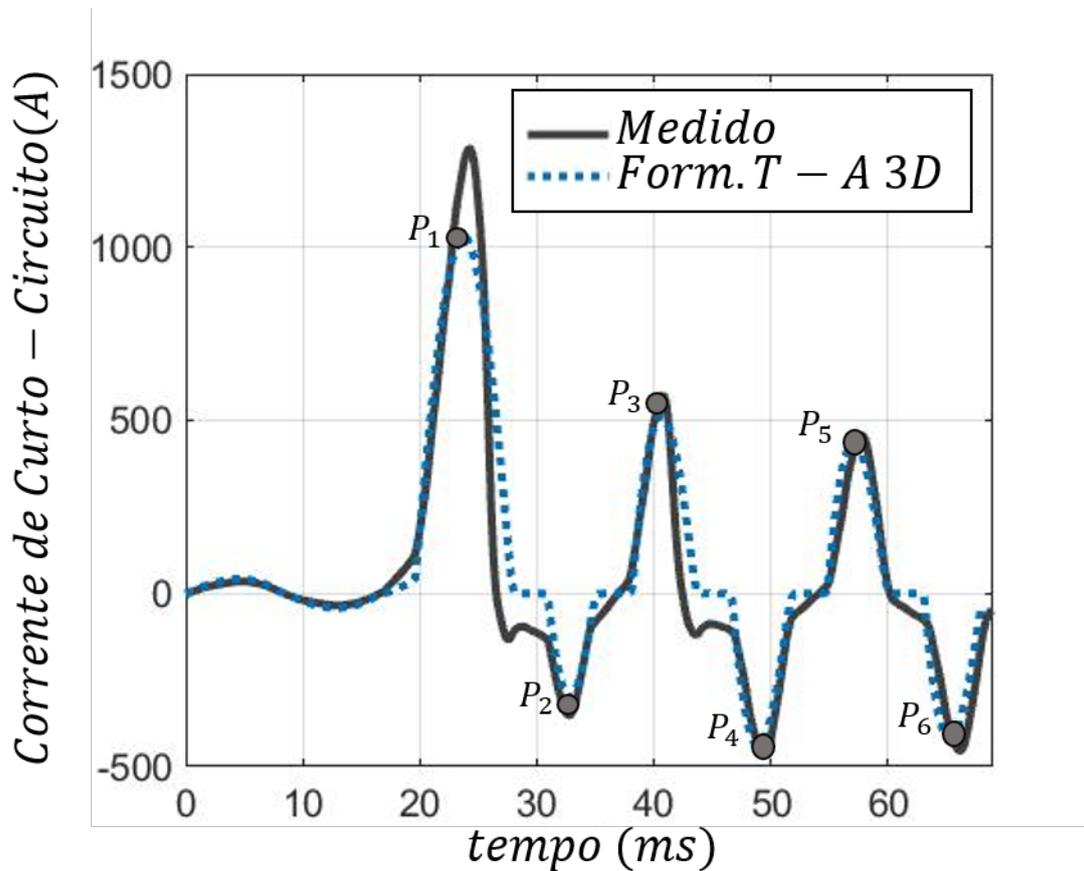


Figura 47 – Corrente de curto-circuito monofásico com a apenas a fase A ligada.

Tabela 8 – Erros nos P_i pontos máximos

Pontos	$Erro_{MS_{T-A}}$
1	15%
2	4%
3	5%
4	0%
5	3%
6	3%

A figura 48 apresenta a corrente e a tensão da bobina supercondutora. Neste caso, a influência das outras fases é desprezada, então a tensão supercondutora calculada é devida a apenas uma bobina de cobre.

A seguir, o primeiro pico da tensão induzida ocorre em 19,7 ms, que corresponde à maior inclinação da corrente de curto-circuito. Durante a condição de falha, a figura 49 apresenta a corrente do supercondutor.

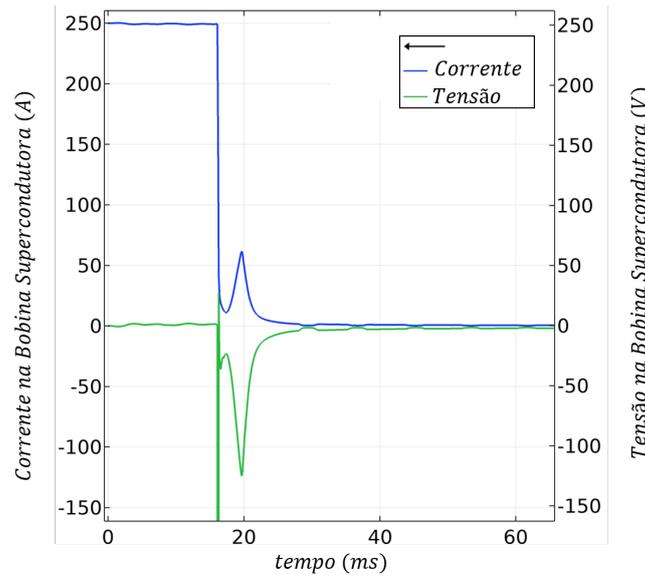


Figura 48 – Corrente e tensão do enrolamento supercondutor no curto-circuito monofásico

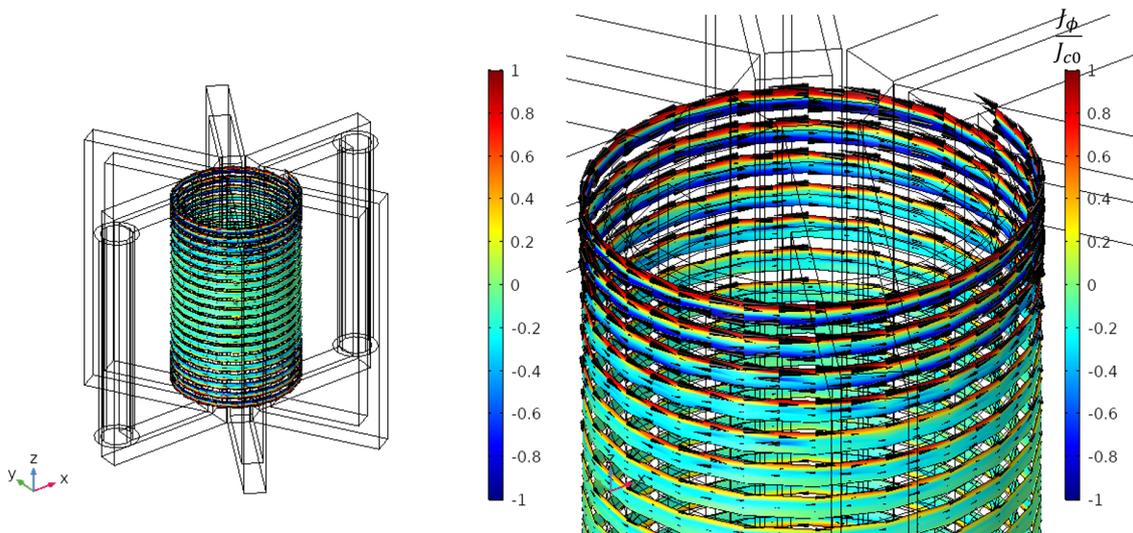


Figura 49 – Densidade de Corrente Normalizada em 18 ms para a condição de curto-circuito monofásico na fase A com as outras fases desligadas.

A figura 50 mostra a densidade de fluxo magnético dentro do núcleo ferromagnético em 18 ms. A força magnetomotriz fornecida pela bobina supercondutora é suficiente para manter o núcleo ferromagnético do LCCS-NS em um estado profundamente saturado durante a operação normal. Uma densidade de fluxo magnético além de 2 T pode ser observada na maior parte do núcleo, que está muito além do valor de saturação que pode ser detectado na figura 17. Em $t = 18$ ms, a força magnetomotriz CA supera a força magnetomotriz CC. Neste instante, a fase A' está dessaturada o núcleo de ferromagnético e a fase A está saturando profundamente

o núcleo ferromagnético oposto. As fases B e C ainda estão saturadas, mostrando a influência da tensão induzida sobre o processo de desmagnetização do limitador. Nesse caso, a tensão induzida provoca uma corrente na bobina supercondutora, esta corrente induzida gera um fluxo magnético, que persiste em manter os núcleos de ferro na região de saturação. Durante a condição de falha, a figura 49 apresenta a densidade de corrente na fita supercondutora.

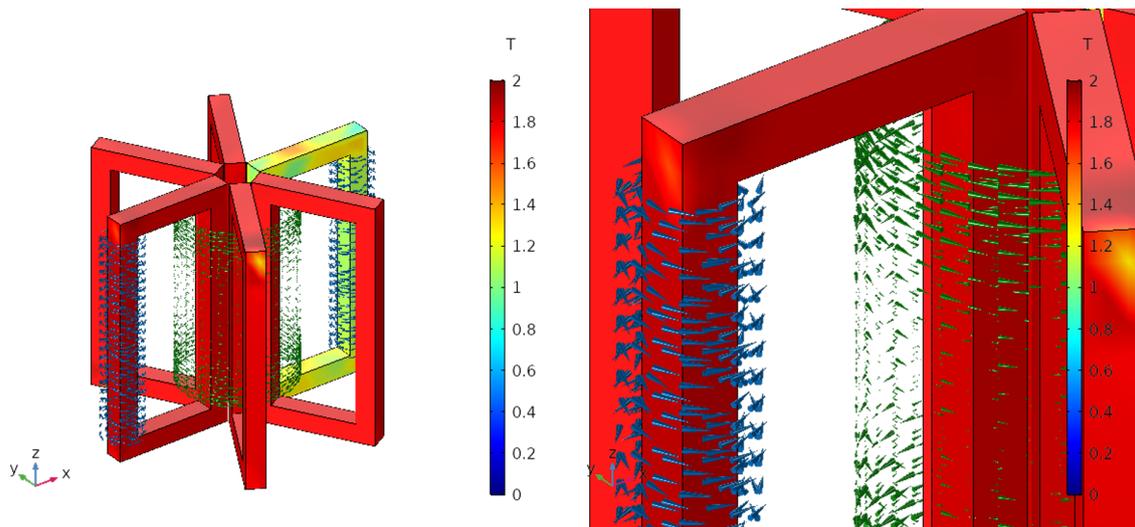


Figura 50 – Densidade de fluxo magnético e densidade de corrente (setas verdes e azuis) em 18 ms no curto-circuito monofásico

6.2.3 Curto-Circuito monofásico na fase A

Diferente da última seção, esta apresenta o curto-circuito monofásico com todas as bobinas de cobre modeladas. A figura 51 mostra o curto-circuito monofásico com todas bobinas de cobre conectadas na rede. Comparando os valores de I_a atuais desses resultados com as correntes da última seção, observa-se um erro mínimo entre essas curvas. Outro resultado importante desta figura é que mesmo em um curto-circuito monofásico, todas as fases são afetadas pela falha.

A figura 52 apresenta a corrente e tensão do enrolamento supercondutor devido a esta falta. Comparando as figuras 52 e 48 fica aparente a diferença na tensão induzida dessas simulações. Isso ocorre devido ao fluxo magnético diferente envolvido pela bobina supercondutora em ambas as situações. Outro impacto, quando todas as bobinas de cobre são consideradas na simulação, é o período transiente da corrente da bobina supercondutora. Comparando a corrente do enrolamento supercondutor nas

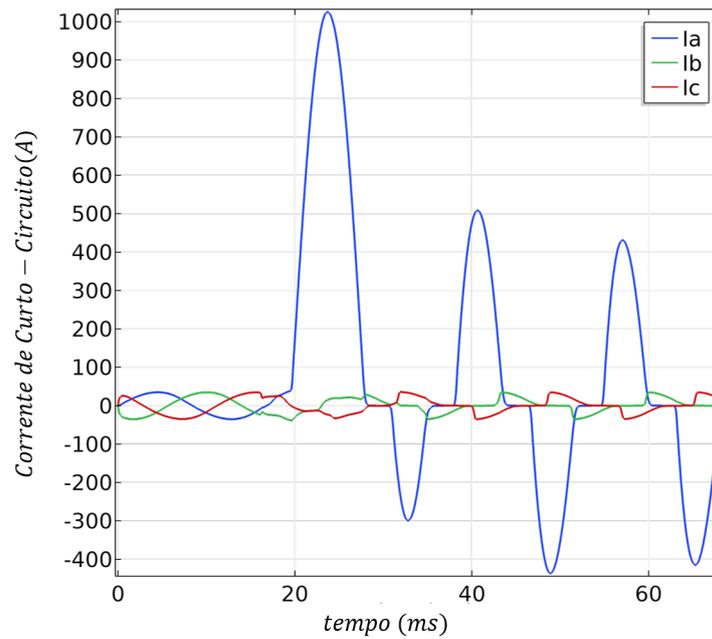


Figura 51 – Corrente de curto-circuito monofásico com todas as bobinas de cobre ligadas.

mesmas figuras, é possível ver que na figura 52 o tempo para a corrente atingir um valor de estado estacionário é maior que na figura 48.

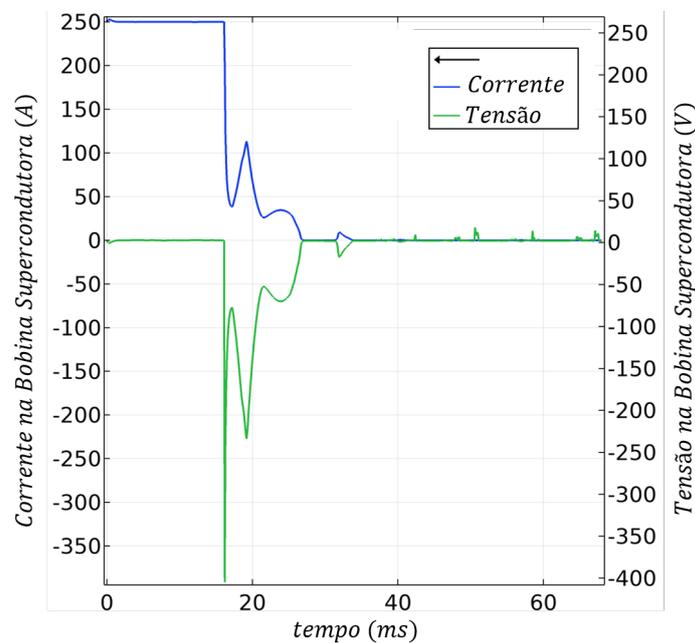


Figura 52 – Corrente no enrolamento supercondutor no curto-circuito monofásico.

A figura 53 fornece o mapa da densidade do fluxo magnético em vista 3D a 18 ms. Neste instante, as forças magnetomotrizes das bobinas CA A', B' e C' superam a força magnetomotriz da bobina CC. Desta forma, essas três bobinas de núcleos

ferromagnéticos estão dessaturando. Por outro lado, devido às forças magnetomotrizes CA e CC estarem na mesma direção nas bobinas A, B e C, esse núcleo se mantém em uma região de saturação. Nos detalhes da figura 53 (setas verdes) e na figura 54 apresenta-se a densidade de corrente normalizada neste curto-circuito.

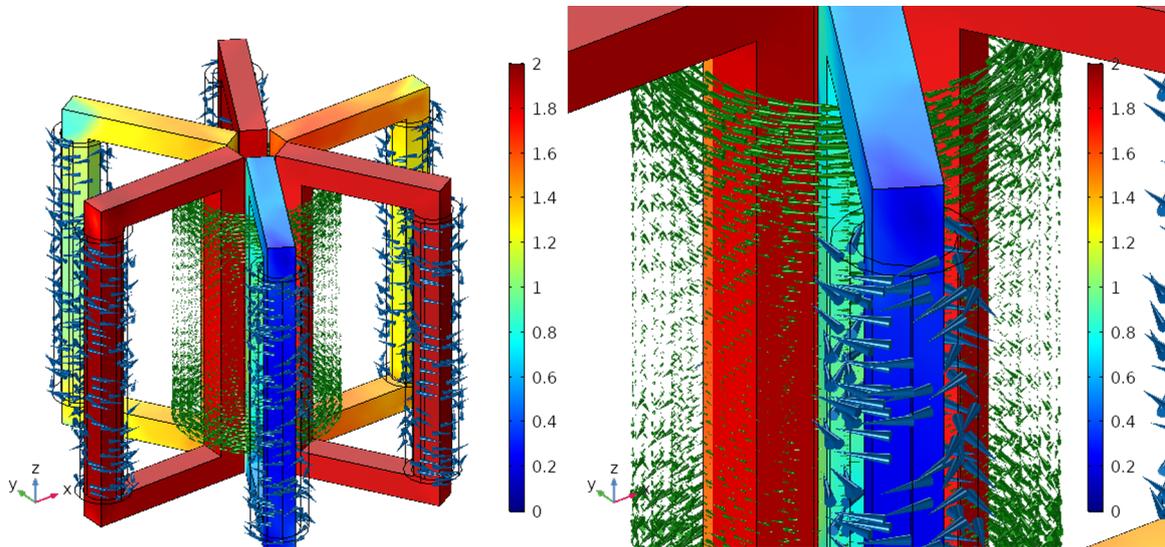


Figura 53 – Densidade de Fluxo Magnético e densidade de corrente (setas verdes e azuis) em 18 ms para o curto-circuito monofásico.

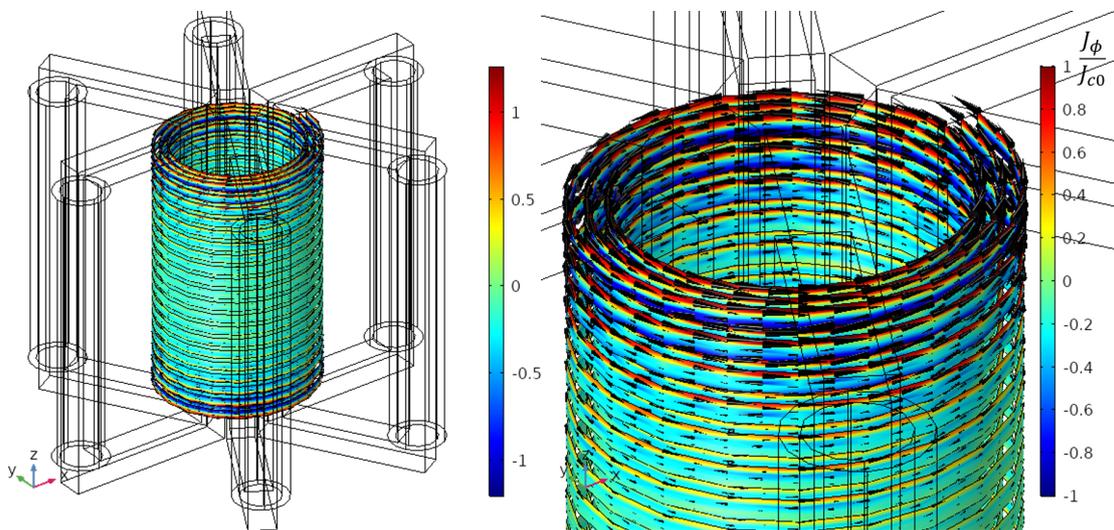


Figura 54 – Densidade de corrente normalizada em 18 ms para o curto-circuito monofásico.

6.2.4 Curto-Circuito Bifásico

No curto-circuito fase-fase, ambas as fases A e B foram curto-circuitadas entre si e a fase C continua ligada durante a falha. A Figura 55 apresenta a corrente de

curto-circuito fase-fase. A limitação do primeiro pico neste caso é de cerca de 44%. Como na última seção, esta falha afeta todas as fases do sistema.

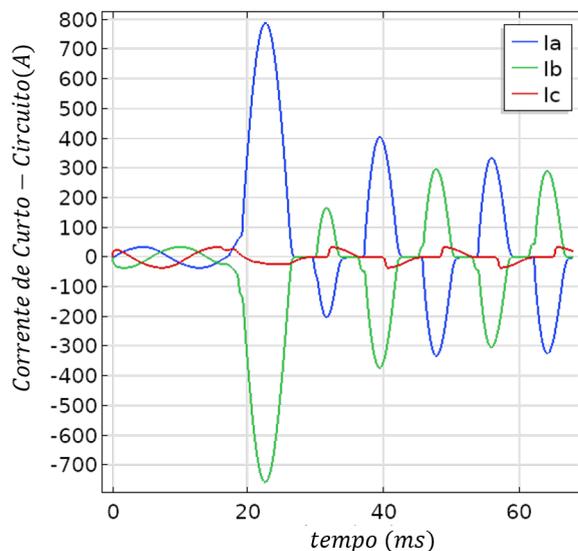


Figura 55 – Corrente do curto-circuito bifásico

Na figura 56 são apresentadas a corrente e a tensão do supercondutor. Nesse caso, o tempo do transitório da corrente CC é menor que a condição de curto-circuito monofásico. Por outro lado, esta falta bifásica provoca uma tensão induzida máxima de 228 V e a corrente da bobina supercondutora que é limitada pelo resistor R_{shunt} tem seu valor máximo igual à de 114 A.

As figuras 57 e 58 exibem a densidade de fluxo magnético e a densidade de corrente em 18 ms. Olhando para a figura 57 e tendo em mente a condição desta falta ($I_a = -I_b$), observa-se que os núcleos de ferro das bobinas A e B' estão dessaturando. Por outro lado, os núcleos de ferro de A' e B permanecem em saturação.

6.2.5 Curto-Circuito Trifásico

Nesta seção, o curto-circuito trifásico é analisado. A Figura 59 expõe que a limitação do primeiro pico da corrente de falha é de cerca de 36% na fase A.

A figura 60 apresenta a corrente e a tensão do supercondutor para esta falta. Nesse caso, a falha impôs uma tensão induzida máxima igual a 225 V. Em função disto, a corrente supercondutora máxima é igual a 112,2 A, e o período transiente da corrente é 28,6 ms. Comparando os primeiros picos entre o curto-circuito trifásico e o curto-circuito fase-fase, a falta trifásica tem um valor de tensão CC induzida mais baixo.

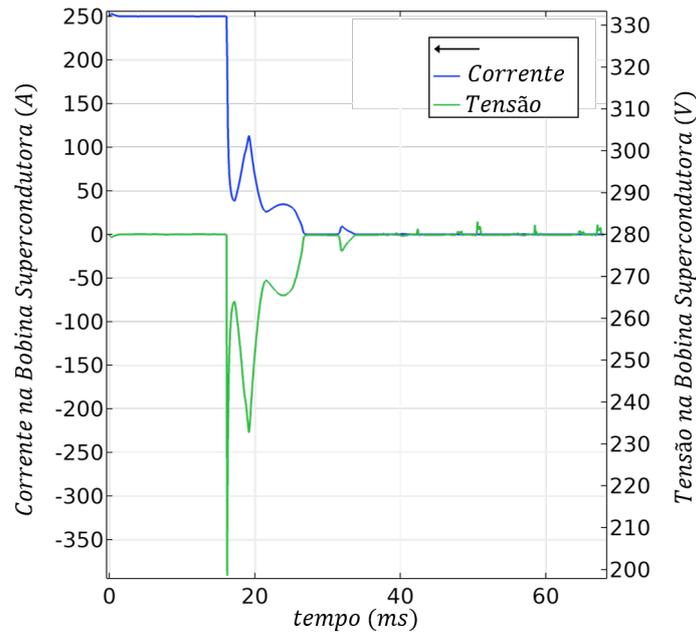


Figura 56 – Corrente do enrolamento supercondutor para o curto-circuito bifásico.

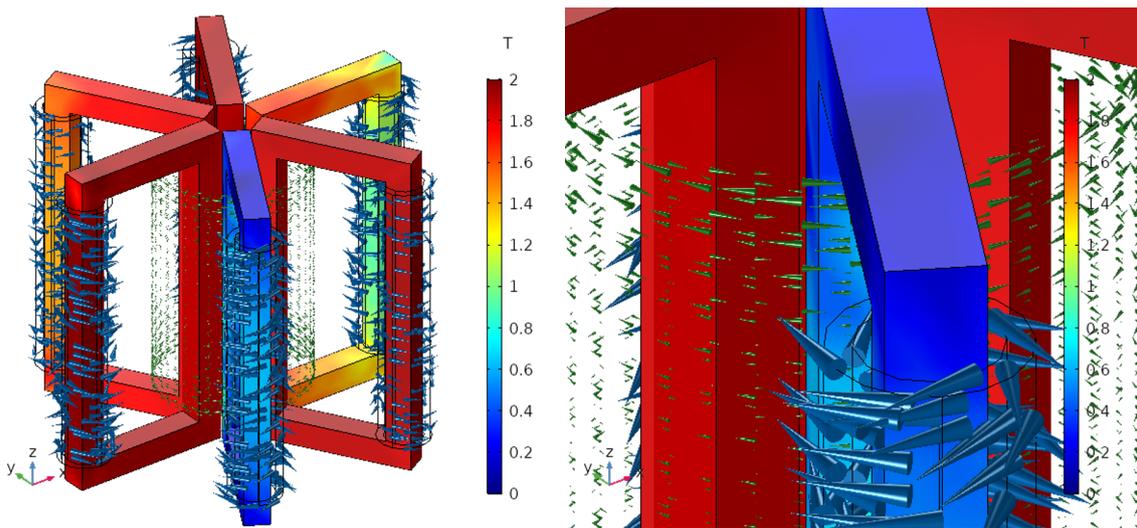


Figura 57 – Densidade de fluxo magnético e a densidade de corrente (setas verdes e azuis) em 18 ms no curto-circuito bifásico.

Por outro lado, neste caso, o segundo pico da tensão induzida é superior a 100 V, sendo observado também um terceiro pico considerável.

As figuras 61 e 62 mostram a densidade de fluxo magnético e a densidade de corrente normalizada devido à falha de curto-circuito trifásico. Como a figura 61 apresenta, os núcleos de ferro das fases A, B e C estão saturados a 18 ms, e os núcleos de ferro A', B e C' estão profundamente saturados.

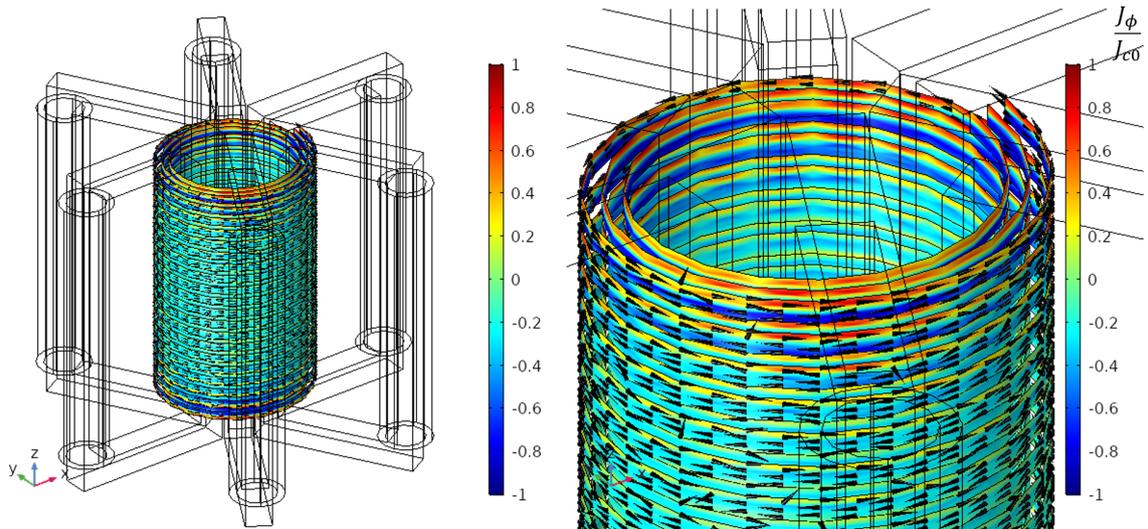


Figura 58 – Densidade de corrente normalizada em 18 ms para o curto-circuito bifásico.

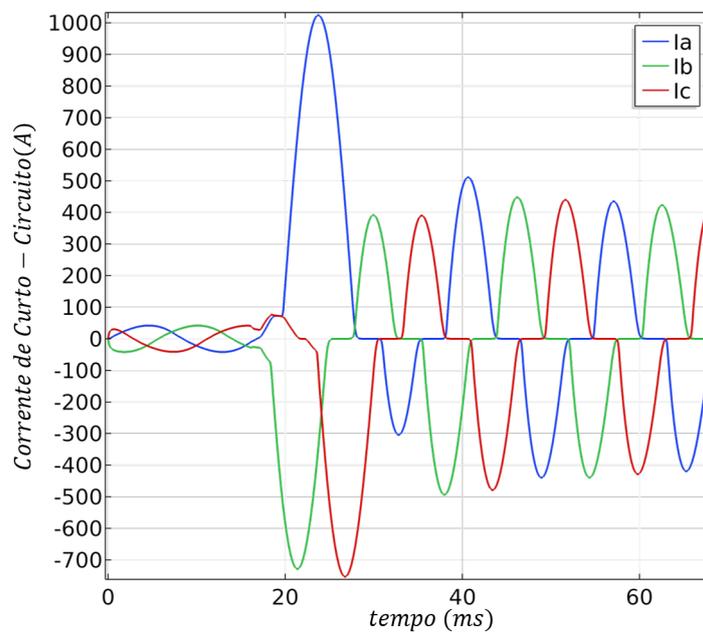


Figura 59 – Corrente de curto-circuito trifásico

6.2.6 Comparação e discussão sobre os resultados.

Observando as últimas seções, é possível ver os diferentes impactos dos curto-circuitos. Desta forma, esta seção fornecerá uma comparação sobre os diferentes curtos-circuitos. Em primeiro lugar, comparando a capacidade de limitação do protótipo LCCS-NS em diferentes falhas, é observar que a maior limitação ocorre no curto-circuito fase-fase. Conforme se investigou nas últimas seções, cada um dos curto-circuitos afeta todas as fases do sistema, A figura 63 apresenta uma comparação

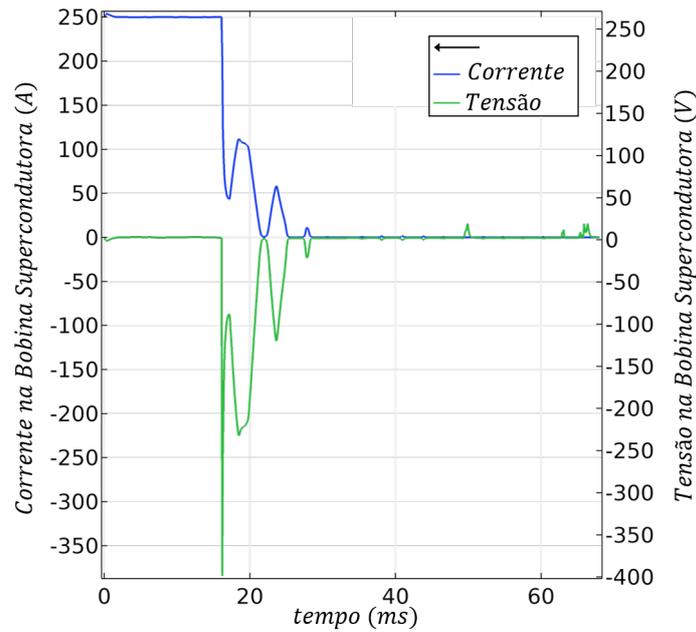


Figura 60 – Corrente e tensão do enrolamento supercondutor para o curto-circuito trifásico.

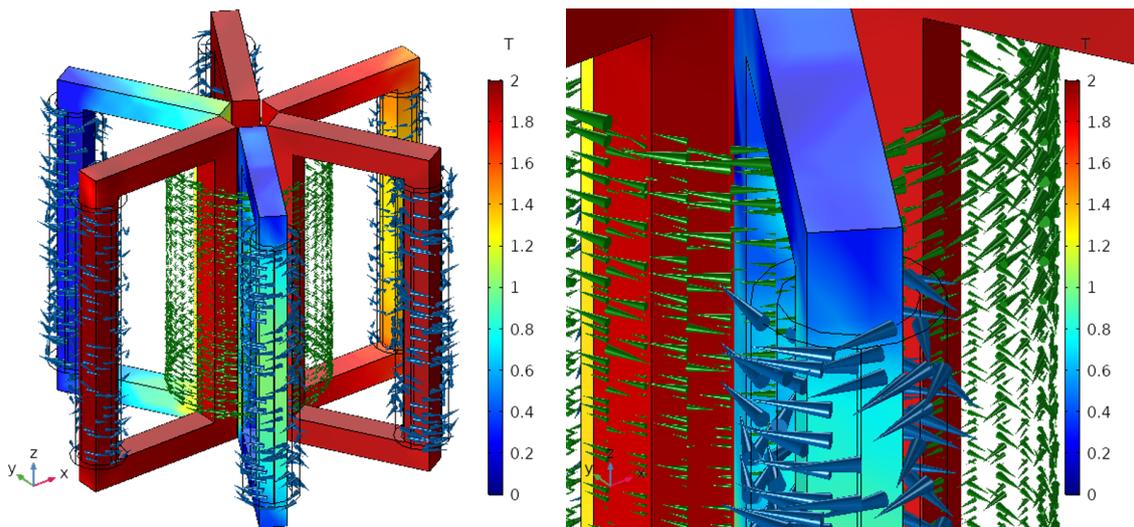


Figura 61 – A densidade de Fluxo magnético e densidade de corrente (setas verdes e azuis) em 18 ms para o curto-circuito trifásico.

entre a corrente do supercondutor para observar os impactos dos diferentes curtos-circuitos no lado CC. Para análise desta figura, considerou-se o critério de 10 A para concluir que o sistema está em regime permanente.

Desta forma, observando a figura 63 o maior período transitório ocorre no curto-circuito monofásico. Por outro lado, o transitório mais rápido aparece no curto-circuito trifásico. A falha mais severa ocorre no curto-circuito fase-fase tendo uma pequena diferença quando comparada com a falta trifásica. A comparação entres os diferentes

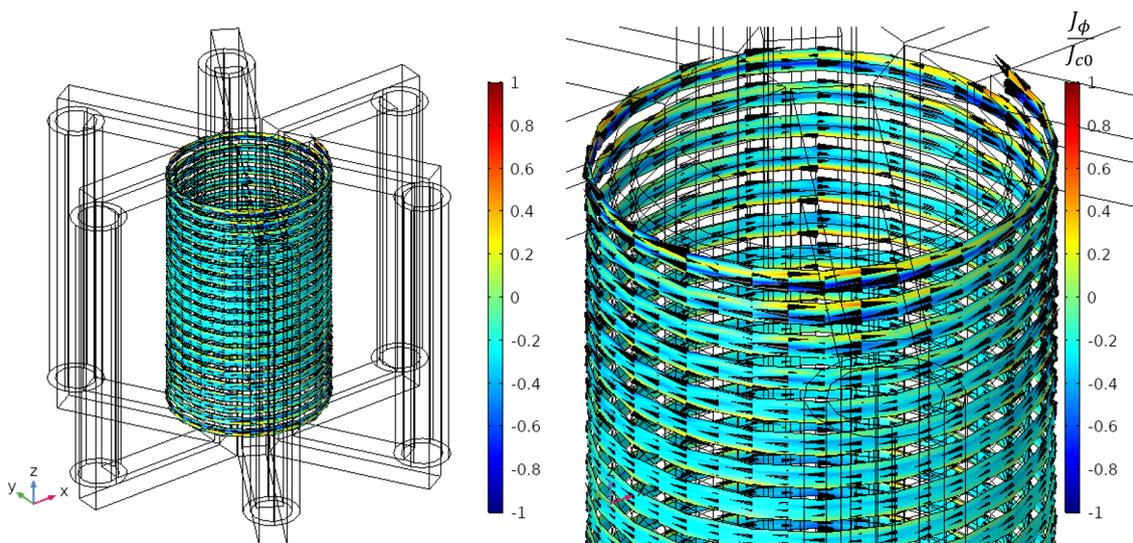


Figura 62 – Densidade de corrente normalizada em 18 ms para o curto-circuito trifásico.

curto-circuitos está resumida na tabela 9.

Tabela 9 – Comparação entre os diferentes tipos de curto-circuito.

Comparação no lado CA		
Tipo de curto-circuito	Limitação	
Monofásico	36%	
Bifásico	44 %	
Trifásico	36 %	
Comparações no lado CC		
Tipo de curto-circuito	Período de transitório (ms)	Valor da corrente CC no primeiro pico(A)
Monofásico	43.6	56.25
Bifásico	32	113.3
Trifásico	28	111.1

6.3 Conclusão

Nesta seção foram apresentados os resultados da formulação T-A implementada em 2D. Em seguida, os resultados da otimização do enrolamento supercondutor e o acoplamento com o modelo de circuito a parâmetros concentrados foram apresentados e discutidos. Além disto, no caso 2D, a formulação T-A foi comparada com as simulações na formulação A-V. Por fim, os resultados da formulação T-A em 3D foram apresentados, discutindo-se os efeitos das diversas condições de curto-circuito, tanto no lado CA quanto no lado CC.

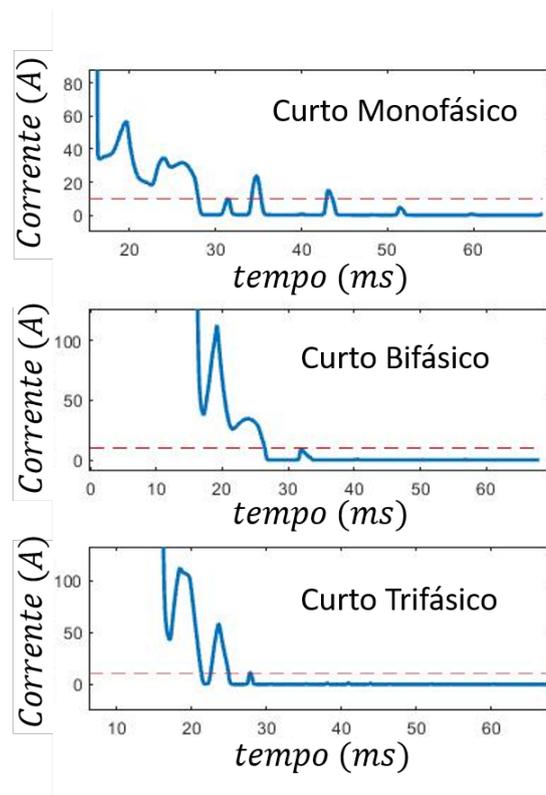


Figura 63 – Comparação entre as correntes no enrolamento supercondutor em diferentes tipos de curto-circuito.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Este trabalho inicialmente apresenta simulações 2D de um limitador de curto-circuito de núcleo saturado. Em seguida, propõe-se um algoritmo de otimização para a bobina supercondutora do limitador simulado. O algoritmo Nelder-Mead foi usado neste processo de otimização e a geometria ótima da bobina supercondutora foi calculada. Os resultados do teste experimental de curto-circuito foram comparados com os resultados da simulação para a bobina supercondutora modelada pela formulação T-A. O enrolamento supercondutor foi projetado para fornecer a mesma força magnetomotriz da bobina de cobre CC, projetada em [133]. Por este motivo, as simulações de curto-circuito das bobinas supercondutora e cobre concordam com os resultados experimentais do LCC-NS usando enrolamento não supercondutor.

Ademais, foi proposto um novo método de acoplamento entre a formulação T-A usando MEF e os parâmetros concentrados do circuito elétrico. Usando este método, um LCCS-NS foi simulado e testado. A variação da corrente aplicada na bobina supercondutora e seu impacto sobre a densidade de corrente crítica foi estudada. A queda de tensão nas bobinas de cobre e supercondutora também foram estudadas. Por fim, com esta metodologia desenvolvida, os transitórios de corrente e tensão no enrolamento supercondutor podem ser analisados.

Os resultados mostram que o fator de preenchimento mínimo no enrolamento supercondutor não é o mais adequado para maximizar sua densidade de corrente crítica. Nesse caso, o aumento da distância entre as fitas supercondutoras pode contribuir para o processo de resfriamento no enrolamento supercondutor e também para maximização da densidade de corrente crítica do material supercondutor.

Por fim, neste trabalho é proposto um novo método para simular dispositivos supercondutores considerando modelos não-lineares do material supercondutor e as não linearidades ferromagnéticas no sistema 3D com os parâmetros elétricos concentrados (sistemas de potência). Este método foi usado para estudar os curto-circuito monofásico, fase-fase e trifásico. Nestes casos foram apresentadas a limitação

de corrente de falta, a corrente e tensão da bobina supercondutora, a densidade do fluxo magnético e a densidade de corrente normalizada.

Através dos resultados das simulações em 3D observou-se que para os casos estudados, a maior capacidade de limitação foi observada no curto-circuito bifásico. Já para o olhando para o lado CC, o maior transitório experienciado pelo enrolamento supercondutor desde o início da falta foi encontrado no curto-circuito monofásico. No entanto, o curto-circuito com o maior impacto na corrente induzida foi observado na falta bifásica.

O LCCS-NS é um dos limitadores de corrente mais estudados na literatura. No entanto, vale ressaltar que o alto preço de fabricação é um dos grandes inconvenientes. Fornecer um modelo de otimização da bobina supercondutora neste equipamento é interessante para torná-lo mais economicamente atrativo. Neste contexto, um algoritmo original para otimizar a bobina supercondutora foi proposto e aplicado com sucesso em um estudo de caso. O algoritmo proposto reduz a quantidade de fita supercondutora usada no LCCS-NS, maximiza a densidade de corrente crítica normaliza e encontra o ponto ótimo da corrente CC aplicada que diminui a queda de tensão dos enrolamentos de cobre CA. Conseqüentemente, o preço da fita supercondutora pode ser reduzido, tendo esta um papel fundamental no custo final do equipamento.

7.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros pretende-se usar a metodologia de acoplamento para modelagem de novos equipamentos supercondutores ligados ao sistema de potência. Além disso, o método de otimização poderá ser expandido para um modelo completo onde otimizar-se-á o material ferromagnético e em seguida o material supercondutor.

Referências

- 1 Genji, T. et al. 400 v class high-speed current limiting circuit breaker for electric power system. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 3, p. 1428–1435, 1994.
- 2 Rezaee, M.; Harley, R. G. Resonance-based fault current limiters: Theory, applications, and assessment. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 54, n. 4, p. 3066–3076, 2018.
- 3 BARZEGAR-BAFROOEI, M. R. et al. On the advance of SFCL: a comprehensive review. Transmission Distribution IET Generation, v. 13, n. 17, p. 3745–3759, 2019. ISSN 1751-8695.
- 4 MORANDI, A.; FABBRI, M.; RIBANI, P. L. Coupled Electromagnetic-Thermal Model and Equivalent Circuit of a Magnetic Shield Type SFCL. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 23, n. 3, p. 5602705–5602705, jun. 2013. ISSN 2378-7074.
- 5 HEKMATI, A. Multiobjective Design of Tunable Shield-Type Superconducting Fault Current Limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 25, n. 5, p. 1–8, out. 2015. ISSN 2378-7074.
- 6 SANTOS, G. dos et al. Tests and Recovery Under Load Simulations of a Novel Bifilar Resistive SFCL Having Undulated Shape Configuration. Superconductor Science and Technology, p. 1–13, 2020. Accepted.
- 7 MAFRA, G. R. F. Q. et al. Application of a Resistive Superconducting Fault Current Limiter in a Distribution Grid. Electric Power Components and Systems, v. 44, n. 18, p. 2084–2098, nov. 2016. ISSN 1532-5008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15325008.2016.1214636>>.
- 8 SOTELO, G. et al. A novel configuration for resistive SFCL with bifilar 2g tapes. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, v. 1559, p. 012098, 6 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F1559%2F1%2F012098>>.
- 9 SOUSA, W. T. B. D. Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters. 2015. Disponível em: <<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.1616.0805>>.
- 10 SANTOS, G. dos et al. Multi-objective optimization for the superconducting bias coil of a saturated iron core fault current limiter using the t-a formulation.

Superconductor Science and Technology, 2020. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/abc8cf>>.

11 XIN, Y. et al. Development of a 220 kv/300 mva superconductive fault current limiter. Superconductor Science and Technology, IOP Publishing, v. 25, n. 10, p. 105011, 2012.

12 XIN, Y. et al. Performance of the 35 kv/90 mva sfcl in live-grid fault current limiting tests. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, IEEE, v. 21, n. 3, p. 1294–1297, 2011.

13 ZHANG, J.-Y. et al. Fabrication of hts dc bias coil for 35kv/90mva sfcl. Journal of Electronic Science and Technology, v. 6, n. 2, p. 97–100, 2008.

14 XIN, Y. et al. Development of a 220 kV/300 MVA superconductive fault current limiter. Superconductor Science and Technology, IOP Publishing, v. 25, n. 10, p. 105011, aug 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F0953-2048%2F25%2F10%2F105011>>.

15 Ma, T. et al. Electromagnetic design of high-temperature superconducting dc bias winding for single-phase 500 kv saturated iron-core fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 28, n. 3, p. 1–5, 2018.

16 Liang, C. et al. Winding technology and experimental study on 500 kv superconductive fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 28, n. 3, p. 1–5, 2018.

17 Li, C. et al. Cooling unit for the 500 kv saturated iron core fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 29, n. 5, p. 1–5, 2019.

18 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, p. 024005, dez. 2016. ISSN 0953-2048. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1361-6668%2F30%2F2%2F024005>>.

19 ONNES, H. K. The liquefaction of helium. Koninklijke Nederlandse Akademie von Wetenschappen, Proceedings, v. 11, p. 1908–1909, 1908.

20 ONNES, H. K. Leiden commun. 1911, 120b; h. kamerlingh onnes, leiden commun. 1911, 122b; h. kamerlingh onnes. Leiden Commun, 1911.

21 ONNES, H. K. Further experiments with liquid helium. h. on the electrical resistance of pure metals etc. vii. the potential difference necessary for the electric

- current through mercury below 4° 19k. In: KNAW, Proceedings. [S.l.: s.n.], 1913. v. 15, p. 1406–1430.
- 22 FORREST, A. M. Meissner and ochsenfeld revisited. European Journal of Physics, IOP Publishing, v. 4, n. 2, p. 117–120, apr 1983. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F0143-0807%2F4%2F2%2F011>>.
- 23 BARDEEN, J.; COOPER, L.; SCHRIEFFER, J. Phys.rev. 108.1175. Phys. Rev., v. 108, n. 5, p. 1175–1204, 1957.
- 24 BEDNORZ, J. G.; MÜLLER, K. A. Possible high T_c superconductivity in the Ba- La- Cu- O system. Zeitschrift für Physik B Condensed Matter, Springer, v. 64, n. 2, p. 189–193, 1986.
- 25 WU, M. K. et al. Superconductivity at 93 k in a new mixed-phase y-ba-cu-o compound system at ambient pressure. Phys. Rev. Lett., American Physical Society, v. 58, p. 908–910, Mar 1987. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.58.908>>.
- 26 NAGAMATSU, J. et al. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. Nature, Nature Publishing Group, v. 410, n. 6824, p. 63–64, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/35065039>>.
- 27 TAKAHASHI, H. et al. Superconductivity at 43 K in an iron-based layered compound $LaO_{1-x}F_xFeAs$. Nature, Nature Publishing Group, v. 453, n. 7193, p. 376–378, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nature06972>>.
- 28 ABRIKOSOV, A. A. The magnetic properties of superconducting alloys. Journal of Physics and Chemistry of Solids, Elsevier, v. 2, n. 3, p. 199–208, 1957. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0022-3697\(57\)90083-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(57)90083-5)>.
- 29 ESSMANN, U.; TRÄUBLE, H. The direct observation of individual flux lines in type ii superconductors. Physics letters A, North-Holland, v. 24, n. 10, p. 526–527, 1967. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0375-9601\(67\)90819-5](https://doi.org/10.1016/0375-9601(67)90819-5)>.
- 30 SOTELO, G. G. Modelagem de supercondutores aplicada ao projeto de mancais magnéticos. Tese (Doutorado) — PhD thesis, COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- 31 SASS, F. Modelagem do comportamento de mancais magnéticos utilizando fitas e blocos maciços supercondutores. Tese (Doutorado) — Tese de D. Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

- 32 SILSBEE, F. B. A note on electrical conduction in metals at low temperatures. Journal of the Washington Academy of Sciences, JSTOR, v. 6, n. 17, p. 597–602, 1916.
- 33 GRILLI, F. et al. Computation of losses in HTS under the action of varying magnetic fields and currents. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, IEEE, v. 24, n. 1, p. 78–110, 2013.
- 34 GRILLI, F. et al. Development of a three-dimensional finite-element model for high-temperature superconductors based on the h-formulation. Cryogenics, Elsevier, v. 53, p. 142–147, 2013.
- 35 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, p. 16–24, nov. 2006. ISSN 0953-2048. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F0953-2048%2F20%2F1%2F004>>.
- 36 Santos, B. M. O. 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, p. 1–9, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2990377>>.
- 37 MARTINS, F. G. R. et al. Using the integral equations method to model a 2g racetrack coil with anisotropic critical current dependence. Superconductor Science and Technology, IOP Publishing, v. 30, n. 11, p. 115009, 10 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1361-6668%2Faa892b>>.
- 38 MARTINS, F. G. R.; SASS, F.; ANDRADE, R. de. Simulations of REBCO tape jointless double crossed loop coils with an integral equations method. Superconductor Science and Technology, IOP Publishing, v. 32, n. 4, p. 044002, 2 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1361-6668%2Faafd08>>.
- 39 PARDO, E.; ŠOUC, J.; FROLEK, L. Electromagnetic modelling of superconductors with a smooth current–voltage relation: variational principle and coils from a few turns to large magnets. Superconductor Science and Technology, IOP Publishing, v. 28, n. 4, p. 044003, 2 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F0953-2048%2F28%2F4%2F044003>>.
- 40 Antonio Morandi and Massimo Fabbri. A unified approach to the power law and the critical state modeling of superconductors in 2D. Superconductor Science and Technology, IOP Publishing, v. 28, n. 2, p. 024004, 12 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F0953-2048%2F28%2F2%2F024004>>.

- 41 Grilli, F. 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, p. 1–9, 01 2021. ISSN 1558-2515.
- 42 RODRIGUEZ, E. et al. Emulation and experimental analysis of an axial superconductor magnetic bearing. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, v. 1293, p. 012084, 7 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F1293%2F1%2F012084>>.
- 43 Wang, Z. et al. Ac loss analysis of a hybrid hts magnet for smes based on h-formulation. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 27, n. 4, p. 1–5, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2646480>>.
- 44 BEAN, C. P. Magnetization of high-field superconductors. Rev. Mod. Phys., American Physical Society, v. 36, p. 31–39, Jan 1964. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.36.31>>.
- 45 RHYNER, J. Magnetic properties and ac-losses of superconductors with power law current—voltage characteristics. Physica C: Superconductivity, Elsevier, v. 212, n. 3-4, p. 292–300, 1993. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0921-4534\(93\)90592-E](https://doi.org/10.1016/0921-4534(93)90592-E)>.
- 46 YAMAFUJI, K.; KISS, T. Current-voltage characteristics near the glass-liquid transition in high-*t_c* superconductors. Physica C: Superconductivity, Elsevier, v. 290, n. 1-2, p. 9–22, 1997. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(97\)01580-3](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(97)01580-3)>.
- 47 Sirois, F.; Grilli, F.; Morandi, A. Comparison of constitutive laws for modeling high-temperature superconductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 29, n. 1, p. 1–10, 2019.
- 48 Sotelo, G. G. 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, p. 1–10, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2591825>>.
- 49 Sa’ed, J. A. et al. Control of solid-state fault current limiter for dg-integrated distribution systems. In: 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe). [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.

- 50 Feng, Y. et al. Impact of solid-state fault current limiters on protection equipment in transmission and distribution systems. In: IEEE PES T D 2010. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.
- 51 Meyer, C.; Kollensperger, P.; De Doncker, R. W. Design of a novel low loss fault current limiter for medium-voltage systems. In: Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 1825–1831 Vol.3.
- 52 Arsénio, P. et al. Analysis of characteristic hysteresis loops of magnetic shielding inductive fault current limiters. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 23, n. 3, p. 5601004–5601004, 2013.
- 53 Elschner, S. et al. Ensystrob—resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 21, n. 3, p. 1209–1212, 2011.
- 54 Hobl, A. et al. Design and production of the eccoflow resistive fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 23, n. 3, p. 5601804–5601804, 2013.
- 55 Kado, H.; Ickikawa, M. Performance of a high-*t_c* superconducting fault current limiter—design of a 6.6 kv magnetic shielding type superconducting fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 7, n. 2, p. 993–996, 1997.
- 56 Ichikawa, M.; Okazaki, M. A magnetic shielding type superconducting fault current limiter using a bi2212 thick film cylinder. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 5, n. 2, p. 1067–1070, 1995.
- 57 YU, M.; HONG, H.; CHEN, H. Electromagnetic Transient Simulation Analysis for the 500 kV Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter. In: 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). [S.l.: s.n.], 2019. p. 2613–2618. ISSN: 2378-8534.
- 58 RAJU, B.; PARTON, K.; BARTRAM, T. A Current Limiting Device Using Superconducting D.C. Bias Applications and Prospects. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101, n. 9, p. 3173–3177, set. 1982. ISSN 0018-9510. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4111722/>>.
- 59 VERHAEGE, T. et al. 25 kV Superconducting Fault Current Limiter. In: SEKIGUCHI, T.; SHIMAMOTO, S. (Ed.). 11th International Conference on Magnet Technology (MT-11): Volume 1. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990.

- p. 413–418. ISBN 978-94-009-0769-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0769-0_71>.
- 60 ROGERS, J. et al. Superconducting fault current limiter and inductor design. IEEE Transactions on Magnetics, v. 19, n. 3, p. 1054–1058, maio 1983. ISSN 1941-0069.
- 61 Pellecchia, A. et al. Development of a saturated core fault current limiter with open magnetic cores and magnesium diboride saturating coils. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 27, n. 4, p. 1–7, 2017.
- 62 Commins, P. A.; Moscrop, J. W. Analytical nonlinear reluctance model of a single-phase saturated core fault current limiter. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 28, n. 1, p. 450–457, 2013.
- 63 Knott, J. C. et al. Design considerations in MgB₂-based superconducting coils for use in saturated-core fault current limiters. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 24, n. 5, p. 1–4, 2014.
- 64 Knott, J. C.; Moscrop, J. W. Increasing energy efficiency of saturated-core fault current limiters with permanent magnets. IEEE Transactions on Magnetics, v. 49, n. 7, p. 4132–4136, July 2013. ISSN 1941-0069.
- 65 Eladawy, M.; Metwally, I. A. A comparative investigation of presaturated core fault current limiters biased by dc current and permanent magnet. IEEE Transactions on Magnetics, v. 55, n. 11, p. 1–10, 2019.
- 66 Zou, L. et al. Analysis and simulation of the pmfcl based on coupled field-circuit modeling methodology. In: 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application. [S.l.: s.n.], 2008. p. 498–502. ISSN null.
- 67 Mukhopadhyay, S. C. et al. Analysis, design and experimental results for a passive current limiting device. IEE Proceedings - Electric Power Applications, v. 146, n. 3, p. 309–316, May 1999. ISSN 1350-2352.
- 68 Li, Q. et al. Modelling methodology and experimental verification of the permanent-magnet-biased saturation-based fault current limiter. IET Electric Power Applications, v. 6, n. 8, p. 504–512, 2012.
- 69 Zhou, H. et al. Performance investigation on a novel high inductance changing ratio mmc-based direct current system saturated core fcl. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 35, n. 3, p. 1502–1514, 2020.

- 70 Yuan, J. et al. Optimized design method of permanent magnets saturated core fault current limiters for hvdc applications. IEEE Transactions on Power Delivery, p. 1–1, 2020.
- 71 Yuan, J. et al. A novel bridge-type hybrid saturated core fault current limiter based on permanent magnets. 2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG), p. 1–1, 2015.
- 72 AHMAD, M.; WANG, Z. A hybrid dc circuit breaker with fault-current-limiting capability for vsc-hvdc transmission system. Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 12, p. 2388, 2019.
- 73 Chen, B. et al. Investigation on a modified hybrid compact saturated-core fault current limiter based on permanent magnets. 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), p. 1–1, 2016.
- 74 Zhu, J. et al. Magneto-thermal coupling design and performance investigation of a novel hybrid superconducting fault current limiter (sfcl) with bias magnetic field based on matlab/simulink. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 29, n. 2, p. 1–5, 2019.
- 75 Vilhena, N. et al. A methodology for modeling and simulation of saturated cores fault current limiters. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 25, n. 3, p. 1–4, June 2015. ISSN 2378-7074.
- 76 Vilhena, N. et al. A design methodology for the optimization of three-phase sfcl of saturated cores type. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 28, n. 4, p. 1–5, 2018.
- 77 Ahmadvand, M.; Khanabdal, S.; Hagh, M. T. A novel three-phase saturable-core fault current limiter structure. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 34, n. 2, p. 410–419, April 2019. ISSN 1937-4208.
- 78 Baferani, M. A. et al. A novel arrangement for improving three phase saturated-core fault current limiter (scfcl). 2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), p. 1–6, 2018.
- 79 Eladawy, M.; Metwally, I. A. A novel five-leg design for performance improvement of three-phase presaturated core fault-current limiter. IEEE Transactions on Magnetism, v. 54, n. 7, p. 1–10, 2018.
- 80 Xin, Y. et al. Development of saturated iron core hts fault current limiters. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 17, n. 2, p. 1760–1763, June 2007. ISSN 2378-7074.

- 81 HONG, H. et al. Cryogenic system for a 35 kv/90 mva saturated iron-core superconducting fault current limiter. AIP Conference Proceedings, v. 1218, n. 1, p. 1395–1401, 2010. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3422314>>.
- 82 SUN, Y. et al. Dc bias system of a 35kv/90mva saturated iron core sfcl. Cryogenics, v. 51, n. 6, p. 257 – 260, 2011. ISSN 0011-2275. Special Issue: ACASC 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011227510001323>>.
- 83 Hong, H. et al. Dc magnetization system for a 35 kv/90 mva superconducting saturated iron-core fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, n. 3, p. 1851–1854, 2009.
- 84 He, Y. et al. Control system modeling and simulation of superconducting current limiter with saturated iron core controlled by dc bias current. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 24, n. 5, p. 1–6, 2014.
- 85 Wang, J. Z. et al. Fem simulations in designing saturated iron core superconducting fault current limiters. 2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, p. 52–55, 2009.
- 86 Xin, Y. et al. Field tests on a 35kv/90mva superconducting fault current limiter. 2010 International Conference on Power System Technology, p. 1–5, 2010.
- 87 Xiao, H. et al. Analysis of transient overvoltage in 220 kv saturated core hts fcl. IEEE Transactions on Magnetics, v. 47, n. 10, p. 2620–2623, 2011.
- 88 Hong, H. et al. Design, fabrication, and operation of the cryogenic system for a 220 kv/300 mva saturated iron-core superconducting fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 24, n. 5, p. 1–4, Oct 2014. ISSN 2378-7074.
- 89 Xin, Y. et al. Factory and field tests of a 220 kv/300 mva saturated iron-core superconducting fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 23, n. 3, p. 5602305–5602305, June 2013. ISSN 2378-7074.
- 90 Yang, B.; Jing, L.; Wei, W. Based on the ansoft 500kv sicsfcl simulation analysis. 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), p. 883–886, 2017.
- 91 Liang, C. et al. Winding technology and experimental study on 500 kv superconductive fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 28, n. 3, p. 1–5, 2018.

- 92 Ma, T. et al. Electromagnetic design of high-temperature superconducting dc bias winding for single-phase 500 kv saturated iron-core fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 28, n. 3, p. 1–5, 2018.
- 93 Yu, M.; Hong, H.; Chen, H. Electromagnetic transient simulation analysis for the 500 kv saturated iron-core superconducting fault current limiter. In: 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). [S.l.: s.n.], 2019. p. 2613–2618.
- 94 Li, C. et al. Cooling unit for the 500 kv saturated iron core fault current limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 29, n. 5, p. 1–5, 2019.
- 95 RAJU, B.; PARTON, K.; BARTRAM, T. A current limiting device using superconducting dc bias applications and prospects. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, IEEE, p. 3173–3177, 1982.
- 96 Xin, Y. et al. Manufacturing and test of a 35 kv/90 mva saturated iron-core type superconductive fault current limiter for live-grid operation. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, n. 3, p. 1934–1937, June 2009. ISSN 2378-7074.
- 97 ABRAMOVITZ, A. et al. Prototyping and testing of a 15 kv/1.2 kA saturable core HTS fault current limiter. IEEE transactions on power delivery, IEEE, v. 28, n. 3, p. 1271–1279, 2013.
- 98 Moriconi, F. et al. Development and deployment of saturated-core fault current limiters in distribution and transmission substations. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 21, n. 3, p. 1288–1293, June 2011. ISSN 2378-7074.
- 99 KLAUS, D. et al. Modelling and testing of saturated core fault current limiter. AIM, 2019.
- 100 SUN, Y. et al. Dc bias system of a 35 kv/90 mva saturated iron core sfcl. Cryogenics, Elsevier, v. 51, n. 6, p. 257–260, 2011.
- 101 SHEN, B.; GRILLI, F.; COOMBS, T. Review of the AC loss computation for HTS using h formulation. Superconductor Science and Technology, IOP Publishing, v. 33, n. 3, p. 033002, 2 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6668/33/3/033002>>.
- 102 CHEN, B. et al. Investigation on a modified hybrid compact saturated-core fault current limiter based on permanent magnets. In: 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–1. ISSN: null.

- 103 BAFERANI, M. A.; FAHIMI, N.; SHAYEGANI, A. A. Method to design saturated iron-core fault current limiters. IET Generation, Transmission & Distribution, IET, v. 13, n. 22, p. 5180–5187, 2019.
- 104 YU, M.; HONG, H.; CHEN, H. Electromagnetic Transient Simulation Analysis for the 500 kV Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter. In: 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). [S.l.: s.n.], 2019. p. 2613–2618. ISSN: 2378-8534.
- 105 BARZEGAR-BAFROOEI, M. R.; FOROUD, A. A. Investigation of the performance of distance relay in the presence of saturated iron core SFCL and diode bridge type SFCL. International Transactions on Electrical Energy Systems, v. 29, n. 2, p. e2736, 2019. ISSN 2050-7038. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/etep.2736>>.
- 106 GONG, W. Z. et al. Plenary talk—practical hts fcl development—updates of innopower’s sfcl r&d projects. In: IEEE. 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. [S.l.], 2013. p. 256–256.
- 107 XIN, Y. Sfcl developments at innopower. Superconducting Fault Current Limiter: Innovation For The Electric Grids, World Scientific, v. 3, p. 299, 2018.
- 108 HE, Y. et al. Influence of sfcl on auto-reclosing relay and system protection [j]. High Voltage Engineering, v. 10, 2008.
- 109 ZHANG, J. Y. et al. Electromagnetic design of saturated iron core sfcl. In: IEEE. 2011 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. [S.l.], 2011. p. 305–308.
- 110 ZHOU, L. et al. 3-phase short circuit tests of 35 k v sfcl in network and its limitation effect analysis. Southern Power System Technology, v. 4, n. s1, p. 46–49, 2010.
- 111 LIU, H. et al. Comparative study on the static and dynamic characteristics of four types of pmfcls for large capacity applications. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 47–56, 2012.
- 112 ZHU, J. et al. Design and evaluation of a novel non-inductive unit for a high temperature superconducting fault current limiter (sfcl) with bias magnetic field. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, IEEE, v. 29, n. 5, p. 1–4, 2019.
- 113 HAN, Y.-H. et al. Development and long-term test of a compact 154-kv sfcl. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, IEEE, v. 29, n. 4, p. 1–6, 2018.

- 114 ZHU, J. et al. Magneto-thermal coupling design and performance investigation of a novel hybrid superconducting fault current limiter (sfcl) with bias magnetic field based on matlab/simulink. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, IEEE, v. 29, n. 2, p. 1–5, 2019.
- 115 WANG, H. et al. Saturated iron core superconducting fault current limiter. In: IEEE. 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. [S.l.], 2011. p. 340–343.
- 116 HONG, H. et al. Cryogenic system for a 35 kv/90 mva saturated iron-core superconducting fault current limiter. In: AIP. AIP Conference Proceedings. [S.l.], 2010. v. 1218, n. 1, p. 1395–1401.
- 117 HE, Y. et al. Analysis and simulation of dc-turned off high temperature superconducting fault current limiter with saturated iron core. In: TRANS TECH PUBL. Applied Mechanics and Materials. [S.l.], 2011. v. 40, p. 111–116.
- 118 VILHENA, N. et al. A Methodology for Modeling and Simulation of Saturated Cores Fault Current Limiters. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 25, n. 3, p. 1–4, jun. 2015. ISSN 2378-7074.
- 119 LLAMBES, J.-C. H. Recent development of sfcl in the usa. In: Proc. 23rd Int. Supercond. Symp. Tsukuba. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–44.
- 120 PEI, X.; SMITH, A. C.; BARNES, M. Superconducting fault current limiters for hvdc systems. Energy Procedia, Elsevier, v. 80, p. 47–55, 2015.
- 121 KLAUS, D. et al. Superconducting fault current limiters-uk network trials live and limiting. IET, 2013.
- 122 NIE, Z. et al. Fundamental and analysis of a novel magnetic coupling fault current limiter for vsc dc grids.
- 123 LOGG, A.; MARDAL, K.-A.; WELLS, G. Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 84.
- 124 BICKFORD, W. B. A first course in the finite element method. [S.l.]: Irwin Homewood & Boston, 1994.
- 125 MUSA, S. M.; SADIKU, M. N. Finite element method analysis of symmetrical coupled microstrip lines. International Journal of Computing and Digital Systems, University of Bahrain, v. 3, n. 03, 2014.

- 126 SADIKU, M. N. Computational Electromagnetics with MATLAB. [S.l.]: CRC Press, 2018.
- 127 JIN, J.-M. The finite element method in electromagnetics. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.
- 128 COGGON, J. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, v. 36, n. 1, p. 132–155, 1971.
- 129 JIANG, B.-n. The least-squares finite element method: theory and applications in computational fluid dynamics and electromagnetics. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1998.
- 130 SADIKU, M. N. Elements of electromagnetics. [S.l.]: Oxford university press, 2014.
- 131 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, IOP Publishing, v. 30, n. 2, p. 024005, 2016.
- 132 LIANG, F. et al. A finite element model for simulating second generation high temperature superconducting coils/stacks with large number of turns. Journal of Applied Physics, AIP Publishing LLC, v. 122, n. 4, p. 043903, 2017.
- 133 FAJONI, F. C. Estudos, desenvolvimento e construção de um limitador de correntes elétricas com núcleo magnético saturado. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- 134 XIN, Y. et al. Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, n. 3, p. 1934–1937, jun. 2009. ISSN 2378-7074.
- 135 XIN, Y. et al. Saturated iron-core superconductive fault current limiter developed at Innopower. AIP Conference Proceedings, v. 1573, n. 1, p. 1042–1048, jan. 2014. ISSN 0094-243X. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4860820>>.
- 136 INSTITUTE, R. R. Amsc amperium® type 8502-350 coil formulation 2g hts. Disponível em: <<http://htsdb.wimbush.eu/dataset/8341037>>.

137 FAJONI, F. et al. Study of Superconducting Fault Current Limiter Using Saturated Magnetic Core. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, v. 28, n. 2, p. 685–690, fev. 2015. ISSN 1557-1947. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10948-014-2871-y>>.

138 COMSOL, A. Optimization Module User's Guide, version 5.4. [S.l.]: Stockholm, 2018.