

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

HENRIQUE KOJI MIYAMOTO

**LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO HÍBRIDO COM
SUPERCONDUTOR E CHAVE DE ESTADO SÓLIDO**

Niterói/RJ

2020

HENRIQUE KOJI MIYAMOTO

**LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO HÍBRIDO COM
SUPERCONDUTOR E CHAVE DE ESTADO SÓLIDO**

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

Orientador: Prof. Dr. Bruno Wanderley França

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias

Niterói/RJ

2020

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

HENRIQUE KOJI MIYAMOTO

LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO HÍBRIDO COM
SUPERCONDUTOR E CHAVE DE ESTADO SÓLIDO

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Wanderley França (Orientador)

UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias (Coorientador)

UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Flávio Goulart dos Reis Martins

UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Rubens de Andrade Júnior

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói/RJ

2020

“Assim como uma pequena planta deve enfrentar muitos obstáculos antes de se transformar numa árvore, nós precisamos experimentar muitas dificuldades no caminho da felicidade absoluta ”

Nichiren Daishonin

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores e professores Dr. Bruno Wanderley França, Dr. Daniel Henrique Nogueira Dias, Dr. Guilherme Sotelo, Dr. Felipe Sass e Dr. Márcio Zamboti por todo apoio, ensinamento e confiança que me deram desde o início deste trabalho.

A Light S.A. pelo apoio técnico e financeiro necessários para conseguir desenvolver esta dissertação de mestrado.

À Universidade Federal Fluminense (UFF) que, através do curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, possibilitou meu ingresso ao mundo acadêmico.

Aos meus amigos e colegas de trabalho Alexandre Bitencourt, André Queiroz, Gabriel dos Santos, Guilherme Scofano, Nicholas Leite, Luís Micahel e todos os alunos que participam do programa de iniciação científica e frequentam o Núcleo de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica (NITEE), pela ajuda e amizade, desde o ingresso ao curso, até a elaboração e término deste manuscrito.

Aos meus amigos, Wanderson Almeida, Anderson Almeida e Agatha Tomazino e minha namorada Priscila, por sempre me incentivar e apoiar nesta jornada.

Aos meus pais por tudo que fizeram para que eu conseguisse chegar até aqui.

RESUMO

Este trabalho propõe um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor híbrido (*LCCSH*). O *LCCSH* é composto por um elemento GdBCO supercondutor, uma bobina de ar e chaves de estado sólido (tiristor). Além disso, possui a seguinte topologia: um ramo com tiristores antiparalelos em série com o elemento supercondutor, formando um módulo; este módulo é paralelo a uma bobina de ar. As novidades são, esta topologia e a utilização da tensão medida nos terminais do limitador como entrada do controlador. Essa tensão é utilizada no controlador para detectar a falta, o que evita a necessidade de detecção de correntes elevadas e, conseqüentemente, aumenta a confiabilidade da limitação de corrente. Neste trabalho, o *software* PSCAD/EMTDC é empregado para modelar o *LCCSH* e especialmente a fita supercondutora. O elemento supercondutor foi modelado considerando fenômenos elétricos e térmicos que descrevem o comportamento do supercondutor de acordo com a corrente que circula pelo sistema. Como resultado, a corrente de falta é limitada no primeiro meio ciclo e, no decorrer deste semiciclo, o circuito de potência é comutado de acordo com as características do tiristor, removendo o elemento supercondutor e inserindo a bobina de ar. Os resultados da simulação são fornecidos para avaliar o desempenho do controlador desenvolvido e comparar aos resultados experimentais.

Palavras-chave: Limitador de corrente de curto-circuito híbrido; Supercondutor; Tiristor; Sistemas de distribuição de energia elétrica; Análise de curto-circuito; PSCAD/EMTDC.

ABSTRACT

This paper proposes a Hybrid High-Temperature Superconducting Fault Current Limiter (Hybrid HTS-FCL). The Hybrid HTS-FCL uses the superconducting GdBCO element, an air coil as an impedance to limit the fault current and semiconductor switches (thyristors). Moreover, it has the following topology: a branch with antiparallel thyristors in series with a superconducting element, forming a module; this module is parallel to an air coil. The novelties are this topology and the measured voltage at the FCL terminals as the input of the controller. This voltage is used in the controller in order to detect the fault, which avoids the need for detecting high currents and, consequently, enhances the reliability of current limiting. In this work, the PSCAD/EMTDC software is employed to model the Hybrid HTS-FCL and especially the superconducting tape. The superconducting element was modeled considering electrical and thermal phenomena that describe the behavior of the superconductor according to the current flowing through the system. As a result, the fault current is limited in the first half-cycle of the fault current. During this half-cycle, the power circuit is switched by removing the superconducting element and inserting the air coil. Simulation and experimental results are provided to evaluate the performance of the developed controller.

Keywords: Hybrid fault current limiters; Superconductor; Thyristor; Electric power distribution; Analysis of fault current; PSCAD/EMTDC.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CIRCUITO RL EQUIVALENTE.....	21
FIGURA 2 - COMPORTAMENTO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SEM E COM LIMITADOR.....	22
FIGURA 3 - POSSÍVEIS LOCAIS PARA DISPOSITIVOS LCCs. ADAPTADA DE [16].....	24
FIGURA 4 - FOTOGRAFIA DOS REATORES LIMITADORES DA SUBESTAÇÃO DE TUCURUÍ DE 500 kV. ADAPTADA DE [19].....	25
FIGURA 5 - ESQUEMA DO LIMITADOR DE CORRENTE PIROTÉCNICO. ADAPTADA DE [16].	26
FIGURA 6 - FORMAS DE ONDA CARACTERÍSTICA DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO COM E SEM APLICAÇÃO DE LCCS TIPO RESISTIVO. ADAPTADA DE [21].	27
FIGURA 7 - CONFIGURAÇÃO DE UM LCCS DO TIPO RESISTIVO. ADAPTADA DE [24].....	28
FIGURA 8 - CIRCUITO EQUIVALENTE LCCS INDUTIVO DE NÚCLEO BLINDADO. ADAPTADO DE [24].....	29
FIGURA 9 – TOPOLOGIA DO LCCS DE NÚCLEO SATURADO. ADAPTADA DE [56].	31
FIGURA 10 - TOPOLOGIA GENÉRICA DO LCCES TIPO SÉRIE. ADAPTADA DE [65].	32
FIGURA 11 - (A) TOPOLOGIA GENÉRICA DO LCCES TIPO PONTE; (B) ESTADO NORMAL; (C) FALTA DE CORRENTE ALTERNADA LIMITADA PELA FONTE DE CORRENTE; (D) FALTA DE CORRENTE ALTERNADA LIMITADA PELA IMPEDÂNCIA Z_f . ADAPTADA DE [65].....	34
FIGURA 12 - LCCES DO TIPO RESSONANTE BÁSICO. ADAPTADA DE [65].	34
FIGURA 13 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO TCSC PARA LIMITAR A CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO. ADAPTADA DE [17].....	36
FIGURA 14 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DISPOSITIVO LIMITADOR BASEADO NO TPSC. ADAPTADO DE [17].	37
FIGURA 15 - LCCSH DO TIPO PONTE DE DIODOS. ADAPTADA DE [85].....	38
FIGURA 16 - LCCSH DO TIPO REATOR CC TRIFÁSICO. ADAPTADA DE [86].....	39
FIGURA 17 - LCCSH DO TIPO PONTE. ADAPTADA DE [88].....	39
FIGURA 18 - LCCSH COM IGCTs. ADAPTADA DE [89].	40
FIGURA 19 - SISTEMA INTELIGENTE LCCSH-FCC. ADAPTADA DE [91].....	41
FIGURA 20 - O LCCSH-FCC E O RESULTADO EXPERIMENTAL. ADAPTADA DE [92].....	42
FIGURA 21 - LCCSH-FS. ADAPTADA DE [94].	42
FIGURA 22. LIMITAÇÃO DA CORRENTE NO LCCSH-FS. ADAPTADA DE [94].....	43
FIGURA 23 – EQUIPAMENTO LCCSH-FS A SER CONECTADO AO KEPCO [98].....	44
FIGURA 24 - CIRCUITO E RESULTADO DO LCCSH-FS. ADAPTADO DE [98].	44
FIGURA 25 - CIRCUITO DO LCCSH DO TIPO INDUTOR SÉRIE CHAVEADO PROPOSTO.....	45
FIGURA 26 - CORRELAÇÃO DAS CONDIÇÕES PARA SUPERCONDUTIVIDADE NOS SUPERCONDUTORES DO TIPO I.	48
FIGURA 27 - DIAGRAMA DE FASES DE UM SUPERCONDUTOR DO TIPO II.	48
FIGURA 28 – (A) DISTRIBUIÇÃO DE VÓRTICES FORMADO NO ESTADO MISTO, (B) A VARIAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO.	52
FIGURA 29 - CURVA E-J GENÉRICA DE UM MATERIAL SUPERCONDUTOR DE ALTA TEMPERATURA, NA ESCALA LOGARÍTMICA.	55
FIGURA 30 - ESPESSURA DE CADA CAMADA DA FITA 2G GdBCO, MODELO SANn12500.....	56
FIGURA 31 - (A) SEÇÃO TRANSVERSAL DA FITA 2G GdBCO; (B) REPRESENTAÇÃO ELÉTRICA DE R_{fita}	56
FIGURA 32 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO ITERATIVO DE CORRENTE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO SUPERCONDUTOR.....	58

FIGURA 33 - TAXA DE FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DE ELEMENTO INFINITESIMAL. ADAPTADA DE [24], [106].	60
FIGURA 34 - CIRCUITO EQUIVALENTE RC DE LINHA DE TRANSMISSÃO, COM FONTE DE CORRENTE. ADAPTADA DE [24], [106].	61
FIGURA 35 - VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DE CADA CAMADA DA FITA SUPERCONDUTORA, AO LONGO DO EIXO Z. ADAPTADA DE [24].	62
FIGURA 36 - CIRCUITO TERMO ELÉTRICO DA FITA 2G GDBCO. ADAPTADO DE [24].	62
FIGURA 37 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO ENTRE A SUPERFÍCIE DA FITA 2G E O NITROGÊNIO LÍQUIDO. ADAPTADA DE [24].	64
FIGURA 38 - (A) COMPONENTE CRIADO PARA CALCULAR A RESISTÊNCIA DA FITA 2G E (B) RESISTÊNCIA VARIÁVEL.	68
FIGURA 39 – CHAVE BIDIRECIONAL UTILIZANDO TIRISTORES	69
FIGURA 40 – (A) COMPONENTE CRIADO PARA CONTROLAR AS CHAVES E (B) PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O SISTEMA DE CONTROLE.	70
FIGURA 41 - CORRENTE DO SISTEMA GENÉRICA PARA EXPLICAR O CONTROLE SENSORIANDO A CORRENTE DA REDE.	71
FIGURA 42 – TENSÃO NO LCCSH GENÉRICA PARA EXPLICAR O CONTROLE SENSORIANDO A TENSÃO NO LCCSH.	72
FIGURA 43 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE CONTROLE.	73
FIGURA 44 – SISTEMA MODELADO NO PSCAD/EMTDC.	74
FIGURA 45 - CIRCUITO LCCSH PROPOSTO, DO TIPO INDUTOR SÉRIE CHAVEADO COM TIRISTOR, COM O CONTROLE SENSORIANDO A TENSÃO DO LIMITADOR.	75
FIGURA 46 - ILUSTRAÇÃO DO PROJETO DE UMA BOBINA COM DIMENSÕES OTIMIZADA PARA A ECONOMIA DE COBRE. FONTE: [122].	76
FIGURA 47 - IMAGEM DO NÍVEL DE DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO.	77
FIGURA 48 - ILUSTRAÇÃO DA COMPONENTE DE DIREÇÃO Z DA DENSIDADE DE FORÇA ELETROMECAÂNICA EM CADA ESPIRA.	78
FIGURA 49 - REATOR DE NÚCLEO DE AR CONSTRUÍDO PARA O LIMITADOR.	78
FIGURA 50 - COMPARAÇÃO ENTRE A MEDIÇÃO E O CÁLCULO DA RESPOSTA A UM DEGRAU DE TENSÃO DE 1,3 V NA BOBINA CONSTRUÍDA.	79
FIGURA 51 - TIRISTOR DO MODELO TT120N16SOF [121].	79
FIGURA 52 – DRIVER DE ACIONAMENTO DOS TIRISTORES.	80
FIGURA 53 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO MÓDULO TT120N16SOF. FONTE: [121].	80
FIGURA 54 - SUPORTE PARA AS FITAS 2G.	81
FIGURA 55 – (A) PRIMEIRA PLACA; (B) SEGUNDA PLACA; E (C) TERCEIRA PLACA.	81
FIGURA 56 - BANCADA DE TESTE.	82
FIGURA 57 - PONTEIRAS DE TENSÃO E CORRENTE E OSCILÓGRAFO MODELO DL850EV DA YOKOGAWA [125].	82
FIGURA 58 - RACK DE CARGAS(A) PARTE FRONTAL E (B) PARTE TRASEIRA.	83
FIGURA 59 - ARRANJO GERAL PARA ENSAIO DO LCCSH.	84
FIGURA 60 - TRANSFORMADOR DE 75 kVA UTILIZADO NOS ENSAIOS.	85
FIGURA 61 - IMPEDÂNCIA DE CARGA E REATOR TOROIDAL.	85
FIGURA 62 - BASE SUPERIOR DA BANCADA.	86
FIGURA 63 - LIGAÇÃO DO LCCSH DO TIPO INDUTOR CHAVEADO COM TIRISTOR.	87
FIGURA 64 - MICROCONTROLADOR CC2640R2F, EMPRESA TEXAS INSTRUMENTS. FONTE: [128].	88

FIGURA 65 - FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO <i>DRIVER</i> DOS TIRISTORES E SISTEMA DE CONTROLE DA (FABRICANTE: <i>POWERSAVE SOLUÇÕES DE TECNOLOGIA EM ENERGIA</i>).	88
FIGURA 66 - PLACA DE CONVERSÃO DE SINAL ÓPTICO PARA SINAL ELÉTRICO E <i>DRIVER</i> DE ACIONAMENTO DOS TIRISTORES (FABRICANTE: <i>POWERSAVE SOLUÇÕES DE TECNOLOGIA EM ENERGIA</i>).	89
FIGURA 67 - CIRCUITO DE REFERÊNCIA SEM O LCCSH PROPOSTO.	91
FIGURA 68 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES PROSPECTIVAS SIMULADA E ENSAIADA DO CIRCUITO SEM O LIMITADOR.	92
FIGURA 69 - DEFORMAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO NO ENSAIO DEVIDO AO LAÇO DE HISTERESE DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR.	92
FIGURA 70 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES ENSAIADA E SIMULADA DO CIRCUITO SEM O LIMITADOR.	93
FIGURA 71 - CIRCUITO DE REFERÊNCIA COM O LCCSH PROPOSTO.	93
FIGURA 72 - CORRENTE DO SISTEMA COM O CONTROLE SENSORIANDO A CORRENTE DO SISTEMA.	94
FIGURA 73 - CORRENTE DO SISTEMA E TENSÃO NO LCCSH COM O CONTROLE SENSORIANDO A TENSÃO DO LCCSH.	95
FIGURA 74 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES SIMULADA E ENSAIADA SENSORIADA POR CORRENTE E POR TENSÃO NO SISTEMA UTILIZANDO A TOPOLOGIA DO LCCSH PROPOSTO.	96
FIGURA 75 - COMPARAÇÃO ENTRE OS CONTROLES SENSORIANDO A CORRENTE DO SISTEMA E SENSORIANDO A TENSÃO NO LCCSH.	97
FIGURA 76 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES NO INDUTOR SIMULADA E ENSAIADA COM CONTROLE SENSORIANDO A CORRENTE DO SISTEMA E COM CONTROLE SENSORIANDO A TENSÃO LCCSH PROPOSTO.	98
FIGURA 77 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CORRENTES NO TIRISTOR SIMULADA E ENSAIADA COM CONTROLE SENSORIANDO A CORRENTE DO SISTEMA E COM CONTROLE SENSORIANDO A TENSÃO LCCSH PROPOSTO.	99
FIGURA 78 - COMPARAÇÃO ENTRE A TENSÃO NO SUPERCONDUTOR SIMULADA E A TENSÃO ENSAIADA COM CONTROLE SENSORIANDO A CORRENTE DO SISTEMA E COM CONTROLE SENSORIANDO A TENSÃO LCCSH PROPOSTO.	99
FIGURA 79 - COMPARAÇÃO ENTRE A TENSÃO NOS TERMINAIS DO LCCSH SIMULADA E ENSAIADA COM O CONTROLE SENSORIANDO A TENSÃO NO LCCSH.	100
FIGURA 80 - COMPARAÇÃO DA CORRENTE NO SISTEMA NOS ENSAIOS SEM E COM O LCCSH PROPOSTO, COM O CONTROLE SENSORIANDO A CORRENTE DO SISTEMA E OUTRO SENSORIANDO A TENSÃO NO LCCSH.	101
FIGURA 81 - COMPARAÇÃO DA TENSÃO DO SISTEMA NOS ENSAIOS SEM E COM O LCCSH PROPOSTO, COM O CONTROLE SENSORIANDO A CORRENTE DO SISTEMA E OUTRO SENSORIANDO A TENSÃO NO LCCSH.	101

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESULTADOS DE TESTES RETIRADOS DE [91].....	41
TABELA 2 - SUPERCONDUTOR, T_c E ANO DE DESCOBERTA DE ALGUNS MATERIAIS SUPERCONDUTORES. ADAPTADA DE [106].....	50
TABELA 3 - ANALOGIA ENTRE PROPRIEDADES TÉRMICAS E ELÉTRICAS. ADAPTADA DE [106].....	61
TABELA 4 - PARÂMETROS DO TIRISTOR.....	69
TABELA 5 - PARÂMETROS DOS ITENS UTILIZADOS NOS ENSAIOS.....	85

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - MOTIVAÇÃO	16
1.1. INTRODUÇÃO.....	17
1.2. OBJETIVO	18
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
CAPÍTULO 2 - LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	20
2.1. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - LCC	21
2.2. CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....	21
2.3. PARÂMETROS DE PERFORMANCE DOS LIMITADORES DE FALTA ...	21
2.4. LCCs COMERCIAIS	24
2.4.1. Reatores de Núcleo de Ar.....	24
2.4.2. Dispositivos Pirotécnicos	25
2.4.3. Resistor de Aterramento.....	26
2.5. LCC SUPERCONDUTOR - LCCS	27
2.5.1. LCCS do Tipo Resistivo	28
2.5.2. LCCS do Tipo Núcleo Blindado	29
2.5.3. LCCS do Tipo Núcleo Saturado.....	30
2.6. LCCs DE ESTADO SÓLIDO– LCCES.....	32
2.6.1. LCCES do Tipo Série.....	32
2.6.2. LCCES do Tipo Ponte.....	33
2.6.3. LCCES do Tipo Ressonante.....	34
2.7. DISPOSITIVOS FACTS	34
2.8. LCC SUPERCONDUTOR HÍBRIDO – LCCSH.....	37

2.8.1.	LCCSH do Tipo Ponte	37
2.8.2.	LCCSH do Tipo Fault Current Controller (LCCSH-FCC)	40
2.8.3.	LCCSH do Tipo Fast Switching (LCCSH-FS)	42
2.9.	LCCSH DO TIPO INDUTOR SÉRIE CHAVEADO POR TIRISTORPROPOSTO	44
2.10.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
CAPÍTULO 3 - SUPERCONDUTIVIDADE, MATERIAIS SUPERCONDUTORES E MODELAGEM DO ELEMENTO SUPERCONDUTOR		46
3.1.	SUPERCONDUTIVIDADE	47
3.2.	SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA	49
3.3.	DINÂMICA DOS VÓRTICES	51
3.4.	CURVA E-J	53
3.5.	MODELAGEM DO SUPERCONDUTOR	55
3.5.1.	Equivalente Elétrico	56
3.5.2.	Equivalente Térmico	59
3.5.2.1.	Analogia Eletrotérmica	59
3.5.2.2.	Circuito Equivalente	61
3.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
CAPÍTULO 4 - MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO LCCSH PROPOSTO		66
4.1.	MODELAGEM COMPUTACIONAL	67
4.1.1.	Princípio de funcionamento do LCCSH proposto	67
4.1.2.	Descrição da simulação da bancada de teste	74
4.2.	PROTÓTIPO DO LIMITADOR	76
4.2.1.	Elementos do protótipo do LCCSH proposto	76
4.2.1.1.	Indutor	76
4.2.1.2.	Chaves semicondutoras	79
4.2.1.3.	Módulo supercondutor	80
4.2.2.	Descrição da bancada de testes	82

4.2.2.1. Equipamentos e instalações.....	82
4.2.2.2. Descrição dos ensaios.....	86
4.2.3. Sistema de controle	87
4.2.3.1. Equipamento de medição, controle e operação	87
4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
5.1. ENSAIO DE CORRENTE E TENSÃO DO SISTEMA SEM O LCCSH.....	91
5.2. ENSAIOS COM O LCCSH PROPOSTO	92
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	102
6.1. CONCLUSÃO.....	103
6.2. TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

CAPÍTULO 1 - MOTIVAÇÃO

Este capítulo é destinado a apresentar a introdução e o objetivo do presente trabalho, ressaltando as metas que devem ser alcançadas para a realização do estudo proposto. Por fim, são apresentadas as descrições dos conteúdos dos capítulos seguintes.

1.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, devido ao constante aumento de demanda e com a integração de novos sistemas de geração de energia elétrica, incluindo as fontes de energia renovável no sistema de distribuição, o sistema de energia elétrica do Brasil sofreu grandes modificações. Uma vez que não há o crescimento da geração de energia de forma proporcional ao da demanda, o sistema vem sendo forçado a operar próximos ao limite de sua capacidade, ou seja, com elevados fluxos de potência ativa e reativa [1]–[3]. Esta operação impacta diretamente na elevação dos níveis de corrente de curto-circuito transitórias nas linhas de distribuição.

Como inúmeras subestações em funcionamento atualmente foram projetadas há algumas décadas, tem-se como consequência, a corrente sob falta atinge valores superiores aos suportados pelos equipamentos presentes na mesma. Além de que, ainda possuem problemas relacionados com o tempo de abertura dos contatos mecânicos e com a extinção de arcos voltaicos. Uma solução disponível para esses problemas é a instalação de um Limitador de Corrente de Curto-Circuito (LCC) no sistema [4]–[6], dado que além de ser uma solução técnica, é economicamente mais atraente do que a substituição dos equipamentos já instalados [7]–[9].

De acordo com a definição do IEEE, LCCs instalados em sistemas de potência de corrente alternada, são equipamentos capazes de reduzir o primeiro e subsequentes picos de corrente de curto-circuito para um valor estabelecido, embasado através do crescimento de uma impedância resistiva e/ou reativa no decorrer da passagem de uma condição nominal para um eventual curto-circuito [10]. Esta atenuação assegura disjuntores e religadores automáticos, antes superados, sejam capazes de operar em um tempo suficientemente seguro.

LCCs que possuem material supercondutor e chaves de estado sólido em seu princípio de funcionamento são classificados como Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor Híbrido (LCCSH).

De maneira a analisar o comportamento do LCCSH, o presente trabalho irá realizar um modelo computacional, com chaves de estado sólido e um material supercondutor. O modelo do material supercondutor foi fundamentado no projeto ENSYSTROB [11], [12], além de considerar a analogia eletrotérmica retratada em [13], [14] com intenção de solucionar a conexão existente entre os fenômenos elétrico e térmico que regem os princípios de funcionamento deste tipo de material.

Baseando no modelo computacional, vai ser construído um protótipo do LCCSH, dimensionando seus componentes, assim como, elaborar o sistema de controle a ser aplicado nas chaves semicondutoras.

O sistema de controle vai ser programado de duas formas, uma monitorando o aumento abrupto da corrente do sistema, definindo o modo de operação do LCCSH e outra monitorando o nível de tensão no LCCSH (Vale ressaltar que o aumento da tensão no LCCSH é resultado da sua transição de estado do elemento supercondutor, com decorrente aumento da resistividade do componente). Essas duas formas serão classificadas como sistema de controle sensoriando a corrente do sistema e sistema de controle sensoriando a tensão no LCCSH, e seus desempenhos para a operação do LCCSH serão comparados.

Por fim, os resultados tanto nas simulações quanto nos ensaios experimentais serão avaliados. Se os resultados das simulações conseguirem reproduzir o comportamento do LCCSH do tipo indutor série chaveado ensaiado, será validado para realizar simulações de um limitador em uma escala de potência maior e, assim, dimensionar de forma adequada os parâmetros do mesmo.

1.2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma topologia e construir um protótipo de Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor Híbrido (LCCSH), que utiliza material supercondutor, bobina de ar e chaves de estado sólido em seu princípio de funcionamento. Basicamente, o LCC é uma impedância variável que é instalado em série com o sistema. No caso de falta, a impedância aumenta para um valor no qual a corrente de falta é limitada para um nível em que a proteção do possa atuar. Realizaram-se simulações computacionais que possibilitou o dimensionamento e a especificação dos componentes reais, então foi construído um protótipo deste limitador para comparar os resultados. Para alcançar o objetivo esperado, as etapas a seguir foram contempladas:

- Modelagem do elemento supercondutor para a simulação no programa PSCAD/EMTDC, com base nas equações que descrevem o comportamento físico deste elemento, e sua validação por meio de resultados encontrados através de ensaios e simulações na literatura.

- Modelagem do LCCSH do tipo indutor série chaveado no *software* PSCAD/EMTDC, baseado na topologia proposta, a fim de simular um sistema em curto-circuito e analisar a operação do limitador.
- Construção do LCCSH proposto, apresentando os componentes que o compõem. Inclusive, descrever o sistema de controle das chaves semicondutoras.
- Análise comparativa entre os resultados obtidos da modelagem do LCCSH proposto e do protótipo de bancada construído. Validação do princípio operacional do limitador proposto.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em 6 capítulos, neste é feita uma introdução sobre o tema pesquisado e os objetivos deste trabalho; o Capítulo 2 faz uma breve revisão bibliográfica sobre Limitadores de Corrente de Curto-Circuito, classificando as tecnologias dos dispositivos, assim como seus princípios de funcionamento; o Capítulo 3 aborda o modelo do material supercondutor adotado para a simulação computacional implementada no PSCAD/EMTDC, com a representação matemática dos fenômenos físicos que representam as características intrínsecas do material supercondutor; o Capítulo 4 apresenta a modelagem e a montagem do LCCSH do tipo indutor série chaveado, além da aquisição e construção dos componentes do limitador; o Capítulo 5 expõe as comparações dos resultados obtidos nas simulações e nos experimentos, e o Capítulo 6 traz as conclusões finais deste manuscrito e sugestões de trabalhos futuros ao tema.

CAPÍTULO 2 - LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Neste capítulo, definem-se as terminologias e características inerentes à corrente de curto-circuito, o limitador de corrente de curto-circuito e os parâmetros de interesse. Também se classifica e descreve alguns tipos de limitadores de corrente de curto circuito, com um breve detalhamento dos seus princípios de funcionamento.

2.1. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - LCC

Com o aumento das correntes de curto-circuito, aumentou a demanda da utilização de LCCs nos últimos anos. Com base nisto, inúmeras topologias de LCCs foram propostas na literatura. A seguir, serão investigados os pontos positivos e negativos de uma série de sugestões para a limitação de corrente de curto-circuito que se encontram na literatura.

2.2. CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Curto-circuitos são colapsos imprevistos que ocorrem devido a uma condição anormal de baixa impedância entre dois pontos do sistema com diferentes potenciais elétricos. A resposta característica das correntes de falha pode ser compreendido por meio da solução de um circuito equivalente RL, alimentado por uma fonte de tensão de corrente alternada (AC), Figura 1, se tratando do comportamento da corrente elétrica obtido pela solução de uma equação diferencial, apresentada em (1):

$$i(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - \text{sen}(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (1)$$

onde $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$ é o ângulo da impedância, e seu módulo, dado por $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, é um fator atenuante do resultado. Esta solução contém duas parcelas, uma de regime permanente (i_{RP}) e uma de regime transitório (i_{TR}). O valor máximo que a corrente atinge durante o regime transitório depende do instante em que a chave é fechada.

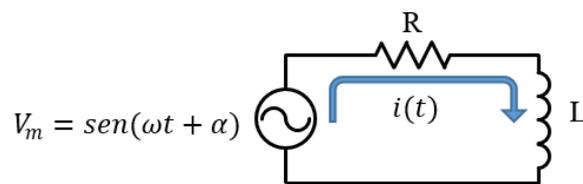


Figura 1 – Circuito RL equivalente.

2.3. PARÂMETROS DE PERFORMANCE DOS LIMITADORES DE FALTA

Em muitos casos os curtos-circuitos podem originar maiores avarias à rede elétrica do que apenas a interrupção do fornecimento de energia, como a queima de equipamentos, que aumentariam os prejuízos para a concessionária de energia elétrica. Evitam-se estes problemas inserindo os LCCs nas subestações de um sistema de distribuição.

Os LCCs são dispositivos instalados em série com a rede elétrica, com o intuito de impedir que a corrente elétrica no sistema exceda os limites suportados pela mesma durante a

situação de faltas. Existem diversas tecnologias de LCCs, e baseado em critérios técnicos e econômicos que haverá a seleção do melhor tipo de LCC a ser instalado em um determinado sistema. A Figura 2 apresenta o funcionamento de um LCC. O sistema opera com a ausência de um LCC, conforme a Figura 2 (a), tem a possibilidade de ocorrer elevados níveis de corrente de falta. A resposta da corrente sem o limitador no sistema, curva vermelha da Figura 2 (c), obtém o nome de corrente prospectiva. O LCC possui a funcionalidade de inserir no sistema uma impedância em série, de acordo com a Figura 2 (b), para reduzir o valor da corrente elétrica ao longo da falta. Esta corrente é nomeada de corrente limitada, segundo a curva azul da Figura 2 (c).

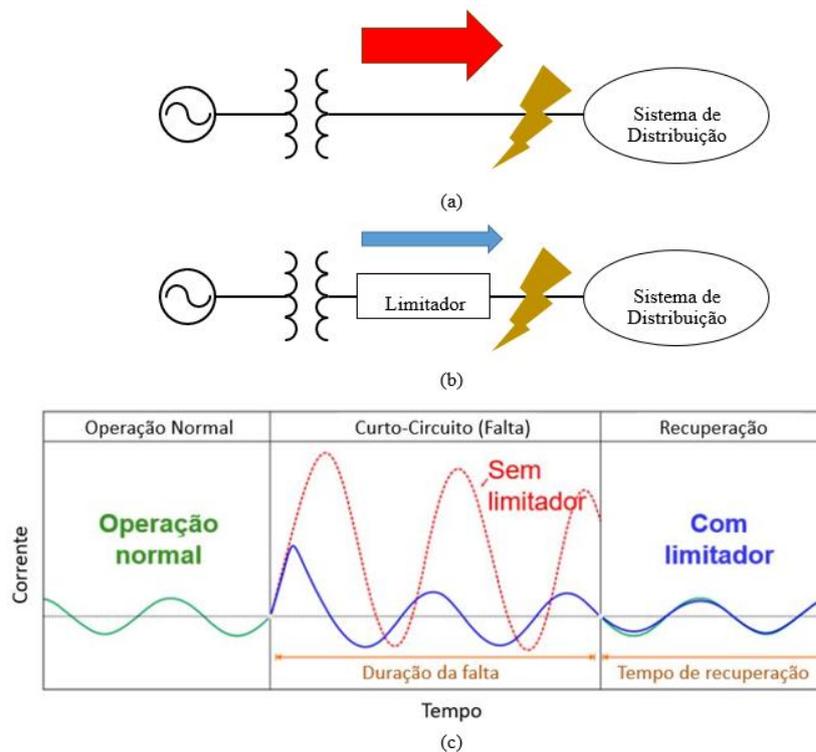


Figura 2 - Comportamento da corrente de curto-circuito sem e com limitador.

A seguir, serão retratadas algumas características deste equipamento que devem ser observados para avaliar seu comportamento.

- **Impedância em regime permanente** – O limitador ideal deve apresentar perdas próximas de zero ou nulas quando o sistema não contém uma falta no sistema elétrico. Em alguns casos o limitador pode ser projetado para possuir uma impedância capacitiva, compensando a característica indutiva da rede e, conseqüentemente, elevando o fator de potência do circuito e reduzindo perdas de condução [15]. Assim sendo, como a impedância equivalente do circuito se torna menos indutiva, a corrente prospectiva de curto-circuito tende de aumentar.

- **Impedância sob condições de falta** – Na ocorrência de curto-circuito, espera-se que o LCC insira uma impedância na rede para limitar a corrente de falta para um valor em que os equipamentos de proteção existentes não danifiquem. Como apresentado na Figura 2, as cargas conectadas em uma rede de distribuição são em sua maioria indutiva. Portanto, durante a falta se o LCC inserir uma impedância:
 - **Indutiva**, a corrente de falta diminuirá, mas a componente de regime permanente transitório da corrente decairá lentamente;
 - **Resistiva**, a corrente de falta diminuirá e componente de regime transitório da corrente decairá rapidamente;

Idealmente, o limitador deve introduzir uma impedância resistiva no momento da falta.

- **Tempo de transição do modo de operação normal para o modo limitador** – Os efeitos no sistema a ser protegido serão reduzidos quanto mais rápido for a atuação do LCC.
- **Tempo de recuperação** – Com o elevado número de defeitos de natureza transitória, o LCC deve estar apto para religar a rede após o curto-circuito o mais rápido possível.
- **Confiabilidade** – Se o LCC for conectado em série com o sistema, a confiabilidade do sistema é dependente do funcionamento do dispositivo limitador. Caso o LCC falhe em sua atuação, deve ser avaliado o impacto na rede. Existem dispositivos classificados como “falha segura”, indicando que caso ocorra uma falha no LCC, ele não prejudicará o sistema.
- **Custos de instalação e de manutenção** – É necessário realizar uma análise econômica comparando o custo da solução e a substituição dos equipamentos superados, levando em consideração as perdas introduzidas no sistema.
- **Volume e peso** – Dispositivos de grande peso e volume podem impossibilitar a instalação em caso de espaços limitados dentro de subestações.

A Figura 3 apresenta alguns possíveis locais em que os LCCs podem ser instalados na rede de distribuição. A seleção do melhor local para a instalação do LCC é baseado no resultado de inúmeras simulações. Normalmente, são avaliados os seguintes pontos:

- Conexões entre barramentos;
- Alimentadores;
- Transformadores;
- Geradores Independentes (*Independent Power Producer* - IPP)

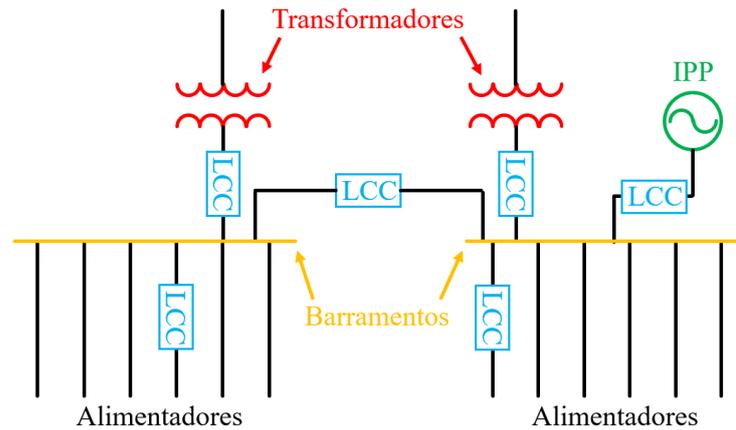


Figura 3 - Possíveis locais para dispositivos LCCs. Adaptada de [16].

2.4. LCCs COMERCIAIS

Diversas tecnologias de LCCs baseados em diferentes tecnologias vêm sendo estudadas e propostas por instituições de pesquisa e empresas. Algumas se destacam pelo nível de maturidade e desenvolvimento tecnológico, sendo disponíveis comercialmente e têm ampla experiência de uso, enquanto outros estão em fase de pesquisa e desenvolvimento. No decorrer desta Seção serão abordados os principais conceitos dos LCCs comerciais.

2.4.1. Reatores de Núcleo de Ar

A tecnologia mais antiga para a limitação de correntes de curto-circuito são os reatores de núcleo de ar [17]. A indutância dos reatores de núcleo de ar se mantém constante quando estes são submetidos a diferentes níveis de corrente, por não estarem sujeitos a saturação de um núcleo magnético. O dispositivo limita a corrente quando é inserido em série com o sistema a ser protegido.

Algumas desvantagens desta tecnologia são: durante o curto-circuito, a impedância com característica indutiva aumenta a constante de tempo do sistema, fazendo com que a componente de corrente de regime transitório retarde a ação dos equipamentos de proteção que atuam com corrente nula, e; durante o regime permanente apresenta um aumento da queda de tensão e perdas de efeito Joule.

No entanto, em função de sua simplicidade e baixo custo, esta solução comercial continua sendo economicamente viável. A seguir temos alguns fabricantes desta tecnologia:

- Siemens;
- Trench Group;

- Adelco Sistemas de Energia;
- IBT – Indústria Brasileira de Transformadores Ltda.

A empresa IBT possui o equacionamento para dimensionar reatores núcleo de ar utilizados em limitadores de corrente, apresentado em [18]. Esta tecnologia é amplamente difundida na indústria, no qual contribui para viabilidade econômica do produto. Entretanto, a instalação de reatores de núcleo de ar necessita de análise de viabilidade técnica, como estudos de curto-circuito, fluxo de potência e transitórios eletromagnéticos [19]. No Brasil, alguns exemplos de sua aplicação são:

- Subestação de Jaraguá – 138 kV – MG;
- Subestação de Angra – 138 kV – RJ;
- Subestação de Mogi das Cruzes – 345 kV – SP;
- Subestação de Tucuruí – 500 kV – PR.

A Figura 4 mostra a fotografia dos reatores limitadores da subestação Tucuruí, no qual fica visível a necessidade de se manter um espaço mínimo entre estes dispositivos, o que pode tornar um problema para a sua instalação em algumas subestações. Este espaçamento tem como finalidade reduzir as forças de interação magnética entre os dispositivos durante o curto-circuito.

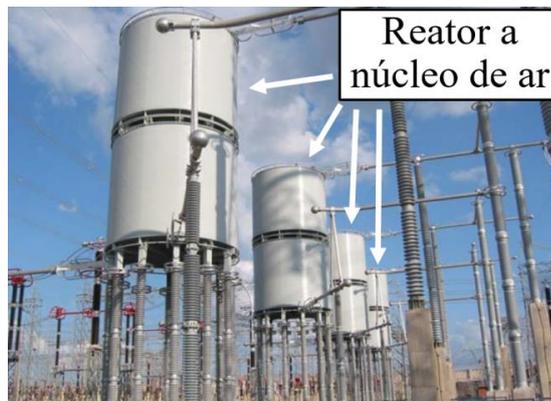


Figura 4 - Fotografia dos reatores limitadores da subestação de Tucuruí de 500 kV. Adaptada de [19].

2.4.2. Dispositivos Pirotécnicos

Desde os anos 50 os dispositivos pirotécnicos são amplamente utilizados. Na década de 90, iniciou-se a utilização nas indústrias nacionais que possuíam em suas instalações um sistema de cogeração, visto que este sistema de cogeração gerou um aumento do nível de corrente de falta nas instalações [17]. Estes dispositivos foram inseridos para impedir a troca

de equipamentos que seriam superados, tais como, disjuntores, religadores, isoladores, entre outros.

Os pontos positivos do dispositivo pirotécnico são: alta velocidade de atuação; relativa facilidade de construção; funcionamento simples; fácil instalação, volume e peso reduzido; e custo relativamente baixo. A desvantagem deste dispositivo é que deve ser instalado preferencialmente em uma rede onde a falha é pouco frequente, justamente porque ele precisa substituir manualmente o elemento fusível e a câmara do barramento de cobre. Desta forma, leva-se em conta o custo operacional da reposição de componentes e o período em que o sistema ficará sem fornecimento de energia [20].

Os dispositivos pirotécnicos possuem capacidade de interromper correntes de curto-circuitos em tempos inferiores a 1/4 de ciclo [16]. A Figura 5 mostra esquematicamente o funcionamento do dispositivo, na qual observa-se que o LCC atua de acordo com as informações obtidas através de sensores de corrente. Com respeito ao seu princípio de funcionamento, a corrente nominal conduz através de um barramento principal contido no limitador pirotécnico. Este barramento contém estrangulamentos sob os quais estão conectadas a cargas explosivas, quando se detecta o curto-circuito, as cargas explosivas são detonadas funcionando como uma chave de abertura. Após a explosão, a corrente de falta desvia para um fusível limitador de corrente com capacidade de ruptura adequada para interromper a corrente [17].

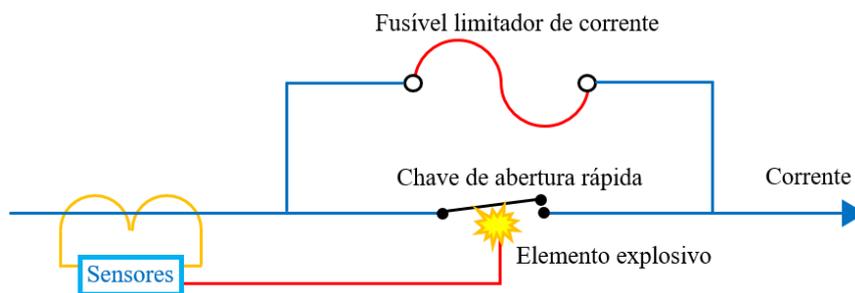


Figura 5 - Esquema do limitador de corrente pirotécnico. Adaptada de [16].

2.4.3. Resistor de Aterramento

Uma alternativa de baixo custo para limitar a corrente de curto-circuito em redes de distribuição consiste em aterrar o neutro do transformador através de um banco de resistores. Em [15], [17], esta alternativa classifica-se como provisória uma vez que esta é eficaz apenas em faltas monofásicas. Além disso, o resistor de aterramento produz uma diferença de

potencial (ddp) entre a terra e o neutro do transformador. Esta ddp é proporcional aos valores da resistência (R) e da corrente que passa por ela (I_N), de acordo com (2).

$$ddp = R \cdot I_N, \quad (2)$$

Na ocorrência de faltas monofásicas, a corrente I_N que surge em (2) é exatamente a corrente de curto-circuito. Conseqüentemente, a tensão de neutro do transformado alcança valores elevados. No regime permanente, há a possibilidade de surgir esta ddp, dado que o desequilíbrio das correntes de fase do transformador está relacionado a corrente I_N .

2.5. LCC SUPERCONDUTOR - LCCS

Os limitadores de corrente de curto-circuito baseado em materiais supercondutores (LCCS) são dispositivos que possuem uma impedância próxima de zero em corrente alternada na operação normal, todavia, na condição de falta, sua impedância aumenta rapidamente em até menos de 1/4 de ciclo (com exceção para a topologia “núcleo saturado” que será apresentada na Seção 2.5.3). Isso se deve à propriedade intrínseca do material em transitar do estado supercondutor para o estado normal (*quench*), em função do aumento de temperatura durante o curto-circuito, esta propriedade será detalhada no Capítulo 3.

A Figura 6 indica as formas de onda típicas da corrente prospectiva (curva tracejada) e com a inserção de um LCCS do tipo resistivo (curva contínua). O LCCS do tipo resistivo, assim como os demais diferentes tipos de LCCS serão explicados nas subseções subsequentes. Nota-se que, ao longo da condição normal do sistema, o equipamento possui uma impedância aproximadamente nula e, em um eventual curto-circuito, é inserido uma impedância, reduzindo, então, o valor de pico da corrente já no primeiro semiciclo.

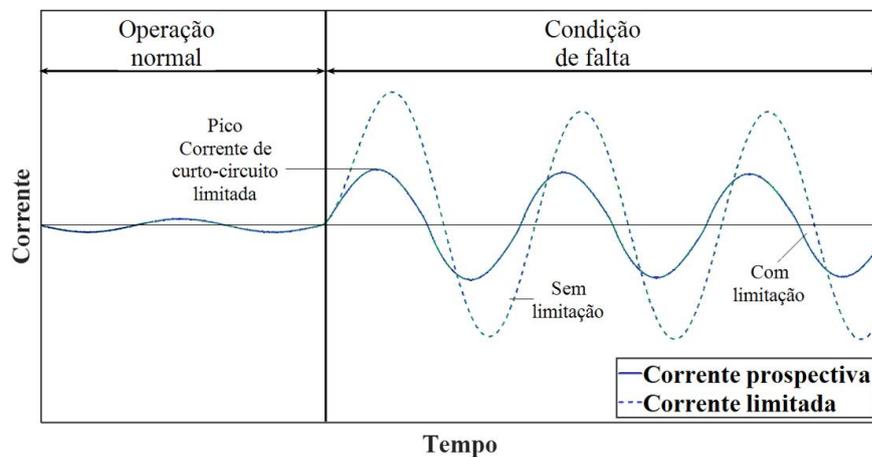


Figura 6 - Formas de onda característica de corrente de curto-circuito com e sem aplicação de LCCS tipo resistivo. Adaptada de [21].

A aplicação dos LCCS é apontada como uma das soluções mais promissoras para o problema dos altos níveis de curto-circuito no sistema elétricos [22], [23], suas principais características são:

- Baixa impedância em condições normais de operação;
- Rápido tempo de atuação;
- Grande capacidade de limitação;
- Sem necessidade de substituição de partes ou componentes;
- Não utiliza sensores de detecção de falta;
- Falha segura;
- Período de recuperação curto e automático.

Nas seções a seguir apresenta-se os principais tipos de LCCS propostos na literatura. Destacam-se 3 configurações: resistivo, indutivo e núcleo saturado.

2.5.1. LCCS do Tipo Resistivo

O limitador de corrente de curto-circuito do tipo resistivo é o que apresenta a configuração mais simples, construído basicamente de um elemento supercondutor em série com o sistema a ser protegido, sendo arrefecido por meio de um sistema criogênico. Em um eventual curto-circuito no sistema, a corrente elétrica e a temperatura do material supercondutor sofrem uma ligeira elevação, fazendo com que o supercondutor transite para o estado normal, passando a apresentar uma resistência não nula [19]. A Figura 7 apresenta um arranjo de um LCCS do tipo resistivo no sistema a ser protegido.

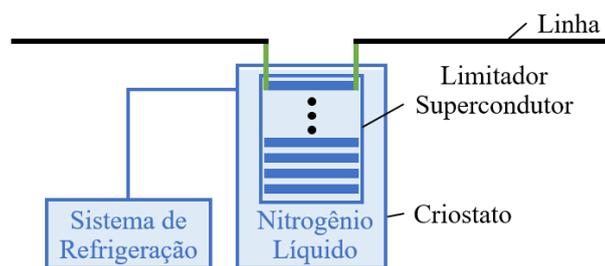


Figura 7 - Configuração de um LCCS do tipo resistivo. Adaptada de [24].

As vantagens deste tipo de limitador são: dimensões reduzidas em comparação aos demais pelas suas características operacionais; redução da assimetria da corrente de curto-circuito devido à redução da razão X/R no ponto de falta com o uso de elemento *shunt* resistivo; ausência de distorção de corrente quando comparado a outros limitadores [25].

Já as desvantagens que podem ser citadas em referência a esta topologia são: a ligação do dispositivo diretamente em série com a corrente a ser limitada, sendo necessária a passagem da mesma do ambiente externo (temperatura ambiente) para o limitador (temperaturas criogênicas), provocando perdas térmicas no sistema de refrigeração, e; a origem dos pontos quentes (*hot spots*) [24]. Para evitar este último, aplica-se uma fina camada de material condutor de eletricidade e térmica em paralelo ao supercondutor, para desviar parcela da corrente que atravessa estes *hot spots* e fornecer estabilidade térmica do supercondutor.

Este tipo de limitador possui inúmeras pesquisas referentes à modelagem na literatura, com a finalidade de investigar determinados aspectos como: caracterização dos fenômenos elétricos e térmicos que transcorrem no limitador em condições normais e de atuação [26]–[29]; otimização no dimensionamento e configuração do limitador [30]–[32], e sua aplicabilidade em sistemas de potência, por meio de simulações computacionais, com intuito de identificar as possíveis vantagens devido à utilização destes tipos de dispositivos [33]–[36]. Ainda, alguns trabalhos aplicam estes limitadores como opção para reduzir os níveis de curto-circuito proporcionados pela GD ligada à rede [37]–[40].

2.5.2. LCCS do Tipo Núcleo Blindado

O limitador de corrente de curto-circuito supercondutor do tipo núcleo blindado possui a seguinte configuração: um acoplamento magnético entre o circuito a ser protegido (carga) e o circuito contendo o elemento supercondutor (R_S), segundo a representação ilustrada na Figura 8. Este limitador também é conhecido como do tipo indutivo, dado que sua configuração se assimila à de um transformador com dois enrolamentos [24]. O primário é formado por uma bobina de material condutor tradicional, representado por uma resistência (R_1) e uma indutância (X_1) na Figura 8, que está conectado em série com a carga do sistema elétrico. O secundário é formado por uma bobina supercondutora em curto circuito, demonstrada na Figura 8 por uma indutância (X_2 e R_S). Neste tipo de tecnologia, a bobina secundária deve ser arrefecida por um sistema criogênico.

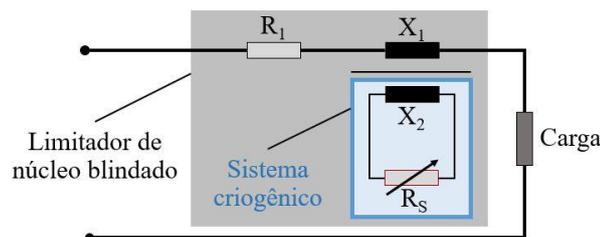


Figura 8 - Circuito equivalente LCCS indutivo de núcleo blindado. Adaptado de [24].

Este limitador utiliza as propriedades magnéticas do supercondutor para atuar. Em operação normal, a corrente induzida no supercondutor é menor que a densidade de corrente crítica. Deste modo, o fluxo magnético gerado no enrolamento primário anula-se pelo enrolamento secundário pertinente às correntes superficiais de blindagem que surgem no supercondutor, no qual a resistência é aproximadamente zero. Consequentemente, para correntes abaixo da densidade de corrente crítica, a indutância total do dispositivo na perspectiva do lado primário é desprezível. No caso de falta, a corrente induzida no enrolamento secundário ultrapassa o valor crítico e o material supercondutor transita para o estado normal, apresentando resistência maior que zero e dissipação térmica. Portanto o fluxo magnético não possui mais a compensação do enrolamento supercondutor secundário, provocando um aumento abrupto da impedância total vista pelo primário [19].

A vantagem principal deste limitador é que o material supercondutor não possui uma ligação direta com a rede elétrica, apresentando apenas um acoplamento magnético através do núcleo de ferro ou de ar. Desta forma, não há trocas de calor entre o circuito em temperatura ambiente com o circuito resfriado através do sistema criogênico. Além disso, dependendo do número de espiras definidos para o enrolamento primário, o material supercondutor pode ser submetido a tensões mais baixas [41].

Em limitadores com núcleo de ferro, existe a desvantagem de aumentar o tamanho e peso graças à necessidade deste núcleo com dimensões similares às de um transformador de potência nominal equivalente [24].

Trabalhos relacionados à modelagem deste equipamento por meio de métodos numéricos para caracterização de fenômenos elétricos e magnéticos são encontrados na literatura, como modelagens do *quench* [42]–[44], dispersão do fluxo magnético [45], [46], influência na variação da resistência *shunt*, tipo de núcleo, fator de potência e números de espiras [47]–[50], dentre outros [51]–[54].

2.5.3. LCCS do Tipo Núcleo Saturado

O limitador de corrente de curto-circuito do tipo núcleo saturado se embasa em um desempenho dinâmico relacionado às propriedades magnéticas do núcleo de ferro com acoplamento magnético subtrativo. De acordo com a Figura 9, o LCCS de núcleo saturado possui dois núcleos de ferro, nos quais duas bobinas CAs formada por material condutor tradicional são ligadas em série com a rede, e uma bobina CC formada por material supercondutor que possui a finalidade de saturar estes dois núcleos. As direções de campo

magnético são opostas, nas bobinas CAs, e uma fonte de corrente CC independente alimenta a bobina supercondutora [55].

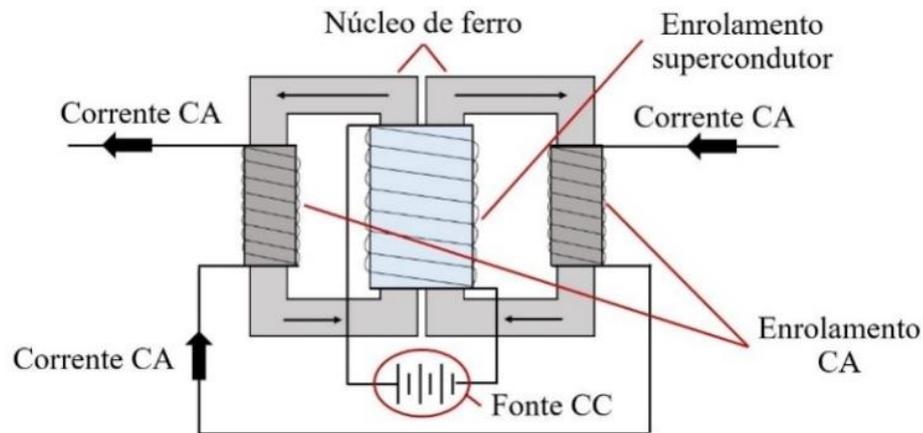


Figura 9 – Topologia do LCCS de núcleo saturado. Adaptada de [56].

Em condições normais, o limitador opera em um estado não limitante, dado que os núcleos de ferro possuem um campo magnético induzido em função da bobina CC, mantendo-os em saturação com permeabilidade baixa em todo o ciclo CA. Conseqüentemente, a impedância total vista no primário é minúscula e praticamente não há efeito na rede elétrica. No entanto, em uma eventual falta, as magnitudes das correntes aumentam, tanto o semiciclo positivo quanto o negativo, induzindo os núcleos e fazendo com que saiam da saturação, resultando no aumento da impedância de linha visto no primário, limitando a corrente de curto-circuito.

A vantagem desta topologia é que não há a transição para o estado normal do material supercondutor durante a falta, reduzindo o tempo de recuperação. Entretanto, este equipamento agrava a qualidade de energia do sistema, gerando um elevado conteúdo harmônico correspondente à oscilação entre saturação e não saturação do núcleo, durante a limitação. Além disso, como este limitador tem a necessidade de dois núcleos de ferro, o seu tamanho e peso são consideráveis, sendo capaz de atingir dimensões próximas à um transformador de mesma potência [24].

Na literatura, encontram-se pesquisas que criaram a modelagem destes equipamentos, para caracterização das correntes (CA e de polarização CC), tensão, campo magnético, ciclo de histerese e perdas em CA, [57]–[60]. Outras pesquisas pretendem aperfeiçoar o projeto do limitador, com relação ao núcleo (material peso) e espiras, assim como a sua coordenação com relés de distância [61]–[64].

2.6. LCCs DE ESTADO SÓLIDO– LCCES

Os limitadores de Corrente de Curto-Circuito denominados de estado sólido são aqueles que têm como principal elemento as chaves semicondutoras de potência. A seguir serão descritas as subclassificações dos LCCs de estado sólido, dependendo da forma que são dispostas no circuito ou conforme com seu arranjo construtivo.

2.6.1. LCCES do Tipo Série

O LCCES do tipo série é formado por um arranjo bidirecional de chaves semicondutoras controladas, S_{SS} (*Solid-State Switch*), e uma combinação de vários ramos em paralelo. A Figura 10 apresenta a forma mais genérica. Por conveniência de descrição, o arranjo de chaves geralmente é chamado apenas como chave, podendo ainda ser “a chave bidirecional” ou “as chaves”, dentre outros termos similares.

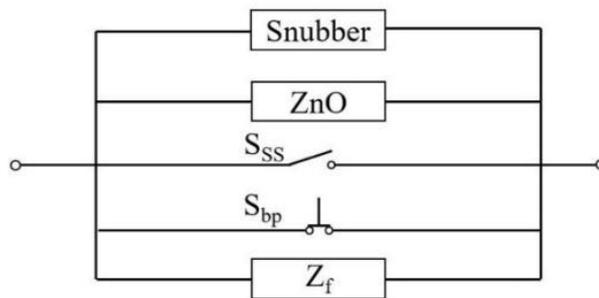


Figura 10 - Topologia genérica do LCCES tipo série. Adaptada de [65].

Vários dispositivos semicondutores (SCR, GTO, ETO, IGBT, IGCT, Tiristor, etc.), podem construir a chave bidirecional. Conforme a Figura 10, os outros ramos podem ser: ramo de estado normal da rede, representado por uma chave mecânica S_{bp} ; ramo da corrente de falta e proteção de sobretensão demonstrados por uma impedância Z_f e um resistor variável $Z_n O$, respectivamente, e; um dispositivo *snubber* que compõe o arranjo de chaves. Destaca-se que o limitador de corrente de curto-circuito de estado sólido tem possibilidade de usar um sistema mais ou menos robusto, de acordo com a velocidade de atuação do algoritmo de respostas às faltas e do circuito de disparo das chaves.

A chave mecânica S_{bp} tem a finalidade de conceder um caminho de baixa impedância a fim de diminuir as perdas semicondutoras e a distorção de forma de onda no estado normal de operação. Seu uso é opcional.

A impedância Z_f possui como objetivo de limitar a corrente de falta e permitir que outros esquemas de proteção tomem a ação inapropriadamente.

O resistor variável Z_nO geralmente é implementado com varistores ou para-raios de alta tensão. Sua função é fornecer um caminho alternativo de corrente quando a chave bidirecional é coordenada para desligar. Este caminho limita a tensão na chave e absorve parte da energia armazenada na indutância da linha.

O dispositivo *snubber* tem a finalidade de limitar a taxa de variação de tensão sobre a chave no momento do desligamento, mantendo-a abaixo do valor máximo permitido conforme com as especificações do fabricante.

Algumas topologias de LCCES do tipo série encontradas na literatura são: com chave SCR Bidirecional [8]; chave ETO Bidirecional [66]; chave GTO e disjuntor auxiliar à vácuo [67] e; chave IGBT e interruptor [68].

2.6.2. LCCES do Tipo Ponte

Os LCCESs do tipo ponte utilizam um arranjo de retificador de onda completa alimentado por uma fonte de tensão CC. Na prática, utilizam-se reatores em série com a fonte de tensão CC emulando uma fonte de corrente [65]. Essa topologia é apropriada para a aplicação alguns elementos semicondutores como diodos e tiristores. Esse tipo de limitador não utiliza ramo para o estado normal, pode ou não ter um ramo para a corrente de falta (Z_f) e contém varistores para a proteção contra sobretensão (Z_nO), mostrado na Figura 11 (a).

Quando se utiliza diodos, em condição normal, a fonte de corrente CC é ajustada para que os quatro diodos sempre estejam conduzindo durante o regime permanente, segundo a Figura 11 (b). Na falta, a corrente do sistema aumenta. Quando essa corrente de falta excede a corrente ajustada da fonte de tensão CC, os diodos são reversamente polarizados, fazendo com que o fluxo de corrente CA passe pelo reator, logo, limitando a corrente de falha, conforme mostrado na Figura 11 (c).

No caso de a ponte ser formada com chaves controladas ou semicontroladas, é possível interrupção da corrente CA ou desviar para um ramo de ramo da corrente de falta demonstrado por uma impedância Z_f , como mostrado Figura 11 (d).

Na literatura encontra-se as seguintes topologias de LCCES tipo ponte: LCC de *Inrush* de transformador com LCC de ponte retificada [69]; com ponte de SCR e 2 reatores [70]; meia ponte controlada de IGCT [71], [72]; ponte de IGCT com chave simples [73], [74] e; ponte de GTO com transformador isolado [75].

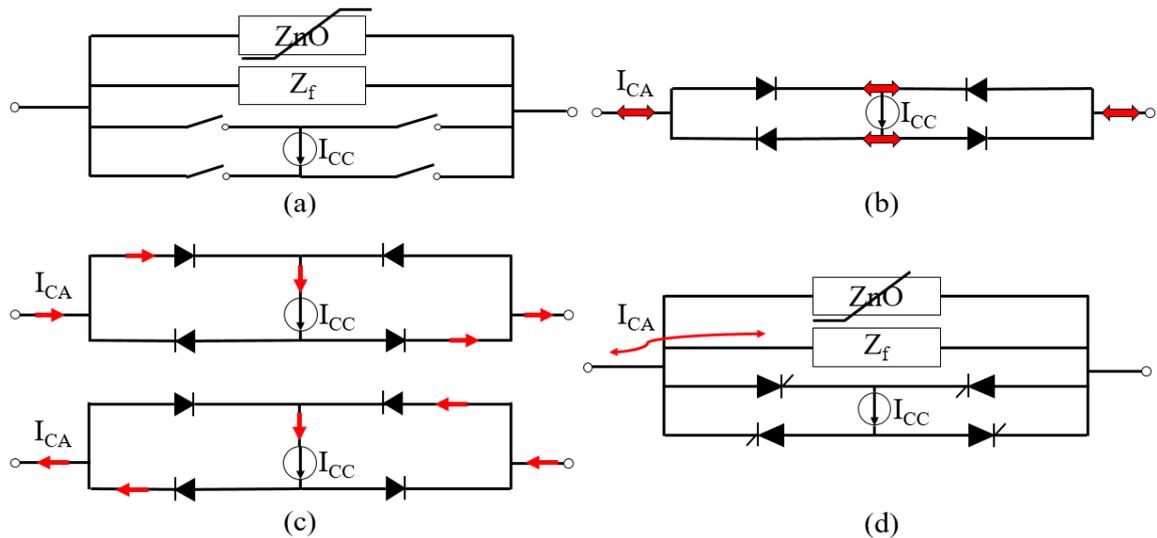


Figura 11 - (a) Topologia genérica do LCCES tipo ponte; (b) Estado normal; (c) falta de corrente alternada limitada pela fonte de corrente; (d) falta de corrente alternada limitada pela impedância Z_f . Adaptada de [65].

2.6.3. LCCES do Tipo Ressonante

O LCCES do tipo ressonante elimina os ramos de estado normal e de falta, descritos nos tópicos anteriores. Esses dispositivos utilizam chaves para ajustar tanto para o estado normal (EN) quanto para a condição de falta (CF), de acordo com a Figura 12. Esses LCCESs operam com circuito ressonante série em seu estado normal, ou seja, a chave não conduz neste momento. Para obter uma impedância equivalente próxima de zero, a ramificação com o indutor (L) e capacitor (C) é ajustada com precisão de acordo com a frequência da linha. Sob a condição de falta, a chave encontra-se conduzindo. Assim, é colocado fora da ressonância. Portanto, uma impedância é inserida na linha. Este tipo de LCCES pode reduzir a corrente de falta, mas não possui capacidade de interrupção [76]–[79].

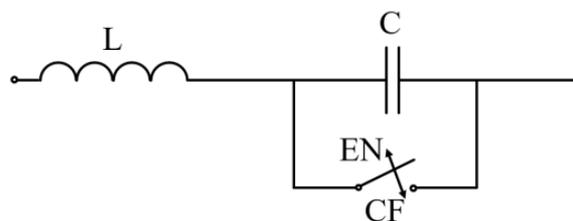


Figura 12 - LCCES do tipo ressonante básico. Adaptada de [65].

2.7. DISPOSITIVOS FACTS

Dispositivos FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission System*) são compostos por equipamentos que contém chaves de estado sólido utilizados para controle de sistemas de transmissão de energia elétrica de corrente alternada, com o objetivo de melhorar a

capacidade de controle e aumentar a robustez e confiabilidade da rede. Em geral é um dispositivo que torna o sistema mais flexível e controlável, através da utilização de eletrônica de potência.

Os equipamentos FACTS se classificam em três grupos: os equipamentos em série, os em derivação e os híbridos que combinam os equipamentos série e derivação simultaneamente. Abaixo encontram-se alguns dispositivos FACTS:

- Compensadores estáticos – SVC (*Static Var Compensator*) [80];
- Reator controlado por tiristor – TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) [81];
- Capacitor chaveado por tiristor – TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) [81];
- Capacitor série chaveado por tiristor – TSSC (*Thyristor Series Switched Capacitor*) [82];
- Capacitor série controlado por tiristor – TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) [80];
- Transformador defasador – PST (*Phase Shift Transformer*) [83];
- Compensador síncrono estático – STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) [80];
- Compensador síncrono estático série – SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) [80];
- Controlador universal de fluxo de potência – UPFC (*Unified Power Flow Controller*) [80];
- Controlador de fluxo de potência da rede – GPFC (*Grid Power Flow Controller*) [84].

Os dispositivos citados acima podem utilizar chaves de estado sólido que trabalham com comutação natural (tiristores) como também auto-comutados, com capacidade de corte, operando em comutação forçada (como o GTO – *Gate Turn-Off Thyristor*, GCT ou IGCT – *Integrated Gate-Commutated Thyristor* e o IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*).

Esses equipamentos podem ser aplicados em:

- Controle do fluxo de potência ativo e reativo;
- Amortecimento de oscilações eletromecânicas;
- Aumento da capacidade de transmissão;
- Limitação das correntes de curto-circuito.

A tecnologia FACTS envolve um conjunto de equipamentos os quais é preciso definir aquele que se encaixa melhor para uma aplicação específica. Dentre os equipamentos FACTS

mencionados no contexto, o promissor para a limitação de corrente de curto-circuito é o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*). Este dispositivo é utilizado para o controle de potência e amortecimento de oscilações de potência e podem ser utilizados como limitadores de corrente de curto-circuito [17].

A Figura 13 exibe o esquema básico do TCSC para limitar a corrente de curto-circuito. O circuito é composto por um banco de capacitor série em paralelo (C) à um reator (L) controlado por tiristores (RCT) e um para-raios (MOV – *Metal Oxide Varistor*) para proteção do capacitor.

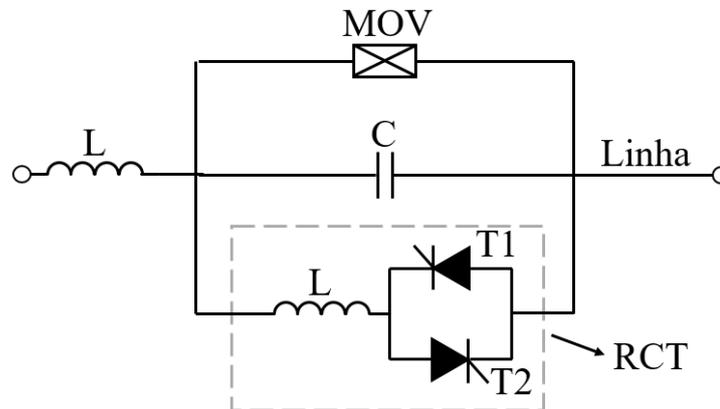


Figura 13 - Diagrama esquemático do TCSC para limitar a corrente de curto-circuito. Adaptada de [17].

Quando se combina o capacitor série convencional com os RCTs, possibilita-se o controle da impedância deste dispositivo. A finalidade do TCSC é ajustar a impedância de uma reatância capacitiva para uma reatância indutiva (chaveando os tiristores). Assim, pode ser utilizado para limitar as correntes de falta [17].

Para limitar a corrente de defeito, o TCSC precisa ser dimensionado para suportar as correntes de falta e disponibilizar uma alta impedância indutiva. Como consequência, o TCSC possui a necessidade de ser modificado, especificamente os valores nominais dos componentes como o para-raios (MOV) e a frequência de ressonância do circuito LC.

No Brasil, utiliza-se quatro TCSC nas interligações Norte-Sul I e II para amortecer as oscilações de potência. Nas subestações de Imperatriz (Eletronorte) e Serra da Mesa (Furnas), o TCSC instalado pode atuar como um limitador de corrente de curto-circuito.

Outro dispositivo baseado em tecnologia FACTS e que limita as correntes de falta, é um TPSC (*Thyristor Protected Series Compensation*), com um reator externo série. Este dispositivo também foi caracterizado anteriormente como um LCCES do tipo ressonante. A Figura 14 apresenta um diagrama simplificado deste dispositivo. Em operação normal, o

dispositivo opera com uma impedância nula (circuito LC em ressonância com a rede). No estado de falta, a chave semicondutora retira o capacitor do circuito, fazendo com que a impedância equivalente do circuito aumente, limitando a corrente de falta. O TPSC descrito é composto por uma tecnologia de disparo dos tiristores por luz (tecnologia LLT – *Light-Triggered Thyristor*) e um sistema de arrefecimento das válvulas por meio de dissipadores de calor [17].

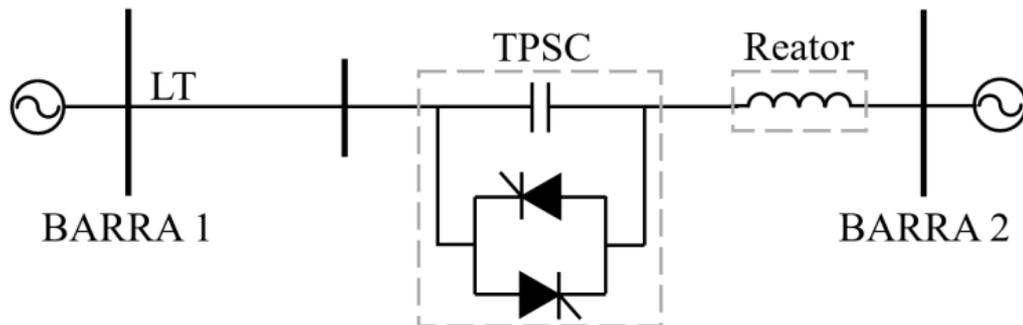


Figura 14 - Diagrama esquemático do dispositivo limitador baseado no TPSC. Adaptado de [17].

2.8. LCC SUPERCONDUTOR HÍBRIDO – LCCSH

Dentre as tecnologias apresentadas até o momento, destacam-se as que utilizam componentes do estado sólido e materiais supercondutores. Porém, conforme apresentado anteriormente, apesar de bastante promissoras, cada uma dessas tecnologias apresenta diferentes vantagens e desvantagens quando empregadas para limitação da corrente de curto-circuito. Uma das formas de unir as vantagens e contornar os problemas encontrados em cada uma das soluções apresentadas é a junção das duas tecnologias em um mesmo equipamento. Essa união caracteriza uma nova topologia de LCC, denominado LCCSH. Por exemplo, ao invés de se utilizar bobinas convencionais, existentes na maioria dos LCCs de estado sólido apresentados, pode-se optar por bobinas supercondutoras. As vantagens, apesar de um custo inicial mais elevado devido à utilização do material supercondutor, são a redução de perdas elétricas durante o regime normal de operação, uma vez que o supercondutor apresenta perdas nulas em corrente contínua e uma densidade de corrente superior ao condutor convencional.

No decorrer desta Seção descreve-se alguns conceitos de LCCSH encontrados na literatura. E a Seção seguinte apresenta-se a topologia do LCCSH proposto neste trabalho.

2.8.1. LCCSH do Tipo Ponte

O circuito elétrico mais simples apresentado para o LCCSH é composto por um retificador em ponte completa utilizando diodos ou tiristores, conectado a uma fonte de tensão CC ligada

em série a uma bobina supercondutora. No regime permanente, uma corrente contínua I_L maior que a corrente alternada I_{ac} , é fornecida pela fonte de tensão CC. Deste modo, em operação normal, todos os diodos da ponte operam em suas regiões de condução, fazendo com que a corrente I_{ac} não passe pela bobina. Nessa condição o circuito apresenta baixa impedância e as quedas de tensão e perdas são ocasionadas pelos elementos de estado sólido. No estado de falta, a corrente CA excede a corrente CC, os diodos são reversamente polarizados, fazendo com que o fluxo de corrente CA passe pelo reator. Nesta topologia substituiu-se uma bobina normal por uma bobina supercondutora para minimizar as perdas do sistema, portanto essa bobina não foi projetada para transitar quando ocorrer a falta. Em 1983 foi proposto um dos primeiros modelos unindo a ponte retificadora junto a um limitador de corrente [85], e a Figura 15 mostra o circuito proposto.

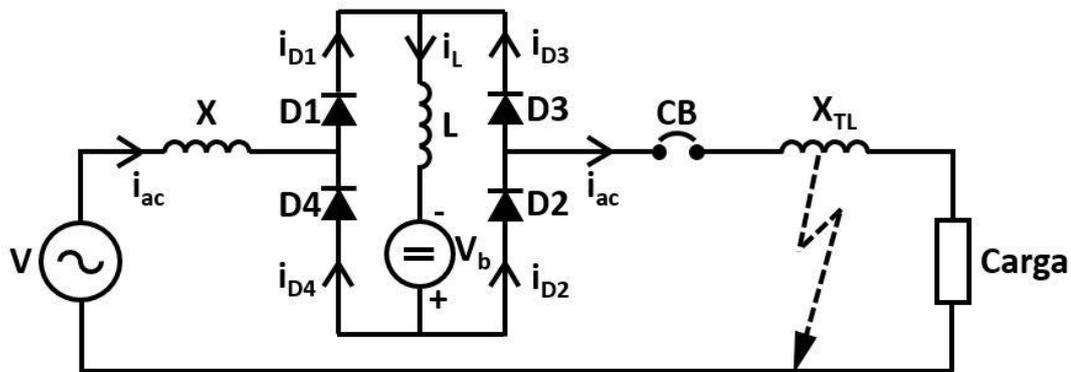


Figura 15 - LCCSH do tipo ponte de diodos. Adaptada de [85].

Com o avanço tecnológico das chaves semicondutoras, foram propostas diversas variantes do circuito básico, apresentado na Figura 15, visando a funcionalidade de limitar a corrente de falta. Em 2005, foi construído e testado uma topologia utilizando tiristores e um reator supercondutor, segundo as referências [86], [87]. Esse limitador híbrido foi denominado de LCC do tipo reator de corrente contínua trifásico. A Figura 16 é apresentado o circuito idealizado neste projeto. Uma vantagem desta topologia é a ausência do termo CC na corrente de falta, visto que o reator CC supercondutor previne o aumento abrupto desta corrente. Conseqüentemente, a corrente de falta aumenta gradualmente durante o período de duração do curto-circuito. Esse método torna a corrente controlável ao mesmo tempo que limita a mesma.

Já no Japão, em um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), foi construído um limitador de corrente tipo ponte com 66 kV e 750 A em operação nominal e obteve-se resultados com sucesso para a condição de curto-circuito. Foi utilizado um conjunto de bobinas para alcançar 75 mH, esse valor foi alcançado através de teste em condição de falta.

Parte do material supercondutor transitou para o estado normal provocando uma queda na corrente de curto [88]. A Figura 17 retrata o circuito simplificado deste LCCSH.

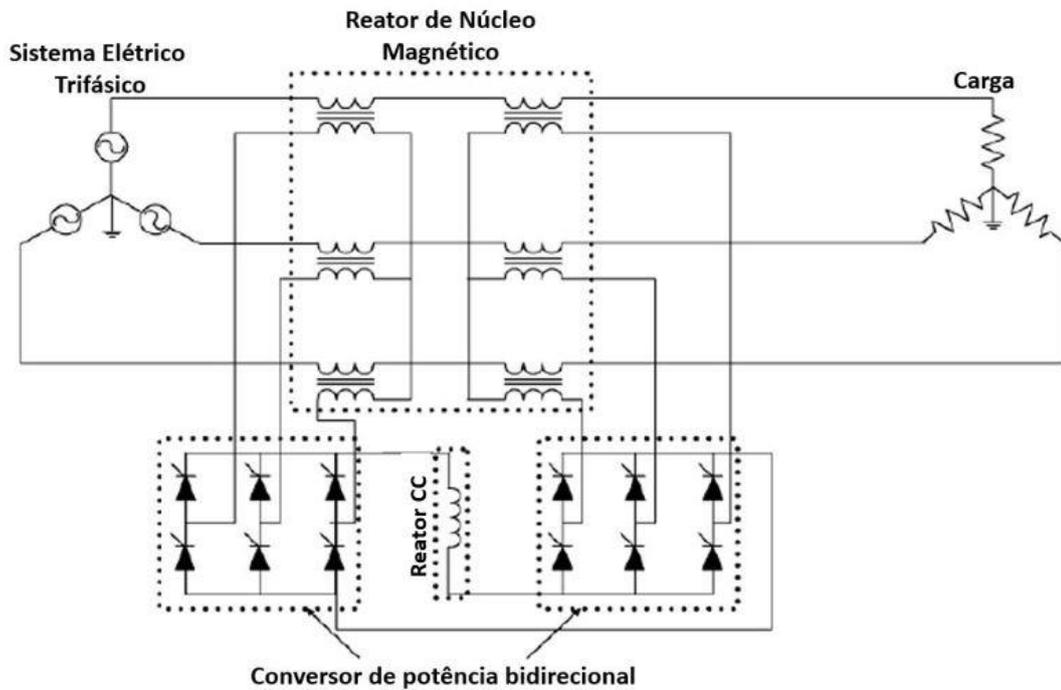


Figura 16 - LCCSH do tipo reator CC trifásico. Adaptada de [86].

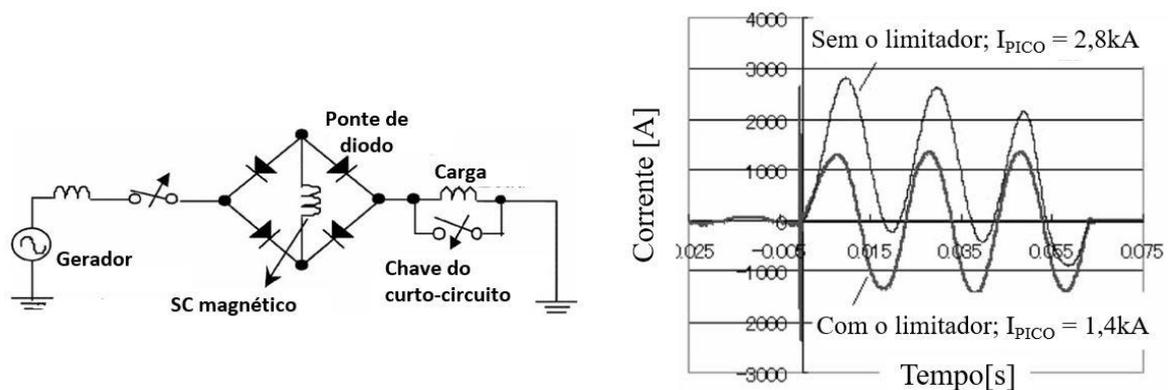


Figura 17 - LCCSH do tipo ponte. Adaptada de [88].

Em 2006 foi proposto outro protótipo de LCCSH do tipo retificador em ponte com reator CC supercondutor, e instalado na subestação Gaoxi em Hunan na China [89]. Os níveis de tensão e corrente utilizados nos testes foram de 10,5 kV e 1,5 kA respectivamente. A bobina supercondutora apresentou uma indutância de 6,25 mH. A corrente de curto trifásico sem o LCCSH alcançava valores de 3500 A, com a introdução do limitador reduziu-se para 635 A. Nesta topologia implantou-se IGCTs em paralelo a resistores conectados a ponte retificadora. A Figura 18 exibe o circuito utilizado. As vantagens deste protótipo foram: recuperação rápida e automática do equipamento para operação normal após a eliminação da falta; o fato do supercondutor não transitar para o estado normal durante a falta (*quenching*), uma vez que

este foi projetado apenas para minimizar as perdas do sistema; e uma menor perda devido a utilização de corrente contínua na bobina.

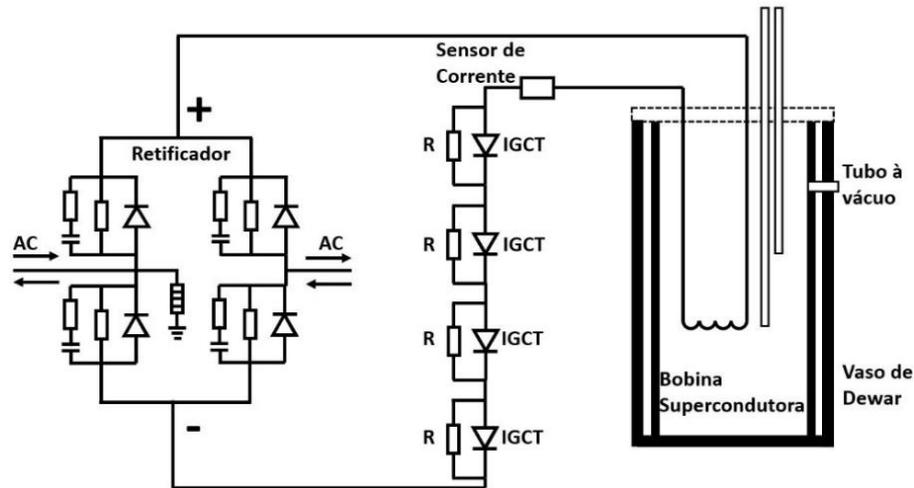


Figura 18 - LCCSH com IGCTs. Adaptada de [89].

A aplicação do LCCSH do tipo ponte possui a desvantagem de não apresentar a característica de falha segura, mesmo quando o supercondutor perca suas propriedades ou danifique no processo de limitação de corrente. Além disso, se ocorrer uma falha em um dos diodos da ponte retificadora, tem a possibilidade de gerar ocorrer um curto-circuito no LCCSH, fazendo com que o disjuntor atue, interrompendo o fornecimento de energia da rede. Estes problemas podem resultar em perdas relativamente altas [90].

2.8.2. LCCSH do Tipo Fault Current Controller (LCCSH-FCC)

Neste tipo de dispositivos limitadores são utilizados componentes de eletrônica de potência, tais como IGBTs e IGCTs. Com esses componentes é possível comandar a abertura e fechamento desses dispositivos, controlando totalmente a corrente de curto-circuito. Além deste controle, pode-se interromper a corrente. Devido ao controle das chaves de estado sólido e a interrupção completa da corrente do circuito é habitual nomear esses limitadores de Controladores de Corrente de Curto (em inglês, *Fault Current Controller- FCC*). Caso substitua os diodos do LCCSH tipo ponte por tiristores, esse limitador se comportaria como FCC [90].

O LCCSH do tipo FCC contém atributos similares ao do tipo ponte, e possui vantagem relacionada ao consumo de potência. Foi demonstrado em protótipo de laboratório, em 2013, que o FCC tem viabilidade para aplicação de limitação de corrente de falta [91]. Os ensaios

contaram com um sistema de controle embarcado, retificador composto por tiristores e uma bobina supercondutora, mostrada na Figura 19.

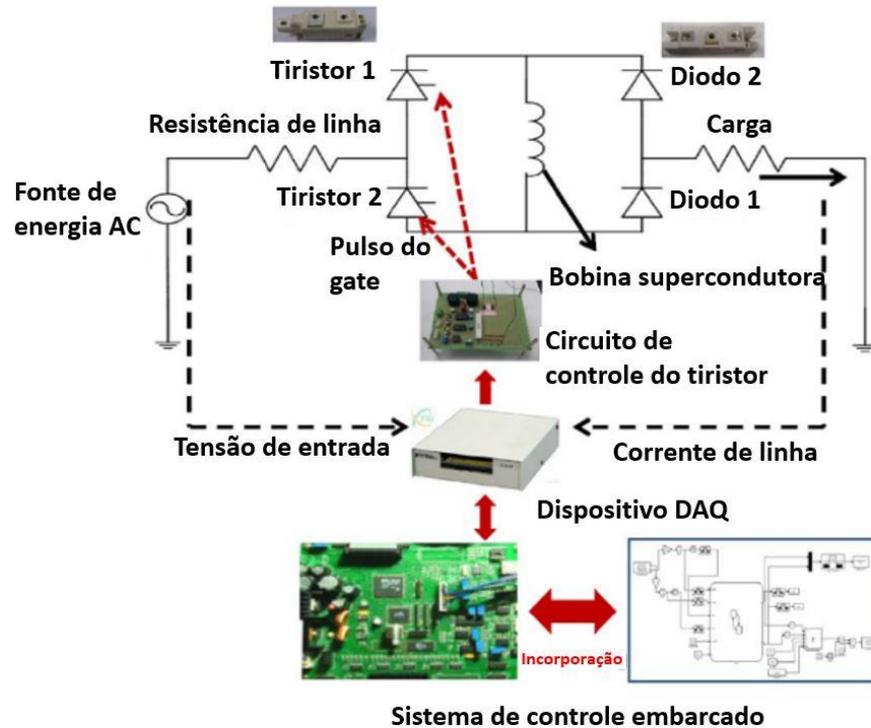


Figura 19 - Sistema inteligente LCCSH-FCC. Adaptada de [91].

Mesmo variando a carga do sistema, o controle identifica o ângulo de disparo adequado. Em seguida, envia o comando para os tiristores controlando o valor da corrente. Na Tabela 1 podem ser vistos os resultados encontrados.

Tabela 1 - Resultados de testes retirados de [91].

Carga conectada (Ω)	Corrente prospectiva (A_{pico})	Corrente limitada e controlada (A_{pico})
0,3	150	45
0,4	120	35
0,5	105	30
0,6	95	40

Realizou-se testes em escala maior em 2015 [92], quando comparado ao trabalho anterior, e demonstraram capazes de atuar em sistemas de distribuição. A classe nominal do equipamento é de 6,6 kV/100 A, sendo que a corrente prospectiva da ordem de 1,8 kA, e a corrente limitada e controlada menor que 1,2 kA. O protótipo utilizado no projeto e o resultado do experimento se encontram na Figura 20.

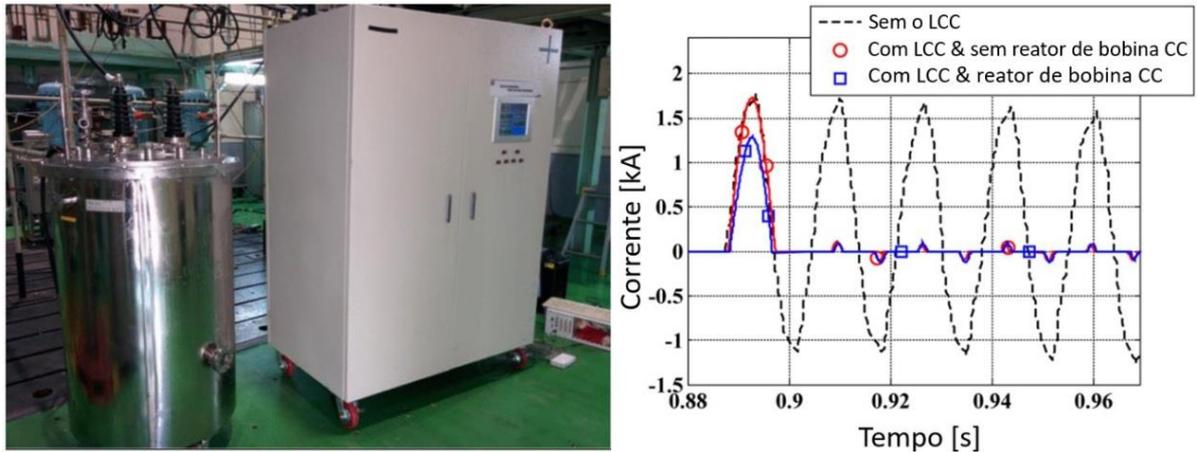


Figura 20 - O LCCSH-FCC e o resultado experimental. Adaptada de [92].

2.8.3. LCCSH do Tipo Fast Switching (LCCSH-FS)

Outro conceito de LCCSH foi proposto em [93]. Sua construção híbrida é composta por um material supercondutor com chaveamento rápido do circuito através de semicondutores, de modo que não sobrecarregue a bobina supercondutora. Assim sendo, o supercondutor não terá uma elevação de temperatura alta durante a limitação da corrente e, conseqüentemente, emprega-se um menor volume de material, menor custo, seguido pela diminuição do sistema criogênico [94]–[97].

O LCCSH-FS de [94] é composto por um supercondutor de alta temperatura, um resistor de $10\text{ m}\Omega$, um par de IGCT na linha primária e um interruptor a vácuo (chave rápida). Na Figura 21 pode-se observar a distribuição dos componentes no LCCSH-FS.

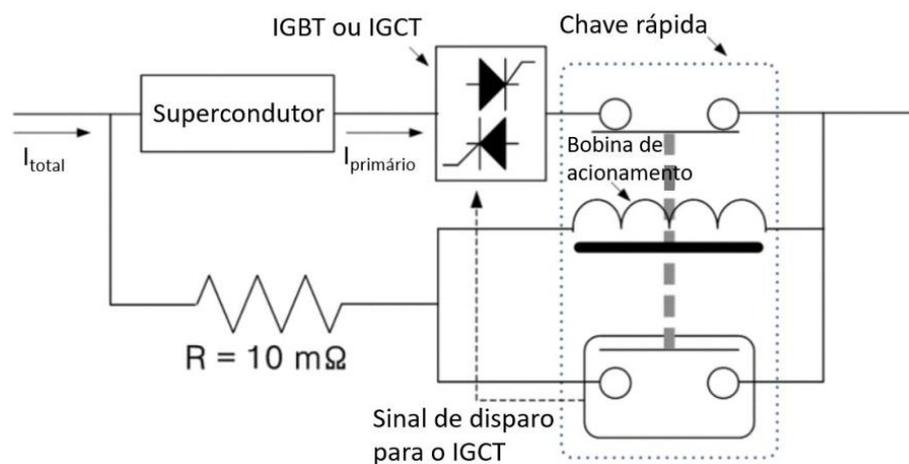


Figura 21 - LCCSH-FS. Adaptada de [94].

A topologia proposta de LCCSH-FS foi construída e testada afim de validar sua funcionalidade em limitadores de falta. Suas características nominais são um equipamento

trifásico operando a 22,9 kV, com corrente de 630 A. Realizaram-se ensaios de falta para os casos: fase-terra, fase-fase e falta trifásica, e todos mostraram que em até 5 ciclos a limitação foi bem-sucedida. Na Figura 22 é apresentado o resultado comparativo entre a corrente prospectiva e corrente limitada pelo LCCSH-FS.

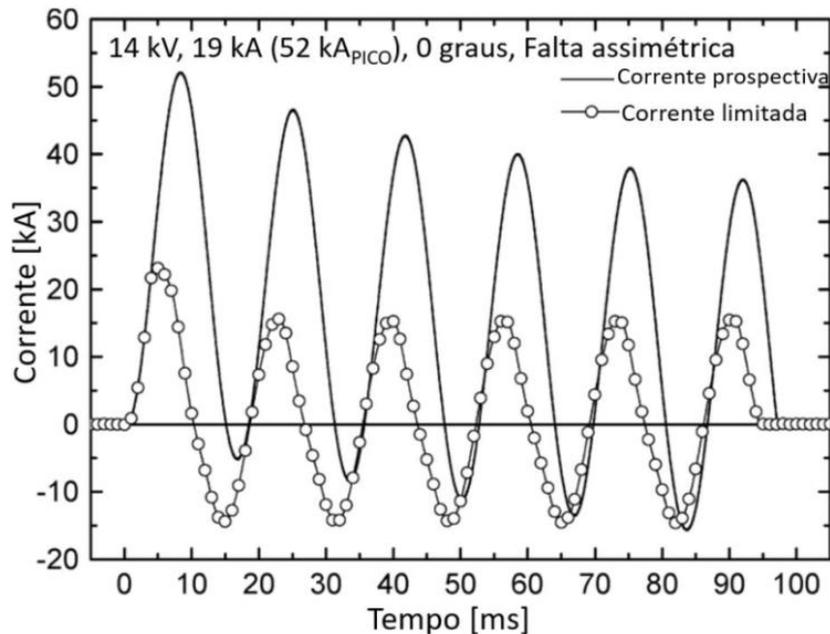


Figura 22. Limitação da corrente no LCCSH-FS. Adaptada de [94].

Em um projeto de P&D de [98], foi construído um equipamento limitador de corrente e está para ser instalado no sistema de distribuição KEPCO (*Korea Electric Power Corporation*). Este protótipo utiliza o princípio de *fast switch* e um elemento supercondutor, e o resultado apresentado foi positivo em relação à limitação de corrente de falta e ao tempo de recuperação do sistema após a falta (na ordem de 50 ms). Contudo, a corrente foi limitada após o primeiro ciclo. As informações do projeto do limitador localizam-se em [98], e visualiza-se a estrutura física do projeto que será ligado ao KEPCO na Figura 23.

Os elementos supercondutores não são utilizados para a limitação da corrente de falta no projeto [98], mas sim no sentido de ativar a bobina de acionamento do controle. A impedância (CLR) que limita a corrente deve ser inserida após meio ciclo e seu valor é controlado coma demanda da rede. O esquema de ligação e um dos resultados do projeto é apresentado na Figura 24, onde comprova-se a capacidade de limitação durante a falta.



Figura 23 – Equipamento LCCSH-FS a ser conectado ao KEPCO [98].

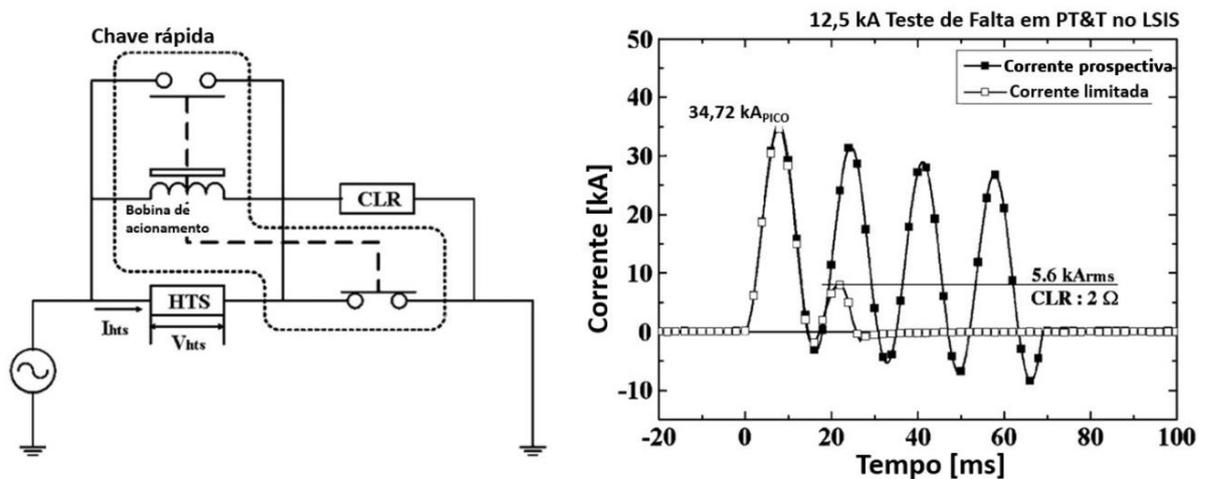


Figura 24 - Circuito e resultado do LCCSH-FS. Adaptado de [98].

2.9. LCCSH DO TIPO INDUTOR SÉRIE CHAVEADO POR TIRISTORPROPOSTO

Neste trabalho foi proposto um LCCSH do tipo indutor série chaveado com a seguinte topologia apresentada na Figura 25: uma bobina a ar é conectada em paralelo em relação a um ramo. Este ramo é composto por um conjunto de chaves semicondutoras controladas em antiparalelo (tiristores) em série com o elemento supercondutor (resistência variável – R_{fitaH}).

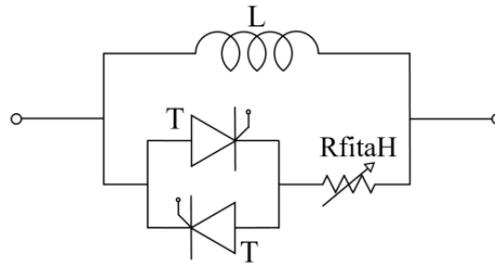


Figura 25 - Circuito do LCCSH do tipo indutor série chaveado proposto.

Esta topologia de LCCSH foi estudada para que utilizasse o mínimo de componentes elétricos, e ainda para que utilizasse apenas componentes comercialmente disponíveis, evitando assim o desenvolvimento de componentes específicos, mais precisamente com a substituição das chaves rápidas por chaves semicondutoras de potência. Outro objetivo deste trabalho é unir as características dos LCCS e do LCCES.

2.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados: as terminologias e características inerentes à corrente de curto-circuito, o limitador de corrente de curto-circuito e os parâmetros de interesse. Também foram apresentadas diversas topologias de LCCs baseados em diferentes tecnologias. Algumas se destacam pelo nível de maturidade e desenvolvimento tecnológico, sendo disponíveis comercialmente, enquanto outros estão em fase de pesquisa e desenvolvimento como os Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutor, de estado sólido e até mesmo os híbridos.

Baseando-se nas topologias descritas ao longo deste capítulo a respeito das tecnologias de LCCs, propôs-se um LCCSH do tipo indutor chaveado por tiristor, por ser identificado como uma tecnologia promissora para estudo, visando o desenvolvimento de um protótipo laboratorial.

CAPÍTULO 3 - SUPERCONDUTIVIDADE, MATERIAIS SUPERCONDUTORES E MODELAGEM DO ELEMENTO SUPERCONDUTOR

Este capítulo apresenta uma breve história da supercondutividade, incluindo os principais conceitos físicos, os tipos e classificações dos materiais supercondutores, projetando a contextualização e compreensão dos fenômenos que regem o funcionamento dos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores. Também será descrito a modelagem da fita supercondutora através de sua analogia eletrotérmica.

3.1. SUPERCONDUTIVIDADE

Uma das propriedades de certos materiais, relacionadas ao fenômeno da supercondutividade, manifesta-se quando estes apresentam uma resistência elétrica nula em corrente contínua quando submetidos abaixo de determinada temperatura, denominada temperatura crítica.

Em 1911, o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes, descobriu este fenômeno a partir de suas investigações sobre a resistividade de metais, quando submetidos a temperaturas abaixo de 4 Kelvin [99], através de hélio líquido, constatando-se uma resistência praticamente nula [100]. Além da temperatura crítica (T_c), outros dois parâmetros influenciam diretamente na supercondutividade: o campo magnético crítico (H_c) e a densidade de corrente crítica (J_c). O primeiro está relacionado ao máximo valor de campo magnético no qual o material está submetido e o segundo à máxima densidade de corrente que pode circular pelo material supercondutor para que ocorra a mudança de estado. Os dois parâmetros (H_c e J_c) são dependentes da temperatura.

Outra particularidade associada aos materiais supercondutores, é que estes são diamagnéticos perfeitos [101], isto é, o estado supercondutor não se caracteriza apenas pela resistividade nula, mas também pela exclusão do fluxo magnético no interior do material supercondutor a uma temperatura abaixo de T_c , quando submetido a um campo magnético externo. Esta propriedade foi descoberta em 1933 e nomeada de efeito Meissner-Ochsenfeld homenageando aos físicos alemães Walther Meissner e Robert Ochsenfeld.

A Figura 26 apresenta a correlação entre os parâmetros dos supercondutores classificados como Tipo I. Seja qual for o ponto dentro do volume envolvido pela superfície em azul, o material encontra-se em seu estado supercondutor ($T < T_c$, $H < H_c$ e $J < J_c$). Em contrapartida, qualquer ponto fora deste volume o material encontra-se em seu estado normal ($T > T_c$, $H > H_c$ e $J > J_c$).

Já os supercondutores do Tipo II apresentam um estado denominado misto, contendo dois campos críticos: campo crítico inferior (H_{c1}) e campo crítico superior (H_{c2}). O estado supercondutor com expulsão total do fluxo interno (Efeito Meissner-Ochsenfeld) ocorre para campos inferiores a H_{c1} ($H < H_{c1}$). Para campos superiores a H_{c2} ($H > H_{c2}$) o supercondutor transita para o estado normal. Apesar disso, os campos aplicados superiores a H_{c1} e inferiores a H_{c2} ($H_{c1} < H < H_{c2}$), o fluxo inicia a penetração no supercondutor na forma de fluxo

quantizado, circulado por micro correntes de blindagem denominados vórtices, estes vórtices serão explicados na Seção 3.3.

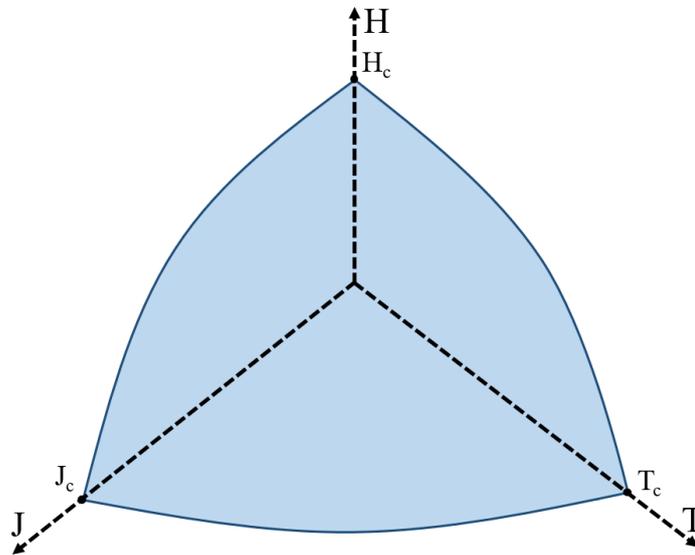


Figura 26 - Correlação das condições para supercondutividade nos supercondutores do Tipo I.

O estado misto foi confirmado experimentalmente e teoricamente por Shubnikow [102] em 1937 e Abrikosov [103] em 1957, respectivamente.

A Figura 27 exhibe a correlação das condições para supercondutividade nos supercondutores do Tipo II [100], nas quais encontram-se dois volumes referentes aos estados diamagnético perfeito e misto, traçados pelos parâmetros T_c , H_{c1} e J_{c1} , e T_c , H_{c2} e J_{c2} , respectivamente. Externamente do volume referente ao estado misto, o material se encontra no estado normal.

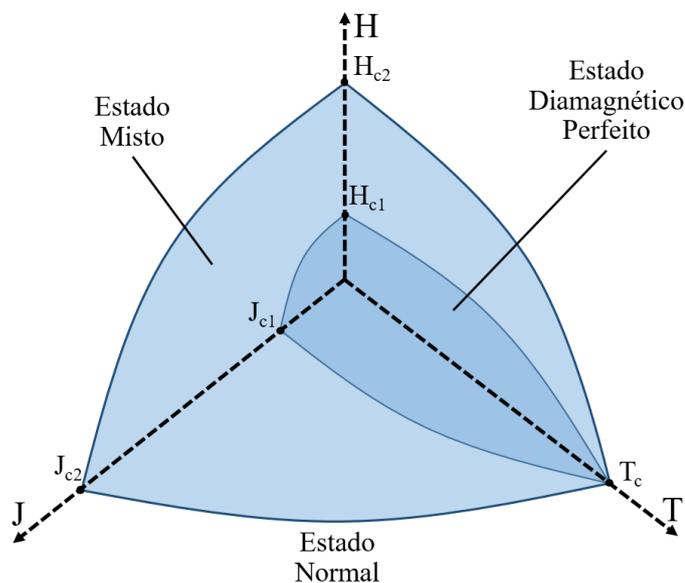


Figura 27 - Diagrama de fases de um supercondutor do Tipo II.

3.2. SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA

Desde a descoberta da supercondutividade, entre 1911 e 1986, os materiais supercondutores estudados estavam limitados à temperatura crítica (T_c) de 23,2 K para o nióbio-germânio (Nb_3Ge) [20]. Para a refrigeração utilizava-se a liquefação do hélio (He), a temperatura de 4,2 K, este arrefecimento apresenta um alto custo devido ao fato de ser um gás nobre e baixa disponibilidade, além da necessidade de equipamentos sofisticados [104].

Em 1986, Georg Bednorz e Alex Müller descobriram a supercondutividade do composto $Ba_x La_{5-x} Cu_5 O_y$ com temperatura crítica entre 30 K e 40 K [105]. A partir de então deu-se início às pesquisas dos chamados supercondutores de alta temperatura (em inglês, *High Temperature Superconductors* – HTS).

Supercondutores de alta temperatura crítica são os que possuem temperatura crítica acima de 25 K. Nos dias de hoje, há supercondutores com T_c acima de 130 K [19]. Os supercondutores com T_c acima de 77 K (compostos como $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ (BSCCO) e $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO)) possuem vantagens, pelo fato de ser esta a temperatura de liquefação do nitrogênio. O nitrogênio é relativamente barato e fácil de liquefazer, e é o elemento mais abundante da atmosfera terrestre, o que amplia potencialmente as aplicações tecnológicas dos supercondutores. A Tabela 2 apresenta alguns supercondutores, indicando a T_c e o ano de sua descoberta.

Os compostos como BSCCO e YBCO, são considerados os mais interessantes supercondutores de alta temperatura para aplicações em engenharia. Suas características são: T_c acima de 77 K; esses materiais possuem alto J_c ; alta anisotropia (algumas propriedades físicas variam ao longo de uma determinada direção); existência de camadas estruturais tipo Cu-O (encarregados pelo transporte da corrente; são supercondutores do Tipo II. As desvantagens destes compostos que são susceptíveis à ruptura durante a instalação e durante a operação para construção de um limitador de corrente de curto-circuito [107].

Os cabos e fitas compostos por BSCCO são intituladas como fitas de primeira geração (1G-HTS) na literatura [108]. O BSCCO encontra-se em duas variações principais: $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ (Bi2212), muito utilizado para produção de compostos massivos como barras, cilindros e discos, e $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Bi2213), que é mais apropriado para fabricação de fitas e cabos supercondutores.

Tabela 2 - Supercondutor, T_c e ano de descoberta de alguns materiais supercondutores. Adaptada de [106].

Composição do supercondutor	T_c [K]	Ano
Hg	4,1	1911
Pb	7,2	1913
Nb	9,2	1930
NbN _{0,96}	15,2	1950
Nb ₃ Sn	18,1	1954
Nb ₃ Ti	10	1962
Nb ₃ (Al _{0,75} Ge _{0,25})	20-21	1966
Nb ₃ Ga	20,3	1971
Nb ₃ Ge	23,2	1973
Ba _x La _{5-x} Cu ₅ O _y	30-35	1986
(La _{0,9} Ba _{0,11}) ₂ Cu _{4-δ} (1 GPa)	52	1986
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	92	1987
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	1988
Ti ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	1988
Ti ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (7 GPa)	131	1993
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ}	133	1993
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ} (25 GPa)	155	1993
Hg _{0,8} Pb _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	133	1994
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ} (30 GPa)	164	1994
Hg _{0,8} Ti _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ} (30 GPa)	138	1995
MgB ₂	39	2001

Já as fitas supercondutoras formadas com YBCO são classificadas como segunda geração (2G-HTS). Quando o Ítrio é substituído pela maioria dos elementos de terras-raras (La, Nd, Gd, Lu, Ho, Sm, Eu, Dy, Er, Tm, Yb), as propriedades supercondutoras praticamente não se alteram. Como o YBCO apresenta fraca ligação entre os grãos supercondutores, mas um bom desempenho em relação a campos magnéticos, este composto é adequado para a fabricação de fitas supercondutoras. As fitas são desenvolvidas mediante estrutura de camadas orientadas, depositadas sob um substrato metálico, que proporcionou sua fabricação em comprimentos maiores, com potencial de redução de custo em larga escala de produção. Além de que, as fitas 2G ostentam maior J_c se comparadas às 1G [104], [109].

Atualmente, após mais de um século de pesquisa, os conceitos aplicados para explicar e descrever o comportamento dos materiais supercondutores até o momento estão incompletos e são insuficientes para prever completamente sua fenomenologia que abrange a supercondutividade, particularmente no caso dos supercondutores de alta temperatura crítica. Apesar disso, aplicações da supercondutividade na engenharia elétrica vêm sendo realizadas com sucesso e a produtividade neste ramo é intensa. Podemos citar as seguintes aplicações [108] (As aplicações não são exclusivas para supercondutores do Tipo II):

- Cabos de transmissão de energia elétrica;
- Limitadores de corrente de curto-circuito;
- Dispositivos armazenadores de energia supercondutores (SMES – *Superconducting magnetic energy storage* e *Flywheel* – armazenadores cinéticos de energia);
- Motores, geradores e transformadores;
- Trens de levitação magnética (MagLev);
- Mancais magnéticos;
- Bobinas para ressonância magnética nuclear;
- Bobinas para separador magnético industrial;
- Grandes projetos científicos tais como Grande Colisor de Hádrons (LCH – *Large Hadron Collider*);
- Dispositivo supercondutor de interferência quântica;
- Ressonância magnética nuclear.

Considerando a possibilidade de produção em larga escala e algumas propriedades físicas como: campo magnético crítico mais elevado e facilidade de refrigeração com o nitrogênio líquido, escolheu-se as fitas supercondutoras formadas por GdBCO 2G-HTS para a simulação e construção do LCCSH deste trabalho, cujo princípio de funcionamento é explicado com mais detalhes na seção seguinte.

3.3. DINÂMICA DOS VÓRTICES

Conforme citadas na seção 3.2, as fitas 2G-HTS foram selecionadas para simular suas aplicações em LCCSH. Como esses supercondutores de alta temperatura apresentam um estado misto, são classificados como Tipo II, no qual é possível existir regiões no estado normal, em que há penetração de linhas de campo, dentro do material no estado supercondutor. Regiões conhecidas como vórtices (fluxóides), onde carrega um fluxo quantizado (ou *fluxon*, Φ), cujo valor é $2,07 \times 10^{-15}$ Wb [107].

Os vórtices formados no estado misto representam uma região que possui formato tubular, onde em seu interior a supercondutividade é destruída. Em torno de cada vórtice fluem supercorrentes que blindam a região em estado supercondutor da região interna do vórtice, que se encontra em estado normal, conforme mostra a Figura 28 (a).

A Figura 28 (b), apresenta a penetração da densidade de campo magnético no vórtice, que se dá numa distância da ordem da profundidade de penetração λ , atingindo seu máximo no centro de cada vórtice.

A medida que os vórtices penetram no supercondutor, surge uma força de repulsão entre eles, no qual é balanceada pela força exercida pelo campo magnético externo. Quando o supercondutor é submetido a uma densidade de corrente (\vec{J}), como indicado na Figura 28 (a), haverá uma interação entre a densidade de corrente com cada vórtice, somadas as suas supercorrentes, dada em (3):

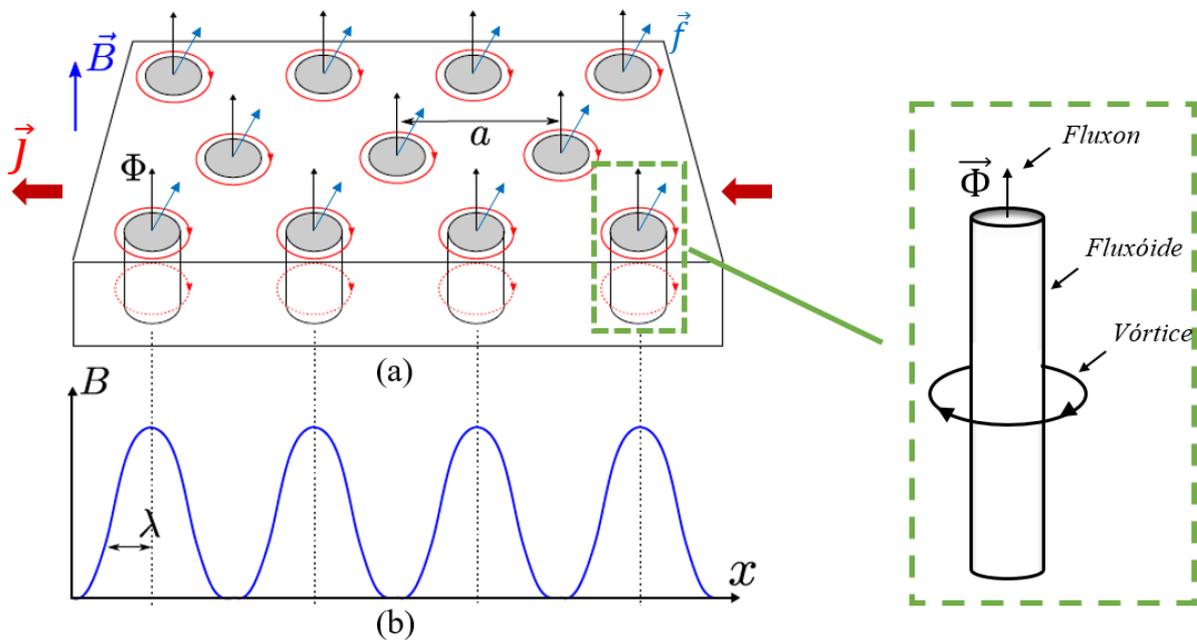


Figura 28 – (a) Distribuição de vórtices formado no estado misto, (b) a variação de campo magnético.

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{\Phi} \quad (3)$$

onde \vec{f} é a força exercida em cada vórtice, causada por \vec{J} . A interação de cada vórtice, chamada de Força de Lorentz, resulta em uma força volumétrica (\vec{F}_L) em todo o material supercondutor, descrita em (4).

$$\vec{F}_L = \vec{J} \times k\vec{\Phi} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (4)$$

onde \vec{B} é a densidade de fluxo magnético, resultante do produto entre *fluxon* e o número de vórtices por unidade de área (k). Dado que estes vórtices se movam com uma velocidade (\vec{v}), surge uma força eletromotriz induzida, ou um campo elétrico (\vec{E}) induzido, em paralelo à direção da densidade de corrente, conforme relacionados em (5).

$$\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v} \quad (5)$$

O campo elétrico, relacionada ao deslocamento do vórtice, causa dissipação de energia térmica, decorrente à potência transportada pela densidade de corrente para movimentar lateralmente a rede de vórtices. Este efeito resulta em um aumento de temperatura no material, podendo causar a transição para o estado normal, caso o valor de T_c seja superado.

Em materiais supercondutores reais, com as variações locais de profundidade de penetração, comprimento de coerência, ou H_c , causados por fatores de impurezas, fronteiras de grão, poros e demais imperfeições, geram uma força de aprisionamento de fluxóides (ou *pinning force*, \vec{F}_p) no qual se contrapõe à força de Lorentz (\vec{F}_L), dificultando a rede de vórtices deslocar e permitindo que haja condução corrente pelo supercondutor no estado misto, sem dissipação de energia.

A força de Lorentz aumenta de acordo com a densidade de corrente, quando esta força ultrapassa a força de aprisionamento, o supercondutor passa a apresentar um estado dissipativo (condutividade finita). Quando a densidade de corrente que gera a força de Lorentz for igual a força de aprisionamento, esta densidade é chamada de densidade de corrente crítica J_c , de forma que podemos observar, de forma simplificada, dois regimes de operação:

- Regime não dissipativo: $|\vec{J}| < |\vec{J}_c| \rightarrow |\vec{F}_L| < |\vec{F}_p|$
- Regime dissipativo: $|\vec{J}| > |\vec{J}_c| \rightarrow |\vec{F}_L| > |\vec{F}_p|$

Consequentemente, a densidade de corrente crítica J_c para os supercondutores do Tipo II, refere ao limite de densidade de corrente que o supercondutor consegue suportar no regime não dissipativo, e deste modo antes do aparecimento de resistência elétrica [110].

A corrente crítica J_c pode ser aumentada com a introdução de centros de aprisionamento de vórtices em seu processo de produção. Entretanto, este aumento de J_c possui um limite teórico, conhecido como densidade de deparamento J_d (*deparing critical current*) [111].

3.4. CURVA E-J

Para a aplicação de supercondutores, a informação do valor da densidade de corrente crítica (J_c) é fundamental, principalmente em supercondutores de alta temperatura crítica. Esta especificação pode ser obtida através medições de densidade de corrente (J), aplicada em uma amostra de material supercondutor, a partir de resistividade ou campo elétrico. Baseando-se

que em um determinado campo elétrico crítico (E_c), o supercondutor transita para o estágio dissipativo e assim sendo, a corrente aplicada é igual à corrente crítica ($J = J_c$). Geralmente, este método adota o seguinte valor para esta constante [112], [113].

$$E_c = 1\mu V/cm. \quad (6)$$

No momento em que a densidade de corrente aplicada é baixa, e gera forças de Lorentz inferiores à corrente de aprisionamento, há uma ausência na movimentação da rede de vórtices. Na medida em que se aplica uma corrente crescente no material supercondutor, verifica-se que em algum momento o campo elétrico (E) o ultrapassa o valor E_c . Nesta transição pode-se identificar 3 estágios:

Flux Creep: estágio onde há uma lenta movimentação dos vórtices e campo elétrico superior a E_c , uma vez que a densidade de corrente gera forças de Lorentz superiores, mas aproximadamente as mesmas ordens de grandeza das forças de aprisionamento.

Flux Flow: estágio onde os vórtices possuem movimentação livre no material supercondutor, dado que, a densidade de corrente produz forças de Lorentz bastante superior as forças de aprisionamento.

Normal: estágio onde o material não apresenta nenhuma propriedade supercondutora, portando sua resistividade varia linearmente com a temperatura.

Quando não há campo magnético externo aplicado sobre o supercondutor, o campo elétrico pode ser determinado em função da densidade de corrente e da temperatura, conforme detalhado em (7), esta equação pode ser utilizada para descrever os três estágios principais da curva E-J [24].

$$E(J, T) = E_c \left[\frac{J}{J_c(T)} \right]^n. \quad (7)$$

Na literatura existem diferentes formas de modelagem da curva E-J, e (7) oferece resultados satisfatórios para os supercondutores de alta temperatura crítica [114], particularmente em aplicações de limitação de corrente de curto-circuito.

Em (7), J_c diminui com a elevação da temperatura, provocando o aumento do campo elétrico, trazendo a curva para cima. No caso de materiais supercondutores resfriados por nitrogênio líquido, a variação entre J_c e a temperatura pode ser modelada linearmente quando o sistema opera em 77 K (temperatura de ebulição do nitrogênio líquido) e a temperatura crítica (T_c), segundo (8) [24].

$$J_c(T) = J_{c(77\text{ K})} \left[\frac{T_c - 77}{T_c - T} \right]^n \quad (8)$$

Ainda em (7), n é denominado de índice de transição e possui uma forte ligação com o tipo de material e do estágio de transição [113]. Tendo como exemplo, o material Bi-2212, no estágio *flux creep* o n varia entre 5 e 15, no estágio *flux flow* entre 2 e 4 [114], [115]. No caso dos supercondutores do tipo YBCO, no estágio *flux creep* o n varia entre 20 e 30, no estágio *flux flow* entre 2 e 5 [115], [116]. Considera-se que para o estado normal os materiais supercondutores apresentando características de resistividade linear, isto é, $n = 1$.

A Figura 29 apresenta um exemplo genérico de curva E-J, em escala logarítmica, estereotipando os 3 estágios da transição.

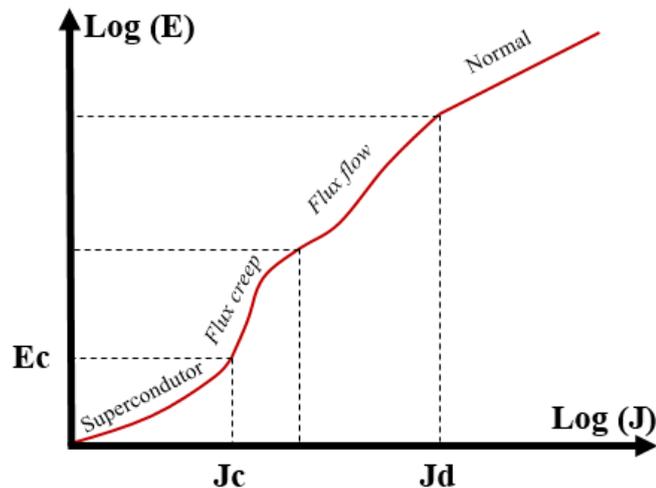


Figura 29 - Curva E-J genérica de um material supercondutor de alta temperatura, na escala logarítmica.

A caracterização do comportamento de transição dos estágios, e suas fórmulas matemáticas são importantes, dado que são aplicadas para modelagem de limitadores em simulações computacionais neste trabalho. O material supercondutor utilizado neste trabalho foi o tipo GdBCO, nas simulações aplicou-se os índices de transição: $n = 30$ para o estágio *flux creep* e $n = 5$ para o estágio *flux flow*.

3.5. MODELAGEM DO SUPERCONDUTOR

Para desenvolver um modelo da fita supercondutora, que permita representar o comportamento de um material supercondutor real, este trabalho utiliza como base o projeto ENSYSTROB [11], [12], e outros trabalhos encontrados na literatura [19], [24], [106]. Para o modelo considerou-se a aplicação de uma analogia eletrotérmica, que faz uso do acoplamento das equações elétricas e térmicas, para a representação do comportamento da fita supercondutora.

As fitas de segunda geração (*2G High Temperature Superconductor*), utilizadas como base para as simulações são do composto $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (GdBCO), modelo SANn12500 da SuNAM Co.. Este modelo é composto por 4 camadas, como apresentado na Figura 30: o revestimento de prata foi denominado de prata superior e prata inferior (encarregados pela estabilização térmica e proteção da camada supercondutora); o material supercondutor $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$; e o substrato de aço inox (minimiza os esforços mecânicos devido a contração térmica). As características desta fita 2G são: largura de 1,2 cm; corrente crítica de 500 A para temperatura de 77 K; temperatura crítica (T_c) de 92 K e; o tempo de suportabilidade na condução de corrente em estado normal é de 100 ms sem que ela danifique [11].

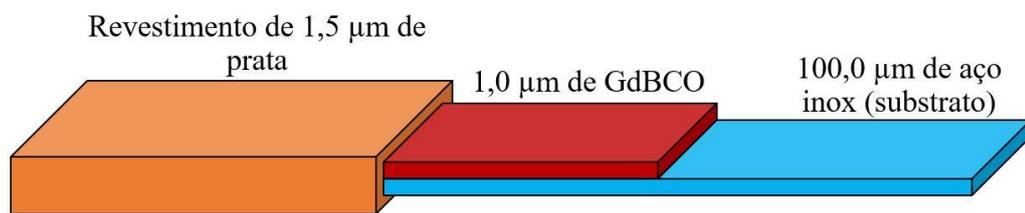


Figura 30 - Espessura de cada camada da fita 2G GdBCO, modelo SANn12500.

3.5.1. Equivalente Elétrico

Seguindo a modelagem da fita 2G GdBCO (R_{fita}), estabeleceu-se que a fita em sua seção transversal representa um conjunto de 4 resistências em paralelo, variáveis com a temperatura, correspondendo a cada camada [26]. Todas as resistências e outros parâmetros como corrente, resistividade e temperatura, por exemplo, foram enumeradas como indicado na Figura 31.

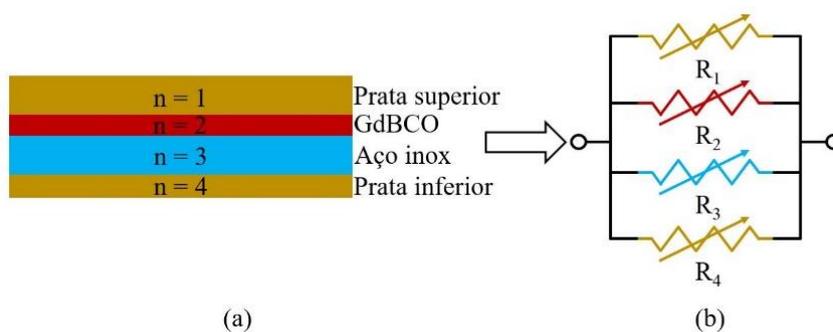


Figura 31 - (a) Seção transversal da fita 2G GdBCO; (b) representação elétrica de R_{fita} .

As resistividades elétricas dos materiais possuem um comportamento linear em relação à temperatura, exceto o GdBCO, quando este se encontra abaixo da temperatura crítica ($T_c = 92\text{K}$), apresenta uma relação não linear. As equações (9) e (10) correspondem ao comportamento linear das resistividades em $[\Omega \cdot \text{cm}]$ da prata e do aço inox respectivamente.

$$\rho_{1,4} = (-2,082 \cdot 10^{-7}) + (6,17 \cdot 10^{-9} * T_{1,4}) \quad (9)$$

$$\rho_3 = 1,193 \cdot 10^{-4} - 7,529 \cdot 10^{-5} e^{-\frac{T_3}{647,113}} \quad (10)$$

Em relação ao supercondutor GdBCO, o comportamento da resistividade elétrica é distinto quando a temperatura está acima ou abaixo da T_c . Para temperaturas menores que T_c ($T_2 < T_c$), a resistividade é uma função entre o campo elétrico (E) e a densidade de corrente (J), através da relação conhecida com curva E-J [117], e matematicamente expressa em (11). Acima da T_c , o material apresenta resistividade elétrica variando linearmente com a temperatura, conforme expresso em (12).

$$\rho_2 = \frac{E}{J}, (T_2 \leq T_c) \quad (11)$$

$$\rho_2 = -0.1 + (10^{-2} \cdot T_2), (T_2 > T_c) \quad (12)$$

A resistência elétrica de cada camada (R_n) apresentada na Figura 31 é dada por (13), onde d_n , l_n e e_n são respectivamente, o comprimento, a largura e a espessura de cada camada. O cálculo da resistência equivalente da fita (R_{fita}) é determinado através do paralelismo entres as n camadas, conforme (14).

$$R_n = \rho_n \cdot \left[\frac{d_n}{l_n \cdot e_n} \right] \quad (13)$$

$$\frac{1}{R_{fita}} = \left(\frac{1}{R_1} \right) + \left(\frac{1}{R_2} \right) + \left(\frac{1}{R_3} \right) + \left(\frac{1}{R_4} \right) \quad (14)$$

Para a modelagem térmica, necessitou a verificação da variação de temperatura devido a potência dissipada no interior de cada camada, portanto calcula-se a corrente que atravessa em cada camada (i_n), por meio de divisor de corrente dado em (15), na qual i_{fita} é a corrente total que passa na fita.

$$i_n = \left(\frac{R_{fita}}{R_n} \right) \cdot i_{fita} \quad (15)$$

Como não há linearidade da resistividade do supercondutor, durante a variação de temperatura em relação à curva E-J, e sua relação direta com a corrente que está conduzindo na fita, é necessário a utilização de um método iterativo para o cálculo da corrente que a atravessa em função da resistividade calculada. O processo iterativo reduz a instabilidade numérica do material supercondutor na simulação. O fluxograma na Figura 32 apresenta o processo iterativo.

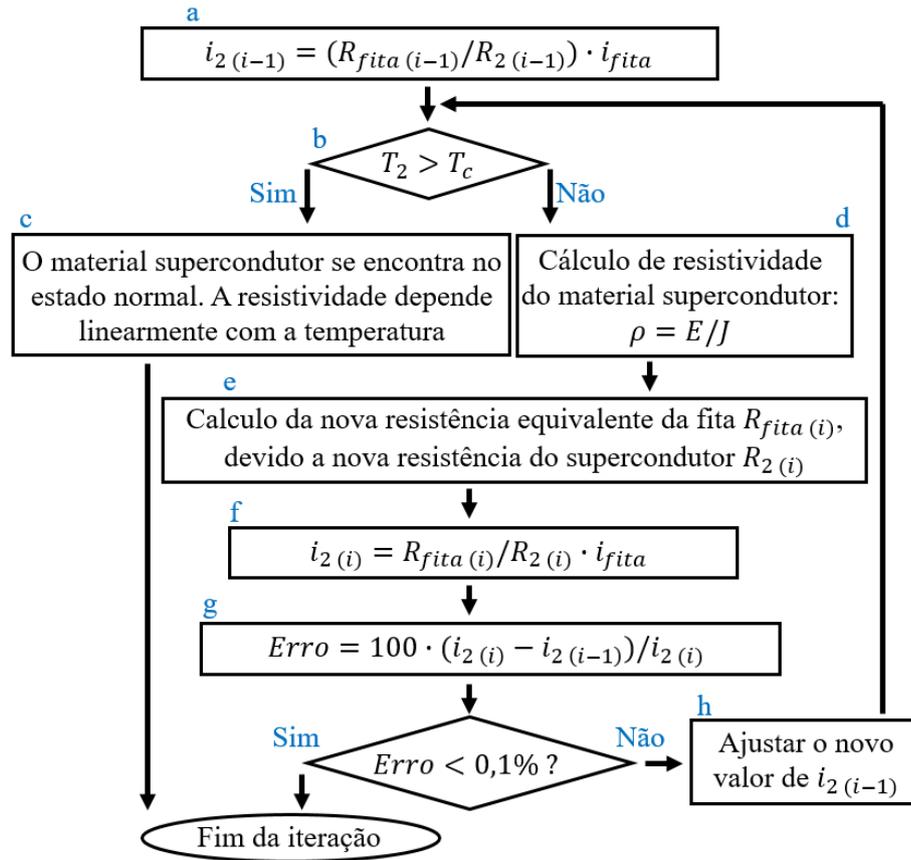


Figura 32 - Fluxograma do método iterativo de corrente e resistividade elétrica no supercondutor.

Para uma corrente que passa pelo supercondutor GdBCO ($i_{2(i-1)}$ representa a corrente que que passa no supercondutor), compara-se as temperaturas T_2 e T_c (passo “b”). Se T_2 for maior que T_c , o material está em seu estado normal, em que a resistividade elétrica é calculada usando (12). As outras resistividades são calculadas utilizando (9) e (10) e as resistências através de (13) e (14), e o processo iterativo é finalizado (passo “c”). Caso contrário, se T_2 for menor ou igual que T_c , a resistividade de GdBCO é dado por (11) (passo “d”) e os resistores R_2 e R_{fita} são atualizados por (13) e (14), respectivamente (passo “e”). O novo valor de corrente que atravessa o supercondutor ($i_{2(i)}$ representa a nova corrente que atravessa o supercondutor) é calculada (passo “f”) e o erro entre $i_{2(i-1)}$ e $i_{2(i)}$ é determinado (passo “g”). Se o *Erro* for menor que a tolerância de 0,1% é considerável estável e o processo termina. Se for maior que a tolerância, o valor de $i_{2(i-1)}$ é incrementado por um fator de ajuste variável, que considera o comportamento do erro durante todo o processo [117], e o processo iterativo será repetido até que o erro seja menor que 0,1%.

Obtendo os resultados dos novos valores de correntes que atravessam cada camada da fita 2G GdBCO, a seguir deve-se determinar a variação de temperatura em cada uma delas. Na

ocorrência de um curto-circuito, a variação está ligada a geração interna de calor e as trocas térmicas que os materiais manifestam quando submetidos a este aumento súbito de corrente. Para considerar e solucionar este fenômeno térmico, a analogia eletrotérmica é aplicada na Seção 3.5.2.

3.5.2. Equivalente Térmico

A analogia eletrotérmica foi utilizada para caracterizar as trocas calor que ocorrem em consequência da geração interna de calor em cada camada da fita, provocada em uma dada condição de curto-circuito. O propósito desta analogia é definir a variação da resistividade elétrica, com relação a temperatura, para o supercondutor. As variações dos parâmetros térmicos (condutividade térmica, calor específico e coeficiente de convecção) de alguns tipos de materiais, na fita supercondutora também devem ser considerados. Este relacionamento existente entre transferência de calor e circuitos elétricos, traz benefícios em simulações computacionais, visto que, possuem um esforço computacional menor, quando comparados aos métodos de elementos finitos, e permitindo seus estudos e aplicações em alguns programas para sistemas elétricos de potência.

3.5.2.1. Analogia Eletrotérmica

Esta seção tem como objetivo, conceder uma base matemática para a analogia eletrotérmica, empregados nas simulações das fitas supercondutoras. Para mais detalhes sobre a formulação do método podem ser encontrados em [13], [14], [24], [117].

Considera-se um fluxo de calor unidirecional transitório dentro de um volume infinitesimal, como ilustrado na Figura 33, de dimensões da unidade ao longo dos eixos de coordenadas cartesianas x e y , e do comprimento dz ao longo do eixo z . Portanto, determina-se que a taxa de fluxo de calor líquido é $\left[-\left(\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z}\right) dz\right]$, através da diferença entre a taxa de entrada (\dot{Q}_z) e a taxa de saída $\left[\dot{Q}_z + \left(\partial \dot{Q}_z / \partial z\right) dz\right]$ deste volume, conforme (16).

$$\dot{Q}_z - \left[\dot{Q}_z + \left(\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z}\right) dz\right] = -\left(\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z}\right) dz \quad (16)$$

Com o princípio de balanço de energia (1º lei da termodinâmica), a taxa líquida de fluxo de calor $\left(-\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} dz\right)$, mais a taxa de geração volumétrica de calor infinitesimal ($\dot{g} dV$), deve ser igual a taxa de variação de energia térmica armazenada pelo material $\left(\gamma c dV \frac{\partial T}{\partial t}\right)$, segundo (17).

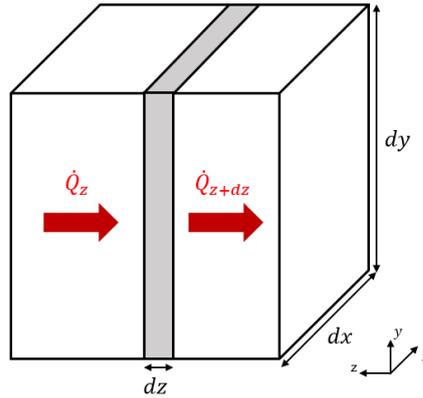


Figura 33 - Taxa de fluxo de calor através de elemento infinitesimal. Adaptada de [24], [106].

$$-\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} dz + \dot{g} dV = \gamma c dV \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

Onde $dV = dx dy dz$ representa o volume do elemento infinitesimal, e γ , c e t representam a massa específica do material, o calor específico do material, e o tempo transiente analisado, respectivamente

Considerando que o material respeita a lei de Fourier para condução de calor, a taxa de fluxo de calor é capaz de ser relacionada à condutividade térmica (λ), à área de superfície de troca de calor $da = dx dy$, ortogonal ao eixo z , e ao gradiente de temperatura $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$ ao longo do eixo z , conforme (18).

$$\dot{Q}_z = -\lambda da \frac{\partial T}{\partial z} \quad (18)$$

Substituindo \dot{Q}_z da equação (18) em (17), adquire-se a equação clássica de condução de calor transiente unidimensional (1D), descrita em (19).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\gamma c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{g}}{\gamma c} \quad (19)$$

A equação de linha de transmissão com parâmetros distribuídos (20), em circuitos elétricos, é matematicamente equivalente à equação (17), com exceção ao termo da geração de calor interno do material $\left(\frac{\dot{g}}{\gamma c}\right)$. O termo adicional pode ser adicionado à equação (20) através da inclusão de uma fonte de corrente em paralelo com a capacitância na linha de transmissão.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{R'C'} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (20)$$

Na Figura 34 destaca-se a fonte de corrente em paralelo ao capacitor *shunt* da linha de transmissão, representada por uma potência (P), e em (21) determina-se a equação elétrica

equivalente à condução de calor transiente 1D. Com o circuito em forma de “T” contém 3 nós, sendo um nó do meio V_b referente à “b” e os outros dois nós V_a e V_c nas extremidades compartilhadas com as camada “a” e “c”, respectivamente.

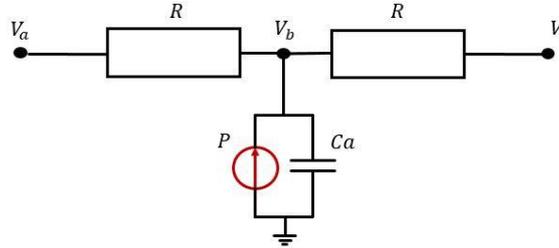


Figura 34 - Circuito equivalente RC de linha de transmissão, com fonte de corrente. Adaptada de [24], [106].

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{R'C'} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{P'}{R'C'} \quad (21)$$

A Tabela 3 exhibe as analogias entre as propriedades térmicas e elétrica, empregadas para a estruturação do circuito equivalente na simulação do comportamento da fita supercondutora. Dessa forma, torna-se possível determinar as variações de temperatura em cada camada da fita por meio das tensões nos nós, e assim a variação da resistividade elétrica de cada material.

Tabela 3 - Analogia entre propriedades térmicas e elétricas. Adaptada de [106].

Propriedades Térmicas			Propriedades Elétricas		
Grandezas	Símbolo	Unidade	Grandezas	Símbolo	Unidade
Temperatura	T	Kelvin	Tensão	V	Volt
Taxa de Fluxo de Calor	\dot{Q}	J/s	Corrente	i	Ampere
Capacidade de Calor	$\gamma \cdot c \cdot d \cdot l$	J/K	Capacitância	C	Farad
Condutividade Térmica	λ	J(K.cm)	Condutividade Elétrica	$1/\rho$	$1/(\Omega.cm)$

3.5.2.2. Circuito Equivalente

De acordo com a análise da seção anterior, utilizando a analogia eletrotérmica entre a equação de condução de calor transiente 1D e a equação da linha de transmissão com parâmetros distribuídos, calcula-se que a variação de temperatura (T_n) em uma direção (seção transversal de cada camada da fita supercondutora), ao longo da espessura (e_n) de cada camada, como mostra a Figura 35, sendo T_5 a temperatura do nitrogênio líquido (77 K).

A Figura 36 demonstra como a configuração citada pode ser representada por meio de um circuito eletrotérmico equivalente, onde a temperatura de 77 K do nitrogênio líquido do ambiente externo à fita supercondutora é representado por uma fonte de tensão em corrente contínua de 77 V.

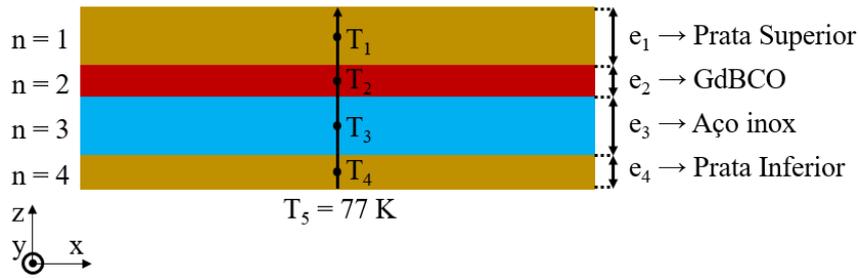


Figura 35 - Variação de temperatura no interior de cada camada da fita supercondutora, ao longo do eixo z.

Adaptada de [24].

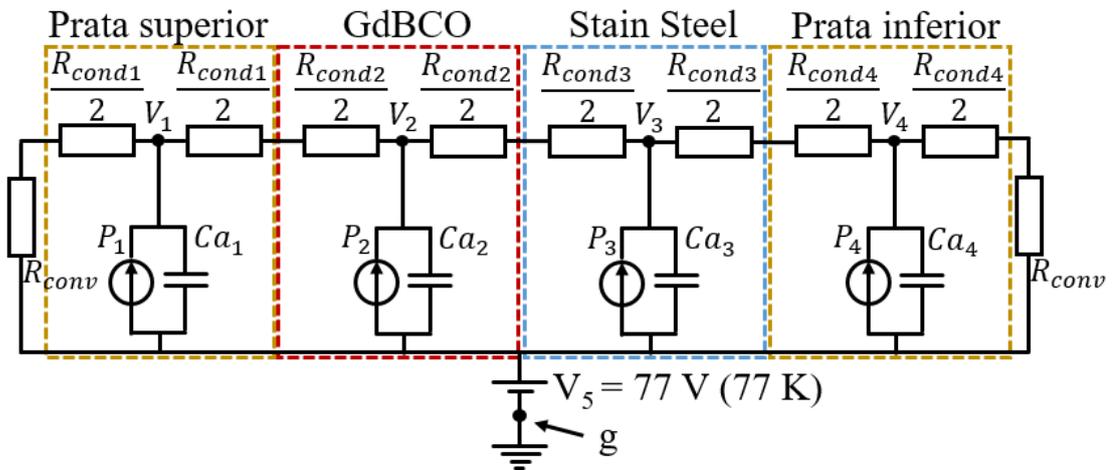


Figura 36 - Circuito termo elétrico da fita 2G GdBCO. Adaptado de [24].

As analogias dos parâmetros elétricos e térmicos são mostradas nas equações (22) a (25). Os parâmetros elétricos como tensão (V_n), resistência de condução e convecção ($R_{cond\ n}$ e R_{conv}) e capacitância (Ca_n) representam, respectivamente, a temperatura (T_n), o inverso da condutância térmica e o inverso da transferência convectiva, e a capacidade de armazenamento de calor; Além disso, a fonte de corrente é dada pela geração interna de calor, que é expressa em termos de perda de potência em $R_{cond\ n}$, conforme escrito em (26).

$$V_n = T_n \quad (22)$$

$$R_{cond\ n} = l_n / (\lambda_n \cdot d_n \cdot l_n) \quad (23)$$

$$R_{conv} = 1 / (h_n \cdot d_n \cdot l_n) \quad (24)$$

$$Ca_n = \gamma_n \cdot c_n \cdot d_n \cdot l_n \cdot e_n \quad (25)$$

$$P_n = R_{cond\ n} \cdot i_n^2 \quad (26)$$

Obtém-se as tensões (temperaturas) V_1 , V_2 , V_3 e V_4 aplicando o método de análise nodal do circuito eletrotérmico da Figura 36, além disso, de forma matricial em (27), determina-se um sistema de equações diferenciais parciais em função do tempo. As condutâncias (G_n) estão relacionadas com as resistências $R_{cond\ n}$ e R_{conv} , conforme (28) a (32).

$$\begin{bmatrix} Ca_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ca_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ca_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ca_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \end{bmatrix} = \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_1 + G_2 & -G_2 & 0 & 0 \\ -G_2 & G_2 + G_3 & -G_3 & 0 \\ 0 & -G_3 & G_3 + G_4 & -G_4 \\ 0 & 0 & -G_4 & G_4 + G_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} + V_{LN_2} \begin{bmatrix} G_1 \\ 0 \\ 0 \\ G_4 \end{bmatrix}$$

$$G_1 = [R_{conv} + (R_1/2)]^{-1} \quad (28)$$

$$G_2 = [(R_1/2) + (R_2/2)]^{-1} \quad (29)$$

$$G_3 = [(R_2/2) + (R_3/2)]^{-1} \quad (30)$$

$$G_4 = [(R_3/2) + (R_4/2)]^{-1} \quad (31)$$

$$G_5 = [(R_4/2) + R_{conv}]^{-1} \quad (32)$$

O Método de Euler é aplicado para discretização de (27), por se tratar de uma matriz com equações acopladas com mais de uma variável dependente (tensão), em função de uma mesma variável independente (tempo), resultando em (33). Além disso, o método implícito é adotado para não tornar o passo de tempo (dt) extremamente pequeno, que seria necessário para manter os erros limitados e gerar estabilidade numérica.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \left\{ \begin{bmatrix} Ca_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ca_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ca_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ca_4 \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} G_1 + G_2 & -G_2 & 0 & 0 \\ -G_2 & G_2 + G_3 & -G_3 & 0 \\ 0 & -G_3 & G_3 + G_4 & -G_4 \\ 0 & 0 & -G_4 & G_4 + G_5 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} Ca_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ca_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ca_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ca_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}_t + \Delta t \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} + \Delta t \cdot V_{LN_2} \begin{bmatrix} G_1 \\ 0 \\ 0 \\ G_4 \end{bmatrix} \right\} \quad (33)$$

Além das trocas térmicas existentes na fita supercondutora, ainda é considerado as variações dos parâmetros térmicos de alguns materiais como: condutividade térmica (λ_n); calor específico (c_n); e coeficiente de transferência de calor por convecção (h_n). Desta forma, são funções da temperatura referentes ao circuito eletrotérmico, conforme descritos em (34) a (39) [118]–[120].

$$c_{prata} = 0,2205 + 4,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{prata} \quad (34)$$

$$c_{GdBCO} = 0,39 \left(\frac{250}{T_{GdBCO}} \right)^2 \cdot \frac{\exp(250/T_{GdBCO})}{[\exp(250/T_{GdBCO2}) - 1]^2} \quad (35)$$

$$c_{aço\ inox} = 0,2 \quad (36)$$

$$\lambda_{\text{prata}} = [420,9 + (501,8 + 0,953T_{\text{prata}})] \times 10^{-2} \quad (37)$$

$$\lambda_{\text{GdBCO}} = 0,05 \quad (38)$$

$$\lambda_{\text{aço inox}} = 0,15 \quad (39)$$

A diferença entre a temperatura da camada em contato com o meio externo e o nitrogênio líquido (ΔT) é define a variação de h_n , caracterizado pelos estágios *free convection*, *bubble boiling* e *film boiling*, apontados na Figura 37 e h_n é calculado de acordo com (40).

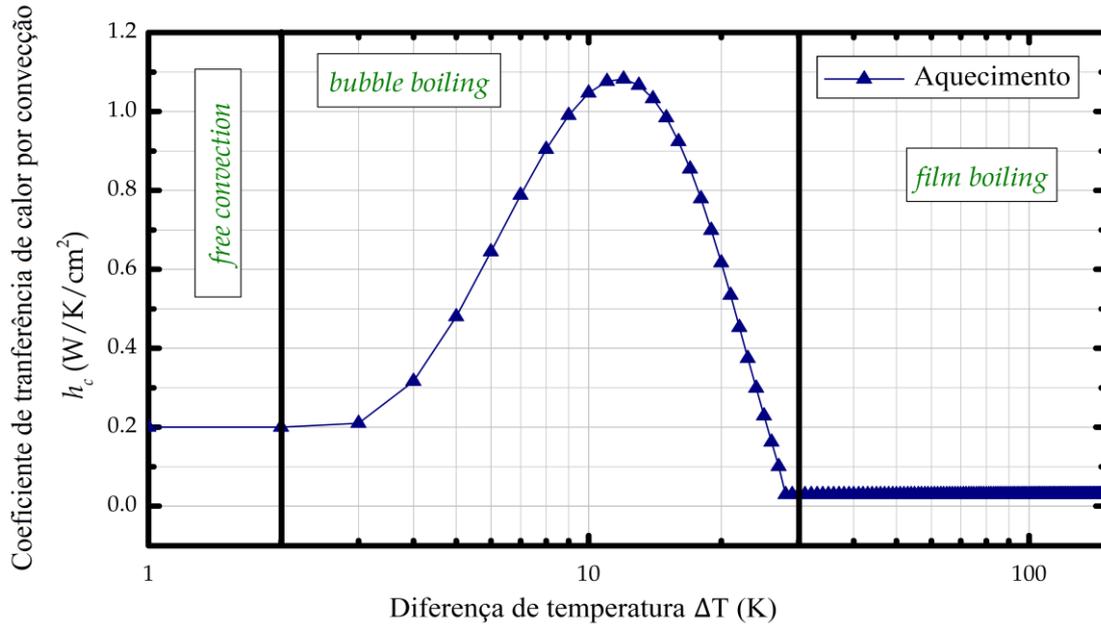


Figura 37 - Variação do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície da fita 2G e o nitrogênio líquido. Adaptada de [24].

$$h_c = \begin{cases} 0,2, & \text{se } \Delta T < 2,75 \\ \left[\frac{3,8147 - 2,8209\Delta T + 0,72328\Delta T^2}{-4,9438 \cdot 10^{-2}\Delta T^3 + 1,325 \cdot 10^{-3}\Delta T^4 - 1,2773 \cdot 10^{-5}\Delta T^5} \right], & \text{se } 2,75 > \Delta T > 2 \\ 0,03, & \text{se } \Delta T < 2,75 \end{cases} \quad (40)$$

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma breve história da supercondutividade, destacando os parâmetros que influenciam diretamente na supercondutividade dos materiais como: a temperatura crítica (T_c), campo magnético crítico (H_c) e densidade de corrente crítica (J_c). Tendo conhecimento dos parâmetros dos materiais supercondutores pode classifica-los em dois tipos: Tipo I e Tipo II.

Conhecendo os materiais supercondutores selecionou-se um supercondutor formado por $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (GdBCO) para a simulação e construção do LCCSH proposto, por possuir a temperatura crítica acima de 77 K e ser intitulado de segunda geração. A temperatura acima de 77 K, por esta ser a temperatura de liquefação do nitrogênio líquido. O nitrogênio é relativamente barato e fácil de liquefazer, e é o elemento mais abundante da atmosfera terrestre. E de segunda geração pois apresentam maior densidade de corrente crítica (J_c) comparadas às de primeira geração.

O modelo do elemento supercondutor teve como base projetos encontrados na literatura, que descrevem o comportamento físico deste dispositivo por meio de equacionamentos, além de dados e resultados experimentais.

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO LCCSH PROPOSTO

Neste capítulo será apresentada a modelagem computacional do LCCSH do tipo indutor série chaveado por tiristor proposto: a descrição dos componentes, a bancada de teste e os ensaios deste limitador. Por fim, o sistema de controle utilizado.

4.1. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A fim de avaliar a topologia do LCCSH do tipo indutor série chaveado por tiristor proposto na Seção 2.9, foi desenvolvido uma modelagem computacional para o desenvolvimento e construção de um protótipo laboratorial.

O software PSCAD/EMTDC, desenvolvido no Canadá pela Manitoba-HVDC, foi utilizado para a simulação, no qual permite a criação de circuitos elétricos por elementos já estabelecidos e disponibilizados em sua biblioteca principal. Este programa é específico para análise de transitórios eletromagnéticos na área de sistemas de potência.

No decorrer desta Seção serão abordados o princípio de funcionamento do LCCSH proposto, abordando a modelagem da fita supercondutora 2G, das chaves semicondutoras, do sistema de controle utilizado neste limitador e a descrição da simulação da bancada de teste.

4.1.1. Princípio de funcionamento do LCCSH proposto

Na topologia já citada na Seção 2.9, possui um ramo com um elemento supercondutor (R_{fita}) em série com as chaves semicondutoras (Tiristor) este ramo em paralelo com um reator de núcleo de ar, conforme a Figura 25. Em operação normal, a corrente conduz pela pelas chaves e pelo elemento supercondutor, R_{fita} se encontra no estado supercondutor e sua resistência é praticamente nula em corrente alternada, apresentado perdas desprezíveis. Na ocorrência da falta, R_{fita} transita para o estado normal e imediatamente inicia a limitação da corrente do sistema antes da abertura das chaves, não atingindo o valor prospectivo. Após a abertura das chaves, a corrente é limitada totalmente pelo indutor.

Tendo em vista o LCCSH proposto, necessita-se de um projeto básico com uma modelagem preliminar da fita supercondutora 2G, chaves semicondutoras e controle por meio do programa PSCAD/EMTDC.

4.1.1.1. Modelo da fita 2G GdBCO no PSCAD

Baseando-se nas equações Seção 3.5, no qual descrevem o comportamento termo elétrico da fita 2G, desenvolveu-se um modelo computacional que simula a dinâmica de atuação da fita quando submetido a uma corrente de curto-circuito.

Este programa também disponibiliza a modelagem de outros elementos, com seu comportamento baseado em código de programação. Desta maneira, possibilitou a criação de algoritmos que reproduzam comportamentos de um componente na presença de determinados

eventos do circuito. Baseando nesta ferramenta, um novo componente foi criado (Figura 38 (a)), com seu comportamento regido por um código FORTRAN. Este componente possui dois parâmetros de entrada, V_{base} e $I_{critica}$, que são a tensão base da rede onde o componente é inserido e a corrente crítica da fita (adquirido no *datasheet* da fita supercondutora). Através de V_{base} é possível definir o comprimento necessário de fita para o sistema, considerando uma queda de tensão máxima de 0,5 V/cm [11].

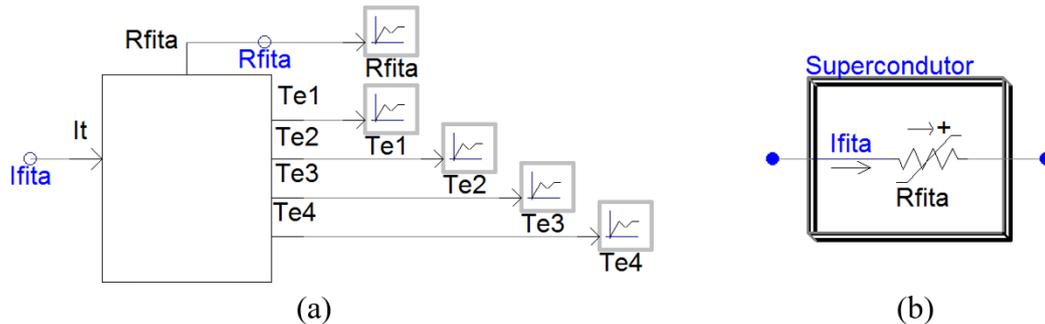


Figura 38 - (a) Componente criado para calcular a resistência da fita 2G e (b) resistência variável.

O código FORTRAN é processado a cada passo de simulação com os seguintes processos:

- Leitura da corrente na fita - I_{fita} (entrada do código);
- Cálculo da resistividade e resistência elétrica de cada camada, $\rho_{1,3 e 4}$ e $R_{1,3 e 4}$ respectivamente, de acordo com (9), (10) e (13), exceto para a camada do GdBCO;
- Um processo iterativo para calcular a resistividade do material supercondutor (ρ_2), sua resistência (R_2) e corrente (i_2), de acordo com o fluxograma da Figura 32;
- Cálculo da R_{fita} , de acordo com (14);
- Cálculo dos parâmetros térmicos de cada camada com base na temperatura anterior ($R_{cond n}$, R_{conv} , Ca_n e P_n), de acordo com (22) a (26);
- Cálculo da corrente que atravessa as demais camadas, de acordo com (15);
- Cálculo da temperatura em cada camada (T_n), com base na analogia termoelétrica (33), que é obtida através da solução matricial do circuito equivalente mostrado em (35);

O código tem como saída o valor da resistência equivalente variável (R_{fita}) e as temperaturas de cada camada (T_n), dependendo da corrente que atravessa a fita 2G (I_{fita}), ambos representados no circuito equivalente da Figura 38 (b). É importante destacar que as temperaturas das camadas precisam de uma condição inicial a ser definida pelo usuário. Neste

trabalho definiu-se 77 K para todas as camadas. Portanto, as variáveis utilizadas para o cálculo em cada etapa são baseadas nos valores calculados no passo atual ou valores definidos na etapa anterior.

4.1.1.2. Descrição das chaves

A modelagem das chaves de eletrônicas de potência encontra-se na Figura 39, observa-se a utilização de dois tiristores em antiparalelo, baseado na condução dos semiciclos positivo e negativo. A Tabela 4 apresenta a configuração do tiristor no PSCAD/EMTDC, a queda mínima de tensão de condução (*Forward Voltage Drop*) pode ser encontrado no *datasheet* do módulo tiristor modelo TT120N16SOF [121].

Os pulsos, gerados pelo sistema de controle das chaves, são aplicados no *gate* dos tiristores (Figura 39) e determinam o acionamento da chave, sendo que sua abertura ocorrerá quando a corrente passar pelo zero, característica típica dos tiristores.

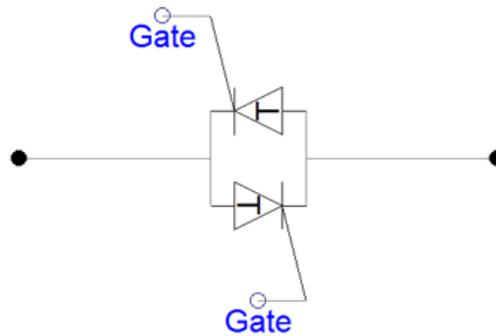


Figura 39 – Chave bidirecional utilizando tiristores

Tabela 4 - Parâmetros do tiristor.

Parâmetro	Valor	Unidade
Thyristor ON Resistance	0,001	Ω
Thyristor ON Resistance	$1 * 10^6$	Ω
Forward Breakover Voltage	0,0009	kV
Forward Withstand Voltage	$1 * 10^5$	kV
Reverse Withstand Voltage	$1 * 10^5$	kV
Minimum Extinction Time	0	μs

4.1.1.3. Sistema de controle

Para o sistema de controle criou-se um componente (Figura 40 (a)), este componente possui um algoritmo que recebe informação do sistema, neste caso recebe-se a corrente do sistema (I_{sist}), mas este mesmo algoritmo também pode ser utilizado para sensoriar a queda de

tensão do LCCSH proposto. Este sistema de controle envia sinal para os *gates* dos semicondutores controlando sua abertura ou fechamento. Já a Figura 40 (b) mostra uma janela para configuração dos parâmetros de entrada do componente criado.

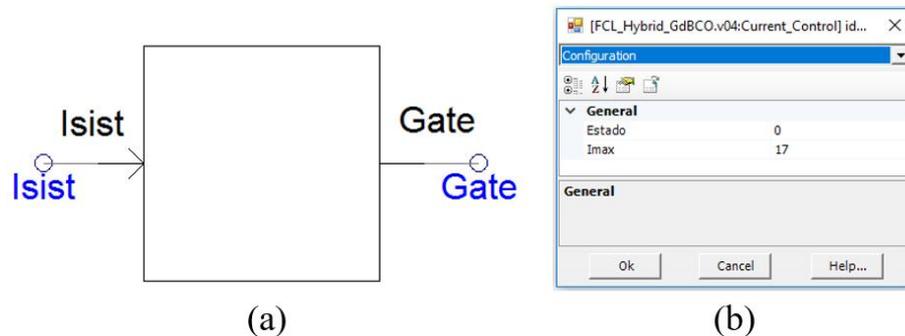


Figura 40 – (a) Componente criado para controlar as chaves e (b) parâmetros de entrada para o sistema de controle.

O algoritmo de controle necessita dos seguintes parâmetros iniciais (dados de entrada):

- O valor máximo de corrente instantânea (I_{MAX}) em [A] para a atuação do LCC se o controle monitora a corrente do sistema ou o valor da queda de tensão máximo instantânea (V_{MAX}) em [V] se o controle monitora a queda de tensão no LCCSH proposto;
- O estado das chaves (*Estado*) para condição normal de operação do sistema. Essa variável depende da topologia ao qual o controle está operando (0 para chave aberta, 1 para chave fechada). Para a topologia do LCCSH proposto a variável Estado deve ser iniciada com o valor 1, ou seja, a chave semicondutora conduz no regime permanente. Ao ser detectada a falta, a variável Estado tem seu valor alterado, alterando o estado de condução das chaves para possibilitar a abertura das chaves no próximo cruzamento por zero da corrente.

Esse valor máximo instantâneo deve estar sempre dentro de uma faixa de atuação tanto para o sistema de controle sensoriando a corrente do sistema quanto sensoriando a tensão no LCCSH, pois este valor define valor mínimo para o algoritmo de detecção de falta atuar e o valor mínimo para verificar a extinção da falta.

No caso do sensoriamento da corrente do sistema, a Figura 41 apresenta de forma genérica uma corrente de falta sendo limitada por um LCCSH. Inicialmente o sistema se encontra sem falta, portanto a corrente do sistema é a nominal (valor mínimo para o controle em vermelho na Figura 41) e o controle não atua, quando ocorre o curto-circuito a partir da linha roxa “1”,

a corrente irá aumentar abruptamente e o controle deve atuar, assim limitando a corrente do sistema, como o limitador utiliza tiristores a corrente será limitada pelo indutor a partir do segundo semiciclo. Após o segundo semiciclo o controle deve monitorar a corrente do sistema (valor máximo para o controle em vermelho na Figura 41), quando a falta encerrar, a partir da primeira linha roxa “2”, a corrente do sistema diminui abaixo da corrente do sistema nominal pois o sistema ainda se encontra sob influência da impedância do limitador na rede, e em seguida o controle atua retirando o limitador e a corrente do sistema retornando a sua nominal. A faixa de atuação do sistema de controle quando está sensoriando a corrente do sistema deve ser entre as linhas mínima e máxima apresentadas na Figura 41.

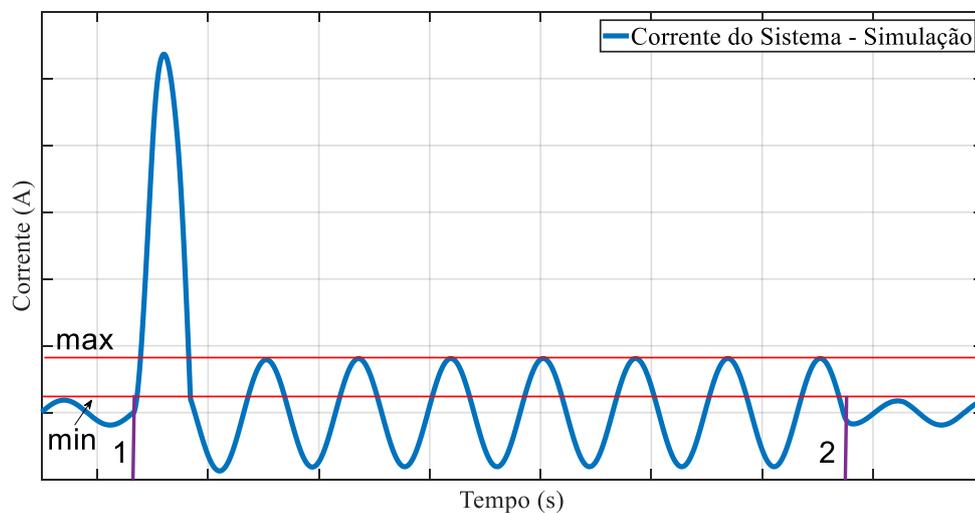


Figura 41 - Corrente do sistema genérica para explicar o controle sensoriando a corrente da rede.

Para o sensoriamento de tensão no LCCSH, a Figura 42 apresenta a tensão no LCCSH antes, durante e após uma falta. Inicialmente o sistema está em operação normal, deste modo o supercondutor está em seu estado supercondutor possuindo apenas a queda de tensão nas chaves semicondutoras do LCCSH, quando ocorre o curto circuito a partir da linha roxa “1”, a corrente aumenta abruptamente causando a transição do supercondutor para o estado normal, no primeiro semiciclo, a tensão no LCCSH aumenta e o controle deve enviar informação para o limitador atuar (valor máximo para o controle em vermelho na Figura 42), a partir do primeiro semiciclo da falta a queda de tensão no limitador será do reator de núcleo de ar, pois o tiristor para de conduzir. Quando a falta se extingue, a partir da primeira linha roxa “2”, teremos a queda de tensão no indutor sob influência da corrente nominal (valor mínimo para o controle em vermelho na Figura 42), em seguida o controle atua retirando o limitador e a tensão no LCCSH volta a ser igual a inicial. A faixa de atuação do sistema de controle quando

está sensoriando tensão do LCCSH deve ser entre as linhas mínima e máxima apresentadas na Figura 42.

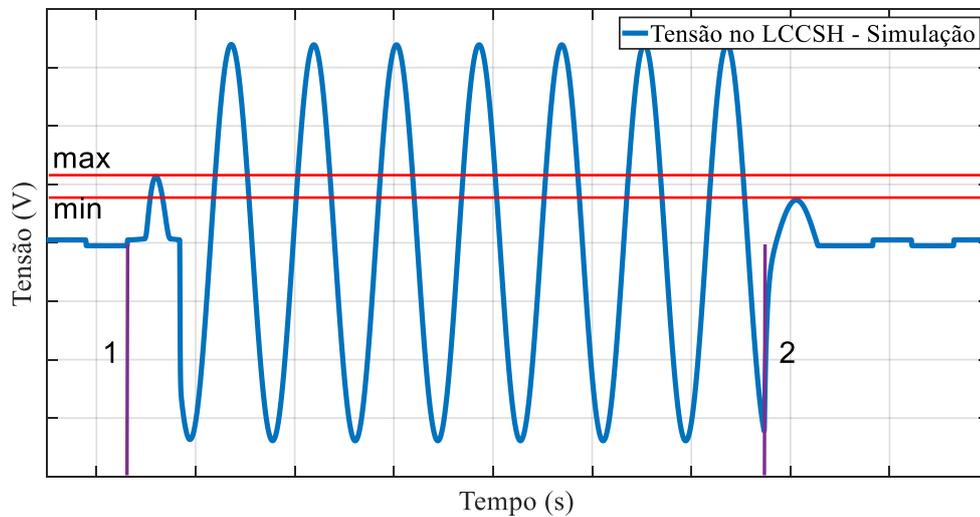


Figura 42 – Tensão no LCCSH genérica para explicar o controle sensoriando a tensão no LCCSH.

Com os parâmetros iniciais inseridos, dentro do algoritmo de controle calcula-se a variável a seguir, para auxiliar na identificação e extinção da falta:

- Diferencial máxima (D_{max}), calculada de acordo com a equação (41).

$$D_{max} = \omega \cdot I_{MAX} \quad (41)$$

Como o controle será inserido em um ensaio experimental, considerou-se que a medição de corrente nos ensaios pode apresentar ruídos. Estes ruídos podem causar acionamentos indevidos nas chaves, pois um ruído pode apresentar um valor superior ao valor de entrada inserido pelo usuário, causando então uma ação inadequada no LCCSH. Portanto foi criado duas variáveis dentro do algoritmo de controle para evitar um acionamento precipitado:

- O Limite de Leituras de Faltas (LLF), corresponde ao número de vezes que a corrente deve superar o valor de I_{MAX} para que o controlador avalie se ocorreu uma falta.
- O Mínimo de Leituras de Saída da Falta ($MLSF$), corresponde ao número de vezes que a corrente deve apresentar valor menor do que I_{MAX} para que o controlador avalie uma falta como extinta.

O fluxograma da Figura 43 apresenta a lógica e a dinâmica de atuação do controle das chaves, utilizando os parâmetros iniciais e as variáveis citadas acima.

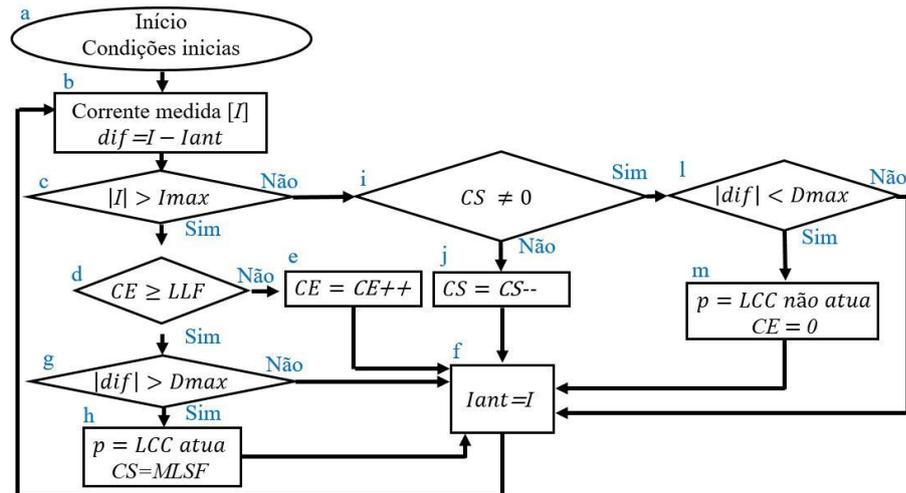


Figura 43 - Fluxograma do algoritmo de controle.

Na etapa “a”, considerando-se que o sistema se encontra em condições normais de operação, o algoritmo é configurado com os dados de entrada. Essa condicional só é executada na energização do equipamento. No passo “b”, repara-se que o cálculo de um delta no tempo do *timestep* foi alterada pela diferença (*dif*) entre a corrente medida na leitura atual (*I*) e a corrente da leitura anterior (*I_{ant}*).

Seguindo na condicional “c”, o módulo da corrente de leitura é comparado com a corrente instantânea máxima. Os resultados desta condição se separam em dois casos: se o controle reconhece uma eventual falta ou a eventual extinção da mesma. Caso a condicional “c” seja verdadeira a condicional “d” compara o contador de detecção de falta, denominado contador de entrada (*CE*), com o valor da variável Limite de Leituras de Faltas (*LLF*). Esta condição certifica que deve encontrar uma quantidade mínima de detecção de faltas consecutivas para evitar um falso positivo. Caso o limite não venha ser ultrapassado, *CE* é incrementado na etapa “e” para atualização sequente de atualização da variável *I_{ant}* no passo “g”. Imediatamente retorna-se para o passo “b”.

Se a condição “d” for verdadeira, averigua-se o diferencial da corrente na condicional “g”. Caso ultrapasse o limite, a variável de pulso (*p*), que controla a operação da chave de estado sólido, é alterada para o estado de operação em curto-circuito na e o Contador de Saída (*CS*) recebe o valor de Mínimo de Leituras de Saída da Falta (*MLSF*) na etapa “h”. Por fim, a etapa “f” é efetuada e retorna-se a etapa “b”.

Caso a condicional “c” for falsa, a condicional “i” compara, através do contador de saída (*CS*), que é um contador decrescente, se ocorreu uma quantidade mínima de detecções consecutivas de corrente abaixo do limite. Esta quantidade mínima de detecções corresponde

ao valor da variável $MSLFe$ é usada para garantir a término do curto-circuito. Caso a quantidade de medidas não tenha sido suficiente as etapas “j” e “f” são executadas e, em seguida, retorna-se a etapa “b”. Caso tenha ocorrido a quantidade mínima de medidas com corrente abaixo do limite, CS será igual a zero e será, então, executa a etapa “l”, que avalia o valor do diferencial, de modo que, se este estiver abaixo do valor máximo especificado, altera-se a variável de controle da chave semicondutora p para o estado de operação em regime permanente na etapa “m”. Sequencialmente a etapa “f” é executada e em seguida retorna-se a etapa “b”. Não sendo atendida a condicional “l”, o limitador continua em operação, a etapa “f” é efetuada, e retorna-se a etapa “b”.

A princípio o sistema de controle foi estudado para sensoriar a corrente do sistema a fim de detectar o curto-circuito. No entanto, a mesma lógica de controle pode ser utilizada para sensoriar a queda de tensão no LCCSH com finalidade de identificar a falta, uma vez que a transição da fita supercondutora indica a ocorrência da falta. Portanto, o algoritmo deixa de monitorar a corrente instantânea máxima (I_{MAX}) do sistema e monitora a tensão instantânea máxima (V_{MAX}) do LCCSH.

Além disso, a utilização de um sensor de tensão visa reduzir o custo no valor final do LCCSH, evitando a aquisição de sensores de altas correntes.

4.1.2. Descrição da simulação da bancada de teste

Com propósito de um entendimento aprofundado do comportamento do LCCSH, realizaram-se simulações no *software* PSCAD/EMTDC. O sistema, apresentado na Figura 44, é composto por uma fonte senoidal (*Fonte*) de $55 V_{rms}$, com frequência de $60Hz$; uma impedância em série com a fonte, para simplificar a representação física do secundário do transformador (Z_{trafo}) composto por uma de resistência de $0,55 \Omega$ e indutância de $0,3 mH$; uma impedância de carga (Z_{carga}), de resistência de $4,05 \Omega$ e; uma impedância de curto (Z_{curto}) composto por uma resistor de $0,01 \Omega$ e um indutor de $0,27 mH$.

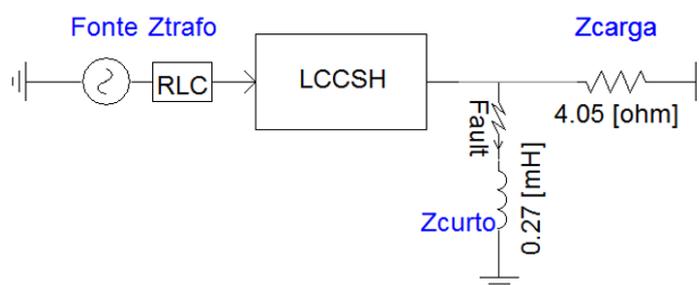


Figura 44 – Sistema modelado no PSCAD/EMTDC.

Considera-se inicialmente que o sistema se encontra na condição normal e, após um intervalo de tempo a impedância de curto ($R = 0,01 \Omega$ e $L = 0,27 \text{ mH}$) é inserida através do componente denominado *Fault*, como observado na Figura 44. Este evento foi configurado para ocorrer no instante em que o ângulo de corrente (θ_i) é igual a 0° , pois é neste ponto que obtém-se o maior valor de corrente de prospectiva. Os valores do passo de simulação e tempo de amostragem foram de 50 microssegundos e 0,25 segundos respectivamente.

A Figura 45 apresenta a modelagem do limitador de corrente de curto-circuito supercondutor híbrido do tipo indutor série chaveado com tiristor. O indutor possui indutância (L) de $2,1 \text{ mH}$ e uma resistência (R) de $0,26 \Omega$ em série representando o efeito Joule existente nas bobinas convencionais. Em paralelo com o indutor, temos um ramo composto por um par de tiristores em antiparalelo, em série com um elemento supercondutor. O princípio de funcionamento consiste na condução de corrente em regime permanente pela chave e elemento supercondutor. Na presença de uma falta, o elemento supercondutor transita do seu estado supercondutor para o estado normal. Durante esse processo, uma queda de tensão surge no supercondutor tão rápida quanto a corrente aumenta, devido às características intrínsecas do supercondutor. A queda de tensão é utilizada como parâmetro de entrada do sistema de controle, quando a tensão atinge um valor acima do especificado, o sinal de comutação é enviado para a chave, que só deixa de conduzir quando a corrente do sistema passa por zero. Até o momento da abertura, a fita supercondutora limitará a corrente de falta, e com a abertura da chave a corrente passa a ser limitada pelo indutor.

Já o sistema de controle tem como entrada a tensão medida nos terminais do limitador. Seguindo a Subseção 4.1.1.3, e os parâmetros do sistema citado, o controle deve ser configurado para operar quando a tensão instantânea (V_{MAX}) estiver entre o limite de $15,6 \text{ V}$ e $41,7 \text{ V}$, pois é nesta faixa que o controle identifica se o sistema se encontra em falta ou não.

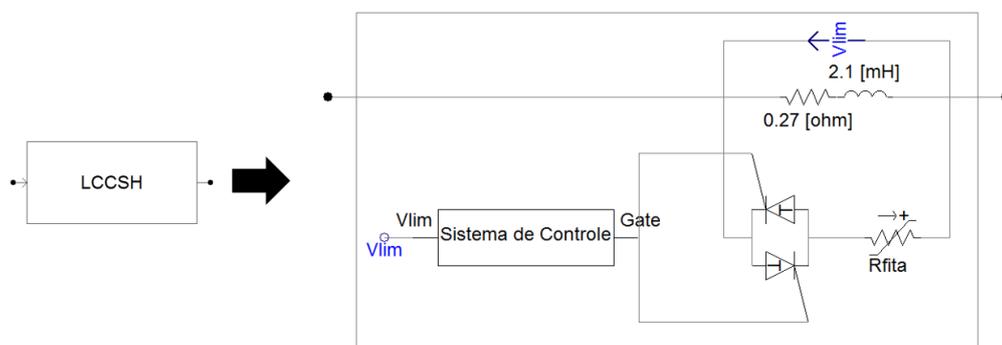


Figura 45 - Circuito LCCSH proposto, do tipo indutor série chaveado com tiristor, com o controle sensoriando a tensão do limitador.

4.2. PROTÓTIPO DO LIMITADOR

Nesta seção será apresentado cada componente adquirido para a construção do LCCSH do tipo indutor chaveado por tiristor, a descrição da bancada de testes e o sistema de controle a ser aplicado no limitador.

4.2.1. Elementos do protótipo do LCCSH proposto

Para o protótipo do Limitador de corrente de curto-circuito supercondutor híbrido do tipo indutor chaveado por tiristor, cada elemento será explicado separadamente para melhor detalhamento do protótipo.

4.2.1.1. Indutor

Para construir o indutor, o utilizou-se o método de elementos finitos para a modelagem e as dimensões foram parametrizadas com base no trabalho de Neville Thiele [122]. A Figura 46 exibe o projeto de uma bobina otimizando as dimensões para economizar o cobre.

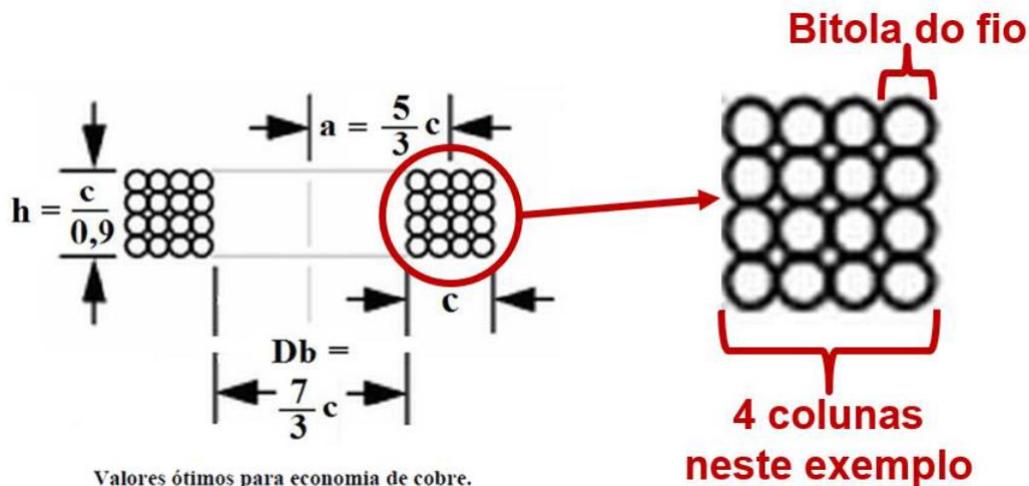


Figura 46 - Ilustração do projeto de uma bobina com dimensões otimizada para a economia de cobre.

FONTE: [122].

Este modelo utilizando o método dos elementos finitos foi reproduzido no programa comercial COMSOL MULTIPHYSICS. Para o modelo, o usuário pode especificar os seguintes parâmetros de entrada:

- Raio do condutor;
- Espessura da camada isolante;
- Espaçamento adicional entre as espiras;
- Quantidade de colunas do enrolamento;

- Resistência CC por unidade de comprimento (especificado pelo fabricante do fio);
- Resistência CA por unidade de comprimento (especificado pelo fabricante do fio).

O tempo de execução de uma simulação é inferior a 20 s, e os resultados gerados são:

- Energia armazenada no campo magnético (para um determinado valor de corrente);
- Indutância;
- Reatância indutiva em 60 Hz;
- Resistência em CC e em CA;
- Módulo da impedância complexa em 60 Hz;
- Comprimento de fio utilizado;
- Perfil de densidade de campo magnético (Figura 47);
- As componentes da densidade de força eletromecânica em cada espira (Figura 48).

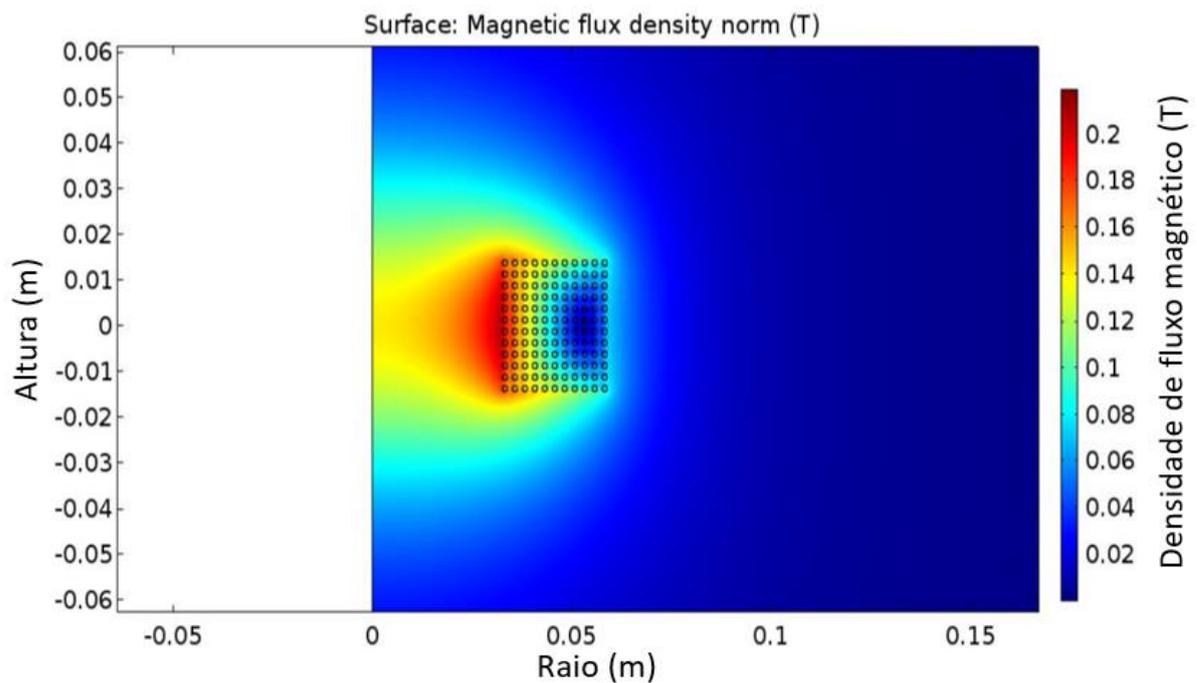


Figura 47 - Imagem do nível de densidade de campo magnético.

Para o protótipo do limitador foi projetado e construído um reator de núcleo de ar como o elemento indutor, apresentado na Figura 49, com as seguintes especificações:

- Indutância: 2,1 mH;
- Resistência: 0,27 Ω ;
- Comprimento de fio utilizado: 66,7 m.

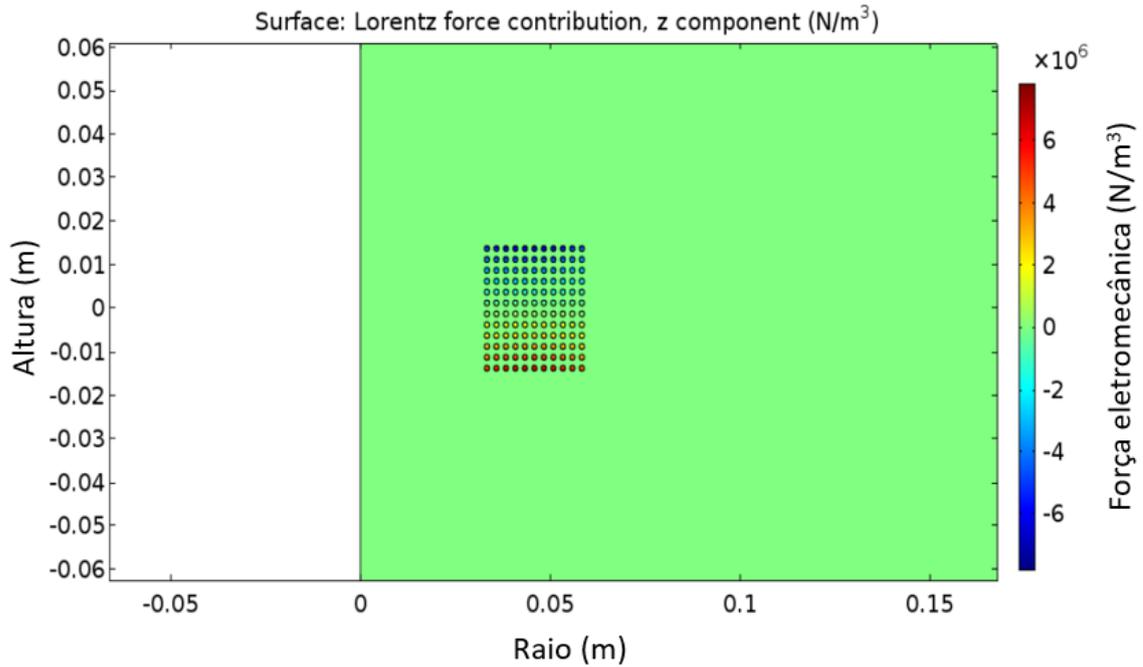


Figura 48 - Ilustração da componente de direção z da densidade de força eletromecânica em cada espira.

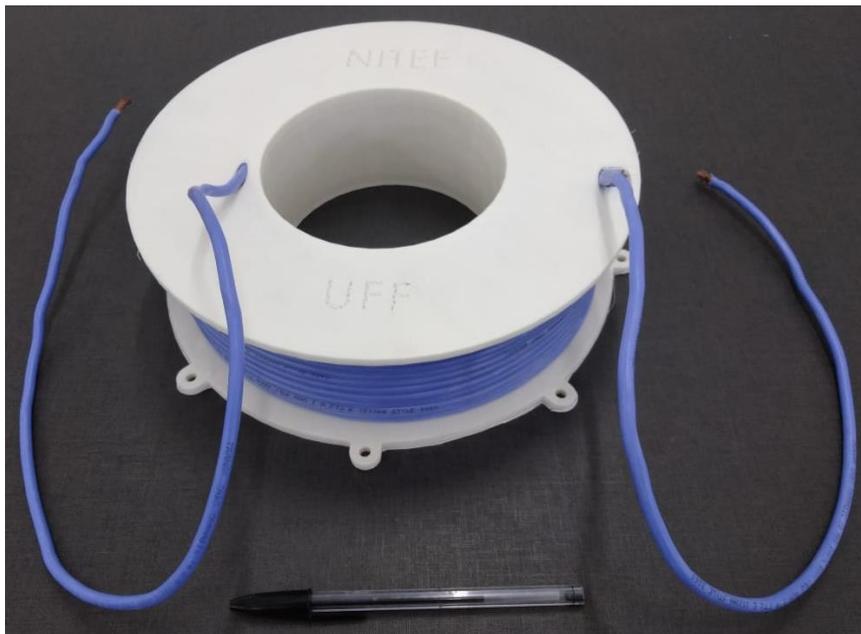


Figura 49 - Reator de núcleo de ar construído para o limitador.

O suporte branco da bobina foi projetado em *software* de modelagem 3D e construído através de uma impressora 3D. Após a produção da bobina, foi realizado um ensaio de resposta a um degrau de tensão de 1,3 V para validar os valores estimados. Na Figura 50 mostra a comparação entre a cálculo e a medição, comprovando o valor esperado.

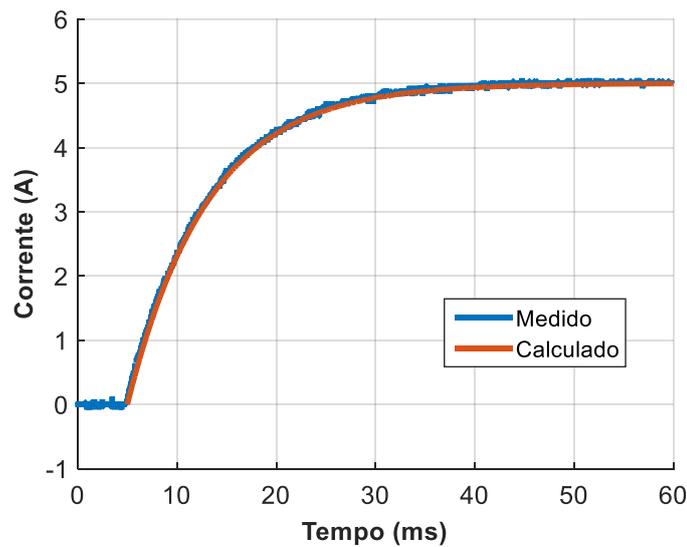


Figura 50 - Comparação entre a medição e o cálculo da resposta a um degrau de tensão de 1,3 V na bobina construída.

4.2.1.2. Chaves semicondutoras

As chaves semicondutoras utilizadas neste trabalho foram os tiristores do modelo TT120N16SOF [121], mostrado na Figura 51. Os tiristores são acionados com pulsos de corrente aplicado no *gate* e cortam a condução quando a corrente anodo-catodo atinge um valor residual, idealmente nulo, também chamado de corrente de manutenção [123]. Da mesma forma, deve ser analisada a queda de tensão nos terminais quando os componentes estão conduzindo. A queda de tensão deve ser avaliada, uma vez que é capaz de acarretar perdas técnicas e fazer com que o componente aqueça, podendo danificar. Por isso, usualmente os dissipadores são associados às chaves semicondutoras.



Figura 51 - Tiristor do modelo TT120N16SOF [121].

Parâmetros como as máximas derivadas de tensão (dv/dt) e corrente (di/dt) que os componentes suportam são considerados importantes. Para proteger o componente de um dv/dt maior que o especificado no *datasheet* é usual a utilização de um *snubber* (associação série de capacitor com resistor) em derivação com os terminais do componente. Neste

trabalho não foi necessário o uso de um *snubber*. Já para proteger o componente de um di/dt maior que o especificado no *datasheet*, utiliza-se um indutor em série com o componente [124].

O tiristor deve ser associado a um *driver*, que é responsável pelo seu acionamento. O *driver* utilizado neste trabalho (Figura 52) foi fabricado pela empresa Adelco Sistemas de Energia S.A..



Figura 52 – *Driver* de acionamento dos tiristores.

Para a topologia LCCSH do tipo indutor chaveado por tiristor, foi possível utilizar apenas um único módulo de chaves, devido à sua construção interna, como pode ser visto na Figura 53. Portanto, conectando os terminais 2 e 3, posiciona os tiristores em antiparalelo.

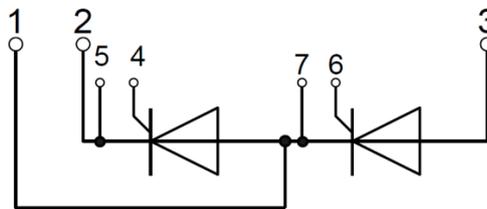


Figura 53 - Esquema de ligação do módulo TT120N16SOF. FONTE: [121].

4.2.1.3. Módulo supercondutor

A construção do componente supercondutor do limitador, baseia-se em uma disposição de fitas supercondutoras de segunda geração (2G), que se aparenta ao das serpentinas de um radiador. O suporte para as fitas foram construídas planejando manter um espaçamento entre elas e, conseqüentemente, melhorar a troca de calor com o nitrogênio líquido. Esse suporte também foi projetado para que o arranjo seja em antiparalelo para reduzir a autoindutância, respeitando o valor mínimo para o raio de curvatura da fita especificado pelo fabricante da fita. A Figura 54 mostra a construção do componente supercondutor, onde foram utilizadas 3 placas de fibra de vidro com resina epóxi (conhecido como G10) com espessura

de 2 mm. A fita 2G utilizado neste protótipo foi o composto $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (GdBCO), modelo SANn12500 da SuNAM Co..

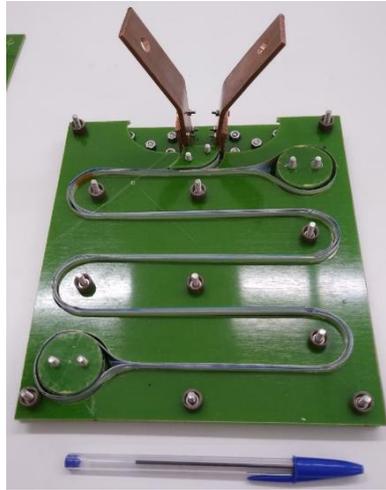


Figura 54 - Suporte para as fitas 2G.

Como se pode observar na Figura 55 (a), a primeira placa seria a base do suporte, onde constam furos retangulares para as barras de cobre. Essas barras possibilitam o contato da fita 2G com contatos externos. Além disso, em todas as placas há furos passantes para os parafusos de fixação e foram utilizados espaçadores para delimitar o caminho percorrido pela fita 2G entre as placas. Na Figura 55 (b) pode-se observar que a segunda placa possui o caminho de distribuição das fitas 2G, semelhante a serpentinhas de um radiador. E a Figura 55 (c) ilustra a terceira placa, que tem a função de gerar maior estabilidade mecânica para a fita 2G e impedir sua movimentação.

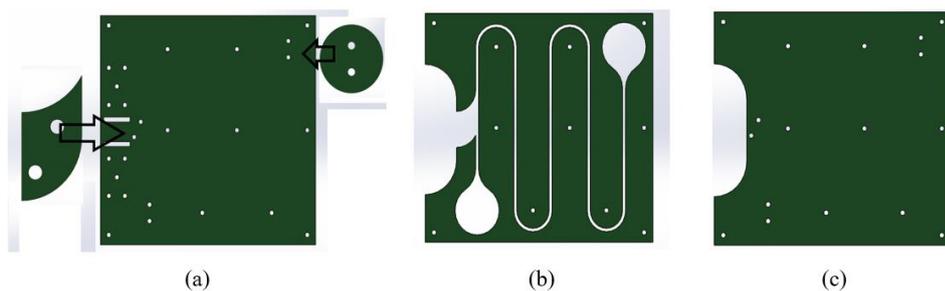


Figura 55 – (a) Primeira placa; (b) segunda placa; e (c) terceira placa.

O contato da fita 2G com as barras de cobre foi feita por pressão, com auxílio de parafusos de fixação. O módulo supercondutor comporta aproximadamente 3,64 m de fita 2G, seguindo o critério de campo elétrico máximo da fita 2G (50 V/m) [11], este módulo pode ser submetido a uma tensão máxima de 182 V entre seus terminais, caso ultrapasse esta tensão máxima o módulo pode ser danificado. Entre as fitas 2G foi utilizado placas de G10, com espessura de 0,3 mm, para a isolamento.

4.2.2. Descrição da bancada de testes

Esta subseção descreverá como foi montada a bancada de teste, os equipamentos utilizados para as medições e aquisições dos dados, o método utilizado para simular as cargas do sistema e a impedância de curto-circuito e descrição da metodologia aplicada no ensaio experimental realizado no trabalho.

4.2.2.1. Equipamentos e instalações

Para a realização do ensaio, necessitou-se construir uma bancada de teste. Na Figura 56 podemos observar a bancada montada a partir de perfis de alumínio, placas de MDF, barramentos de cobre, diversos tipos de parafusos e algumas peças que unem os perfis de alumínio. Essas peças foram projetadas em *software* de modelagem 3D e impressas em uma impressora 3D.

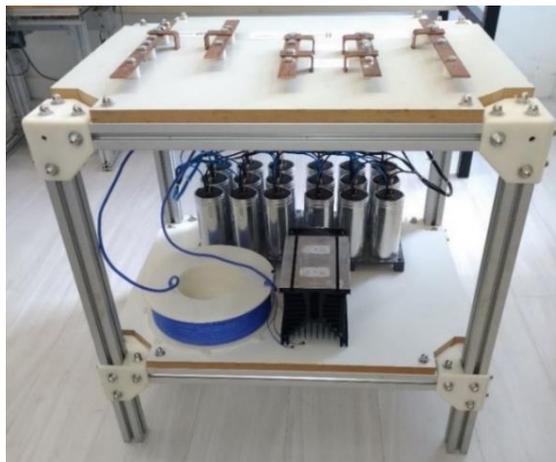


Figura 56 - Bancada de teste.

Para medição e aquisição de dados do ensaio do LCCSH utilizaram-se ponteiros de corrente e tensão e um oscilógrafo modelo DL850EV [125] da Yokogawa, visto na Figura 57.



Figura 57 - Ponteiros de tensão e corrente e oscilógrafo modelo DL850EV da Yokogawa [125].

A Figura 58 apresenta um *rack* de cargas. Este *rack* precisou ser construído com a finalidade de alocar as cargas utilizadas nos ensaios, e auxiliar a comutação entre elas para obter diferentes valores de impedância. Além disso, este painel possui a função de aplicar o curto-circuito, que é capaz de ser realizada de forma controlada, através de uma botoeira que aciona a conexão de uma impedância de curto-circuito no sistema ensaiado.

A parte frontal do painel, vista na Figura 58 (a), é composta por uma chave de energização, um led branco para indicação de que o sistema está energizado, quatro chaves para as cargas e seus respectivos leds de sinalização, uma botoeira de curto-circuito, um relé temporizado, e um botão de emergência para desligamento geral do painel.

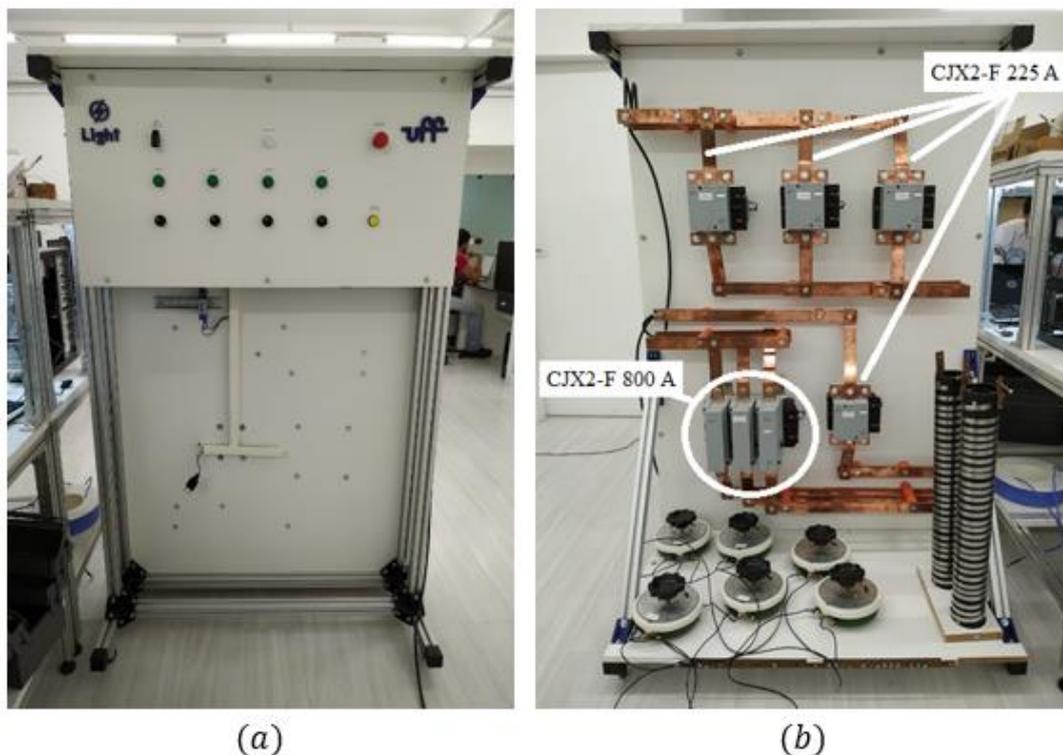


Figura 58 - Rack de cargas(a) parte frontal e (b) parte traseira.

O acionamento da botoeira de curto-circuito foi planejado em conjunto com um relé temporizado, do modelo Clip [126]. O relé instalado certifica que a duração das faltas possua o mesmo tempo em diferentes ensaios. Foram utilizadas quatro contadoras do modelo CJX2-F da JNG [127] com capacidade de corrente por fase de 225 A para a comutação das cargas. Já para a contadora do curto-circuito foi utilizada o modelo CJX2-F com capacidade de corrente de 800 A para cada fase.

A parte traseira do *rack*, apresentada na Figura 58 (b), mostra que as contadoras foram conectadas com barramentos de cobre, com dimensões de 1.1/2" por 5/16". A seção dos

barramentos foi selecionada de forma a suportar a corrente máxima das contadoras. Na parte inferior do *rack*, encontram-se as cargas de impedância e de curto-circuito, que são conectados a um barramento comum na base do *rack*.

A Figura 59 exibe o arranjo geral do ensaio, com alguns componentes conectados para o ensaio do LCCSH proposto, faltando o módulo do supercondutor em um meio refrigerado. Para reproduzir o equivalente elétrico do sistema, utilizou-se um transformador de 75 kVA, mostrado na Figura 60, com o primário conectado à rede elétrica com tensão de 220 V_{rms} e o secundário com tensão nominal de 55 V_{rms}. Foram construídas 3 impedâncias de carga (apresentada na Figura 61) a partir de fita de aço inox enrolada em 2 tubos de PVC de diâmetros diferentes, um interno e outro externo, enrolados em sentidos opostos de forma a minimizar a indutância. Cada impedância de carga possui 1,35 Ω, estando as três impedâncias ligadas em série, formando uma impedância equivalente de 4,05 Ω. Por fim, a impedância de curto-circuito foi composta por um arranjo de reatores toroidais (apresentada na Figura 61) e impedância equivalente de 0,262 mH. Os valores dos componentes utilizados nos ensaios foram organizados na Tabela 5.

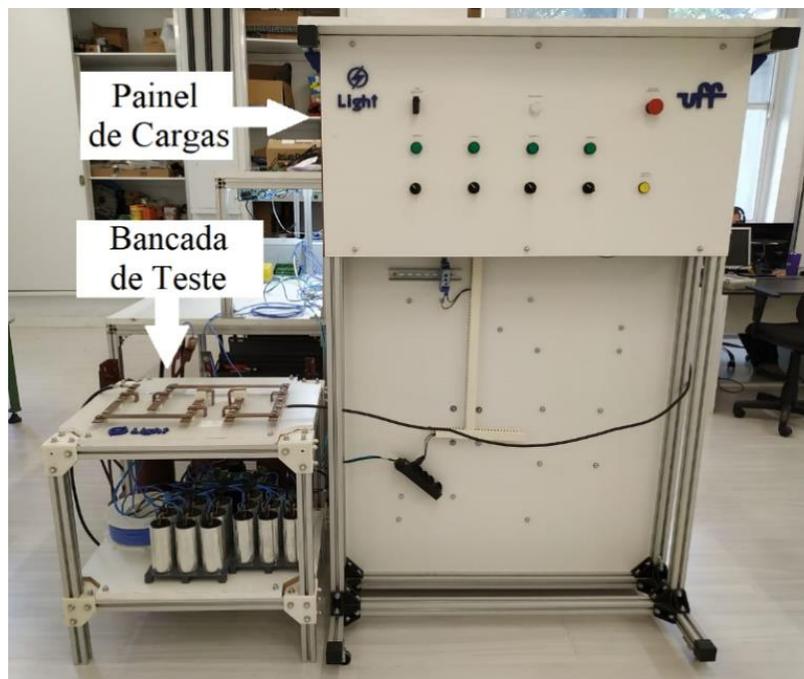


Figura 59 - Arranjo geral para ensaio do LCCSH.



Figura 60 - Transformador de 75 kVA utilizado nos ensaios.



Figura 61 - Impedância de carga e Reator toroidal.

Tabela 5 - Parâmetros dos itens utilizados nos ensaios.

Componente	Elemento	Valores	Unidade
Fonte de Tensão	Tensão	55	V_{rms}
	Resistência	0,05	Ω
Reator de Núcleo de Ar	Resistência	0,27	Ω
	Indutância	2,1	mH
Impedância de Carga	Resistência	4,05	Ω
Impedância de Curto-Circuito	Indutância	0,26	mH

4.2.2.2. Descrição dos ensaios

A bancada de teste foi construída de forma a permitir outras topologias de LCC, sem a necessidade de remoção e/ou a inserção de componentes, devendo para tal operação apenas alterar as ligações dos barramentos enumerados da Figura 62. A base inferior da bancada foi elaborada a fim de acomodar as chaves semicondutoras e dissipador, o *driver* de acionamento das chaves e reator de núcleo de ar para a limitação da corrente de curto-circuito.

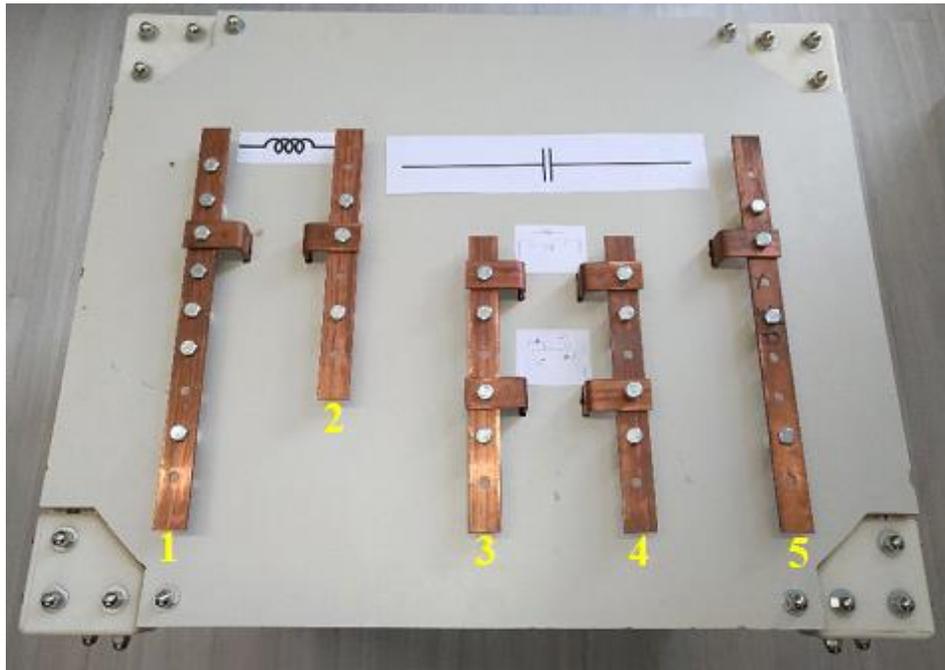


Figura 62 - Base superior da bancada.

Para manter os ensaios padronizados, a tensão da rede geralmente foi conectada no barramento 1 e as cargas no barramento 5. Com a finalidade de obter a corrente de prospectiva de curto-circuito, conecta-se as barras 1 e 5, ignorando então a aplicação do LCC. Para a montagem da topologia LCCSH do tipo indutor chaveado com tiristor, foram conectadas as barras 1-3 e 2-5, de modo a chavear o indutor e, ao mesmo tempo, não conectar o capacitor. Já o módulo supercondutor foi conectado entre as barras 4 e 5. A escolha das chaves de estado sólido é feita entre os terminais 3 e 4.

A Figura 63 mostra as ligações dos barramentos na base superior e o componentes na base inferior. Da mesma forma, observa-se que na barra 4 e 5 o módulo supercondutor está conectado e dentro de isopor com nitrogênio líquido resfriando este módulo.

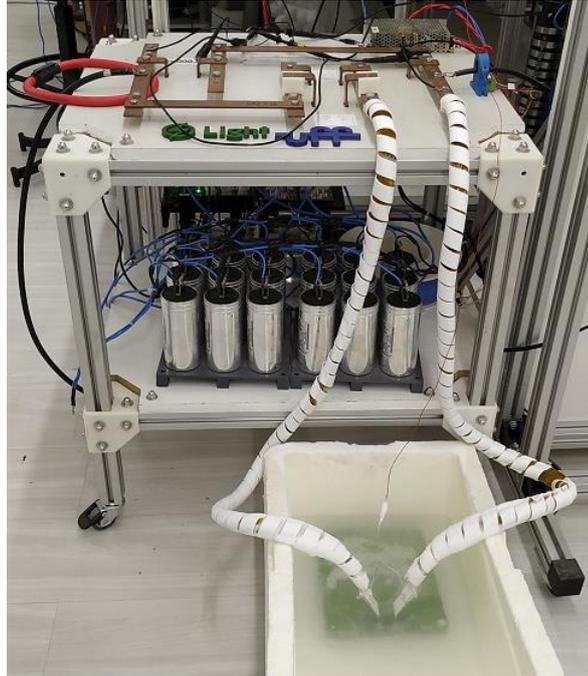


Figura 63 - Ligação do LCCSH do tipo indutor chaveado com tiristor.

A rotina do ensaio consiste em energizar o sistema através do disjuntor conectado ao primário do transformador e executar o comando de curto-circuito, registrando as informações relevantes no oscilógrafo como: A corrente do sistema, tensão do sistema, corrente no indutor, tensão no limitador, tensão no supercondutor e sinal de controle. O comando de falta foi aplicado para ser capaz de executá-lo a todo momento no instante que o ângulo da corrente (θ_i) estiver próximo de 0° , com erro máximo de 3° . Esse acionamento em instante programado serve para que seja possível comparar os resultados de ensaios diferentes.

4.2.3. Sistema de controle

No sistema de controle desenvolvido, sensores (neste trabalho utilizou-se sensor de corrente e sensor de tensão para comparar os resultados) enviam informações para um microcontrolador. Este dispositivo executa um algoritmo de detecção de falta e, com base no resultado processado, envia os sinais de disparo para os *drivers* controlarem o estado das chaves de estado sólido de maneira adequada.

4.2.3.1. Equipamento de medição, controle e operação

O microcontrolador utilizado neste trabalho foi o CC2640R2F, da empresa *Texas Instruments* [128], ilustrado na Figura 64, que executa o processamento de sinais do sistema de instrumentação. O algoritmo de detecção de curto-circuito foi elaborado na linguagem C para ser embarcado no CC2640R2F. Este microcontrolador dispõe de três processadores: um

ARM Cortex M3, apontado como a principal unidade de processamento; um *ARM Cortex M0*, inacessível ao usuário e designado apenas para finalidades de radiofrequência; e, um processador mais simples chamado *Sensor Controller*, indicado para amenizar parte da carga de processamento da unidade principal e poupar energia em dispositivos alimentados por baterias de pequeno porte. Este microcontrolador trabalha na faixa de tensão entre 0 e 3,3 V.



Figura 64 - Microcontrolador CC2640R2F, empresa *Texas Instruments*. FONTE: [128].

Para ser capaz de operar o microcontrolador CC2640R2F, utilizou-se um dispositivo de controle (ou sistema de controle) que recebe sinais analógicos, realiza conversões analógico/digitais e envia sinais ópticos. Este dispositivo, conforme mostrado na Figura 65, possuem 4 entradas de sensores (corrente ou tensão), 4 entradas de sensores tipo LEM, 2 entradas ópticas e 6 saídas ópticas. Ao lado deste dispositivo nota-se uma fonte de 24 V para alimentar o *driver* de acionamento dos tiristores.

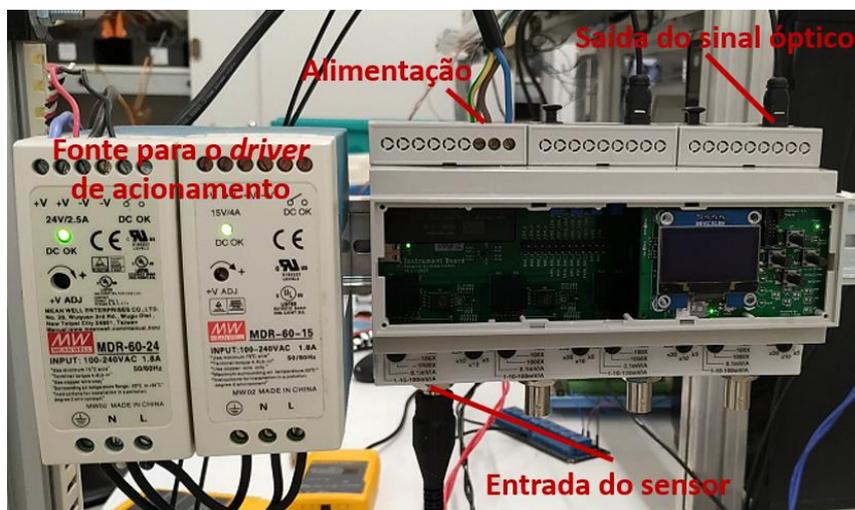


Figura 65 - Fonte de alimentação do *driver* dos tiristores e sistema de controle da (fabricante: *Powersave Soluções de Tecnologia em Energia*).

Além do Sistema de Controle, foi utilizado um conversor de sinal óptico para sinal analógico para comunicação com o *drive* de acionamentos dos tiristores, para evitar que ruídos externos interfiram no acionamento dos tiristores, conforme observado na Figura 66.

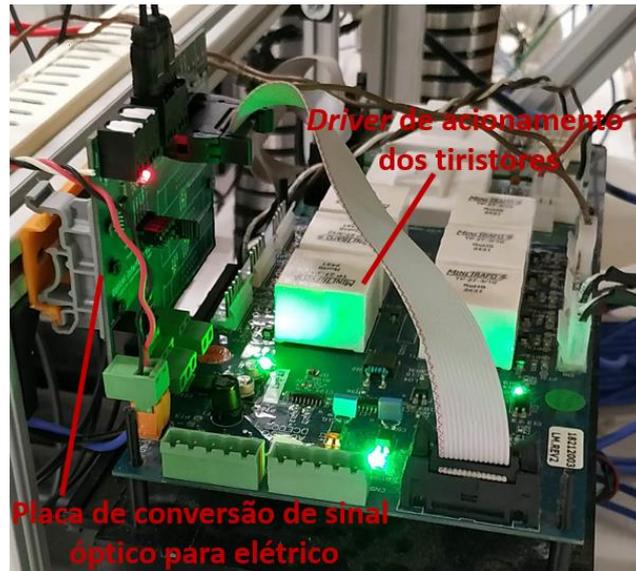


Figura 66 - Placa de conversão de sinal óptico para sinal elétrico e *driver* de acionamento dos tiristores (fabricante: *Powersave* Soluções de Tecnologia em Energia).

O algoritmo de controle que foi embarcado no dispositivo de controle e possui a mesma lógica descrita na seção 4.1.1.3, tendo a opção do controle sensoriando a corrente do sistema ou a tensão no LCCSH.

4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo realizou-se a modelagem computacional do LCCSH do tipo indutor série chaveado, apresentando o princípio de funcionamento do limitador, havendo a necessidade de modelar o elemento supercondutor, as chaves semicondutoras, o sistema de controle e a bancada de teste.

Foram descritos os elementos que compõem o protótipo do limitador como: indutor, chaves semicondutoras, módulo supercondutor. E do ensaio experimental: como construção de bancada de teste, equipamento de medição, *rack* de cargas, transformador de 75 kVA, impedância de carga, reator toroidal e o sistema de controle utilizado nos ensaios.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados encontrados tanto nas simulações quanto nos ensaios experimentais. Os principais pontos analisados foram a corrente do sistema, a tensão no sistema, correntes nos elementos limitadores e tensões relacionados ao módulo supercondutor.

5.1. ENSAIO DE CORRENTE E TENSÃO DO SISTEMA SEM O LCCSH

No ensaio desta seção utilizou-se o circuito sem o LCCSH proposto apresentado na Figura 67, onde medimos a corrente do sistema com o sensor de corrente A_1 e a tensão do sistema com o sensor de tensão V_1 , destacados em vermelho. O valor da corrente de curto-circuito sem o limitador instalado no sistema recebe o nome de prospectiva.

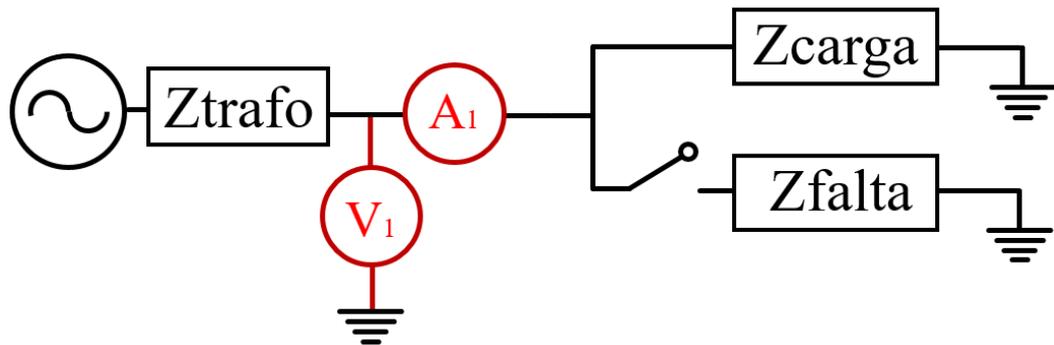


Figura 67 - Circuito de referência sem o LCCSH proposto.

A Figura 68 mostra a comparação da corrente simulada e ensaiada no sistema sem o limitador, em que ambas possuem uma corrente de regime permanente de $18,9 A_{pico}$. O momento da falta ocorre em aproximadamente em $0,106 s$, próximo ao ângulo zero (0°) e extingue em $0,2335 s$. Com exceção ao primeiro ciclo depois da falta que é classificado como transitório, a simulação e o ensaio alcançaram resultados similares durante o curto circuito, alcançando aproximadamente $600 A_{pico}$ a partir do terceiro semiciclo, que representa um aumento maior que trinta vezes o valor nominal. Entretanto, existe uma diferença na forma de onda da corrente, de forma que o resultado do ensaio apresenta uma deformação na corrente de curto circuito, como apresenta a Figura 69. Essa deformação se deve ao laço de histerese do núcleo do transformador. Dado que essa característica não foi considerada na simulação, portanto não é possível observar este comportamento na simulação.

A Figura 70 exhibe a comparação das tensões simulada e ensaiada no sistema sem o limitador. Em regime permanente, os dois possuem um valor aproximado de $80 V_{pico}$, e $60 V_{pico}$ no curto-circuito, provocando em 25% de queda de tensão no sistema. Existe uma diferença de tensão durante o curto-circuito, causada pela diferença entre o valor real e simulado da impedância do secundário do transformador. Há também uma deformação na forma de onda da tensão ensaiada que, da mesma forma da corrente, é provocada pelo laço de histerese do núcleo do transformador.

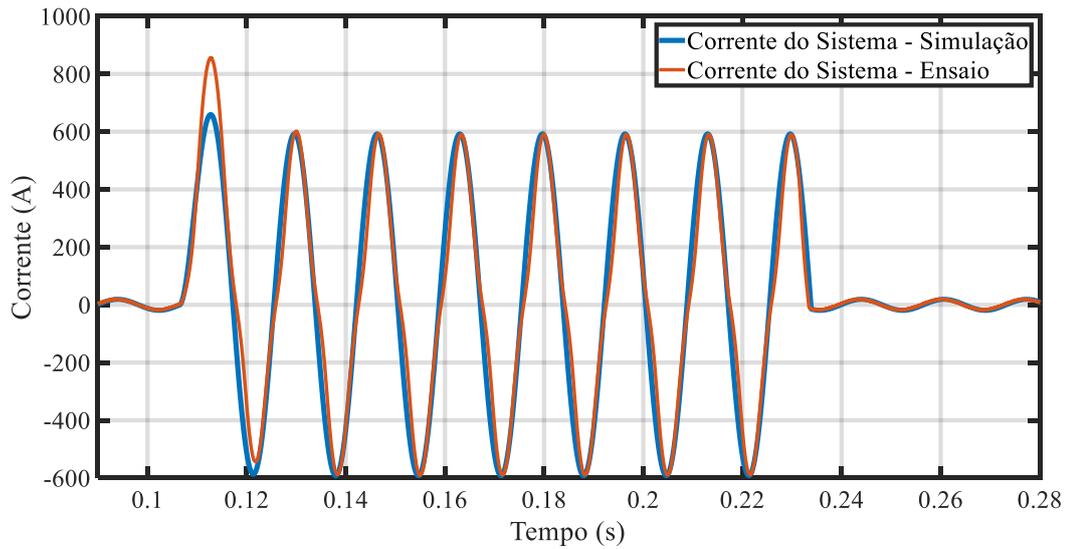


Figura 68 - Comparação entre as correntes prospectivas simulada e ensaiada do circuito sem o limitador.

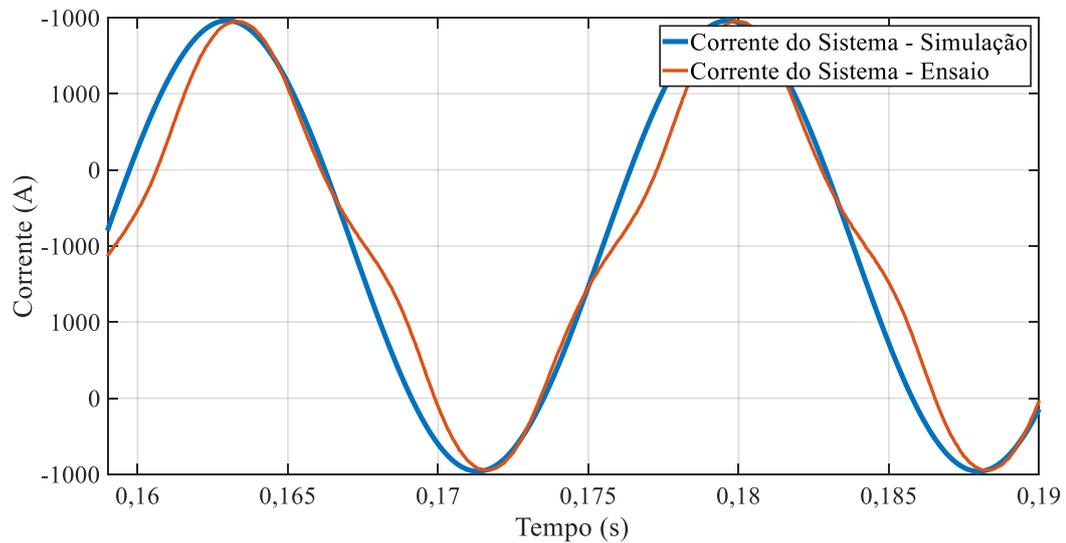


Figura 69 - Deformação da corrente de curto-circuito no ensaio devido ao laço de histerese do núcleo do transformador.

5.2. ENSAIOS COM O LCCSH PROPOSTO

Nos ensaios desta seção utilizou-se o circuito com o LCCSH proposto apresentado na Figura 71, onde mede-se a corrente do sistema e a corrente no ramo do indutor, através dos sensores de corrente A_1 e A_2 respectivamente. Já a corrente no ramo das chaves com o supercondutor, realizou-se a diferença entre as correntes do sistema e a corrente no ramo do indutor, indicado como um sensor de corrente A_3 na Figura 71. E as tensões do sistema, do supercondutor e do LCCSH proposto através dos sensores de tensão V_1 , V_2 e V_3 respectivamente. Todos os sensores estão destacados em vermelho na Figura 71.

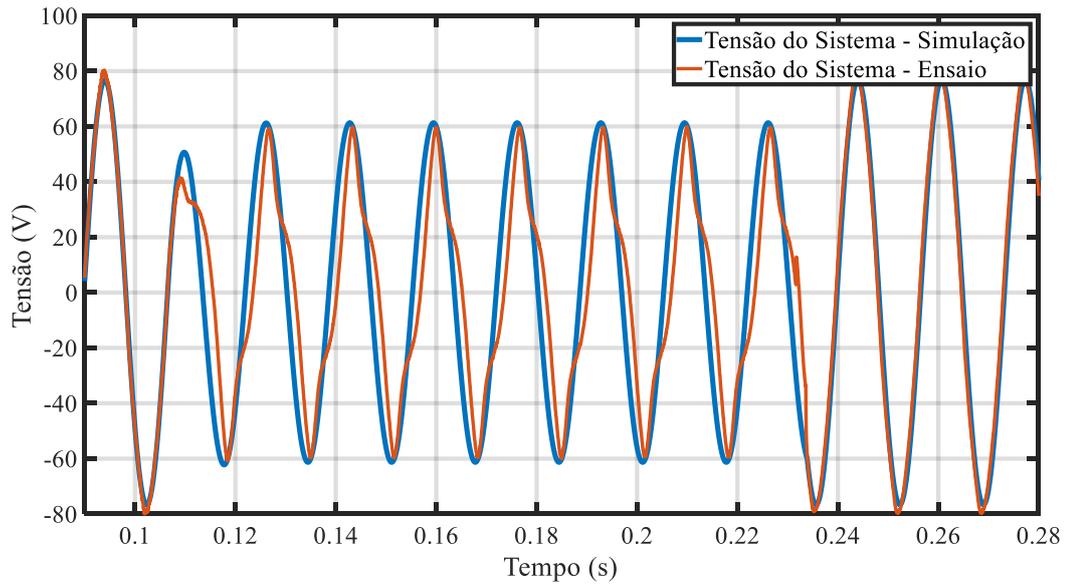


Figura 70 - Comparação entre as tensões ensaiada e simulada do circuito sem o limitador.

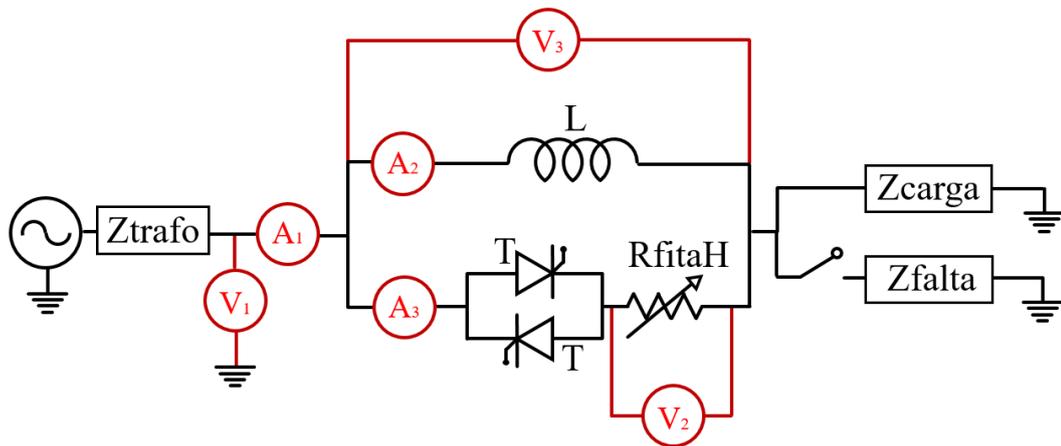


Figura 71 - Circuito de referência com o LCCSH proposto.

A Figura 72 apresenta a corrente do sistema utilizando o LCCSH proposto com sistema de controle sensoriando a corrente do sistema no gráfico de cima e no de baixo o sinal de controle que os tiristores recebem do sistema de controle. O controle deste ensaio foi configurado para detectar a falta quando ultrapassar a corrente instantânea de 50 A.

Inicialmente o sistema se encontra em regime permanente, a corrente deve conduzir pelo ramo do tiristores em série com a chave, no instante 0,106 s o curto-circuito ocorre e a corrente do sistema aumenta abruptamente e o supercondutor já deve transitar para o estado normal iniciando a limitação logo em seu primeiro semiciclo. Neste mesmo semiciclo, o sistema de controle deve identificar que a corrente do sistema ultrapassa o limite mínimo (limite mínimo e máximo explicados na Seção 4.1.1.3) e detecta que o sistema se encontra em estado de falta enviando o sinal para os *gates* dos tiristores encerrarem sua condução no

tiristor. Como mostra o sinal de controle da Figura 72, pela característica dos tiristores, a corrente é interrompida no semiconductor apenas quando passa por zero, na transição do primeiro para o segundo semiciclo. Assim, a partir do segundo semiciclo da falta, a corrente do sistema em curto-circuito é comutado para o ramo do indutor, que limita esta corrente de falta. Quando a falta extingue em 0,2268 s, a corrente do sistema diminui abaixo do limite máximo, e o sistema de controle percebe que a falta acabou, enviando o comando para os tiristores voltarem a conduzir.

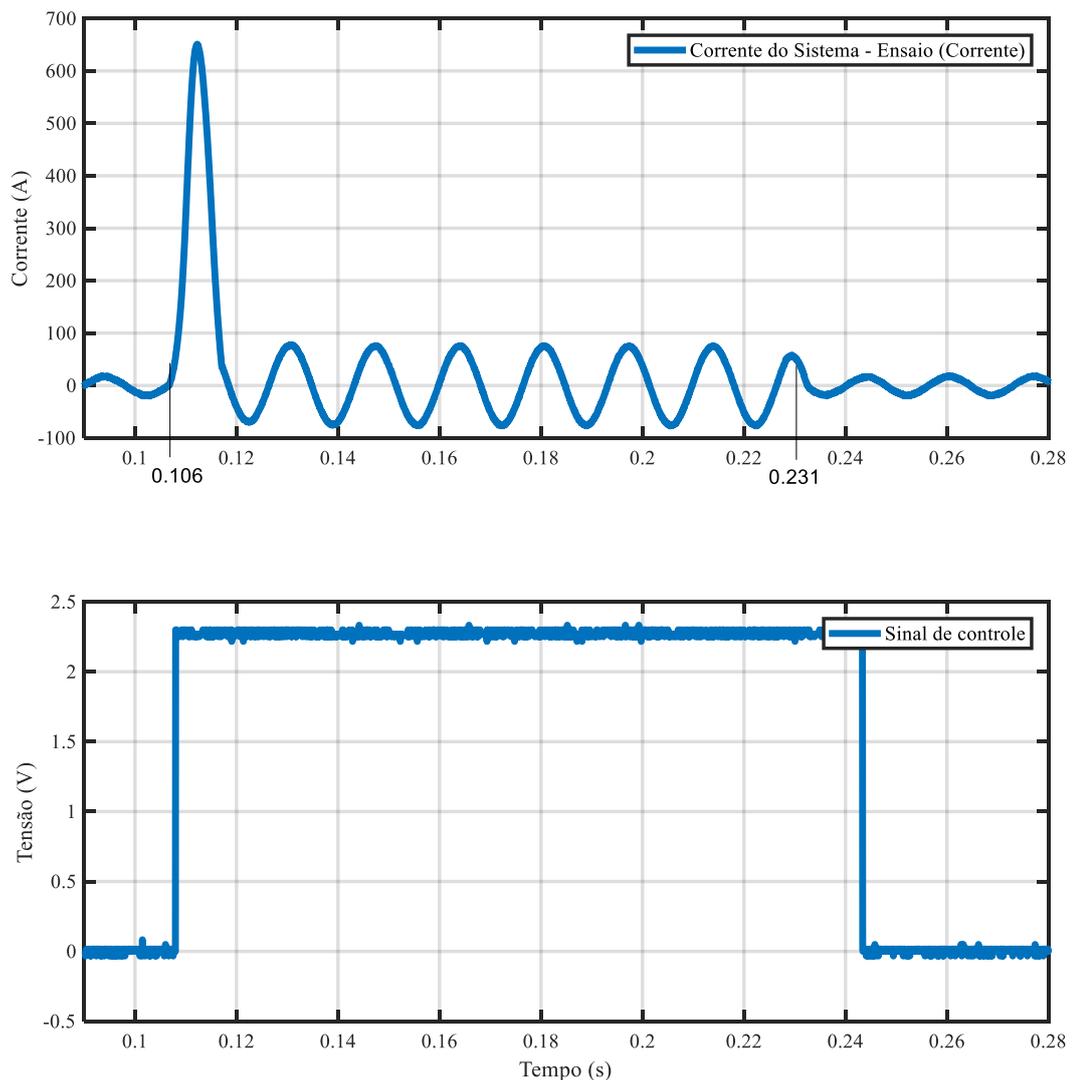


Figura 72 - Corrente do sistema com o controle sensoriando a corrente do sistema.

A Figura 73 apresenta a corrente do sistema e tensão do LCCSH proposto no gráfico da parte superior e o sinal de controle para as chaves baseado na tensão do LCCSH no gráfico da parte inferior. O sinal de controle possui esta forma de onda uma vez que um sinal trem de pulso é enviado para os tiristores, e o equipamento de medição tem taxa de amostragem

reduzida, apenas para visualização do estado de acionamento das chaves. O controle deste ensaio foi configurado para detectar a falta quando ultrapassar a tensão instantânea de 18 V.

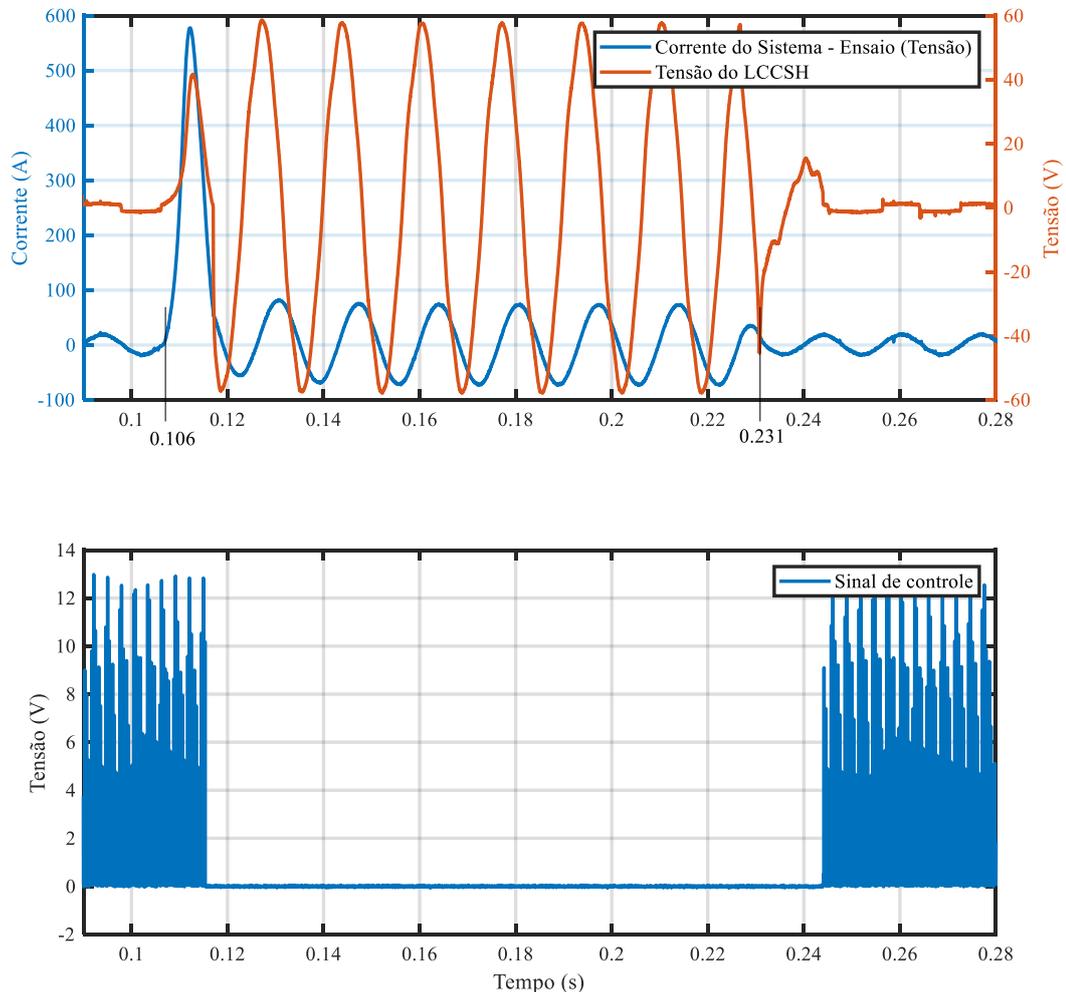


Figura 73 - Corrente do sistema e tensão no LCCSH com o controle sensoriando a tensão do LCCSH.

No gráfico superior, o sistema inicia sem a ocorrência de falta, com a corrente em sua nominal e a tensão no LCCSH é apenas a queda de tensão nas chaves, lembrando uma onda quadrada; quando ocorre a falta em 0,106 s, a corrente do sistema aumenta abruptamente em seu primeiro semiciclo e neste mesmo semiciclo o módulo supercondutor inicia sua transição do estado supercondutor para o estado normal, surgindo então uma impedância, consequentemente ocorrendo uma queda de tensão no LCCSH, a queda de tensão é detectada pelo sistema de controle quando ultrapassa um limite mínimo (limite mínimo e máximo explicados na Seção 4.1.1.3) e o sistema de controle entende que o sistema se encontra em estado de falta enviando o sinal para os *gates* dos tiristores encerrarem sua condução no tiristor, como mostra o sinal de controle da Figura 73, pela característica dos tiristores, a corrente é cortada apenas quando a corrente passa por zero, isto é, na transição do primeiro

para o segundo semiciclo do curto-circuito, assim a partir do segundo semiciclo da falta a corrente do sistema em curto-circuito é comutado para o ramo do indutor, que limita esta corrente de falta e apresenta uma queda de tensão no indutor que é a mesma do LCCSH que pode ser observado no gráfico superior da Figura 73.

Quando a falta extingue em 0,2268 s, a tensão no LCCSH diminui, pois, a corrente deixa ser a de falta e volta a ser a nominal, com isto, o sistema de controle verifica que a tensão se encontra em seu limite mínimo, logo o controle envia o comando para os tiristores voltarem a conduzir.

A Figura 74 apresenta a comparação entre a corrente simulada, corrente do sistema dos ensaios com o controle sensoriando a corrente do sistema e outro com controle sensoriando a tensão no LCCSH. Com exceção ao primeiro ciclo após a falta e a seguir do fim da falta, classificado como transitório, o comportamento ensaiado é bem representado pela simulação. Os curtos-circuitos foram programados para ocorrer mais próximo possível do ângulo zero, a fim de facilitar a comparação nos ensaios, porém os ensaios não foram exatamente no mesmo instante, tanto no início quanto a extinção da falta, tendo então uma ligeira diferença no primeiro ciclo após a falta e a seguir do fim da falta nos resultados dos ensaios.

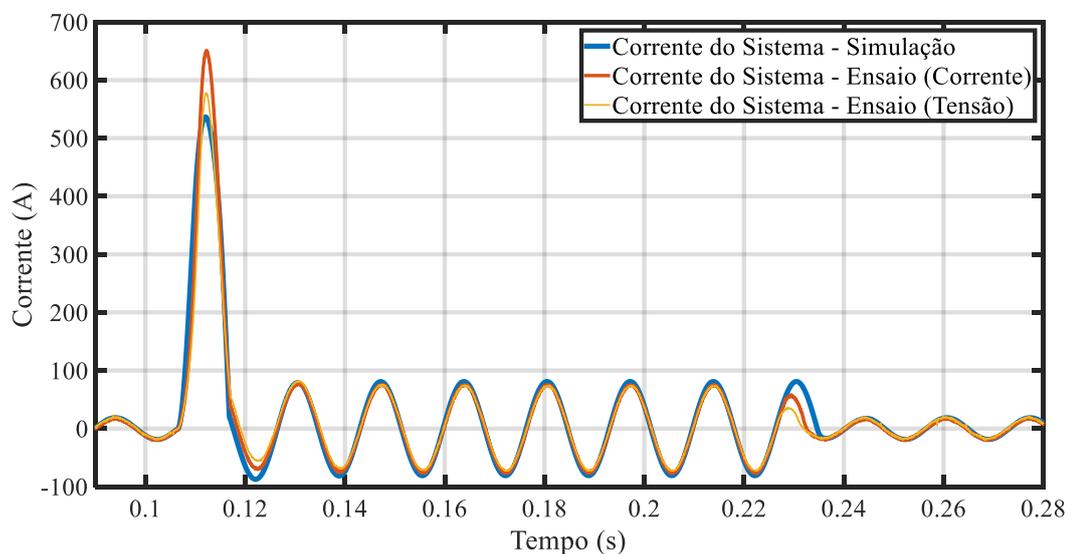


Figura 74 - Comparação entre as correntes simulada e ensaiada sensorizada por corrente e por tensão no sistema utilizando a topologia do LCCSH proposto.

Em 0,106 s ocorre a falta e o primeiro semiciclo da corrente de curto-circuito é conduzida no módulo supercondutor e conseqüentemente limitada por este módulo. Nesse semiciclo é possível observar uma redução da corrente em relação a corrente de prospectiva apresentada

na Figura 68. Do segundo semiciclo em diante, com a comutação do tiristor, a corrente é limitada pelo indutor.

A Figura 75 apresenta a comparação entre sinais de controle sensoriando a corrente do sistema e sensoriando a tensão no LCCSH. Os sinais de controle possuem formas diferentes uma vez que sinal de controle sensoriado pela corrente do sistema foi medido antes do *driver* de acionamento dos tiristores e o sinal de controle sensoriado pela tensão do LCCSH foi medido na saída do *driver*.

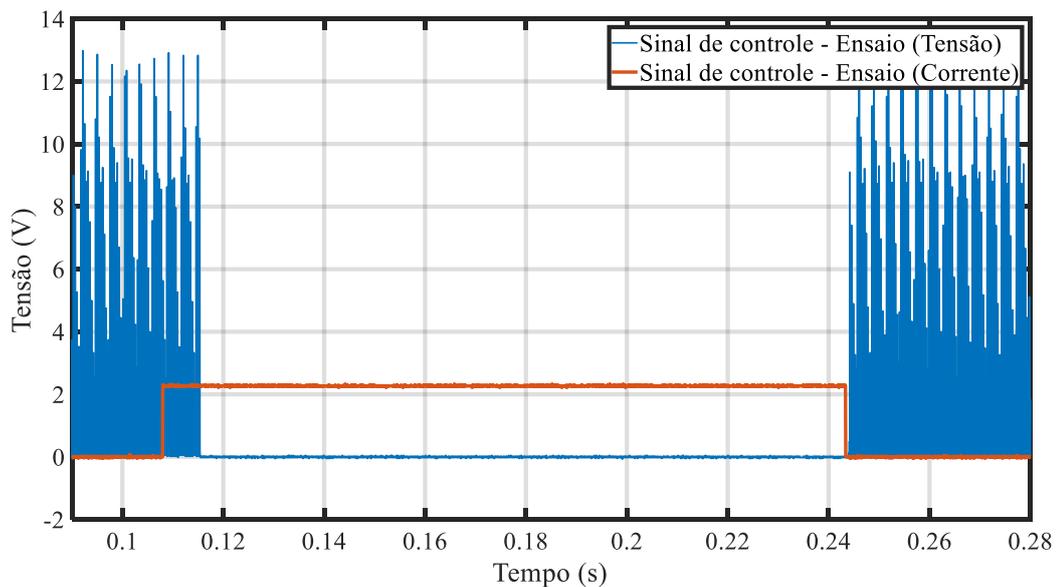


Figura 75 - Comparação entre os controles sensoriando a corrente do sistema e sensoriando a tensão no LCCSH.

Observa-se que o controle sensoriando a tensão do LCCSH possui um atraso no sinal, em relação ao sinal de controle sensoriado pela corrente do sistema, dado que, no controle sensoriado por tensão do LCCSH foi configurado para atuar quando tensão instantânea ultrapassar 18 V. Para o módulo supercondutor transitar do estado supercondutor para o estado normal a corrente do sistema deve ultrapassar 500 A, visto que esta é a corrente crítica da fita GdBCO utilizada no módulo supercondutor. Já o controle sensoriando a corrente do sistema foi configurada para o LCCSH atuar quando a corrente instantânea ultrapassar 50 A, valor abaixo da corrente crítica. Por este motivo o controle sensoriando corrente envia o sinal antes que o controle sensoriando a tensão no LCCSH, mas esta diferença de sinais não interferiu na atuação do LCCSH proposto, dado pela característica do tiristor que corta a condução de corrente em seu ramo apenas quando a corrente passa por zero. Portanto os ensaios são parecidos independentes do controle utilizado.

A Figura 76 exibe a comparação entre as correntes no indutor simulada e ensaiada com o controle sensoriando a corrente do sistema e outro sensoriando a tensão no LCCSH. Com exceção ao primeiro ciclo após a falta e logo após o fim da falta, classificado como transitório e também foram ensaios diferentes podendo não ocorrer os casos no mesmo instante de tempo, e a diferença de aproximadamente 10%, no qual é considerado aceitável para simulação devido a algumas resistências de contatos que não foram considerados, o comportamento ensaiado é bem representado pela simulação.

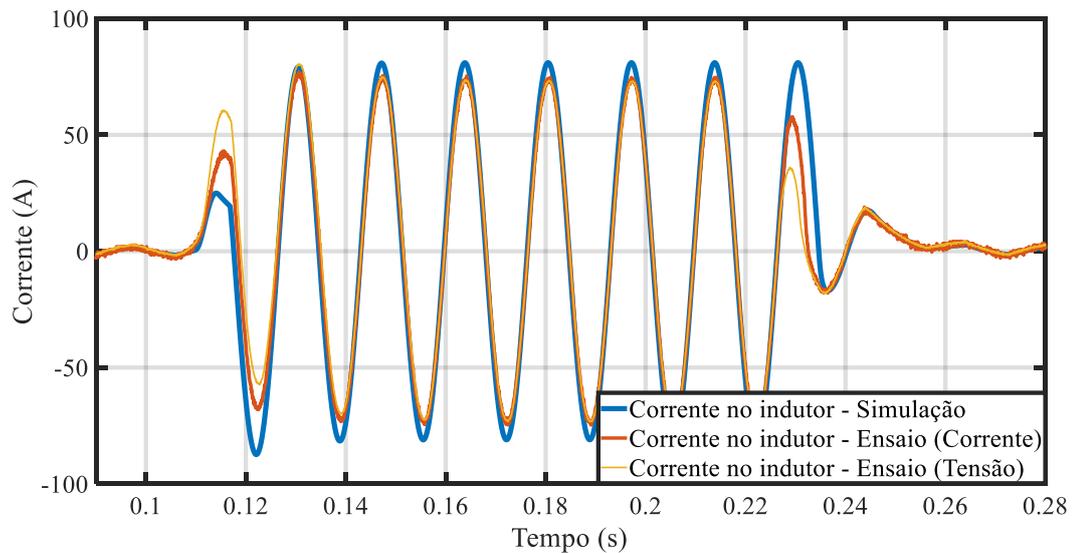


Figura 76 - Comparação entre as correntes no indutor simulada e ensaiada com controle sensoriando a corrente do sistema e com controle sensoriando a tensão LCCSH proposto.

No regime permanente há uma corrente de 1,6 A_{rms} . Ao ocorrer a falta, em 0,106 s, a corrente aumenta gradativamente, uma vez que com aumento da resistência do módulo supercondutor a corrente do sistema se divide entre os ramos do limitador no primeiro semiciclo. Com a comutação do tiristor, a corrente passa totalmente pelo indutor e deste modo é limitada. Observa-se que os ensaios são parecidos independentes do controle utilizado.

A Figura 77 apresenta a comparação entre as correntes no tiristor simulada e ensaiada com o controle sensoriando a corrente do sistema e outro sensoriando a tensão no LCCSH. No pico do primeiro semiciclo, após o início da falta, existe uma diferença no perfil do transitório da corrente. A fita limita a corrente de falta em aproximadamente 28% no primeiro semiciclo após a falta.

A Figura 78 mostra a comparação entre a tensão no supercondutor simulada e ensaiada com o controle sensoriando a corrente do sistema e outro sensoriando a tensão no LCCSH. Existe uma diferença, pois contém transitórios no primeiro ciclo após a falta que não foram

modelados na simulação. Apesar disso, observa-se que a variação de tensão e, conseqüentemente, de resistência, apenas ocorre no primeiro semiciclo do curto-circuito, visto que o supercondutor se encontra em seu estado supercondutor no regime permanente e no momento da falta ele inicia sua transição para o estado normal, e é retirado do sistema a partir do segundo semiciclo.

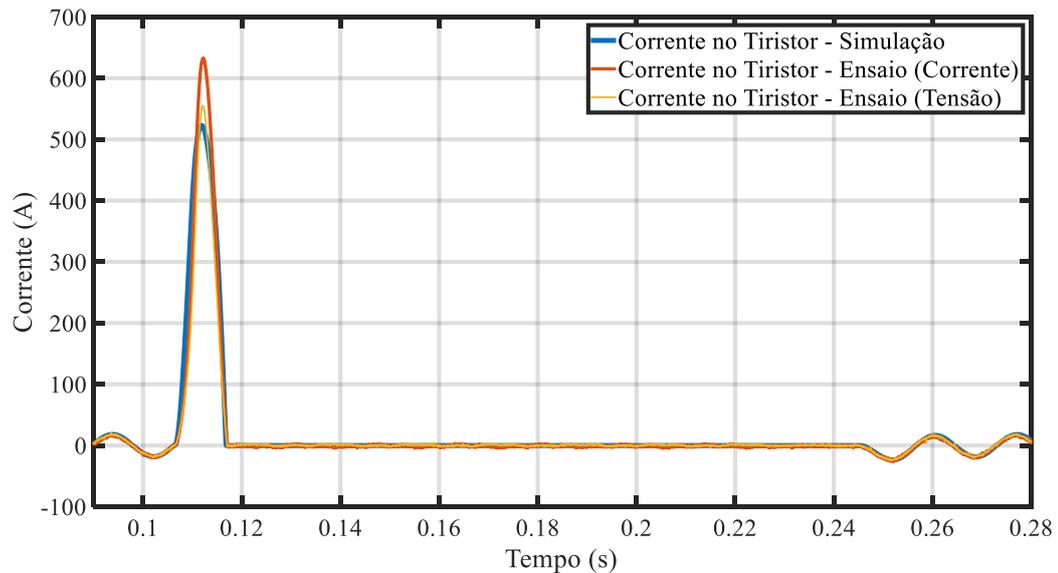


Figura 77 - Comparação entre as correntes no tiristor simulada e ensaiada com controle sensoriando a corrente do sistema e com controle sensoriando a tensão LCCSH proposto.

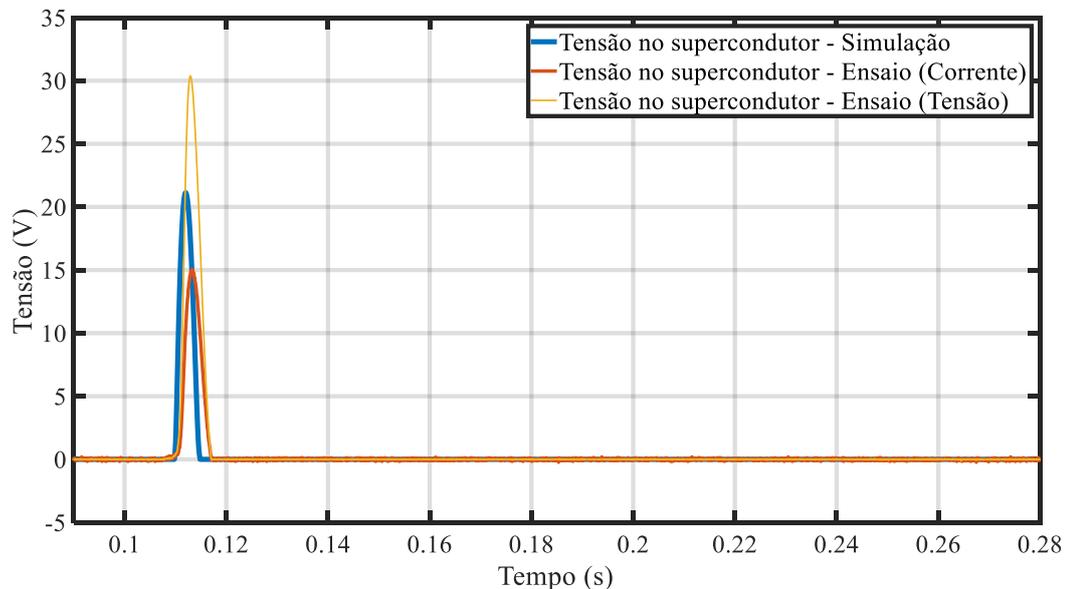


Figura 78 - Comparação entre a tensão no supercondutor simulada e a tensão ensaiada com controle sensoriando a corrente do sistema e com controle sensoriando a tensão LCCSH proposto.

A Figura 79 apresenta a comparação entre tensão nos terminais do limitador simulada e ensaiada com o controle sensoriando a tensão no LCCSH. Quando foi realizado o ensaio com

controle sensoriando a corrente do sistema, não se mediu esta tensão no LCCSH, por isso não se encontra nesta comparação. No regime permanente possui uma pequena queda tensão de aproximadamente 1,3 V, representada pela queda de tensão em cima dos tiristores em antiparalelo. Por esta razão a queda de tensão se encontra no semiciclo positivo e negativo. Quando ocorre o curto-circuito, em seu primeiro semiciclo a fita 2G limita a corrente, transitando do estado supercondutor para o estado normal, visto que a resistência aumenta neste ramo, a corrente do sistema se divide entre os ramos do limitador em seu primeiro semiciclo. Com a comutação do tiristor no segundo semiciclo, a queda de tensão se encontra totalmente no indutor. A queda de tensão no LCCSH é o parâmetro de entrada do sistema de controle sensoriado por tensão.

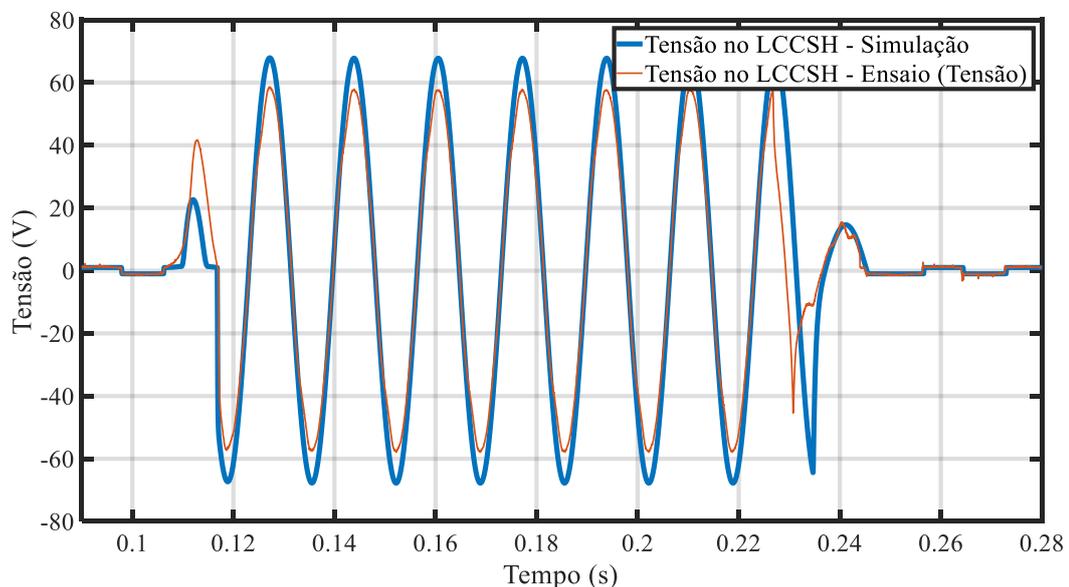


Figura 79 - Comparação entre a tensão nos terminais do LCCSH simulada e ensaiada com o controle sensoriado a tensão no LCCSH.

A Figura 80 apresenta a comparação entre as correntes no sistema nos ensaios sem e com o LCCSH proposto e com o controle sensoriando a corrente do sistema e outro sensoriando a tensão no LCCSH. . Observa-se que no primeiro semiciclo, o LCCSH possui uma limitação da corrente de curto-circuito. A partir do segundo semiciclo a limitação do LCCSH é maior, já que a corrente é conduzida pelo indutor. Deste modo o LCCSH tem uma redução percentual da corrente de 24% no primeiro ciclo e 87% a partir do nono semiciclo.

O material supercondutor utilizado no módulo supercondutor do LCCSH proposto, foi o modelo SANn12500 da SuNAM Co., e de acordo com o *datasheet*, sua corrente crítica é de

500 A, por esse motivo o primeiro semiciclo possui uma pequena limitação, uma vez que o material supercondutor transita apenas com correntes acima de 500 A.

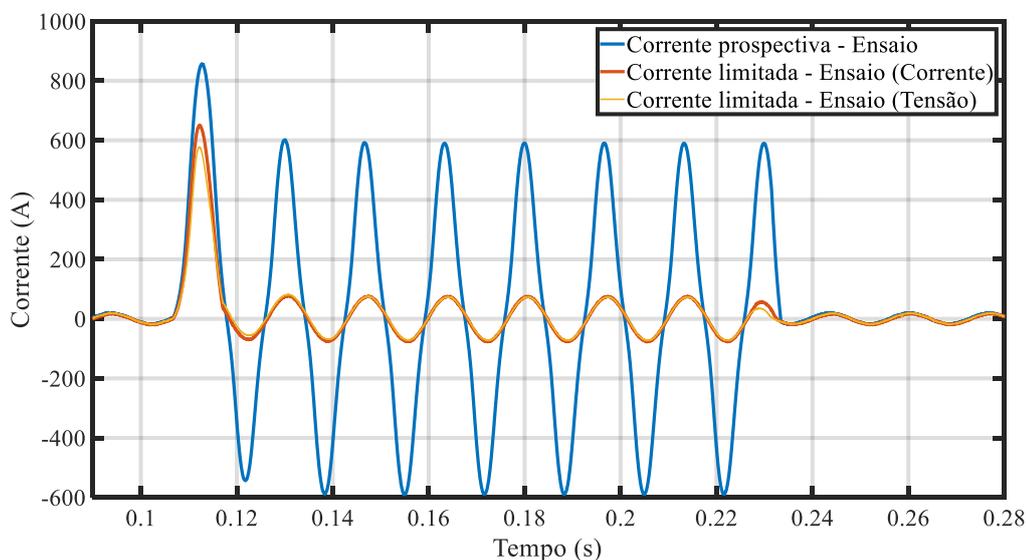


Figura 80 - Comparação da corrente no sistema nos ensaios sem e com o LCCSH proposto, com o controle sensoriando a corrente do sistema e outro sensoriando a tensão no LCCSH.

A Figura 81 apresenta a comparação da tensão no sistema com e sem o LCCSH proposto, utilizando os dois tipos de controle. Observa-se que o LCCSH que no primeiro semiciclo da falta não houve uma redução de afundamento significativo comparando o sistema com e sem o LCCSH, mantendo um afundamento de próximo de 44 %. No entanto, após o primeiro semiciclo o indutor limita a corrente de falta, reduzindo o afundamento para aproximadamente para 5 % o afundamento de tensão que antes era de 25 % sem o LCCSH.

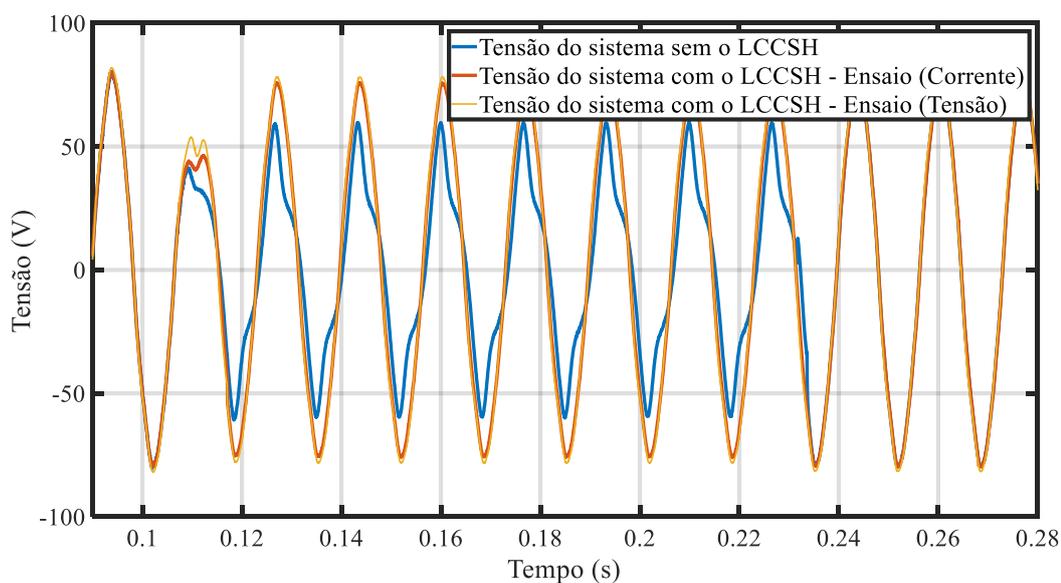


Figura 81 - Comparação da tensão do sistema nos ensaios sem e com o LCCSH proposto, com o controle sensoriando a corrente do sistema e outro sensoriando a tensão no LCCSH.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões e sugeridos trabalhos futuros.

6.1. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma topologia de um Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor Híbrido (LCCSH) do tipo Indutor Série Chaveado por Tiristor, contemplando: estudos na literatura sobre Limitadores de Corrente de Curto-Circuito; modelagem computacional do LCCSH proposto e elaboração do projeto básico do limitador em escala laboratorial; construção e ensaio do protótipo de bancada, e; comparação entre os resultados da simulação e dos ensaios experimentais.

Antes de escolher qual LCC seria estudado, realizou-se um estudo teórico sobre correntes de curto-circuito, definições de LCCs e as principais características almejadas. Foram apresentados os LCCs disponíveis comercialmente (reator de núcleo de ar, dispositivo pirotécnico e resistores de aterramento), os LCCs supercondutores (LCCS) do tipo resistivo, núcleo blindado e núcleo saturado, os LCCs de estado sólido (limitadores que utilizam chaves semicondutoras de potência em seu modo de atuação), e os LCCs denominados como híbridos (LCCSH), que utilizam chaves semicondutoras e elementos supercondutores em suas topologias. Todas essas tecnologias de limitação foram pesquisadas em diversos trabalhos encontrados na literatura científica, revelando seus princípios de funcionamento, e as vantagens e desvantagens que sua aplicação podem trazer para o sistema a ser inserido. A partir dessa pesquisa bibliográfica foi escolhida a topologia Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor Híbrido (LCCSH) do tipo Indutor Série Chaveado por Tiristor, para um estudo posterior, modelagem computacional e projeto do protótipo.

Foi fundamental a modelagem computacional do LCCSH proposto. Este modelo foi elaborado por meio do programa PSCAD/EMTDC, na qual permitiu a criação de circuitos elétricos por elementos já estabelecidos e disponibilizados em sua biblioteca principal. Além disto, foi feita a modelagem do elemento supercondutor e do sistema de controle dos tiristores, com seu comportamento baseado em código de programação. Para a modelagem da fita supercondutora 2G, considerou-se uma analogia eletrotérmica para a solução do acoplamento existente entre tais fenômenos físicos, descrevendo a variação não-linear de sua resistividade durante a transição do estado supercondutor para o estado normal. Utilizou-se o sistema de controle de duas formas, um atuando de acordo com a corrente que passa no sistema e outro atuando de acordo com a queda de tensão no LCCSH.

Após a modelagem do computacional do LCCSH, foram adquiridos e construídos os elementos que compõem o limitador para posterior montagem numa bancada (protótipo do

limitador) e ainda construído um *rack* para comutação das cargas. Os elementos dimensionados foram o indutor (reator de núcleo de ar), chaves semicondutoras (tiristor) e fita supercondutora 2G. Outros elementos que compõem o ensaio foram apresentados, como transformador, impedâncias de carga e de curto-circuito.

O LCCSH proposto apresentou resultado interessante, uma vez que conseguiu limitar a corrente de curto-circuito em menos de meio ciclo, devido ao elemento supercondutor e os semiciclos subsequentes limitados pelo indutor em virtude do tiristor (que abre o ramo do módulo supercondutor apenas quando a corrente de curto-circuito passa por zero, após o primeiro semiciclo), também observa-se que há uma redução no afundamento de tensão do sistema para aproximadamente 5 %, que antes era de 25 % de afundamento, quando o indutor limita a corrente de falta. Uma vantagem deste modelo é que o elemento supercondutor permanece no sistema apenas o primeiro semiciclo do curto-circuito, evitando que este ultrapasse o tempo de suportabilidade na condução de corrente em estado normal que é de 100 ms sem que ela danifique [11].

Em relação ao sistema de controle utilizado, os resultados dos ensaios experimentais foram similares, independente se o controle foi sensoriando a corrente do sistema ou sensoriando a tensão no LCCSH. Conclui-se que o que pode definir a vantagem seria o custo entre os sensores de corrente e tensão, De acordo com os resultados experimentais obtidos neste trabalho. o sensor de corrente deve suportar correntes de até 580 A e o sensor de tensão deve suportar até 60 V.

Por fim, apresentou-se os resultados das simulações e ensaios. Foram comparados os valores encontrados nas simulações com suas respectivas modelagens computacionais e observado que foram obtidos resultados semelhantes. Este modelo computacional mostrou-se robusto, podendo ser utilizado na análise dos efeitos que um LCCSH pode apresentar em uma escala de potência maior em estudos futuros.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo realizado por este trabalho, foi possível identificar determinados temas complementares que colaboram para análise do LCCSH proposto, conforme listados.

- Análise comparativa entre o LCCSH proposto com outros modelos de LCCs como: LCCs disponíveis comercialmente (reator de núcleo de ar, dispositivo pirotécnico e resistores de aterramento), os LCCs do tipo resistivo, núcleo

blindado e núcleo saturado, os LCCEs (limitadores que utilizam chaves semicondutoras de potência em seu modo de atuação), e outras topologias LCCSH, que utilizam chaves semicondutoras e elementos supercondutores em suas topologias.

- O aumento do nível de curto-circuito no protótipo de bancada iria melhorar a limitação no primeiro semiciclo do LCCSH, pois a fita supercondutora utilizada no módulo supercondutor é do modelo SANn12500 da SuNAM Co. e apresenta uma corrente crítica de 500 A.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Ahmadvand, S. Khanabdal, e M. T. Hagh, “A Novel Three-Phase Saturable-Core Fault Current Limiter Structure”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, n° 2, p. 410–419, abr. 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2890142.
- [2] L. M. Castro, D. Guillen, e F. Trillaud, “On Short-Circuit Current Calculations Including Superconducting Fault Current Limiters (ScFCLs)”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, n° 5, p. 2513–2523, out. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2800732.
- [3] A. N. R. L. Sirisha e A. K. Pradhan, “Parameter Estimation of Resonant Fault Current Limiter for Protection and Stability Analysis”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, n° 3, p. 2288–2295, maio 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2608904.
- [4] M. Eladawy e I. A. Metwally, “Design and Performance Analysis of Single-Phase Pre-Saturated Core Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, n° 6, p. 2603–2612, dez. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2808318.
- [5] A. Abramovitz, K. M. Smedley, F. De La Rosa, e F. Moriconi, “Prototyping and Testing of a 15 kV/1.2 kA Saturable Core HTS Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, n° 3, p. 1271–1279, jul. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2256801.
- [6] H. Radmanesh e S. H. Fathi, “Fast AC reactor-based fault current limiters application in distribution network”, *High Volt.*, vol. 3, n° 3, p. 232–243, set. 2018, doi: 10.1049/hve.2017.0195.
- [7] T. Ghanbari e E. Farjah, “A Multiagent-Based Fault-Current Limiting Scheme for the Microgrids”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, n° 2, p. 525–533, abr. 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2282917.
- [8] C. Meyer, P. Kollensperger, e R. W. De Doncker, “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.*, Anaheim, CA, USA, 2004, vol. 3, p. 1825–1831, doi: 10.1109/APEC.2004.1296114.
- [9] M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, e I. Rahmati, “Reliability Study of HV Substations Equipped With the Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, n° 2, p. 610–617, abr. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2179122.
- [10] “IEEE Guide for Fault Current Limiter (FCL) Testing of FCLs Rated above 1000 V AC”, IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7473798.
- [11] S. Elschner *et al.*, “ENSYSTROB - Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for Medium Voltage Application”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, n° 3, p. 1209–1212, jun. 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2100799.
- [12] S. Elschner *et al.*, “ENSYSTROB – Design, manufacturing and test of a 3-phase resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application”, *Phys. C Supercond. Its Appl.*, vol. 482, p. 98–104, nov. 2012, doi: 10.1016/j.physc.2012.04.025.
- [13] D. I. Lawson e J. H. McGuire, “The Solution of Transient Heat-flow Problems by Analogous Electrical Networks”, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 167, n° 1, p. 275–290, jun. 1953, doi: 10.1243/PIME_PROC_1953_167_034_02.
- [14] A. F. Robertson e D. Gross, “An electrical-analog method for transient heat-flow analysis”, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 61, n° 2, p. 105, ago. 1958, doi: 10.6028/jres.061.016.
- [15] M. M. Lannes, “Limitador eletrônico de corrente de curto-circuito baseado em circuito ressonante controlado por dispositivos semicondutores de potência”, Dissertação, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2006.

- [16] W. T. B. de Souza, “Simulações e Ensaio com Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores do Tipo Resistivo”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [17] A. M. Monteiro, “Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no ipc (interphase power controller)”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [18] I. I. B. de Transformadores Ltda., “Reatores a Núcleo de Ar”, 25-mar-2018.
- [19] H. J. Schettino, “Análise de Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo para Inserção de Geradores ao Sistema de Transmissão”, Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- [20] G. Mafra, “Aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores em sistemas elétricos de distribuição e plataformas de produção de petróleo e gás”, Niterói, 2016. 135 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Montagem Industrial) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.
- [21] L. Kovalsky, X. Yuan, K. Tekletsadik, A. Keri, J. Bock, e F. Breuer, “Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 15, n° 2, p. 2130–2133, jun. 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849471.
- [22] A. Morandi, “State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system”, *Phys. C Supercond.*, vol. 484, p. 242–247, jan. 2013, doi: 10.1016/j.physc.2012.03.004.
- [23] A. Hobl, S. Elschner, J. Bock, S. Kramer, C. Janke, e J. Schramm, “Superconducting fault current limiters: a new tool for the ‘grid of the future’”, in *CIREN 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid*, Lisbon, Portugal, 2012, p. 296–296, doi: 10.1049/cp.2012.0852.
- [24] W. T. B. De Sousa, “Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters”, 2015.
- [25] S. Alaraifi e M. S. El Moursi, “Design considerations of superconducting fault current limiters for power system stability enhancement”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, n° 9, p. 2155–2163, jun. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0549.
- [26] W. T. Batista de Sousa, T. Mariano Lessa Assis, A. Polasek, A. M. Monteiro, e R. de Andrade, “Simulation of a Superconducting Fault Current Limiter: A Case Study in the Brazilian Power System With Possible Recovery Under Load”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, n° 2, p. 1–8, mar. 2016, doi: 10.1109/TASC.2015.2510609.
- [27] Y. X. Tan *et al.*, “Resistive type superconducting fault current limiter and current flowing time”, in *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Shanghai, China, nov. 2015, p. 290–291, doi: 10.1109/ASEMD.2015.7453578.
- [28] Y. X. Tan *et al.*, “Heat generation and temperature rise in a resistive type superconducting fault current limiter”, in *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Shanghai, China, nov. 2015, p. 286–287, doi: 10.1109/ASEMD.2015.7453576.
- [29] Y. Tan *et al.*, “Investigation on the development of a resistive superconducting fault current limiter”, in *2015 3rd International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*, Busan, out. 2015, p. 212–216, doi: 10.1109/ICEPE-ST.2015.7368374.
- [30] H. Heydari, H. Hooshyar, M. Savaghebi, e R. Sharifi, “Harmonics Consideration of a Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter”, in *2007 IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa - PowerAfrica*, Johannesburg, South Africa, jul. 2007, p. 1–4, doi: 10.1109/PESAfr.2007.4498075.

- [31] S. M. Blair, C. D. Booth, e G. M. Burt, “Current–Time Characteristics of Resistive Superconducting Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, n° 2, p. 5600205–5600205, abr. 2012, doi: 10.1109/TASC.2012.2187291.
- [32] Byung Chul Sung e Jung-Wook Park, “Optimal Parameter Selection of Resistive SFCL Applied to a Power System Using Eigenvalue Analysis”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, n° 3, p. 1147–1150, jun. 2010, doi: 10.1109/TASC.2010.2041333.
- [33] G. Angeli, M. Bocchi, L. Serri, e L. Martini, “Short-Circuit Current Limitation Through 2G YBCO Resistive-Type SFCL Devices: A Model for Technical and Economic Comparison With Traditional Air-Core Reactors”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, n° 4, p. 1–5, jun. 2018, doi: 10.1109/TASC.2018.2820720.
- [34] N. Hayakawa, Y. Maeno, e H. Kojima, “Fault Current Limitation Coordination in Electric Power Grid With Superconducting Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, n° 4, p. 1–4, jun. 2018, doi: 10.1109/TASC.2018.2818279.
- [35] J. Rusiński, “Impact of superconducting fault current limiter on the distributed energy source work”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, n° 2, p. 310–317, jan. 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1013.
- [36] J. S. Reddy e S. Chatterjee, “Superconducting fault current limiter for smart grid application”, in *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Coimbatore, fev. 2017, p. 1–5, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8118025.
- [37] P. K. R. Manigilla, N. K. Sharma, e S. R. Samantaray, “Application of superconducting fault current limiter to cloud the presence of distributed generation”, in *2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Bangalore, nov. 2017, p. 1–6, doi: 10.1109/APPEEC.2017.8308949.
- [38] A. Moghadasi e A. I. Sarwat, “Optimal analysis of resistive superconducting fault current limiters applied to a variable speed wind turbine system”, in *SoutheastCon 2015*, Fort Lauderdale, FL, USA, abr. 2015, p. 1–7, doi: 10.1109/SECON.2015.7132944.
- [39] H. S. Ruiz, X. Zhang, e T. A. Coombs, “Resistive-Type Superconducting Fault Current Limiters: Concepts, Materials, and Numerical Modeling”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, n° 3, p. 1–5, jun. 2015, doi: 10.1109/TASC.2014.2387115.
- [40] F. Zheng, C. Deng, L. Chen, S. Li, Y. Liu, e Y. Liao, “Transient Performance Improvement of Microgrid by a Resistive Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, n° 3, p. 1–5, jun. 2015, doi: 10.1109/TASC.2015.2391120.
- [41] C. Rey, Org., *Superconductors in the power grid: materials and applications*. Amsterdam: Woodhead Publ./Elsevier, 2015.
- [42] T. Janowski e G. Wojtasiewicz, “Possibility of Using the 2G HTS Superconducting Transformer to Limit Short-Circuit Currents in Power Network”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, n° 3, p. 5500804–5500804, jun. 2012, doi: 10.1109/TASC.2011.2174570.
- [43] H.-S. Choi, Y.-S. Cho, e S.-H. Lim, “Operational Characteristics of Hybrid-Type SFCL by the Number of Secondary Windings With YBCO Films”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, n° 2, p. 719–722, jun. 2006, doi: 10.1109/TASC.2006.871270.
- [44] Hyo-Sang Choi, Ju-Hyoung Lee, Yong-Sun Cho, e Hyoung-Min Park, “Recovery Behaviors of the Transformer-Type SFCL With or Without Neutral Lines”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, n° 3, p. 1793–1796, jun. 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2018051.
- [45] Meng Song, Yuejin Tang, Yusheng Zhou, Li Ren, Lei Chen, e Shijie Cheng, “Electromagnetic Characteristics Analysis of Air-Core Transformer Used in Voltage

- Compensation Type Active SFCL”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, n° 3, p. 1194–1198, jun. 2010, doi: 10.1109/TASC.2010.2043084.
- [46] A. Gyore, I. Vajda, V. Meerovich, e V. Sokolovsky, “Experimental Determination of Optimal Construction of Current Limiting Transformers Using HTS Tapes and Rings”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, n° 3, p. 1976–1980, jun. 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2017756.
- [47] T. Janowski, S. Kozak, B. Kondratowicz-Kucewicz, G. Wojtasiewicz, e J. Kozak, “Analysis of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, n° 2, p. 1788–1790, jun. 2007, doi: 10.1109/TASC.2007.898134.
- [48] A. M. Konin e O. L. Kiprijanovic, “Dynamics Modeling of Fast Transformer Type Fault Current Limiter Loaded With HTSC”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, n° 4, p. 3853–3856, dez. 2007, doi: 10.1109/TASC.2007.910145.
- [49] Hyo-Sang Choi e Yong-Sun Cho, “Critical Current Equalization via Neutral Lines in a Transformer-Type SFCL”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, n° 2, p. 733–736, jun. 2008, doi: 10.1109/TASC.2008.920635.
- [50] H. Yamaguchi e T. Kataoka, “Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter With Shunt Impedance and Inductive Load”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, n° 2, p. 668–671, jun. 2008, doi: 10.1109/TASC.2008.921258.
- [51] P. Surdacki, L. Jaroszynski, e L. Wozniak, “Limiting short-circuit current with a 10 kVA superconducting transformer”, in *2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (ELMECO & AoS)*, Nałęczów (Naleczow), Poland, dez. 2017, p. 1–4, doi: 10.1109/ELMECO.2017.8267764.
- [52] F. Ferreira, J. Murta-Pina, e J. Martins, “Development of a computational tool for simulating inductive superconducting fault current limiters”, in *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Costa da Caparica, Portugal, jun. 2015, p. 476–481, doi: 10.1109/CPE.2015.7231122.
- [53] M. Harada, K. Okuda, Y. Yokomizu, e T. Matsumura, “Periodic behavior of magnetic flux density in flat-type inductive fault current limiter with YBCO thin film discs during AC over-current carrying period”, in *2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, Matsue-city, Japan, out. 2013, p. 1–4, doi: 10.1109/ICEPE-ST.2013.6804330.
- [54] H. Heydari e R. Sharifi, “Three-Dimensional Pareto-Optimal Design of Inductive Superconducting Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, n° 5, p. 2301–2311, out. 2010, doi: 10.1109/TASC.2010.2053366.
- [55] Y. Jia, J. Yuan, Z. Shi, H. Zhu, Y. Geng, e J. Zou, “Simulation Method for Current-Limiting Effect of Saturated-Core Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, n° 4, p. 1–4, jun. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2536563.
- [56] J. Moscrop, “Design and development of a 3-phase saturated core high temperature superconducting fault current limiter”, apresentado em International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009.
- [57] Y. Jia, M. D. Ainslie, D. Hu, e J. Yuan, “Numerical Simulation and Analysis of a Saturated-Core-Type Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, n° 4, p. 1–5, jun. 2017, doi: 10.1109/TASC.2017.2656619.
- [58] Y. Jia, Z. Shi, H. Zhu, L. Hao, J. Zou, e J. Yuan, “Cognition on the Current-Limiting Effect of Saturated-Core Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, n° 11, p. 1–4, nov. 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2436715.

- [59] C. Zhang, Y. Tang, Y. Xu, L. Ren, Z. Wang, e S. Liang, “Analysis of Magnetic Circuit and Leakage Magnetic Field of a Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, n° 4, p. 1–5, jun. 2017, doi: 10.1109/TASC.2017.2672819.
- [60] Y. Nikulshin *et al.*, “Saturated Core Fault Current Limiters in a Live Grid”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, n° 3, p. 1–4, abr. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2524444.
- [61] N. Vilhena, J. Murta-Pina, A. Pronto, e A. Alvarez, “A Design Methodology for the Optimization of Three-Phase SFCL of Saturated Cores Type”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, n° 4, p. 1–5, jun. 2018, doi: 10.1109/TASC.2018.2806001.
- [62] Z. Wei, Y. Xin, J. Jin, e Q. Li, “Optimized Design of Coils and Iron Cores for a Saturated Iron Core Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, n° 7, p. 1–4, out. 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2601621.
- [63] B. Li, C. Li, e F. Guo, “Application Studies on the Active SISFCL in Electric Transmission System and Its Impact on Line Distance Protection”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, n° 2, p. 1–9, abr. 2015, doi: 10.1109/TASC.2014.2368131.
- [64] D. Sarkar, A. Upadhyaya, A. B. Choudhury, e D. Roy, “Performance analysis of a saturated iron core superconducting fault current limiter using different core materials”, in *Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*, Calcutta, India, jan. 2014, p. 387–391, doi: 10.1109/CIEC.2014.6959116.
- [65] A. Abramovitz e K. Ma Smedley, “Survey of Solid-State Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, n° 6, p. 2770–2782, jun. 2012, doi: 10.1109/TPREL.2011.2174804.
- [66] B. Chen, A. Q. Huang, M. Baran, C. Han, e W. Song, “Operation Characteristics of Emitter Turn-Off Thyristor (ETO) for Solid-State Circuit Breaker and Fault Current Limiter”, in *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.*, USA, 2006, p. 174–178, doi: 10.1109/APEC.2006.1620535.
- [67] T. Genji, O. Nakamura, M. Isozaki, M. Yamada, T. Morita, e M. Kaneda, “400 V class high-speed current limiting circuit breaker for electric power system”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, n° 3, p. 1428–1435, jul. 1994, doi: 10.1109/61.311172.
- [68] M. M. R. Ahmed, G. A. Putrus, L. Ran, e R. Penlington, “Development of a Prototype Solid-State Fault-Current Limiting and Interrupting Device for Low-Voltage Distribution Networks”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, n° 4, p. 1997–2005, out. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2006.874584.
- [69] M. Tarafdar Hagh e M. Abapour, “DC reactor type transformer inrush current limiter”, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, n° 5, p. 808, 2007, doi: 10.1049/iet-epa:20060511.
- [70] Zhengyu Lu, Daozhuo Jiang, e Zhaolin Wu, “A new topology of fault-current limiter and its parameters optimization”, in *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC '03.*, Acapulco, Mexico, 2003, vol. 1, p. 462–465, doi: 10.1109/PESC.2003.1218335.
- [71] W. Fei, Y. Zhang, e Z. Meng, “A Novel Solid-State Bridge Type FCL for Three-Phase Three-Wire Power Systems”, in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, CA, USA, fev. 2007, p. 1369–1372, doi: 10.1109/APEX.2007.357694.
- [72] W. Fei e Y. Zhang, “A novel IGCT-based Half-controlled Bridge Type Fault Current Limiter”, in *2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Shanghai, China, ago. 2006, p. 1–5, doi: 10.1109/IPEMC.2006.4778168.

- [73] W. Fei, Y. Zhang, e Z. Lu, “Novel Bridge-Type FCL Based on Self-Turnoff Devices for Three-Phase Power Systems”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, n° 4, p. 2068–2078, out. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2002838.
- [74] W. Fei, Y. Zhang, e Q. Wang, “A Novel Bridge Type FCL Based on Single Controllable Switch”, in *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, Thailand, nov. 2007, p. 113–116, doi: 10.1109/PEDS.2007.4487687.
- [75] V. K. Sood e S. Alam, “3-Phase Fault Current Limiter for distribution systems”, in *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, dez. 2006, p. 1–6, doi: 10.1109/PEDES.2006.344259.
- [76] G. G. Karady, “Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit”, *IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib.*, vol. 139, n° 1, p. 1, 1992, doi: 10.1049/ip-c.1992.0001.
- [77] M. Martins Lanes, H. A. Carvalho Braga, e P. Gomes Barbosa, “Fault Current Limiter Based on Resonant Circuit Controlled by Power Semiconductor Devices”, *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 5, n° 5, p. 311–320, set. 2007, doi: 10.1109/TLA.2007.4378523.
- [78] H. G. Sarmiento, “A fault current limiter based on an LC resonant circuit: Design, scale model and prototype field tests”, in *2007 iREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability*, Charleston, SC, USA, ago. 2007, p. 1–5, doi: 10.1109/IREP.2007.4410570.
- [79] S. Sugimoto, J. Kida, H. Arita, C. Fukui, e T. Yamagiwa, “Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, n° 2, p. 842–847, abr. 1996, doi: 10.1109/61.489342.
- [80] S. Chirantan, S. C. Swain, P. C. Panda, e R. Jena, “Enhancement of power profiles by various FACTS devices in power system”, in *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, out. 2017, p. 896–901, doi: 10.1109/CESYS.2017.8321212.
- [81] S. U. Bagwan e A. M. Mulla, “A solution of power quality issues by adaptive FACTS controller: A modelling and simulation”, in *2015 International Conference on Energy Systems and Applications*, Pune, India, out. 2015, p. 612–616, doi: 10.1109/ICESA.2015.7503422.
- [82] B. D. Deotale e S. R. Paraskar, “Transient stability improvement using Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC) FACTS device”, in *2016 IEEE Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, Bhopal, India, mar. 2016, p. 1–6, doi: 10.1109/SCEECS.2016.7509268.
- [83] K. Elamari e L. A. C. Lopes, “Comparison of phase shifting transformer and unified power flow control based interphase power controllers”, in *2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Ottawa, ON, Canada, out. 2016, p. 1–6, doi: 10.1109/EPEC.2016.7771768.
- [84] K. Sadek, M. Mohaddes, M. Rashwan, D. Brandt, e W. Braun, “GPFC-grid power flow controller: description and applications”, in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, USA, 2002, vol. 1, p. 461–466, doi: 10.1109/PESS.2002.1043277.
- [85] H. Boenig e D. Paice, “Fault current limiter using a superconducting coil”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 19, n° 3, p. 1051–1053, maio 1983, doi: 10.1109/TMAG.1983.1062396.
- [86] M. C. Ahn *et al.*, “The Short-Circuit Characteristics of a DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter With Fault Detection and Signal Control of the Power Converter”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 15, n° 2, p. 2102–2105, jun. 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849462.

- [87] S. Lee *et al.*, “Development of 6.6 kV-200 A DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 14, n° 2, p. 867–870, jun. 2004, doi: 10.1109/TASC.2004.830304.
- [88] T. Yazawa *et al.*, “Design and Test Results of 66 kV High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, n° 2, p. 683–686, jun. 2006, doi: 10.1109/TASC.2006.871208.
- [89] D. Hui *et al.*, “Development and Test of 10.5 kV/1.5 kA HTS Fault Current Limiter”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, n° 2, p. 687–690, jun. 2006, doi: 10.1109/TASC.2006.871209.
- [90] M. Noe e M. Steurer, “High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status”, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, n° 3, p. R15–R29, mar. 2007, doi: 10.1088/0953-2048/20/3/R01.
- [91] Jae Young Jang *et al.*, “A Novel and Smart Design of Superconducting Fault Current Controller: Implementation and Verification for Various Fault Condition”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, n° 3, p. 5602904–5602904, jun. 2013, doi: 10.1109/TASC.2012.2230292.
- [92] J. Lee *et al.*, “Fabrication and Experimental Analysis of 6.6 kV/100 A Class Single-Phase Superconducting Fault Current Controller With Superconducting DC Reactor Coil”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, n° 3, p. 1–5, jun. 2015, doi: 10.1109/TASC.2014.2374672.
- [93] B. W. Lee *et al.*, “Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, n° 2, p. 624–627, jun. 2008, doi: 10.1109/TASC.2008.920785.
- [94] Ok-Bae Hyun, Jungwook Sim, Hye-Rim Kim, Kwon-Bae Park, Seong-Woo Yim, e Il-Sung Oh, “Reliability Enhancement of the Fast Switch in a Hybrid Superconducting Fault Current Limiter by Using Power Electronic Switches”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, n° 3, p. 1843–1846, jun. 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2018369.
- [95] S. M. Alaraifi e M. S. El Moursi, “Hybrid HTS-FCL Configuration With Adaptive Voltage Compensation Capability”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, n° 6, p. 1–8, dez. 2014, doi: 10.1109/TASC.2014.2329392.
- [96] O.-B. Hyun *et al.*, “Long-Term Operation and Fault Tests of a 22.9 kV Hybrid SFCL in the KEPCO Test Grid”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, n° 3, p. 2131–2134, jun. 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2089587.
- [97] Ok-Bae Hyun, Kwon-Bae Park, Jungwook Sim, Hye-Rim Kim, Seong-Woo Yim, e Il-Sung Oh, “Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issue”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, n° 3, p. 1946–1949, jun. 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2018256.
- [98] Gyeong-Ho Lee *et al.*, “Hybrid Superconducting Fault Current Limiter of the First Half Cycle Non-Limiting Type”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, n° 3, p. 1888–1891, jun. 2009, doi: 10.1109/TASC.2009.2017873.
- [99] H. K. Onnes, “Further experiments with Liquid Helium. G. On the Electrical Resistance of Pure Metals, etc. VI. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears.”, in *Through Measurement to Knowledge*, vol. 124, K. Gavroglu e Y. Goudaroulis, Orgs. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991, p. 267–272.
- [100] ROSE-INNES, A. C.; RHODERICK, E H., “Introduction to superconductivity”, 1^a ed. Oxford: Pergamon Press.
- [101] Meissner, W., Ochsenfeld, R, “Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit”, *Naturwissenschaften*, v. 21, n. 44, pp. 787–788, 1933.

- [102] J. N. Rjabinin e L. W. Shubnikow, “Magnetic Properties and Critical Currents of Supra-conducting Alloys”, *Nature*, vol. 135, n° 3415, p. 581–582, abr. 1935, doi: 10.1038/135581a0.
- [103] A. A. Abrikosov, “The magnetic properties of superconducting alloys”, *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 2, n° 3, p. 199–208, jan. 1957, doi: 10.1016/0022-3697(57)90083-5.
- [104] LAMAS, J. S., “Projeto e construção de limitador de corrente supercondutor utilizando fitas de YBCO”, Lorena, 2009. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.
- [105] J. G. Bednorz e K. A. Muller, “Possible highT_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system”, *Z. Phys. B Condens. Matter*, vol. 64, n° 2, p. 189–193, jun. 1986, doi: 10.1007/BF01303701.
- [106] Queiroz, A. T., “Simulação de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor em sistemas de distribuição de energia elétrica”, Niterói, 2018. Dissertação (Mestrado Profissional em Montagem Industrial) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.
- [107] C. P. Poole, Org., *Superconductivity*, 2. ed. (rev. version). Amsterdam: Elsevier, Acad. Press, 2007.
- [108] WOLSKY, A. M., “HTS from precommercial to commercial: a roadmap to future use of HTS by the power sector”, Paris: Internacional Energy Agency, 2013. 28 p.
- [109] DIAS, F. J. M., “Avaliação das características elétricas e magnéticas de bobinas supercondutoras, levando em consideração algumas configurações de isolamento”, Niterói, 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) - Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.
- [110] K. Fossheim e A. Sudbø, *Superconductivity: physics and applications*. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ: Wiley, 2004.
- [111] A. K. Saxena, *High-temperature superconductors*. Heidelberg ; New York: Springer, 2010.
- [112] Y. Wang, *Fundamental elements of applied superconductivity in electrical engineering*. Singapore: Science Press/John Wiley & Sons Inc, 2013.
- [113] D. Shi, *High-temperature superconducting materials science and engineering: new concepts and technology*. New York, N.Y.: Pergamon, 1995.
- [114] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, e W. Lanz, “Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications”, *Phys. C Supercond.*, vol. 354, n° 1–4, p. 27–33, maio 2001, doi: 10.1016/S0921-4534(01)00018-1.
- [115] T. Rettelbach e G. J. Schmitz, “3D simulation of temperature, electric field and current density evolution in superconducting components”, *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 16, n° 5, p. 645–653, maio 2003, doi: 10.1088/0953-2048/16/5/318.
- [116] J. Duron, B. Dutoit, F. Grilli, M. Decroux, L. Antognazza, e O. Fischer, “Computer Modeling of YBCO Fault Current Limiter Strips Lines in Over-Critical Regime With Temperature Dependent Parameters”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, n° 2, p. 1839–1842, jun. 2007, doi: 10.1109/TASC.2007.898365.
- [117] W. T. B. de Sousa, A. Polasek, R. Dias, C. F. T. Matt, e R. de Andrade, “Thermal–electrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters”, *Cryogenics*, vol. 62, p. 97–109, jul. 2014, doi: 10.1016/j.cryogenics.2014.04.015.
- [118] O. Mäder, *Simulationen und Experimente zum Stabilitätsverhalten von HTSL-Bandleitern*. Karlsruhe: KIT Scientific Publ, 2012.

- [119] M. Stemmler, *Supraleitende Strombegrenzer in Hochspannungsnetzen*. Aachen: Shaker, 2009.
- [120] T. Naito *et al.*, “Thermal Conductivity of YBCO Coated Conductors Reinforced by Metal Tape”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, n° 3, p. 3037–3040, jun. 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2089481.
- [121] E. Infineon, “Technical Information (Datasheet) - TT120N16SOF”.
- [122] N. Thiele, “Air-Cored Inductors for Audio”, *J Audio Eng Soc*, vol. 24, no 5, p. 374–378, 1976.
- [123] D. W. Hart, *Power electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [124] M. H. Rashid, *Power electronics: circuits, devices, and applications*, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [125] E. Yokogawa, “DL850E/DL850EV ScopeCorder”.
- [126] E. CLIP Automação Industrial, “AFX Series – Temporizadores Eletrônicos Digitais”.
- [127] E. JNG Materiais Elétricos, “Contatora linha CJX2”.
- [128] E. Texans Instruments, “CC2640R2F SimpleLink Bluetooth low energy Wireless MCU”.