

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL**

ANDRÉ TIAGO QUEIROZ

**SIMULAÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO  
SUPERCONDUTOR EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Niterói, RJ

2019

ANDRÉ TIAGO QUEIROZ

**SIMULAÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO  
SUPERCONDUTOR EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Montagem Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo

Coorientador: Dr. Alexander Polasek

Niterói/RJ

2019

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

Q3s Queiroz, André Tiago  
Simulação de um Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica / André Tiago Queiroz ; Guilherme Gonçalves Sotelo, orientador ; Alexander Polasek, coorientador. Niterói, 2019.  
83 f. : il.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2019.mp.08291604690>

1. Sistema elétrico de potência. 2. Supercondutividade. 3. Curto circuito. 4. Modelagem computacional. 5. Produção intelectual. I. Sotelo, Guilherme Gonçalves, orientador. II. Polasek, Alexander, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

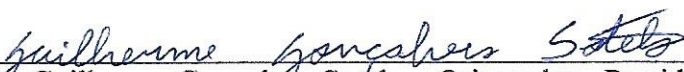
**ANDRÉ TIAGO QUEIROZ**


**SIMULAÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO  
SUPERCONDUTOR EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sofelo – Orientador - Presidente  
Universidade Federal Fluminense

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alexander Polasek - Coorientador  
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes  
Universidade Federal Fluminense

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Delberis Araujo Lima  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Niterói, RJ  
2019

“O sábio pode mudar de opinião. O ignorante,  
nunca.”

Immanuel Kant

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus orientadores e professores Dr. Guilherme Sotelo, Dr. Alexander Polasek e Dr. Márcio Zamboti por todo apoio, ensinamento e confiança que me deram desde o início deste trabalho.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e 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 Profissional em Montagem Industrial, possibilitou meu ingresso ao mundo acadêmico. Agradeço também à secretária Heloisa e ao coordenador Prof. Dr. Roger pela disponibilidade e paciência ao longo curso.

Aos meus amigos e colegas de trabalho Ana Carolina, Tarcísio, Monique, Rogério, Luís Micahel, Fernando, Paulo, Luiz Felipe e Rodrigo pela ajuda e amizade, desde o ingresso ao curso, até a elaboração e término deste manuscrito.

Aos meus familiares, Camila, Fernanda e minha mãe por tudo que fizeram para que eu conseguisse chegar até aqui.

Ao meu namorado Alexandre Maximovitch, por sempre me incentivar e apoiar nesta jornada.

## RESUMO

Dentre as tecnologias de limitadores de corrente de curto-circuito (LCC) aplicadas em sistemas de distribuição de energia elétrica, as do tipo supercondutores apresentam vantagens consideradas promissoras em relação às demais, devido a fatores como: impedância praticamente nula durante operação normal do sistema; rápido tempo de sensibilização e limitação da corrente de curto-circuito; e a não necessidade de utilização de dispositivos auxiliares, dentre outras. Estudos sobre o dimensionamento e impacto que estes dispositivos podem gerar em redes de distribuição são necessários para viabilizar projetos relacionados ao seu emprego nestes sistemas. Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise de aplicação de limitadores supercondutores do tipo resistivo em uma rede de distribuição real, por meio de modelos computacionais desenvolvidos no programa *Alternative Transients Program* (ATP). A dinâmica de atuação, assim como os fenômenos físicos que regem o princípio de funcionamento deste tipo de dispositivo, foram elaborados e validados com base em modelos reconhecidos na literatura. Os resultados obtidos, sem e com inserção deste tipo de LCC na rede modelada, possibilitaram determinar parâmetros necessários para seu dimensionamento, assim como avaliar seu desempenho nestes tipos de sistema. A utilização de LCCs supercondutores demonstrou grande e rápida capacidade de limitação das correntes de curto-circuito, possibilitando a proteção de equipamentos que compõem uma rede de distribuição (transformadores, disjuntores, religadores automáticos, cabos, dentre outros) e melhorias na qualidade do fornecimento de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Limitador de corrente de curto-circuito supercondutor; Sistemas de distribuição de energia elétrica; Análise de curto-circuito; ATP.

## **ABSTRACT**

Concerning to fault current limiters (FCL) technologies applied to distribution networks, the superconducting fault current limiters have some advantages in relation to the other kinds of FCL, such as: negligible impedance during normal system operation, fast operation time for fault current limitation and no need of auxiliary devices, among others. Researches about how to design these devices and their impacts in the electric system are necessary, to make feasible to use them in power-system protection projects. In this context, this work presents an analysis of a resistive type superconducting fault current limiter applied to a real distribution network, using computational models developed in Alternative Transients Program (ATP). The dynamic and physical phenomena that exist in its functioning were elaborated and confirmed based on models well established in the scientific literature. The simulated results without and with the superconducting FCL in the network allowed to determine the parameters needed to evaluate its performance in this type of system and to dimensioning the FCL. The application of superconducting FCL demonstrated their fast response and high capacity to limit fault currents, allowing the protection of equipments in the distribution network (like transformers, circuit breakers, automatic reclosers, cables, etc.). Furthermore, the FCL can improve the power quality of the utilities, reducing voltage sags levels.

**Keywords:** Superconducting fault current limiter; Electric power distribution; Analysis of fault current; ATP.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Diagrama de fases de um supercondutor do tipo I.....	4
Figura 02: Diagrama de fases de um supercondutor do tipo II. ....	5
Figura 03: Circuito equivalente de um nb-LCCS. Adaptado de [12]. ....	10
Figura 04: Ilustração de nb-LCCS com núcleo de ferro (a) e de ar (b). ....	11
Figura 05: Topologia do ns-LCCS. Adaptado de [49]. ....	13
Figura 06: Configuração de um r-LCCS. Adaptado de [12]. ....	15
Figura 07: Formas de onda característica de corrente de curto com/sem aplicação de r-LCCS. Adaptado de [15]. ....	18
Figura 08: Força de Lorentz gerada nos vórtices em função da densidade de corrente. Adaptado de [16]. ....	19
Figura 09: Curva E-J delimitada com os 3 estágios de transição. Adaptado de [12]. ....	21
Figura 10: Espessuras de cada camada da fita 2G YBCO modelo SF12100 da SuperPower. Adaptado de [84]. ....	22
Figura 11: Arranjo do módulo de r-LCCS. ....	23
Figura 12: (a) Seção transversal e (b) representação elétrica das fitas 2G YBCO e aço inox ( <i>shunt</i> ). ....	23
Figura 13: Circuito equivalente do protótipo de r-LCCS. ....	25
Figura 14: Fluxograma do método iterativo de corrente e resistividade elétrica no supercondutor. ....	25
Figura 15: Taxa de fluxo de calor através de um elemento infinitesimal. ....	27
Figura 16: Circuito equivalente RC de linha de transmissão, com a fonte de corrente inserida. .....	28
Figura 17: Variação de temperatura no interior de cada camada do r-LCCS, ao longo do eixo z.....	29
Figura 18: Circuito eletrotérmico da fita 2G YBCO (a) e da resistência <i>shunt</i> (b). ....	30

Figura 19: Variação do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície da fita 2G e o LN2. Adaptado de [12]. .....	32
Figura 20: Circuito equivalente utilizado para ensaio do r-LCCS. Adaptado de [12].....	33
Figura 21: Valores mensurados de tensão e correntes prospectiva e limitada em teste. Adaptado de [12]. .....	33
Figura 22: Fluxograma da rotina de simulação do r-LCCS desenvolvida no MODELS. ....	35
Figura 23: Circuito equivalente utilizado para simulação do r-LCCS no ATPDraw. ....	35
Figura 24: Correntes prospectiva e limitada, obtidas em ensaio e simulação no ATP.....	37
Figura 25: Corrente limitada em escala menor, obtidas em ensaio e simulação no ATP. ....	38
Figura 26: Variação da resistência equivalente do r-LCCS, obtidas via simulações MATLAB e ATP. ....	38
Figura 27: Variação da temperatura em cada camada, obtidas via simulações MATLAB (a) e ATP (b).....	39
Figura 28: Diagrama unifilar da RD simulada. ....	40
Figura 29: Circuito equivalente da RD, modelada via ATPDraw. ....	43
Figura 30: Identificação dos nove potenciais pontos de instalação de LCC na rede. ....	47
Figura 31: Reator a núcleo de ar, empresa COSMO. Adaptado de [91].....	48
Figura 32: Circuito equivalente do r-LCCS. ....	51
Figura 33: Forma de onda das correntes prospectivas nos pontos 1 (a) e 6 (b). ....	53
Figura 34: Formas de onda das tensões nos pontos 1 (a) e 6 (b). ....	54
Figura 35: VTCDs nas fases A dos pontos 1 (a) e 6 (b). ....	55
Figura 36: Forma de onda das correntes limitadas nos pontos 1 (a) e 6 (b).....	57
Figura 37: Correntes prospectiva e limitada na fase A dos pontos 1 (a) e 6 (b).....	58
Figura 38: Forma de onda das tensões com a aplicação de r-LCCS nos pontos 1 (a) e 6 (b)..	59
Figura 39: Tensões nas fases A dos pontos 1 (a) e 6 (b), sem e com a aplicação de r-LCCS..	60
Figura 40: Variação das resistências das fitas 2G nas fases A dos pontos 1 (a) e 6 (b). ....	61

Figura 41: Variação das temperaturas das camadas supercondutoras nas fases A dos pontos 1 (a) e 6 (b).....	62
Figura 42: Modelo da rede de distribuição feita no ATPDraw. ....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Composição, $T_c$ e ano de descoberta de alguns materiais supercondutores. Adaptado de [16].	6
Tabela 02: Trabalhos experimentais relacionados à nb-LCCS para RD.	12
Tabela 03: Dados dos nb-LCCS citados nos trabalhos.	13
Tabela 04: Trabalhos experimentais relacionados à ns-LCCS.	14
Tabela 05: Dados dos ns-LCCS citados nos trabalhos.	15
Tabela 06: Trabalhos experimentais relacionados à r-LCCS para RD.	17
Tabela 07: Dados dos r-LCCS citados nos trabalhos.	17
Tabela 08: Analogia entre propriedades térmicas e elétricas. Adaptado de [12].	29
Tabela 09: Dados dos transformadores de potência da RD simulada.	41
Tabela 10: Informações das cargas conectadas na RD simulada.	42
Tabela 11: Dados dos cabos da RD simulada.	42
Tabela 12: Valores das correntes de curto-circuito trifásico.	45
Tabela 13: Valores das correntes de curto-circuito bifásico com retorno à terra.	45
Tabela 14: Valores das correntes de curto-circuito bifásico sem retorno à terra.	45
Tabela 15: Valores das correntes de curto-circuito monofásico.	46
Tabela 16: Parâmetros para dimensionamento e especificação do r-LCCS.	47
Tabela 17: Classificação dos modelos de r-LCCS.	48
Tabela 18: Parâmetros dos reatores dimensionados para duas classes de r-LCCS.	49
Tabela 19: Quantitativo de fitas 2G para dimensionamento dos r-LCCS.	50
Tabela 20: Valores das correntes obtidas na fase A, sem aplicação de r-LCCS (prospectivas). .....	52
Tabela 21: Classificação das variações momentâneas de tensão. Adaptado de [92].	55
Tabela 22: Região de sensibilidade, fatores de ponderação e de impacto base. Adaptado de [21].	56

## LISTA DE ABREVIATURAS

1G – Primeira Geração

2G – Segunda Geração

ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – *American National Standards Institute*

ATP – *Alternative Transients Program*

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

DES – Disjuntores de Estado Sólido

FACTS - *Flexible Alternating Current Transmission System*

FIE – Fontes Intermitentes de Energia

GD – Geração Distribuída

HTS – *High-Temperature Superconductor*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IPC – *Interphase Power Controllers*

nb-LCCS – Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor do tipo núcleo blindado

LCC – Limitador de Corrente de Curto-Circuito

LCCS – Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor

LN<sub>2</sub> – Nitrogênio Líquido

MagLev – Levitação Magnética

ns-LCCS – Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor do tipo núcleo saturado

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

UFF – Universidade Federal Fluminense

1D – Unidimensional

r-LCCS – Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor do tipo resistivo

RD – Rede de Distribuição de Energia Elétrica

SE – Subestação

SMES – *Superconducting Magnetic Energy Storage*

TRT – Tensões de Restabelecimento Transitórias

VTCD – Variação de Tensão de Curta Duração

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVO .....	2
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
2. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO- CIRCUITO SUPERCONDUTORES... 4	
2.1. SUPERCONDUTIVIDADE .....	4
2.2. SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA .....	5
2.3. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO .....	7
2.4. PRINCIPAIS TIPOS DE LCCSs .....	9
2.4.1. Núcleo Blindado .....	10
2.4.2. Núcleo Saturado .....	13
2.4.3. Resistivo .....	15
2.5. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO r-LCCS .....	18
2.5.1. Dinâmica dos Vórtices .....	18
2.5.2. Curva E-J .....	20
3. MODELAGEM DO r-LCCS .....	22
3.1. EQUIVALENTE ELÉTRICO .....	23
3.2. EQUIVALENTE TÉRMICO .....	26
3.2.1. Analogia Eletrotérmica .....	27
3.2.2. Circuito Equivalente .....	29
3.3. DADOS PARA SIMULAÇÃO DO MODELO DE r-LCCS NO ATPDRAW .....	33
3.4. MODELO DE r-LCCS NO ATPDRAW .....	34
3.5. CONVERGÊNCIA DO MODELO r-LCCS .....	36
4. MODELAGEM DA RD E DIMENSIONAMENTO DO r-LCCS .....	40
4.1. DESCRIÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO .....	40
4.2. MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO NO ATPDRAW .....	43
4.3. PROJETO BÁSICO DO r-LCCS PARA RD MODELADA .....	46
4.3.1. Análise da RD Simulada .....	46
4.3.2. Dimensionamento do Elemento <i>Shunt</i> .....	48
4.3.3. Dimensionamento da Fita 2G .....	50
5. RESULTADOS .....	52
5.1. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO, SEM APLICAÇÃO DE r-LCCS .....	52
5.2. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO, COM APLICAÇÃO DE r-LCCS .....	57
6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	63
6.1. CONCLUSÃO .....	63

6.2.	TRABALHOS FUTUROS.....	64
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
8.	APÊNDICES .....	75
8.1.	CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO MODELO r-LCCS (ATP) .....	75
8.2.	MODELO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO NO ATPDRAW .....	83



## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao constante aumento por demanda e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, existe a necessidade de inserir novas fontes de geração nos sistemas de potência, e de aumentar os pontos de interconexões e expansão nos sistemas de transmissão. Estas alterações podem aumentar os níveis de curto-circuito, principalmente em pontos próximos às novas unidades de geração de energia e/ou interconexões. Este aumento, anteriormente não previsto, pode ocasionar a superação da capacidade de elementos como disjuntores, transformadores, religadores automáticos, barramentos e cabos, em relação à suportabilidade para correntes de curto-circuito [01], [02].

Os principais métodos para mitigar/solucionar estes problemas são: restrições operativas; alterações na topologia das redes; substituição/recapitação de elementos superados; e aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito (LCC) [03]. Este último pode apresentar-se como uma alternativa de menor custo, se comparado a uma recapitação de subestação com aquisições de novos equipamentos e paradas programadas de fornecimento de energia para instalações dos mesmos, por exemplo.

Segundo a definição do IEEE, LCCs são dispositivos capazes de limitar o primeiro e subsequentes picos de correntes de curto-circuito para um valor especificado, em sistemas de potência de corrente alternada, baseado no aumento de uma impedância resistiva e/ou reativa durante a transição de uma condição nominal para um evento de curto-circuito [04]. Esta atenuação possibilita que elementos convencionais, como disjuntores e religadores automáticos, antes superados, possam então atuar em um tempo suficientemente seguro. LCCs que utilizam materiais supercondutores em seu princípio de funcionamento são classificados como limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores (LCCS), têm sido estudados e testados recentemente em sistemas de energia elétrica [05], [06], [07], [08], por apresentarem características intrínsecas ao material que são consideradas ideais para um limitador [09].

De forma a analisar o comportamento dos LCCSs inseridos na rede, um estudo técnico se faz necessário a fim de avaliar seu desempenho, em sistemas de energia elétrica. Estudos preliminares, em geral, levam em consideração a modelagem matemática dos fenômenos físicos que regem seu comportamento, para posteriormente desenvolver modelos computacionais que possibilitem sua simulação.

Neste contexto, o presente trabalho irá analisar o desempenho de um LCCS do tipo resistivo (r-LCCS), aplicado em uma rede de distribuição de energia elétrica (RD) em pontos previamente determinados, por meio de simulação computacional. Os dados para modelagem da RD foram extraídos de um sistema real, fornecido pela concessionária LIGHT S.A., relacionado ao projeto P&D “Limitador de corrente de curto-circuito híbrido para sistemas de distribuição”. O modelo de r-LCCS foi baseado no projeto ENSYSTROB [10], [11], além de considerar a analogia eletrotérmica apresentada em [12] para solução do acoplamento existente entre os fenômenos elétrico e térmico, que regem os princípios de funcionamento deste tipo de dispositivo.

### 1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma métrica para aplicação de r-LCCS em redes de distribuição, por meio de simulação computacional. Isso possibilitará o dimensionamento e especificação de protótipos que poderão ser instalados em redes de concessionárias de energia elétrica e demais sistemas de potência. Para alcançar o objetivo esperado, as etapas a seguir são contempladas:

- Modelagem do r-LCCS para simulação no programa *Alternative Transients Program* (ATP), através da interface gráfica ATPDraw, com base em equações que descrevem o comportamento físico deste dispositivo, e sua validação por meio de resultados encontrados através de ensaios e simulações na literatura;
- Modelagem de uma RD, baseada em dados fornecidos por uma concessionária, a fim de simular os níveis de curto-circuito típico que estes sistemas podem apresentar, identificando potenciais pontos de instalação de LCC;
- Extração dos resultados obtidos sem e com a aplicação de r-LCCS na rede, para uma posterior análise da capacidade de limitação de correntes de curto-circuito que estes dispositivos podem realizar.

### 1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: neste capítulo é feita uma introdução sobre o tema pesquisado e os objetivos deste trabalho; o Capítulo 2 faz uma breve revisão bibliográfica sobre supercondutividade, principais tecnologias de LCCS, assim como seus princípios de funcionamento; o Capítulo 3 aborda o modelo de r-LCCS adotado para

simulação computacional que foi implementado no ATP, com a descrição matemática dos fenômenos físicos relativos à sua dinâmica de atuação; o Capítulo 4 apresenta os dados e a modelagem da RD, além do dimensionamento de r-LCCS para aplicação na mesma, de acordo com os níveis de corrente, tensão e limitação desejados; o Capítulo 5 expõe os resultados obtidos nas simulações, sem e com a utilização de r-LCCS na RD modelada; e o Capítulo 6 traz as conclusões finais deste manuscrito e sugestões de trabalho futuros relacionados ao tema.

## 2. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO- CIRCUITO SUPERCONDUTORES

### 2.1. SUPERCONDUTIVIDADE

Supercondutividade são propriedades elétrica e magnética que determinados materiais apresentam quando submetidos a baixas temperaturas, chamada temperatura crítica ( $T_c$ ). Em 1911 na cidade de Leiden na Holanda, Heike Lamerlingh Onnes descobriu tal fenômeno quando submeteu o elemento mercúrio a temperaturas abaixo de 4 K, por meio de hélio líquido, verificando-se uma resistência praticamente nula [13]. Além da temperatura  $T_c$ , existem outros dois parâmetros que influenciam diretamente a 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 e o segundo à máxima densidade de corrente que pode circular pelo material supercondutor para que ocorra a mudança de fase. Ambos os parâmetros ( $H_c$  e  $J_c$ ) são dependentes da temperatura.

Outra característica relacionada aos materiais supercondutores é o diamagnetismo perfeito, descoberto em 1933 pelos físicos alemães W. Meissner e R. Ochsenfeld. Esta propriedade, também chamada de efeito Meissner-Ochsenfeld, é verificada pela expulsão do fluxo magnético no interior do material resfriado a uma temperatura abaixo de  $T_c$ , quando submetido a um campo magnético externo. A Figura 01 ilustra o diagrama de fase dos supercondutores classificados como tipo I, que apresentam dois estados (supercondutor e normal), sendo que dentro do volume delimitado pelos três parâmetros críticos  $T_c$ ,  $H_c$  e  $J_c$ , o material encontra-se no estado supercondutor, e fora se encontra no estado normal.

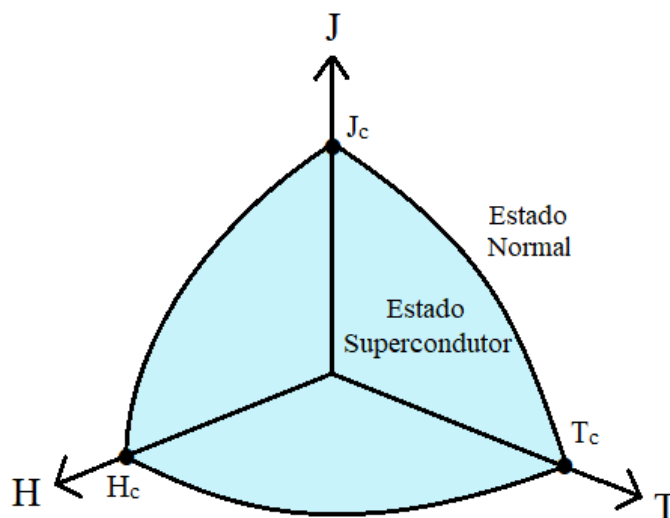


Figura 01: Diagrama de fases de um supercondutor do tipo I.

Existem determinados materiais supercondutores que apresentam um estado denominado misto, quando submetidos a determinados campos magnéticos externos superiores a um primeiro campo crítico  $H_{c1}$ . O estado misto apresenta uma coexistência de regiões supercondutoras e normais, sendo esta última delimitada por vórtices de corrente. Esses supercondutores são chamados de tipo II [13]. A Figura 02 apresenta o diagrama de fases destes tipos de supercondutores, nas quais existem dois volumes referentes aos estados diamagnético perfeito e misto, delimitados pelos parâmetros  $T_c$ ,  $H_{c1}$  e  $J_{c1}$ , e  $T_c$ ,  $H_{c2}$  e  $J_{c2}$ , respectivamente. Fora do volume referente ao estado misto, o material se encontra no estado normal.

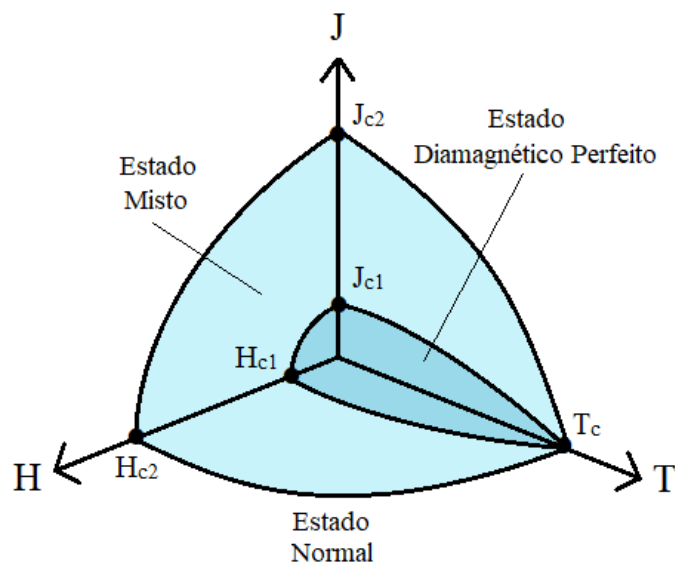


Figura 02: Diagrama de fases de um supercondutor do tipo II.

## 2.2. SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA

Desde a descoberta da supercondutividade em 1911 até 1986, os materiais supercondutores estudados estavam limitados à máxima  $T_c$  de 23,2 K para o nióbio-germânio ( $Nb_3Ge$ ) [14]. A refrigeração utilizada até então se dava através da liquefação do hélio ( $He$ ) a 4,2 K, que apresenta um elevado custo para sua obtenção devido ao fato de ser um gás nobre e pouco disponível, além da necessidade de equipamentos sofisticados [15].

A partir da descoberta do composto cerâmico  $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_y$  (BLCO) com  $T_c$  entre 30 K e 40 K, por Georg Bednorz e Alex Müller em 1986, deu-se início às pesquisas dos supercondutores de alta temperatura (*High-Temperature Superconductor* - HTS). Posteriormente, compostos como  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  (BSCCO) e  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO) foram desenvolvidos e suas  $T_c$  obtidas acima de 77 K, o que possibilitou a aplicação de nitrogênio

líquido (LN<sub>2</sub>) que apresenta um custo menor de obtenção se comparado ao He. A Tabela 01 mostra alguns supercondutores, indicando sua composição,  $T_c$  e o ano de sua descoberta.

Tabela 01: Composição,  $T_c$  e ano de descoberta de alguns materiais supercondutores. Adaptado de [16].

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

Os compostos óxidos de cobre do tipo cerâmico, como BSCCO e YBCO, são considerados os mais importantes supercondutores de alta temperatura. Além de a  $T_c$  ser acima de 77 K, esses materiais têm como características alta  $J_c$ , alta anisotropia (algumas propriedades físicas variam ao longo de uma determinada direção), existência de camadas estruturais do tipo Cu-O (responsáveis pelo transporte de corrente), são supercondutores do tipo II (apresentam grande profundidade de penetração e pequeno comprimento de coerência, relativos a Teoria BCS) [16].

Esses supercondutores passaram por técnicas de desenvolvimento que permitiram a produção de fitas supercondutoras com uma corrente crítica maior. Fitas supercondutoras fabricadas com BSCCO são denominadas na literatura como fitas de primeira geração (1G) [09]. Elas possuem o elemento prata (Ag) em 70 % de seu volume. As fases estequiométricas mais comuns do BSCCO são o Bi-2212 e Bi-2223, que são utilizados para produção de compostos massivos como discos e na produção de fitas supercondutores. O fato de conter uma matriz de prata nas fitas 1G aumenta o custo do material, em relação as fitas 2G, além de serem altamente sensíveis ao efeito de campos magnéticos externos aplicados

perpendicularmente à sua superfície, em altas temperaturas. Estas fitas são aplicadas principalmente em equipamentos de ressonância magnética nuclear para geração de campos magnéticos intensos [17], [18].

Já as fitas supercondutoras feitas com YBCO são conhecidas na literatura como de segunda geração (2G) [09]. Elas apresentam elementos de terras raras em sua composição que melhoram o desempenho para aplicação com campo magnético. Essas fitas foram desenvolvidas por meio de estrutura de camadas orientadas, depositadas sob um substrato metálico, que possibilitou sua fabricação em maiores comprimentos com potencial de redução de custo em larga escala de produção. Além disso, as fitas 2G apresentam maior  $J_c$  se comparadas às 1G [15], [18].

Desde a descoberta da supercondutividade, algumas aplicações relacionadas a utilização desses materiais vêm sendo estudadas, tais como [09]:

- Geradores, motores e transformadores;
- Armazenadores de energia elétrica (*Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES*, e armazenadores cinéticos de energia - *Flywheel*);
- Cabos para transmissão e distribuição de energia elétrica;
- Trens de levitação magnética (MagLev);
- Bobinas para ressonância magnética;
- Magnetos e *current leads* (aceleradores de partículas);
- Limitadores de corrente de curto-circuito (LCC).

Devido às vantagens como possibilidade de produção em larga escala e propriedades físicas adequadas, as fitas 2G YBCO foram escolhidas para a simulação de um modelo de r-LCCS neste trabalho, cujo princípio de funcionamento é explicado com mais detalhes na seção 2.5.

### 2.3. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Existe um crescimento na demanda de energia elétrica, assim como na geração, ao longo dos anos no Brasil. Estima-se que até 2027 haverá um crescimento médio desta demanda no País de 3,6 % ao ano, totalizando uma estimativa de consumo 753 TWh [19]. Outras tendências no sistema elétrico brasileiro são o aumento dos pontos de interconexão,

com o intuito de elevar a confiabilidade e flexibilidade da rede de transmissão, além da crescente geração distribuída (GD) baseada em fontes intermitentes de energia (FIE). Estima-se que no ano 2017 as energias eólica e fotovoltaica foram responsáveis por 5,6 % e 1,9 %, respectivamente, de toda energia produzida no mundo [20].

Todos estes fatores citados anteriormente podem causar riscos para a infraestrutura existente, devido ao aumento nos níveis de curto-circuito causados pelos mesmos. Isto pode exigir investimentos adicionais para a modernização dessas redes, pois equipamentos como disjuntores, transformadores de corrente, religadores automáticos, e estruturas como barramentos e cabos, podem ficar superados em relação aos seus níveis de suportabilidade para estas novas correntes de curto-circuito.

Uma das alternativas adotadas para mitigar este aumento não previsto é a aplicação de LCC em sistemas de proteção elétrica da rede. Este dispositivo é utilizado para limitar e/ou interromper correntes de curto-circuito em redes de transmissão e distribuição. Sua aplicação pode evitar a substituição de equipamentos superados, possibilitando redução de custos e menores impactos ao fornecimento de energia, do que a substituição e/ou até a recapitação completa de instalações (como subestações, por exemplo). Esta última opção pode acarretar em maiores custos, pois se faz necessária a aquisição de novos equipamentos, além da possibilidade de desligamentos de linhas para execução de obras, podendo prejudicar a continuidade no fornecimento de energia.

Outros fenômenos que podem estar associados aos eventos de curtos-circuitos são os afundamentos e as interrupções de tensões, classificados como variação de tensão de curta duração (VTCD) no Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) [21]. Tais fenômenos podem afetar indústrias e consumidores comerciais/residenciais, causando danos e prejuízos como por exemplo a interrupção de processos industriais e o desligamento de equipamentos eletrônicos sensíveis a estas perturbações [22]. Como o princípio de funcionamento de alguns LCCs é baseado na inserção de uma impedância durante o evento de curto-circuito, estes VTCDs podem ser minimizados, o que possibilita melhorar a qualidade e a continuidade no fornecimento de energia.

Em geral, os LCCs podem ser divididos em dispositivos que aumentam a impedância do sistema tanto em operação normal, quanto em condições de curto-circuito, não alterando suas características, e dispositivos que possuem impedância baixa em operação normal, porém na condição de curto-circuito sua impedância cresce rapidamente [23]. As principais



características consideradas como ideais para um LCC podem ser resumidas conforme apresentado em [24]:

- Nula ou baixa impedância em regime normal de operação;
- Alta impedância para correntes de curto-circuito;
- Limitação rápida a partir do instante em que ocorre o curto-circuito;
- Não surgimento de sobretensões devido da limitação da corrente;
- Rápida recuperação para o regime normal de operação;
- Não atuação para correntes que não sejam curtos-circuitos (*inrush*, partida de motores, sobrecarga, entre outros);
- Alta confiabilidade;
- Manutenção reduzida;
- Baixo impacto para o meio ambiente;
- Dimensões, peso e custos de implementação reduzidos.

Dentre estas tecnologias existentes até agora, as principais aplicadas para LCC são: reator limitador a núcleo de ar; dispositivo pirotécnico; controlador de potência interfases (*Interphase Power Controllers* - IPC); dispositivos com tecnologia FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*); disjuntores de estado sólido (DES); e LCCS. Este último foi escolhido para desenvolvimento deste trabalho, conforme justificado na seção 2.4, sendo os demais apenas citados aqui para conhecimento, uma vez que não é objetivo deste trabalho tratar de todas as tecnologias existentes. Para maiores informações, verificar as referências [03], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31].

#### 2.4. PRINCIPAIS TIPOS DE LCCSs

Considerados como uma das soluções mais promissoras para o problema dos altos níveis de curto-circuito nos sistemas elétricos, os LCCSs apresentam algumas vantagens em relação as demais tecnologias de LCCs como: rápida atuação (menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo) durante o evento de curto-circuito; não há necessidade de substituição de partes ou componentes após atuação; não utilização de sensores para detecção de curto-circuito; tempo de recuperação (ou *recovery time*) automático após normalização do sistema. Além disso, as fitas supercondutoras 2G já são comercializadas por várias empresas como: *SuperPower*;

*InnoPower; Fujikura; SuperOx; HyperTech; AMSC; SuNAM; InnoST; SEI*; entre outras empresas. Isto aumenta a viabilidade de projetos com base nesta tecnologia devido ao número de possíveis fornecedores, além de existir uma tendência de produção em larga escala e consequente redução de custos [32], [33].

Dentre os principais tipos de LCCSs propostos na literatura, podem-se destacar 3 configurações: núcleo blindado; núcleo saturado e resistivo. Este último foi selecionado para pesquisa deste trabalho devido às vantagens descritas na seção 2.4.3, em relação às demais topologias. Os três modelos de LCCS são descritos nas seções 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3, destacando projetos experimentais aplicados em sistemas de distribuição (subtransmissão e transmissão para LCCS do tipo núcleo saturado).

#### 2.4.1. Núcleo Blindado

O limitador de corrente de curto-circuito supercondutor do tipo núcleo blindado (nb-LCCS) tem como princípio de funcionamento o acoplamento magnético entre o circuito a ser protegido (carga) e o circuito contendo o elemento supercondutor ( $R_s$ ). Este limitador também é classificado como indutivo, e sua configuração se assemelha à de um transformador com dois enrolamentos [12]. O primário é composto por material condutor convencional com uma resistência ( $R_1$ ) e uma indutância ( $X_1$ ) conectados em série com a carga, e o secundário composto por uma espira supercondutora com uma indutância ( $X_2$ ) e  $R_s$ , em curto-circuito e resfriados por um sistema criogênico conforme ilustrado na Figura 03.

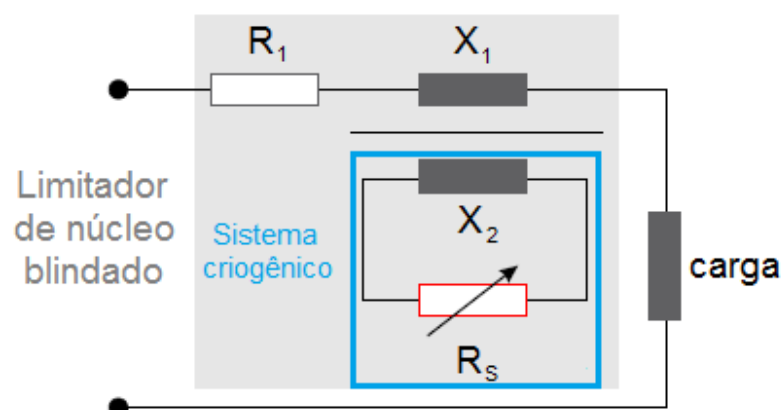


Figura 03: Circuito equivalente de um nb-LCCS. Adaptado de [12].

Este limitador atua com base nas propriedades magnéticas dos supercondutores. Em condições normais, a corrente induzida no supercondutor é menor do que a crítica. Assim, o fluxo magnético produzido pelo enrolamento primário é compensado com base nas correntes superficiais de blindagem que surgem no supercondutor, de forma que a indutância total do

dispositivo vista pelo lado primário é residual, decorrente unicamente do enlace de fluxo entre os enrolamentos primários e secundários. Em condições de correntes acima da crítica, a corrente induzida no enrolamento secundário ultrapassa o valor crítico e o material supercondutor transita para o estado normal, passando a apresentar resistência maior do que zero e dissipação térmica. O fluxo magnético do enrolamento primário passa a não ser compensado pelo supercondutor mais, levando a um rápido aumento da impedância total vista pelo lado primário [03].

A principal vantagem deste tipo de limitador é que o material supercondutor não fica diretamente ligado em série com o circuito, mas através de um acoplamento magnético, conforme a configuração ilustrada na Figura 04, utilizando núcleo de ferro (a) ou de ar (b). Assim, não há conexão direta entre o circuito em temperatura ambiente com o circuito resfriado em temperaturas criogênicas, o que elimina a necessidade dos conectores de corrente para dentro dos criostatos. Além disso, neste tipo de limitador o elemento supercondutor pode ser submetido a tensões mais baixas, de acordo com o número de espiras definido para o enrolamento primário [24].

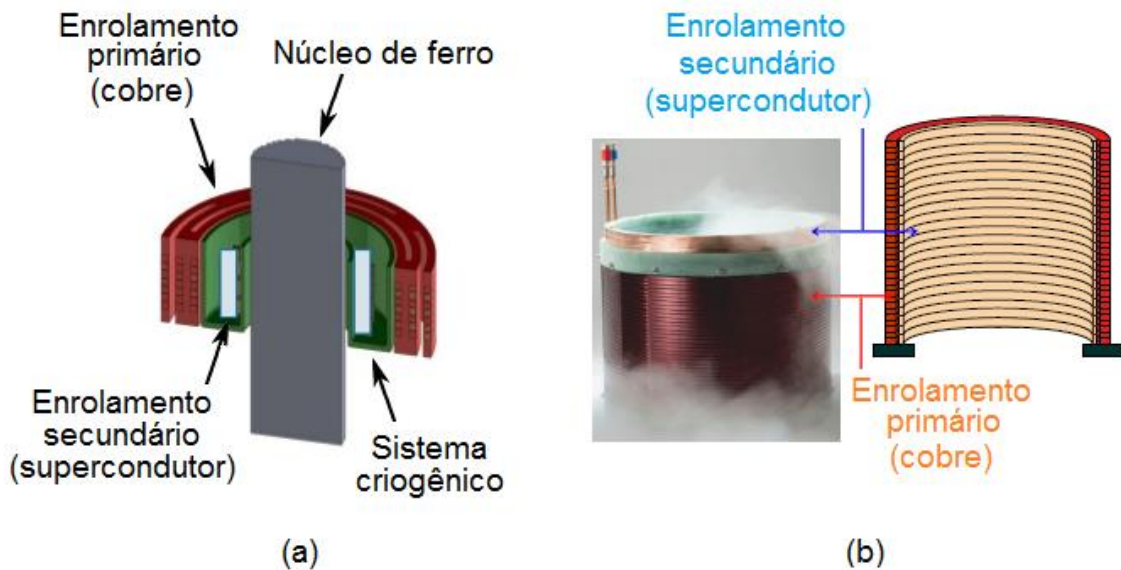


Figura 04: Ilustração de nb-LCCS com núcleo de ferro (a) e de ar (b).

No caso de limitadores com núcleo de ferro, a desvantagem existente é o grande tamanho e peso devido a este núcleo com proporções semelhantes às de um transformador de mesma potência nominal [12]. Além disso, a característica anisotrópica da fita supercondutora 2G possibilita o surgimento de pontos quentes (em inglês, *hot spots*), fazendo a transição precocemente nestes pontos para o estado normal, o que pode danificar o dispositivo [03].

Na literatura, existem trabalhos relacionados a modelagem deste dispositivo através de métodos numéricos para determinação de fenômenos elétricos e magnéticos, como *quench*

(transição do material supercondutor de seu estado supercondutor para o estado normal abruptamente) [34], [35], dispersão do fluxo magnético [36], influência na variação da resistência *shunt*, tipo de núcleo, fator de potência e número de espiras [37]. Outras pesquisas visaram otimizar projetos destes tipos de limitadores para determinados níveis de tensão e corrente, assim como sua coordenação com sistemas de proteção elétrica [38], [39].


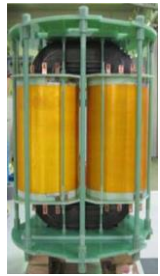
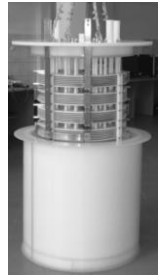


Algumas pesquisas desenvolveram protótipos em menor escala para comprovar os resultados experimentais com aqueles obtidos numericamente, em relação a corrente, tensão, ciclo de histerese, temperatura e fator de potência [40], [41]. Outros projetos buscaram avaliar o *quench*, tempo de recuperação, configurações de núcleos, campo magnético (do núcleo e de dispersão), formas de enrolamento, perdas em CA e harmônicos [05], [42]. Para protótipos em escala real, aplicáveis em níveis de tensões e correntes de RD, e que utilizam o YBCO em sua composição, podem-se destacar os seguintes trabalhos indicados na Tabela 02, sendo divididos entre “Comercial” (instados em RD reais) e “Teste” (apenas ensaiados).

Tabela 02: Trabalhos experimentais relacionados à nb-LCCS para RD.

Item	Título	Referência	Ano	País	Comercial X Teste
A	Current Limiting Characteristics of Parallel-Connected Coated Conductors for High-Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer	[43]	2009	Japão	Teste
B	Progress in Development of Superconducting Fault Current Limiting Transformer	[44]	2011	Japão	Teste
C	Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter	[45]	2012	Polônia	Teste
D	Experimental Results of a 15 kV, 140 A Superconducting Fault Current Limiter	[46]	2017	Polônia	Teste
E	Manufacturing of a 1-MVA-Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer With Recovery-Under-Load Capabilities	[47]	2017	Alemanha	Teste

A Tabela 03 apresenta um resumo dos dados informados nos trabalhos citados anteriormente, considerados importantes para avaliar se o dispositivo é ou não adequado para limitar determinados níveis de corrente de curto-circuito, além da tensão considerada. As informações destacadas são: nível de tensão a que o limitador foi submetido; corrente de curto-circuito no primeiro pico (corrente prospectiva); corrente no primeiro pico obtida após aplicação do limitador (corrente limitada); tempo em que o limitador foi submetido para limitar correntes de curto-circuito (tempo de teste); tempo necessário para que o dispositivo limite a corrente de curto-circuito (tempo de atuação); tempo necessário para que o limitador opere novamente, após a sua atuação (tempo de recuperação); se o limitador é intrinsecamente seguro (falha segura) e; imagem do dispositivo desenvolvido (ilustração).

Tabela 03: Dados dos nb-LCCS citados nos trabalhos.

Itemº	A	B	C	D	E
Potência [MVA]	0,1	2,0	3,6	2,1	0,577
Tensão no primário [ $kV_{rms}$ ]	6,6	22,0	6,0	15,0	20,0
Tensão no secundário [ $V_{rms}$ ]	210	6600	0,75	1,0	1000
Corrente Prospectiva [ $kA_{pico}$ ]	1,344	0,75	20,0	40,0	20,88
Corrente Limitada [ $kA_{pico}$ ]	1,142	0,2	5,0	5,0	6,0
Tempo de Teste [ms]	100	150	100	160	60
Tempo de Atuação [ms]	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
Tempo de Recuperação [s]	10	-	10	27	-
Falha Segura	sim	sim	sim	sim	sim
Ilustração					

#### 2.4.2. Núcleo Saturado

O limitador de corrente de curto-circuito de núcleo saturado (ns-LCCS) se baseia em um comportamento dinâmico, relacionado a característica magnética do núcleo de ferro em mudar a reatância indutiva de um sistema. Conforme o arranjo dado na Figura 05, o ns-LCCS contém dois núcleos de ferro e duas bobinas em CA feitas de material condutor convencional, por fase, e uma bobina em corrente contínua (CC) composta por material supercondutor. As bobinas em CA são conectadas em série com a rede, e apresentam direções de campo magnético opostas, e a bobina supercondutora é alimentada por fonte em CC independente [48].

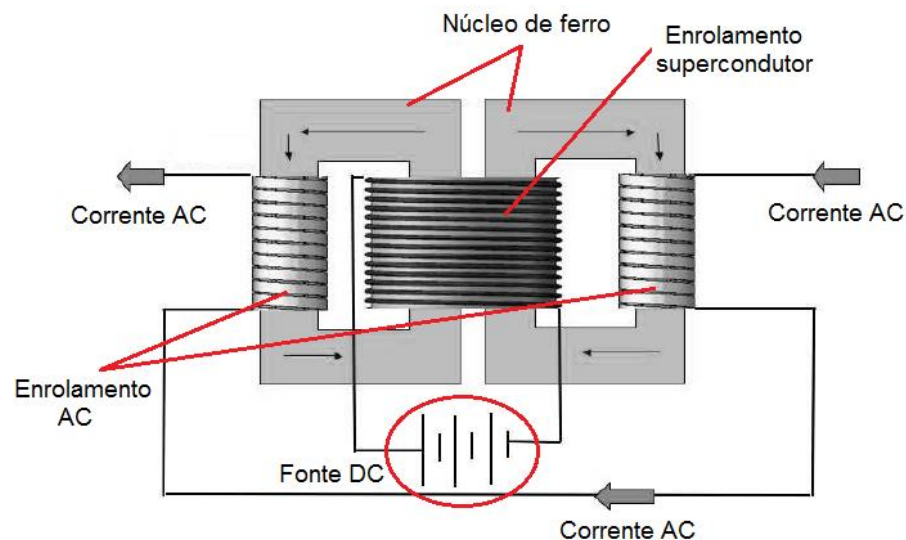


Figura 05: Topologia do ns-LCCS. Adaptado de [49].

Durante a operação normal da rede elétrica, o ns-LCCS funciona em um estado não limitante, uma vez que a corrente na bobina em CC induz um campo magnético nos núcleos de ferro, mantendo-os sempre em saturação com baixa permeabilidade em todo o ciclo em CA. Portanto, a impedância total vista no primário é pequena e quase não tem efeito na rede elétrica. Porém, em uma condição de falha, os semiciclos negativo e positivo de corrente alternada induzem os núcleos a saírem da saturação, aumentando a impedância de linha vista no primário, o que limita a corrente de curto-circuito.


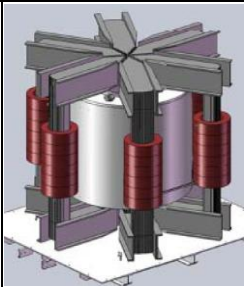

A vantagem desta configuração é o enrolamento supercondutor não transita para o estado normal durante o curto-circuito, reduzindo seu tempo de recuperação em comparação às demais topologias de LCCS. Todavia, este equipamento gera um elevado conteúdo harmônico devido à alternância entre saturação e não saturação do núcleo, durante a limitação. Além disso, este limitador apresenta tamanho e peso consideráveis em razão da necessidade de dois núcleos de ferro, podendo alcançar dimensões proporcionais a um transformador de mesma potência [12].

Existem pesquisas que realizaram a modelagem destes dispositivos, para determinação das correntes (em CA e de polarização em CC), tensão, campo magnético, ciclo de histerese e perdas em CA, [50], [51]. Outros trabalhos visaram aprimorar o projeto do limitador, em relação às espiras e núcleo de ferro (material e peso), assim como a sua coordenação com relés de distância [52], [53]. Para protótipos em escala real, destacam alguns projetos realizados no Reino Unido e EUA, para níveis de RD (11 kV) e de subtransmissão (33 kV), que foram testados e instalados em sistemas reais [54]. A Tabela 04 apresenta alguns trabalhos com limitadores já implantados em redes reais, com as informações dos projetos detalhadas na Tabela 05, semelhante ao realizado na seção 2.4.1.

Tabela 04: Trabalhos experimentais relacionados à ns-LCCS.

Item	Título	Referência	Ano	País	Comercial X Teste
A	Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation	[55]	2009	China	Comercial
B	An Innovative Compact Saturable-Core HTS Fault Current Limiter - Development, Testing and Application to Transmission Class Networks	[56]	2010	EUA	Comercial
C	Factory and Field Tests of a 220 kV/300 MVA Statured Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter	[57]	2013	China	Comercial

Tabela 05: Dados dos ns-LCCS citados nos trabalhos.

Nº	A	B	D
<b>Potência [MVA]</b>	90,0	18,0	300
<b>Tensão no primário [kV<sub>rms</sub>]</b>	35,0	15,0	220,0
<b>Corrente Prospectiva [kA<sub>pico</sub>]</b>	41,0	32,5	50,0
<b>Corrente Limitada [kA<sub>pico</sub>]</b>	25,0	19,5	30,0
<b>Tempo de Teste [ms]</b>	60	100	60
<b>Tempo de Atuação [ms]</b>	5	0,83	5
<b>Tempo de Recuperação [s]</b>	0,8	0,1	0,6
<b>Falha Segura</b>	sim	sim	sim
<b>Ilustração</b>			

### 2.4.3. Resistivo

O r-LCCS é o que possui topologia mais compacta em relação às demais, constituído basicamente de um elemento supercondutor em série com o sistema a ser protegido, sendo refrigerado através de um sistema criogênico. Quando ocorre um curto-circuito, a corrente elétrica e a temperatura do supercondutor sofrem um rápido aumento, fazendo com que material supercondutor transite para o estado normal, passando a apresentar resistência não nula [03]. A Figura 06 apresenta um diagrama esquemático de um limitador resistivo inserido no sistema a ser protegido.

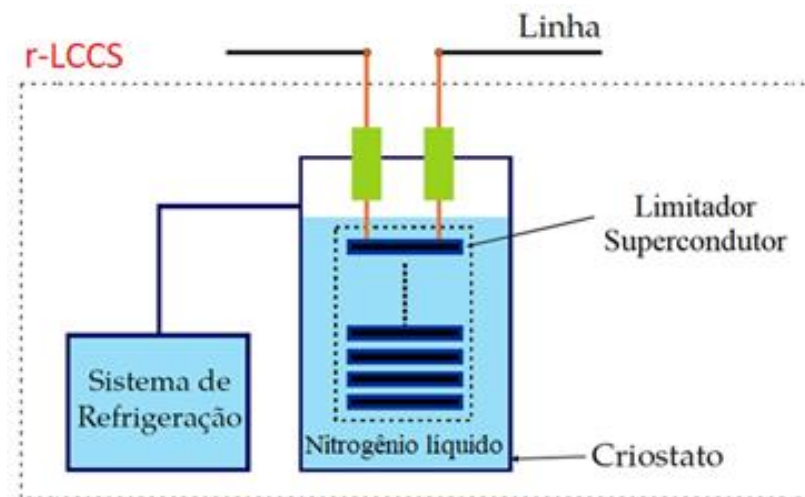


Figura 06: Configuração de um r-LCCS. Adaptado de [12].

Este tipo de limitador apresenta as seguintes vantagens: já existem vários dispositivos testados em níveis de tensão e corrente típicos de sistemas de distribuição de energia elétrica; tamanho e peso reduzidos em comparação às duas topologias de LCCS mencionadas anteriormente; mitigação da assimetria da corrente de curto-circuito, devido à redução da razão  $X/R$  com o uso de elementos *shunt* resistivo; não apresenta distorção da corrente quando comparado a outros limitadores [58].

As desvantagens que podem ser citadas em relação a esta topologia são: a conexão do equipamento 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, ocasionando perdas térmicas no sistema de refrigeração e; o surgimento dos *hot spots*. Para que este último não ocorra, utiliza-se uma fina camada de material com boa condutividade elétrica e térmica em paralelo a camada supercondutora, para dar estabilidade térmica a fita supercondutora 2G e desviar parte da corrente que atravessa estes pontos quentes.

Na literatura, já existem pesquisas relacionadas à modelagem deste tipo de limitadores, com o objetivo de analisar determinados fatores como: caracterização dos fenômenos elétricos e térmicos que ocorrem no limitador em condições normais e de atuação [59], [60], otimização no dimensionamento e configuração do limitador [61], [62], e sua aplicação em sistemas de potência, através de simulações computacionais, a fim de identificar os possíveis benefícios devido à utilização destes tipos dispositivos [63], [64]. Além disso, alguns trabalhos fazem uso destes limitadores como alternativa para redução dos níveis de curto-circuito ocasionados pela GD conectada à rede [65], [66].

Na parte experimental, alguns trabalhos desenvolveram protótipos em escala menor e/ou real para mensurar dados elétricos e térmicos como: perdas em corrente alternada [67], [68], fenômenos como *quench* e tempo de recuperação [69], [70], temperatura, isolamento e sistema criogênico [71], [72].

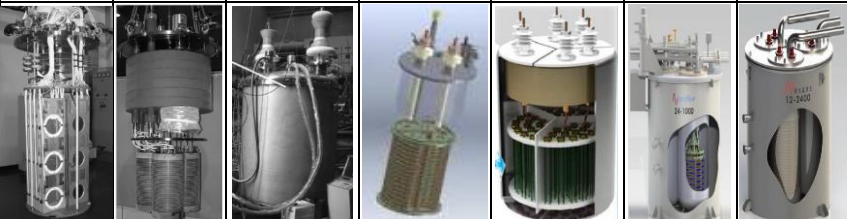
Existem trabalhos que, através de ensaios, apresentaram caracterizações elétrica e térmica para limitadores que utilizam fita supercondutora 1G, como o composto BSCCO [73], [74], e fitas 2G, como o YBCO [75], [76]. As Tabelas 06 e 07 apresentam os dados dos artigos destacados e dos protótipos construídos, respectivamente, para níveis de RD e com aplicação de fitas 2G, idem ao realizado nas seções 2.4.1 e 2.4.2



Tabela 06: Trabalhos experimentais relacionados à r-LCCS para RD.

Item	Título	Referência	Ano	País	Comercial X Teste
A	6.6 kV Resistive Superconducting Fault Current Limiter Based on YBCO Films	[77]	2005	Coreia do Sul	Teste
B	Design and Experimental Results of Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter Using Highly-Resistive YBCO Tapes	[78]	2009	Japão	Teste
C	Study on a Series Resistive SFCL to Improve Power System Transient Stability: Modeling, Simulation, and Experimental Verification	[79]	2009	Coreia do Sul	Teste
D	ENSYSTROB - Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for Medium Voltage Application	[10]	2011	Alemanha	Teste
E	The Development and Performance Test of a 10 kV Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter	[80]	2012	China	Teste
F	Design and Production of the ECCOFLOW Resistive Fault Current Limiter	[81]	2013	Espanha Eslováquia	Comercial
G	AmpaCity - Advanced Superconducting Medium Voltage System for Urban Area Power Supply	[82]	2014	Alemanha	Comercial

Tabela 07: Dados dos r-LCCS citados nos trabalhos.

Item	A	B	C	D	E	F	G
Tensão [ $kV_{rms}$ ]	6,6	6,6	13,2	12,0	10,0	24,0	12,0
Corrente Prospectiva [ $kA_{pico}$ ]	10,0	1,56	28,8	63,0	2,8	25,6	50,0
Corrente Limitada [ $kA_{pico}$ ]	0,816	0,84	9,45	16,3	1,5	10,8	11,5
Tempo de Teste [ms]	120	100	100	120	120	1000	100
Tempo de Atuação [ms]	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
Tempo de Recuperação [s]	10,0	30,0	< 30	< 30	30,0	30,0	< 30
Falha Segura	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Ilustração							

## 2.5. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO r-LCCS

O r-LCCS são dispositivos que possuem impedância desprezível em operação normal em sistemas de corrente alternada (CA), porém em condição de curto-circuito, sua impedância cresce rapidamente em até menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo. Isso se deve à propriedade intrínseca do material em transitar do estado supercondutor para o estado normal, em função do rápido aumento da temperatura que ocorre durante o curto-circuito. A Figura 07 demonstra as formas de onda típicas de uma corrente de curto-circuito sem a utilização de um limitador (prospectiva) e com aplicação de r-LCCS (limitada). Observa-se que durante a condição normal do sistema, o dispositivo apresenta uma impedância virtualmente nula e, na ocorrência de um curto-circuito, é inserida uma impedância que reduz o valor do primeiro pico da corrente, assim como seus picos subsequentes.

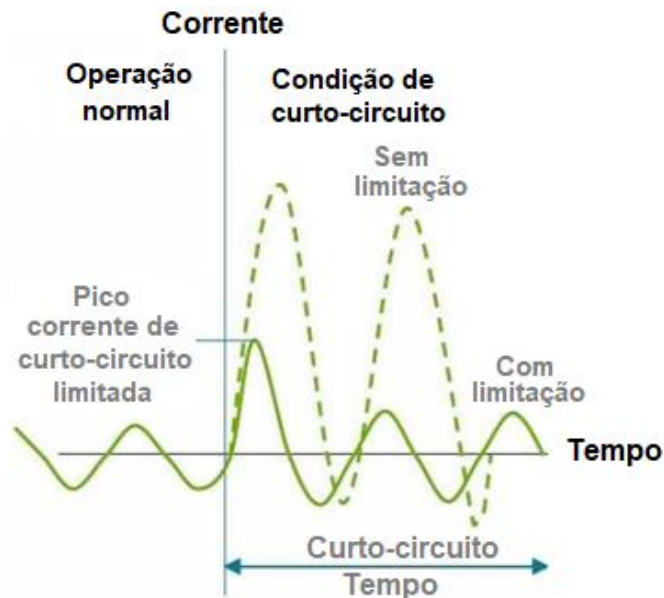


Figura 07: Formas de onda característica de corrente de curto com/sem aplicação de r-LCCS. Adaptado de [15].

### 2.5.1. Dinâmica dos Vórtices

Conforme citadas na seção 2.2, as fitas 2G YBCO foram selecionadas para simular sua aplicação em LCCS neste trabalho. Estes supercondutores de alta temperatura crítica e do tipo II apresentam um estado misto, no qual existem regiões em estado normal com penetração de linhas de campo dentro do material no estado supercondutor. Estas regiões são chamadas de fluxóides, por onde é carregada uma quantidade de fluxo quantizada (ou *fluxon*,  $\Phi$ ), cujo valor é  $2,07 \times 10^{-15}$  Wb [16].

Estes fluxóides são delimitados através de vórtices de corrente, que circulam perpendicularmente ao *fluxon*, blindando a região supercondutora da região normal. A Figura 08 ilustra a distribuição triangular (ou hexagonal) destes vórtices de corrente ao longo do supercondutor, também conhecido como rede de Abrikosov [16].

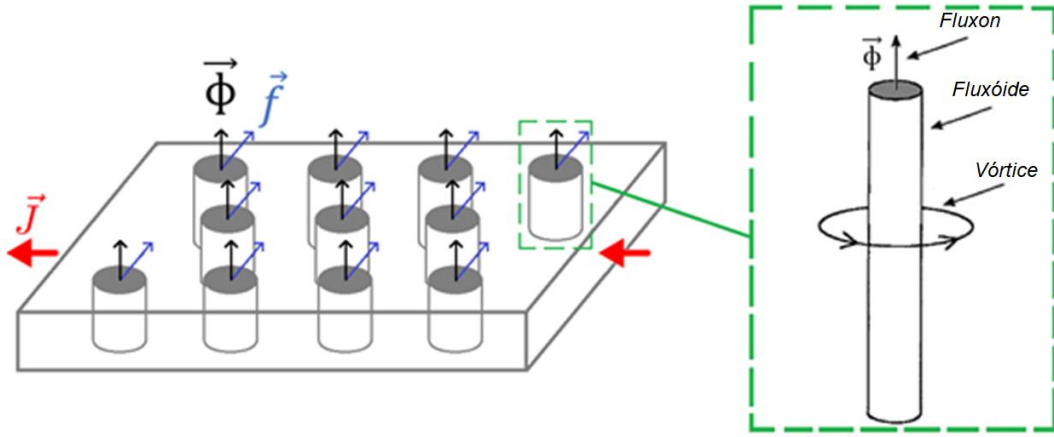


Figura 08: Força de Lorentz gerada nos vórtices em função da densidade de corrente. Adaptado de [16].

Caso o supercondutor seja submetido a uma densidade de corrente ( $\vec{J}$ ), conforme indicada na Figura 08, existirá uma interação entre cada vórtice com esta densidade de corrente, somadas as suas supercorrentes, dada em (01):

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{\Phi} \quad (01)$$

na qual  $\vec{f}$  a força exercida em cada vórtice causada por  $\vec{J}$ . Esta interação em cada vórtice, chamada Força de Lorentz, resulta em uma força volumétrica ( $\vec{F}_L$ ) para todo o material, descrita em (02):

$$\vec{F}_L = \vec{J} \times k\vec{\Phi} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (02)$$

na qual  $\vec{B}$  é a densidade de fluxo magnético, dado pelo produto entre *fluxon* e o número de vórtices por unidade de área ( $k$ ). Uma vez que estes vórtices se movam com uma velocidade ( $\vec{v}$ ), surgirá uma força eletromotriz induzida, ou um campo elétrico ( $\vec{E}$ ) induzido, paralelo à direção da densidade de corrente, conforme relacionados em (03).

$$\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v} \quad (03)$$

Este campo elétrico, relacionada ao movimento do vórtice, gera dissipação de energia térmica, devido à potência transportada pela densidade de corrente para movimentar lateralmente a rede de vórtices. Este efeito aumenta a temperatura no material, podendo causar sua transição para o estado normal.

Devido a variações locais de profundidade de penetração, comprimento de coerência, ou  $H_c$ , causadas por fatores como impurezas, fronteiras de grão, precipitados, poros e demais imperfeições, existirá uma força de aprisionamento de fluxóides (ou *pinning*,  $\vec{F}_p$ ) que irá se contrapor à  $\vec{F}_L$ . Estas duas forças definem dois regimes de operação, de acordo com a delimitação a seguir:

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

Estes parâmetros são importantes para definir a máxima corrente que passará pelo LCCS sem que dissipe calor, em corrente contínua. Em supercondutores do tipo II, o valor de  $\vec{J}_c$  pode ser aumentado com o aumento de  $\vec{F}_p$ , através da dopagem do material, até um limite teórico denominado de densidade de corrente de depareamento ( $\vec{J}_d$ ).

### 2.5.2. Curva E-J

Considerando que não exista campo magnético externo aplicado sobre o supercondutor, o campo elétrico pode ser determinado como função da densidade de corrente e da temperatura ( $T$ ), conforme descrito em (04), e por sua vez  $J_c$  como uma dependência linear com  $T$ , de acordo com (05) [83]:

$$E(J, T) = E_c \left[ \frac{J}{J_c(T)} \right]^n \quad (04)$$

$$J_c(T) = J_{cT_i} \left( \frac{T_c - T}{T_c - T_i} \right), \text{ para } T_i < T < T_c \quad (05)$$

nas quais  $E_c$  é o campo elétrico crítico quando o supercondutor transita para o estágio dissipativo (ou seja, quando aplicado a  $J_c$ ),  $T_i$  é a temperatura inicial em que o material se encontra em equilíbrio com o meio externo, e  $n$  é o índice de transição relativo ao estágio de operação do material (os valores variam em relação a composição química do supercondutor). A  $J_c$  é definida como a densidade de corrente na qual se obtém  $E_c$ , normalmente adotado como 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ . A curva E-J, apresentada em escala logarítmica na Figura 09, demonstra a relação entre o campo elétrico e a densidade de corrente caracterizada em três estágios de transição, nos quais  $n$  assume valores diferentes, de acordo com as descrições a seguir:

- *Flux Creep* - estágio no qual ocorre um lento movimento dos vórtices, uma vez que a densidade de corrente e campo elétrico são superiores a  $J_c$  e  $E_c$ , respectivamente, e as forças de Lorentz começam a se sobrepor às forças de aprisionamento;
- *Flux Flow* - estágio em que as forças de Lorentz são superiores às de aprisionamento, ocasionando um movimento livre dos vórtices no material supercondutor;
- Normal - estágio no qual o material já não apresenta propriedades da supercondutividade, variando sua resistividade linearmente com a temperatura.

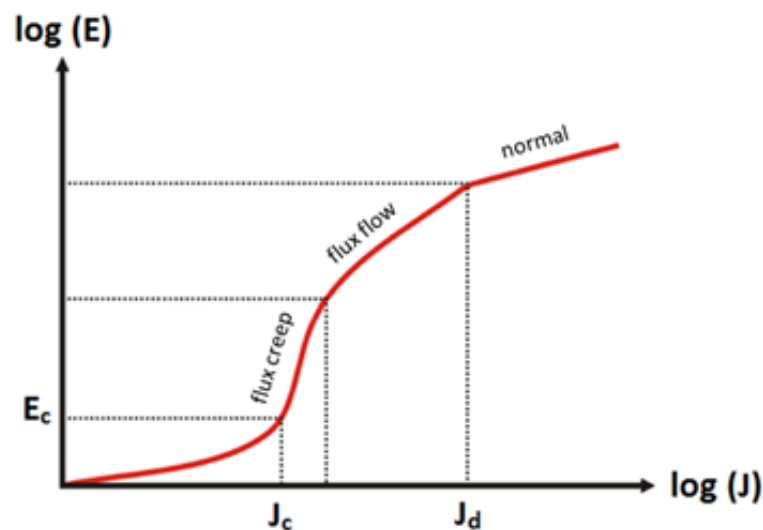


Figura 09: Curva E-J delimitada com os 3 estágios de transição. Adaptado de [12].

Com relação ao  $n$ , as fitas de 2G YBCO apresentam valores entre 20 e 30 para o regime *Flux Creep* e 2 e 5 para o *Flux Flow* [12]. Para o estágio normal, os materiais passam a apresentar uma resistividade elétrica linear, no caso  $n$  igual a 1. Estas caracterizações do comportamento de transição dos estágios, e suas expressões matemáticas são importantes, uma vez que são aplicadas para modelagem de limitadores em simulações computacionais neste trabalho.

### 3. MODELAGEM DO r-LCCS

Para desenvolver um modelo de r-LCCS que simule o comportamento de um dispositivo real, este trabalho tem como base o projeto ENSYSTROB [10], [11]. É considerada também a aplicação da analogia eletrotérmica, como uma alternativa na resolução do acoplamento das equações elétricas e térmicas, existentes no princípio de funcionamento deste dispositivo. Os resultados finais expostos em [12] via medições em testes são considerados para validação do modelo proposto, além das simulações realizadas no programa MATLAB (*Matrix Laboratory*) para análise da variação das temperaturas e da resistência equivalente do r-LCCS.

A tecnologia utilizada para a construção do módulo r-LCCS é baseada em fitas 2G YBCO do modelo SF12100 da *SuperPower*, ilustrada na Figura 10, que tem como características comprimento de 430 cm, largura de 1,2 cm, corrente crítica de 275 A para 77 K, temperatura crítica de 92 K, tempo máximo de condução de corrente em estado normal que varia de 100 a 120 ms, considerando uma queda de tensão máxima de 0,5 V/cm [10]. Esta fita é composta basicamente de 5 camadas: Prata superior e inferior (responsáveis pela estabilização térmica e proteção da camada supercondutora); o supercondutor YBCO; camadas *Buffer* (melhoram a aderência do material supercondutor ao substrato, entre outras funções); e o substrato *Hastelloy* (minimiza os esforços mecânicos devido à contração térmica).

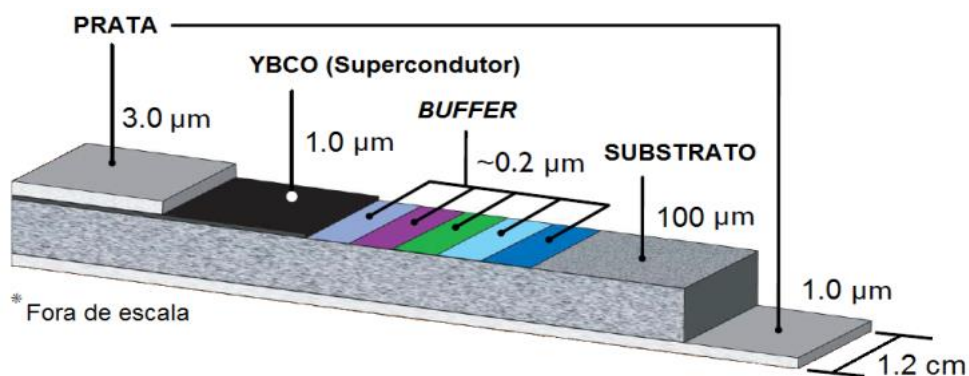


Figura 10: Espessuras de cada camada da fita 2G YBCO modelo SF12100 da SuperPower. Adaptado de [84].

O modelo do limitador é composto por módulos de r-LCCS. Cada módulo consiste em 8 fitas 2G YBCO, sendo 4 fitas em paralelo na entrada conectadas com mais 4 fitas em paralelo na saída, por meio de uma resistência de contato, em um arranjo antiparalelo para compensar as perdas em CA e diminuir o campo induzido pelas mesmas, conforme apresentado na Figura 11. A resistência *shunt* é conectada em paralelo com o arranjo de fitas,

e tem a finalidade de conduzir/limitar a corrente de curto-circuito após o supercondutor transitar para o estado normal, evitando a degradação da fita supercondutora por Efeito Joule.

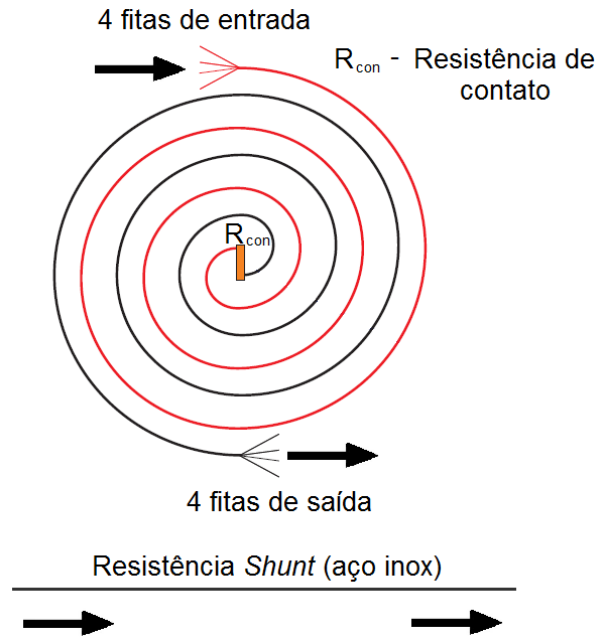


Figura 11: Arranjo do módulo de r-LCCS.

### 3.1. EQUIVALENTE ELÉTRICO

Para modelagem elétrica da fita 2G YBCO, foi considerada a seção transversal da fita 2G como um conjunto de 4 resistências em paralelo, variáveis com a temperatura, que correspondem a cada camada da mesma, com exceção do *Buffer* que tem seu efeito desprezado devido a sua pequena espessura. A mesma analogia é realizada para o elemento *shunt*, composto por uma fita de aço inox, sendo sua resistência dada pela seção transversal da mesma. Cada resistência é enumerada de acordo com ( $n$ ), conforme a indicada na Figura 12.

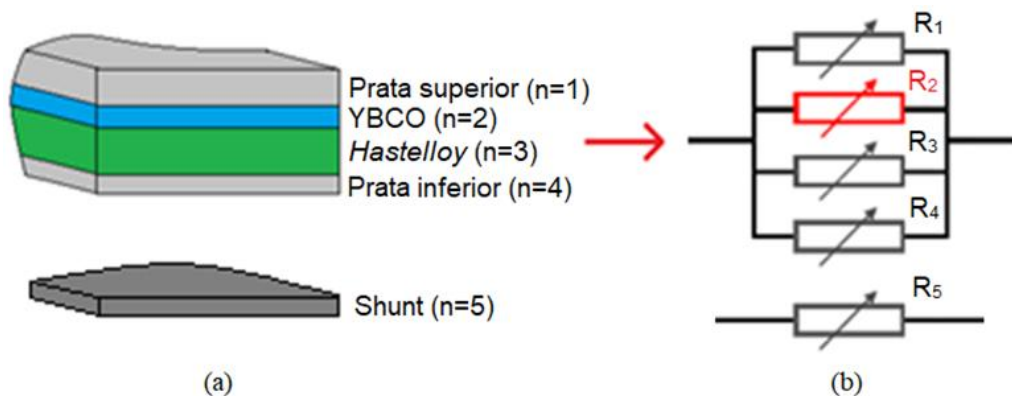


Figura 12: (a) Seção transversal e (b) representação elétrica das fitas 2G YBCO e aço inox (*shunt*).

A resistividade elétrica ( $\rho_n$ ) destes materiais são funções lineares da temperatura ( $T_n$ ), com exceção do YBCO quando se encontra abaixo de  $T_c$ . As equações (06), (07) e (08)

descrevem o comportamento linear das resistividades em [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] da prata, do *hastelloy*, e do aço inox, respectivamente [85], [86].

$$\rho_{prata} = (-2,082 \cdot 10^{-7}) + (6,17 \cdot 10^{-9} \cdot T_{prata}) \quad (06)$$

$$\rho_{hastelloy} = (1,103 \cdot 10^{-4}) + (8,958 \cdot 10^{-9} \cdot T_{hastelloy}) \quad (07)$$

$$\rho_{aço\ inox} = (1,193 \cdot 10^{-4}) - (7,529 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-T_{aço\ inox}/647,113}) \quad (08)$$

Para o supercondutor YBCO, existe um comportamento da resistividade elétrica distinto quando a temperatura está acima ou abaixo de  $T_c$ . Em temperaturas menores que  $T_c$ , a resistividade é função da relação entre o campo elétrico dado pela equação (04), e a densidade de corrente, através da curva E-J do material nos estágios de *Flux Creep* e *Flux Flow*, expressa em (09). Acima da  $T_c$ , o material se comporta como um condutor normal, tendo sua resistividade variando linearmente com a temperatura, descrita em (10).

$$\rho_{YBCO\ (abaixo\ de\ T_c)} = E/J \quad (09)$$

$$\rho_{YBCO\ (acima\ de\ T_c)} = -0,1 + (10^{-2} \cdot T) \quad (10)$$

A resistência elétrica de cada camada ( $R_n$ ), exposta na Figura 12, é dada em (11):

$$R_n = \rho_n \cdot [d_n / (l_n \cdot e_n)] \quad (11)$$

na qual  $d_n$ ,  $l_n$  e  $e_n$  são o comprimento, a largura e a espessura da camada, respectivamente. O cálculo da resistência equivalente de uma fita 2G YBCO ( $R_{fita}$ ) é determinado através do paralelismo entre suas camadas consideradas, que correspondem às resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , expressa em (12).

$$1/R_{fita} = (1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3) + (1/R_4) \quad (12)$$

A resistência total do r-LCCS ( $R_{total}$ ) é determinada através do arranjo de fitas utilizadas para limitação, em paralelo à resistência *shunt* ( $R_5$ ), ilustrado na Figura 13, desprezando-se o valor da resistência de contato ( $R_{con}$ ). A resistência equivalente é determinada pela equação (13).



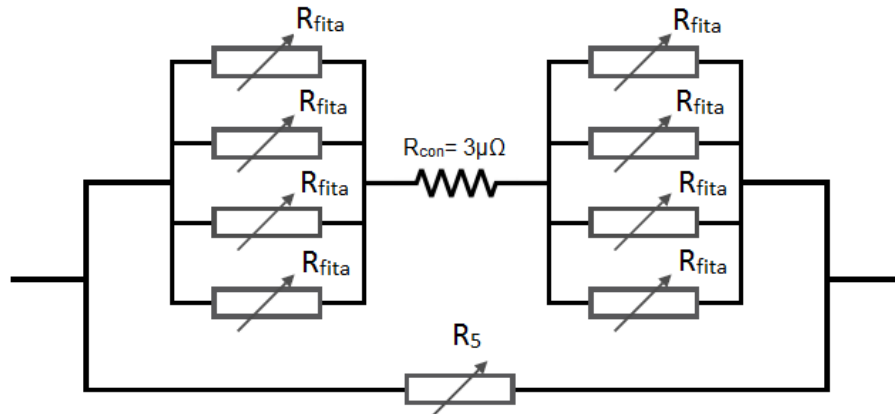


Figura 13: Circuito equivalento do protótipo de r-LCCS.

$$1/R_{total} = (2/R_{fita}) + (1/R_5) \quad (13)$$

Para determinar a variação de temperatura devido à potência dissipada no interior de cada camada, calcula-se a corrente que atravessa por cada uma delas ( $i_n$ ), por meio de divisor de corrente dado em (14), na qual  $i_{total}$  é a corrente total que passa pelo r-LCCS.

$$i_n = (R_{total}/R_n) \cdot i_{total} \quad (14)$$

Devido a não linearidade da resistividade do supercondutor durante sua variação em relação à curva E-J, e sua relação direta com a corrente que está sendo aplicada, se faz necessário a utilização de um método iterativo para o cálculo da corrente que passa por ele em função da resistividade calculada. Este processo iterativo minimiza a instabilidade numérica na simulação do r-LCCS. Este processo é resumido pelo fluxograma apresentado pela Figura 14.

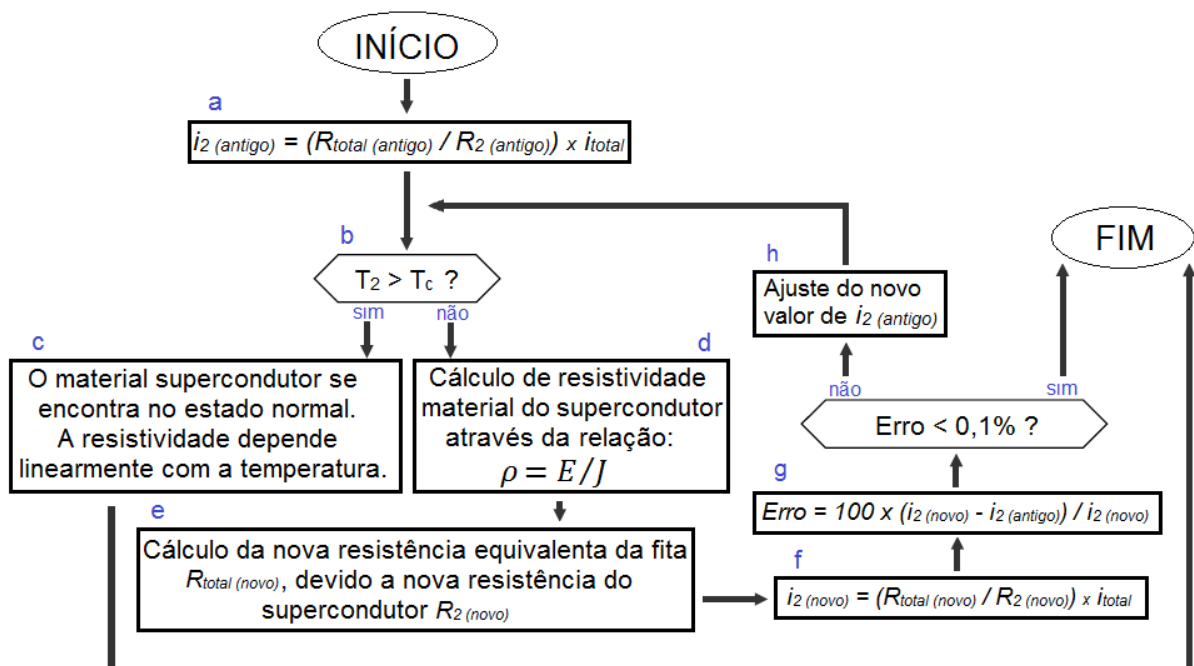


Figura 14: Fluxograma do método iterativo de corrente e resistividade elétrica no supercondutor.

Após a obtenção da corrente que passa pelo supercondutor  $i_{2 (antigo)}$  (passo "a"), o valor da temperatura do supercondutor ( $T_2$ ) é comparada com  $T_c$  (passo "b"). Caso  $T_2$  seja maior que  $T_c$ , então o material está no estado normal e a resistividade é calculada através da equação (10) e o processo iterativo é encerrado (passo "c"). Caso contrário, a resistividade é dada pela equação (09) (passo "d") e os valores de  $R_2$  e  $R_{total}$  são atualizados por meio das equações (11), (12) e (13) (passo "e"). A nova corrente que atravessa o supercondutor  $i_{2 (novo)}$  é determinada (passo "f") e o erro existente entre  $i_{2 (antigo)}$  e  $i_{2 (novo)}$  é calculado (passo "g"). Se o erro for menor do que 0,1 %, ele é considerado estável e o processo finaliza. Caso seja maior, o valor de  $i_{2 (antigo)}$  é corrigido através de um fator de ajuste e o processo iterativo irá se repetir até que o erro seja menor do que 0,1 %. Maiores detalhes sobre esta metodologia são encontrados na referência [12].

Finalizada a aquisição destes novos valores das correntes que atravessam em cada camada da fita 2G YBCO, a próxima etapa é determinar a variação da temperatura que ocorre em cada uma delas. No caso de um curto-circuito, esta variação está ligada a geração interna de calor e as trocas térmicas que estes materiais apresentam quando submetidos a este aumento súbito de corrente. Para avaliar e solucionar este fenômeno térmico, a analogia eletrotérmica é explicada e aplicada na seção 3.2.

### 3.2. EQUIVALENTE TÉRMICO

Foi utilizada a analogia eletrotérmica para caracterizar as trocas térmicas que ocorrem devido a geração interna de calor em cada camada do r-LCCS, causada durante uma condição de curto-circuito. O objetivo principal desta analogia é determinar a variação da resistividade elétrica, em relação a temperatura, para o supercondutor e os demais elementos que compõe o limitador. Além disso, considera-se também a variação dos parâmetros térmicos (condutividade térmica, calor específico e coeficiente de convecção) em relação a temperatura para alguns tipos de materiais existentes do r-LCCS. Este isomorfismo que existe entre transferência de calor e circuitos elétricos traz vantagens em simulações computacionais, pois diminui o esforço computacional se comparado aos métodos de elementos e diferenças finitas, e permite sua aplicação e estudo em programas específicos para sistemas elétricos de potência.

### 3.2.1. Analogia Eletrotérmica

Em transferência de calor, este fenômeno térmico que ocorre em cada camada pode ser aproximado como uma rápida mudança unidimensional de temperatura, no interior de um sólido (no caso, a fita 2G considerada como uma placa plana finita e isotrópica). Esta aproximação é possível devido às dimensões das espessuras de cada camada serem muito menores do que as demais dimensões.

Por isso, considera-se que exista uma taxa de fluxo de calor de forma unidirecional transiente apenas em uma direção (eixo  $z$ ), conforme ilustrado na Figura 15, através de um volume infinitesimal. Pode-se determinar a taxa de fluxo de calor líquida  $[-(\partial\dot{Q}_z/\partial z)dz]$  pela diferença entre a taxa que entra ( $\dot{Q}_z$ ) e a que sai  $[\dot{Q}_z + (\partial\dot{Q}_z/\partial z)dz]$  deste volume, por meio da equação (15).

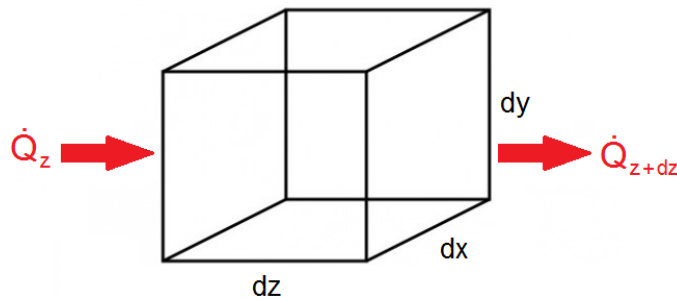


Figura 15: Taxa de fluxo de calor através de um elemento infinitesimal.

$$\dot{Q}_z - \left[ \dot{Q}_z + \left( \frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} \right) dz \right] = - \left( \frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} \right) dz \quad (15)$$

Se o material analisado obedece a lei de Fourier para condução de calor, a taxa de fluxo de calor pode ser relacionada à condutividade térmica ( $\lambda$ ), à área da superfície de troca de calor ( $da$ ), ortogonal ao eixo  $z$  (plano  $dx dy$ ), e ao gradiente de temperatura ( $\partial T$ ) ao longo do eixo  $z$ , de acordo com a equação (16).

$$\dot{Q}_z = -\lambda da \frac{\partial T}{\partial z} \quad (16)$$

De acordo com o princípio de balanço de energia da 1ª lei da Termodinâmica, a taxa líquida de fluxo de calor, somada a taxa de geração volumétrica de calor infinitesimal ( $\dot{g} dV$ ) ao volume ( $dV$ ), é igual a taxa de variação da energia térmica armazenada pelo material ( $\gamma \cdot c \cdot dV \cdot \partial T / \partial t$ ), conforme a equação (17):

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

na qual  $\gamma$ ,  $c$  e  $t$  representam a massa específica do material, o calor específico do material, e o tempo transiente analisado, respectivamente. Ao substituir  $\dot{Q}_z$  da equação (16) em (15), obtêm-se a equação de condução de calor transiente unidimensional (1D) descrita em (18).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\gamma c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{g}}{\gamma c} \quad (18)$$

Em circuitos elétricos, a equação de linha de transmissão com parâmetros distribuídos, dada pela equação (19), é matematicamente equivalente à equação (17), exceto o termo relativo à geração de calor interna no material [ $\dot{g}/(\gamma c)$ ].

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{R'C'} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (19)$$

Ao adicionar uma fonte de corrente em paralelo ao capacitor *shunt* da linha de transmissão, representada por uma potência ( $P$ ) conforme indicada na Figura 16, determina-se a equação elétrica equivalente à condução de calor transiente 1D, dada por (20). O circuito em forma de “T” contém 3 nós, sendo o nó do meio  $V_b$  referente à camada “b” e os outros dois nós  $V_a$  e  $V_c$  relacionados às extremidades compartilhadas com as camadas “a” e “c”, respectivamente.

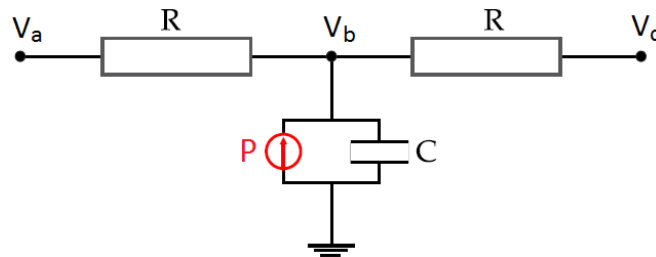


Figura 16: Circuito equivalente RC de linha de transmissão, com a fonte de corrente inserida.

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

A Tabela 08 apresenta a analogia existente entre as propriedades térmicas e elétricas, utilizadas para a elaboração do circuito equivalente na simulação do comportamento das fitas 2G e *shunt*, em relação às gerações internas de calor e as trocas térmicas existentes em cada uma delas. Com isso, é possível determinar as variações de temperatura no interior de cada camada do limitador por meio das tensões nos nós, e conseqüentemente a variação da resistividade elétrica de cada elemento, inclusive do supercondutor, conforme detalhada na seção 3.1.

Tabela 08: Analogia entre propriedades térmicas e elétricas. Adaptado de [12].

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

### 3.2.2. Circuito Equivalente

Conforme analisado na seção anterior, a variação das temperaturas ( $T_n$ ) ao longo das espessuras ( $e_n$ ) de cada camada do r-LCCS (seção transversal), indicado na Figura 17, podem ser calculadas através da analogia eletrotérmica entre a equação de condução de calor transiente 1D e a equação de linha de transmissão com parâmetros distribuídos. Nesta figura,  $T_{LN_2}$  é a temperatura do LN<sub>2</sub> a 77 K.

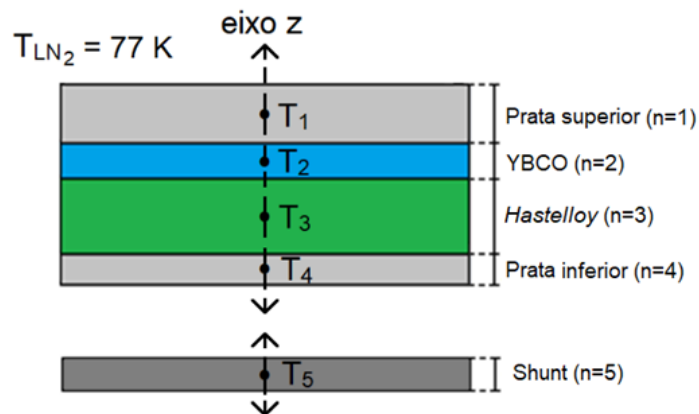


Figura 17: Variação de temperatura no interior de cada camada do r-LCCS, ao longo do eixo z.

Esta configuração pode ser representada por meio de um circuito eletrotérmico equivalente, ilustrado na Figura 18, no qual a fonte de tensão em corrente contínua, com o valor de 77 V, representa a temperatura do ambiente externo ao r-LCCS refrigerado por LN<sub>2</sub> a 77 K ( $V_{LN_2}$ ).

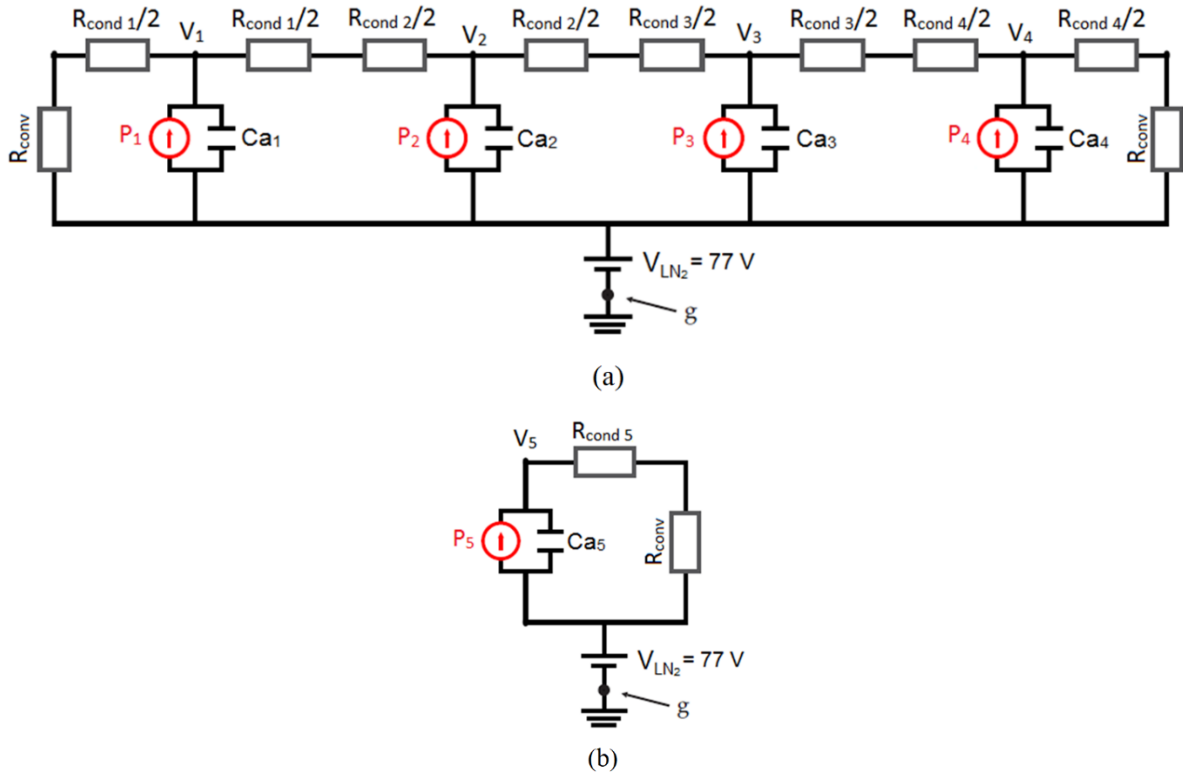


Figura 18: Circuito eletrotérmico da fita 2G YBCO (a) e da resistência *shunt* (b).

Esta representação por meio de circuitos elétricos possibilita as seguintes analogias entre: tensão ( $V_n$ ) e temperatura; resistência de condução ( $R_{cond\ n}$ ) e o inverso da condutância térmica; resistência de convecção ( $R_{conv}$ ) e o inverso da transferência convectiva, sendo  $h_n$  o coeficiente de transferência de calor por convecção; capacitância ( $Ca_n$ ) e capacidade de armazenamento de calor; e fonte de corrente e taxa de fluxo de calor, relacionadas à geração interna de calor e expressas em potência ( $P_n$ ). Todas estas relações são expressas pelas equações (21), (22), (23), (24) e (25).

$$V_n = T_n \quad (21)$$

$$R_{cond\ n} = l_n / (\lambda_n \cdot d_n \cdot l_n) \quad (22)$$

$$R_{conv} = 1 / (h_n \cdot d_n \cdot l_n) \quad (23)$$

$$Ca_n = \gamma_n \cdot c_n \cdot d_n \cdot l_n \cdot e_n \quad (24)$$

$$P_n = R_{cond\ n} \cdot i_n^2 \quad (25)$$

Aplicando o método de análise nodal no circuito da Figura 18 para obtenção das tensões (temperaturas)  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$  e, determina-se um sistema de equações diferenciais parciais em função do tempo, descrito na forma matricial em (26). A tensão  $V_5$  é determinada isoladamente pela equação (27), uma vez que o elemento *shunt* não está acoplado à fita 2G YBCO fisicamente, não realizando trocas térmicas com as demais camadas. As condutâncias

( $G_n$ ) estão relacionadas com as resistências térmicas  $R_{cond\ n}$  e  $R_{conv}$ , de acordo com as equações (28), (29), (30), (31), (32) e (33).

$$\begin{bmatrix} Ca_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ca_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ca_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ca_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_1 + G_2 & -G_2 & 0 & 0 \\ -G_2 & G_2 + G_3 & -G_3 & 0 \\ 0 & -G_3 & G_3 + G_4 & -G_4 \\ 0 & 0 & -G_4 & G_4 + G_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} + V_{LN_2} \begin{bmatrix} G_1 \\ 0 \\ 0 \\ G_4 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\dot{V}_5 = (1/Ca_5) \cdot [P_5 - G_6(V_5 - V_{LN_2})] \quad (27)$$

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

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

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

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

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

$$G_6 = (R_{conv} + R_5)^{-1} \quad (33)$$

Por se tratar de um sistema de equações acopladas com mais de uma variável dependente (temperatura), em função de uma mesma variável independente (tempo), o Método de Euler é aplicado para discretização das equações (26) e (27), conforme resultado expresso em (34) e (35), respectivamente. Além disso, utiliza-se o método implícito para não tornar o passo de tempo ( $dt$ ) extremamente pequeno, que seria necessário para manter os erros limitados e gerar estabilidade numérica.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \left\{ \begin{bmatrix} Ca_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ca_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ca_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ca_4 \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} G_1 + G_2 & -G_2 & 0 & 0 \\ -G_2 & G_2 + G_3 & -G_3 & 0 \\ 0 & -G_3 & G_3 + G_4 & -G_4 \\ 0 & 0 & -G_4 & G_4 + G_5 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} Ca_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ca_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ca_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ca_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}_t + \Delta t \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} + \Delta t \cdot V_{LN_2} \begin{bmatrix} G_1 \\ 0 \\ 0 \\ G_4 \end{bmatrix} \right\} \quad (34)$$

$$V_{5t+\Delta t} = [Ca_5 + (\Delta t \cdot G_6)]^{-1} \times \{(Ca_5 \cdot V_{5t}) + \Delta t [P_5 + (V_{LN_2} \cdot G_6)]\} \quad (35)$$

Além da geração interna de calor e as trocas térmicas existentes no r-LCCS, o modelo ainda considera as seguintes variações dos parâmetros térmicos de alguns materiais, em relação a temperatura: condutividade térmica ( $\lambda_n$ ); calor específico ( $c_n$ ); e coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h_n$ ). Desta forma, são consideradas funções da temperatura, além das resistividades elétricas de determinadas camadas, as resistências e

capacitâncias referentes ao circuito eletrotérmico, conforme descritos em (36), (37), (38), (39), (40), (41), (42) e (43) [85], [86], [87].

$$c_{prata} = 0,2205 + 4,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{prata} \quad (36)$$

$$c_{YBCO} = 0,39 \left( \frac{250}{T_{YBCO}} \right)^2 \cdot \frac{\exp(250/T_{YBCO})}{[\exp(250/T_{YBCO2}) - 1]^2} \quad (37)$$

$$c_{Hastelloy} = 0,19 + 2 \left[ 0,194 \left( 1 - \exp(-T_{Hastelloy}/310) \right) \right] \quad (38)$$

$$c_{aço\ inox} = 0,2 \quad (39)$$

$$\lambda_{prata} = [420,9 + (501,8 + 0,953 T_{prata})] \times 10^{-2} \quad (40)$$

$$\lambda_{YBCO} = 0,05 \quad (41)$$

$$\lambda_{Hastelloy} = 0,03873 + 0,00017 \cdot T_{hastelloy} \quad (42)$$

$$\lambda_{aço\ inox} = 0,15 \quad (43)$$

A variação de  $h_n$  depende da diferença entre a temperatura da camada em contato com o meio externo e o LN<sub>2</sub> ( $\Delta T$ ), caracteriza pelos estágios *free convection*, *bubble boiling* e *film boiling*, indicados na Figura 19. Para  $\Delta T$  menor que 2,75 K, considera-se  $h_n$  igual a 0,2 J/(K.cm<sup>2</sup>), e maior que 26,5 K igual a 0,03 J/(K.cm<sup>2</sup>). No caso de  $\Delta T$  ser maior ou igual a 2,75 e menor ou igual a 26,5,  $h_n$  é calculado de acordo com a equação (44) [88].

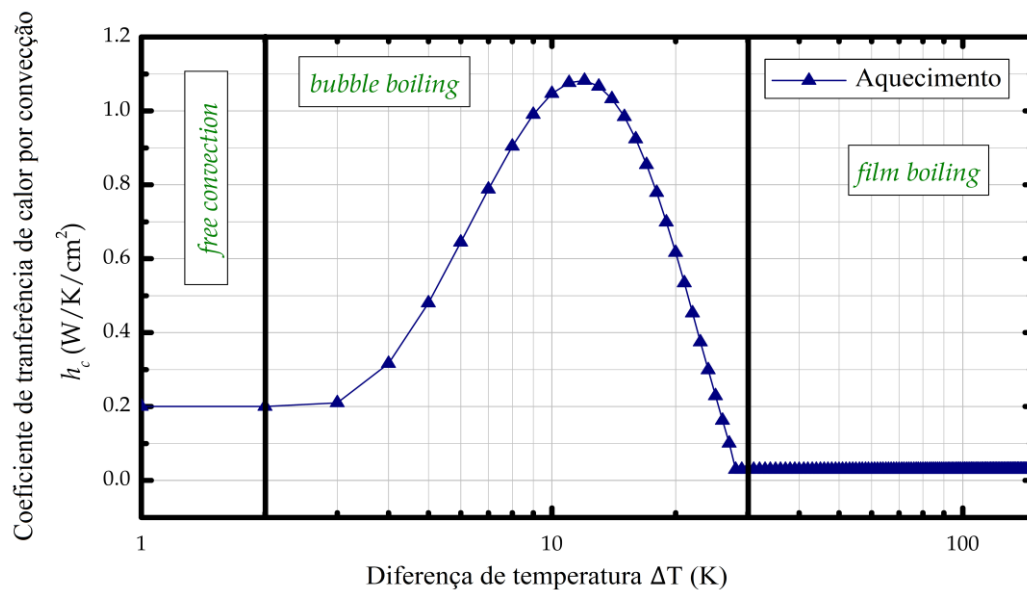


Figura 19: Variação do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície da fita 2G e o LN<sub>2</sub>.

Adaptado de [12].

$$h_n = [3,8147 - 2,8209\Delta T + 0,72328\Delta T^2 - 4,9438 \cdot 10^{-2}\Delta T^3 + 1,325 \cdot 10^{-3}\Delta T^4 - 1,2773 \cdot 10^{-5}\Delta T^5]/\Delta T \quad (44)$$



### 3.3. DADOS PARA SIMULAÇÃO DO MODELO DE r-LCCS NO ATPDRAW

Para simular e posteriormente validar modelo proposto, este trabalho teve com referência testes realizados no Laboratório de Alta Corrente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL/Unidade Adrianópolis), no qual um módulo de r-LCCS foi submetido a determinados níveis de curto-circuito monofásico, por meio do circuito equivalente apresentado pela Figura 20. A resistência e reatância de controle do circuito 2,  $R_c$  e  $X_c$ , respectivamente, compõem a impedância que define o nível de corrente de curto-circuito ou corrente prospectiva ( $i_{pro}$ ), que se deseja aplicar no dispositivo limitador conectado ao circuito 3.

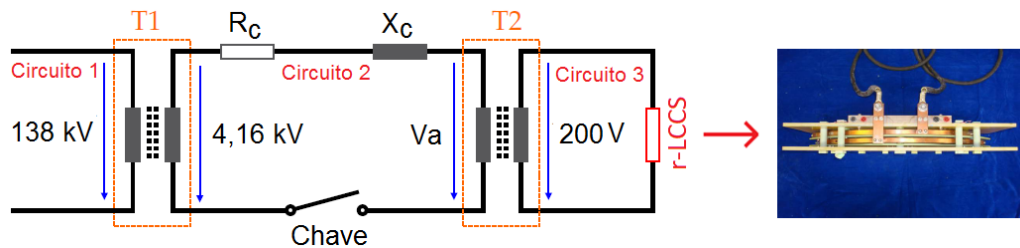


Figura 20: Circuito equivalente utilizado para ensaio do r-LCCS. Adaptado de [12].

Durante os ensaios, o r-LCCS foi refrigerado a 77 K com  $LN_2$  e submetido a uma corrente de curto-circuito de  $30 \text{ kA}_{\text{rms}}$ , em um período de 60 ms (tempo inferior ao limite de 120 ms, para evitar possíveis degradações) e uma frequência de 60 Hz. Através de um divisor resistivo e um transformador de corrente, foi possível mensurar os valores de tensão e corrente, respectivamente. O valor de  $i_{pro}$  no primeiro pico assimétrico foi de  $80,5 \text{ kA}_{\text{pico}}$ , conforme ilustrado na Figura 21, enquanto que sua corrente limitada ( $i_{lim}$ ) ficou próxima de  $4,5 \text{ kA}_{\text{pico}}$ .

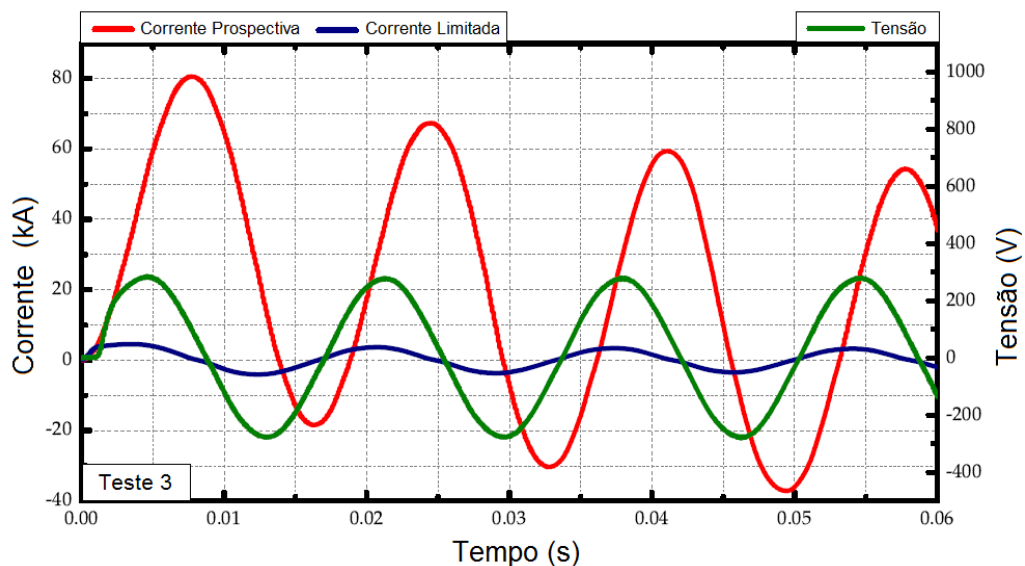


Figura 21: Valores mensurados de tensão e correntes prospectiva e limitada em teste. Adaptado de [12].

Com base no resultado demonstrado na figura anterior, é possível observar que o dispositivo conseguiu limitar a corrente de curto-circuito já no primeiro pico da corrente e, uma vez que este r-LCCS tem característica resistiva, minimizou o efeito assimétrico na forma de onda da corrente diminuindo a relação X/R. Além disso, após a transição do material para o estado normal (ou *quench*), a corrente entra em regime permanente, tendo seu valor limitado pela resistência *shunt*, responsável por conduzir a maior parte desta corrente de curto-circuito.

### 3.4. MODELO DE r-LCCS NO ATPDRAW

Com base nas equações citadas nas seções anteriores, que descrevem o comportamento elétrico e térmico do r-LCCS, é possível desenvolver um modelo computacional que simule a dinâmica de atuação do protótipo quando submetido a uma corrente de curto-circuito. O *software* utilizado para simulação foi ATP, através da interface gráfica ATPDraw, na qual permite a construção de circuitos elétricos por elementos já estabelecidos e disponibilizados via menu da biblioteca. Este programa é específico para análise de transitórios eletromagnéticos na área de sistemas de energia elétrica, com base no método de integração trapezoidal para solucionar as equações diferenciais dos sistemas simulados [89].

Além disso, o programa disponibiliza a modelagem de outros elementos por meio do sistema de controle MODELS, baseado em linguagem de programação. Este recurso possibilita a criação de algoritmos que descrevam o comportamento de um componente diante a determinados eventos do circuito. Com base nesta ferramenta, a modelagem do r-LCCS é descrita de acordo com a lógica apresentada no fluxograma da Figura 22. Este algoritmo controla a resistência equivalente variável do r-LCCS ( $R_{total}$ ) em função da corrente total que o atravessa, mensurada pela chave ( $Ch$ ), ambos representados no circuito equivalente da Figura 23 que é utilizado para simulação no ATPDraw.

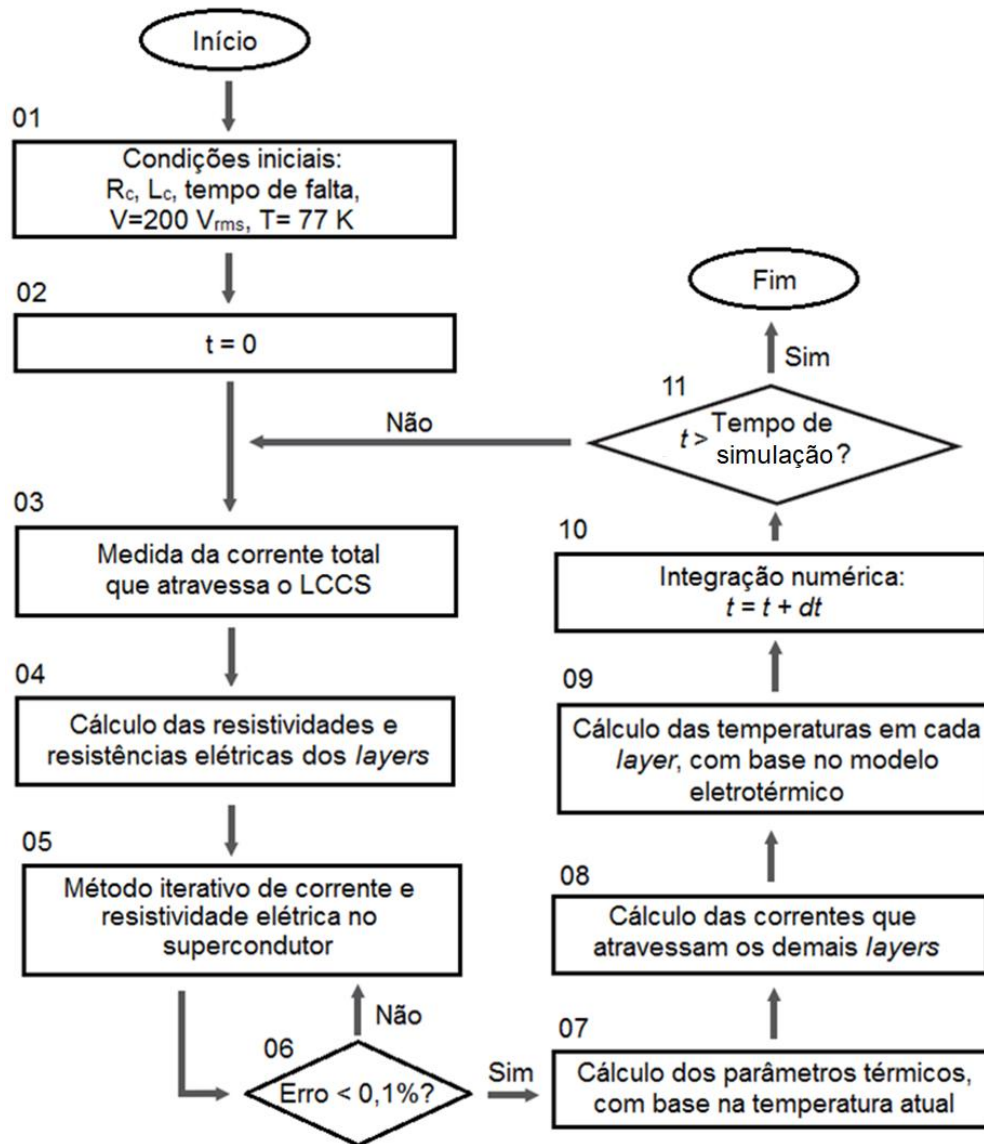


Figura 22: Fluxograma da rotina de simulação do r-LCCS desenvolvida no MODELS.

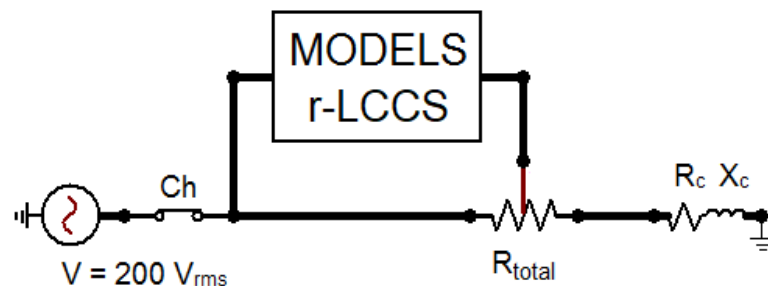


Figura 23: Circuito equivalente utilizado para simulação do r-LCCS no ATPDraw.

Considera-se que o r-LCCS esteja em equilíbrio com a temperatura do LN<sub>2</sub> a 77 K, e submetido uma tensão inicial ( $V$ ) de 200  $V_{rms}$  (passo "01"). No instante igual a zero ( $t=0$ ), uma corrente de curto-circuito com valor definido por  $R_c$  e  $X_c$  circulará através de  $R_{total}$  e  $Ch$  (passo "02"), conforme ilustradas na Figura 23, sendo esta última responsável por mensurar a corrente de falha (passo "03").

A partir dos dados de entrada (módulo das correntes de fase), a rotina programada no MODELS inicia o cálculo das resistividades e das resistências elétricas das camadas (passo "04"), com base na última temperatura atualizada (no caso inicial, 77 K). Com o valor da resistência equivalente do r-LCCS, determina-se a corrente que passa pela camada supercondutora, por meio de divisor de corrente. Devido a não linearidade da resistência do supercondutor, é necessário realizar um método iterativo para estabilizar numericamente os valores de corrente e resistividade da camada supercondutora, obtidos a cada passo (método de integração trapezoidal), conforme descrito na Figura 14 e indicado na Figura 22 (passo "05"). A etapa seguinte (passo "06") avalia a discrepância (ERRO) entre os módulos das correntes integralizadas a cada passo, de forma a não tornar as equações diferenciais aplicadas para o cálculo das temperaturas em equações rígidas. Caso o ERRO seja maior do que 0,1 %, o passo "5" se repete, corrigindo a diferença entre os módulos obtidos através de um fator de ajuste, até que o ERRO seja menor do que 0,1 % e a etapa seguinte possa ser executada [12].

A próxima etapa (passo "07") realiza os cálculos dos parâmetros térmicos em função da temperatura atual (calor específico, condutividade térmica e coeficiente de transferência de calor por convecção), assim como os elementos referentes à analogia eletrotérmica (resistências por condução e convecção, capacitâncias ligadas à capacidade térmica). Para determinação da geração interna de calor devido à passagem de corrente, realiza-se também o divisor de corrente para as demais camadas (passo "08"). Baseado no circuito eletrotérmico, atualizam-se as temperaturas, devido a passagem dessa corrente de curto-circuito em cada uma delas (passo "09").

Finalizada a rotina, o valor de  $R_{total}$  é atualizado e o programa segue para a próxima etapa ( $t=t+dt$ ), sendo o valor de passo ( $dt$ ) definido pelo usuário (passo "10"). Se  $t$  for menor que o tempo de curto-circuito, estipulado inicialmente pelo usuário no (passo "01"), a rotina se repete a partir do (passo "03") até alcançar o valor do tempo de simulação (passo "11"), finalizando a rotina. Para maiores detalhes, o código de programação do r-LCCS simulado neste trabalho se encontra no Apêndice 8.1, e a validação dos resultados obtidos são apresentados na seção 3.5.

### 3.5. CONVERGÊNCIA DO MODELO r-LCCS

Com base nos resultados experimentais citados na seção 3.3, na resistência equivalente e nas temperaturas das camadas do r-LCCS simuladas via MATLAB [12], as simulações realizadas neste trabalho através do programa ATP foram configuradas de acordo

com os seguintes parâmetros: tempo de curto-circuito de 60 ms; tensão de 200 V<sub>rms</sub>; corrente de curto-circuito de 30 kA<sub>rms</sub>;  $R_c$  de 0,52 mΩ; e  $X_c$  de 6,6 mΩ. As correntes prospectiva ( $i_{pro}$ ) e limitada ( $i_{lim}$ ) tiveram valores no primeiro pico assimétrico de 80,5 kA<sub>pico</sub> e 4,5 kA<sub>pico</sub>, respectivamente, conforme já ilustrado na Figura 21.

As formas de onda das correntes  $i_{pro}$  e  $i_{lim}$  obtidas em teste e nas simulações deste trabalho são apresentadas na Figura 24. Através do programa ATP, o primeiro pico assimétrico de  $i_{pro}$  e de  $i_{lim}$  foram iguais a 76,5 kA<sub>pico</sub> e 4,44 kA<sub>pico</sub>, exibindo uma diferença de 0,05 % e 0,013 %, respectivamente, em relação aos que foram obtidos em ensaio. Mesmo ao exibir pequenos desvios, causados por determinados elementos não considerados na simulação, o comportamento de  $i_{pro}$  e  $i_{lim}$  são semelhantes, sendo este último melhor visualizado na Figura 25, na qual mostra apenas as formas de onda de  $i_{lim}$ , em uma escala menor.

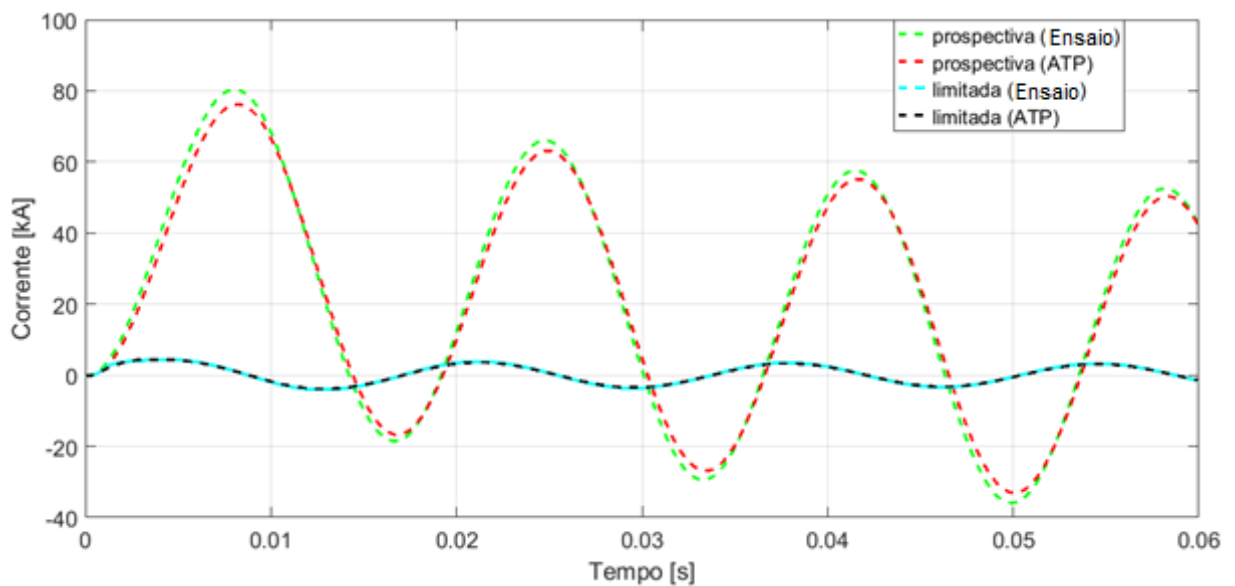


Figura 24: Correntes prospectiva e limitada, obtidas em ensaio e simulação no ATP.

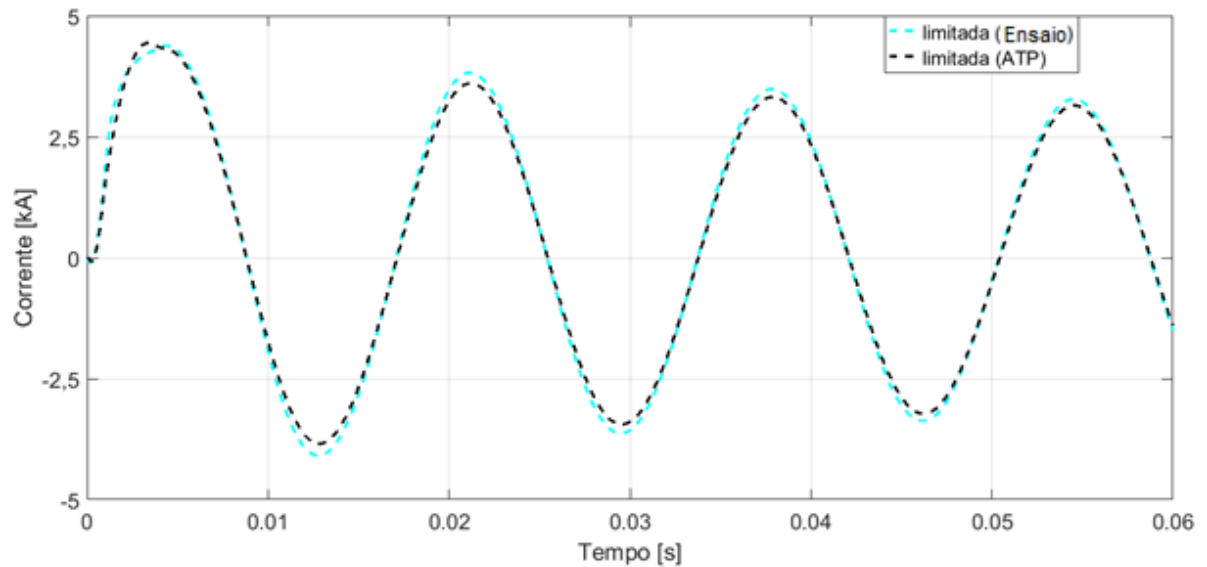


Figura 25: Corrente limitada em escala menor, obtidas em ensaio e simulação no ATP.

A Figura 26 compara a variação da resistência equivalente do r-LCCS na ocorrência do curto-circuito, simuladas no programa MATLAB e no ATP, sendo que a primeira alcançou um valor final de 129,5 m $\Omega$ , e a segunda de 128,0 m $\Omega$ . A diferença entre estes dois resultados encontrados nas simulações foi de 0,01 %. Apesar dos desvios visualizados entre as duas curvas, o modelo desmonstrou convergência satisfatória em relação a referência [12].

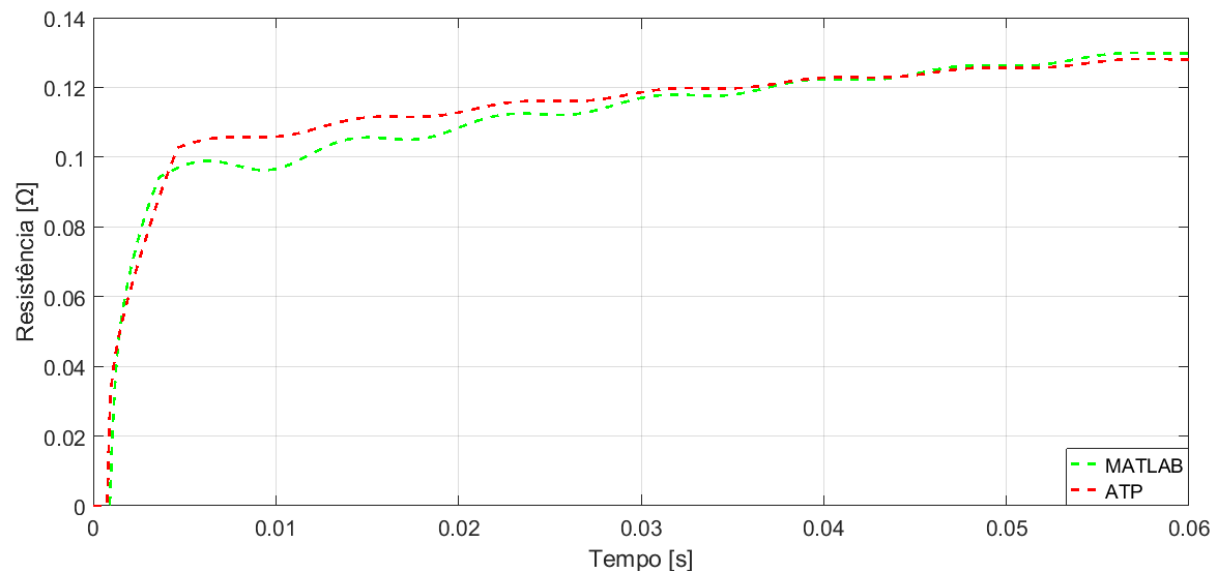
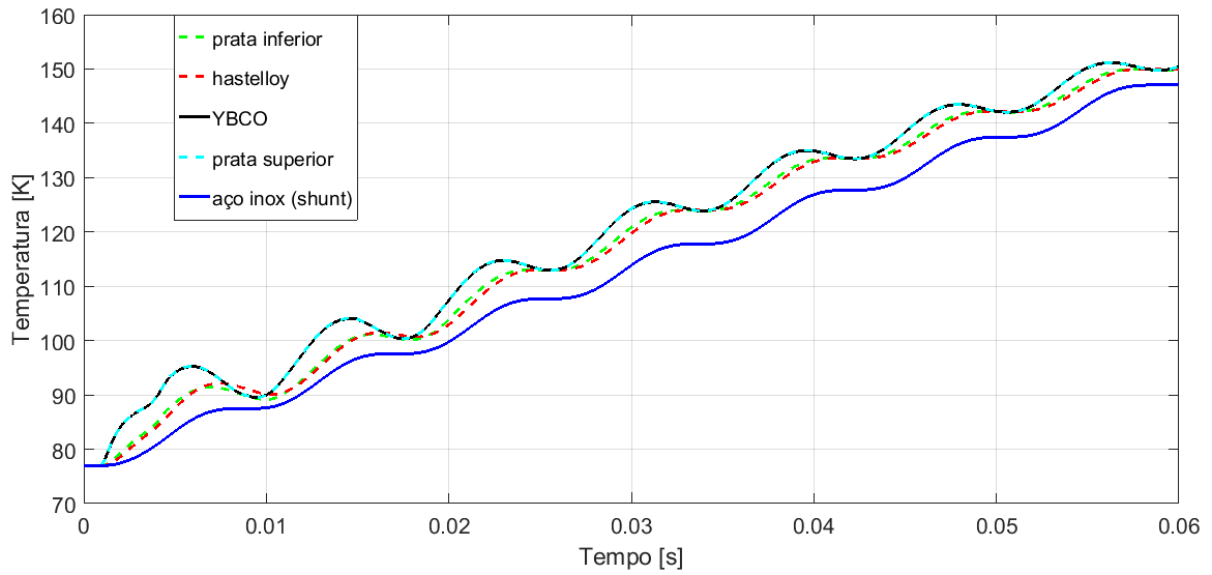
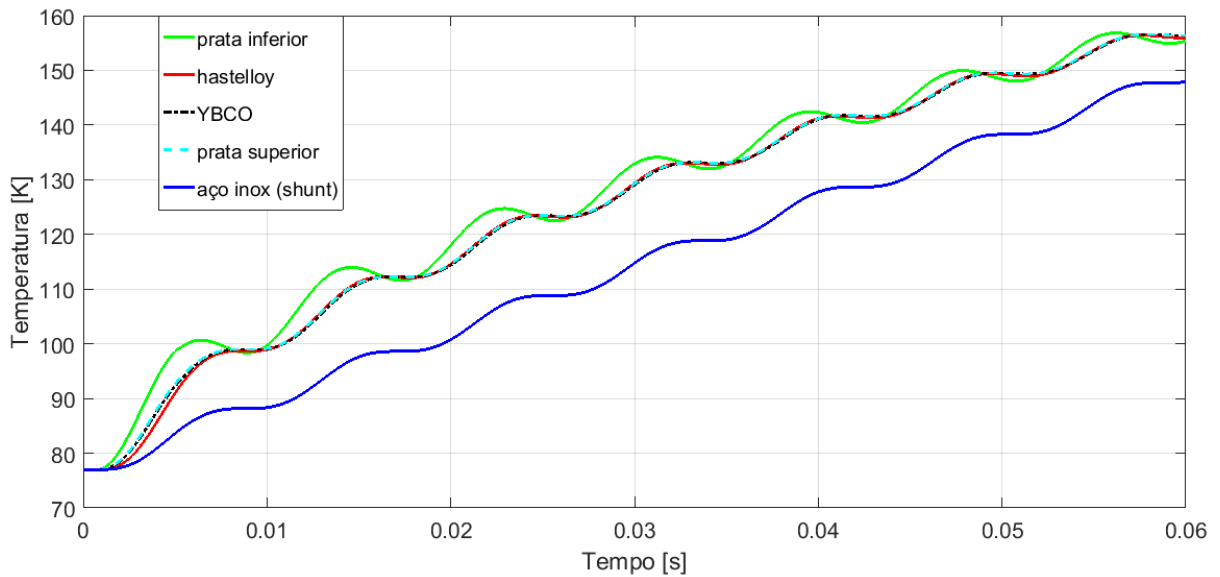


Figura 26: Variação da resistência equivalente do r-LCCS, obtidas via simulações MATLAB e ATP.

A Figura 27 exibe a variação de temperatura em cada camada, devido a passagem da corrente de curto-circuito pelas mesmas, entre as simulações via MATLAB e ATP. Ambos os casos apresentaram valores próximos de 148 K para a resistência *shunt* (aço inox) e na faixa de 155 K a 157 K para as demais camadas, apresentando comportamentos semelhantes entre ambas as simulações.



(a)



(b)

Figura 27: Variação da temperatura em cada camada, obtidas via simulações MATLAB (a) e ATP (b).

De acordo com os resultados encontrados, é possível afirmar que o modelo proposto apresenta comportamentos semelhantes aos exibidos por [12], em relação aos módulos e expressões gráficas. A comparação entre ambos os trabalhos mostra que o modelo pode ser aplicado para análise de transitórios, inserindo-o em circuitos elétricos que simulem casos de curtos-circuitos em sistemas de potência.

#### 4. MODELAGEM DA RD E DIMENSIONAMENTO DO r-LCCS

Para aplicação do modelo r-LCCS em sistemas de potência, foi considerado um circuito equivalente a uma RD, com base em dados reais fornecidos pela concessionária LIGHT S.A., a fim de dimensionar os principais componentes do LCC proposto neste trabalho, e avaliar seu desempenho na limitação de corrente de curto-circuito para sistemas de distribuição.

##### 4.1. DESCRIÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A RD simulada foi baseada no sistema indicado na Figura 28, composto por 3 subestações abaixadoras (SE): Eldorado, 138 kV para 25,6 kV; Capivari e São Lourenço, com a maior parte das tensões ajustadas de 25,6 kV para 13,8 kV. Este sistema com topologia radial apresenta no total 8 ramais (alimentadores) nas saídas das subestações, sendo dois clientes na SE Eldorado, 4 ramais na SE Capivari e 2 ramais na SE São Lourenço.

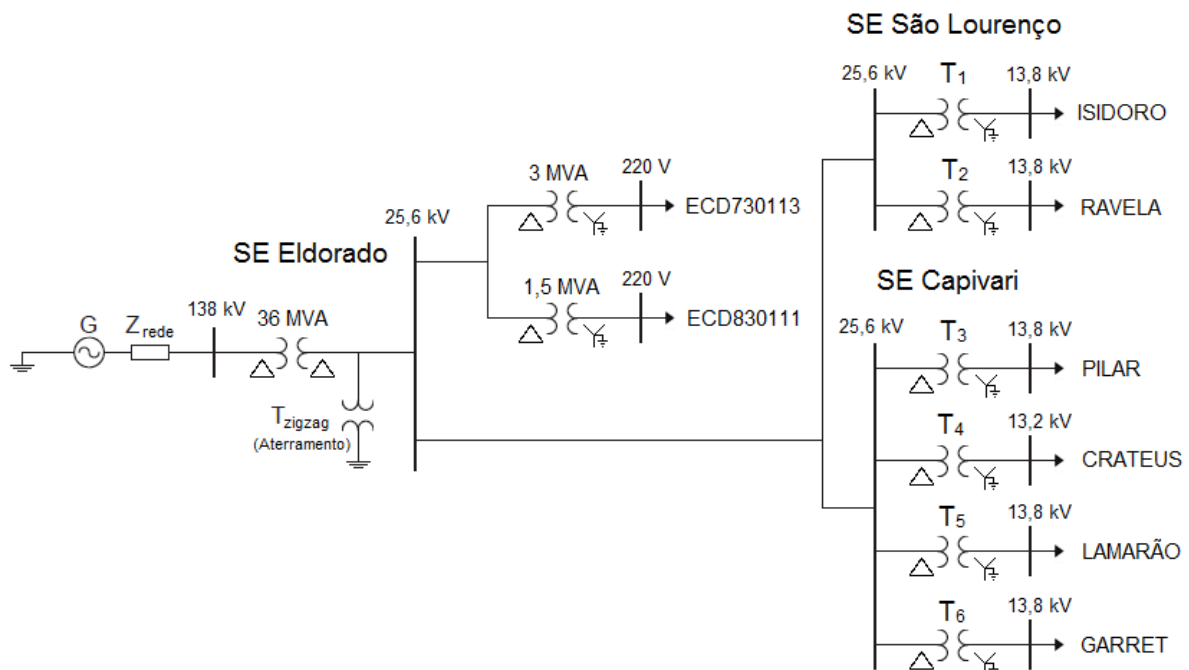


Figura 28: Diagrama unifilar da RD simulada.

No diagrama unifilar da Figura 28: (G) representa a fonte de tensão equivalente, conectada na barra de 138 kV; ( $Z_{rede}$ ) a impedância equivalente do sistema que define o nível de curto-circuito na entrada da SE Eldorado. Os valores de resistência nas sequências positiva, negativa e zero são, respectivamente, 0,94  $\Omega$ , 0,941  $\Omega$  e 3,62  $\Omega$ . Os valores de reatância indutiva nas sequências positiva, negativa e zero são, respectivamente, 6,99  $\Omega$ , 6,99  $\Omega$  e



19,32  $\Omega$ . A SE Eldorado é composta por três transformadores monofásicos de 12 MVA (Trafo<sub>a</sub>, Trafo<sub>b</sub> e Trafo<sub>c</sub>), totalizando uma potência de 36 MVA (Trafo<sub>SE1</sub>), 138 kV para 25,6 kV, ligação delta-delta, e um transformador de aterramento (Trafo<sub>zigzag</sub>), com uma potência de 7 MVA, 34,5 kV (relação de transformação 1:1) e uma impedância de sequência zero igual a 6,08  $\Omega$ , conectado no secundário dos transformadores monofásicos. As SEs Capivari e São Lourenço são compostas por transformadores trifásicos de 3 MVA (Trafo<sub>1</sub>, Trafo<sub>2</sub>, Trafo<sub>3</sub>, Trafo<sub>4</sub>, Trafo<sub>5</sub> e Trafo<sub>6</sub>), ligações delta-estrela aterrada, nos quais estão conectados ao secundário os ramais Isidoro, Ravena, Pilar, Crateus, Lamarão e Garret, com tensões ajustadas em 25,6 kV para 13,8 kV (com exceção de Trafo<sub>4</sub>, ajustado em 24,75 kV para 13,2 kV). Além disso, existem 2 transformadores de 3 MVA (Trafo<sub>x</sub>) e de 1,5 MVA (Trafo<sub>y</sub>), referentes aos clientes ECD730113 e ECD830111, nesta ordem.

Os transformadores da SE Capivari são aterrados através de um banco de resistores equivalente a 4,4  $\Omega$ , enquanto que os demais referentes a SE São Lourenço e os dois clientes ECD730113 e ECD830111 são aterrados sem aplicação de resistores. Os dados dos transformadores da RD modelada são apresentados na Tabela 09.

Tabela 09: Dados dos transformadores de potência da RD simulada.

Trafo	Potência [MVA]	Primário		Secundário		Impedância de Dispersão [%]	Impedância de Aterramento [ $\Omega$ ]	
		Ligação	Tensão [kV <sub>rms</sub> ]	Ligação	Tensão [kV <sub>rms</sub> ]			
Trafo <sub>SE1</sub>	Trafo <sub>a</sub>	12	Delta	138	Delta	25,6	9,29	6,08
	Trafo <sub>b</sub>	12	Delta	138	Delta	25,6	9,19	6,08
	Trafo <sub>c</sub>	12	Delta	138	Delta	25,6	9,21	6,08
Trafo <sub>x</sub>	3	Delta	25,6	Estrela aterrado	0,22	4,50	0	
Trafo <sub>y</sub>	1,5	Delta	25,6	Estrela aterrado	0,22	4,50	0	
Trafo <sub>1</sub>	3	Delta	25,6	Estrela aterrado	13,8	4,49	0	
Trafo <sub>2</sub>	3	Delta	25,6	Estrela aterrado	13,8	4,49	0	
Trafo <sub>3</sub>	3	Delta	25,6	Estrela aterrado	13,8	4,51	4,4	
Trafo <sub>4</sub>	3	Delta	24,75	Estrela aterrado	13,2	4,94	4,4	
Trafo <sub>5</sub>	3	Delta	25,6	Estrela aterrado	13,8	4,84	4,4	
Trafo <sub>6</sub>	3	Delta	25,6	Estrela aterrado	13,8	5,01	4,4	

Em relação às cargas conectadas nos 8 ramais, utilizou-se o modelo "impedância constante" do tipo concentrado e conexão em estrela aterrado, com base nos valores de demanda máxima de potência ativa mensurada em um período de um ano pela concessionária, e um fator de potência igual a 0,92 indutivo, conforme limite estabelecido no Módulo 8 do PRODIST [21].

A Tabela 10 resume os valores das resistências e reatâncias indutivas calculadas, que representam as impedâncias totais vista em cada saída dos 8 ramais identificados na rede e na saída da SE Eldorado. Os valores destas impedâncias são baseados nas tensões nominais em cada ponto, e nas correntes máximas ( $I_{max}$ ) informadas pela concessionária (200 A<sub>rms</sub> para os

ramais em 13,8 kV, e correntes nominais dos transformadores no lado secundário da SE Eldorado e dos dois clientes ECD730113 e ECD830111).

Tabela 10: Informações das cargas conectadas na RD simulada.

Local	Tensão [kV <sub>rms</sub> ]	I <sub>max</sub> [A <sub>rms</sub> ]	Resistência [Ω]	Reatância Indutiva [Ω]
SE Eldorado	25,6	812	16,75	7,13
Isidoro	13,8	200	36,65	15,61
Ravena	13,8	200	36,65	15,61
Pilar	13,8	200	36,65	15,61
Crateus	13,2	200	35,06	14,93
Lamarão	13,8	200	36,65	15,61
Garret	13,8	200	36,65	15,61
ECD730113	0,22	7873	0,01484	0,00632
ECD830111	0,22	3936	0,02969	0,01265

Os condutores utilizados nas linhas da RD simulada são descritos na Tabela 11, e o modelo utiliza informações a respeito da corrente máxima admissível ( $I_{adm}$ ), das resistências e reatâncias de sequência zero ( $R0$  e  $X0$ , respectivamente) e positiva ( $RI$  e  $XI$ , nesta ordem), e do comprimento total avaliado. Ao todo, são aproximadamente 16,5 km de cabos aplicados da entrada da SE Eldorado até a saída dos 8 alimentadores considerados, sendo que a ordem de aplicação dos tipos de cabos varia ao longo do circuito. Devido à distância das linhas serem menores do que 80 km, o modelo “Pi” com parâmetros concentrados foi aplicado para simulação [90].

Tabela 11: Dados dos cabos da RD simulada.

Tipo de Cabo	I <sub>adm</sub> [A <sub>rms</sub> ]	R0 [Ω/km]	X0 [Ω/km]	RI [Ω/km]	XI [Ω/km]	Comprimento [km]
A	113	2,194	0,517	1,369	0,107	0,189
B	510	0,334	1,033	0,165	0,282	5,694
C	663	0,283	1,843	0,119	0,386	6,082
D	505	0,329	1,885	0,165	0,384	0,058
E	538	0,393	0,975	0,165	0,269	4,480

Com base em todas as informações citadas, a modelagem da RD especificada foi realizada, através do programa ATP, que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos (como curtos-circuitos). Além disso, a interface gráfica ATPDraw permite a construção de circuitos elétricos por elementos já estabelecidos e disponibilizados via menu da biblioteca. Os dados de curtos-circuitos da RD, informados pela concessionária, foram utilizados para validação da modelagem.

#### 4.2. MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO NO ATPDRAW

Com a utilização do ATPDraw, foi possível realizar a modelagem da RD ilustrada na Figura 29, de acordo com os dados citados na seção anterior, a fim de aplicar o modelo r-LCCS proposto neste trabalho. A conexão entre a SE Eldorado (entre Barras 2 e 3 - SE1) e o sistema elétrico brasileiro é representado por três fontes ideais de tensão monofásica em CA,  $V_{fase a}$ ,  $V_{fase b}$  e  $V_{fase c}$ , ligadas à Barra 1 e em série com  $Z_{rede}$ , que define os níveis de curto-circuito trifásico assimétrico e em regime permanente (ainda sob curto, após o transitório) na entrada de SE1 (Barra 2) em  $26,6 \text{ kA}_{pico}$  e  $11,3 \text{ kA}_{rms}$ , respectivamente, conforme informado pela concessionária através de estudos de planejamento da rede e projeto do sistema de proteção.

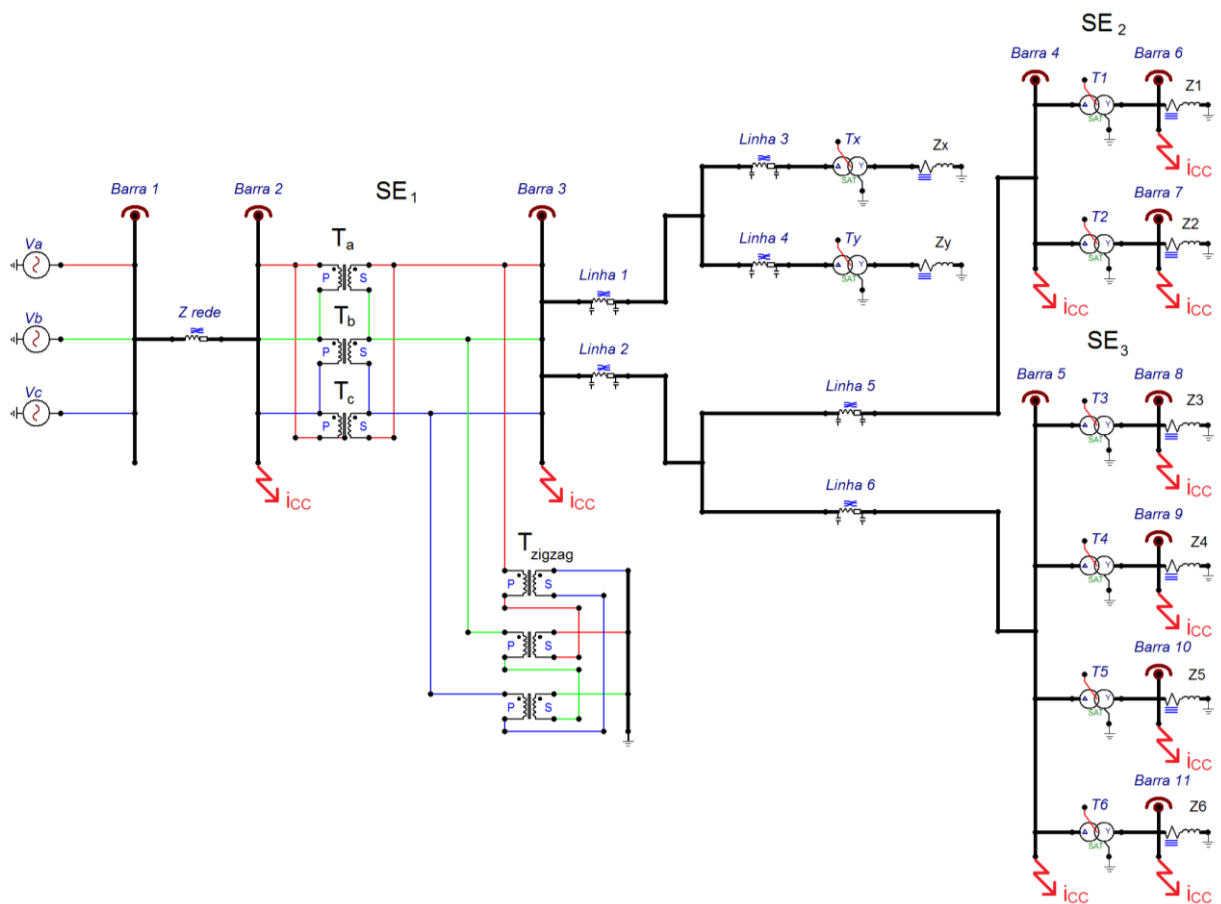


Figura 29: Circuito equivalente da RD, modelada via ATPDraw.

A SE<sub>1</sub> é composta pelos três transformadores monofásicos Trafo<sub>a</sub>, Trafo<sub>b</sub> e Trafo<sub>c</sub>, ligados em delta-delta, e um transformador de aterramento (Trafo<sub>zigzag</sub>) conectado à Barra 3 e também modelado através de três transformadores monofásicos, com uma impedância de  $6,08 \Omega$ . Os cabos de distribuição foram representados através dos equivalentes “Linhas” (de 1 a 6) apenas para ilustração do circuito equivalente do sistema simulado, sendo o modelo completo simulado com 273 barras apresentado no Apêndice 8.2 - Modelo do Sistema de

Distribuição no Programa ATPDraw - que inclui todos os cabos e chaves informados pela concessionária.

Os clientes ECD730113 e ECD830111 são representados pelas impedâncias  $Z_x$  e  $Z_y$ , assim como pelos transformadores  $Trafo_x$  e  $Trafo_y$ , respectivamente. As SEs São Lourenço ( $SE_2$ ) e Capivari ( $SE_3$ ), localizadas nas Barras 4 e 5, respectivamente, são simuladas através de seus alimentadores compostos por suas cargas ( $Z_1$  a  $Z_6$ ) e pelos transformadores ( $Trafo_1$  a  $Trafo_6$ ).

Para verificar se o modelo desenvolvido apresenta níveis de curto-circuito trifásicos semelhantes aos resultados simulados no ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) pela concessionária, foram simuladas falhas trifásicas nas dez barras indicadas em vermelho com "i<sub>cc</sub>" (correntes de curto-circuito) na Figura 29, localizados desde a entrada da SE Eldorado até a saída dos seis alimentadores das SEs São Lourenço e Capivari. A descrição dos eventos simulados no programa ATP é apresentada a seguir:

- De 0 a 0,03 s, o sistema se encontra na condição nominal (corrente e tensão dentro de limites considerados normais ao sistema);
- Em 0,03 s, ocorre o evento de curto-circuito no instante em que o ângulo da tensão na fase A é igual a 0 (condição em que o valor da componente contínua é próximo do máximo, considerando circuitos com fator de potência predominantemente indutivo). O intuito deste evento é simular a condição máxima de curto-circuito da rede, independentemente do tipo de falha (trifásica, monofásica, bifásica sem e com retorno à terra);
- Em 0,15 s, o sistema retorna para a condição nominal, simulando uma falha transitória com um tempo total de 120 ms (tempo máximo em que a fita 2G poderá ficar submetida a uma queda de tensão de 0,5 V/cm, durante o estado normal). Os objetivos deste tipo de evento são avaliar as tensões transitórias que podem surgir devido sua ocorrência, e a atuação dos controladores dos LCCs em identificar/distinguir corretamente condições nominais e de curto-circuito;
- Em 0,18 s a simulação é encerrada.

O resumo dos valores das correntes obtidas para falhas trifásicas é apresentado na Tabela 12, levando-se em consideração seus valores de primeiro pico assimétrico ( $I_{assim}$ ) e eficaz em regime permanente ( $I_{regim}$ ) na fase A, conforme as descrições dos eventos citados anteriormente. Também foram simulados curtos-circuitos bifásicos (fases A e B com e sem

retorno à terra) e monofásicos (fase A), conforme indicados nas Tabelas 13, 14 e 15, respectivamente, sob as mesmas considerações feitas para as falhas trifásicas.

Tabela 12: Valores das correntes de curto-circuito trifásico.

Barra	Local de Curto-Circuito	Tensão [kV]	$I_{assim}$ [kA <sub>pico</sub> ]	$I_{regim}$ [kA <sub>rms</sub> ]		
				Simulado	Referência	Desvio [%]
2	Entrada da SE Eldorado	138	26,58	11,29	11,30	0,09
3	Saída da SE Eldorado	25,6	24,82	9,0	8,74	2,97
4	Entrada da SE São Lourenço	25,6	12,96	5,96	5,86	1,71
5	Entrada da SE Capivari	25,6	17,01	7,22	7,08	1,98
6	Saída do ramal Isidoro	13,8	5,43	2,06	2,23	7,62
7	Saída do ramal Ravena	13,8	5,42	2,06	2,23	7,62
8	Saída do ramal Pilar	13,8	5,61	2,25	2,30	2,17
9	Saída do ramal Crateus	13,2	5,57	2,23	2,23	0
10	Saída do ramal Lamarão	13,8	5,32	2,13	2,17	1,84
11	Saída do ramal Garret	13,8	5,19	2,07	2,11	1,90

Tabela 13: Valores das correntes de curto-circuito bifásico com retorno à terra.

Barra	Local de Curto-Circuito	Tensão [kV]	$I_{assim}$ [kA <sub>pico</sub> ]	$I_{regim}$ [kA <sub>rms</sub> ]		
				Simulado	Referência	Desvio [%]
2	Entrada da SE Eldorado	138	22,74	9,99	10,35	3,48
3	Saída da SE Eldorado	25,6	20,84	8,45	8,16	3,55
4	Entrada da SE São Lourenço	25,6	11,27	5,67	5,56	1,98
5	Entrada da SE Capivari	25,6	14,58	6,81	6,68	1,95
6	Saída do ramal Isidoro	13,8	5,61	2160	2350	8,09
7	Saída do ramal Ravena	13,8	5,6	2,16	2,35	8,09
8	Saída do ramal Pilar	13,8	5,12	2,35	2,4	2,08
9	Saída do ramal Crateus	13,2	5,08	2,33	2,32	0,43
10	Saída do ramal Lamarão	13,8	4,87	2,24	2,28	1,75
11	Saída do ramal Garret	13,8	4,77	2,18	2,22	1,80

Tabela 14: Valores das correntes de curto-circuito bifásico sem retorno à terra.

Barra	Local de Curto-Circuito	Tensão [kV]	$I_{assim}$ [kA <sub>pico</sub> ]	$I_{regim}$ [kA <sub>rms</sub> ]
2	Entrada da SE Eldorado	138	21,70	9,79
3	Saída da SE Eldorado	25,6	20,0	7,86
4	Entrada da SE São Lourenço	25,6	10,59	5,17
5	Entrada da SE Capivari	25,6	13,82	6,26
6	Saída do ramal Isidoro	13,8	4,45	1,80
7	Saída do ramal Ravena	13,8	4,44	1,80
8	Saída do ramal Pilar	13,8	4,58	1,97
9	Saída do ramal Crateus	13,2	4,55	1,95
10	Saída do ramal Lamarão	13,8	4,35	1,86
11	Saída do ramal Garret	13,8	4,25	1,81

Tabela 15: Valores das correntes de curto-circuito monofásico.

Barra	Local de Curto-Circuito	Tensão [kV]	$I_{assim}$ [kA <sub>pico</sub> ]	$I_{regim}$ [kA <sub>rms</sub> ]		
				Simulado	Referência	Desvio [%]
2	Entrada da SE Eldorado	138	16,1	7,08	7,08	0
3	Saída da SE Eldorado	25,6	3,57	2,52	2,34	7,69
4	Entrada da SE São Lourenço	25,6	2,9	2,04	1,98	3,03
5	Entrada da SE Capivari	25,6	3,14	2,22	2,15	3,26
6	Saída do ramal Isidoro	13,8	5,87	2,2	2,39	7,95
7	Saída do ramal Ravena	13,8	5,86	2,19	2,39	8,37
8	Saída do ramal Pilar	13,8	2,11	1,44	1,44	0
9	Saída do ramal Crateus	13,2	2,1	1,43	1,39	2,88
10	Saída do ramal Lamarão	13,8	2,08	1,41	1,41	0
11	Saída do ramal Garret	13,8	2,06	1,39	1,39	0

Com base nos valores obtidos de  $I_{regim}$  nas Tabelas 12, 13 e 15, é possível constatar que o maior desvio obtido foi de 8,37 % em relação ao valor de referência de curto-circuito monofásico, no secundário de Trafo<sub>2</sub> (ramal Ravena). Este e os demais desvios encontrados são causados devido uma diferença entre os valores das impedâncias equivalentes de curto-circuito, consideradas durante a modelagem da RD nos programas ATPDraw e ANAFAS, sendo este último elaborado pela concessionária.

As diferenças nos resultados obtidos no ATPDraw e no ANAFAS podem ser reduzidas a partir de uma triagem das diferenças entre os dados de entrada utilizados em ambos os programas. Porém, os resultados obtidos atendem aos objetivos do projeto e permitem que sejam determinadas as ordens de grandeza da tensão,  $I_{max}$  (corrente máxima para o que o LCC não atue) e da corrente de curto-circuito (assimétrica e em regime permanente) para dimensionamento do r-LCCS, conforme especificado na seção a seguir.

#### 4.3. PROJETO BÁSICO DO r-LCCS PARA RD MODELADA

##### 4.3.1. Análise da RD Simulada

Ao analisar a topologia da rede de distribuição simulada, é possível identificar nove pontos potenciais para aplicação de LCC, conforme indicado em vermelho na Figura 30. Para o estudo inicial do projeto básico do r-LCCS, as primeiras condicionais utilizadas são fundamentadas nas tensões e correntes em cada ponto selecionado, com base nos valores obtidos via simulação na seção 4.2. A topologia de LCC desenvolvida neste projeto é baseada na instalação de um circuito limitador por fase, conforme destacado na Figura 30, totalizando 3 elementos por circuito no sistema.

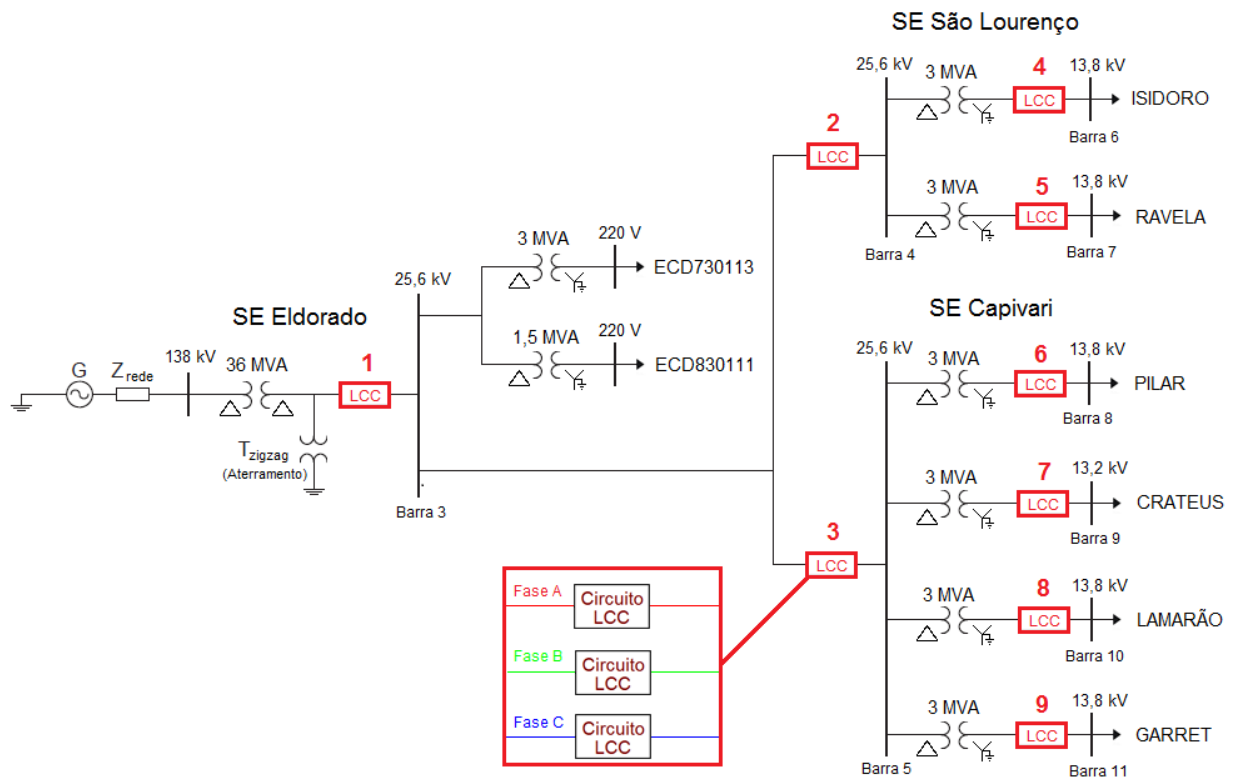


Figura 30: Identificação dos nove potenciais pontos de instalação de LCC na rede.

A Tabela 16 sumariza os valores de tensão,  $I_{max}$  e de curto-circuito trifásico (maior nível de correntes assimétrica e em regime permanente obtidos) em cada ponto de instalação. Estes resultados são utilizados no dimensionamento e especificação dos principais componentes do r-LCCS: elemento *shunt*; e fitas 2G.

Tabela 16: Parâmetros para dimensionamento e especificação do r-LCCS.

Ponto	Local de Instalação	Barra*	Tensão [kV]		$I_{max}$ [Arms]	$I_{assim}$ [kA <sub>pico</sub> ]	$I_{regim}$ [kA <sub>rms</sub> ]
			Linha	Fase			
1	A jusante do secundário do transformador da SE Eldorado.	3	25,6	14,78	812	24,82	9,0
2	A montante dos transformadores da SE São Lourenço.	4	25,6	14,78	200	12,96	5,96
3	A montante dos transformadores da SE Capivari.	5	25,6	14,78	200	17,01	7,22
4	A jusante do secundário do transformador do ramal Isidoro.	6	13,8	7,96	200	5,43	2,06
5	A jusante do secundário do transformador do ramal Ravena.	7	13,8	7,96	200	5,42	2,06
6	A jusante do secundário do transformador do ramal Pilar.	8	13,8	7,96	200	5,61	2,25
7	A jusante do secundário do transformador do ramal Crateus.	9	13,2	7,62	200	5,57	2,23
8	A jusante do secundário do transformador do ramal Lamarão.	10	13,8	7,96	200	5,32	2,13
9	A jusante do secundário do transformador do ramal Garret.	11	13,8	7,96	200	5,19	2,07

\*A jusante do LCC

Com base nos valores de tensão e nos níveis de  $I_{assim}$  e  $I_{regim}$  obtidos, pode-se dividir os modelos de r-LCCS em dois grupos (X e Y) para dimensionamento dos componentes, a fim de projetar duas classes de limitadores que atenderiam aos nove pontos selecionados da rede, conforme exposto na Tabela 17.

Tabela 17: Classificação dos modelos de r-LCCS.

Classe	Tensão [kV]		$I_{max}$ [A <sub>rms</sub> ]	$I_{assim}$ [kA <sub>pico</sub> ]	$I_{regim}$ [kA <sub>rms</sub> ]
	Linha	Fase			
X	25,6	14,78	1000	25	10
Y	13,8	7,96	200	10	3

#### 4.3.2. Dimensionamento do Elemento *Shunt*

No projeto ENSYSTROB [10], [11], o elemento *shunt* foi construído através de fitas de aço inox em paralelo com o arranjo de fitas 2G, ilustrado na Figura 11. Assim como as fitas supercondutoras, as fitas de aço inox também apresentam um tempo limite de condução de corrente entre 100 a 120 ms, durante o evento de curto-circuito, para que não ocorra a degradação das mesmas causadas pelo aumento da temperatura. Portanto, para que este tempo seja ultrapassado, em casos de aplicação em RD que possua religadores automáticos com ajuste de temporização maior do que 100 ms, optou-se neste trabalho por utilizar elemento *shunt* baseado em reatores a núcleo de ar.

Os reatores a núcleo de ar são constituídos por enrolamentos de cobre ou alumínio, montados em suportes isolantes para formação de bobinas, conforme exemplificado na Figura 31. Sua aplicação abrange sistemas de alta, média e baixa tensão, e tem como principal objetivo limitar o rápido aumento de correntes, como no caso de curtos-circuitos, protegendo os equipamentos instalados na rede (seccionadores, religadores automáticos, disjuntores, transformadores, dentre outros).



Figura 31: Reator a núcleo de ar, empresa COSMO. Adaptado de [91].



A principal razão de se utilizar reatores com núcleo de ar na aplicação de LCC, ao invés de um núcleo feito de material ferromagnético, consiste em evitar a saturação do núcleo durante o curto-circuito e a consequente variação do valor indutância. Neste projeto, foram dimensionados reatores de núcleo de ar com base nos valores descritos na Tabela 17 para as classes X e Y, em relação às correntes de curto-circuito em regime permanente ( $I_{regim}$ ), de forma a reduzi-las em 80% ( $0,2 \times I_{regim}$ ). Os cálculos para obtenção dos valores da reatância indutiva de cada reator ( $X_L$ ), assim como suas indutâncias ( $L$ ), são descritos nas equações (45) e (46), respectivamente [92]:

$$X_L = \frac{U_n \cdot k}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{i_{lim}} - \frac{1}{i_{pro}} \right) \quad (45)$$

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (46)$$

nas quais  $U_n$  é a tensão de linha em que o reator é conectado,  $k$  é o fator de sobretensão (1,05 de acordo com o ANSI C 57,16 [93]),  $i_{lim}$  é a corrente de curto-circuito depois da inserção do reator (corrente limitada),  $i_{pro}$  é a corrente de curto-circuito antes da inserção do reator (corrente prospectiva), e  $f$  é a frequência da rede (60 Hz). A Tabela 18 resume os valores de  $X_L$ , assim como os valores das indutâncias  $L$ , dimensionados para as duas classes de r-LCCS (X e Y) propostas.

Tabela 18: Parâmetros dos reatores dimensionados para duas classes de r-LCCS.

Classe	$U_n$ [kV]	$i_{pro}$ [kA <sub>rms</sub> ]	$i_{lim}$ [kA <sub>rms</sub> ] ( $0,2 \times i_{pro}$ )	$X_L$ [ $\Omega$ ]	$L$ [mH]
X	25,6	10	2	6,21	16,47
Y	13,8	3	0,6	11,15	29,59

A aplicação do reator na topologia do r-LCCS não apresenta perdas consideráveis causadas pela queda de tensão, como é observado na instalação convencional de reatores em série com a rede, tal como é feito atualmente. O modelo proposto possui uma impedância praticamente nula em operação normal, e em condição de curto-circuito, sua impedância aumenta e desvia/limita a corrente através do reator, causando queda de tensão apenas durante tal evento.

### 4.3.3. Dimensionamento da Fita 2G

Conforme já especificado na seção 3, para a modelagem do r-LCCS foi utilizada a fita supercondutora 2G HTS da SuperPower, modelo SF12100, já apresentada na Figura 10, composta por 4 camadas consideradas: o supercondutor YBCO; o substrato de *Hastelloy*; e as camadas de prata superior e inferior.

A determinação do comprimento total de fita 2G é baseada em [10], que considera uma queda de tensão máxima de  $0,5 V_{rms}/cm$  durante limitação da corrente de curto-circuito (quando o material supercondutor se encontra no estado normal), em um tempo máximo de 120 ms. De acordo com a Tabela 17, as tensões de fase das classes X e Y são 14,78 kV (tensão de linha de 25,6 kV) e 7,96 kV (tensão de linha de 13,8 kV), respectivamente. Portanto, os comprimentos mínimos de fitas 2G ( $d$ ) para os dois níveis de tensão são iguais a:

$$d_{25,6\text{ kV}} = (14,78 \times 10^3)/0,5 = 295,603 \text{ m}$$

$$d_{13,8\text{ kV}} = (7,96 \times 10^3)/0,5 = 159,349 \text{ m}$$

Para que o r-LCCS não atue de forma equivocada durante a passagem de correntes consideradas normais pelo sistema, é necessário construir um arranjo de fitas 2G em paralelo, com base na  $I_c$  informada pelo fabricante. Uma vez que os valores de  $I_c$  são determinados através de ensaios em CC, deve-se considerar o valor de pico de  $I_{max}$  para sistemas em CA, quantificando-se o número de fitas em paralelo ( $n^{\circ}_{fitas}$ ) necessário para que o r-LCCS não atue, conforme descrito em (47):

$$n^{\circ}_{fitas} \cong \frac{I_{max}[A_{rms}]}{I_c} \sqrt{2} \quad (47)$$

A Tabela 19 apresenta a quantidade de fitas em paralelo para cada classe, com base nos valores de  $I_{max}$  [ $A_{pico}$ ] sumarizados na Tabela 17 e para uma  $I_c$  igual a 275 A, além dos reatores de núcleo de ar (elementos *shunts*) especificados na Tabela 18, e os comprimentos mínimo para cada fase ( $d$ ) e totais para as 3 fases ( $d_{TOTAL}$ ).

Tabela 19: Quantitativo de fitas 2G para dimensionamento dos r-LCCS.

Classe	Tensão de Fase [kV]	$I_{max}$		$n^{\circ}_{fitas}$	$d$ [m]	$d_{TOTAL}$ [m] (nas 3 fases)	Elemento <i>Shunt</i> [ $\Omega$ ] (Reator de Núcleo de Ar)
		[ $A_{rms}$ ]	[ $A_{pico}$ ]				
X	14,78	1000	1414,2	5	300	4500	6,21
Y	7,96	200	282,8	1	160	480	11,15

A fita 2G especificada ( $R_{fita}$ ) ficará submersa em um meio refrigerante ( $LN_2$ ) através de um sistema criogênico, mostrado na Figura 32, sendo conectada em paralelo com o reator

(bobina convencional). O conjunto  $R_{fita}$  e reator são conectados em série com o sistema a ser protegido (linha).

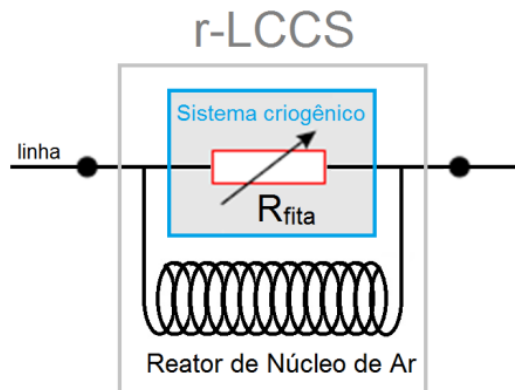


Figura 32: Circuito equivalente do r-LCCS.

O reator somente limitará corrente quando o material supercondutor transitar para o estado normal (evento de curto-circuito). Durante a condição normal do sistema, a fita supercondutora estará em estado supercondutor (com resistividade virtualmente nula), sendo responsável por conduzir praticamente toda a corrente da rede, sem que ocorra queda de tensão (perdas) no reator em paralelo.

## 5. RESULTADOS

Este t3pico apresenta os resultados das simula33es da rede da LIGHT, apresentada na Figura 34, utilizando o ATPDraw. Primeiramente, ser33 feita uma an33lise de curto-circuito sem a aplica33o de LCCs. Em seguida, ser33 apresentada uma nova an33lise considerando o uso de r-LCCS.

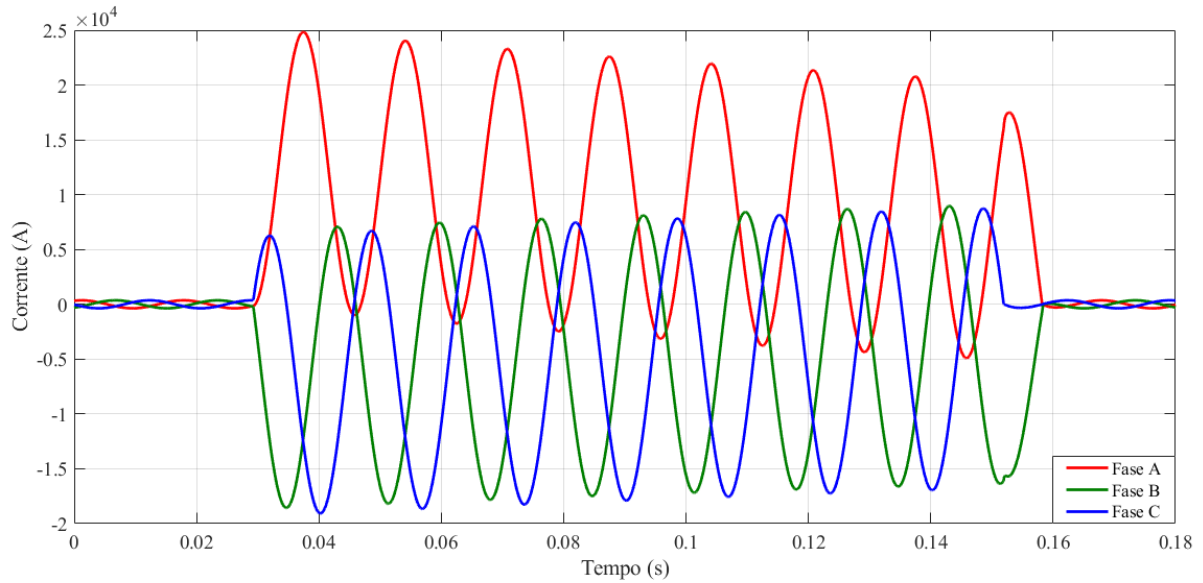
### 5.1. AN33LISE DE CURTO-CIRCUITO, SEM APLICA33O DE r-LCCS

Com base nos valores de correntes de curto-circuito trif33sico apresentados na Tabela 12, verificou-se que os locais com os maiores n33veis de correntes foram nas barras 3 e 8 da Figura 29, para as tens33es de 25,6 kV e 13,8 kV, respectivamente. Por isso, as an33lises dos resultados obtidos sem e com a aplica33o dos modelos de r-LCCS, ser33o realizadas referentes aos pontos 1 e 6 indicados na Figura 30, conforme os valores sumarizados na Tabela 20.

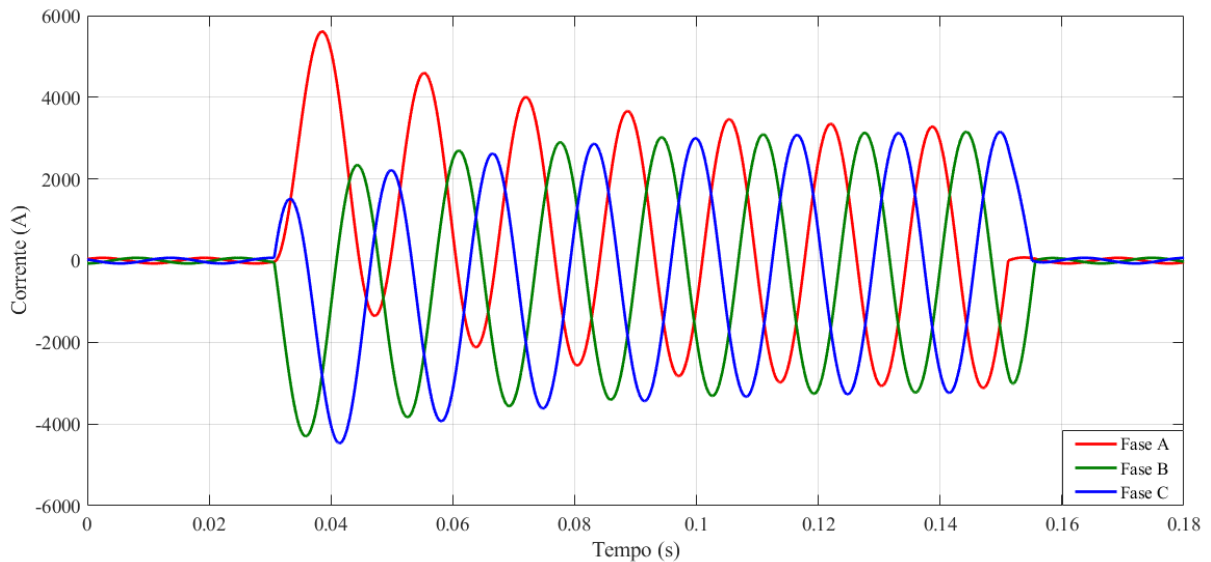
Tabela 20: Valores das correntes obtidas na fase A, sem aplica33o de r-LCCS (prospectivas).

<b>Local</b>	<b>Tens33o [kV<sub>rms</sub>]</b>	<b><math>I_{max}</math> [A<sub>rms</sub>]</b>	<b><math>I_{assim}</math> [kA<sub>pico</sub>]</b>	<b><math>I_{regim}</math> [kA<sub>rms</sub>]</b>
Ponto 1	25,6	1000	24,82	9,0
Ponto 6	13,8	200	5,61	2,24

A Figura 33 mostra o comportamento das correntes obtidas na simula33o para os pontos 1 (a) e 6 (b), de acordo com a descri33o realizada na se33o 4.2. De 0 a 0,03 s, o sistema est33 na condi33o nominal. Em 0,03 s ocorre o evento de curto-circuito trif33sico, com  $I_{assim}$  iguais a 24,82 kA<sub>pico</sub> e 5,61 kA<sub>pico</sub> e  $I_{regim}$  iguais a 9,0 kA<sub>rms</sub> e 2,24 kA<sub>rms</sub> para os pontos 1 e 6, respectivamente. Ap33s 0,15 s, o sistema volta a condi33o nominal (extin33o do curto-circuito), e a corrente retorna para valores nominais.



(a)



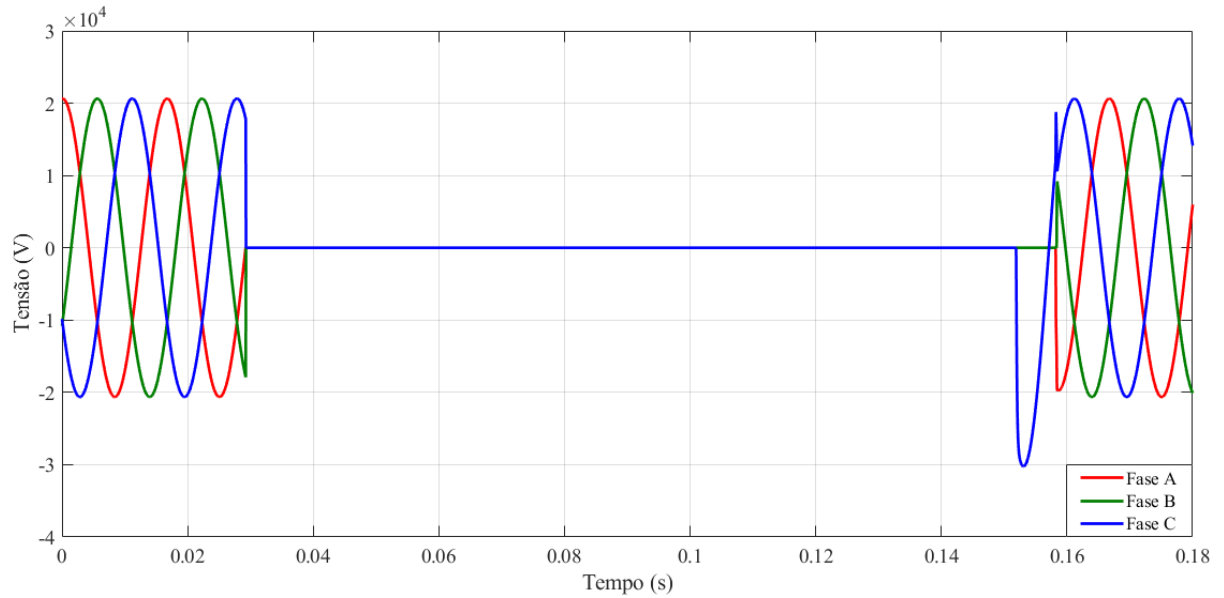
(b)

Figura 33: Forma de onda das correntes prospectivas nos pontos 1 (a) e 6 (b).

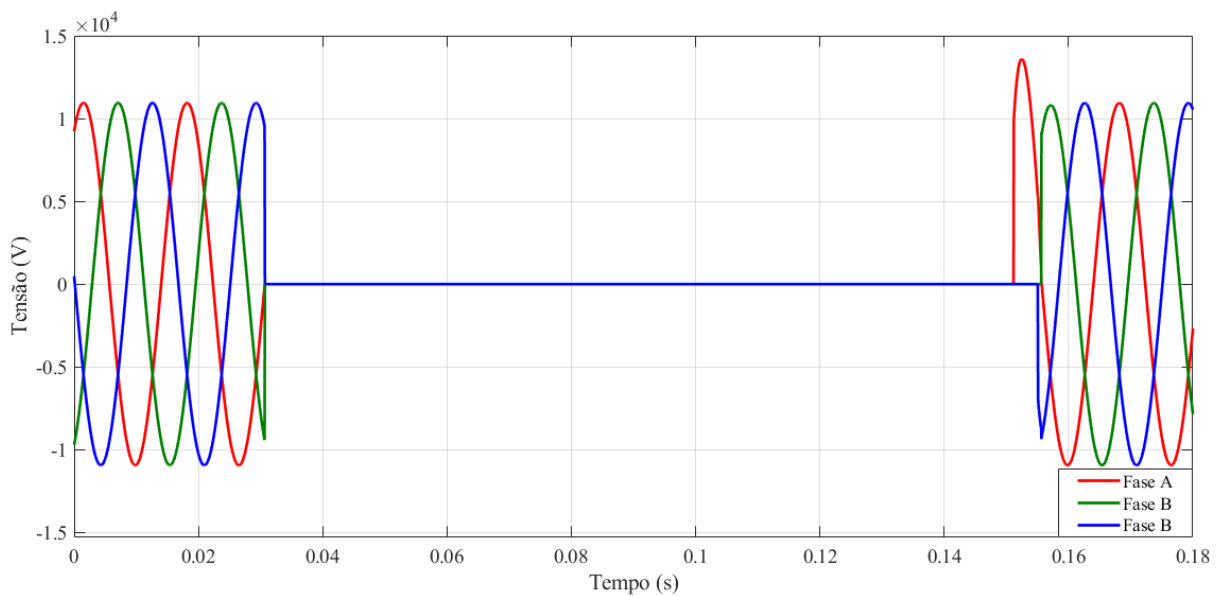
A comparação entre a corrente prospectiva e limitada na seção 5.2 teve como base apenas a fase A, por ter a maior corrente assimétrica (curto-circuito efetuado no instante em que o ângulo da tensão da fase é igual a zero). Além disso, são analisados os parâmetros referentes a temperatura e resistência equivalente da fita 2G dos r-LCCS.

A Figura 34 ilustra as formas de onda das tensões nos pontos 1 (a) e 6 (b), antes, durante e após o curto-circuito trifásico. Foi possível verificar que de 0 a 0,03 s as tensões estão em condição nominal (tensões de fase iguais a  $14,78 \text{ kV}_{\text{rms}}$  e  $7,96 \text{ kV}_{\text{rms}}$  para os pontos 1 e 6, respectivamente), e em 0,03 s as tensões vão a zero devido à falha trifásica. Após a extinção do curto-circuito em 0,15 s, ocorre o fenômeno de tensões de restabelecimento transitórias (TRT), na fase C ( $30,21 \text{ kV}_{\text{pico}}$ ) do ponto 1 e na fase A ( $13,42 \text{ kV}_{\text{pico}}$ ) do ponto 6,

voltando a condição nominal em menos de um ciclo (16,67 ms) até o final da simulação em 0,18 s.



(a)



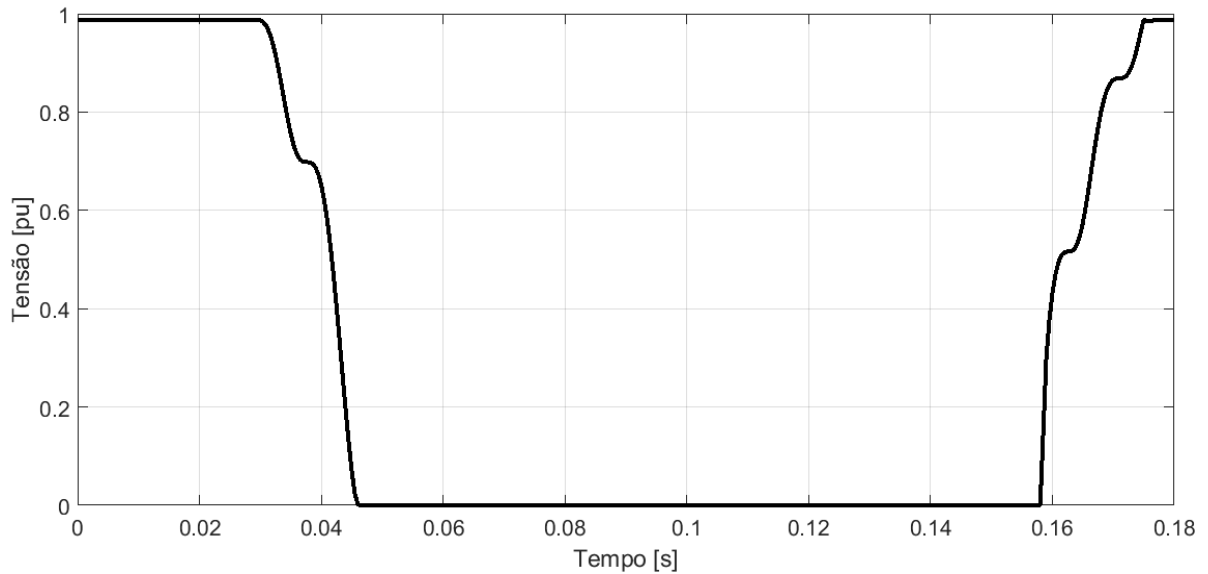
(b)

Figura 34: Formas de onda das tensões nos pontos 1 (a) e 6 (b).

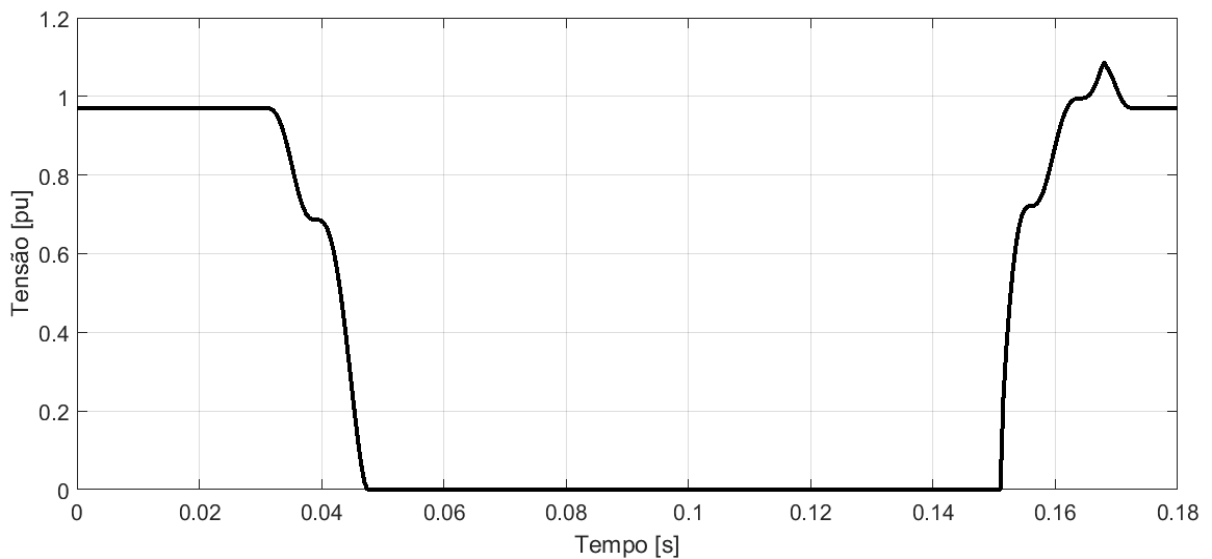
De acordo com a Tabela 21, adaptada do Módulo 8 do PRODIST [21], estas VTCDs entre 0,03 s e 0,15 s nos dois pontos são denominadas como “Interrupção Momentânea de Tensão”, uma vez que a amplitude da tensão em relação a nominal é igual a 0 (inferior a 0,1 pu), em um tempo próximo a 120 ms (inferior ou igual a três segundos), conforme pode ser visualizadas nas fases A destes dois pontos na Figura 35. Já as TRTs ocorridas após 0,15 s, mostradas na Figura 39, permaneceram em um tempo menor do que meio ciclo (8,33 ms), não sendo classificadas como VTCDs.

Tabela 21: Classificação das variações momentâneas de tensão. Adaptado de [92].

Denominação	Duração da variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu



(a)



(b)

Figura 35: VTCDs nas fases A dos pontos 1 (a) e 6 (b).

A Tabela 22 indica as regiões de sensibilidade (*Reg*) das diferentes cargas conectadas aos sistemas de distribuição, em média e/ou alta tensão, assim como seu fator de ponderação ( $f_{pond}$ ), baseados nas amplitudes de tensões e na duração de cada evento de VTCD. Além disso, os valores de fator de impacto base ( $FI_{base}$ ) também são expostos nesta mesma tabela.

Tabela 22: Região de sensibilidade, fatores de ponderação e de impacto base. Adaptado de [21].

Amplitude [pu]	Duração [s]							FI <sub>base</sub> [kV]	
	[0,0167-0,1]	(0,1 – 0,3]	(0,3 – 0,6]	(0,6 - 1]	(1 - 3]	(3 - 60]	(60 - 180]	[1,0 – 69]	(69 – 230]
> 1,15	Região H $f_{pond} = 0,02$			Região I $f_{pond} = 0,04$				2,13	1,42
(1,10 - 1,15]									
(0,85 - 0,90]	Região A $f_{pond} = 0,00$						Região G $f_{pond} = 0,07$		
(0,80 - 0,85]									
(0,70 - 0,80]	Região B $f_{pond} = 0,04$	Região D $f_{pond} = 0,15$		Região F $f_{pond} = 0,36$					
(0,60 - 0,70]									
(0,50 - 0,60]	Região C $f_{pond} = 0,07$								
(0,40 - 0,50]									
(0,30 - 0,40]	Região E $f_{pond} = 0,25$								
(0,20 - 0,30]									
(0,10 - 0,20]									
< 0,10									

Ao analisar os eventos de VTCDs nos dois pontos mostrados na Figura 40, ambos se encontram na “Região E”, com  $f_{pond}$  e  $FI_{base}$  iguais a 0,25 e 2,13, respectivamente. Tais fatores podem contribuir para o aumento do fator de impacto ( $FI$ ), que caracteriza a severidade da incidência de eventos de VTCD na RD, descrita em (48):

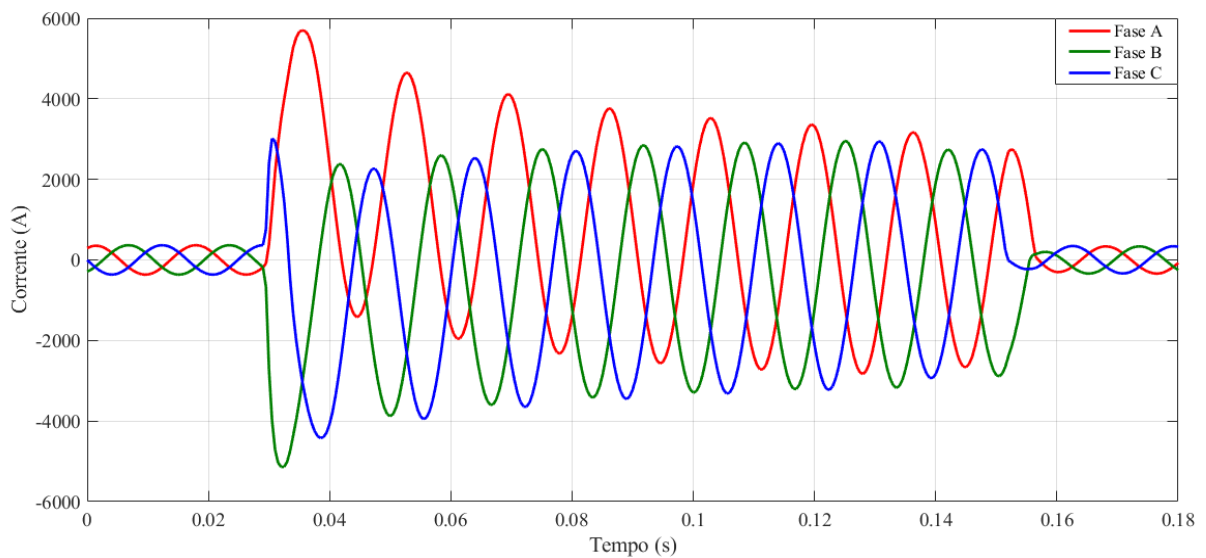
$$FI = \frac{\sum_{Reg=A}^I (f_{oReg} \times f_{pondReg})}{FI_{base}} \quad (48)$$

na qual  $f_{oReg}$  é a frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apurada por meio de medição apropriada em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade ( $Reg = A, B, C, D, E, F, G, H$  e  $I$ ), e  $f_{pondReg}$  é o fator de ponderação para cada  $Reg$ , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração. Todos estes indicadores descritos anteriormente são utilizados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), como classificadores da qualidade do produto fornecido pelas concessionárias. Um dos objetivos deste trabalho está em atenuar as VTCDs causadas por eventos de curto-circuito, com a inserção de r-LCCS no sistema modelado. Portanto, na seção 5.2 serão avaliados tais fenômenos sem e com a aplicação destes dispositivos na rede.

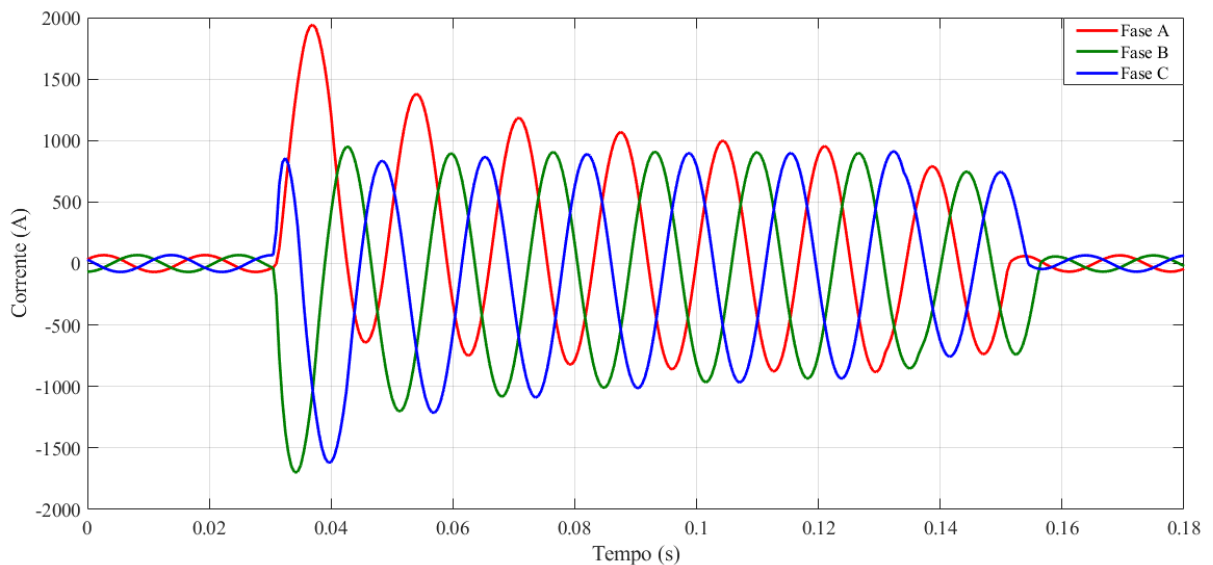


## 5.2. ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO, COM APLICAÇÃO DE r-LCCS

Foram simulados os mesmos eventos descritos na seção anterior, com as classes X e Y de r-LCCS (projetadas na seção 4.3), inseridas nos pontos 1 e 6, nesta ordem. A Figura 36 apresenta as correntes limitadas obtidas na simulação com a aplicação dos r-LCCS, inseridos nos pontos 1 (a) e 6 (b) da RD. É possível verificar que as correntes nas fases A, B e C tiveram valores máximos no primeiro pico de 5,69 kA<sub>pico</sub>, 5,13 kA<sub>pico</sub> e 4,42 kA<sub>pico</sub> no ponto 1, e 1,94 kA<sub>pico</sub>, 1,69 kA<sub>pico</sub> e 1,61 kA<sub>pico</sub> no ponto 6, respectivamente. As correntes em regime permanente nas três fases ficaram próximas de 2,0 kA<sub>rms</sub> no ponto 1 e 0,53 kA<sub>rms</sub> no ponto 6.



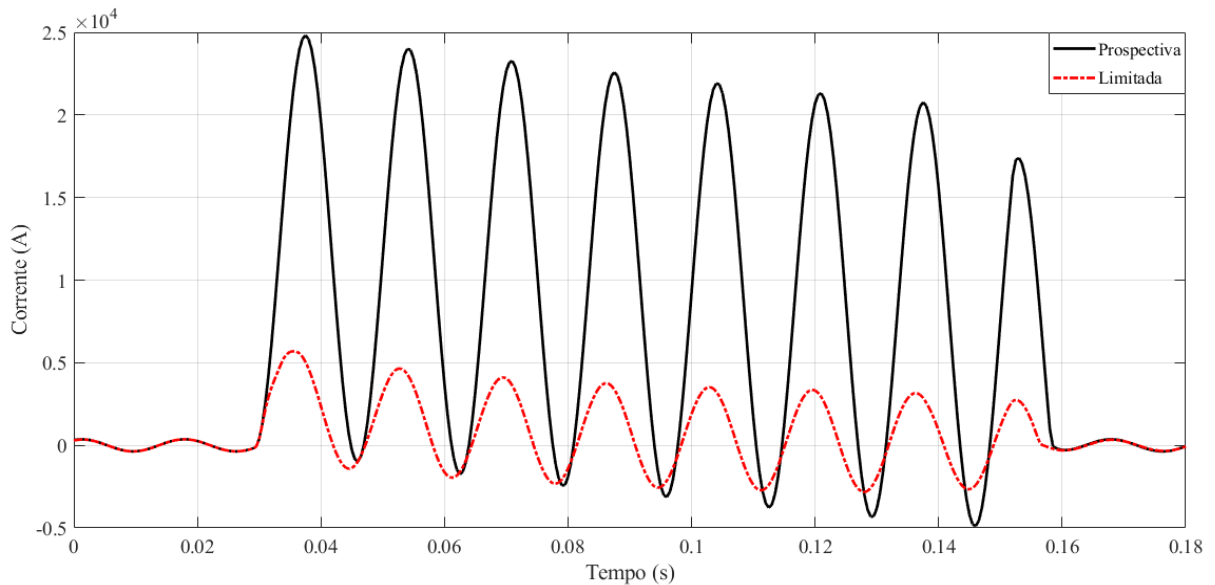
(a)



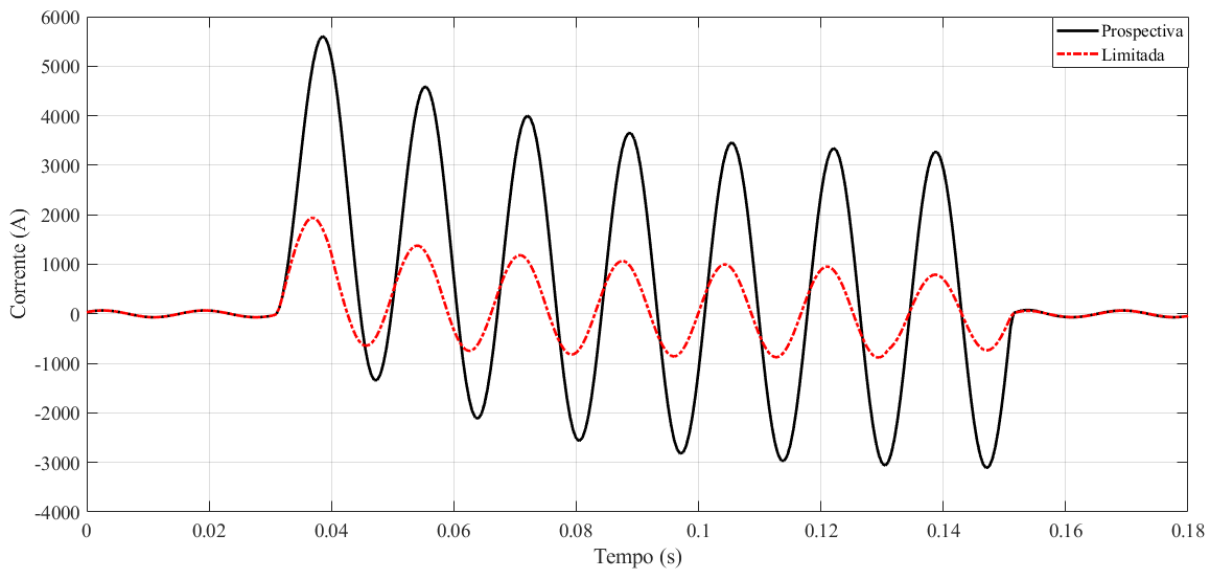
(b)

Figura 36: Forma de onda das correntes limitadas nos pontos 1 (a) e 6 (b).

Ao comparar as correntes de curto-circuito prospectiva e limitada na Figura 37, para as fases A nos pontos 1 (a) e 6 (b), verifica-se uma limitação já no primeiro pico da corrente assimétrica em 77,1 % e 65,4 % em relação as prospectivas de 24,86 kA<sub>pico</sub> e 5,61 kA<sub>pico</sub>, respectivamente. Em regime permanente, a corrente eficaz no ponto 1 foi reduzida em 77,8 % em relação à prospectiva de 9,0 kA<sub>rms</sub>, e no ponto 6 houve uma redução em 76,3 % em relação a prospectiva de 2,24 kA<sub>rms</sub>.



(a)

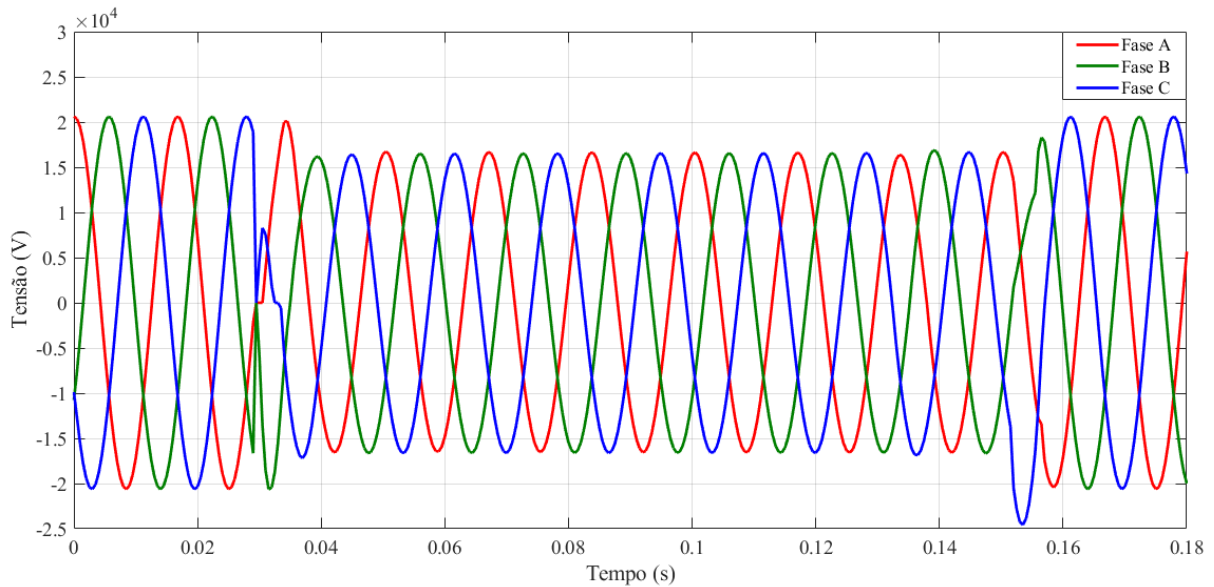


(b)

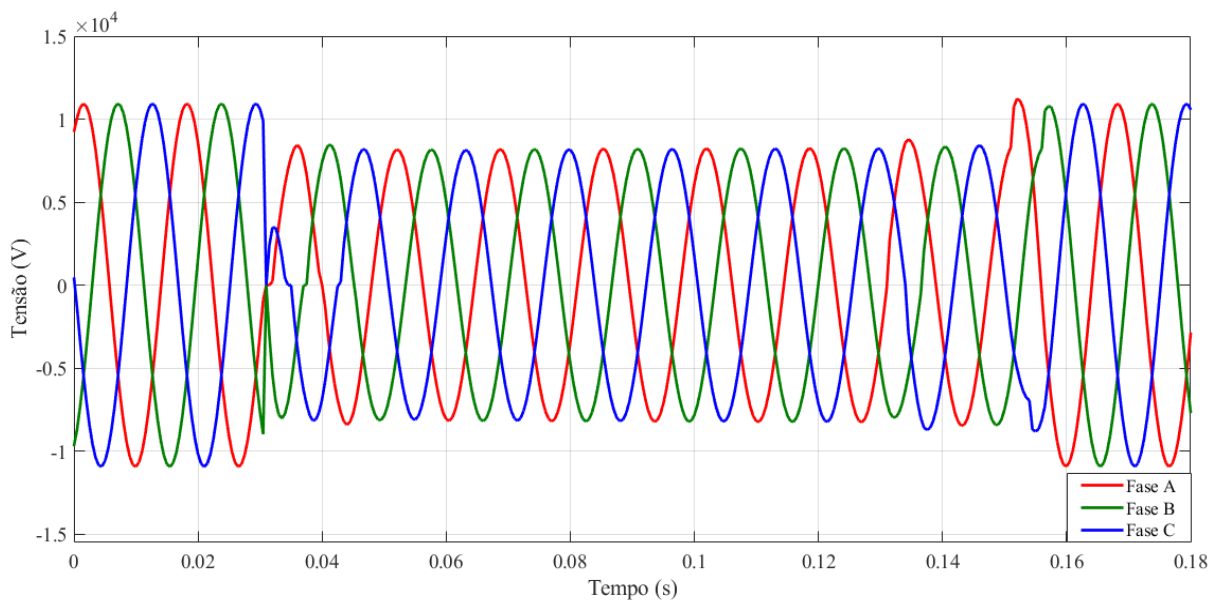
Figura 37: Correntes prospectiva e limitada na fase A dos pontos 1 (a) e 6 (b).

A Figura 38 mostra as formas de onda das tensões nas fases A, B e C nos pontos 1 (a) e 6 (b), antes, durante e após a falha trifásica, com a aplicação dos r-LCCS. De acordo com os resultados, verificou-se que no instante em que ocorre o curto-circuito (0,03 s), houve afundamentos e/ou deformações na forma de onda das tensões, em pelo menos uma das fases,

durante menos de meio ciclo, nos dois casos analisados. Também foi observado fenômenos de TRT após a extinção do curto-circuito em 0,15 s, na fase C do ponto 1 e na fase A (em menor magnitude) do ponto 6, em ambos os casos, em um tempo menor que meio ciclo. Apesar destes distúrbios identificados, de acordo com a classificação do PRODIST indicada na Tabela 21, estes fenômenos não são classificados como VTCDs, devido suas durações menores do que um ciclo (16,67 ms), o que não compromete a avaliação da qualidade de fornecimento de energia.



(a)

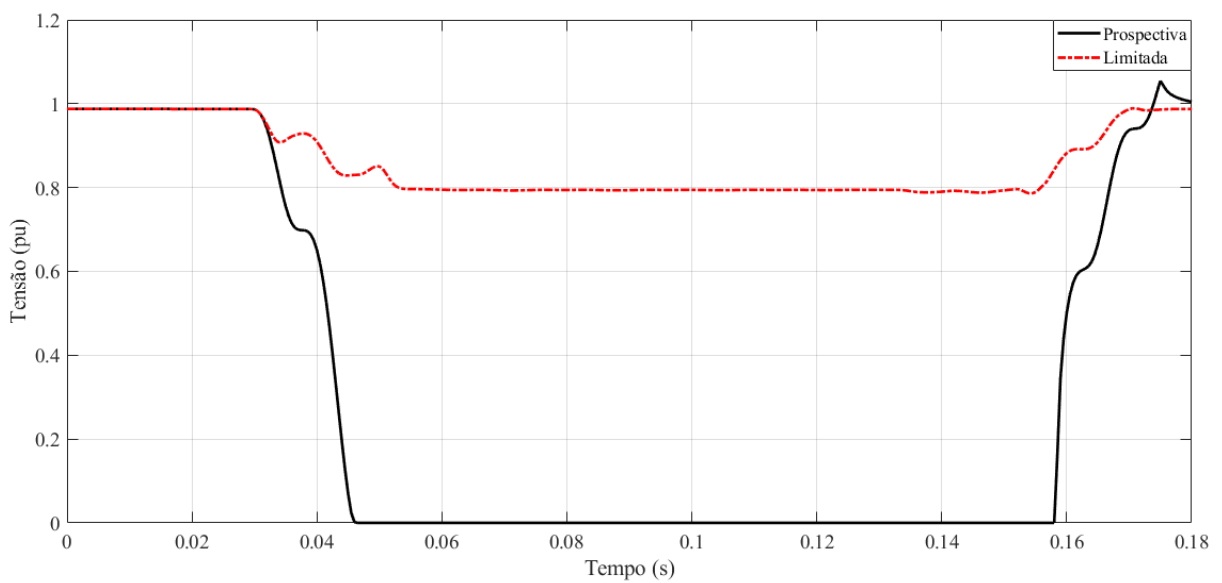


(b)

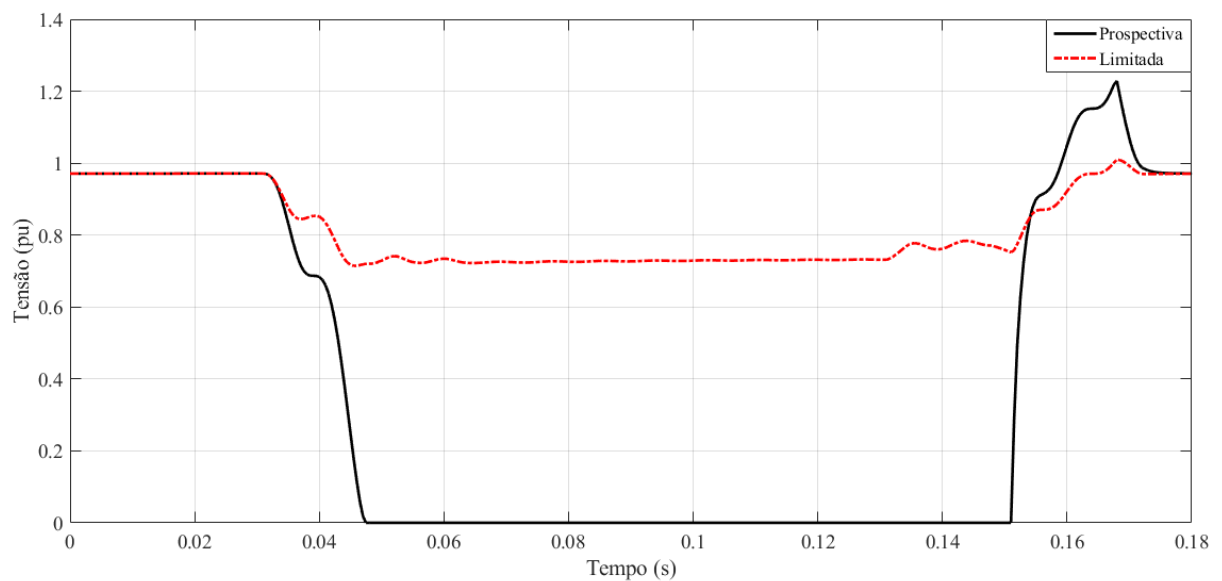
Figura 38: Forma de onda das tensões com a aplicação de r-LCCS nos pontos 1 (a) e 6 (b).

Na condição nominal da RD simulada, as tensões nas três fases do ponto 1 são iguais a 25,3 kV (0,987 pu, em relação a tensão base de 25,6 kV) e do ponto 6 iguais a 13,4 kV

(0,971 pu, em relação a tensão base de 13,8 kV). Durante o evento de curto-circuito trifásico (0,03 s a 0,15 s) sem a aplicação de r-LCCS, os valores em “pu” das tensões nos pontos 1 e 6 são iguais a zero, como foi mostrado na Figura 35. Com a atuação dos r-LCCS, estas tensões permanecem em 0,8 pu no ponto 1 e 0,75 pu no ponto 6, durante a maior parte do evento de curto-circuito, conforme apresentado na Figura 39. Com base nas Tabelas 21 e 22, os dois casos alteraram a classificação de VTCD de “Interrupção Momentânea de Tensão” para “Afundamento Momentâneo de Tensão”, e as regiões de sensibilidade passaram de “E” para “A” ( $f_{pond} = 0$ ) no ponto 1 e “D” ( $f_{pond} = 0,15$ ) no ponto 6, demonstrando uma melhora significativa nos indicadores de qualidade do produto [21].



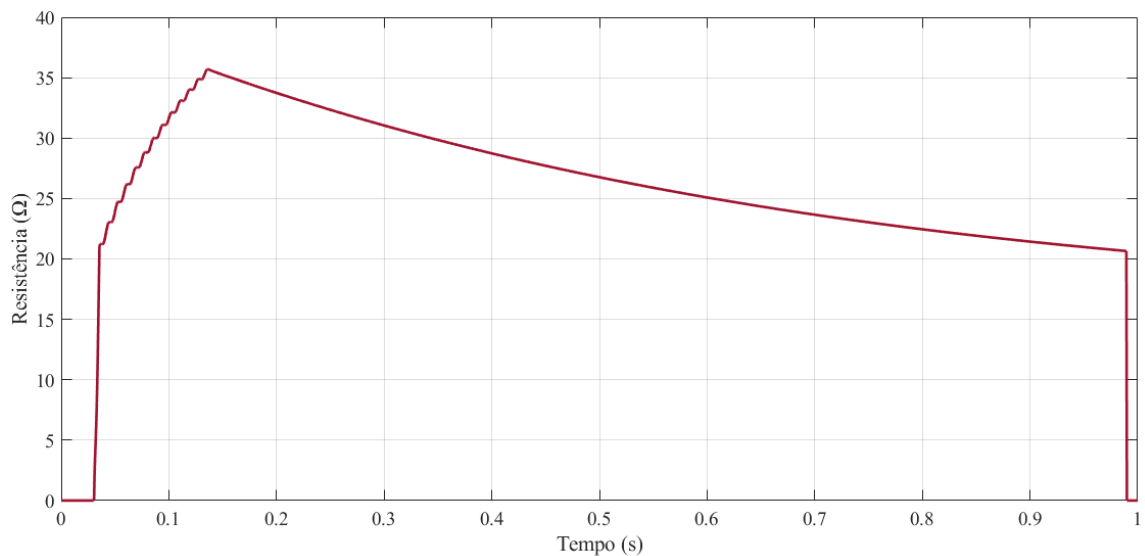
(a)



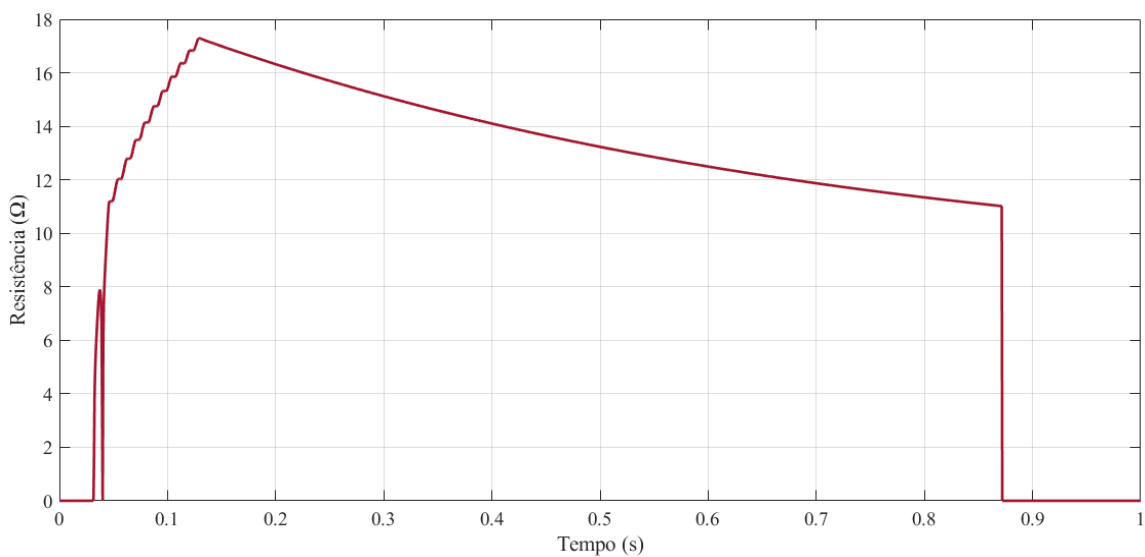
(b)

Figura 39: Tensões nas fases A dos pontos 1 (a) e 6 (b), sem e com a aplicação de r-LCCS.

A Figura 40 mostra as variações das resistências equivalentes das fitas 2G ( $R_{fita}$ ) nas fases A, antes, durante e após a corrente de curto-circuito, nos modelos X e Y de r-LCCS, nos pontos 1 (a) e 6 (b). Nota-se que antes do curto-circuito (de 0 a 0,03 s),  $R_{fita}$  é igual 0 em todos os casos, uma vez que a corrente do sistema é menor que a corrente crítica da fita 2G ( $I_{max} < I_c$ ), e a camada supercondutora se encontra no estado supercondutor. De 0,03 s até 0,15 s, os r-LCCS são submetidos a uma corrente de curto-circuito, fazendo com que a camada supercondutora transite do estado supercondutor para o estado normal (corrente do sistema maior que  $I_c$ ), aumentando o valor de  $R_{fita}$  de 0 a 36  $\Omega$  no ponto 1, e de 0 a 17,5  $\Omega$  no ponto 6. Após cessar a corrente de curto-circuito em 0,15 s, o valor de  $R_{fita}$  diminui em ambos os casos até as camadas supercondutoras voltarem para o estado supercondutor ( $R_{fita}$  igual a 0) em menos de 1 s.



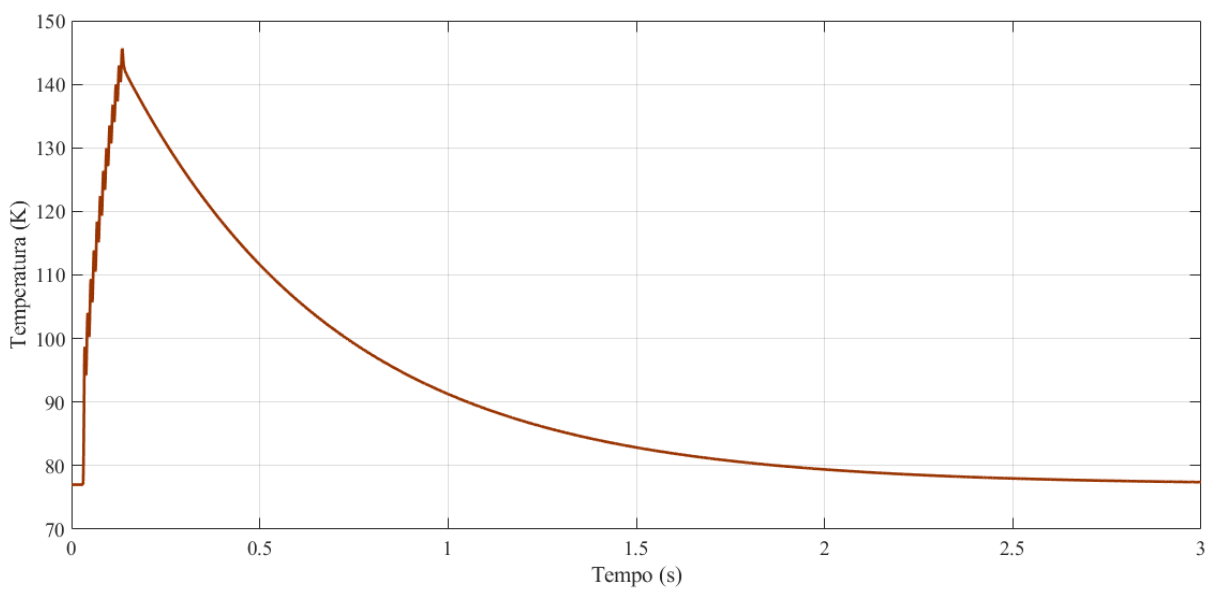
(a)



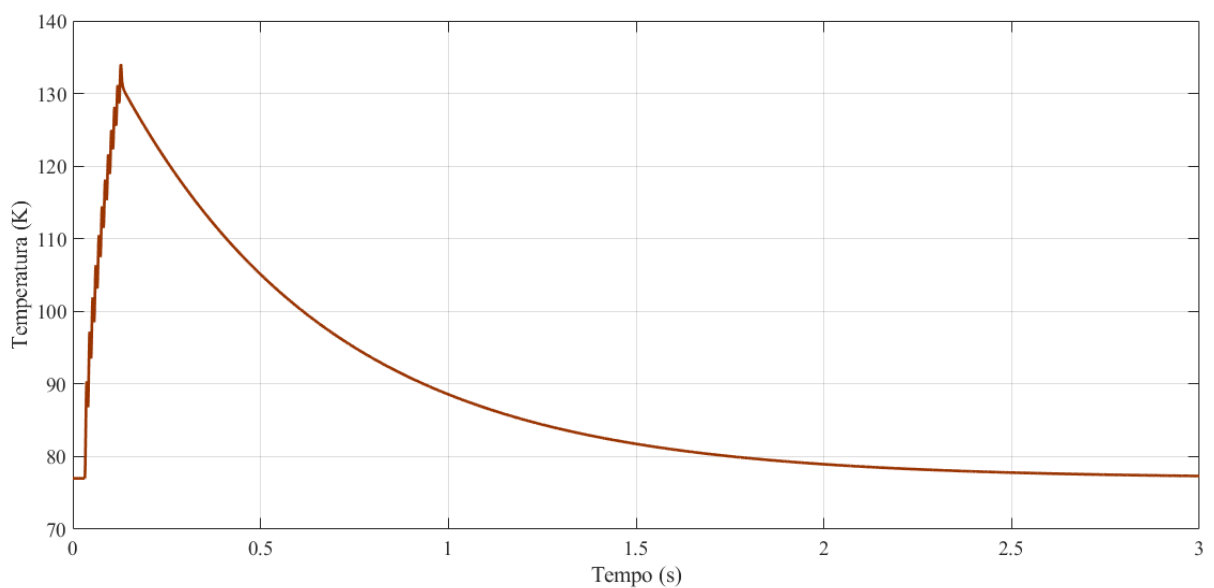
(b)

Figura 40: Variação das resistências das fitas 2G nas fases A dos pontos 1 (a) e 6 (b).

A Figura 41 ilustra a variação das temperaturas das camadas supercondutoras nas fases A, antes, durante e após a corrente de curto-circuito, nos pontos 1 (a) e 6 (b). Antes do evento de curto-circuito (de 0 a 0,03 s), as temperaturas se encontram em equilíbrio com o meio refrigerante (LN<sub>2</sub> a 77 K). Durante o curto-circuito (de 0,03 s a 0,15 s), as temperaturas se elevaram de 77 K até os valores máximos de 146 K no ponto 1, e 134 K no ponto 6, ficando abaixo da temperatura limite de 473 K por até 5 minutos [94], sem indicar possibilidade de dano das fitas 2G. Após a extinção do curto-circuito em 0,15 s, foi necessário um tempo de recuperação de mais de 3 s para que as fitas 2G se equalizem com o meio refrigerante a 77 K, em todos os casos.



(a)



(b)

Figura 41: Variação das temperaturas das camadas supercondutoras nas fases A dos pontos 1 (a) e 6 (b).

## 6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo da aplicação de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor do tipo resistivo (r-LCCS), em sistemas de distribuição de energia elétrica. O estudo foi realizado através de simulações computacionais no programa *Alternative Transients Program* (ATP), com a modelagem do dispositivo limitador proposto e de uma rede de distribuição (RD), baseada em dados reais de um sistema fornecido por uma concessionária. As análises realizadas ao longo do manuscrito podem auxiliar no dimensionamento/especificação de r-LCCS para sistemas de energia elétrica.

O modelo do r-LCCS desenvolvido para este trabalho teve como base projetos apresentados na literatura, que descrevem o comportamento físico deste dispositivo por meio de equacionamentos, além de dados e resultados experimentais. De acordo com a validação realizada, o modelo apresentou resultados convergentes aos exibidos em ensaios e simulações encontradas na literatura, relacionados aos parâmetros corrente, temperatura e resistência equivalente do r-LCCS. Isto possibilitou sua aplicação em programas específicos na área de sistemas de potência, ligados à transitórios eletromagnéticos, para simular uma RD representada com grande nível de detalhes.

Os resultados obtidos com a modelagem de uma RD real, através de simulações no programa ATP, demonstraram boa aproximação em relação aos dados de curto-circuito fornecidos pela concessionária, o que possibilitou uma análise dos níveis de corrente e tensão que este tipo de sistema pode apresentar, em determinados pontos de seu circuito. Estas informações obtidas foram utilizadas para o dimensionamento/especificação dos principais componentes de um r-LCCS, assim como para posteriormente simulação do mesmo inserido nestes pontos específicos do sistema modelado.

Uma estimativa dimensional de elementos *shunt* (reator a núcleo de ar) e de fitas 2G foi realizada de acordo com dois pontos identificados na simulação da RD, com níveis de tensão e corrente distintos, além da premissa de redução em 80% do valor da corrente de curto-circuito em regime permanente. Com base nestes r-LCCS projetados, os resultados obtidos com a inserção destes dispositivos na RD modelada indicaram uma redução de mais de 70% da corrente de curto-circuito, tanto no primeiro pico da corrente assimétrica, quanto em regime permanente, sem causar deformações significativas na forma de onda das mesmas.

Os r-LCCS demonstraram capacidade de minimizar as interrupções e/ou afundamentos de tensões causadas por estes eventos de curto-circuito, devido sua rápida atuação (em menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo) com inserção de uma impedância limitadora em série com o sistema curto-circuitado, melhorando indicadores relacionados a variação de tensão de curta duração (VTCD), referente à qualidade no fornecimento de energia. Isto se deve a natureza intrínseca do material supercondutor em transitar rapidamente do estado supercondutor para o estado normal, devido a passagem de correntes superiores à sua corrente crítica, como em tais eventos analisados. Além disso, foi verificado que os valores de temperatura e resistência nas fitas 2G, especificadas para estes tipos de LCC, não apresentaram variações bruscas na transição do estado supercondutor para o estado normal, devido à passagem da corrente de curto-circuito, o que possibilita sua aplicação em projetos relacionados à sistemas de distribuição de energia elétrica.

## 6.2. TRABALHOS FUTUROS

Com base no estudo realizado por este trabalho, foi possível identificar determinados temas complementares que colaboram para análise do r-LCCS inserido em sistemas de distribuição, conforme listados a seguir:

- Análise comparativa entre o r-LCCS com outros modelos de LCCS (núcleo blindado e núcleo saturado), assim como para as demais tecnologias convencionais de limitação da corrente de curto-circuito (reator a núcleo de ar, dispositivo pirotécnico, IPC, FACTS, DES, entre outros);
- Estudo de coordenação entre o r-LCCS e o sistema de proteção elétrica existente em sistemas de distribuição (disjuntores, religadores automáticos, elos fusíveis, dentre outros).

Além disso, este trabalho pode auxiliar em projetos relacionados ao desenvolvimento de protótipos de bancada e de escala real (níveis de corrente e tensão de sistemas de distribuição). Um deles será realizado pelo autor, referente a construção de um nb-LCCS de bancada a ser construído e testado durante seu programa de doutorado.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] RADMANESH, H. et. al. A Novel solid-state fault current-limiting circuit breaker for medium-voltage network applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE: v. 31, n. 1, p. 236-244, fev. 2016.
- [02] REBIZANT, W. et. al. Coordination of overcurrent protection relays in networks with superconducting fault current limiters. *Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier: v. 95, p. 307-314, ago. 2017.
- [03] SCHETTINO, H. J. Análise de limitador de corrente supercondutor resistivo para inserção de geradores ao sistema de transmissão. Rio de Janeiro, 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [04] IEEE Standards Association. IEEE Guide for Fault Current Limiter (FCL) Testing of FCLs Rated above 1000 V AC. IEEE Power and Energy Society, New York: dez. 2015.
- [05] LIANG, F. et. al. Experimental test of two types of non-inductive solenoidal coils for superconducting fault current limiters use. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. v.27, n.4, p.01-05, jun. 2017.
- [06] GARCIA, W. R. L. et. al. Technical and economic analysis of the r-type SFCL for HVDC grids protection. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. v.27, n.7, p. 01-09, 2017.
- [07] CHEN, L. et. al. Technical evaluation of superconducting fault current limiters used in a micro-grid by considering the fault characteristics of distributed generation, energy storage and power loads. *Energies*, Switzerland: MDPI, v. 9, p. 01-21, set. 2016.
- [08] DIDIER, G.; et. al. Influence of fault type on the optimal location of superconducting fault current limiter in electrical power grid. *Electrical Power and Energy Systems*: Elsevier, v. 56, p. 279-285, nov. 2013.
- [09] 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.

- [10] ELSCHNER, S. et. al. ENSYSTROB: resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, New York: IEEE, v. 21, n. 3, p. 1209-1212, jun. 2011.
- [11] ELSCHNER, S. et. al. ENSYSTROB: design, manufacturing and test of a 3-phase resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application. Physica C: Superconductivity. Philadelphia: Elsevier, v. 482, p. 98-104, nov. 2012.
- [12] SOUSA, W. T. B. Transient simulations of superconducting fault current limiters. Rio de Janeiro, 2015. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- [13] ROSE-INNES, A. C.; RHODERICK, E H. Introduction to superconductivity. 1ª ed. Oxford: Pergamon Press, 1969. 229 p.
- [14] MAFRA, G. R. F. Q. Aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores em sistemas elétricos de distribuição e plataformas de produção de petróleo e gás natural. Niterói, 2016. 135 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Montagem Industrial) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.
- [15] 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.
- [16] POOLE JR., C. P.; FARACH, H. A.; CRESWICK, R. J.; PROZOROV, R. Superconductivity. 2ª ed. ELSEVIER: 2007. 633 p.
- [17] SOUSA, W. T. B. de. Simulações e ensaios com limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores do tipo resistivo. Rio de Janeiro, 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [18] 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.
- [19] EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2018.
- [20] REN21. Renewables 2018 Global Status Report. Paris, 2018. Disponível em: <<http://www.ren21.net>>. Acesso em: 08-11-2018.
- [21] PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em 21-11-2018.
- [22] OLIVEIRA, F. D. Monitoramento e Análise de Afundamentos Momentâneos de Tensão. Belo Horizonte, 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- [23] DIAS, T. C. Aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito pirotécnicos em sistemas elétricos industriais. Itajubá, 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UNIFEI, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- [24] REY, C. Superconductors in the power grid: Materials and applications. 1ª ed. Londres: Elsevier, 2015. 427 p.
- [25] MONTEIRO, A. M. Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller). Rio de Janeiro, 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- [26] TRENCH GROUP. Reactors. 2007. Disponível em: <<http://www.trenchgroup.com/en/Products-Solutions/Coil-Products/Air-Core-Reactors>>. Acesso em: 08-08-2017.
- [27] ABB. Is-Limiter - The world fastest limiting and switching device. 2014. Disponível em: <http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/fault-current-limiting/current-limiter>. Acesso em: 08-03-2017.

- [28] G&W ELECTRIC. CLiP – Current Limiting Protector. 2014. Disponível em: <[http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/fault-current-limiting/current limiter](http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/fault-current-limiting/current-limiter)>. Acesso em: 08-03-2017.
- [29] LEMAY, J.; et al. Interphase Power Controllers. Citeq, Hydro Québec and ABB. Polytechnic International Press. 2000. 7 p.
- [30] ANDRADE, V. S. de. Limitação da corrente de curto-circuito através de dispositivos supercondutores. Rio de Janeiro, 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [31] RODRIGUES, R. et. al. Solid state circuit breakers for shipboard distribution systems. Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Arlington: IEEE, p. 406-413, ago. 2017.
- [32] MORANDI, A. State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system. Physica C: Superconductivity, vol. 484, pp. 242–247, jan. 2013.
- [33] HOBL, A.; et. al. Superconducting fault current limiters: a new tool for the grid of the future. CIRED 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid, IET, 2012.
- [34] JANOWSKI, T.; et. al. Possibility of using the 2G HTS superconducting transformer to limit short-circuit currents in power network. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, jun. 2012.
- [35] CHOI, H. S.; et. al. Recovery behaviors of the transformer-type SFCL with or without neutral lines. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, pp. 1793-1796, jun. 2009.
- [36] SONG, M.; et. al. Electromagnetic characteristics analysis of air-core transformer used in voltage compensation type active SFCL. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, pp. 1194-1198, jun. 2010.
- [37] CHOI, H. S.; et. al. Critical current equalization via neutral lines in a transformer-type SFCL. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 18, pp. 733-736, jun. 2008.

- [38] SHARIFI, R.; et. al. Viable inductive superconducting fault-current limiters using autotransformer-based hybrid schemes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, pp. 3514–3522, out. 2011.
- [39] CHOI, S. G.; et. al. Analysis of recovery characteristics of three-phase transformer type SFCL per types of faults according to reclosing system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, jun. 2012.
- [40] ARSÉNIO, P.; et. al. Numerical and experimental analysis of an inductive type fault current limiter using short-circuited 2g tape. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018.
- [41] YANG, Z.; et. al. Voltage distribution characteristic of a flux-coupling superconducting fault current limiter in different operating conditions. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, pp. 1-6, jun. 2017.
- [42] SOUSA, W. T. B.; et. al. Simulations of the recovery process of an air-coil SFCL. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, pp. 1-6, jan. 2016.
- [43] OMURA, K.; et. al. Current limiting characteristics of parallel-connected coated conductors for high-tc superconducting fault current limiting transformer (HTc-SFCLT). *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, pp. 1880-1883, jun. 2009.
- [44] HAYAKAWA, N.; et. al. Progress in development of superconducting fault current limiting transformer (SFCLT). *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, pp. 1397-1400, jun. 2011.
- [45] KOZAK, J.; et. al. Design and tests of coreless inductive superconducting fault current limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, jun. 2012.
- [46] KOZAK, J.; et. al. Experimental results of a 15 kV, 140 a superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, pp. 1-4, jun. 2017.
- [47] HELLMANN, S.; et. al. Manufacturing of a 1-MVA-class superconducting fault current limiting transformer with recovery-under-load capabilities. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, pp. 1-5, jun. 2017.

- [48] JIA, Y.; et. al. Simulation method for current-limiting effect of saturated-core superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, pp. 1-4, jun. 2016.
- [49] MOSCROP, J. "Design and development of a 3-phase saturated core high temperature superconducting fault current limiter. 2009 International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, (EPECS), 2009.
- [50] JIA, Y.; et. al. Numerical simulation and analysis of a saturated-core-type superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, pp. 1-5, jun. 2017.
- [51] ZHANG, C.; et. al. Analysis of magnetic circuit and leakage magnetic field of a saturated iron-core superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, pp. 1-5, jun. 2017.
- [52] VILHENA, N.; et. al. A design methodology for the optimization of three-phase SFCL of saturated cores type. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, pp. 1-5, jun. 2018.
- [53] WEI, Z.; et. al. "Optimized design of coils and iron cores for a saturated iron core superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, pp. 1-4, out. 2016.
- [54] KLAUS, D.; et. al. Superconducting fault current limiters - UK network trials live and limiting. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [55] XIN, Y.; et. al. Manufacturing and test of a 35 kV/90 MVA saturated iron-core type superconductive fault current limiter for live-grid operation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, pp. 1934-1937, jun. 2009.
- [56] MORICONI, F.; et. al. An innovative compact saturable-core HTS fault current limiter - development, testing and application to transmission class networks. *IEEE PES General Meeting*, IEEE, jul. 2010.
- [57] XIN, Y.; et. al. Factory and field tests of a 220 kV/300 MVA saturated iron-core superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, jun. 2013.

- [58] ALARAIFI, S.; et. al. Design considerations of superconducting fault current limiters for power system stability enhancement. *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, pp. 2155-2163, jun. 2017.
- [59] SOUSA, W. T. B.; et. al. Simulation of a superconducting fault current limiter: A case study in the brazilian power system with possible recovery under load. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, New York: IEEE, v. 26, n. 2, p. 1-8, dez. 2015.
- [60] SOUSA, W. S.; et. al. Thermoelectrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters. *Cryogenics*, vol. 62, pp. 97-109, jul. 2014.
- [61] BLAIR, S. M.; et. al. Current time characteristics of resistive superconducting fault current limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, abr. 2012.
- [62] SHARIFI, R. Optimal design of superconducting fault current limiters for electrical systems. *2010 Second International Conference on Engineering System Management and Applications*, 2010.
- [63] ANGELI, G.; et. al. Short-circuit current limitation through 2g YBCO resistive-type SFCL devices: a model for technical and economic comparison with traditional air-core reactors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, pp. 1-1, 2018.
- [64] HAYAKAWA, N.; et. al. Fault current limitation coordination in electric power grid with superconducting fault current limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, pp. 1-4, jun. 2018.
- [65] MANIGILLA, P. K. R.; et. al. Application of superconducting fault current limiter to cloud the presence of distributed generation. *2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, IEEE, nov. 2017.
- [66] MAFRA, G. R. F. Q.; et. al. Analysis of the operation of a d-STATCOM in unbalanced distribution systems under voltage disturbances. *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*, IEEE, nov. 2010.
- [67] YING, J. et. al. AC loss and contact resistance of resistive type fault current limiter using YBCO coated conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, jun. 2012.

- [68] PEI, X.; et. al. Resistive superconducting fault current limiter AC loss measurements and analysis. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016.
- [69] HONG, J.; et. al. The structure, performance and recovery time of a 10 kV resistive type superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, jun. 2013.
- [70] SOUSA, W. T. B.; et. al. Recovery of superconducting state in an r-SCFCL MCP-BSCCO-2212 assembly. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, fev. 2013.
- [71] HAYAKAWA, N.; et. al. Volume effect of dynamic breakdown strength in LN<sub>2</sub> for insulation design of resistive superconducting fault current limites. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, pp. 1-4, jun. 2018.
- [72] SUN, H.; et. al. Insulation characteristics of polyimide as insulation material used in pancake tape coil structure for resistive-type SFCL. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, pp. 1-4, jun. 2015.
- [73] SOUSA, W. T. B.; et. al. Simulations and tests of MCP-BSCCO-2212 superconducting fault current limites. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, abr. 2012.
- [74] MARTINI, L.; et. al. The first Italian superconducting fault current limiter: Results of the field testing experience after one year operation. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 507, mai. 2014.
- [75] PEI, X.; et. al. Experimental testing and development of improved modelling for multistrand resistive SFCL. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, pp. 1-5, jun. 2016.
- [76] GUI, Z. X.; et. al. “Experimental studies of the resistive superconducting fault current limiter based on double-sided YBCO thin films. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, pp. 54-58, fev. 2014.
- [77] HYUN, O. B.; et. al. 6.6 kV resistive superconducting fault current limiter based on YBCO films. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, pp. 2027-2030, jun. 2005.



- [78] YAZAWA, T.; et. al. Design and experimental results of three-phase superconducting fault current limiter using highly-resistive YBCO tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, pp. 1956-1959, jun. 2009.
- [79] SUNG, B. C.; et. al. Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: Modeling, simulation, and experimental verification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 2412-2419, jul. 2009.
- [80] HONG, Z.; et. al. "The development and performance test of a 10 kV resistive type superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, jun. 2012.
- [81] HOBL, A.; et. al. Design and production of the ECCOFLOW resistive fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, jun. 2013.
- [82] STEMMLE, M.; et. al. AmpaCity - advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply. 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, IEEE, abr. 2014.
- [83] KOVALSKY, L. et. al. Applications of superconducting fault current limiters in electric power transmission systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. v.15, n.2, p.2130-2133, 2005.
- [84] SUPERPOWER. SuperPower 2G HTS Wire Specifications. Empresa SuperPower, Disponível em: <http://www.superpower-inc.com>. Acesso em 20-11-2018.
- [85] MÄDER, O. Simulationen und Experimente zum Stabilitätsverhalten von HTSL - Bandleitern. Karlsruhe, 2012. 194 f. Tese (PhD em Engenharia Elétrica), Karlsruhe Institut für Technologie, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruhe, 2012.
- [86] STEMMLE, M. Supraleitende Strombegrenzer in Hochspannungsnetzen. Hannover, 2009. 133 f. Tese (PhD em Engenharia Elétrica), Universität Hannover, Hannover, 2009.
- [87] NAITO, T., et al. Thermal Conductivity of YBCO Coated Conductors Reinforced by Metal Tape. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 21, n. 3, pp. 303-3040, jun. 2011.

- [88] FASTOWSKI, W., PETROWSKI, J., ROWINSKI, A. Kryotechnik, v. 1. Berlin, Akademie-Verlag, 1970.
- [89] PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K. ATPDraw - User's Manual. v. 5.6, 266 p. nov. 2009.
- [90] COSTA, J. M. S. C. Metodologia e Critérios para Estudos de Energização de Transformadores de Potência: Experiência da CHESF. CIGRÉ - Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos. XIII ERIAC, Puerto Iguazú, 2009. 8 p. mai. 2009.
- [91] COSMO. Reatores de Núcleo de Ar. Empresa Cosmo. Disponível em: <http://transformadorescosmo.com.br>. Acesso em 20-11-2018.
- [92] SEIVER, J. R.; et. al. Short Circuit Calculations: The Easy Way. Intertec Publishing, 1999.
- [93] IBT - Indústria Brasileira de Transformadores Ltda. Reatores de Núcleo de Ar. Empresa IBT. Disponível em: <http://www.ibt.com.br/>. Acesso em 20-11-2018.
- [94] SUPERPOWER. Soldering Instructions - SuperPower 2G HTS Wire has excellent soldering characteristics. Empresa SuperPower. Disponível em: <http://www.superpower-inc.com>. Acesso em 20-11-2018.

## 8. APÊNDICES

### 8.1. CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO MODELO r-LCCS (ATP)

```
MODEL YBCO
```

```
INPUT Ct -- corrente total que atravessa o r-LCCS
```

```
OUTPUT Rl,Te[1..5]
```

```
-- Rl = resistência equivalente do r-LCCS
```

```
-- Te [1,2,3,5] = temperatura da camada de silver bottom, hastelloy, supercondutor (YBCO), silver top e stainless steel, respectivamente
```

```
VAR Rl,Te[1..5],py,Re[1..5],I[1..5],h,X[1..27]
```

```
-- py = resistividade do supercondutor (YBCO)
```

```
-- R[1,2,3,4,5] = resistência do silver bottom, hastelloy, supercondutor (YBCO), silver top stainless steel, respectivamente
```

```
-- I[1,2,3,4,5] = corrente que atravessa na camada de silver bottom, hastelloy, supercondutor (YBCO), silver top e stainless steel, respectivamente
```

```
-- h = passo de integração das temperaturas
```

```
-- X = variáveis do algoritmo
```

```
HISTORY Te[1..5]{DFLT:77},py{DFLT:0} -- inicialmente, todas as camadas se encontram em 77 K e "py" é igual a zero
```

```
INIT
```

```
h:=timestep -- atribui o valor de passo de integração aplicado no programa pelo usuário
```

```
ENDINIT
```

EXEC

```

-- Cálculos de resistividade [ohm*cm] do material de cada camada, em função da temperatura [K] obtidas no passo anterior para cada camada
X[1]:=(-2*(10**-7))+(7*(10**-9)*Te[1]) -- silver bottom
X[2]:=(1.202*(10**-4))+(8.957*(10**-9)*Te[2]) -- hastelloy
-- py é calculado no método iterativo de estabilização
X[3]:=(-2*(10**-7))+(7*(10**-9)*Te[4]) -- silver top
X[4]:=(1.2*(10**-4))-(7.53*(10**-5))*(exp(-Te[5]/647.113)) -- stainless steel

-- Cálculos de resistência [ohm] de cada camada [ohm]
Re[1]:=X[1]*(430/(0.0001*1.2)) -- silver bottom
Re[2]:=X[2]*(430/(0.01*1.2)) -- hastelloy
Re[3]:=(py*(430/(0.0001*1.2)))+0.0000000000000001 -- supercondutor (YBCO)
Re[4]:=X[3]*(430/(0.0004*1.2)) -- silver top
Re[5]:=X[4]*(600/(0.24*1.2)) -- stainless steel

Rl:=1/((1/Re[1])+(1/Re[2])+(1/Re[3])+(1/Re[4])) -- Cálculo da resistência equivalente da fita 2G [ohm]
Rl:=1/((2/Rl)+(1/Re[5])) -- Cálculo da resistência equivalente de r-LCCS [ohm]

I[3]:=(Rl[1]/Re[3])*abs(Ct) -- Cálculo da corrente [A] que atravessa a camada supercondutora (obtida através de divisor de corrente)

X[1]:=1 -- Er = atribui um valor inicial de erro para o método iterativo de estabilização
X[2]:=I[3] -- atribui para x[2] o valor de I[3] inicialmente calculado acima

-- Método iterativo de estabilização = método numérico para estabilizar os valores de corrente e resistividade da camada supercondutora
WHILE abs(X[1])>0.01 DO -- Enquanto Er for maior do que 0.01, faça
  IF Te[3]<92 THEN -- se Te[3] estiver abaixo da temperatura crítica (92 K), então

```

```

-- cálculos da resistividade do supercondutor [ohm*cm], em função da temperatura e corrente atuais, nas regiões de
X[3]:=((0.000001*((((X[2]*(92-77))/(275*(92-Te[3])))**30))/(X[2]/(0.0001*1.2))) -- "flux-creep"
X[4]:=((0.015*((((X[2]*(92-77))/(275*(92-Te[3])))**5))/(X[2]/0.00012)) -- "flux-flow"
X[5]:=((0.01*Te[3])-0.1) -- "normal state" (a resistividade varia linearmente apenas com a temperatura)
X[5]:=min(X[3],X[4],X[5]) -- determina em qual região (resistividade) a camada supercondutora se encontra (menor ponto obtido entre as três retas
-- que caracterizam as regiões)

ELSE -- senão,
  X[5]:=((0.01*Te[3])-0.1) -- a camada supercondutora já se encontra na região de "normal state"
ENDIF

X[3]:=((X[5]*(430/(0.0001*1.2)))+0.0000000000000001) -- atualiza o valor da resistência da camada supercondutora
X[4]:=1/(((1/Re[1])+(1/Re[2])+(1/X[3])+(1/Re[4]))) -- atualiza o valor da resistência equivalente da fita 2G
X[4]:=1/(2/((X[4])+(1/Re[5]))) -- atualiza o valor da resistência equivalente de r-LCCS
X[6]:=((X[4]/X[3])*abs(Ct)) -- atualiza o valor da corrente que atravessa a camada supercondutora
X[7]:=100*((X[6]-X[2])/X[6]) -- atribui o valor de Er atual (X[7]), com base na diferença percentual entre a corrente atual (X[6]) e a corrente
anterior (X[2])

-- Determinação do fator de correção (X[8]), com base nos valores de Er anterior (X[1]) e de Er atual (X[7])
IF (X[7]>0 AND X[3]>0) OR (X[7]<0 AND X[3]<0) THEN -- Ern(G3) AND Er(X3)
  X[8]:=0.02+0.08
ELSE
  X[8]:=0.02
ENDIF

X[2]:=X[2]+(X[8]*(X[6]-X[2])) -- correção/atualização do valor da corrente anterior (X[2]), com base na corrente atual(X[6]) e no fator de correção
(X[8])
X[1]:=X[7] -- atualização de Er anterior (X[1]), com base no valo calculado de Er atual (X[7])
ENDWHILE

```

```

py:=X[5] -- atualiza o valor de py, corrigido pelo método iterativo de estabilização
Re[3]:=X[3] -- atualiza o valor de Re[3], corrigido pelo método iterativo de estabilização
Rl:=X[4] -- atualiza o valor da Rl, corrigido pelo método iterativo de estabilização
I[3]:=X[6] -- atualiza o valor da I[3], corrigido pelo método iterativo de estabilização

-- Cálculos das demais correntes que atravessam as camadas [A]
I[1]:=(Rl/Re[1])*abs(Ct) -- silver bottom
I[2]:=(Rl/Re[2])*abs(Ct) -- hastelloy
I[4]:=(Rl/Re[4])*abs(Ct) -- silver top
I[5]:=(Rl/Re[5])*abs(Ct) -- stainless steel

-- Cálculos de calor específico [J/(g.K)] do material de cada camada
X[1]:=(220.56+(0.0460488*Te[1]))*0.001 -- silver bottom
X[2]:=0.18995+(2*0.19139*(1-(exp(-Te[2]/309.98354)))) -- hastelloy
X[3]:=(0.39*((250/Te[3])**2))*((exp(250/Te[3]))/(((exp(250/Te[3]))-1)**2)) -- supercondutor (YBCO)
X[4]:=(220.56+(0.0460488*Te[4]))*0.001 -- silver top
-- stainless steel = 0.2

-- Massa específica [g/cm³] do material de cada camada
-- cobre = 8.92
-- silver bottom = 10.47
-- hastelloy = 8.9
-- supercondutor (YBCO) = 6.3
-- stainless steel = 7.9

-- Cálculos da capacidade térmica [F] de cada camada (capacidade de armazenamento de calor no interior de cada camada)
X[1]:=10.47*X[1]*0.0001*(430*1.2) -- silver bottom
X[2]:=8.9*X[2]*0.01*(430*1.2) -- hastelloy

```

```

X[3]:=6.3*X[3]*0.0001*(430*1.2) -- supercondutor (YBCO)
X[4]:=10.47*X[4]*0.0004*(430*1.2) -- silver top
-- stainless steel = 7.9*0.2*0.24*(600*1.2) = 273.024

-- Cálculos de condutividade térmica [W/(K.cm)] do material de cada camada
X[5]:=(420.864+(501.782*(0.956**Te[1]))) *0.01 -- silver bottom
X[6]:=(3.873+(0.017*Te[2]))*0.01 -- hastelloy
-- supercondutor (YBCO) = 0.05
X[7]:=(420.864+(501.782*(0.956**Te[4]))) *0.01 -- silver top
-- stainless steel = 0.15

-- Cálculos da diferença de temperatura entre o meio externo (nitrogênio líquido) e as camadas externas/shunt
X[18]:=Te[1]-77 -- silver botton
X[19]:=Te[4]-77 -- silver top
X[20]:=Te[5]-77 -- stainless steel

-- Determinação dos coeficientes de convecção [W/(K.cm2)] (maiores detalhes, tese SOUSA/2015 - Figura 5.11, pag. 72)

-- silver botton
IF (X[18]<2) THEN -- se a diferença de temperatura for menor que 2, então
  X[21]:=0.18 -- coeficiente de convecção na região "free convection"
ELSE -- senão,
  IF (X[18]>26.5) THEN -- se a diferença de temperatura for maior que 26.5, então
    X[21]:=0.03 -- coeficiente de convecção na região "film boiling"
  ELSE -- senão,
    X[21]:=3.8147-(2.8209*X[18])+(0.72328*(X[18]**2))-(0.049438*(X[18]**3))+(0.001325*(X[18]**4))-(0.000012773*(X[18]**5))
    X[21]:=X[21]/X[18] -- coeficiente de convecção na região "bubble boiling"
  ENDIF
ENDIF

```

```
ENDIF
```

```
-- silver top
```

```
IF (X[19]<2) THEN -- se a diferença de temperatura for menor que 2, então
```

```
  X[22]:=0.18 -- coeficiente de convecção na região "free convection"
```

```
ELSE -- senão,
```

```
  IF (X[19]>26.5) THEN -- se a diferença de temperatura for maior que 26.5, então
```

```
    X[22]:=0.03 -- coeficiente de convecção na região "film boiling"
```

```
  ELSE -- senão,
```

```
    X[22]:=3.8147-(2.8209*X[19])+(0.72328*(X[19]**2))-(0.049438*(X[19]**3))+
```

```
    (0.001325*(X[19]**4))-(0.000012773*(X[19]**5))
```

```
  X[22]:=X[22]/X[19] -- coeficiente de convecção na região "bubble boiling"
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
-- stainless steel
```

```
IF (X[20]<2) THEN -- se a diferença de temperatura for menor que 2, então
```

```
  X[23]:=0.18 -- coeficiente de convecção na região "free convection"
```

```
ELSE -- senão,
```

```
  IF (X[20]>26.5) THEN -- se a diferença de temperatura for maior que 26.5, então
```

```
    X[23]:=0.03 -- coeficiente de convecção na região "film boiling"
```

```
  ELSE -- senão,
```

```
    X[23]:=3.8147-(2.8209*X[20])+(0.72328*(X[20]**2))-(0.049438*(X[20]**3))+
```

```
    (0.001325*(X[20]**4))-(0.000012773*(X[20]**5))
```

```
  X[23]:=X[23]/X[20] -- coeficiente de convecção na região "bubble boiling"
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```



```

-- Cálculos da resistência térmica por convecção [ohm] (resistência a transferência convectiva de calor entre o nitrogênio líquido e as camadas
externas)
X[24]:=1/(X[21]*430*1.2) -- silver bottom
X[25]:=1/(X[22]*430*1.2) -- silver top
X[26]:=1/(X[23]*600*1.2) -- stainless steel

-- Cálculos de resistência térmica por condução [ohm] de cada camada (resistência ao fluxo de calor por condução em cada camada)
X[5]:=0.0001/(X[5]*(430*1.2)) -- silver bottom
X[6]:=0.01/(X[6]*(430*1.2)) -- hastelloy
-- supercondutor (YBCO) = 0.0001/(0.05*(430*1.2)) = 0.000003876
X[7]:=0.0004/(X[7]*(430*1.2)) -- silver top
-- stainless steel = 0.24/(0.15*(600*1.2)) = 0.0022222

-- Cálculos de condutância [S] entre as camadas e entre as camadas externas com o nitrogênio líquido
X[8]:=1/(X[24]+(X[5]/2)) -- G1 (nitrogênio líquido + silver bottom/2)
X[9]:=1/((X[5]+X[6])/2) -- G2 (silver bottom/2 + hastelloy/2)
X[10]:=1/((X[6]+0.000003876)/2) -- G3 (hastelloy/2 + supercondutor/2)
X[11]:=1/((0.000003876+X[7])/2) -- G4 (supercondutor/2 + silver top/2)
X[12]:=1/((X[7]/2)+X[25]) -- G5 (silver top/2 + nitrogênio líquido)
X[27]:= 1/(0.00222222+(2*X[26])) -- G6 (stainless steel + 2*nitrogênio líquido)

-- Cálculos da temperatura [K] no interior de cada camada (maiores detalhes, dissertação SCHETTINO/2016 - Equação 4.18, pag. 63)
-- Pré-multiplicação de matrizes: |B|=|A|-1.|C| <=> |C|=|A|.|B|
-- Parte dos cálculos da equação de matrizes |C|=|A|.|B|
X[13]:=h*((Re[1]*(I[1]**2))+77*X[8])+(X[9]*Te[2]) -- parte da equação linear 1 (silver bottom)
X[14]:=h*((Re[2]*(I[2]**2))+X[10]*Te[3])+(X[9]*Te[1]) -- parte da equação linear 2 (hastelloy)
X[15]:=h*((Re[3]*(I[3]**2))+X[11]*Te[4])+(X[10]*Te[2]) -- parte da equação linear 3 (supercondutor)
X[16]:=h*((Re[4]*(I[4]**2))+77*X[12])+(X[11]*Te[3]) -- parte da equação linear 4 (silver top)

```

```
x[17]:=h*((Re[5]*(I[5]**2))+77*x[27])) -- equação linear (stainless steel)

-- Término dos cálculos da equação de matrizes |C|=|A|.|B| (temperatura no interior de cada camada)
Te[1]:=((x[1]*Te[1])+x[13])/(x[1]+(h*(x[9]+x[8]))) -- Temperatura no interior do silver bottom
Te[2]:=((x[2]*Te[2])+x[14])/(x[2]+(h*(x[10]+x[9]))) -- Temperatura no interior do hastelloy
Te[3]:=((x[3]*Te[3])+x[15])/(x[3]+(h*(x[11]+x[10]))) -- Temperatura no interior do supercondutor
Te[4]:=((x[4]*Te[4])+x[16])/(x[4]+(h*(x[12]+x[11]))) -- Temperatura no interior do silver top
Te[5]:=((273.024*Te[5])+x[17])/(273.024+(h*x[27])) -- Temperatura no interior do stainless steel
ENDEXEC
ENDMODEL
```

## 8.2. MODELO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO NO ATPDRAW

A Figura 42 mostra o modelo da rede de distribuição simulado no software ATP, contendo as subestações Eldorado, São Lourenço e Capivari.

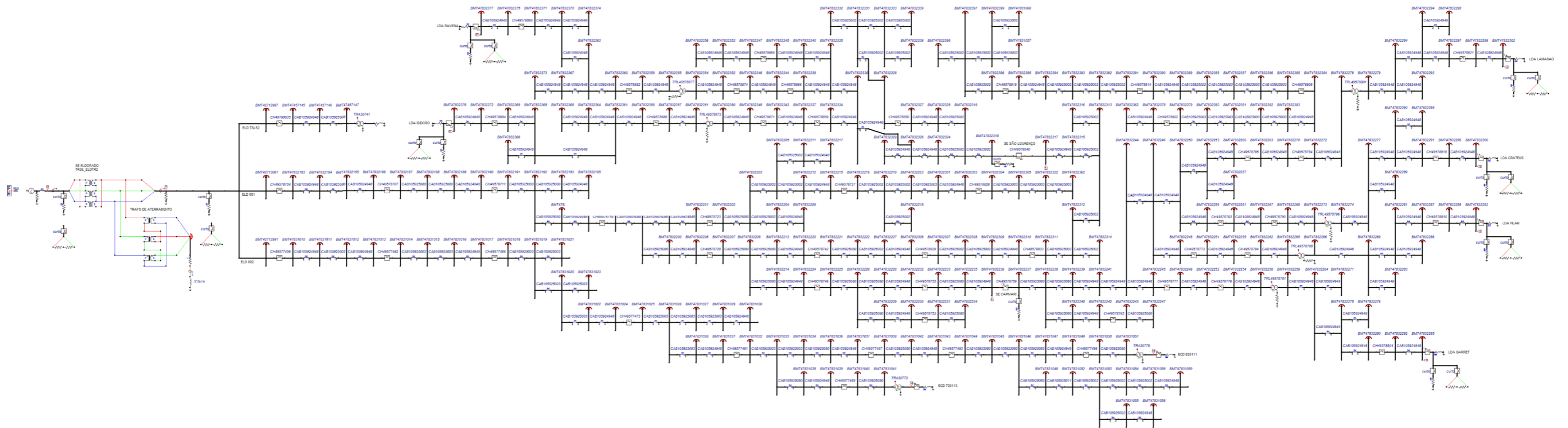


Figura 42: Modelo da rede de distribuição feita no ATPDraw.