



ANÁLISE DE LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO PARA INSERÇÃO DE GERADORES AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Henrique Junqueira Schettino

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Rubens de Andrade Jr.

Wesley Tiago Batista de Sousa

Rio de Janeiro
Setembro de 2016

ANÁLISE DE LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO
PARA INSERÇÃO DE GERADORES AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Henrique Junqueira Schettino

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

Examinada por:

Prof. Rubens de Andrade Jr., D.Sc.

Dr. Wesley Tiago Batista de Sousa, D.Sc.

Profa. Tatiana Mariano Lessa Assis, D.Sc.

Dr. Alexander Polasek, D.Sc.

Profa. Jussara Farias Fardin, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2016

Schettino, Henrique Junqueira

Análise de Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo para Inserção de Geradores ao Sistema de Transmissão/Henrique Junqueira Schettino. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIV, 112 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Rubens de Andrade Jr.

Wesley Tiago Batista de Sousa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 98 – 102.

1. limitadores de corrente. 2. curto-circuito. 3. supercondutores. I. Andrade Jr., Rubens de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Não seria possível concluir este trabalho sem a ajuda e incentivo que recebi das pessoas a meu redor. Gostaria de deixar meus sinceros agradecimentos a todos vocês, mesmo os que não sejam pessoalmente mencionados.

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Rubens de Andrade Junior e Dr. Wescley Tiago Batista de Sousa, pela coragem em me orientar neste trabalho e por toda competência, dedicação, empenho e paciência a mim dedicados durante toda jornada.

Gostaria de agradecer ao CEPEL e ao Dr. Alexander Polasek, por terem gentilmente cedido dados experimentais que em muito contribuíram para o enriquecimento da pesquisa.

Não posso deixar de agradecer aos novos amigos que fiz ao longo desta caminhada no PEE e no LASUP, mestrandos, doutorandos e professores, que tenham contribuído direta ou indiretamente para que este trabalho se realizasse.

Agradeço imensamente ao meu grande amor, Livia, por ter estado ao meu lado em todos os momentos me incentivando a superar os grandes desafios de mais esta etapa da vida. Sem o seu apoio nos momentos mais difíceis eu não teria conseguido.

Gostaria de agradecer a minha grande e querida família e aos bons e velhos amigos, pelo suporte, estímulo, e ainda por terem entendido as minhas necessárias ausências ao longo desta caminhada. Em especial aos meus pais, Bruno e Georgina, meus exemplos e heróis de vida que me encorajaram a iniciar esta empreitada. Ao meu padrasto Maikel e madrasta Alice, pelo apoio sempre presente. Aos meus irmãos de sangue e de consideração, Vinícius, João Pedro, Francisco, David, Gabi e Carol, pela torcida sincera e boas vibrações.

Finalmente, gostaria de agradecer a Universidade Federal do Rio de Janeiro pela oportunidade e estrutura proporcionada, bem a todos os brasileiros que indiretamente financiaram o meu curso de mestrado.

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

ANÁLISE DE LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO PARA INSERÇÃO DE GERADORES AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Henrique Junqueira Schettino

Setembro/2016

Orientadores: Rubens de Andrade Jr.

Wescley Tiago Batista de Sousa

Programa: Engenharia Elétrica

Apresenta-se neste trabalho o problema de superação dos limites dos equipamentos elétricos pelo aumento dos níveis correntes de curto-circuito nos sistemas de potência, que tem como uma de suas principais causas a entrada em operação de novas unidades geradoras. As soluções usualmente empregadas para contornar o problema são descritas com enfoque na utilização dos dispositivos limitadores de correntes de curto-circuito supercondutores. É apresentada uma modelagem detalhada de um limitador supercondutor do tipo resistivo baseado em supercondutores de alta temperatura crítica de segunda geração, utilizando o método da analogia elétrico-térmica para representar as trocas térmicas entre as camadas das fitas supercondutoras. O modelo é implementado para simulação dinâmica utilizando programa MATLAB/Simulink e validado através da comparação das simulações com resultados experimentais. Um limitador supercondutor com características semelhantes ao dispositivo ensaiado, em maior escala, é proposto para ser inserido no ponto de acoplamento de uma nova unidade geradora a um sistema de transmissão de testes de 12 barras do CIGRE. O limitador é instalado na rede de média tensão com o objetivo de limitar a corrente na rede de alta tensão. Avaliou-se o desempenho do limitador proposto através da análise de três casos de faltas em pontos diferentes do sistema. Os resultados evidenciaram que o limitador supercondutor desempenhou-se de forma efetiva para o sistema simulado, limitando a contribuição das correntes de falta. Adicionalmente, foi possível investigar o comportamento de variáveis internas do dispositivo, como a temperatura das camadas do supercondutor, para os diferentes casos analisados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS FOR
INSERTION OF GENERATORS IN POWER SYSTEMS

Henrique Junqueira Schettino

September/2016

Advisors: Rubens de Andrade Jr.

Wesley Tiago Batista de Sousa

Department: Electrical Engineering

In this work, we present the problem of exceeding fault current limits of existing electrical equipments due to higher fault current levels in power systems, having as one of its main causes the entry into operation of new generating units. The solutions usually employed to circumvent the problem are described, focusing on the use of superconducting fault current limiters. It is described a detailed modeling of a resistive-type superconducting fault current limiter device based on second generation high temperature superconductors, using the electrothermal analogy method to represent heat exchange between the layers of superconducting tapes. The model is implemented for dynamic simulation using MATLAB/Simulink and validated by comparing simulations with experimental results. A superconducting limiter with characteristics similar to the tested device, on a larger scale, is proposed to be inserted into the coupling point of a new generation unit to a 12 bar CIGRE benchmark transmission system. The limiter is installed at medium voltage grid in order to limit the current at high voltage grid. We evaluated the performance of the limiter proposed through the analysis of three cases of faults in different points of the system. The results showed that the superconducting limiter performed effectively to the simulated system, limiting the contribution of fault currents. Additionally, it was possible to investigate the behavior of the device internal variables such as the temperature of the superconducting layers for the different cases studied.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura do Texto	3
2 Supercondutividade e Materiais Supercondutores	5
2.1 Supercondutividade	5
2.2 Resistência Zero	7
2.3 Efeito Meissner-Ochsenfeld	9
2.4 Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência	12
2.4.1 Profundidade de Penetração	12
2.4.2 Comprimento de Coerência	14
2.5 Tipos de Supercondutores	15
2.5.1 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica	17
2.6 Dinâmica dos Vórtices	18
2.6.1 Curva E-J	22
3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	24
3.1 Introdução	24
3.2 Correntes de Curto-Circuito	25
3.3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	28
3.3.1 Reatores Limitadores de Núcleo de Ar	29
3.3.2 Dispositivos Pirotécnicos	31
3.3.3 FACTS	33
3.3.4 HVDC	35
3.3.5 IPC	35
3.3.6 Disjuntores de Estado Sólido	36
3.4 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores	38

3.4.1	Limitador Supercondutor Resistivo	41
3.4.2	Limitador Supercondutor Resistivo com Transição Auxiliada por Campo Magnético	43
3.4.3	Limitador Supercondutor Indutivo com Núcleo de Ferro	43
3.4.4	Limitador Supercondutor Indutivo com Núcleo de Ar	45
3.4.5	Limitador Supercondutor de Núcleo Saturado	46
3.4.6	Limitador Supercondutor em Ponte Completa	47
3.5	Comparativo dos Limitadores de Curto-Circuito Convencionais e Supercondutores	48
4	Modelo de Simulação	52
4.1	Introdução	52
4.2	Dispositivo Considerado	52
4.3	Ensaio para Validação	54
4.4	Comportamento Dinâmico do Limitador	55
4.4.1	Modelos Simplificados	55
4.4.2	Modelos Detalhados	56
4.5	Analogia Eletro-térmica	57
4.5.1	Equivalente Elétrico	57
4.5.2	Equivalente Térmico	60
4.5.3	Simulações	65
4.6	Validação do modelo	67
4.7	Sistema de Potência Teste	69
4.7.1	Características do Limitador Proposto	72
5	Resultados e Discussões	75
5.1	Caso A - curto-circuito na linha 1-6	75
5.1.1	Descrição da simulação	75
5.1.2	Correntes	77
5.1.3	Tensões	78
5.1.4	Temperatura	80
5.1.5	Impedância	81
5.2	Caso B - curto-circuito na linha 1-2	82
5.2.1	Descrição da simulação	82
5.2.2	Correntes	83
5.2.3	Tensões	84
5.2.4	Temperaturas	85
5.2.5	Impedâncias	86
5.3	Caso C - curto-circuito na linha 3-4	87
5.3.1	Descrição da Simulação	87

5.3.2	Correntes	88
5.3.3	Tensões	90
5.3.4	Temperatura	91
5.3.5	Impedância	91
5.4	Resumo dos resultados	92
6	Conclusões	95
6.1	Trabalhos Futuros	96
	Referências Bibliográficas	98
A	Rotina de Simulação	103
B	Dados do Sistema Teste	108
B.1	Linhas de Transmissão	108
B.2	Transformadores	109
B.3	Geradores	109
B.4	Cargas e Compensação Capacitiva	110
B.5	Inicialização da simulação	111

Lista de Figuras

2.1	Descoberta de alguns dos principais materiais supercondutores ao longo dos anos.	6
2.2	(a) Queda abrupta na resistividade do mercúrio em 4,2K observada por Onnes [2] e (b) Queda da resistividade do supercondutor e dos metais normais.	8
2.3	Correlação das condições para supercondutividade nos supercondutores do Tipo I.	9
2.4	Interação do campo aplicado e o campo desmagnetizante, resultando em densidade de fluxo magnético nula no interior do supercondutor.	10
2.5	Comparação do comportamento do material supercondutor (a) e de um condutor perfeito (b) quando resfriados abaixo da temperatura crítica submetidos a um campo aplicado.	11
2.6	Exemplo do fenômeno de levitação magnética: (a) ilustração e (b) fotografia [6].	12
2.7	Penetração do campo magnético na superfície do supercondutor.	13
2.8	Variação da densidade de superelétrons na superfície do supercondutor.	14
2.9	Diagrama de estados para o supercondutor do (a) Tipo I e supercondutor do (b) Tipo II.	16
2.10	Rede de vórtices triangular formada no estado misto (a) e a variação do campo magnético (b) e da densidade de superelétrons (c) ao longo do supercondutor.	19
2.11	Força de Lorentz gerada nos vórtices em função da interação com a corrente de transporte.	21
2.12	Curva $E - J$ de um supercondutor de alta temperatura em escala logarítmica.	23
3.1	Formas de onda de um curto-circuito típico.	27
3.2	Formas de conexão dos reatores ao sistema.	30

3.3	Fotografia dos reatores limitadores da subestação de Tucuruí de 500 kV. Adaptado de [22].	30
3.4	Dispositivo pirotécnico da G&W.	31
3.5	Princípio de funcionamento dos dispositivos pirotécnicos para limitação de curto-circuito	32
3.6	(a) Diagrama elétrico de um TCSC e (b) Possíveis pontos de operação da impedância equivalente de acordo com o ângulo de disparo dos tiristores.	34
3.7	(a) Diagrama esquemático do IPC tipo Transformador Limitador de curto-circuito e (b) Circuito equivalente de (a).	36
3.8	Topologias de disjuntores de estado sólido: (a) baseada em comutação de corrente e (b) baseada em comutação de tensão.	37
3.9	Forma de onda típica de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor com os períodos de operação normal, curto-circuito e recuperação.	39
3.10	Locais possíveis de utilização dos limitadores supercondutores nos sistemas de potência.	40
3.11	(a) Ilustração de limitador supercondutor resistivo e (b) surgimento de <i>hot-spots</i> e desvio da corrente para o elemento <i>shunt</i>	42
3.12	Circuito equivalente de um limitador supercondutor resistivo com elemento <i>shunt</i>	42
3.13	Ilustração de limitador supercondutor resistivo com transição auxiliada por campo magnético.	43
3.14	(a) Ilustração de limitador supercondutor indutivo com núcleo de ferro e (b) circuito equivalente de (a).	44
3.15	Enrolamento de cobre (primário) e enrolamento supercondutor (secundário) do limitador supercondutor de núcleo de ar: (a) Fotografia (b) Esquema da Seção transversal e (c) Vista superior do dispositivo.	45
3.16	Circuito equivalente do limitador indutivo de núcleo de ar.	45
3.17	Ilustração de limitador supercondutor de núcleo saturado.	47
3.18	Circuito básico de limitador supercondutor em ponte completa.	48
4.1	Foto (a) e diagrama de conexão (b) do limitador de curto-circuito submetido a ensaios.	53
4.2	Esquema simplificado do circuito de ensaio empregado nos testes.	54
4.3	Corrente de curto-circuito e corrente limitada em ensaio de 5 kA_{rms}	55
4.4	Seção transversal da fita 2G YBCO do limitador resistivo (a) e sua representação elétrica (b).	58

4.5	Diagrama de blocos do método iterativo para cálculo da resistividade do material supercondutor.	59
4.6	Circuito Térmico-Elétrico para resolver o comportamento térmico do módulo 2G YBCO.	61
4.7	Curva de variação do coeficiente de transferência de calor entre as superfícies da fita YBCO 2G e o nitrogênio líquido.	64
4.8	Bloco para simulação do limitador supercondutor.	65
4.9	Diagrama de simulação do limitador de corrente de curto-circuito inserido num sistema elétrico genérico.	66
4.10	Simulação do limitador de curto-circuito para as condições do ensaio.	68
4.11	Comparação da corrente limitada entre simulação e ensaio.	68
4.12	Comparação da queda de tensão sobre o SFCL entre simulação e ensaio.	68
4.13	Comportamento da temperatura nas camadas da fita 2G HTS.	69
4.14	Resistência elétrica da fita, elemento shunt e resistência equivalente.	69
4.15	Sistema de transmissão utilizado como base de teste para simulações do limitador de curto-circuito supercondutor.	70
4.16	Topologia do limitador supercondutor resistivo considerado que consiste de 32 módulos de fitas 2G HTS e um reator <i>shunt</i>	73
5.1	Caso A: Diagrama do sistema para um curto-circuito na linha 1-6, próximo à barra 6, com abertura dos disjuntores DJ1 e DJ2 após 120ms.	76
5.2	Caso A - Corrente passante entre as barras B6 e B12 com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.	77
5.3	Caso A - Corrente de curto-circuito trifásico na barra B6.	78
5.4	Caso A - Corrente nas Fitas 2G HTS, no elemento shunt, e corrente total no limitador da fase A.	78
5.5	Caso A - Tensão fase-terra na barra B6 com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.	79
5.6	Caso A - Tensão fase-terra nos terminais do gerador com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.	79
5.7	Caso A - Queda de tensão sobre o limitador na fase A.	80
5.8	Caso A - Temperatura das camadas das Fitas HTS 2G no limitador da fase A.	81
5.9	Caso A - Impedância total das Fitas 2G HTS, do elemento <i>shunt</i> e impedância equivalente do limitador da fase A.	82
5.10	Caso B: Diagrama do sistema para um curto-circuito na barra 12 com abertura dos disjuntores após 120ms.	83

5.11	Caso B - Corrente na barra B6 com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.	84
5.12	Caso B - Corrente nas Fitas 2G HTS, no elemento <i>shunt</i> e corrente total no limitador da fase A.	84
5.13	Caso B - Queda de tensão sobre o limitador na fase A.	85
5.14	Caso B - Temperatura das camadas das Fitas HTS 2G no limitador da fase A.	85
5.15	Caso B - Impedância total das Fitas 2G HTS, do elemento <i>shunt</i> , e impedância equivalente do limitador da fase A.	87
5.16	Caso C - Diagrama do sistema para curto-circuito em uma das linhas 3-4, com abertura dos disjuntores após 120ms.	88
5.17	Caso C - Corrente de falta na linha 3-4 com e sem a atuação do limitador supercondutor.	88
5.18	Caso C - Corrente no gerador com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.	89
5.19	Caso C - Corrente nas Fitas 2G HTS, no elemento <i>shunt</i> , e corrente total no limitador da fase A.	89
5.20	Caso C - Tensão na barra 4 com e sem o limitador supercondutor.	90
5.21	Caso C - Queda de tensão sobre o limitador na fase A.	90
5.22	Caso C - Temperatura das camadas das Fitas HTS 2G no limitador da fase A.	91
5.23	Caso C - Impedância total das Fitas 2G HTS, do elemento <i>shunt</i> , e impedância equivalente do limitador da fase A.	92
5.24	Comparativo dos níveis de curto-circuito trifásico nas barras de alta tensão.	94
5.25	Comparativo dos níveis de curto-circuito trifásico nas barras de média tensão (geração).	94
B.1	Diagrama do sistema elétrico de potência simulado.	112

Lista de Tabelas

2.1	Prêmios Nobel de Física no campo da supercondutividade (adaptado de [3])	6
2.2	Parâmetros característicos dos principais supercondutores [12] [4].	17
3.1	Comparativo geral das principais características dos limitadores de corrente de curto-circuito.	50
3.2	Comparativo das principais características entre os tipos de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores existentes, adaptado de [17].	51
4.1	Propriedades análogas entre sistemas térmicos e sistemas elétricos.	61
4.2	Níveis de curto-circuito do sistema de transmissão considerado. . .	72
4.3	Parâmetros do limitador supercondutor para o sistema em estudo.	73
5.1	Resumo dos resultados das simulações.	92
B.1	Dados do sistema teste - Linhas de transmissão.	108
B.2	Dados do sistema teste - Transformadores.	109
B.3	Dados do sistema teste - Geradores.	110
B.4	Dados do sistema teste - Cargas.	110
B.5	Dados do sistema teste - Compensação capacitiva.	111

Capítulo 1

Introdução

Com o constante aumento da demanda por energia elétrica em todo mundo, há uma necessidade permanente de ampliação da oferta de energia, o que acarreta a introdução de novas unidades geradoras aos sistemas de potência. Além disso, existe uma tendência cada vez maior do aumento dos pontos de interconexão nos sistemas elétricos com o objetivo de melhorar as características de confiabilidade e flexibilidade de operação. Este processo tem como consequência o aumento dos níveis de curto-circuito nos sistemas elétricos, especialmente nos pontos mais próximos à instalação de novas unidades geradoras e dos pontos de interconexão. O aumento do nível de curto-circuito leva, muitas vezes, à superação dos limites de suportabilidade a curto-circuitos de equipamentos que não tenham sido projetados para os altos níveis de falta tais como linhas de transmissão, transformadores, barramentos e disjuntores. Os principais meios para resolver ou contornar estes problemas consistem em restrições operativas, modificações na topologia das redes, substituição ou recapitação de equipamentos superados e, finalmente, na utilização de limitadores de corrente de curto-circuito.

Os limitadores de corrente de curto-circuito são dispositivos utilizados para atenuar ou até mesmo bloquear os picos das altas correntes de falta com rapidez suficiente para que os disjuntores possam operar com segurança. Dentre estes dispositivos, podemos destacar os limitadores baseados em materiais supercondutores, os quais são considerados uma das tecnologias mais promissoras na limitação de corrente [1].

Os materiais supercondutores têm sido utilizados na pesquisa e desenvolvimento de vários tipos de equipamentos para o setor elétrico. De uma maneira geral, todas as aplicações de supercondutores sofreram um impulso com o desenvolvimento da supercondutividade, principalmente após 1986, quando a supercondutividade de alta temperatura crítica foi descoberta. No caso de limitadores de corrente de curto-circuito, o uso de supercondutores é justificado pelo fato destes apresentarem propriedades intrínsecas que vão de encontro aos requisitos

operativos ideais para um dispositivo limitador.

Neste contexto, os limitadores de corrente de curto-circuito à base de materiais supercondutores de alta temperatura crítica têm sido estudados e desenvolvidos por vários grupos de pesquisa e empresas, de forma que atualmente já existem equipamentos comerciais disponíveis. Entretanto, a instalação de novos dispositivos nos sistemas elétricos deve ser sempre precedida de estudos técnicos que avaliem de forma detalhada o real impacto da instalação dos mesmos. Estes estudos, em geral, são realizados por meio de simulações computacionais, utilizando modelos que representam o limitador e o sistema elétrico integrados. É importante avaliar a atuação do dispositivo tanto do ponto de vista da influência que este exerce ao sistema, como do ponto de vista do controle das suas variáveis internas.

Neste trabalho será analisada a atuação de um limitador supercondutor do tipo resistivo inserido no ponto de acoplamento de uma unidade geradora ao sistema de transmissão. A utilização de limitadores de curto-circuito supercondutores no ponto de conexão de novas unidades geradoras é interessante porque limita a contribuição para a corrente de falta advinda destas fontes diretamente no ponto de acoplamento, fazendo com que a interferência destas fontes para o aumento dos níveis de curto-circuito do sistema seja minimizada, evitando assim superação dos níveis de suportabilidade a curto-circuitos de equipamentos elétricos nas subestações próximas. No presente trabalho, o limitador é instalado na rede de média tensão com o objetivo de limitar a corrente na rede de alta tensão.

Em razão do grande número de variáveis envolvidas no processo de limitação de corrente pelo supercondutor, uma previsão do comportamento dinâmico de um limitador de curto-circuito é bastante complexa e exige modelos detalhados. Neste trabalho, o modelo utilizado para representação do dispositivo é baseado no método da analogia eletro-térmica e provê informações importantes sobre variáveis internas do equipamento, como as temperaturas internas e impedâncias. O sistema de transmissão utilizado como base de teste para o limitador é um sistema teste de 12 barras proposto pelo CIGRE, o qual tem as linhas de transmissão, transformadores, geradores e demais componentes modelados de forma detalhada para simulação dinâmica.

Em resumo, este trabalho irá avaliar de forma detalhada, por meio de simulações computacionais, os impactos da instalação de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor do tipo resistivo no ponto de conexão de uma nova fonte de geração ao sistema de transmissão.

1.1 Objetivos

O presente trabalho visa o estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito, com ênfase nos limitadores supercondutores do tipo resistivo, e tem como principais objetivos:

1. Compreender o problema dos altos níveis de curto-circuito nos sistemas elétrico, assim como as soluções e alternativas que têm sido utilizadas para limitação de corrente;
2. Compreender os fenômenos físicos envolvidos na limitação de corrente de curto-circuito utilizando a tecnologia de materiais supercondutores;
3. Descrever o modelo digital detalhado implementado no programa MATLAB/Simulink para o limitador supercondutor resistivo que será utilizado nas análises realizadas neste trabalho;
4. Validar o modelo digital implementado através da comparação dos resultados das simulações com um ensaio realizado com uma amostra real do dispositivo;
5. Investigar, através de simulações, a interferência da instalação de limitadores de corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento de uma nova unidade geradora em um sistema teste de transmissão.

1.2 Estrutura do Texto

A estrutura deste trabalho está dividida em 6 capítulos e 2 apêndices. Neste capítulo, foi apresentada uma introdução ao tema e os principais objetivos do trabalho. Sem qualquer intenção de esgotar o tema, o Capítulo 2 apresenta um breve resumo da teoria da supercondutividade, incluindo os principais conceitos físicos e os tipos e classificações dos materiais supercondutores, objetivando a contextualização e compreensão dos fenômenos que regem o funcionamento dos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores. No Capítulo 3, apresentaremos uma síntese do problema das altas correntes de curto-circuito nos sistemas elétricos e uma descrição e comparação dos tipos e conceitos de limitadores existentes, com enfoque nos limitadores baseados em supercondutores. No Capítulo 4 são descritos os procedimentos realizados com o objetivo de avaliar a atuação de um limitador supercondutor resistivo em um sistema de potência teste. Neste capítulo, o modelo utilizado é desenvolvido e validado com resultados experimentais, bem como é implementado para simulação integrada com sistemas elétricos.

Capítulo 1- Introdução

Ainda neste capítulo, o sistema teste que será utilizado como base para as simulações do limitador é descrito e o limitador supercondutor resistivo é dimensionado para o caso de estudo. No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados de simulação, os quais são obtidos por meio da simulação de três casos de curto-circuito. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões finais do trabalho e sugestões de trabalhos futuros. O Apêndice A apresenta a rotina de simulação do limitador supercondutor e o Apêndice B apresenta os dados detalhados do sistema teste considerado.

Capítulo 2

Supercondutividade e Materiais Supercondutores

2.1 Supercondutividade

A supercondutividade é o fenômeno pelo qual certos materiais apresentam ausência de resistência elétrica em corrente contínua quando resfriados abaixo de determinada temperatura, denominada temperatura crítica.

Este fenômeno foi descoberto pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes em 1911 a partir de suas pesquisas sobre a resistividade de metais submetidos a temperaturas da ordem de alguns Kelvin [2]. Hoje se sabe que a supercondutividade não é um fenômeno raro, ocorrendo com diversos materiais para diferentes temperaturas críticas, incluindo mais de vinte elementos da Tabela periódica e milhares de ligas metálicas e compostos cerâmicos.

A Figura 2.1 apresenta uma linha do tempo da descoberta dos principais materiais supercondutores ao longo dos anos. Até a década de 1980 todos os materiais supercondutores conhecidos apresentavam temperatura crítica inferiores a 25 K, sendo necessária a utilização de fluidos criogênicos como refrigerantes, tais como hélio líquido (4,2 K) e hidrogênio líquido (21 K). Em 1986 foram descobertos materiais que possuem temperatura crítica mais elevadas quando comparados aos citados anteriormente, sendo que alguns deles podem ser resfriados com nitrogênio líquido (77 K). Até hoje não foram descobertos materiais supercondutores em temperatura ambiente.

A resistividade nula, porém, é apenas uma das propriedades da supercondutividade. Desde a sua descoberta até os tempos atuais, este fenômeno despertou e desperta fascínio no mundo científico em função das características peculiares que estes materiais apresentam e conseqüentemente do grande potencial para aplicações na engenharia. Como exemplo do grande interesse e das importantes realiza-

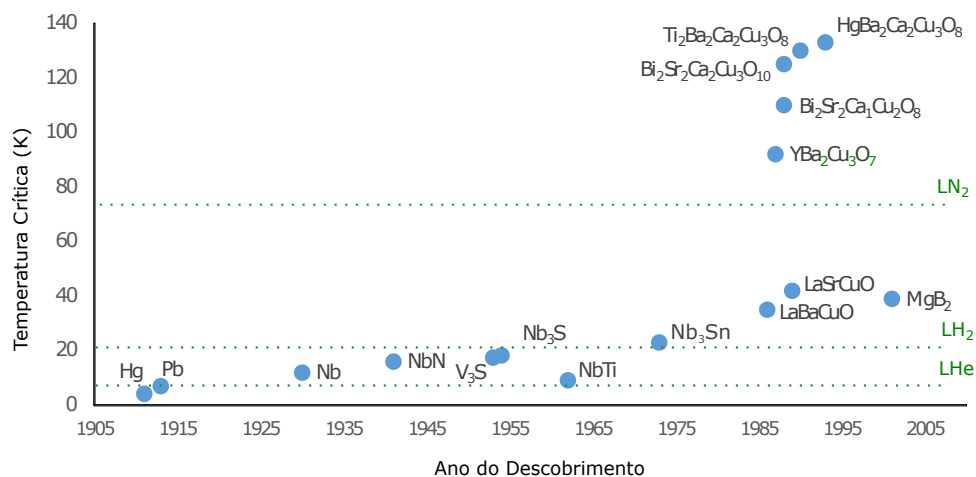


Figura 2.1: Descoberta de alguns dos principais materiais supercondutores ao longo dos anos.

ções no campo supercondutividade, podemos citar o elevado número de prêmios Nobel de Física distribuídos somente nesta área do conhecimento [3], que incluiu o próprio Onnes pela liquefação do hélio e descobrimento do fenômeno e mais quatro grupos de pesquisadores por realizações posteriores, conforme mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Prêmios Nobel de Física no campo da supercondutividade (adaptado de [3])

Ano	Pesquisador	Realização
1913	Heike Kamerlingh Onnes	Liquefação do Hélio e contribuições na descoberta da supercondutividade
1972	John Bardeen Leon Neil Cooper John Robert Schrieffer	Desenvolvimento da teoria BCS
1973	Brian David Josephson Leo Esaki Ivar Giaever	Previsão e comprovação do efeito Josephson
1987	Johannes Georg Bednorz Karl Alexander Müller	Descoberta do primeiro supercondutor de alta temperatura crítica
2003	Alexei Alexeyevich Abrikosov Vitaly Lazarevich Ginzburg Anthony James Leggett	Contribuições pioneiras à teoria de supercondutores e superfluidos

Até hoje, após mais de um século de desenvolvimento, as teorias utilizadas para explicar e descrever o comportamento dos materiais supercondutores ainda estão incompletas e são insuficientes para prever toda a fenomenologia que envolve a supercondutividade, especialmente no caso dos supercondutores de alta temperatura crítica. Apesar disso, aplicações da supercondutividade na enge-

nharia elétrica vêm sendo realizadas com sucesso e a produtividade neste ramo é intensa. Podemos citar as seguintes aplicações:

- Cabos de transmissão de energia elétrica
- Limitadores de corrente de curto-circuito
- Dispositivos armazenadores de energia supercondutores (SMES)
- Motores, geradores e transformadores
- Trens de levitação magnética (MagLev)
- Mancais magnéticos
- Bobinas para ressonância magnética nuclear
- Bobinas para separador magnético industrial
- Grandes projetos científicos tais como Grande Colisor de Hádrons (LHC)

Foge ao escopo deste trabalho apresentar toda a teoria de materiais supercondutores. Assim, o objetivo deste capítulo é apresentar um breve resumo da teoria da supercondutividade e dos tipos e classificações dos materiais supercondutores, com ênfase em fornecer a base necessária para compreensão do princípio de funcionamento dos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores.

2.2 Resistência Zero

Após o sucesso em liquefazer o gás hélio pela primeira vez em 1908 e obter assim temperaturas da ordem de 4,2 K, Heike Kamerlingh Onnes iniciou estudos sobre o comportamento de metais submetidos a baixíssimas temperaturas. Em 1911, Onnes verificou experimentalmente que a resistividade do mercúrio parecia desaparecer completamente quando o metal era submetido a temperaturas inferiores a 4,2 K, conforme Figura 2.2a [2]. Posteriormente, Onnes verificou resultados semelhantes para o chumbo (em temperatura de 7,2 K) e para o estanho (em temperatura de 3,7 K). Podemos dizer que certos materiais transitam de seu estado normal para um estado supercondutor sob determinadas circunstâncias, apresentando, dentre outras propriedades, a ausência total de resistividade elétrica. Desde a descoberta de Onnes, a temperatura característica abaixo da qual o material passa a apresentar supercondutividade é chamada de temperatura crítica (T_c).

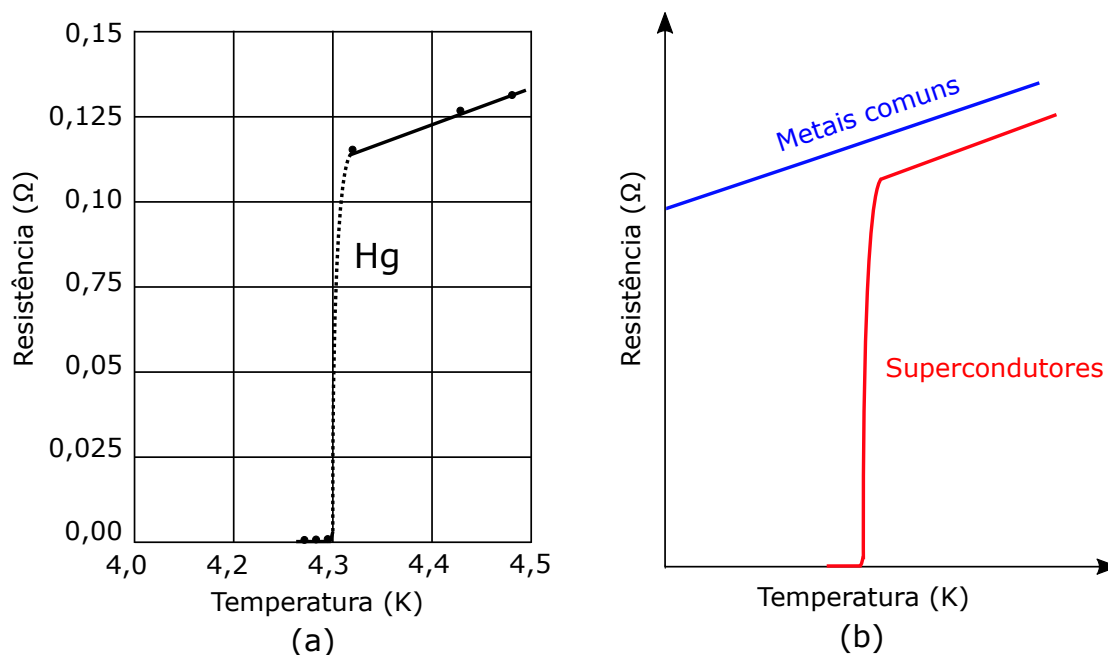


Figura 2.2: (a) Queda abrupta na resistividade do mercúrio em 4,2K observada por Onnes [2] e (b) Queda da resistividade do supercondutor e dos metais normais.

Este curioso comportamento apresentado pelos supercondutores é diferente da queda gradual da resistividade apresentada pela maioria dos metais, como mostra a Figura 2.2b.

Naturalmente não é possível medir de forma absoluta se a resistência no estado supercondutor é de fato zero ou algum valor muito pequeno, tendo em vista que a precisão dos equipamentos de medição é sempre limitada. A partir de uma técnica que consiste em induzir corrente em um anel supercondutor é possível demonstrar que mesmo após longos períodos de tempo não há indicação de decréscimo significativo na intensidade desta corrente. Por esta técnica, é possível estimar que a resistência do supercondutor seria no mínimo dezessete ordens de grandeza menor do que a resistência do cobre [4]. Parece razoável, portanto, tratar a resistência elétrica de um supercondutor em corrente contínua como zero.

No entanto, os supercondutores apresentam resistência quando carregam uma corrente elétrica variante no tempo (corrente alternada). Essa resistência dá origem às chamadas perdas em corrente alternada que, embora sejam valores bastante inferiores quando comparados a condutores convencionais, não são desprezíveis e precisam ser compensadas pelo sistema de refrigeração do supercondutor [4].

Onnes também observou em seus experimentos que a supercondutividade desaparecia quando o material era submetido a certo valor de campo magnético, ainda que sob temperaturas menores do que T_c . Este valor de campo magnético foi posteriormente denominado densidade de campo magnético crítico B_c . Vere-

mos na Seção 2.5 que os supercondutores do Tipo II apresentam um estado intermediário entre o estado supercondutor e o estado normal e possuem dois campos críticos B_{c1} e B_{c2} .

Além disso, embora possa conduzir corrente sem resistência elétrica, o supercondutor também perde suas propriedades se a densidade de corrente transportada assume valores superiores a certo valor, valor este denominado densidade de corrente crítica J_c .

Portanto, pode-se dizer que o fenômeno da supercondutividade ocorre quando os três parâmetros críticos básicos T_c , B_c e J_c são simultaneamente respeitados no supercondutor. Estes parâmetros não são independentes e apresentam uma forte correlação entre si. Para o caso mais simples dos supercondutores do Tipo I, a interdependência entre os parâmetros pode se representada pela superfície de transição da Figura 2.3. Em qualquer ponto de operação dentro do volume envolvido pela superfície, o material encontra-se em seu estado supercondutor ($T < T_c$, $B < B_c$ e $J < J_c$), enquanto em qualquer ponto fora deste volume o material encontra-se em seu estado normal ($T > T_c$, $B > B_c$ e $J > J_c$).

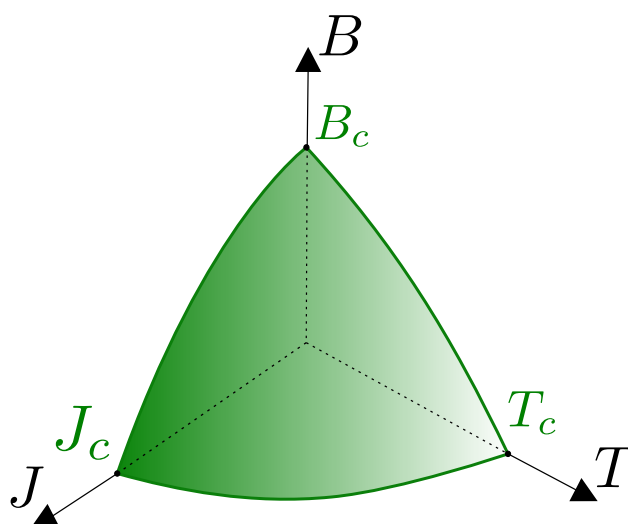


Figura 2.3: Correlação das condições para supercondutividade nos supercondutores do Tipo I.

2.3 Efeito Meissner-Ochsenfeld

Em 1933, Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram que os supercondutores eram também diamagnéticos perfeitos [5], ou seja, o estado supercondutor é caracterizado não apenas pela resistividade nula, mas também pela expulsão do fluxo magnético no interior do supercondutor, independentemente do estado inicial. Esta notável propriedade dos supercondutores ficou conhecida como Efeito Meissner-Ochsenfeld em homenagem aos descobridores.

Em uma amostra supercondutora, quando ocorre a transição do estado normal ($T > T_c$) para o estado supercondutor ($T < T_c$) na presença de um campo magnético aplicado menor do que o campo magnético crítico ($B_a < B_c$), pode-se dizer que a densidade de fluxo magnético no interior do supercondutor é anulada por correntes de blindagens que surgem na superfície do supercondutor. Estas correntes induzem uma densidade de fluxo magnético desmagnetizante B_m igual e oposta ao campo aplicado, de forma que o resultado final é uma densidade de fluxo magnético nula ($\vec{B} = 0$) no interior do supercondutor, conforme representado na Figura 2.4.

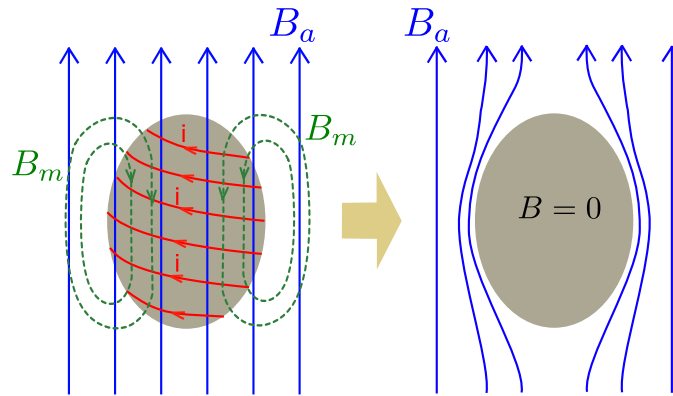


Figura 2.4: Interação do campo aplicado e o campo desmagnetizante, resultando em densidade de fluxo magnético nula no interior do supercondutor.

Para uma abordagem prática, é possível obter a curva de magnetização de um supercondutor da forma:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.1)$$

Sendo M a magnetização e H o campo magnético aplicado. Como $\vec{B} = 0$ no interior do supercondutor, temos que:

$$\vec{H} = -\vec{M} \quad (2.2)$$

É importante observar que o Efeito Meissner-Ochsenfeld mostra que um supercondutor não pode ser descrito simplesmente como sendo um condutor perfeito que obedece a lei de Faraday [4]. De fato, um condutor perfeito reagiria à variação de fluxo magnético no seu interior e não simplesmente à presença de um campo magnético estático. A Figura 2.5a apresenta o Efeito Meissner-Ochsenfeld em um supercondutor a partir do resfriamento do material com um campo aplicado B_a , em oposição ao comportamento que hipoteticamente ocorreria no caso de um condutor perfeito (Figura 2.5b). O supercondutor expulsa o campo interno independentemente do estado inicial, sendo este efeito reversível quando deixa-se de aplicar um campo externo ($B_a = 0$). Já o condutor perfeito reage a qualquer

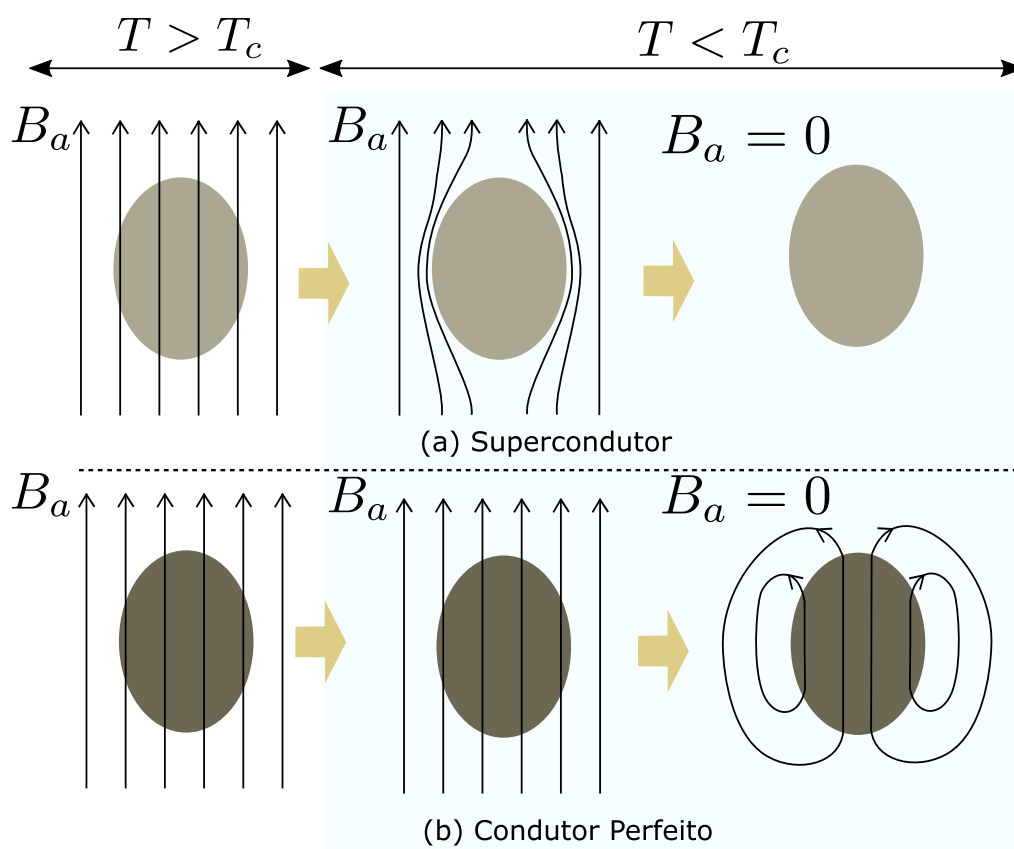


Figura 2.5: Comparação do comportamento do material supercondutor (a) e de um condutor perfeito (b) quando resfriados abaixo da temperatura crítica submetidos a um campo aplicado.

variação do campo aplicado, não expulsando o campo interno se o mesmo estiver previamente aplicado.

Como será visto na Seção 2.5, nos supercondutores do Tipo I o Efeito Meissner-Ochsenfeld é total, enquanto nos supercondutores do Tipo II há também um estado intermediário em que existe uma pequena penetração das linhas de campo magnético para dentro do material. Embora não seja o caso do Efeito Meissner-Ochsenfeld total, a maneira mais comum de se demonstrar a expulsão das linhas de campo nos supercondutores é pela levitação magnética. Ao colocarmos um pequeno ímã sobre uma amostra supercondutora resfriada abaixo de T_c , veremos que este irá flutuar devido a força magnética proveniente da circulação de correntes superficiais, força esta que se opõe a força gravitacional exercida sobre o ímã. A Figura 2.6 representa o efeito de levitação magnética.

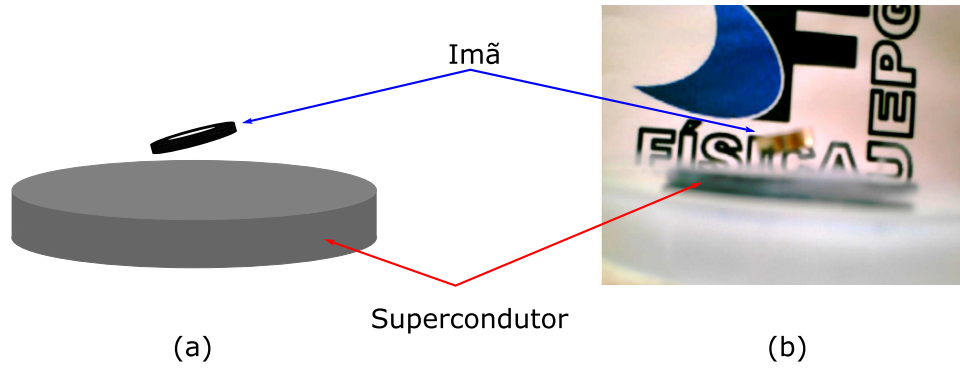


Figura 2.6: Exemplo do fenômeno de levitação magnética: (a) ilustração e (b) fotografia [6].

2.4 Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência

2.4.1 Profundidade de Penetração

Os irmãos Fritz e Hanz London propuseram em 1935 uma teoria capaz de descrever a supercondutividade e o efeito Meissner a partir de uma abordagem fenomenológica [7]. A teoria baseia-se no modelo de dois fluidos que assume a existência de elétrons normais e elétrons responsáveis pela supercondutividade, os chamados superelétrons. A densidade de corrente total seria portanto o somatório da densidade de corrente devido aos superelétrons (\vec{J}_s) com a densidade de corrente devido aos elétrons normais (\vec{J}_n):

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_s. \quad (2.3)$$

Enquanto a densidade de corrente normal segue a lei de Ohm ($J_n = \rho E$), a densidade de corrente de superelétrons, também chamada supercorrente, respeita equações conhecidas como equações de London:

$$\nabla \times \vec{J}_s = -\frac{1}{\mu_0 \lambda^2} \vec{B} \quad (2.4)$$

e

$$\frac{d\vec{J}_s}{dt} = \frac{1}{\mu_0 \lambda^2} \vec{E}, \quad (2.5)$$

sendo \vec{E} e \vec{B} os campos elétrico e magnético, μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo e λ a profundidade de penetração de London, que por sua vez é dada por [4]:

$$\lambda = \frac{\int_0^\infty B(x) dx}{B_a} = \sqrt{\frac{m^* c^2}{4\pi e^2 n_s}}, \quad (2.6)$$

em que m^* é a massa do elétron, e é a carga do elétron, c a velocidade da luz no vácuo e n_s é o número de superelétrons por unidade de volume.

A profundidade de penetração λ é um dos mais importantes parâmetros característicos dos supercondutores, pois mede o quão grande é a penetração do campo magnético na superfície do supercondutor.

A teoria de London prevê a existência do Efeito Meissner-Ochsenfeld, uma vez que sua solução indica que o campo tende a zero no interior do supercondutor. Por exemplo, a Equação 2.5, de London, aplicada para um caso unidimensional na fronteira entre um supercondutor semi-infinito e o vácuo (Figura 2.7), assume a forma:

$$\frac{\delta^2 \vec{B}}{\delta x^2} = \frac{1}{\mu_0 \lambda^2} \vec{B}, \quad (2.7)$$

e a solução é do tipo

$$B = B_a e^{-x/\lambda}. \quad (2.8)$$

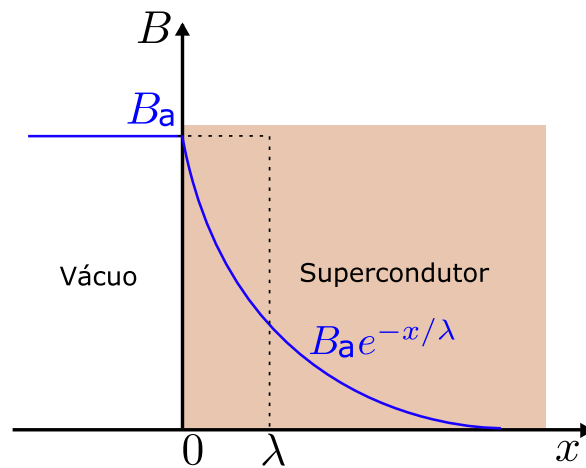


Figura 2.7: Penetração do campo magnético na superfície do supercondutor.

Verifica-se, portanto, que há uma queda exponencial do campo magnético à medida que o mesmo penetra no interior do supercondutor, sendo esta queda tão acentuada quanto menor for o valor da profundidade de penetração λ do material. Sabe-se que λ é muito pequeno, na ordem de dezenas de nanômetros para os metais supercondutores. O valor de λ varia fortemente com a temperatura, divergindo em $T = T_c$ e aproximando-se de um valor aproximadamente independente da temperatura (λ_0) para temperaturas baixas. A variação de λ com a temperatura que é obtida experimentalmente é dada por:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 - (T/T_c)^4} \quad (2.9)$$

2.4.2 Comprimento de Coerência

As equações de London não são aplicáveis em situações nas quais a densidade de superelétrons n_s varia com o campo aplicado ou com a corrente, não sendo capazes de descrever satisfatoriamente os supercondutores do Tipo II.

Por este motivo, os russos Ginzburg e Landau desenvolveram um modelo fenomenológico a partir do qual derivaram duas equações através da minimização da energia livre. Os portadores de carga do estado supercondutor são tratados como um fluido quântico descrito por uma função de onda macroscópica que representa o parâmetro de ordem complexo da transição supercondutora, de tal forma que o seu módulo representa a densidade de superelétrons n_s . Maiores detalhes da teoria de Ginzburg e Landau podem ser obtidos em [4] e [8]. A teoria de Ginzburg e Landau introduziu, além do comprimento de penetração de London λ , o comprimento de coerência ξ , o qual indica o comprimento típico sobre o qual o parâmetro de ordem pode variar. É possível representar a variação de n_s na fronteira entre um supercondutor semi-infinito e o vácuo conforme Figura 2.8. O valor de n_s cresce desde zero até um valor aproximadamente constante no interior do supercondutor. O quão acentuada ocorre esta transição é determinado pelo comprimento de coerência ξ , que é um parâmetro típico próprio de cada material supercondutor.

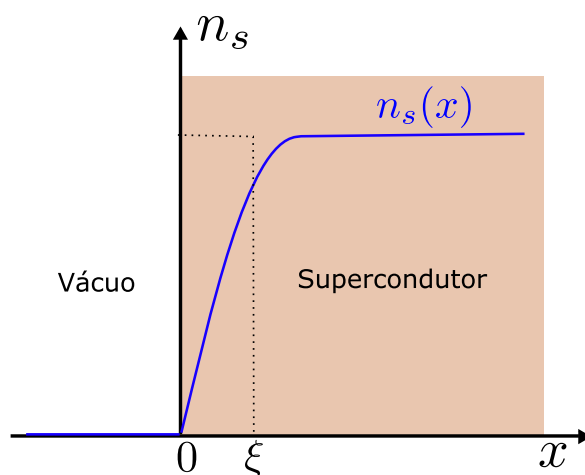


Figura 2.8: Variação da densidade de superelétrons na superfície do supercondutor.

Apesar do sucesso das teorias fenomenológicas dos London e de Ginzburg-Landau, a grande contribuição teórica para a explicação da supercondutividade foi dada pelos americanos Bardeen, Cooper e Schrieffer (Teoria BCS) com a proposição da teoria microscópica da supercondutividade em 1957 [9]. Foge ao escopo deste trabalho apresentar detalhes da Teoria BCS, que podem ser encontradas em [8]. A Teoria BCS prevê que os superelétrons formam os chamados pares de Cooper a partir de sua interação com a rede cristalina do material, de forma que estes

elétrons são capazes de se movimentarem livremente dentro do supercondutor. Tal combinação de elétrons também determina o comprimento de coerência ξ , que corresponde, em termos microscópicos, à distância entre os elétrons dentro do par de Cooper.

2.5 Tipos de Supercondutores

Nos primeiros experimentos, observava-se que os supercondutores não permitiam penetração do campo magnético antes da perda da supercondutividade. No entanto, posteriormente foi verificado experimentalmente que certos supercondutores mantinham a sua resistência elétrica nula e ao mesmo tempo permitiam penetração parcial de campos magnéticos no interior do material, de forma que era possível observar a coexistência do estado supercondutor e o estado normal no material supercondutor.

Sugerido por Abrikosov [10], o parâmetro de Ginzburg-Landau (κ) é um importante parâmetro para classificação dos tipos de materiais supercondutores, sendo este definido como a razão entre a profundidade de penetração (λ) e o comprimento de coerência (ξ):

$$\kappa = \lambda/\xi \quad (2.10)$$

Embora λ e ξ sejam fortemente dependentes da temperatura, a razão entre as duas grandezas é aproximadamente independente da temperatura quando próximo da temperatura crítica, de forma que κ pode ser utilizado para distinguir os materiais supercondutores em dois tipos: Tipo I e Tipo II. Se $\kappa < 1/\sqrt{2}$, o supercondutor é dito do Tipo I e se $\kappa > 1/\sqrt{2}$, então o supercondutor é dito do Tipo II.

A principal diferença entre os dois tipos de supercondutores é em relação a suas respostas a um campo magnético externo aplicado, como mostra a Figura 2.9.

Os supercondutores do Tipo I possuem dois estados básicos: estado supercondutor e estado normal. O estado supercondutor repele totalmente o fluxo interno (Efeito Meissner-Ochenfeld). Para valores de campo magnético aplicado imediatamente superior ao campo crítico B_{c1} , o supercondutor transita para o estado normal, perdendo a supercondutividade (Figura 2.9a).

Os supercondutores do Tipo II possuem dois campos críticos: campo crítico inferior (B_{c1}) e campo crítico superior (B_{c2}). O estado supercondutor com expulsão total do fluxo interno (Efeito Meissner-Ochenfeld) ocorre apenas para pequenos campos aplicados, inferiores a B_{c1} . Para campos superiores a B_{c1} o supercondutor transita para o estado normal. No entanto, para campos aplicados superiores a

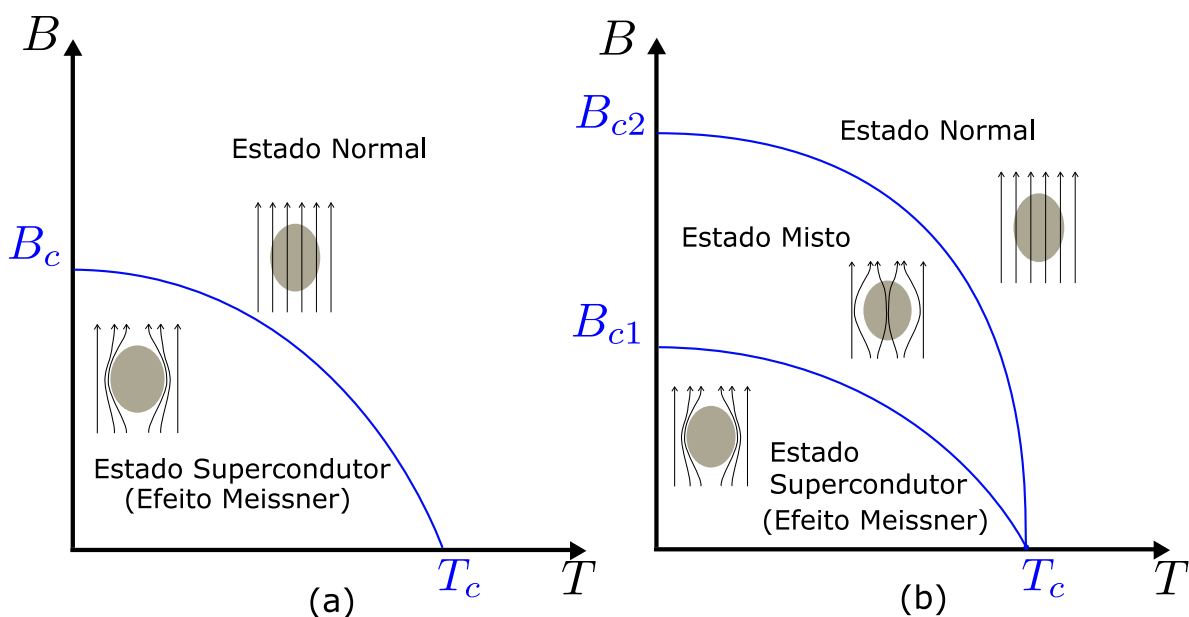


Figura 2.9: Diagrama de estados para o supercondutor do (a) Tipo I e supercondutor do (b) Tipo II.

B_{c1} e inferiores a B_{c2} , o fluxo começa a penetrar no supercondutor na forma de filamentos microscópicos denominados vórtices. Este estado intermediário em que coexistem o estado supercondutor e o estado normal é chamado estado misto, e foi verificado experimentalmente por Shubnikow [11] em 1937 e explicado teoricamente por Abrikosov [10] em 1957.

O estudo da dinâmica de vórtices em materiais supercondutores tem sido muito intenso nos últimos anos, tendo em vista que em aplicações práticas, o movimento de vórtices é capaz de destruir a supercondutividade. A compreensão deste fenômeno é fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e será abordada na Seção 2.6.

A Tabela 2.2 apresenta as características de alguns materiais supercondutores. Somente os supercondutores do Tipo II são utilizados em aplicações na área de engenharia elétrica em função dos seus maiores valores de temperatura crítica e campo crítico superior B_{c2} , os quais são apresentados na Tabela 2.2. O campo crítico inferior B_{c1} , assim como o campo crítico B_c dos supercondutores do Tipo I, é em geral muito pequeno, na ordem de mT , de forma que as aplicações da supercondutividade tornam-se viáveis somente para os supercondutores do Tipo II no estado misto ($B_{c1} < B < B_{c2}$). Destacam-se o $NbTi$ e o Nb_3Sn como duas ligas metálicas amplamente utilizados como supercondutores, bem como os supercondutores de alta temperatura crítica que serão abordados a seguir.

Tabela 2.2: Parâmetros característicos dos principais supercondutores [12] [4].

Supercondutor	Tipo	T_c K	$B_c(0K)$ T	$\lambda(0 K)$ nm	$\xi(0K)$ nm
<i>Hg</i>	I	4,2	0,04	–	55
<i>Pb</i>	I	7,2	0,08	37	510
<i>Al</i>	I	1,1	0,01	16	1600
<i>Nb</i>	II	9,2	0,2	39	38
<i>NbTi</i>	II	9,3	13	300	4
<i>Nb₃Sn</i>	II	18	23	65	3
<i>MgB₂</i>	II	39	16	140	5,2
<i>YBa₂Cu₃O₇</i>	II	91	670	150	2
<i>Bi₂Sr₂CaCu₂O₈</i>	II	90	280	300	3
<i>Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀</i>	II	110	250	150	1,5
<i>HgBa₂Ca₂Cu₃O₈</i>	II	135	160	–	1,42

2.5.1 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica

Apesar do enorme sucesso alcançado pela Teoria BCS, ela previa um limite teórico de que a supercondutividade apenas poderia existir abaixo de uma temperatura crítica de cerca de 32 K, pois, acima desta faixa, segundo a teoria, a energia térmica levaria à destruição dos pares de Cooper. Foi uma grande surpresa no mundo científico quando Bednorz e Muller descobriram a supercondutividade do composto *LaBaCuO* com temperatura crítica entre 30 K e 40 K [13]. A partir de então houve grande esforço científico para descoberta e desenvolvimento de novos materiais com temperaturas críticas cada vez mais altas, os quais foram chamados de supercondutores de alta temperatura crítica (em inglês, *High Temperature Superconductors* - HTS).

Supercondutores com temperaturas críticas acima de 25 K já são considerados supercondutores de alta temperatura crítica. Hoje já são conhecidos supercondutores com T_c acima de 130 K. A grande vantagem de um supercondutor possuir T_c acima de 77 K vem do fato de ser esta a temperatura de liquefação do nitrogênio. O nitrogênio é o elemento mais abundante de nossa atmosfera e é relativamente barato e fácil de liquefazer, o que amplia o potencial das aplicações tecnológicas dos supercondutores.

Os supercondutores de alta temperatura crítica são exemplos extremos de supercondutores do Tipo II: Possuem grande profundidade de penetração e pequeno comprimento de coerência ($\lambda \gg \xi$) e portanto o parâmetro κ muito alto.

O valor do campo crítico inferior (B_{c1}) é em geral muito baixo e o campo crítico superior (B_{c2}) pode ser extremamente alto, como pode ser visto na Tabela 2.2.

Os mais importantes supercondutores de alta temperatura são compostos óxido de cobre do tipo cerâmicos. Estes são formados por estruturas de camadas cristalinas, nas quais os planos que contêm os átomos de oxigênio e cobre são os responsáveis pelo transporte de corrente. Isso explica o fato de as propriedades supercondutoras no material serem extremamente anisotrópicas, ou seja, tanto a corrente crítica quanto o campo crítico são bem maiores na direção paralela do plano de óxido-cobre do que na região perpendicular. Um ponto importante, é que os materiais cerâmicos são, em geral, mecanicamente frágeis, o que dificulta a sua aplicação prática. Atualmente destacam-se dois tipos principais de materiais supercondutores de alta temperatura crítica para aplicações de engenharia:

- Óxido de ítrio-bário-cobre - YBCO

Sendo o primeiro composto descoberto que apresenta supercondutividade com temperatura crítica acima de 77 K, o $YBa_2Cu_3O_7$ ou YBCO apresenta T_c da ordem de 91 K. As propriedades supercondutoras deste sistema praticamente não se alteram quando o Ítrio é substituído pela maioria dos átomos da família de terras-raras (La, Nd, Gd, Lu, Ho, Sm, Eu, Dy, Er, Tm, Yb). O YBCO apresenta bom desempenho em relação a campos magnéticos mas possui fraca ligação entre os grãos supercondutores, sendo mais adequado para fabricação de fitas supercondutoras. As fitas supercondutoras produzidas com este material em escala industrial fazem parte da chamada segunda geração de supercondutores de alta temperatura (2G-HTS).

- Óxido de bismuto-estrôncio-cálcio-cobre - BSCCO

Diferentemente do YBCO, o BSCCO não apresenta elementos de terras raras. O BSCCO pode existir em duas principais variações: $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ (Bi2212) com temperatura crítica de 90 K e $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Bi2213) com temperatura crítica de 110 K. O composto Bi2212 é muito utilizado para produção de compostos massivos como discos, cilindros e barras. Já o Bi2213 é mais adequado para produção de fitas e cabos supercondutores. Os cabos e fitas feitos de BSCCO são conhecidos como a primeira geração de supercondutores de alta temperatura (1G-HTS).

2.6 Dinâmica dos Vórtices

Como vimos anteriormente, os supercondutores de alta temperatura crítica são exemplos de supercondutores do Tipo II. Estes apresentam o estado misto onde é possível existir regiões no estado normal, em que há penetração de linhas de

campo, dentro do material no estado supercondutor. Estas regiões são denominadas vórtices.

Cada vórtice formado no estado misto consiste de uma região que tem formato tubular dentro da qual a supercondutividade é destruída. Ao redor de cada vórtice fluem supercorrentes que blindam a região em estado supercondutor da região interna do vórtice em estado normal conforme mostra a Figura 2.10a. Sabe-se ainda que cada vórtice carrega uma quantidade de fluxo quantizada Φ (*fluxon*) no valor de:

$$\Phi = \frac{h}{2e} = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Wb.} \quad (2.11)$$

A penetração da densidade de campo magnético no vórtice se dá numa distância da ordem da profundidade de penetração λ , atingindo seu máximo no centro de cada vórtice, vide Figura 2.10b. De forma oposta, a densidade de superelétrons decai desde a borda ate o centro do vórtice de acordo com o comprimento de coerência ξ , tornando-se nula no centro (Figura 2.10c).

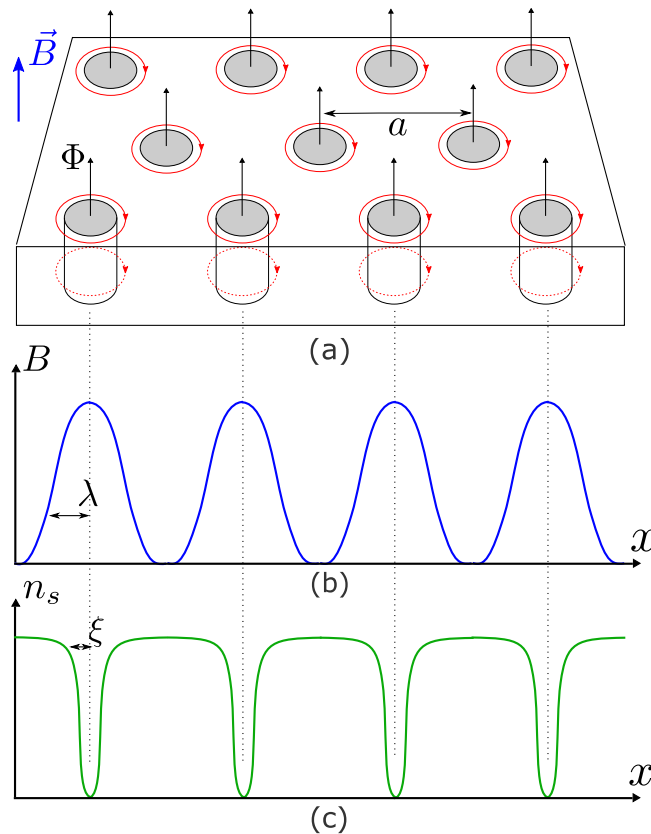


Figura 2.10: Rede de vórtices triangular formada no estado misto (a) e a variação do campo magnético (b) e da densidade de superelétrons (c) ao longo do supercondutor.

Conforme estes vórtices penetram no supercondutor surge uma força de repulsão entre eles que é contrabalanceada pela força exercida pelo campo magnético

externo. A interação entre dois vórtices é dada por:

$$\vec{f}_2 = \vec{J}_1 \times \Phi, \quad (2.12)$$

sendo \vec{f}_2 a força exercida no vórtice 1 pelo vórtice 2 e \vec{J}_1 a densidade de supercorrentes no vórtice 1. Esta força está ao longo da linha que liga os vórtices e é proporcional à densidade de supercorrentes dos vórtices.

É possível calcular, a partir da generalização de 2.12, que a rede mais estável para a interação de um conjunto de vórtices é uma rede triangular uniforme com distância a entre 2 vórtices dada por [4]

$$a = \sqrt{\frac{2\Phi}{\sqrt{3}B}}. \quad (2.13)$$

A rede de vórtices é também conhecida como rede de Abrikosov (Figura 2.10a), e a é chamado de parâmetro da rede.

Se, em adição às supercorrentes ao redor dos vórtices, o supercondutor for submetido a uma corrente de transporte J , conforme mostrado Figura 2.11, haverá uma interação entre cada vórtice com esta corrente. Esta interação pode ser descrita pela força de Lorentz para cada vórtice:

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{\Phi}, \quad (2.14)$$

e, sendo k o número de vórtices por unidade de área, a rede completa estará sujeita a:

$$\vec{F} = \vec{J} \times k\vec{\Phi} = \vec{J} \times \vec{B}. \quad (2.15)$$

No caso de um material supercondutor ideal, ou seja, num cristal perfeito sem nenhum defeito, esta rede estará livre para se mover sobre o efeito da força de Lorentz. Considerando que estes vórtices se movem com uma velocidade \vec{v} , surge um campo elétrico induzido paralelo à direção da densidade de corrente:

$$\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v}. \quad (2.16)$$

Como resultado, tem-se uma tensão elétrica associada ao movimento do vórtice que gera dissipação de energia, e portanto resistência elétrica. Esta resistividade é conhecida como resistividade de *flux flow* e é uma fração da resistividade do material em estado normal. Embora não se trate de um processo resistivo idêntico a um condutor normal em termos microscópicos, o efeito é o mesmo, uma vez que a energia dissipada para movimentar o sistema de vórtices resulta em aquecimento, podendo levar o material a transitar para o estado normal. Em resumo, um

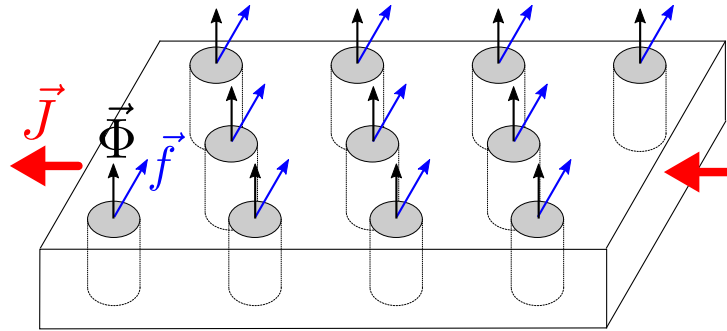


Figura 2.11: Força de Lorentz gerada nos vórtices em função da interação com a corrente de transporte.

supercondutor ideal do Tipo II em seu estado misto apresenta resistência elétrica não nula.

Em materiais supercondutores reais, defeitos na rede cristalina do material supercondutor interagem com a rede de vórtices, gerando uma força de aprisionamento \vec{F}_p (*pinning force*) que se contrapõe à força de Lorentz, impedindo o deslocamento da rede de vórtices e permitindo que haja condução de corrente pelo supercondutor no estado misto sem dissipação de energia. A força de aprisionamento é finita e depende da forma geométrica do supercondutor e de sua micro-estrutura. Quando a corrente é aumentada, a força de Lorentz também aumenta, até que ultrapasse a força de aprisionamento. Quando isto ocorre, o supercondutor passa a apresentar um estado dissipativo (condutividade finita). A densidade de corrente que gera uma força de Lorentz igual à força de aprisionamento é dita densidade de corrente crítica J_c , de forma que podemos observar, de forma simplificada, dois regimes de operação:

1. Regime não dissipativo: $|\vec{J}| < |\vec{J}_c| \Rightarrow |\vec{F}| < |\vec{F}_p|$
2. Regime dissipativo: $|\vec{J}| > |\vec{J}_c| \Rightarrow |\vec{F}| > |\vec{F}_p|$

Assim sendo, a densidade de corrente crítica J_c para os supercondutores do Tipo II significa a máxima densidade de corrente que o supercondutor consegue suportar no regime não dissipativo, e portanto antes do aparecimento de resistência elétrica [14].

A corrente crítica J_c de um determinado supercondutor pode ser aumentada pela introdução de centros de aprisionamento de vórtices em seu processo de produção. Porém, este aumento de J_c tem um limite teórico, que é conhecido como densidade de corrente de deparamento J_d (*deparing critical current*) [15]. Este nome se refere à quebra dos pares de Cooper, os superelétrons na Teoria BCS. Assim, $J_c \leq J_d$ para supercondutores do Tipo II. Já para os supercondutores do Tipo I não há esta diferenciação de conceitos ($J_c = J_d$), uma vez que estes não apresentam o estado misto.

2.6.1 Curva E-J

O conhecimento do valor da densidade de corrente crítica J_c é fundamental para as aplicações com supercondutores, especialmente no caso dos supercondutores de alta temperatura crítica. Esta determinação pode ser feita por medições de densidade de corrente (J) aplicada em uma amostra supercondutora a partir de critérios de campo elétrico ou resistividade, sendo mais comum o critério de campo elétrico. Considera-se que a partir de um determinado campo elétrico crítico E_c o supercondutor passa ao estágio dissipativo e portanto a corrente aplicada é igual à corrente crítica ($J = J_c$). Normalmente, este critério é adotado como [12, 16]:

$$E_c = 1 \mu V/cm. \quad (2.17)$$

Quando a densidade de corrente de transporte aplicada é muito baixa e gera forças de Lorentz inferiores à máxima força de aprisionamento, não há qualquer movimentação da rede de vórtices. Na medida em que aplicamos uma corrente crescente no material supercondutor, nota-se que o campo elétrico E passa a aumentar para valores superiores a E_c . Podem ser identificados 3 estágios principais nesta transição:

- *Flux Creep*: a densidade de corrente de transporte gera forças de Lorentz superiores, mas na mesma ordem de grandeza das forças de aprisionamento, o que acarreta em um lento movimento dos vórtices e campo elétrico superior a E_c .
- *Flux Flow*: a densidade de corrente de transporte gera forças de Lorentz bem maiores do que as forças de aprisionamento, o que acarreta em um movimento livre dos vórtices no material supercondutor.
- Normal: o material perde totalmente as propriedades da supercondutividade e passa para o estágio normal, não existindo mais a rede de vórtices. A curva E-J passa a ter uma característica linear.

Quando não há campo magnético externo aplicado, o campo elétrico pode ser considerado uma função da densidade de corrente e da temperatura e a Equação 2.18 pode ser utilizada para descrever os três estágios principais da curva $E - J$ [17].

$$E(J, T) = E_c \left[\frac{J}{J_c(T)} \right]^n. \quad (2.18)$$

Apesar de existirem diferentes formas de modelagem da curva E-J na literatura, a Equação 2.18 é suficiente para resultados satisfatórios para os supercondu-

tores de alta temperatura crítica [17], especialmente para as aplicações de limitação de corrente de curto-circuito. Nesta equação, J_c decresce com o aumento da temperatura, fazendo com que o campo elétrico aumente, deslocando a curva para cima. Para os supercondutores de alta temperaturas resfriados por nitrogênio líquido, a variação de J_c com a temperatura pode ser modelada como uma função linear quando o sistema opera entre 77 K (temperatura do nitrogênio líquido) e a temperatura crítica T_c , de acordo com a Equação 2.19 [17].

$$J_c(T) = J_{c(77K)} \left(\frac{T_c - 77}{T_c - T} \right) . \quad (2.19)$$

Na Equação 2.18, n é chamado de índice de transição e varia fortemente com o tipo do material e do estágio da transição [16]. Por exemplo, para o Bi-2212, n varia entre 5 e 15 no estágio de *flux creep*, e entre 2 e 4 no estágio de *flux flow* [18] [19]. Para supercondutores do tipo YBCO, n varia entre 20 e 30 no estágio de *flux creep* e entre 2 e 4 no estágio de *flux flow* [20][18]. No estágio normal, os materiais supercondutores passam a apresentar característica de resistividade linear, ou seja, $n = 1$.

A Figura 2.12 apresenta, em escala logarítmica, um exemplo de curva E-J para uma determinada temperatura, representando os 3 estágios da transição.

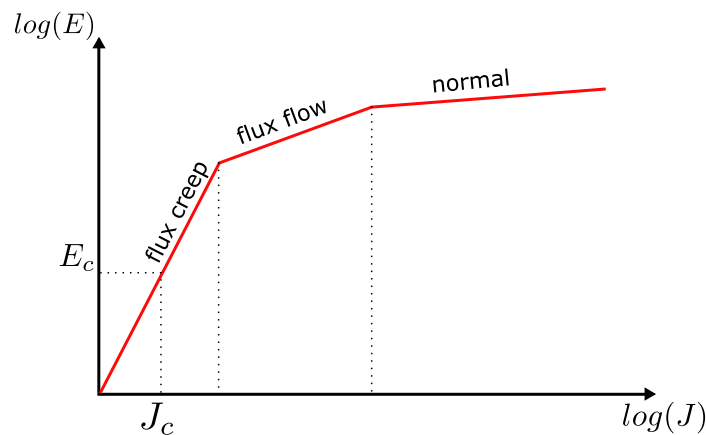


Figura 2.12: Curva $E - J$ de um supercondutor de alta temperatura em escala logarítmica.

Capítulo 3

Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

3.1 Introdução

A demanda por energia elétrica aumentou consideravelmente nas últimas décadas e estima-se um crescimento médio de 2% ao ano até o ano de 2050 [21]. Com o aumento da demanda, há uma necessidade constante de ampliação da oferta de energia, o que acarreta a introdução de novas unidades geradoras aos sistemas de potência, sejam elas localizadas próximas ou distantes dos centros de carga. Além disso, de forma a aumentar a confiabilidade e flexibilidade dos sistemas, percebe-se cada vez mais uma tendência de aumento dos pontos de interconexão das redes. Este processo tem como consequência a elevação do nível das correntes de curto-circuito nos sistemas elétricos para valores antes não previstos, especialmente nas subestações que se encontram próximas aos pontos de conexão das novas usinas e nos pontos de interconexão do sistema.

O aumento dos níveis de corrente de curto-circuito leva, em muitos casos, à superação dos níveis de suportabilidade a correntes de falta de diversos equipamentos tais como disjuntores, transformadores, barramentos e linhas de transmissão. Deste modo, é evidente a importância do estudo de soluções para limitação de correntes de curto-circuito, especialmente daquelas aplicáveis às redes já existentes. As soluções normalmente adotadas podem ser classificadas basicamente em medidas de caráter provisório e medidas de caráter definitivo [22].

- **Soluções de caráter provisório** \implies Restrições operativas e modificações na topologia das redes que permitem uma acomodação temporária das capacidades dos equipamentos instalados. A adoção destas medidas implicam, em geral, em perdas de flexibilidade nas operações do sistema elétrico, assim como redução da confiabilidade. São elas:

- Seccionamento de barramentos;
 - Radialização de circuitos;
 - Alteração do aterramento de transformadores;
 - Desligamentos de compensadores síncronos;
 - Inserção de novos equipamentos com maiores impedâncias.
- **Soluções de caráter definitivo** \implies Necessitam de estudos mais complexos associados a um maior período de planejamento e execução, sendo basicamente de dois tipos:
- Recapitação ou substituição de equipamentos superados;
 - Utilização de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito.

A recapitação ou substituição completa de equipamentos superados normalmente apresenta-se como solução de custo elevado e causa grande impacto no sistema elétrico pelos desligamentos necessários para execução de obras.

Com objetivo de limitar e até interromper as correntes de curto-circuito, diversas topologias de limitadores de curto-circuito baseados em diferentes tecnologias vêm sendo estudados. Alguns desses limitadores são usados comercialmente enquanto outros estão em fase de pesquisa e desenvolvimento. A associação de dispositivos limitadores com os dispositivos de proteção convencionais pode aumentar a confiabilidade, eficiência e evitar que estes tenham que ser substituídos pela superação [23].

Este capítulo apresenta uma síntese do problema das correntes de curto-circuito nos sistemas elétricos e uma descrição dos tipos e conceitos de limitadores existentes, com enfoque nos limitadores de curto-circuito baseados em supercondutores.

3.2 Correntes de Curto-Circuito

Todos os componentes dos sistemas elétricos estão sujeitos a curto-circuitos. Curto-circuitos são basicamente falhas que ocorrem devido a uma condição anormal de baixa impedância entre dois pontos do sistema com diferentes potenciais elétricos, dando origem a altas correntes elétricas conhecidas como correntes de curto-circuito ou correntes de falta (do inglês *fault currents*). A corrente de falta dos sistemas de transmissão e distribuição é em geral entre 10 e 30 vezes a corrente nominal de operação do sistema [24], podendo chegar em alguns casos a até 100 vezes este valor.

Cerca de 80% dos curto-circuitos são do tipo transitório, ou seja, são causados por sobretensões transitórias anormais devido a descargas atmosféricas (raios) que atingem a rede elétrica ou chaveamentos no sistema [24]. Estas sobretensões causam ruptura no isolamento dos equipamentos pela formação de arcos elétricos, possibilitando assim um caminho de baixa impedância para circulação das altas correntes de curto-circuito. Nestes casos, após um intervalo de cerca de 300 ms da atuação do sistema de proteção, os disjuntores podem ser religados e o sistema volta ao seu regime de operação normal [25]. Nos casos em que a tentativa de religamento do disjuntor não é bem sucedida, pode-se dizer que o curto-circuito é permanente. As faltas permanentes são causadas por falhas ou envelhecimento de isolamento, queda de objetos (galhos, animais, etc) sobre os equipamentos ou queda de condutores no solo.

As faltas também são classificadas de acordo com os condutores envolvidos no defeito, podendo ser do tipo fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra ou trifásicas. Normalmente, mas nem sempre, as faltas mais severas são do tipo trifásicas ou monofásicas, seguidas pelas faltas fase-fase e fase-fase-terra [24]. Em todos os casos, os sistemas de proteção são projetados para detectar e atuar na eliminação das faltas com a abertura dos disjuntores. Quando não eliminadas rapidamente, as correntes de falta são extremamente prejudiciais para os componentes do sistema elétrico, podendo causar problemas como:

- Danos permanentes em equipamentos como geradores, transformadores e barramentos em razão das grandes forças eletrodinâmicas geradas;
- Danos permanentes em equipamentos em razão de sobreaquecimento;
- Superaquecimento e deformação de condutores;
- Incêndio em instalações;
- Instabilidade de frequência, causando aceleração conjunta de geradores e possíveis *blackouts* em grandes áreas;
- Instabilidade de tensão em razão de quedas de tensão acentuadas.

A forma característica das correntes de falta pode ser compreendida através da solução de um circuito equivalente RL alimentado por uma fonte de tensão CA (corrente alternada) de amplitude V_{max} com frequência angular ω . Para simplificação da análise, pode-se considerar o circuito sem carga antes do curto-circuito, com a chave S sendo fechada em $t = 0$, conforme representação na Figura 3.1a.

A partir do momento da falta, a corrente elétrica $i_f(t)$ passa a ser composta de uma componente CA com amplitude em geral bem superior à da corrente nominal, acrescida de uma componente CC (corrente contínua) com um amortecimento

exponencial (Figura 3.1b). A amplitude inicial da componente CC depende do ângulo de fase da fonte tensão CA no instante da ocorrência da falta, assumindo o seu valor mais crítico quando a falta ocorre na passagem da curva de tensão por zero. A constante de tempo (τ) determina o amortecimento exponencial da componente CC ($i_{cc}(t)$) e está relacionada com a impedância vista pela fonte de tensão.

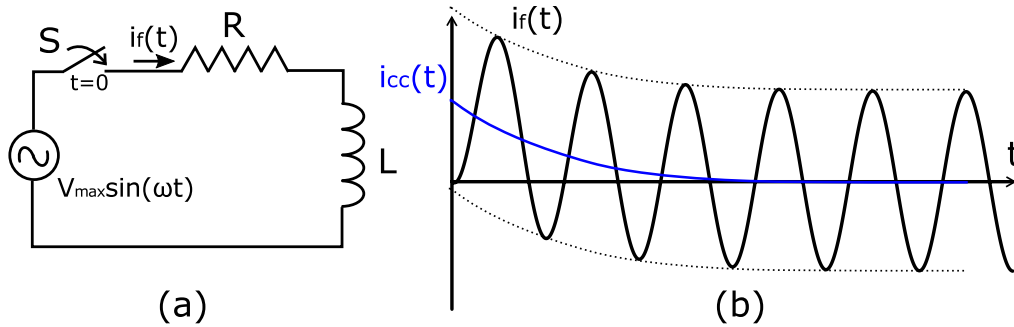


Figura 3.1: Formas de onda de um curto-circuito típico.

Considerando o caso mais crítico do ângulo de tensão no momento da falta, a corrente de curto-circuito pode ser dada pela Equação 3.1 [25], sendo $\tau = L/R$ e $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$.

$$i_f(t) = \frac{V_{max}}{Z} (e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega t)), \quad (3.1)$$

A análise dos níveis das correntes de curto-circuito em grandes sistemas são bem mais complexas, e em geral são realizadas com o auxílio de programas computacionais de análise de redes, análise de curto-circuito e de transitórios eletromagnéticos. Apesar disso, as formas de onda de correntes de falta geralmente obtidas são semelhantes às da Equação 3.1 e Figura 3.1b. A componente CA da corrente de falta é chamada de corrente de curto-circuito simétrica, enquanto a corrente total da falta, incluindo a componente CC, é chamada de corrente de curto-circuito assimétrica.

É importante observar ainda que os equipamentos elétricos, principalmente os geradores, que são a principal fonte das correntes de curto-circuito, possuem impedância interna que varia durante a ocorrência de uma falta. Esta impedância é dividida em três fases principais: subtransitória, transitória e síncrona. A variação da impedância também faz com que as correntes de curto-circuito variem ao longo da permanência da falta, possuindo valores maiores nos momentos iniciais do curto-circuito.

Todos os equipamentos instalados em um sistema elétrico são projetados para valores bem definidos de suportabilidade a correntes de faltas simétricas e assimétricas. Para uma operação segura, as correntes de curto-circuito devem ser inferiores a estes valores, além de serem inferiores à capacidade de in-

terrupção do disjuntor que protege o sistema. Os disjuntores possuem valores nominais de capacidade de interrupção simétrica, capacidade de interrupção assimétrica e ainda limites relacionados ao máximo pico de corrente suportável.

3.3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

Limitadores de corrente de curto-circuito são dispositivos que têm o objetivo de limitar e até interromper as correntes de curto-circuito. A associação de dispositivos limitadores com os dispositivos de proteção convencionais pode aumentar a confiabilidade, eficiência e evitar que estes tenham que ser substituídos devido a superação de suas capacidades de suportabilidade a correntes de falta[23]. Um limitador de corrente de curto-circuito ideal é "invisível" ao sistema em situação normal de carga, apresentando impedância nula e, no momento do curto-circuito, muda rapidamente a sua impedância de zero para um valor considerável de forma a limitar a corrente antes do primeiro pico. As principais características desejáveis em um limitador de corrente de curto-circuito são resumidas a seguir [1]:

- Baixa impedância e baixas perdas para regime normal de operação;
- Limitação do primeiro pico de corrente de falta;
- Limitação da corrente de curto-circuito de regime permanente (simétrica);
- Não surgimento de sobretensões decorrentes da limitação da corrente;
- Rápida e automática recuperação para o regime normal de operação (baixa impedância) após a interrupção do defeito por outros dispositivos;
- Não atuação para correntes próximas das nominais e para correntes de falta suficientemente pequenas;
- Alta confiabilidade por longos períodos com manutenção reduzida;
- Dimensões, peso e custos de implementação reduzidos.

Diversas topologias de limitadores de curto-circuito baseados em diferentes tecnologias vêm sendo estudadas e propostas por instituições de pesquisa e empresas. Alguns desses limitadores já são disponíveis comercialmente e têm ampla experiência de uso, enquanto outros estão em fase de pesquisa e desenvolvimento. No decorrer desta Seção serão abordados os principais conceitos de limitadores de curto-circuito, com exceção dos limitadores baseados em supercondutores, que serão abordados na Seção seguinte.

3.3.1 Reatores Limitadores de Núcleo de Ar

Os limitadores do tipo reatores de núcleo de ar são os dispositivos de tecnologia mais antiga utilizados na redução de correntes de curto-circuito, sendo compostos basicamente de uma grande bobina que é ligada em série com o sistema a ser protegido. Estes equipamentos introduzem uma impedância adicional fixa no sistema, tanto no regime de operação normal quanto no regime de curto-circuito. Assim, com a inserção do equipamento, a impedância total vista pelo sistema no caso de um curto-circuito torna-se maior, reduzindo a corrente de falta que flui (ver Equação 3.1).

Embora os reatores de núcleo de ar sejam o tipo de equipamento mais simples e de baixo custo empregado para limitação de curto-circuito, algumas considerações a respeito de sua utilização devem ser realizadas. Um ponto importante está relacionado com a introdução de maiores quedas de tensão na rede, visto que este dispositivo encontra-se permanentemente conectado em série com o sistema. As maiores quedas de tensão associadas à inserção do reator podem ainda acarretar problemas relacionados à estabilidade transitória do sistema. Estes problemas são amenizados quando os reatores são empregados em redes altamente malhadas, visto que, em geral, a tensão é menos afetada [22].

Outra questão importante relacionada à instalação destes dispositivos é o grande espaçamento físico que deve ser deixado entre cada reator. Isso ocorre em razão das elevadas magnitudes de campo magnético produzidos por estes dispositivos que geram forças de repulsão magnética na ocorrência de um curto-circuito. Finalmente, a resistência elétrica associada ao reator não é desprezível e, do ponto de vista econômico, o custo destas perdas ao longo de anos pode inviabilizar este tipo de solução frente à substituição dos equipamentos superados ou outra tecnologia de limitação de curto-circuito. Um dos motivos pelo qual a instalação de reatores de núcleo de ar não se torna solução inviável é que seus efeitos negativos ao sistema podem, em alguns casos, serem compensados economicamente ao se evitar a substituição de equipamentos superados [26].

Como se trata da introdução de uma nova impedância na rede, são necessários estudos de curto-circuito, fluxo de potência e transitórios eletromagnéticos a fim de verificar a viabilidade da instalação do reator e o valor da sua impedância, tendo sempre em mente um compromisso entre o valor da corrente a ser limitada e os valores suportáveis de perdas e de quedas de tensão introduzidas na rede.

A tecnologia para fabricação dos reatores a núcleo de ar é amplamente difundida, sendo este um dos únicos dispositivos de redução de correntes de curto-circuito disponível comercialmente para todos os níveis de tensão. A Figura 3.2 descreve as duas principais formas de utilização destes equipamentos: através do

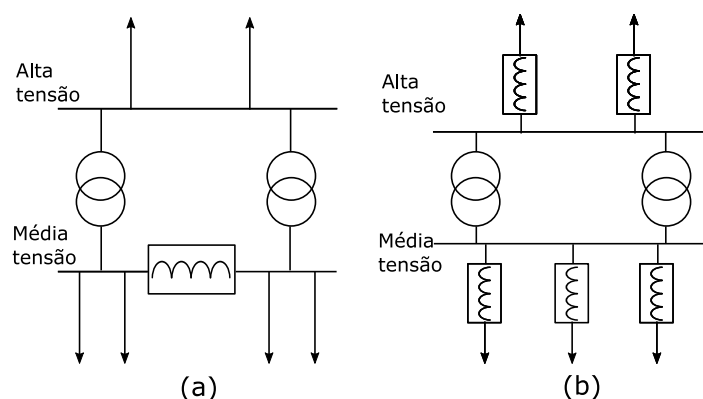


Figura 3.2: Formas de conexão dos reatores ao sistema.

seccionamento do barramento (Figura 3.2a), e em série com as linhas de transmissão (Figura 3.2b). A experiência de utilização deste tipo de equipamento no Brasil e no mundo são amplas, desde de aplicações em 13,8 kV até sistemas de alta tensão em 138 kV, 345 kV e 500 kV. Como exemplo, podemos citar as seguintes subestações brasileiras que utilizam reatores limitadores de curto-circuito [22]:

- Jaguará - 138 kV - MG
- Angra - 138 kV - RJ
- Mogi das Cruzes - 345 kV - SP
- Tucuruí - 500 kV - PR

A Figura 3.3 mostra uma fotografia dos reatores limitadores da subestação de Tucuruí de 500 kV. A instalação destes equipamentos foi feita entre os dois barramentos de grupos de geradores da usina de forma a possibilitar o funcionamento em paralelo dos dois sistemas de geração desta usina para uma operação mais flexível, e sem acarretar na superação dos disjuntores então existentes.

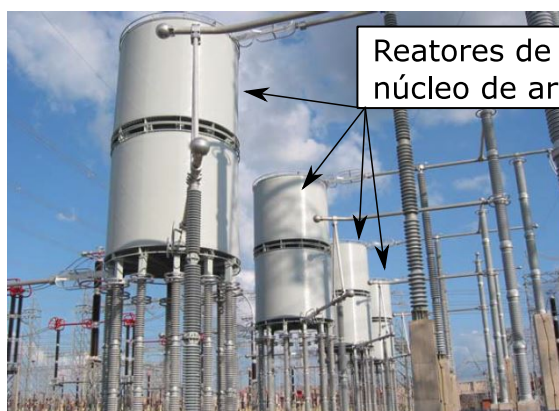


Figura 3.3: Fotografia dos reatores limitadores da subestação de Tucuruí de 500 kV. Adaptado de [22].

3.3.2 Dispositivos Pirotécnicos

Dispositivos pirotécnicos são capazes de interromper correntes de curto-circuito elevadas em tempos inferiores a 1/4 de ciclo [22]. Isto é possível pois esses dispositivos possuem cargas explosivas e elementos fusíveis para interrupção da corrente de falta. Os disjuntores convencionais, por serem dispositivos mecânicos, não são capazes de interromper correntes tão elevadas em tempos tão curtos.

A Figura 3.4 mostra um dispositivo pirotécnico comercial, de fabricação G&W, para tensão de 15,5 kV, corrente nominal de 3000 A e capacidade de interrupção de corrente de até 120 kA¹. Os dispositivos pirotécnicos são constituídos por duas câmaras em paralelo (Figura 3.4b). Uma câmara contém um condutor principal de cobre que conduz a corrente de carga normal do circuito. Esse barramento pode conter um ou mais estrangulamentos, sob os quais cargas de explosivo são detonadas quando acionadas por sensores alimentados por transformadores de corrente localizados na própria barra, em caso de ocorrência de um curto-circuito. A corrente de falta nesta câmara é então interrompida, sendo desviada para a outra câmara paralela onde a corrente é totalmente extinguida com a abertura do elemento fusível. O circuito paralelo formado pelo elemento fusível possui impedância consideravelmente superior à impedância do circuito principal, de forma que por ele não circula corrente em condições de operação normal (corrente nominal).

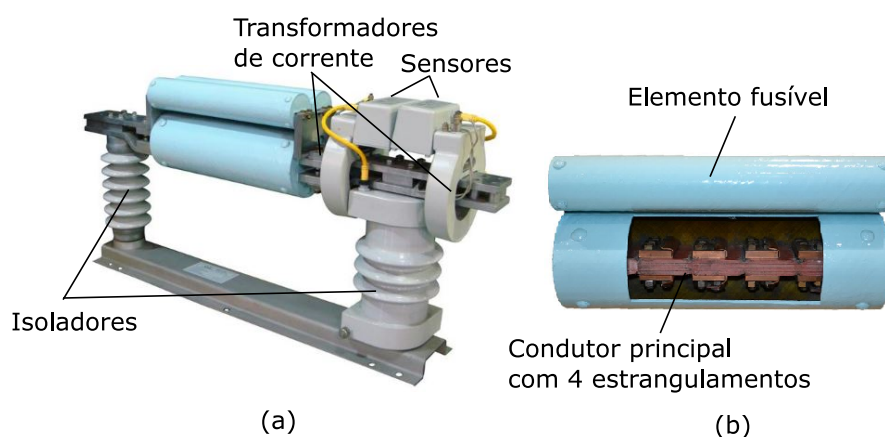


Figura 3.4: Dispositivo pirotécnico da G&W.

A Figura 3.5 mostra esquematicamente o funcionamento do dispositivo em 3 etapas. Inicialmente, na Figura 3.5a, o funcionamento em carga normal, com o condutor de cobre conduzindo a corrente nominal do circuito através do condutor principal. A Figura 3.5b apresenta o momento imediatamente posterior ao detonamento dos elementos explosivos, em que a corrente de curto-circuito é desviada para a câmara do fusível. Finalmente, na Figura 3.5c, a abertura do fusível

¹Dados do dispositivo e foto reproduzidas do catálogo comercial do fabricante

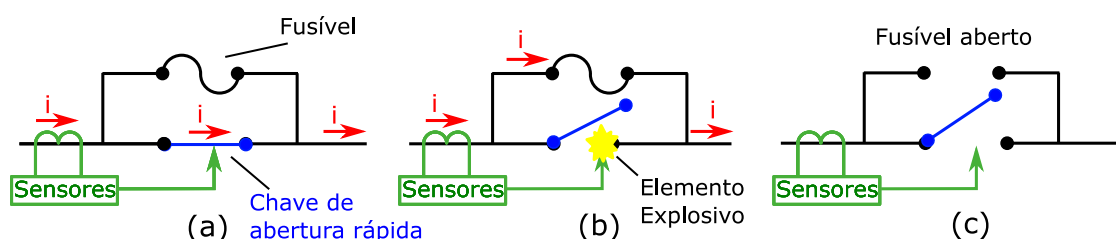


Figura 3.5: Princípio de funcionamento dos dispositivos pirotécnicos para limitação de curto-circuito

e a total extinção da corrente de curto-circuito.

Um ponto importante relacionado a este dispositivo é que, após a interrupção do defeito, ocorre o isolamento entre a fonte de alimentação do curto-circuito e o resto do sistema, até que ocorra a substituição manual do elemento fusível e da câmara do barramento de cobre. Durante este período há a perda de suprimento às cargas afetadas (quando o dispositivo é instalado em alimentadores) ou a separação da rede (quando o dispositivo é localizado, por exemplo, em interligações de barramentos de subestações).

A instalação dos dispositivos pirotécnicos não elimina a necessidade dos equipamentos de manobra convencionais dos circuitos, como chaves seccionadoras e disjuntores. Isto ocorre pois este dispositivo somente é acionado quando o sistema está sob risco, isto é, para correntes superiores às capacidades dos disjuntores. Pequenas correntes de falta continuam sendo interrompidas pelos disjuntores convencionais.

Este dispositivo é amplamente utilizado desde os anos 50. No Brasil, começou a ser utilizado nos anos 90 nas indústrias que passaram a ter em suas plantas um sistema de cogeração, o que acarretou a elevação do nível de corrente de curto-circuito nas instalações existentes. Para evitar a troca de equipamentos que seriam superados, optou-se pela instalação de dispositivos limitadores pirotécnicos [22].

Como vantagens do dispositivo pirotécnico podemos citar a alta velocidade de atuação, relativa facilidade de construção, funcionamento simples, simples instalação, volume e peso reduzidos e custo relativamente baixo. Uma espécie de regra geral para o uso deste tipo de dispositivo é que a sua instalação deve estar condicionada a uma rede onde o tipo de falha que ele deve proteger é pouco frequente, justamente porque ele precisa ser rearmado a cada operação [26]. Além disso, devido ao emprego de um fusível em paralelo, estes dispositivos têm seu uso restrito a tensões de até 40kV [27].

3.3.3 FACTS

O conceito de FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) foi proposto pela primeira vez em 1988 com o objetivo básico de obter sistemas em corrente alternada com alto nível de flexibilidade, da mesma forma como os sistemas de transmissão em corrente contínua [28]. Esta tecnologia se valeu do grande desenvolvimento da eletrônica de potência e da teoria de controle para aplicá-la na solução de diversos problemas em sistemas de potência, visando um controle rápido e eficiente do fluxo de potência ativo e reativo nas redes.

A filosofia de controle de fluxo de potência passa por dispositivos semicondutores de potência para chavear circuitos rapidamente de forma a controlar o ângulo de carga, a impedância ou a tensão do sistema. Estes dispositivos podem ser os tiristores, trabalhando com comutação natural, e também dispositivos com capacidade de operação com comutação forçada, como o GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*), IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*) e o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*).

Os equipamentos com tecnologia FACTS podem ser divididos em três categorias básicas: os equipamentos *shunt* (em derivação), os equipamentos série e os controladores que combinam equipamentos série e *shunt* simultaneamente. Abaixo são citados alguns destes dispositivos:

- Reator controlado por tiristor - TCR (*Thyristor Controlled Reactor*);
- Capacitor chaveado por tiristor - TSC (*Thyristor Switched Capacitor*);
- Compensadores estáticos - SVC (*Static Var Compensator*);
- Capacitor série controlado por tiristor, TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*);
- Compensador síncrono estático - STATCOM (*Static Synchronous Compensator*);
- Compensador síncrono estático série - SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*);
- Controlador universal de fluxo de potência - UPFC (*Unified Power Flow Controller*).

Uma das dificuldades na utilização dos reatores de núcleo de ar como dispositivos limitadores de corrente (abordados na Seção 3.3.1) é a impedância adicional que estes equipamentos introduzem no sistema mesmo em condições normais de operação. Idealmente, para limitação de curto-circuito, devemos ter uma

impedância nula em regime normal e alta impedância na ocorrência de curto-circuito, com imediata recuperação do estado de baixa impedância após a extinção do curto. Os dispositivos FACTS podem ser utilizados para contornar esta dificuldade. O princípio básico de funcionamento dos FACTS para limitação de corrente é o controle, via eletrônica de potência, de um circuito ressonante LC, que apresenta baixa impedância para regime permanente e na presença de uma falta ele é forçado (disparado) a incrementar sua impedância, o que limita a corrente de falta. Dentre os dispositivos FACTS, os equipamentos do tipo série como o TCSC, TPSC, SSSC, têm maior vocação para controle de corrente de curto-circuito.

A Figura 3.6a apresenta o esquema elétrico básico do TCSC, que é composto de um banco de capacitor série, em paralelo com um reator controlado por tiristores. De acordo com o ângulo de disparo dos tiristores, o TCSC tem habilidade de ajustar rapidamente o valor de sua impedância desde um ponto da região capacitiva até um ponto na região indutiva (Figura 3.6b), o que é utilizado, em geral, para controle de fluxo de potência e amortecimento de oscilações.

É possível utilizar o TCSC também para limitação de curto-circuito [29], embora seja necessário modificar algumas características do dispositivo, tais como os valores nominais dos componentes deste equipamento e a frequência natural de ressonância do circuito LC e estratégia de controle.

No Brasil, foram utilizados quatro TCSC para o amortecimento de oscilações de potência nas linhas de transmissão 500 kV de interligação Norte-Sul, os quais atualmente não estão mais em operação, operando simplesmente como impedância capacitiva fixa.

Em geral, devido ao seu alto custo, a utilização dos dispositivos FACTS para aplicação de limitação de corrente de faltas só é viável se agregar um outro benefício para o sistema além da limitação das correntes de falta, como o amortecimento de oscilações e controle de fluxo de potência.

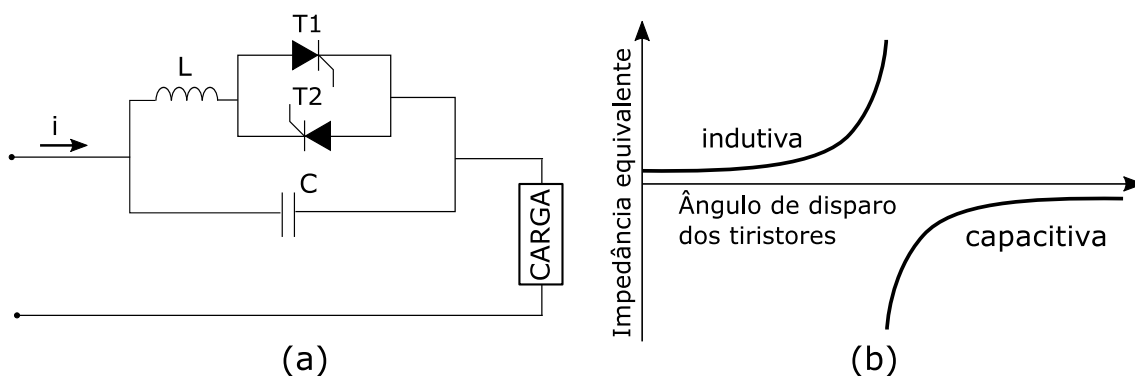


Figura 3.6: (a) Diagrama elétrico de um TCSC e (b) Possíveis pontos de operação da impedância equivalente de acordo com o ângulo de disparo dos tiristores.

3.3.4 HVDC

A tecnologia de transmissão em corrente contínua HVDC (*High Voltage Direct Current*) pode ser classificada em dois tipos: HVDC convencional, baseado em conversores fonte de corrente e o HVDC baseado em conversores fontes de tensão. O primeiro tipo faz uso de tiristores em um conversor de fonte de corrente, enquanto que o segundo, mais recente, faz uso de chaves autocomutadas como IGBT, GTO e IGCT [30].

Os sistemas de transmissão em corrente contínua convencionais têm como uma de suas características, pelo próprio método de controle empregado, a não contribuição para o aumento dos níveis das correntes de curto-circuito [30]. Assim, pode-se dizer que são mais uma tecnologia disponível para o enfrentamento do aumento dos níveis de corrente de curto-circuito nos sistemas de potência de grande porte. Esta tecnologia pode ser utilizada, por exemplo, para a interligação de sistemas elétricos, ou para novas conexões aos sistemas existentes, evitando que as contribuições de um sistema possam influir na superação das instalações dos demais.

Os sistemas HVDC baseados em conversores de fonte de tensão têm vantagens de possibilitar controle independente da potência ativa e reativa [30]. A depender das características da topologia e do tipo de controle empregado, estes sistemas HVDC também podem atuar na limitação das correntes de curto-circuito. Cabe ressaltar que os sistemas HVDC, tanto os convencionais como os baseados em conversores de tensão, não se tratam propriamente de dispositivos limitadores. A implementação destes sistemas tem um custo muito elevado e requer estudos de viabilidade bastante complexos. A viabilidade de um sistema HVDC depende, entre outros fatores, da tensão de operação, do comprimento da linha de transmissão e do custo das unidades conversoras [22]. Sua utilização apenas como método de limitação de corrente de curto-circuito parece pouco interessante, mas pode se tornar viável quando associada a outras finalidades além da limitação.

3.3.5 IPC

Os dispositivos Controladores de Potência Interfases (em inglês *Interphase Power Controllers* - IPC) são uma tecnologia desenvolvida pela ABB em conjunto com a Hydro Quebec - CITEQ. Os IPCs apresentam duas características topológicas principais: são conectados entre duas barras e possuem, pelo menos, dois ramos paralelos [22]. Um dos ramos contém uma reatância indutiva e o outro uma reatância capacitiva, cada qual em série com um elemento defasador. Esse defasamento pode ser obtido através da utilização de transformadores defasadores, conexões de transformadores convencionais ou conexões entre fases diferentes de

dois sistemas síncronos [22].

Os IPCs podem ser aplicados para interligação de subsistemas síncronos, controle de fluxo de potência em linhas de transmissão e para aumento da capacidade de transformação sem elevação dos níveis de correntes de curto-circuito. Para cada aplicação, existe um tipo de arranjo específico.

O Transformador Limitador de Corrente de Curto-Circuito (TLCC) é um dos arranjos possíveis da família dos IPCs. Este arranjo pode ser aplicado em subestações que apresentam pelo menos dois transformadores em paralelo, e tem como objetivo possibilitar aumento da capacidade de transformação sem elevar os níveis de corrente de curto-circuito. Um dos elementos defasadores e a reatância indutiva são substituídos pela própria impedância equivalente de transformadores já existentes nas subestações. Através da inclusão de um elemento defasador e de uma reatância capacitiva, pode-se acrescentar um novo transformador que passa a funcionar como TLCC [22]. A Figura 3.7a apresenta um arranjo deste tipo, cujo circuito equivalente é apresentado na Figura 3.7. Através do controle sobre a tensão do elemento defasador V_{ed} , é possível controlar a corrente I_2 no ramo do capacitor. Em regime normal de operação, a corrente I_1 é praticamente igual a corrente I_2 . Na ocorrência de um curto-circuito, o módulo da tensão V_{ed} é controlado de forma que as correntes I_1 e I_2 ficam praticamente em oposição de fase, limitando a corrente total I_f .

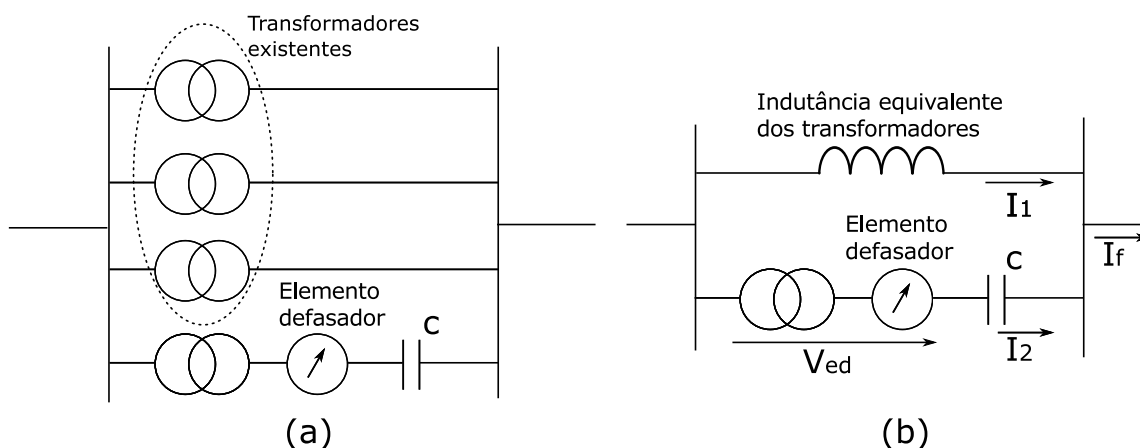


Figura 3.7: (a) Diagrama esquemático do IPC tipo Transformador Limitador de curto-circuito e (b) Circuito equivalente de (a).

3.3.6 Disjuntores de Estado Sólido

Como já discutido anteriormente, o tempo de atuação e a capacidade de interrupção de corrente dos disjuntores eletromecânicos pode não ser suficiente para algumas aplicações, de forma que estes disjuntores podem ser superados. Neste contexto, a tecnologia de eletrônica de potência permitiu o desenvolvimento dos

disjuntores de estado sólido, que têm se apresentado como mais uma alternativa na limitação ou extinção de correntes de curto-circuito.

Os disjuntores de estado sólido (também chamados de disjuntores eletrônicos de abertura rápida [22]), são equipamentos construídos a partir de dispositivos semicondutores de eletrônica de potência, que podem ser os tiristores, GTO, IGCT, IGBT, etc., dependendo de cada aplicação [31]. A grande vantagem destes equipamentos é relativa ao tempo de atuação. Enquanto os disjuntores eletromecânicos convencionais mais rápidos possuem tempo de atuação da ordem de 20 ms, os disjuntores contendo chaves eletrônicas podem abrir em tempos inferiores a 5 ms [32].

Diversas topologias de disjuntores de estado sólido têm sido propostas [31–33], as quais podem ser classificadas em dois grupos principais: as baseadas na interrupção da corrente de curto-circuito por comutação de corrente ou por comutação de tensão.

Um exemplo de topologia baseada em comutação de tensão é mostrado na Figura 3.8a [31]. Em condições normais, a corrente nominal flui pela chave principal T1, com a chave auxiliar T2 aberta. Quando um curto-circuito é detectado, o tiristor T2 é ligado, de forma que a tensão do capacitor que estava previamente carregado é aplicada ao tiristor T1, o que faz com que este seja polarizado negativamente, interrompendo a corrente de curto-circuito.

Outro exemplo de topologia, desta vez baseado na comutação de corrente, é apresentado na Figura 3.8b [31]. Em condições normais, a chave principal T1 é mantida fechada por onde flui a corrente nominal do sistema. Quando uma falta é detectada, T2 é fechada, o que resulta numa corrente oscilante no circuito formado por L, C e T2. Quando a corrente passa por zero, o tiristor T2 bloqueia, de forma que uma corrente oscilante que passa a fluir pelo circuito formado por C, L, D e T1. Esta corrente se opõe à corrente de falta, fazendo com que o T1 abra no instante que a corrente resultante seja nula.

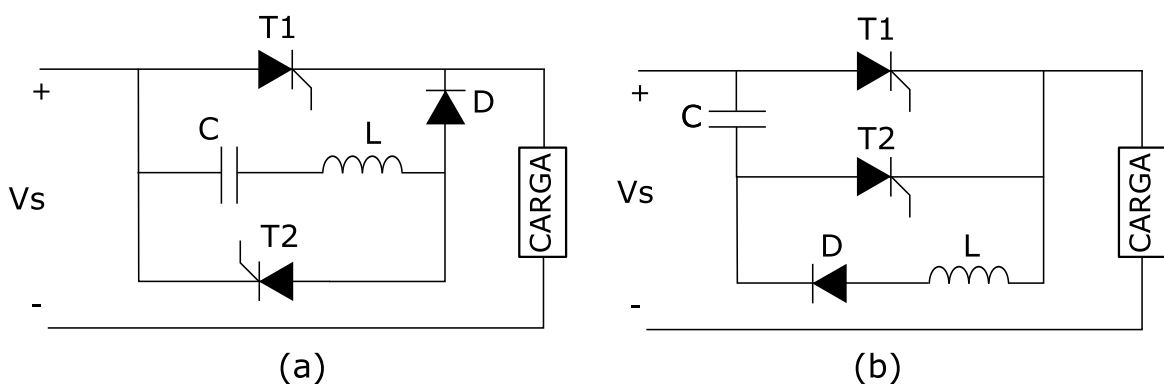


Figura 3.8: Topologias de disjuntores de estado sólido: (a) baseada em comutação de corrente e (b) baseada em comutação de tensão.

A ideia da utilização dos disjuntores rápidos como limitadores de corrente de curto-circuito seria a abertura dos mesmos antes da atuação dos disjuntores convencionais. No momento do defeito, os disjuntores rápidos atuariam, ou seccionando um barramento ou abrindo uma linha, reduzindo o nível de curto total e permitindo desta forma, a operação adequada dos disjuntores convencionais existentes. Existem ainda propostas de topologias de disjuntor misto, os quais agregam características dos disjuntores eletromecânicos convencionais com os disjuntores de estado sólido [31].

É importante ressaltar que a utilização dos disjuntores de estado sólido provocam perdas elevadas em regime permanente inerentes ao aspecto construtivo dos elementos de chaveamento de eletrônica de potência, as quais são consideravelmente maiores do que as perdas dos disjuntores eletromecânicos convencionais. Além disso, os custos destes equipamentos ainda são restritivos tendo em vista que esta tecnologia ainda está em fase de desenvolvimento.

3.4 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores

Os limitadores de curto-circuito baseados em supercondutores de alta temperatura crítica (*Superconducting Fault Current Limiters - SCFL*) são considerados uma das soluções mais promissoras para o problema dos altos níveis de curto-circuito nos sistemas elétricos. As principais características gerais destes equipamentos são [17]:

- Baixa impedância em condições normais: estes dispositivos apresentam resistência desprezível e indutância baixa, evitando assim quedas de tensão e dissipação de energia em operação normal;
- Rápido tempo de atuação: atuam na limitação de corrente em períodos da ordem de meio ciclo ou menos;
- Grande capacidade de limitação: possibilidade de ajuste da corrente a ser limitada de acordo com as especificações, podendo limitar a corrente de falta em até 10 vezes;
- Sem necessidade de substituição de partes ou componentes: não necessitam de substituição de partes ou nenhum tipo de rearme em caso de atuação;
- Não utilizam sensores para detecção do curto-circuito: Na maioria dos tipos de SFCL a limitação da corrente de curto-circuito ocorre devido à propriedade intrínseca do material de transitar do estado supercondutor para

o estado normal em razão do rápido aumento da temperatura que ocorre durante o curto-circuito;

- Falha-segura: a maioria dos tipos de SFCL são intrinsecamente seguros. Qualquer defeito no sistema criogênico ou outro problema no equipamento durante um curto-circuito faz com que o material transite para o estado normal, com resistividade diferente de zero, limitando assim a corrente de curto-circuito.
- Período de recuperação curto e automático: após a falta é necessário um determinado tempo para que o material supercondutor do limitador retorne ao seu estado de resistividade nula, sendo este tempo inferior a 1 minuto nos limitadores supercondutores, desde que providos de refrigeração adequada;

A Figura 3.9 apresenta a forma de onda típica de uma corrente limitada por um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor. Durante o período de operação normal, o SFCL é projetado para apresentar impedância nula, de forma a ser "invisível" ao sistema, não interferindo em seu funcionamento e operação. Na ocorrência do curto-circuito, o SFCL passa a apresentar rapidamente uma impedância finita e atua na limitação do curto-circuito já no primeiro ciclo. Alguns ciclos depois, após a extinção da falta por dispositivos de proteção convencionais, o SFCL em geral precisa de um tempo para se recuperar e retornar à sua operação normal. Este período é chamado de tempo de recuperação (*recovery time*). O tamanho deste tempo depende muito da configuração de cada limitador, das condições de refrigeração e do tempo que o limitador ficou sujeito às correntes de falta. Quanto maior a energia dissipativa, maior a temperatura e mais tempo é necessário para a recuperação.

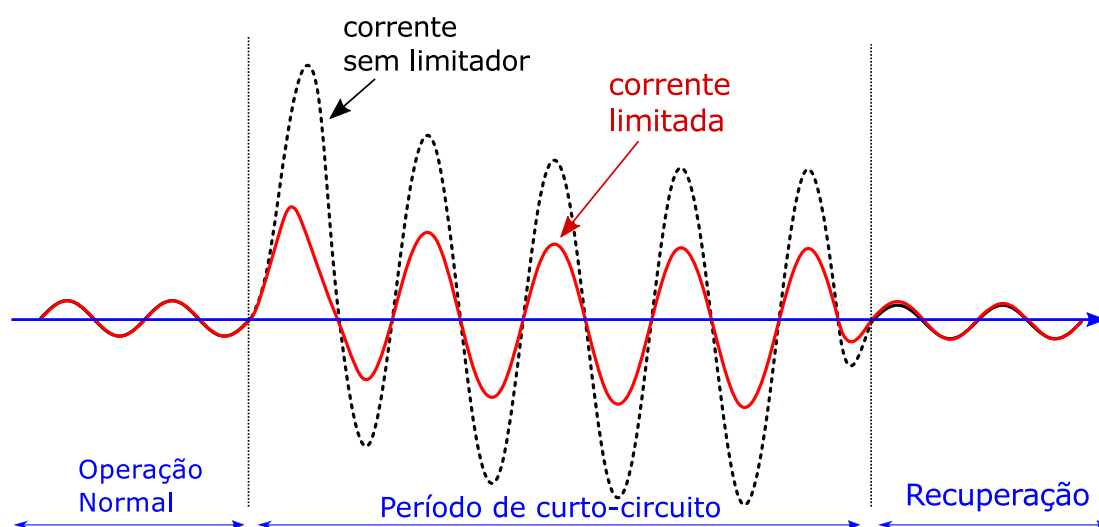


Figura 3.9: Forma de onda típica de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor com os períodos de operação normal, curto-circuito e recuperação.

Conforme exemplificado na Figura 3.10, os limitadores supercondutores podem ser aplicados em diferentes pontos nos sistemas elétricos:

1. Conexão de unidades geradoras de larga escala novas ou existentes;
2. Alimentação de cargas auxiliares em subestações de geração;
3. Saída dos transformadores de distribuição;
4. Acoplamento de redes de distribuição existentes;
5. Saída dos alimentadores de distribuição;
6. Conexão de barramentos dentro de subestações;
7. Interligação de unidades de geração distribuída locais;
8. Fechamento de anéis no sistema de distribuição.

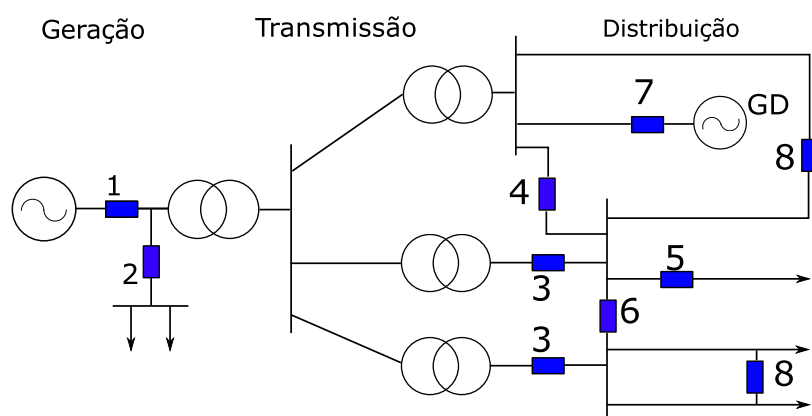


Figura 3.10: Locais possíveis de utilização dos limitadores supercondutores nos sistemas de potência.

Os primeiros limitadores supercondutores disponíveis comercialmente foram instalados pela empresa *Nexans Superconductors GmbH* para uma rede de distribuição de 12 kV [1]. Atualmente existe uma grande quantidade de projetos de limitadores supercondutores em fase de pesquisa, desenvolvimento e testes em todo mundo. Embora existam protótipos de limitadores supercondutores para alta tensão em fase de testes, podemos dizer que os limitadores supercondutores têm sido desenvolvidos predominantemente para aplicações em média tensão. Os maiores desafios para a comercialização em maior escala dos SFCL são o alto custo dos materiais supercondutores e dos sistemas de refrigeração. Apesar disso, avanços consideráveis nos processos de fabricação dos materiais supercondutores e nas tecnologias de refrigeração indicam que estes dispositivos irão entrar no mercado com maior intensidade brevemente [27].

Alguns conceitos de SFCL são baseados na transição do material supercondutor do seu estado de resistência nula para o seu estado normal. Outros conceitos utilizam os elementos supercondutores sempre em seu estado de resistência nula em combinação com outros elementos, com o único objetivo de reduzir perdas. A seguir será apresentada uma revisão do princípio de funcionamento dos principais tipos de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores que têm sido propostos.

3.4.1 Limitador Supercondutor Resistivo

O limitador de corrente de curto-circuito do tipo resistivo é o que possui topologia mais simples, constituído basicamente de um elemento supercondutor em série com o sistema a ser protegido. Este conceito foi proposto pela primeira vez em 1936 [1] e é baseado na propriedade intrínseca do supercondutor de aumentar sua resistência elétrica de um valor nulo para um valor finito, com a mudança do supercondutor de seu estado de resistência nula para o estado normal.

Em condições normais de operação, com a corrente próxima de seu valor nominal, o material supercondutor se encontra em seu estado de resistência nula e, portanto, sem dissipação de energia.

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. O processo físico desta transição entre os estados foi abordado na Seção 2.6. A Figura 3.11a apresenta um diagrama esquemático de um limitador resistivo inserido no sistema a ser protegido.

Apesar da aparente simplicidade do limitador resistivo, este conceito possui algumas dificuldades de implementação. Como este tipo de limitador pode ser formado por longos condutores feitos de supercondutores de alta temperatura, é possível a ocorrência de inhomogeneidades no material, fazendo com que haja variação nas propriedades supercondutoras ao longo do material. Por esta razão, é difícil se obter uma transição uniforme do estado de resistência nula para o estado normal. Partes do material podem transitar antes que outras, gerando os chamados pontos de calor, referidos na literatura como *hot-spots* (ver Figura 3.11b). O surgimento dos *hot-spots* é totalmente indesejado, uma vez que a região do material que transita precocemente acaba por dissipar toda a energia do curto-circuito sozinha, o que pode resultar em danos e até mesmo a destruição total do dispositivo.

Para lidar com a existência dos *hot-spots*, é usual a utilização de um elemento *shunt* conectado em paralelo com o limitador. Desta forma, a maior parte da cor-

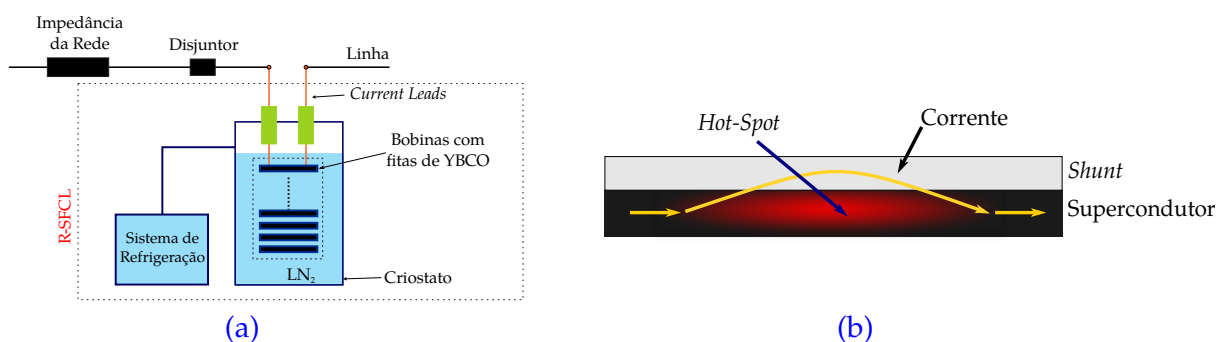


Figura 3.11: (a) Ilustração de limitador supercondutor resistivo e (b) surgimento de *hot-spots* e desvio da corrente para o elemento *shunt*.

rente é conduzida pelo elemento *shunt* durante a ocorrência de uma falta. Além disso, o elemento *shunt* permite o ajuste da impedância da linha em condições de limitação de corrente e evita o surgimento de sobretensões que ocorreriam com o rápido aumento da resistência do material supercondutor [17]. A Figura 3.12 apresenta o circuito equivalente de um limitador resistivo com elemento *shunt*.

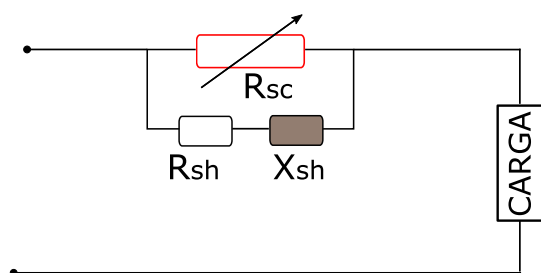


Figura 3.12: Circuito equivalente de um limitador supercondutor resistivo com elemento *shunt*.

Outra questão que deve ser levada em conta é que, devido ao equipamento estar conectado em série diretamente com a corrente a ser limitada, existe a necessidade de utilização de conectores para possibilitar a passagem desta corrente do ambiente externo em temperatura ambiente para o ambiente de temperaturas criogênicas (em inglês, *current leads*). Desta forma, ainda que a tecnologia dos *current leads* permita boa isolamento, há condução de calor para dentro do ambiente resfriado, o que ocasiona perdas térmicas que precisam ser compensadas pelo sistema de refrigeração [1].

Limitadores de corrente de curto-circuito resistivos são estudados e desenvolvidos por muitos grupos de pesquisa e empresas, e podem ser encontrados em diversos formatos e topologias. Os primeiros protótipos foram fabricados usando condutores maciços (*bulk*), mas atualmente existe uma maior quantidade de pesquisa e desenvolvimento nos limitadores de corrente supercondutores baseados em fitas supercondutoras de segunda geração.

As maiores vantagens do limitador resistivo são a sua configuração simples,

pequeno volume e peso, impedância desprezível em condições normais de operação e rápido tempo de atuação. Como desvantagens, podemos citar a necessidade de uso de *current leads* e a necessidade de lidar com os *hot-spots*.

3.4.2 Limitador Supercondutor Resistivo com Transição Auxiliada por Campo Magnético

Para proporcionar uma transição mais rápida e homogênea, um grupo de pesquisadores propôs um limitador resistivo com transição auxiliada por campo magnético (*resistive with magnetic field assisted SFCL*). Neste tipo de limitador, uma bobina *shunt* é inserida coaxialmente por fora do supercondutor como mostra o esquema na Figura 3.13. Em condições de curto-circuito, a transição começa a ocorrer em partes do supercondutor, o que faz com que a corrente seja parcialmente desviada para a bobina. A corrente circulante na bobina gera um fluxo magnético que por sua vez gera um efeito positivo na transição das demais partes do supercondutor, reduzindo a corrente crítica e acelerando a transição [34]. As vantagens e problemas desta configuração são semelhantes às do limitador resistivo abordado na Seção anterior. Uma vantagem adicional desta configuração é que o material supercondutor é capaz de suportar maiores campos elétricos durante o período de falta, e portanto uma menor quantidade de material supercondutor é necessária [1].

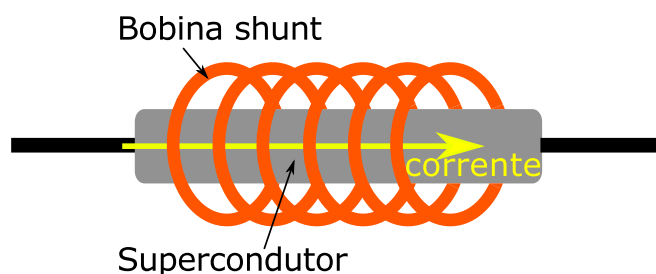


Figura 3.13: Ilustração de limitador supercondutor resistivo com transição auxiliada por campo magnético.

3.4.3 Limitador Supercondutor Indutivo com Núcleo de Ferro

O funcionamento do limitador de corrente supercondutor indutivo é baseado no acoplamento magnético entre o circuito a ser protegido e o circuito contendo o elemento supercondutor. Este limitador também é conhecido como limitador de núcleo blindado ou limitador do tipo transformador, em razão da semelhança com o princípio de funcionamento de um transformador com dois enrolamentos, sendo o secundário em curto-circuito (Figura 3.14) [1].

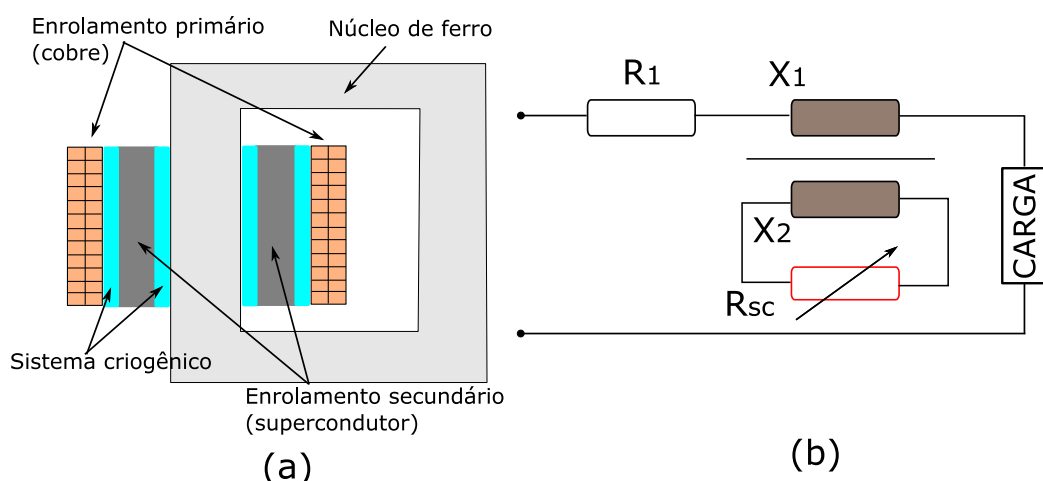


Figura 3.14: (a) Ilustração de limitador supercondutor indutivo com núcleo de ferro e (b) circuito equivalente de (a).

Conforme apresentado no esquema da Figura 3.14a, o enrolamento primário é feito de material condutor convencional conectado em série com o sistema a ser protegido, enquanto o enrolamento secundário possui somente uma espira que é um invólucro cilíndrico constituído de material supercondutor, sendo este resfriado por um sistema criogênico.

O conceito de limitação de corrente do limitador indutivo reside nas propriedades magnéticas dos supercondutores. Sob condições normais de operação, a densidade de corrente induzida no supercondutor é menor do que a densidade de corrente crítica, de forma que o material encontra-se em seu estado de resistividade nula. Assim, o fluxo magnético produzido pelo enrolamento primário é compensado pelo fluxo magnético originário das 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 [1].

Em condições de curto-circuito, a corrente induzida no enrolamento secundário excede o seu valor crítico. Conseqüentemente, o material supercondutor transita para o estado normal, passando a apresentar resistência diferente de zero e dissipação térmica. O fluxo magnético do enrolamento primário passa a não mais ser compensado pelo supercondutor, e aumenta consideravelmente no núcleo magnético, levando a um rápido aumento da impedância total vista pelo lado primário.

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. 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 (*current leads*).

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 [1].

A principal desvantagem desta configuração é o grande tamanho e peso em razão da necessidade de utilização de núcleo de ferro com proporções semelhantes às de um transformador de mesma potência nominal [17].

3.4.4 Limitador Supercondutor Indutivo com Núcleo de Ar

O limitador de núcleo de ar é uma variação do limitador indutivo que permite a omissão do núcleo de ferro. Este é um novo conceito em desenvolvimento na Alemanha [35] e possui princípio de funcionamento que é semelhante ao do limitador indutivo. A Figura 3.15 apresenta uma fotografia, esquema da Seção transversal e vista vertical do equipamento. O limitador é composto por dois enrolamentos, sendo o primário composto de cobre e o secundário é um enrolamento de fitas HTS 2G resfriado por nitrogênio líquido (77 K).

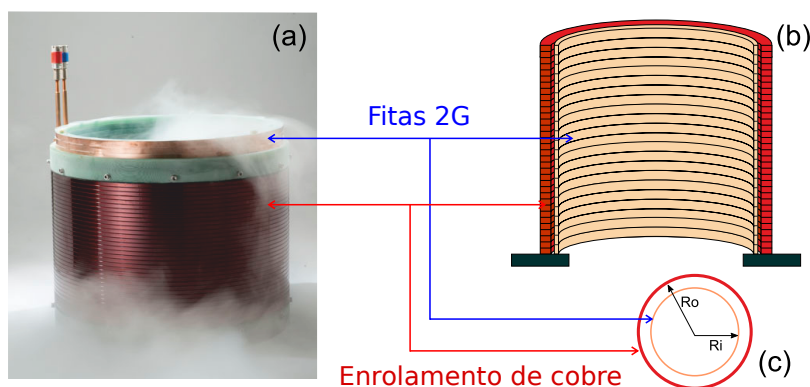


Figura 3.15: Enrolamento de cobre (primário) e enrolamento supercondutor (secundário) do limitador supercondutor de núcleo de ar: (a) Fotografia (b) Esquema da Seção transversal e (c) Vista superior do dispositivo.

O funcionamento do dispositivo pode ser melhor entendido pela análise de seu circuito equivalente que se assemelha ao de um transformador em curto-circuito, conforme Figura 3.16.

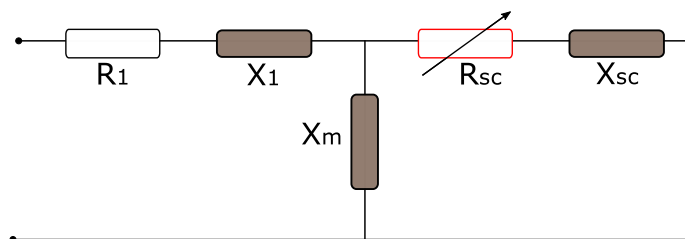


Figura 3.16: Circuito equivalente do limitador indutivo de núcleo de ar.

Em condições normais de operação, as fitas supercondutoras no enrolamento secundário blindam o campo magnético no interior das bobinas, de forma que a corrente induzida no enrolamento primário é menor do que a corrente crítica e o supercondutor encontra-se no estado de resistência nula ($R_{sc} = 0$). Como a indutância do enrolamento supercondutor X_{sc} é pequena, a impedância total vista pelo lado primário é baixa. Em condições de curto-circuito, a corrente no enrolamento de cobre (primário) aumenta, de forma que é induzida uma corrente no enrolamento secundário. Dependendo do quão grande é esta corrente, o supercondutor transita para o estado normal, fazendo com que a impedância do secundário aumente consideravelmente. Como a impedância do secundário torna-se maior do que a do ramo de magnetização X_m , a maior parte da corrente de curto-circuito é desviada para este ramo e a corrente de curto-circuito é limitada.

O principal objetivo desta tecnologia é a modificação para aperfeiçoamento de reatores de núcleo de ar já existentes a partir da inserção de um novo enrolamento supercondutor. A não existência do núcleo de ferro permite redução considerável do peso, tamanho e custo do equipamento em relação ao limitador indutivo convencional [17]. Além disto, assim como os limitadores indutivos, possui a vantagem em relação ao limitador resistivo de que a corrente de carga não passa pelo circuito criogênico, o que reduz as perdas térmicas.

3.4.5 Limitador Supercondutor de Núcleo Saturado

O funcionamento do limitador de núcleo saturado é baseado, essencialmente, no comportamento dinâmico das propriedades magnéticas do ferro para mudar a reatância indutiva do sistema.

O conceito utiliza, para cada fase, dois núcleos de ferro, cada qual com um enrolamento de corrente alternada feito de material condutor convencional, os quais são conectados em série com a linha a ser protegida. Os dois núcleos de ferro possuem ainda um enrolamento supercondutor comum que é alimentado por uma fonte de corrente contínua. A Figura 3.17 apresenta uma ilustração desta topologia.

O comportamento não-linear do ferro constitui a base física deste limitador. Em operação normal, ambos os núcleos são mantidos saturados pela corrente contínua produzida pela fonte CC que flui no enrolamento supercondutor.

Na situação de curto-circuito, os picos negativos e positivos de corrente alternada forçam os núcleos a saírem da situação de saturação, o que leva a aumento da impedância de linha durante parte de cada semiciclo. O resultado é uma redução considerável na corrente de curto-circuito. Durante o curto-circuito, a alternância entre a saturação e não saturação do núcleo faz com que as formas de onda tenham

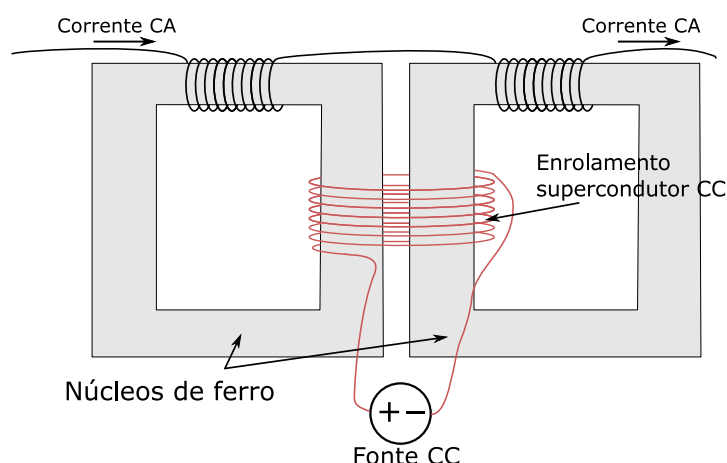


Figura 3.17: Ilustração de limitador supercondutor de núcleo saturado.

um conteúdo harmônico elevado. Entretanto, em situação normal, as formas de onda de tensão e corrente não são afetadas pelos harmônicos [17].

Nesta configuração, o enrolamento supercondutor do limitador de núcleo saturado não transita em nenhum momento para o estado normal, o que é uma vantagem pelo reduzido tempo de recuperação. A principal desvantagem desta configuração é o grande tamanho e peso em razão da necessidade de dois núcleos de ferro que podem ser consideravelmente maiores do que um transformador de mesma potência nominal [17].

3.4.6 Limitador Supercondutor em Ponte Completa

Os limitadores em ponte completa (*bridge-type superconducting fault current limiters*) utilizam elementos de chaveamento de eletrônica de potência em conjunto com uma bobina feita com material supercondutor.

Na configuração original, proposta pela primeira vez em 1983, diodos são arranjados em formato de retificador de onda completa, conectados em conjunto com uma fonte de tensão CA e uma bobina supercondutora. A Figura 3.18 apresenta um circuito deste tipo.

Em condições normais de operação, a fonte de corrente contínua fornece uma corrente de amplitude I_0 que é superior à corrente alternada I_{ac} . Isto faz com que os quatro diodos (D1, D2, D3 e D4) estejam em regime de condução, de forma que a corrente alternada flui somente pelos diodos, e não pela bobina supercondutora.

Na ocorrência de um curto-circuito, a corrente alternada assume valores superiores à corrente contínua. No semiciclo positivo, somente o par de diodos D1 e D2 conduzem, e no semiciclo negativo, somente o par de diodos D3 e D4 conduzem. Este comportamento faz com que a corrente alternada seja desviada para o reator, limitando assim a corrente de curto-circuito pela ação da indutância L. Se tiris-

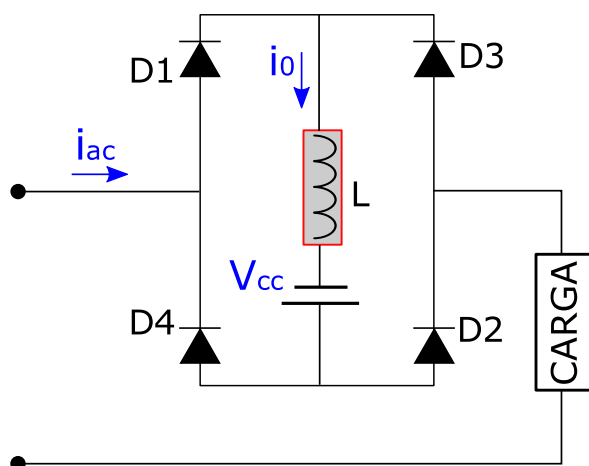


Figura 3.18: Circuito básico de limitador supercondutor em ponte completa.

tores são usados no lugar dos diodos, é possível que a limitação da corrente seja feita antes do primeiro semiciclo, mas em contrapartida é necessário um circuito de detecção e acionamento dos dispositivos [1].

Em princípio o reator não necessariamente precisa ser feito de material supercondutor, mas isto implicaria em maiores perdas devido à condução de corrente contínua pelo reator. Nesta configuração, o elemento supercondutor é utilizado somente em seu estado de resistência nula, não havendo transição para o estado normal em nenhum momento. Esta pode ser considerada uma vantagem deste tipo de limitador, uma vez que o tempo de recuperação é praticamente nulo [17].

Como desvantagens, podemos citar que esta configuração não é do tipo falha-segura: uma falha nos componentes semicondutores, por exemplo, pode criar um caminho para fluxo de corrente e impossibilitar a limitação do curto-circuito. Além disso, as perdas dissipativas em regime normal são determinadas pelos semicondutores de potência e são consideradas altas.

3.5 Comparativo dos Limitadores de Curto-Circuito Convencionais e Supercondutores

Os métodos usualmente empregados no tratamento da limitação de corrente foram expostos na Seção 3.3 e apresentam alguns inconvenientes que podem ou não serem aceitáveis dependendo das características do sistema no qual serão empregados. No caso da instalação de reatores de núcleo de ar em série, há a ocorrência de problemas como as quedas de tensão, perdas excessivas e problemas de instabilidade transitória, que podem inviabilizar a utilização destes dispositivos. Os dispositivos pirotécnicos não interferem na operação do sistema em condições normais, mas possuem o problema da necessidade de rearme, semelhante aos fu-

síveis. Os disjuntores de estado sólido ainda estão em fase de desenvolvimento, e apresentam como desvantagem as elevadas perdas e altos custos. No caso dos dispositivos FACTS, do IPC e dos sistemas de transmissão HVDC, são raras as aplicações destas soluções especificamente para a limitação de curto-circuito. Embora estas tecnologias tenham sido iniciadas há décadas, seu uso é bastante complexo e muito caro, e, de forma geral, somente são viáveis em situações muito específicas ou quando associadas a outras finalidades além da limitação. Os limitadores baseados em supercondutores apresentam algumas características gerais interessantes frente a estes equipamentos, como falha-segura, não interferência no sistema na operação normal, baixas perdas, grande capacidade de limitação já no primeiro ciclo e não necessidade de rearme e substituição de partes. A Tabela 3.1 apresenta um comparativo geral das características das tecnologias de limitadores.

A Seção 3.4 tratou especificamente dos limitadores supercondutores e abordou uma variedade de configurações possíveis. A Tabela 3.2 apresenta um comparativo dentre os tipos de limitadores supercondutores. Os limitadores resistivos possuem configuração simples, compacta, e rápido tempo de atuação, mas possuem como desvantagem os problemas relacionados às perdas térmicas pela passagem da corrente no sistema criogênico. Os limitadores indutivos de núcleo de ferro possuem a vantagem de não estarem conectados em série com o sistema, o que reduz as perdas térmicas, mas possuem peso e tamanho consideravelmente maior. O limitador indutivo de núcleo de ar agrega algumas vantagens dos limitadores resistivo e indutivo. Os limitadores de núcleo saturado e de ponte completa possuem a vantagem em relação aos demais de não apresentarem perdas CA e terem tempo de recuperação imediato, pela não necessidade de transição do elemento supercondutor. Em contrapartida, o limitador de núcleo saturado possui tamanho e volume muito grande, enquanto o limitador em ponte completa apresenta perdas pela utilização de chaves de eletrônica de potência e não é falha-segura. No presente trabalho será avaliada a atuação de um limitador supercondutor do tipo resistivo, que é um limitador que possui maior quantidade de pesquisa e protótipos em desenvolvimento.

Tabela 3.1: Comparativo geral das principais características dos limitadores de corrente de curto-circuito.

	Reatores de Núcleo de Ar	Dispositivos Pirotécnicos	Disjuntores de Estado Sólido	FACTS, IPC , HVDC	SFCL
Nível de tensão	Distribuição / Transmissão	Distribuição	Distribuição	Distribuição / Transmissão	Distribuição
Disponibilidade Tecnológica	Comercial	Comercial	Protótipos / Desenvolvimento	Comercial / Desenvolvimento	Comercial / Desenvolvimento
Quedas de Tensão	Altas	Baixas	Baixas	Médias	Baixas
Perdas	Médias	Baixas	Altas	Altas	Baixas
Falha-segura	Sim	Não	Não	Não	Sim (maioria)
Rearme	Não	Sim	Não	Não	Não
Volume / peso	Grande	Pequeno	Pequeno	Médio	Pequeno / Médio
Custos	Médio	Baixo	Médio / Alto	Alto	Médio / Alto

Tabela 3.2: Comparativo das principais características entre os tipos de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores existentes, adaptado de [17].

	Resistivo	Resistivo Auxiliado por Campo Magnético	Indutivo com Núcleo de Ferro	Indutivo com Núcleo de Ar	Núcleo Saturado	Ponte Completa de Diodos
Falha-segura	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Transição do Supercondutor	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Perdas CA	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Corrente de linha entra no Criostato	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim
Auxílio de sensores	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Volume e peso	Pequeno	Pequeno / Médio	Médio / Grande	Pequeno / Médio	Grande	Médio
Manutenção	Média	Baixa/Média	Média	Baixa	Baixa	Média
Tempo de Recuperação	Segundos / Minutos	Segundos / Minutos	Segundos	Segundos	Imediato	Imediato
Quedas de tensão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa

Capítulo 4

Modelo de Simulação

4.1 Introdução

O atual nível de desenvolvimento tecnológico na fabricação dos materiais supercondutores já tornou viável a disponibilidade comercial dos limitadores de curto-circuito supercondutores. A realização de diversos estudos antes da efetiva integração destes dispositivos nos sistemas elétricos de potência é necessária, assim como para os demais métodos de limitação de curto-circuito. É importante avaliar a atuação do dispositivo tanto do ponto de vista do controle das propriedades físicas dos supercondutores que o compõe, quanto do impacto da inserção dos mesmos nos sistemas de potência.

Neste capítulo serão detalhados os procedimentos realizados com o objetivo de avaliar a atuação de um limitador de corrente de curto-circuito resistivo em um sistema de potência teste. Inicialmente, será descrito o tipo e características do limitador considerado, bem como será apresentado um ensaio realizado com uma amostra do dispositivo com o objetivo de validar o modelo de simulação a ser utilizado. Posteriormente, será detalhada a forma com que o dispositivo é modelado para ser inserido em programa computacional de análise dinâmica em conjunto com o sistema elétrico de potência. A simulação do modelo implementado será confrontada com os resultados do ensaio do dispositivo para validação. Finalmente, será descrito o sistema de potência teste que será utilizado de base para as simulações do limitador e o limitador de curto-circuito será dimensionado especificamente para o sistema analisado.

4.2 Dispositivo Considerado

Como já mencionado, as maiores vantagens dos limitadores supercondutores do tipo resistivo são a sua simplicidade topológica, pequeno volume e peso dos com-

ponentes, impedância desprezível em condições normais de operação e rápido tempo de atuação. Estes limitadores são encontrados em diversos formatos como em barra, espiral, tubular, bobina do tipo panqueca, entre outros. Os materiais supercondutores mais utilizados em limitadores de corrente são os cerâmicos Bi-2212 na forma maciça (*bulk*) e as fitas de segunda geração à base do supercondutor YBCO (2G HTS). Há uma tendência a um uso cada vez maior de componentes 2G, devido ao seu menor tempo de recuperação e às ótimas propriedades de transporte de corrente destas fitas supercondutoras [36]. Por outro lado, os limitadores baseados em supercondutores na forma maciça estão caindo em desuso. O limitador supercondutor que será considerado neste trabalho é baseado em fitas 2G e é similar ao limitador empregado no projeto ENSYSTROB, que foi recentemente projetado, construído e instalado na Alemanha para aplicações de média tensão [36] [37].

A Figura 4.1(a) mostra uma fotografia do componente testado enquanto a Figura 4.1(b) apresenta o diagrama de conexão do mesmo. O limitador é composto de oito fitas de 4,3 m cada. Estas fitas são dispostas em 2 grupos de 4 fitas paralelas que são conectados em série com um contato central. Os condutores são dispostos em arranjo anti-paralelo de bobinas do tipo panqueca, de forma a minimizar a indutância e perdas CA do dispositivo. A corrente nominal é de $600 A_{rms}$ em temperatura de 77 K, e a tensão máxima é de $400 V_{rms}$. O equipamento é fabricado pela empresa *Nexans Superconductors GmbH*. De acordo com o fabricante, o limitador pode atuar por tempo de até 120 ms, limitando picos de corrente de até 70 kA. Os componentes são modulares, podendo ser conectados em arranjos série e/ou paralelo de modo a alcançar a tensão e a corrente nominais necessárias para cada situação da rede. O componente possui um elemento *shunt* metálico conectado em paralelo com o conjunto de fitas supercondutora, o qual conduz a maior parte da corrente quando o supercondutor transita para o estado normal.

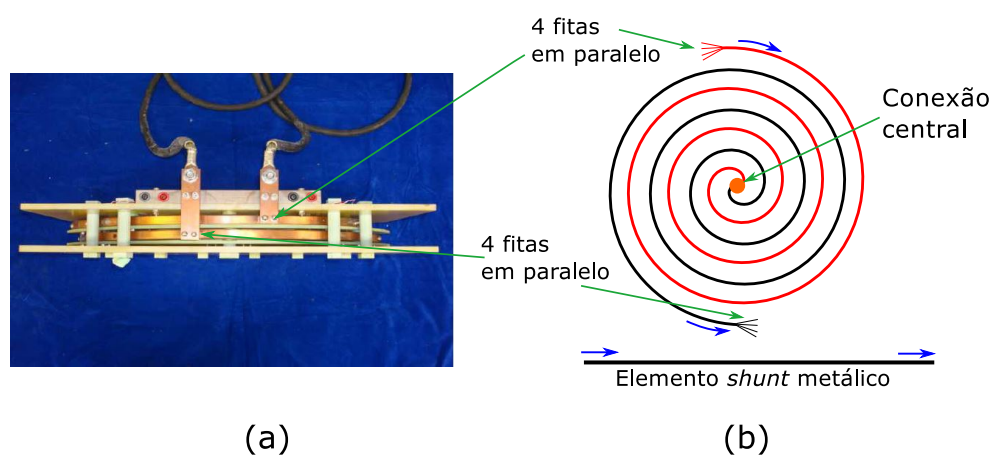


Figura 4.1: Foto (a) e diagrama de conexão (b) do limitador de curto-circuito submetido a ensaios.

4.3 Ensaio para Validação

As configurações do ensaio e o resultado experimental que serão utilizados neste trabalho foram gentilmente cedidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL ELETROBRAS) e são provenientes de uma série de testes em limitadores de curto-circuito supercondutores resistivos realizados no Laboratório de Alta Corrente do CEPEL [17, 36, 37].

O limitador foi submetido a testes de curto-circuito monofásico através do circuito de testes representado de forma simplificada pela Figura 4.2. O circuito é composto de dois transformadores, sendo que o primeiro (T1) abaixa a tensão de 138 kV proveniente da subestação de Furnas para o valor de 4,16 kV, para alimentação de um circuito secundário. Neste circuito, é ajustado o valor da corrente de curto-circuito desejada através dos valores da resistência R e da indutância L . O limitador de curto-circuito é conectado numa terceira parte do circuito, após o abaixamento da tensão por um segundo transformador (T2). O início e fim do curto-circuito são controlados pela abertura e fechamento da chave S ¹. No ensaio considerado no presente trabalho, foram aplicadas correntes presumidas assimétricas (carga indutiva) de 5 kA_{rms} , com duração de 80 ms e tensão senoidal de 200 V_{rms} . Um sistema de aquisição de dados coletou os dados da corrente limitada e da queda de tensão sobre o limitador. Antes da aplicação do ensaio de limitação de corrente, com o objetivo de medir o valor de corrente de curto-circuito (presumida), foi realizado teste de curto-circuito sem a presença do limitador com uma barra de cobre em seu lugar.

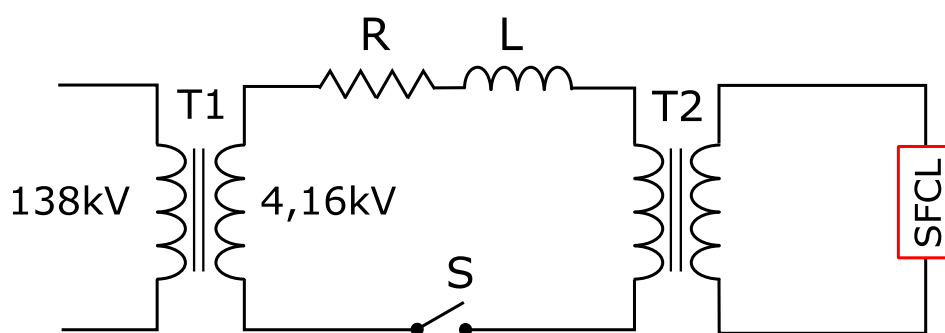


Figura 4.2: Esquema simplificado do circuito de ensaio empregado nos testes.

A Figura 4.3 apresenta as formas de onda obtidas da corrente presumida de curto-circuito, corrente limitada e a queda de tensão sobre o limitador. O primeiro pico da corrente assimétrica foi reduzido de $13,5 \text{ kA}_{pico}$ para $4,4 \text{ kA}_{pico}$ com a atuação do limitador. Pelo ensaio, pode-se perceber o momento do início da atuação do limitador, antes do primeiro quarto do ciclo de corrente, quando o mesmo passa a apresentar resistência diferente de zero.

¹Na prática são duas chaves, sendo uma para o fechamento e outra para a abertura

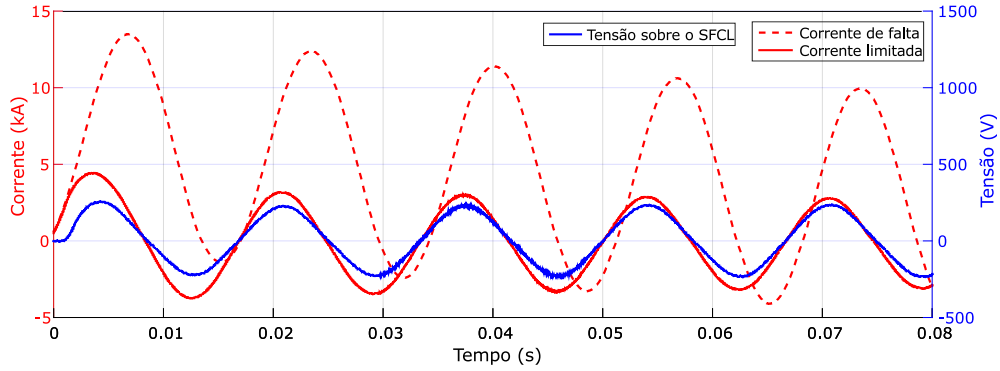


Figura 4.3: Corrente de curto-circuito e corrente limitada em ensaio de 5 kA_{rms} .

4.4 Comportamento Dinâmico do Limitador

Em razão do grande número de variáveis envolvidas no processo de transição do material supercondutor para o estado resistivo, uma previsão precisa do comportamento dinâmico de um limitador de curto-circuito supercondutor é bastante complexa. No momento do curto-circuito, grande parte da potência de curto-circuito fornecida pela fonte é absorvida pelo supercondutor, fazendo com que ocorra um rápido aquecimento do material. Além disso, durante a transição, o supercondutor é submetido a altos campos elétricos que são muito difíceis de serem medidos localmente, o que torna a transição difícil de ser modelada [17]. Os modelos existentes para previsão do comportamento dos limitadores de curto-circuito supercondutores para sistemas de potência podem ser classificados em modelos simplificados e modelos detalhados, conforme descrito a seguir.

4.4.1 Modelos Simplificados

O comportamento dinâmico de um limitador supercondutor resistivo em um sistema elétrico pode ser representado através de uma resistência variável no tempo. Esta resistência possui um valor zero em condições normais de operação e começa a aumentar no momento da ocorrência do curto-circuito ($t = t_f$) até um valor final constante. Uma forma de se representar este aumento da resistência é através de uma curva exponencial conforme a Equação 4.1.

$$R_{sfcl} = \begin{cases} 0, & \text{para } t < t_f, \\ cte [1 - e^{-q(t-t_f)}], & \text{para } t > t_f. \end{cases} \quad (4.1)$$

A constante q define o quão rápida a resistência do material aumenta até aproximar-se do valor constante (cte), quando é assumido o fim da transição do supercondutor. Modelos como estes são bastante simples e de fácil implementação computacional e por esta razão são utilizados em muitos trabalhos em que

se deseja analisar o comportamento dos limitadores de curto-circuito em sistemas de potência, especialmente para de estudos de estabilidade [38–41]. Apesar disso, esta abordagem apresenta problemas que devem ser considerados:

- **Não reage ao início das faltas automaticamente:** é necessário que seja programado para entrar no estado resistivo num tempo específico da simulação. Esta questão é crítica pois é difícil definir com precisão o momento que se inicia o processo de transição do supercondutor para o estado normal, ainda mais quando se considera faltas envolvendo mais de uma fase em sistemas com muitas barras.
- **Baixa precisão do modelo:** o modelo assume um aumento exponencial da resistência e considera o valor final da resistência *shunt* após a transição do supercondutor como uma constante, o que nem sempre ocorre. Apesar de apresentarem resultados satisfatórios em alguns casos, estes modelos não são capazes de descrever com detalhes o comportamento dinâmico do limitador.
- **Necessidade de informações de testes e ensaios anteriores para ser usado:** o modelo pode ser capaz de reproduzir o comportamento transitório de um limitador, mas não é capaz de prever este comportamento, sendo necessária uma calibração do modelo, através da comparação com ensaios, para cada tipo de limitador.
- **Falta de informações adicionais:** não fornece quaisquer informações sobre variáveis internas do limitador, como o aquecimento dos materiais que o compõe.

4.4.2 Modelos Detalhados

Para uma previsão mais precisa do comportamento do limitador é necessário levar em consideração as características da curva E-J do supercondutor. Alguns modelos mais detalhados foram propostos e levam em consideração esta característica (referências [42] e [27]), mas ainda assim falham em oferecer uma representação dinâmica fiel do limitador, uma vez que não é possível, por exemplo, obter os valores do aumento da temperatura em cada camada dos materiais que compõem o limitador. Para isso, é importante levar em conta os processos de trocas térmicas que ocorrem entre as camadas do supercondutor, o que em geral torna o problema bastante complexo de ser resolvido em razão do acoplamento das equações elétricas e térmicas que regem o funcionamento do dispositivo [17].

Modelos baseados no método dos elementos finitos [43] e método das diferenças finitas [44] [17] também foram propostos e oferecem uma descrição bastante precisa e local dos efeitos supercondutores. No entanto, a implementação destes modelos requerem alto esforço computacional, de forma que atualmente tem sido utilizados somente para simulação de partes do material supercondutor e por curtos períodos tempo [17]. Além disso, a interface destes modelos em sistemas elétricos com elementos de circuitos convencionais como transformadores, linhas de transmissão, cargas, etc, é bastante complicada.

Uma alternativa vantajosa, e que será considerada neste trabalho, é a modelagem das trocas térmicas do limitador utilizando uma analogia entre circuitos elétricos e térmicos (analogia eletro-térmica). Este método apresenta um bom compromisso entre a complexidade da modelagem e esforço computacional, resultando numa representação bastante fiel do comportamento dinâmico do limitador e ao mesmo tempo possível de ser implementado em programas de simulação de sistemas elétricos juntamente com outros componentes.

4.5 Analogia Eletro-térmica

A analogia entre circuitos térmicos e elétricos já foi utilizada por pesquisadores para prever o comportamento térmico de muitos equipamentos e dispositivos elétricos. Este método foi recentemente proposto para aplicação da simulação dos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores [45].

O método é relativamente simples, e consegue prever com boa precisão o comportamento térmico e elétrico do limitador. Para análise do circuito elétrico, o limitador supercondutor é modelado como um grupo de resistências variáveis em paralelo, cujos valores dependem da temperatura de cada camada. A variação desta temperatura no tempo é obtida pela solução das equações de um circuito equivalente térmico-elétrico. Basicamente, as saídas do equivalente elétrico são usadas como entradas no circuito térmico-elétrico, o que possibilita uma solução acoplada das equações elétricas e térmicas.

Esta seção apresenta a aplicação deste método através da obtenção de um equivalente elétrico e térmico-elétrico para o limitador supercondutor resistivo em estudo.

4.5.1 Equivalente Elétrico

Para análise elétrica, o limitador supercondutor é modelado como um grupo de resistências variáveis em paralelo, sendo que cada resistência corresponde a uma camada do material. O valor da resistência de cada camada, depende da resisti-

vidade do material que a compõe. Além disso, a resistividade de cada camada é linearmente dependente da temperatura (com exceção do YBCO quando abaixo de T_c).

A Figura 4.4(a) apresenta uma representação das camadas da fita 2G HTS enquanto que a Figura 4.4(b) apresenta o equivalente elétrico de cada fita. A arquitetura ilustrada na Figura 4.4(a) é semelhante àquela das fitas utilizadas no limitador ensaiado (Seção 4.3) e apresenta quatro camadas ² η com diferentes espessuras (ν_η): camada de prata superior, camada supercondutora de YBCO, camada de substrato *Hastelloy* e camada de prata inferior.

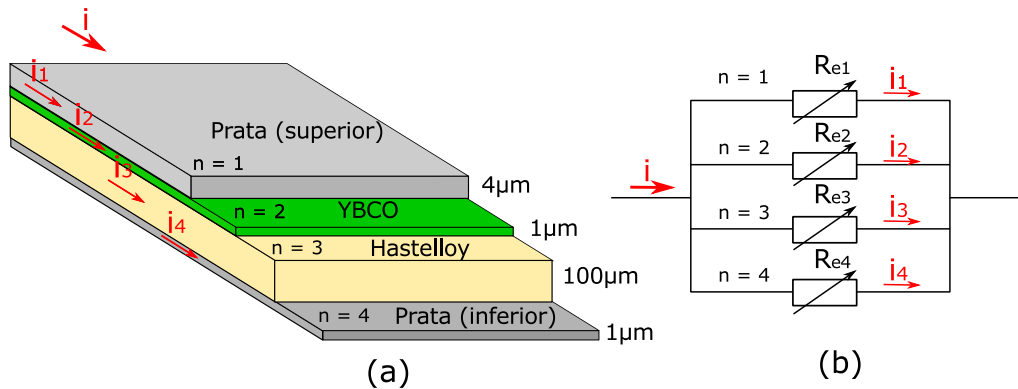


Figura 4.4: Seção transversal da fita 2G YBCO do limitador resistivo (a) e sua representação elétrica (b).

A resistência de cada camada η é dada pela Equação:

$$R_{e\eta}(T) = \rho_\eta(T) \frac{l}{A_\eta}, \quad (4.2)$$

sendo $\rho_\eta(T)$ a resistividade elétrica do material de cada camada, $A_\eta = \nu_\eta \times d$ a área da Seção transversal de cada camada ³ e l o comprimento total da fita. A resistência equivalente da fita é obtida pelo cálculo do paralelismo das resistências de cada camada de acordo com a Equação 4.3:

$$\frac{1}{R_{fita}} = \frac{1}{R_{e1}} + \frac{1}{R_{e2}} + \frac{1}{R_{e3}} + \frac{1}{R_{e4}} \quad (4.3)$$

Quando são consideradas fitas conectadas em paralelo e/ou série, é necessário calcular o equivalente total da resistência do componente. A partir da corrente total que passa em uma fita 2G, a corrente que passa por cada camada da fita pode ser calculada por um simples divisor de corrente:

$$i_\eta = \frac{R_{fita}}{R_\eta} i \quad (4.4)$$

²Na fita 2G existe também uma fina camada de *buffer*, a qual não foi representada pois seu efeito é desprezível.

³(d = largura)

Para a camada de YBCO após a transição ($T > T_c$) e para as demais camadas da fita 2G, a resistividade varia linearmente com a temperatura. As equações 4.5 a 4.7 descrevem a dependência com a temperatura para cada material das camadas da fita 2G [17].

$$\rho_{1,4}(T) = -2.08 \times 10^{-9} + 6.17 \times 10^{-11}T, \quad (4.5)$$

$$\rho_2(T) = -10 \times 10^{-4} + 1 \times 10^{-4}T \quad (\text{para } T > T_c), \quad (4.6)$$

$$\rho_3(T) = 1.10 \times 10^{-6} + 8.96 \times 10^{-11}T. \quad (4.7)$$

Para o supercondutor YBCO ($\eta = 2$), durante a transição ($T < T_c$), a resistividade pode ser extraída da curva E-J do material nos estágios de *flux creep* e *flux flow*, conforme descrito na Seção 2.6.1. Em razão da grande não-linearidade da curva E-J do supercondutor, e uma vez que a resistividade do supercondutor depende diretamente da corrente que passa por ele, será utilizado um método iterativo para o cálculo da resistividade. Este processo iterativo de corrente evita instabilidade numérica na simulação do limitador supercondutor. Este processo é resumido no diagrama da Figura 4.5 e maiores detalhes do mesmo são encontrados na referência [17].

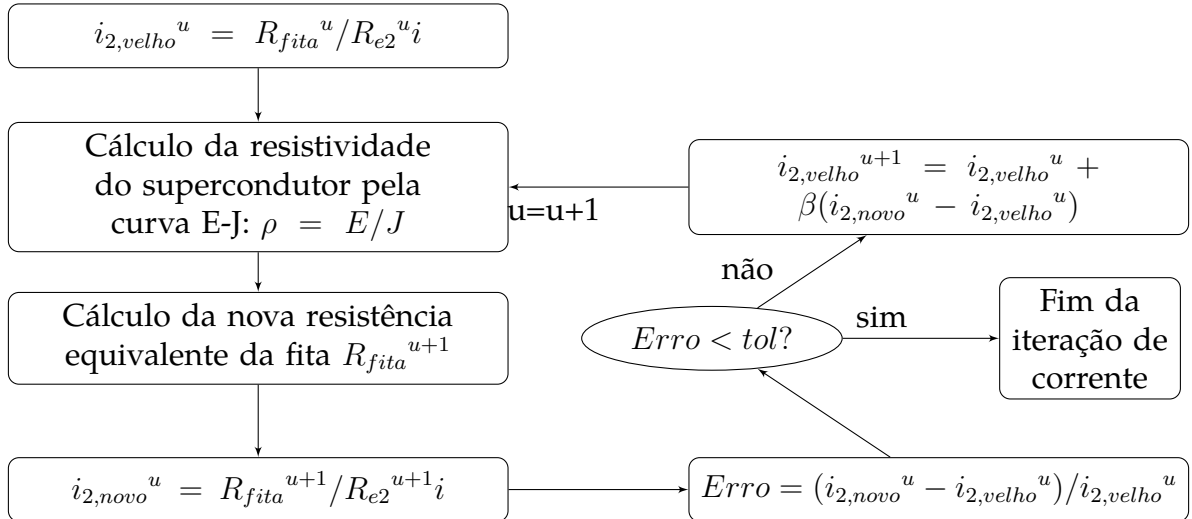


Figura 4.5: Diagrama de blocos do método iterativo para cálculo da resistividade do material supercondutor.

O processo de iteração começa com o valor da corrente que passa na camada do supercondutor ($i_{2,velho}^u$), sendo esta corrente calculada pelo divisor de corrente (Equação 4.4) a partir da corrente total na fita 2G e dos valores iniciais de resistência. A partir deste valor, a resistividade (ρ) do material é obtida a partir da curva E-J. Com o valor de ρ , o valor da resistência da camada supercondutora é recalculado e um novo valor da corrente que passa pelo supercondutor é obtido ($i_{2,novo}^u$).

O valor de $i_{2,novo}^u$ é então comparado com o valor anterior da corrente, e, caso o erro percentual encontrado esteja dentro dos limites de tolerância, a iteração termina e o valor da resistividade do supercondutor é obtido. Caso contrário, o valor da corrente inicial é incrementado ($i_{2,velho}^{u+1}$) e é iniciada uma nova iteração.

Elemento *Shunt*

O elemento *shunt* que é geralmente conectado em paralelo com o componente pode ser modelado como uma resistência ou como um reator com impedância praticamente indutiva [46]. Como o *shunt* não entra em contato direto com as fitas 2G, não há trocas de calor entre o *shunt* e as fitas.

No entanto, como boa parte da corrente de curto-circuito passa pelo *shunt* após a transição da camada supercondutora, este também pode ser aquecido. Neste trabalho, o elemento *shunt* será modelado como uma impedância constante. Esta abordagem foi utilizada porque a variação da resistência deste elemento com a temperatura é bem pequena em relação à variação da resistência dos demais materiais que compõe a fita 2G, de forma que a influência no resultado da resistência equivalente do limitador é pequena. Além disso, na simulação do limitador dentro do sistema teste, conforme será visto adiante, o *shunt* será considerado um reator com impedância praticamente indutiva. Assim, os efeitos de aquecimento do *shunt* não serão levados em conta.

4.5.2 Equivalente Térmico

Para determinação das temperaturas de cada camada é feita uma análise da transferência de calor, onde uma transferência unidimensional de calor entre as camadas na direção transversal do condutor é assumida. É neste ponto que a analogia existente entre circuitos térmicos e elétricos é utilizada para auxiliar na modelagem e solução do problema. Empregando esta analogia, o forte acoplamento entre as equações elétricas e térmicas torna-se mais simples de ser resolvido, uma vez que as equações de transferência de calor são equivalentes a equações elétricas de um circuito RC. Maiores detalhes da fundamentação matemática deste método podem ser encontrados nas referências [17] e [45]. A Tabela 4.1 lista as propriedades análogas entre os sistemas térmicos e elétricos utilizadas na elaboração dos circuitos térmicos-elétricos.

Desta forma, o problema unidimensional de condução de calor entre as camadas da fita 2G HTS (Figura 4.4a) pode ser representado pelo circuito térmico-elétrico apresentado na Figura 4.6. Neste circuito, as resistências R_η (sendo $\eta = 1, 2, 3, 4$) representam a oposição ao fluxo de calor por condução em cada camada η da fita 2G. O valor de R_η é dado pela Equação 4.8:

Tabela 4.1: Propriedades análogas entre sistemas térmicos e sistemas elétricos.

Sistemas Térmicos			Sistemas Elétricos		
Propriedade	Símbolo	Unidade	Propriedade	Símbolo	Unidade
Temperatura	T	K	Tensão	V	Volt
Potência	P	Watt	Corrente	i	Ampere
Capacidade Térmica	C	J/K	Capacitância	C	Farad
Resistência Térmica	R	K/Watt	Resistência Elétrica	R	Ohm

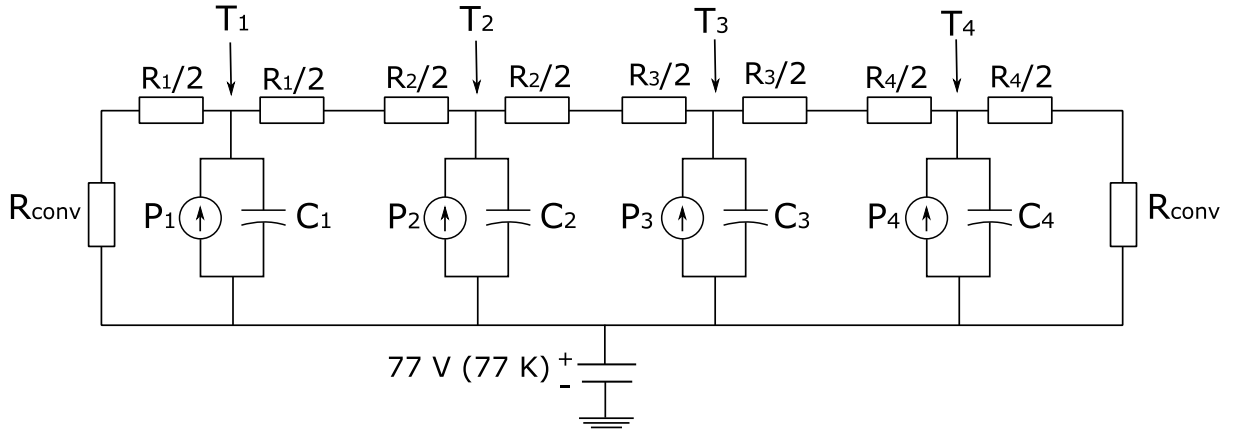


Figura 4.6: Circuito Térmico-Elétrico para resolver o comportamento térmico do módulo 2G YBCO.

$$R_{\eta} = \frac{\nu_{\eta}}{k_{\eta}S}, \quad (4.8)$$

sendo k_{η} a condutividade térmica de cada camada, ν_{η} a espessura de cada camada e $S = l \times d$ a área da Seção longitudinal da fita.

Os capacitores C_{η} representam a capacidade térmica dentro de cada camada η , e seu cálculo é dado por:

$$C_{\eta} = \gamma_{\eta}\varsigma_{\eta}\nu_{\eta}S, \quad (4.9)$$

em que ς_{η} representa o calor específico e γ_{η} a densidade volumétrica de cada camada η .

As fontes de corrente P_{η} estão associadas com a potência elétrica dissipada dentro de cada camada por efeito joule e são obtidas a partir do equivalente elétrico visto na Subseção anterior:

$$P_{\eta} = R_{e\eta}i_{\eta}^2. \quad (4.10)$$

A fonte CC de tensão de 77 V representa o líquido refrigerante (nitrogênio líquido - 77 K) que é utilizado para resfriar o limitador.

Finalmente, as resistências R_{conv} estão inversamente relacionadas com a transferência convectiva de calor entre o nitrogênio líquido e as camadas externas su-

perior e inferior e são dadas por:

$$R_{conv} = \frac{1}{h_c S}, \quad (4.11)$$

sendo h_c o coeficiente de transferência de calor por convecção.

No circuito térmico-elétrico da Figura 4.6, as temperaturas de cada camada da fita são numericamente iguais às tensões nos nós centrais das respectivas camadas com relação ao terra do circuito. Assim, o cálculo destas temperaturas torna-se um problema elétrico que pode ser resolvido pela solução das equações diferenciais que regem o comportamento do circuito. Aplicando os procedimentos de análises de circuitos por nós e evidenciando os nós correspondentes a T_1, T_2, T_3, T_4 , é possível chegar a um sistema de equações diferenciais no tempo que é representado em sua forma matricial pela Equação 4.12. Esta Equação representa o comportamento dinâmico do sistema térmico. Nesta Equação, T_{LN_2} representa a temperatura do líquido refrigerante (77 K). O cálculo das admitâncias entre os nós ($G_{01}, G_{12}, G_{23}, G_{34}$ e G_{40}) em função das resistências térmicas das camadas é dado pelas equações 4.13 a 4.17.

$$\begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_{01} + G_{12} & -G_{12} & 0 & 0 \\ -G_{12} & G_{12} + G_{23} & -G_{23} & 0 \\ 0 & -G_{23} & G_{23} + G_{34} & -G_{34} \\ 0 & 0 & -G_{34} & G_{34} + G_{40} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} + T_{LN_2} \begin{bmatrix} G_{01} \\ 0 \\ 0 \\ G_{40} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

A solução do sistema de equações diferenciais 4.12 precisa ser feita por métodos numéricos. No presente trabalho, tentou-se inicialmente a utilização do método de integração numérica de Euler explícito, mas não houve convergência dos valores das temperaturas. Já o método de Euler implícito ofereceu resultados satisfatórios. A discretização da Equação 4.12 pelo método de Euler implícito é dada pela Equação matricial 4.18 [47].

$$G_{01} = (R_{conv} + R_1/2)^{-1} \quad (4.13)$$

$$G_{12} = (R_1/2 + R_2/2)^{-1} \quad (4.14)$$

$$G_{23} = (R_2/2 + R_3/2)^{-1} \quad (4.15)$$

$$G_{34} = (R_3/2 + R_4/2)^{-1} \quad (4.16)$$

$$G_{40} = (R_4/2 + R_{conv})^{-1} \quad (4.17)$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}_{t+dt} = \left(\begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix} + dt \begin{bmatrix} G_{01} + G_{12} & -G_{12} & 0 & 0 \\ -G_{12} & G_{12} + G_{23} & -G_{23} & 0 \\ 0 & -G_{23} & G_{23} + G_{34} & -G_{34} \\ 0 & 0 & -G_{34} & G_{34} + G_{40} \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (4.18)$$

$$\times \left(\begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}_t + dt \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} + dt T_{LN_2} \begin{bmatrix} G_{01} \\ 0 \\ 0 \\ G_{40} \end{bmatrix} \right)$$

O modelo utilizado neste trabalho considera ainda que as propriedades térmicas da condutividade (k), calor específico (ς) e o coeficiente de transferência de calor (h_c) são dependentes da temperatura, conforme equações 4.19 a 4.24 [17]. Assim, é importante ressaltar que os resistores e capacitores do circuito térmico-elétrico da Figura 4.6 possuem valores variáveis. Apesar disso, a Equação 4.12 mantêm o mesmo formato e a solução pelo método de Euler implícito continua válida (Equação 4.18), sendo que os valores das resistências e capacitâncias são atualizados em cada passo de integração.

$$\varsigma_{1,4}(T) = 220.5 + 0.046T \quad (4.19)$$

$$\varsigma_2(T) = 390 \left(\frac{250}{T} \right)^2 \frac{e^{250/T}}{(e^{250/T} - 1)^2} \quad (4.20)$$

$$\varsigma_3(T) = 1900 + 388 (1 - e^{-T/310}) \quad (4.21)$$

$$k_{1,4}(T) = 402.9 + 501.8 \times 0.965^T \quad (4.22)$$

$$k_2 = 5.0 \quad (4.23)$$

$$k_3 = 3.873 + 0.017T \quad (4.24)$$

$$h_c(\Delta T) = \begin{cases} 0.2, & \text{para } \Delta T < 2.75, \\ \frac{1}{\Delta T} [3.81 - 2.82\Delta T + 0.72\Delta T^2 - 0.05\Delta T^3 \\ + 1.32 \times 10^{-3}\Delta T^4 - 12.7 \times 10^{-6}\Delta T^5], & \text{para } 2.75 < \Delta T < 28.4, \\ 0.03, & \text{para } \Delta T > 28.4. \end{cases} \quad (4.25)$$

Dentre os parâmetros variáveis com a temperatura, o coeficiente de transferência de calor h_c , representado no circuito térmico pelas resistências R_{conv} , é o que apresenta maior influência no comportamento dinâmico do limitador. A variação de h_c com a temperatura é um ponto essencial a ser considerado nas simulações e operações dos limitadores supercondutores baseados em fitas 2G HTS [46]. Esta variação é dependente da diferença de temperatura entre a superfície externa do supercondutor e o nitrogênio líquido (ΔT) e é decorrente da formação de bolhas de N_2 que alteram significativamente o processo de troca convectiva de calor entre o supercondutor e o líquido refrigerante. A curva utilizada neste trabalho é aquela apresentada na Figura 4.7 e que pode ser dividida em três fases: Convecção livre, *bubble boiling* e *film boiling*. Na fase de *bubble boiling*, há um aumento significativo de h_c , que acelera o processo de troca de calor, contribuindo para uma refrigeração mais efetiva do limitador e evitando as altas temperaturas. No último estágio da curva, chamado *film boiling*, h_c atinge seu valor mínimo, o que acarreta uma redução severa da troca de calor e conseqüentemente um aumento acentuado da temperatura do limitador.

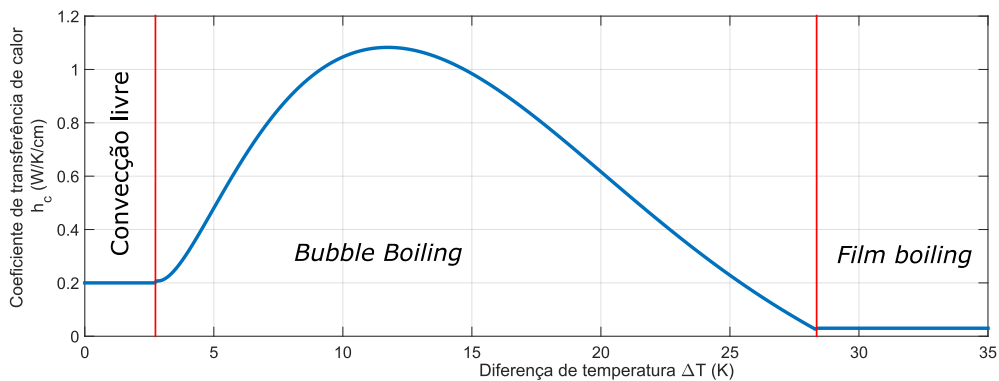


Figura 4.7: Curva de variação do coeficiente de transferência de calor entre as superfícies da fita YBCO 2G e o nitrogênio líquido.

4.5.3 Simulações

As simulações do presente trabalho foram realizadas através do programa MATLAB/Simulink. O Simulink é uma ferramenta do MATLAB que possui uma interface gráfica com o usuário (GUI) para construir e simular modelos com diagramas de blocos, usando as operações clicar-e-arrastar do mouse. Além de inúmeros blocos de operações matemáticas e de controle, diversos componentes elétricos pré-definidos são disponibilizados em pacotes do *software*, como resistores, capacitores, linhas de transmissão, transformadores, máquinas elétricas, etc, o que torna o software uma ferramenta poderosa para análise dinâmica de sistemas de potência. Neste trabalho, buscou-se implementar o modelo do limitador de curto-circuito em um bloco independente do Simulink, de forma a possibilitar a sua simulação em conjunto com quaisquer sistemas elétricos que sejam construídos e simulados com o software.

A rotina de simulação do limitador de curto-circuito foi inserida em código em um arquivo do MATLAB (arquivo ".m"), que foi integrada à simulação do Simulink (arquivo ".slx") através de um bloco pré-definido que permite a inserção de rotinas ".m" embutidas, conforme Figura 4.8. A rotina utilizada nas simulações é apresentada integralmente no Apêndice A. A cada passo de integração, o programa executou esta rotina de integração.

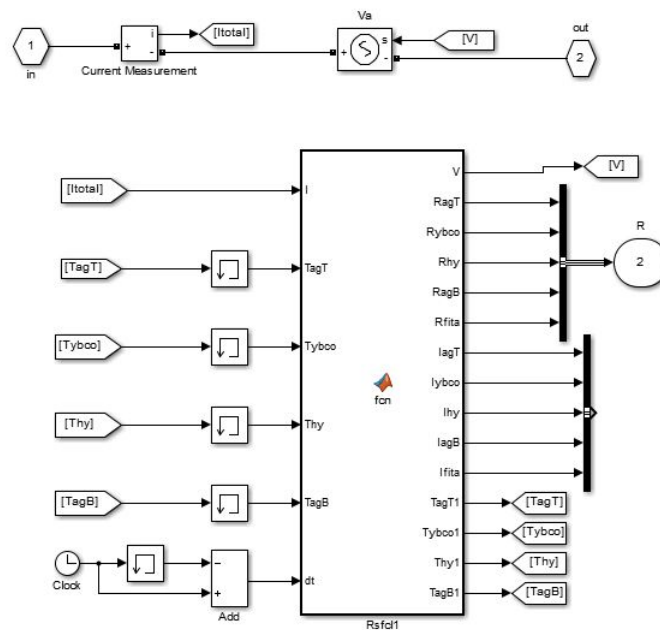


Figura 4.8: Bloco para simulação do limitador supercondutor.

Adicionalmente, para tornar mais prática a mudança das constantes do limitador para diferentes configurações, foi gerada uma interface gráfica para inserção destes parâmetros (características da fita 2G HTS, número de fitas em série, nú-

mero de fitas em paralelo, comprimento da fita, etc.).

A Figura 4.9 apresenta um fluxograma das etapas da simulação do limitador de curto-circuito supercondutor inserido num sistema elétrico genérico utilizando o método da analogia térmica-elétrica.

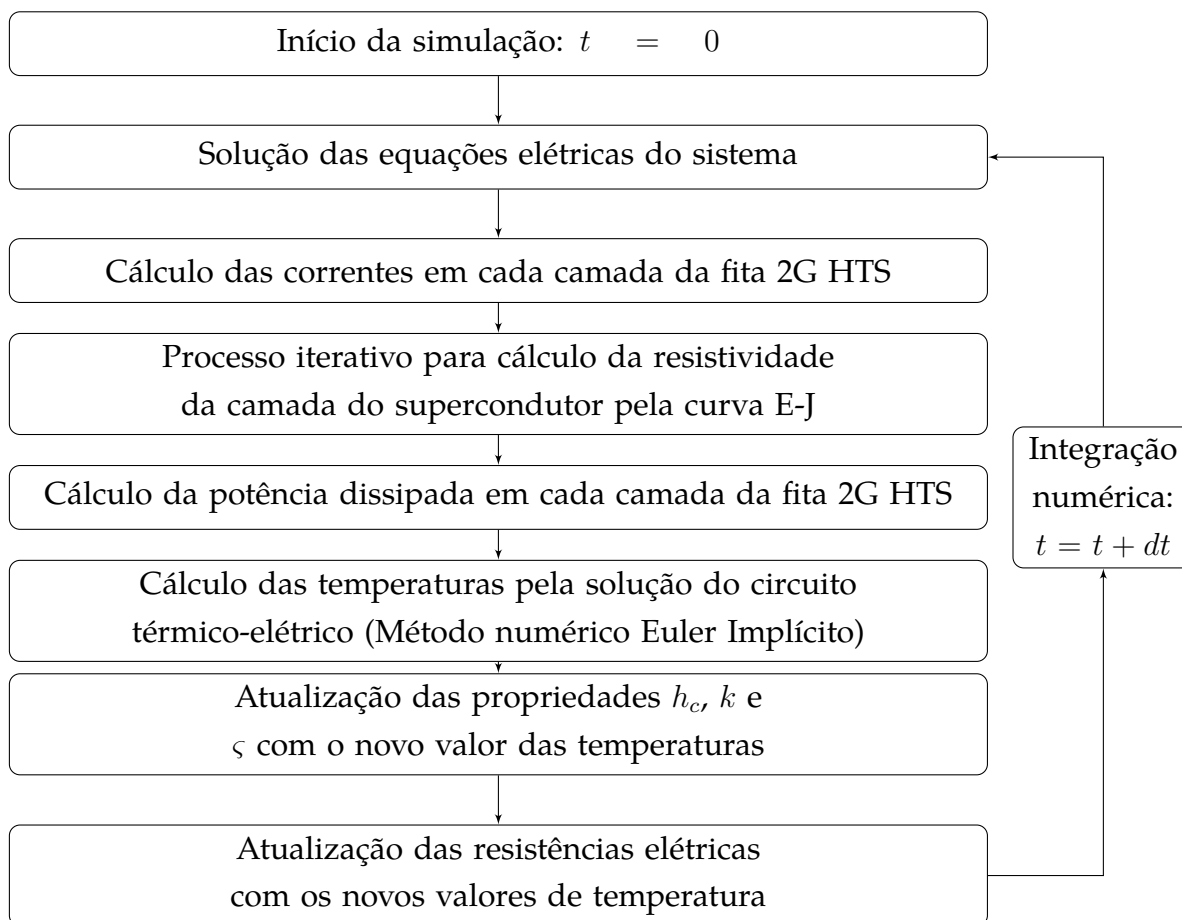


Figura 4.9: Diagrama de simulação do limitador de corrente de curto-circuito inserido num sistema elétrico genérico.

A solução das equações do sistema elétrico no qual o limitador é inserido é realizada pelas próprias rotinas de integração internas do software. A cada passo de integração, a corrente total que passa pelo limitador serve de entrada para a rotina do limitador do curto-circuito, que é executada pelo Simulink. A partir daí, são calculadas as correntes em cada camada da fita 2G através um divisor de corrente, conforme Equação 4.4. Inicia-se então o processo iterativo para o cálculo da resistividade da camada da fita 2G através da curva E-J, conforme descrito na Figura 4.5. Após o fim desse processo iterativo, de posse dos valores definitivos das resistências e correntes em cada camada do material, são calculadas a potência dissipada em cada camada do material pela Equação 4.10. Estes valores servem de entrada (fontes de corrente) para a solução numérica do sistema de equações diferenciais (Equação 4.12) resultantes do circuito térmico-elétrico. A integração

desta Equação é realizada dentro do código através do método de Euler implícito, conforme Equação 4.18. Finalmente, após os cálculos das temperaturas, as propriedades térmicas (h_c , k , e ς) e as resistências elétricas são atualizadas com os novos valores de temperaturas. A rotina de simulação do limitador é concluída e é iniciado mais um passo de integração ($t = t + dt$), sendo o processo repetido até que o tempo limite da simulação seja atingido.

Todas as simulações foram realizadas num Laptop convencional com sistema operacional Windows 10 (CPU i7 1.8GHz, 8GB RAM).

4.6 Validação do modelo

A simulação de limitadores de curto-circuito supercondutores pelo método da analogia térmica-elétrica já teve os resultados validados experimentalmente [17] e foi utilizada em trabalhos anteriores para simulação do comportamento destes dispositivos em sistemas de potência reduzidos [46] [48]. Ainda assim, de forma a garantir a correta implementação do método neste trabalho, esta seção apresenta a comparação dos resultados das simulações com os resultados do ensaio descrito na Seção 4.3.

A Figura 4.10 apresenta o circuito equivalente utilizado na simulação. Os valores da resistência e indutância foram definidos de forma equivalente às das condições do ensaio e foram calibrados de acordo com a corrente de curto-circuito presumida. A fonte de tensão considerada é senoidal pura de $200 V_{rms}$ e o momento da ocorrência do curto-circuito foi ajustado de acordo com o ângulo inicial de tensão da fonte, de forma a ser equivalente ao do ensaio. Os parâmetros do modelo do limitador de curto-circuito foram configurados com as mesmas características do limitador testado. O elemento *shunt* foi modelado como uma resistência fixa em paralelo com o limitador.

Os resultados comparativos da corrente limitada e da queda de tensão sobre o limitador são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12. Ambas as curvas das simulações apresentaram boa correspondência com as do ensaio. O erro máximo para a curva de corrente limitada foi de 3,6% e ocorreu no primeiro pico da corrente. Para a curva de queda de tensão, o erro máximo foi de 9,0% e ocorreu no fim do primeiro semi-ciclo da curva. A partir do segundo ciclo, ambas as curvas apresentaram erro percentual inferior a 2 %.

A variação da temperatura nas camadas da fita 2G HTS de acordo com o modelo implementado é apresentada na Figura 4.13. Pode-se perceber que ocorreu um aumento abrupto na temperatura na camada do YBCO, que rapidamente atinge a temperatura crítica ($T_c = 91 K$ em $t = 0.0034 s$), resultando na transição do supercondutor.

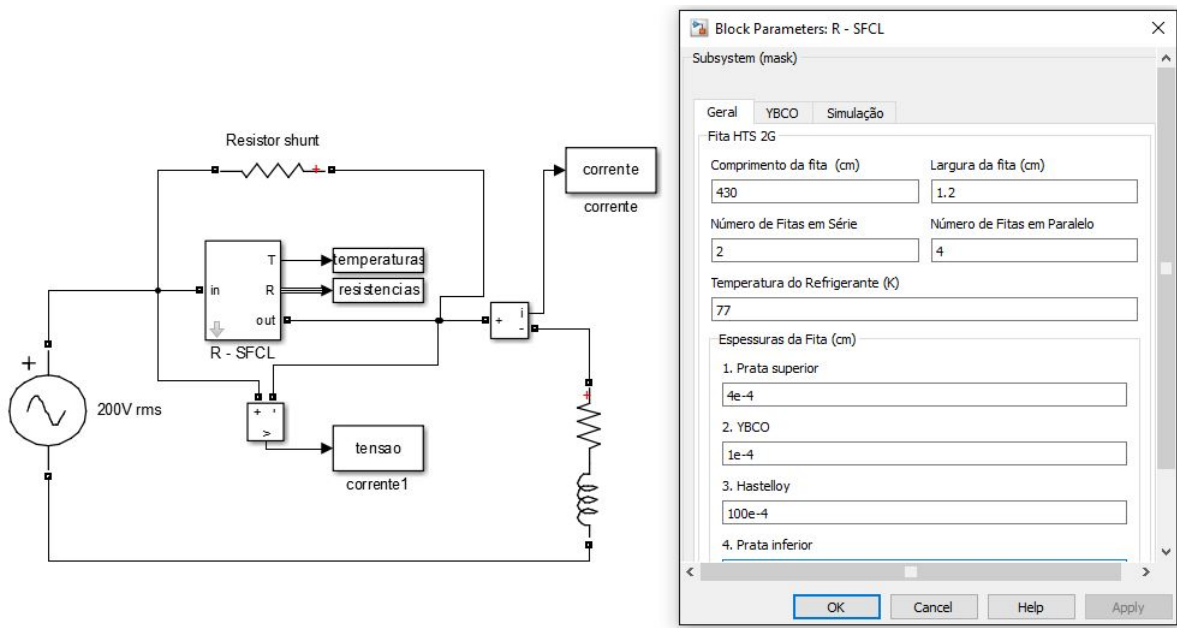


Figura 4.10: Simulação do limitador de curto-circuito para as condições do ensaio.

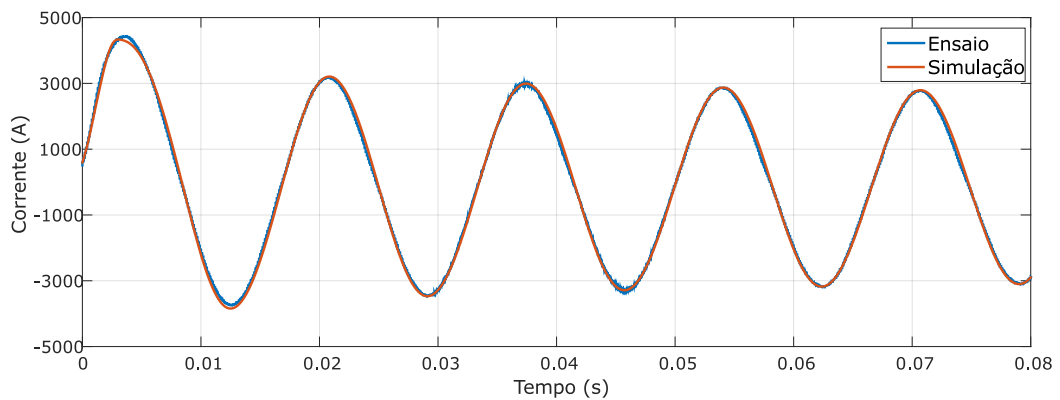


Figura 4.11: Comparação da corrente limitada entre simulação e ensaio.

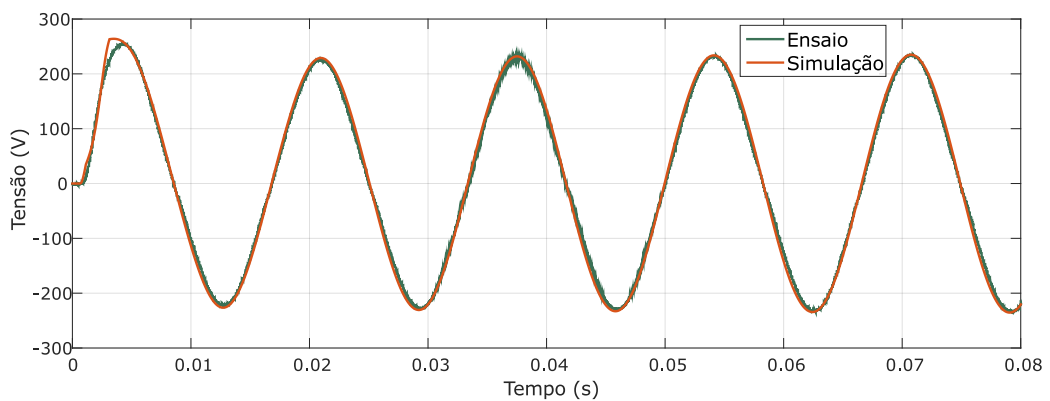


Figura 4.12: Comparação da queda de tensão sobre o SFCL entre simulação e ensaio.

Pela Figura 4.13, é possível observar também a influência do coeficiente de troca de calor convectivo (h_c). A partir da temperatura de 105,4 K ($\Delta T > 28.4 K = 105,4 K - 77 K$)⁴, h_c assume seu menor valor e as temperaturas passam a aumentar mais acentuadamente. Por fim, na Figura 4.14, é apresentada a resistência da fita supercondutora e a resistência equivalente do limitador considerando a resistência *shunt*.

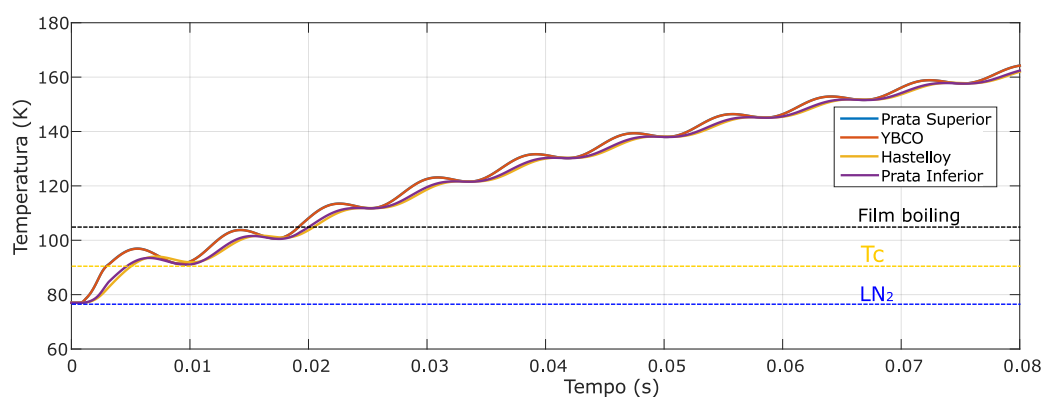


Figura 4.13: Comportamento da temperatura nas camadas da fita 2G HTS.

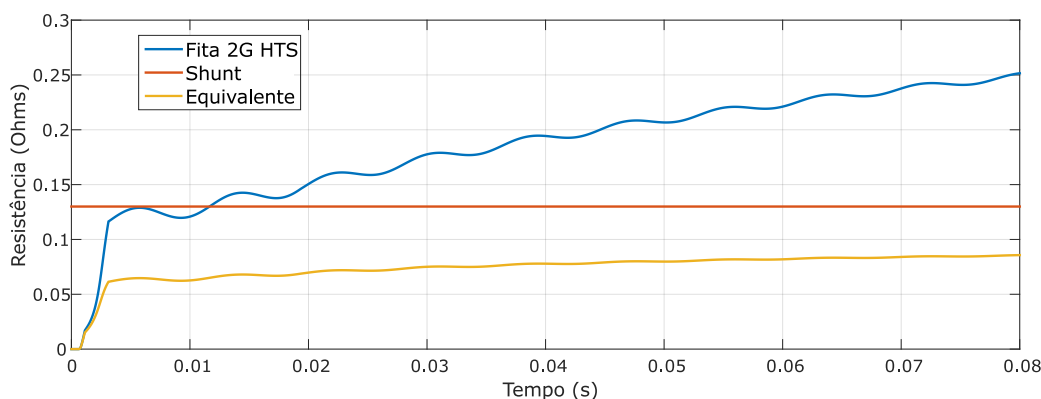


Figura 4.14: Resistência elétrica da fita, elemento shunt e resistência equivalente.

4.7 Sistema de Potência Teste

O sistema de potência que servirá de base de teste para o estudo do limitador de curto-circuito supercondutor no presente trabalho é baseado em um dos três sistemas *benchmark* propostos por um grupo de pesquisadores da CIGRE (Technical Brochure 575 - Task Force C6.04.02) [49]. Os sistemas propostos no documento têm como objetivo principal servirem de base comum de testes para o estudo da

⁴Obtido a partir da curva de h_c considerada na Equação 4.25.

integração de novas fontes de energia renovável e de geração distribuída ao sistema elétrico, tanto em escala de transmissão quanto distribuição. As aplicações principais são: operação e controle, planejamento, qualidade de energia, proteção e estabilidade.

O diagrama do sistema considerado é apresentado na Figura 4.15. Este sistema de transmissão é baseado numa rede de alta tensão existente na América do Norte, que abrange as regiões de Manitoba, Dakota do Norte e Minesota. Em comparação com a rede original, o sistema teve o número de nós reduzidos de forma a possibilitar a simulação em programas de análises de transitórios, mas ao mesmo tempo preservando as características originais da rede [49]. A rede consiste de 12 barras e cobre três áreas geográficas, referenciadas como áreas 1, 2 e 3, conforme marcado com linha tracejada na Figura 4.15. A área 1 é predominantemente um centro de geração. A área 2 é um centro de carga com pouca geração disponível e é situada cerca de 500 km da área 1. A área 3 é localizada entre as áreas 1 e 2. A barra 12, situada na área 3, é um local adequado para estudo da incorporação de fontes de geração em larga escala, pois está localizada próxima de um centro de carga e distante das demais áreas de geração [49]. As barras de geração possuem tensão de 22 kV. A transmissão principal é em 220 kV, sendo que a linha longa que conecta as áreas 1 e 2 possui tensão de 380 kV. Os modelos utilizados para representar os elementos da rede, assim como os dados de todas as impedâncias das linhas de transmissão (sequência zero e sequência positiva), geradores, transformadores, cargas e compensação por capacitores constam no Apêndice B.

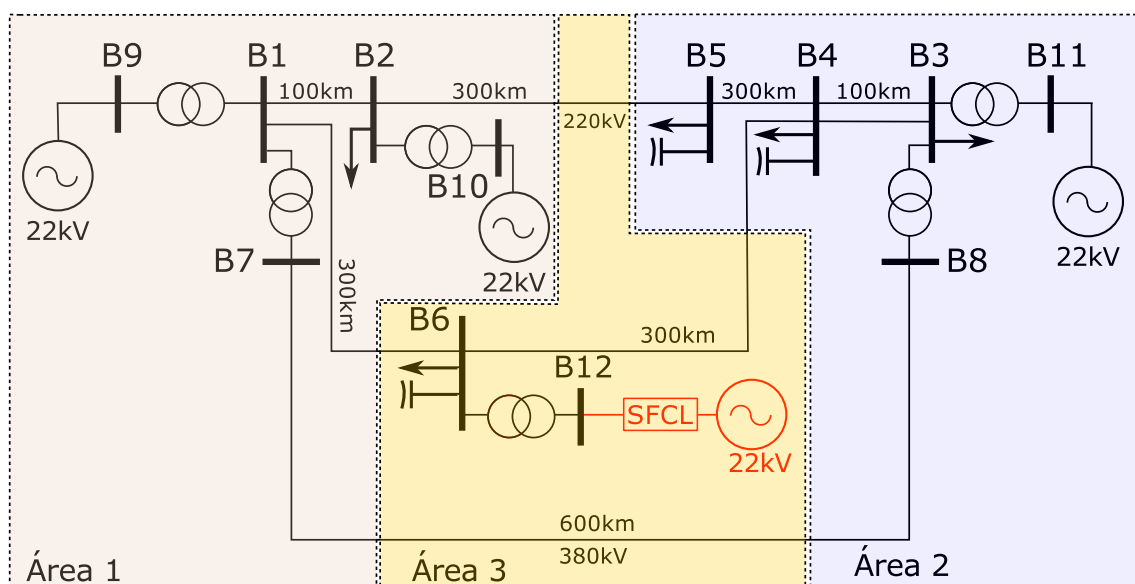


Figura 4.15: Sistema de transmissão utilizado como base de teste para simulações do limitador de curto-circuito supercondutor.

Embora o sistema *benchmark* tenha sido concebido com enfoque no estudo de integração de fontes de energia renováveis de larga escala (por exemplo, grandes fazendas eólicas e usinas solares), neste trabalho consideraremos a incorporação de uma fonte de geração convencional. Esta opção foi escolhida devido a seguinte razão: o objetivo do trabalho é a avaliação do limitador de curto-circuito sob condições de correntes de faltas severas. Fontes de energia renováveis, por apresentarem controle por eletrônica de potência, podem não ser suficientes para gerarem níveis de corrente de curto-circuito que justificassem a instalação de um limitador de corrente supercondutor no sistema. Além disso, os níveis de corrente de curto-circuito no caso de fontes de geração que possuem controle por eletrônica de potência é bastante dependente da estratégia de controle empregada em cada situação específica, o que poderia obscurecer a análise dos resultados da atuação do limitador. Para as máquinas síncronas conectadas diretamente à rede (usinas hidroelétricas e termoeletricas), os níveis de curto-circuito dependem fundamentalmente dos parâmetros da máquina utilizada. Portanto, neste trabalho é considerada a incorporação de um gerador de 500 MVA na barra B12, que representa a entrada em operação de uma usina hidroelétrica.

Os dados do sistema *benchmark*, por ser um sistema fictício, não incluem os valores dos limites de capacidade de interrupção de corrente dos disjuntores de cada barra assim como os dos demais equipamentos elétricos. Desta forma, foi realizada uma análise comparativa dos níveis de curto-circuito trifásicos e monofásicos do sistema antes e após a incorporação do gerador que são apresentados na Tabela 4.2. Estes valores foram obtidos a partir da simulação de curto-circuitos trifásicos e fase-terra em cada barra do sistema através do programa MATLAB/Simulink. O valor considerado é o máximo valor eficaz da corrente de falta (corrente assimétrica eficaz). Pode-se verificar, como era esperado, que o acréscimo da fonte de geração eleva os níveis de curto-circuito de todo o sistema, o que é mais notável nas barras mais próximas à interligação do gerador. Pode-se observar ainda que, neste sistema, os níveis dos curtos-circuitos monofásicos são pouco severos em relação aos curtos-circuito trifásicos. Assim, os casos de estudo terão enfoque em curto-circuitos trifásicos. As barras B6 e B12, especialmente, tiveram seu nível de curto-circuito trifásico e monofásico aumentados consideravelmente. Desta forma, pode-se inferir que as subestações próximas a estas barras estão sujeitas a problemas relacionados aos níveis de curto-circuito inicialmente não previstos, com a possível superação de equipamentos.

Será avaliada a possibilidade de instalação de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor do tipo resistivo na barra de conexão deste novo gerador (barra B12). Espera-se que o aumento do nível das correntes de curto-circuito devido à entrada desta fonte de geração seja mitigado com a instalação

Tabela 4.2: Níveis de curto-circuito do sistema de transmissão considerado.

Barra	Tensão (kV)	Nível de Curto-circuito (kA_{rms})			
		Sem Gerador		Com Gerador	
		3f	1f	3f	1f
1	220	23,69	3,81	24,50	3,789
2	220	35,71	5,14	36,15	5,20
3	220	34,80	7,44	35,45	7,48
4	220	8,89	5,18	9,63	5,40
5	220	2,71	1,68	2,76	1,70
6	220	2,83	1,95	56,09	6,00
7	380	8,99	2,10	9,18	2,214
8	380	11,09	3,74	11,25	3,76
9	22	436,82	356,7	441,90	359,5
10	22	460,29	269,75	461,07	269,93
11	22	404,39	249,97	403,30	252,51
12	22	27,43	32,78	560,70	288,41

do limitador, evitando a necessidade de intervenção em subestações próximas, especialmente a barra B6, que é responsável pela alimentação de cargas consideráveis e sofreu um aumento muito grande no nível de falta.

4.7.1 Características do Limitador Proposto

O limitador supercondutor dimensionado para ser ligado em série com o gerador na barra 12 do sistema teste possui topologia semelhante ao limitador considerado no ensaio (Seção 4.3), porém, em escala consideravelmente maior.

Como o sistema é trifásico, são necessários três limitadores, sendo um para cada fase. Cada limitador consiste de dois ramos conectados em paralelo, conforme Figura 4.16. O primeiro ramo contém 32 módulos de fitas 2G HTS dispostas em arranjo anti-paralelo e o segundo ramo contém um elemento *shunt* que consiste basicamente de um reator de núcleo de ar. Sendo Z_{fita} a impedância total dos módulos de fitas 2G HTS e $Z_{sh} = \sqrt{R_{sh}^2 + X_{sh}^2}$ a impedância do elemento *shunt*, a impedância equivalente total do limitador Z_{eq} é dada pelo paralelismo das duas impedâncias, conforme Equação 4.26.

$$Z_{eq} = \frac{Z_{fita}Z_{sh}}{Z_{fita} + Z_{sh}}. \quad (4.26)$$

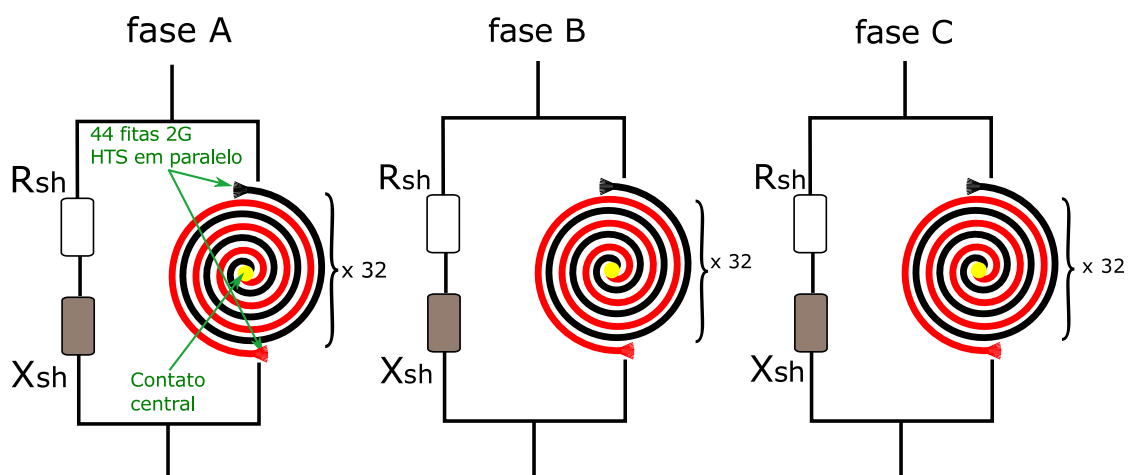


Figura 4.16: Topologia do limitador supercondutor resistivo considerado que consiste de 32 módulos de fitas 2G HTS e um reator *shunt*.

A Tabela 4.3 resume os parâmetros para o limitador proposto.

Tabela 4.3: Parâmetros do limitador supercondutor para o sistema em estudo.

Parâmetro	Valor
Comprimento de fitas 2G por módulo	20 m
Corrente crítica total I_c	13200 A
Total de fitas em paralelo	44
Total de módulos em série	32
Reatância shunt X_{sh}	0,1 Ω
Resistência shunt R_{sh}	0,0125 Ω

Cada módulo de fitas 2G HTS contém 44 fitas conectadas em paralelo através de um contato central; cada módulo é resfriado em nitrogênio líquido à 77 K. O grande número de fitas em paralelo é necessário em razão da alta corrente que passa pelo limitador em condições normais de operação. A corrente máxima do gerador em condições normais de operação é de 9185 A_{rms}, que resulta em um valor de 12989 A_{pico}. Desta forma, o limitador tem que ser dimensionado de forma que este valor de corrente, mesmo com eventuais sobrecargas aceitáveis, não seja suficiente para causar aquecimento nas fitas quando o sistema opera em condições normais. Como a corrente crítica I_c de cada fita é de 300 A, a corrente crítica total do dispositivo é de 13200 A.

A tensão nominal na barra é de 22 kV_{rms} entre fases, o que resulta numa tensão de pico fase-terra na ordem de 18 kV_{pico}. O limitador tem que ser projetado para suportar tensões desta magnitude, pois numa situação de curto-circuito estes valores de tensão surgem nos terminais do equipamento. O valor máximo de

tensão suportável pelas fitas 2G HTS é tipicamente de 0,5 V/cm, sendo que na topologia proposta o valor ficou em 0,3 V/cm. Desta forma, o limitador é composto de 32 módulos de fitas em série, cada fita com um comprimento de 20 m. Além da questão da suportabilidade à tensão, a utilização de comprimentos grandes de fitas 2G é interessante porque reduz o aquecimento do limitador em razão da maior quantidade de material que precisa ser aquecido.

A utilização de reatores núcleo de ar em paralelo com os módulos de fitas 2G HTS já foi implementada em instalações reais de forma a aumentar o tempo de exposição do limitador a correntes de curto-circuito [50]. Durante a ocorrência do curto-circuito a maior parte da corrente passa pelo reator, o que diminui o aquecimento do supercondutor. A definição dos parâmetros do elemento *shunt* deve ser cuidadosa, pois influencia diretamente nos níveis de limitação de curto-circuito e no aquecimento das fitas 2G. Caso a impedância seja muito alta, pode ocorrer um aquecimento rápido do limitador que é prejudicial às fitas 2G, o que reduz o tempo máximo a que o limitador pode ser submetido às correntes de falta antes da atuação do sistema de proteção. Caso o valor da impedância *shunt* seja muito pequena, a limitação do curto-circuito fica prejudicada, uma vez que a corrente que passa pelo reator durante o curto-circuito é bastante alta.

No próximo capítulo são apresentados resultados de simulação do limitador supercondutor proposto inserido no sistema teste apresentado na Seção 4.7.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas com o limitador de curto-circuito supercondutor inserido no sistema teste discutido na Seção 4.7. A atuação do limitador será analisada por meio de três situações de curto-circuito:

1. Caso A - curto-circuito na linha 1-6
2. Caso B - curto-circuito na barra 12
3. Caso C - curto-circuito na linha 3-4

Com o objetivo de possibilitar a análise da interferência do limitador no sistema foram realizadas duas simulações para cada caso: uma simulação realizada com o limitador e outra sem o limitador. Como o curto-circuito é trifásico, as formas de onda nas três fases são semelhantes, sendo a diferença entre elas basicamente dada pelo ângulo da tensão de cada fase no momento da falta. Assim, optou-se por apresentar somente os gráficos da fase A em que os níveis de falta foram os mais severos. Ao final do capítulo, será apresentada uma análise geral da atuação do limitador no sistema considerado. Além disso, será apresentada uma Tabela com resumo dos resultados das simulações para os três casos para as 3 fases do sistema.

5.1 Caso A - curto-circuito na linha 1-6

5.1.1 Descrição da simulação

Nesta simulação é avaliada a atuação do limitador supercondutor instalado junto ao gerador na rede de média tensão (barra B12 - 22 kV) para limitação de corrente na linha de alta tensão (barra B6 - 220 kV). Conforme já apresentado na Tabela 4.2, o nível de curto-circuito trifásico antes da instalação do gerador na barra B12 era

de $2,8 \text{ kA}_{rms}$ e, após a instalação do gerador na barra, este valor aumentou consideravelmente para 56 kA_{rms} , resultando numa provável superação de equipamentos nas subestações subjacentes. O disjuntor DJ1, que protege a linha 1-6, foi considerado com capacidade de interrupção assimétrica de ¹ de $31,5 \text{ kA}_{rms}$ para fins de dimensionamento do limitador. O limitador supercondutor foi dimensionado para reduzir o nível de falta para abaixo deste nível.

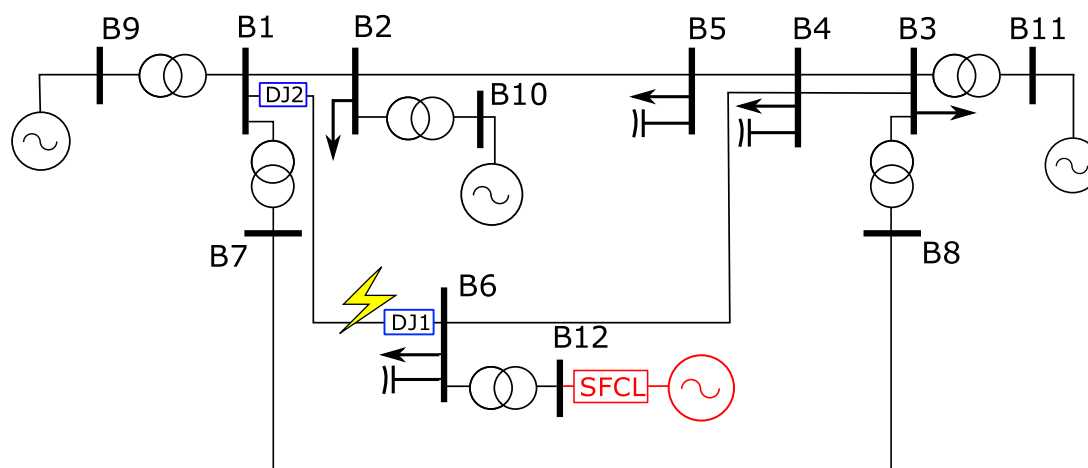


Figura 5.1: Caso A: Diagrama do sistema para um curto-circuito na linha 1-6, próximo à barra 6, com abertura dos disjuntores DJ1 e DJ2 após 120ms.

Dada a proximidade do local do curto-circuito com o gerador da barra B12 e que a maior parte da contribuição da corrente de falta é proveniente do gerador, espera-se que o limitador instalado atue reduzindo esta contribuição. Assim, foi simulado um curto-circuito trifásico na linha 1-6 (220kV), próximo à barra 6, conforme diagrama na Figura 5.1. Considerou-se um tempo do curto-circuito com duração de 120 ms, iniciando em $t = 0.04 \text{ s}$ e terminando em $t = 0.16 \text{ s}$. Após este período, a linha 1-6 é aberta pelos disjuntores DJ1 e DJ2 e a falta é extinta.

Algo importante sobre a situação analisada neste caso é que o curto-circuito é extinto pela atuação dos disjuntores que protegem a linha 1-6 (DJ1 e DJ2), de forma que o sistema passa por um período transitório até estabilizar-se em um outro ponto de operação com a linha 1-6 desativada. Como o gerador e o limitador supercondutor não encontram-se localizados na área isolada do sistema, as cargas continuam a serem alimentadas pelo gerador. Portanto, o período de recuperação do limitador (refrigeração das fitas HTS 2G e retorno para o estado de resistência nula após a extinção da falta), neste caso, ocorre sob carga. Isto quer dizer que correntes continuam passando pelo limitador após a extinção do curto-circuito, o que torna a recuperação mais lenta do que se o limitador fosse isolado pela proteção.

¹Valor mínimo para disjuntores de alta tensão de acordo com pesquisa em catálogos de fabricantes.

5.1.2 Correntes

A Figura 5.2 apresenta os resultados da simulação da corrente de linha entre as barras 6 e 12, no lado de alta tensão, antes e depois da instalação do limitador supercondutor. Antes do curto-circuito o sistema estava em regime permanente, com corrente de $813 A_{rms}$. Sem o limitador, a corrente chegou a $88 kA_{pico}$ no primeiro pico. Com a atuação do limitador, esta corrente foi limitada em $18 kA_{pico}$. Em valores eficazes, a corrente assimétrica máxima foi limitada de $54 kA_{rms}$ para $15 kA_{rms}$. Após o segundo ciclo de curto-circuito, a corrente limitada estabiliza-se em $10 kA_{rms}$. Com a eliminação do curto-circuito, em $t = 0.16 s$, tanto a corrente limitada quanto a corrente não limitada passam por um período transitório para se estabilizarem no novo ponto de operação do sistema (sem a linha 1-6), com corrente de cerca de $1050 A_{rms}$.

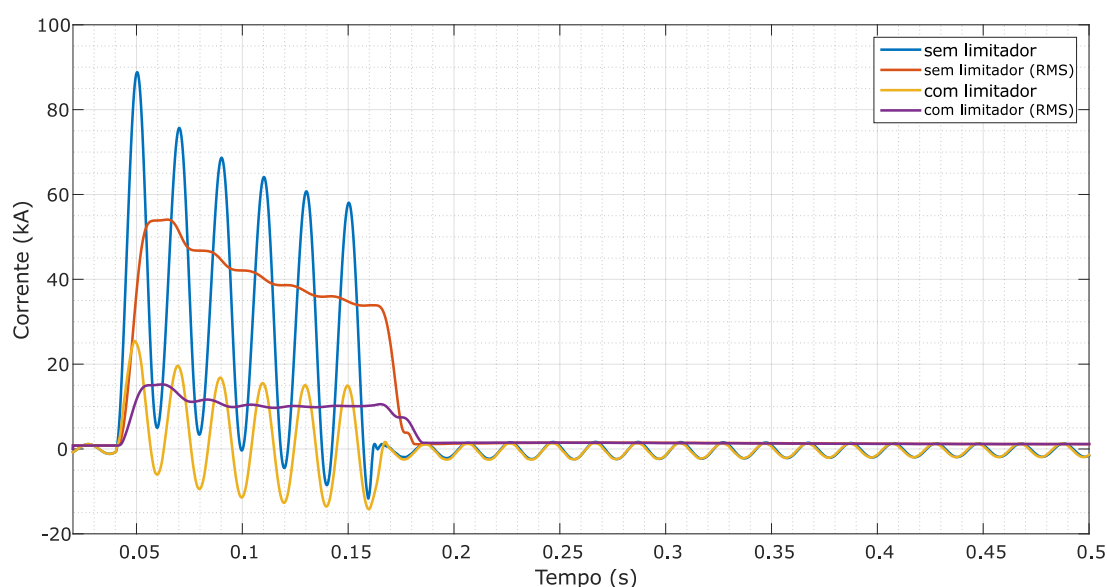


Figura 5.2: Caso A - Corrente passante entre as barras B6 e B12 com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.

A corrente de falta na barra B6 é dada pela Figura 5.3 e apresenta comportamento similar àquele mostrado na Figura 5.2. Esta é a corrente máxima que os equipamentos devem suportar e é a que deve ser considerada para fins de cálculos de superação dos equipamentos. Percebe-se que, com a atuação do limitador, a corrente assimétrica máxima foi limitada de $56 kA_{rms}$ para $17 kA_{rms}$.

A divisão das correntes que passam pelo limitador entre o elemento *shunt* e as fitas 2G HTS são apresentadas na Figura 5.4. Antes do curto-circuito, toda a corrente passa pelas fitas 2G HTS, uma vez que esta apresenta impedância praticamente nula. Assim que ocorre a falta, o supercondutor transita para o estado resistivo e pode-se perceber que a maior parte da corrente no limitador é desviada para o elemento *shunt*. Isto ocorre porque o *shunt* possui impedância con-

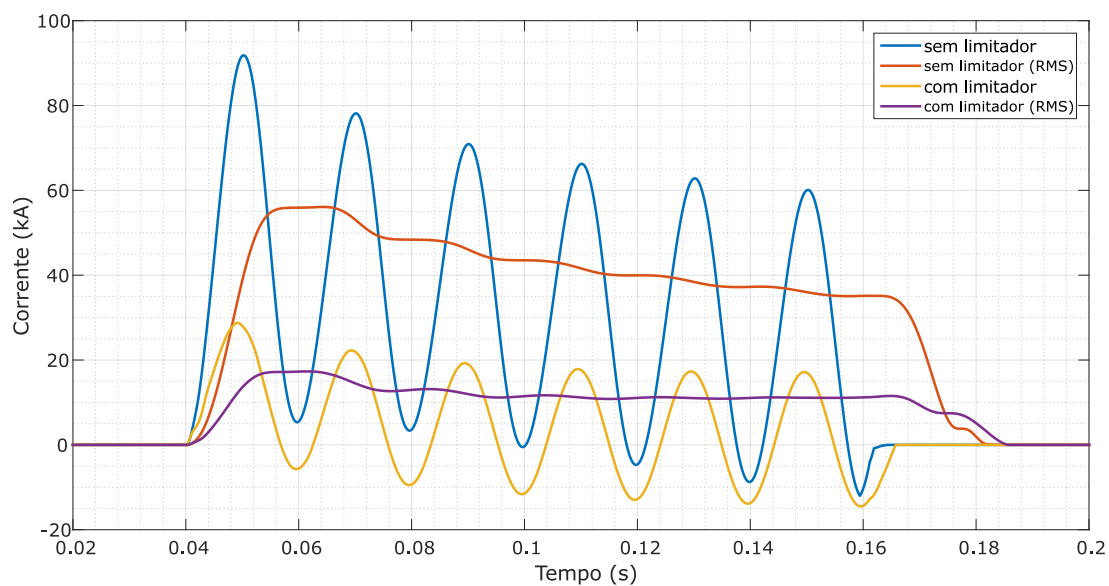


Figura 5.3: Caso A - Corrente de curto-circuito trifásico na barra B6.

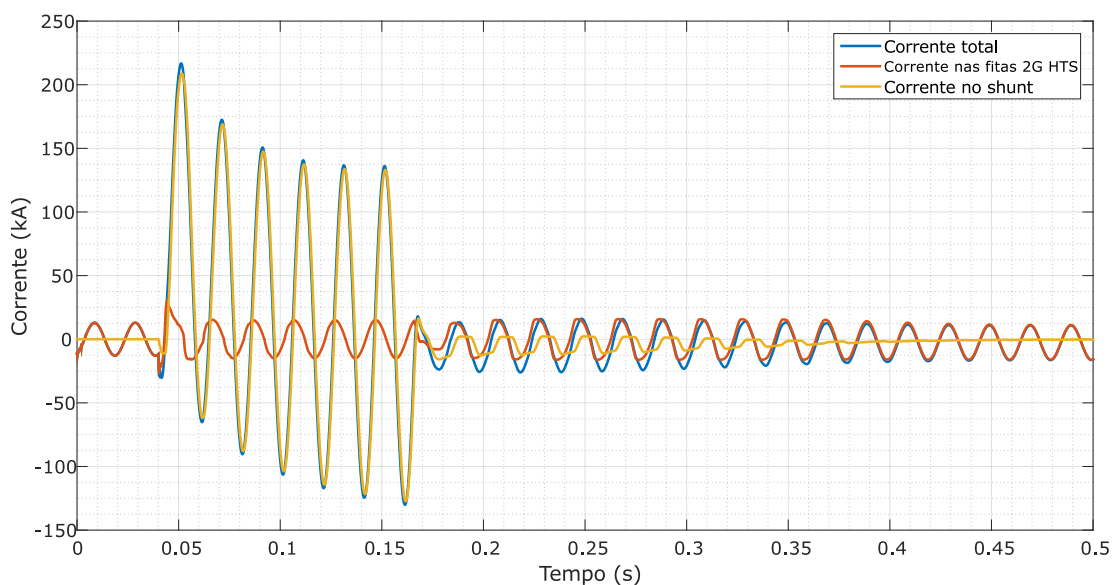


Figura 5.4: Caso A - Corrente nas Fitas 2G HTS, no elemento shunt, e corrente total no limitador da fase A.

sideravelmente menor do que as fitas 2G após a transição (como será discutido posteriormente na Seção 5.1.5 e mostrado na Figura 5.9). Após a extinção da falta, verifica-se claramente o período de recuperação do limitador entre $t = 0.16$ s e $t = 0.5$ s quando a corrente que passa pelo *shunt* passa a assumir valores cada vez menores, até que toda a corrente volta a passar pelas fitas 2G.

5.1.3 Tensões

A tensão fase-terra da fase A na barra B6 é apresentada na Figura 5.5 com e sem a presença do limitador.

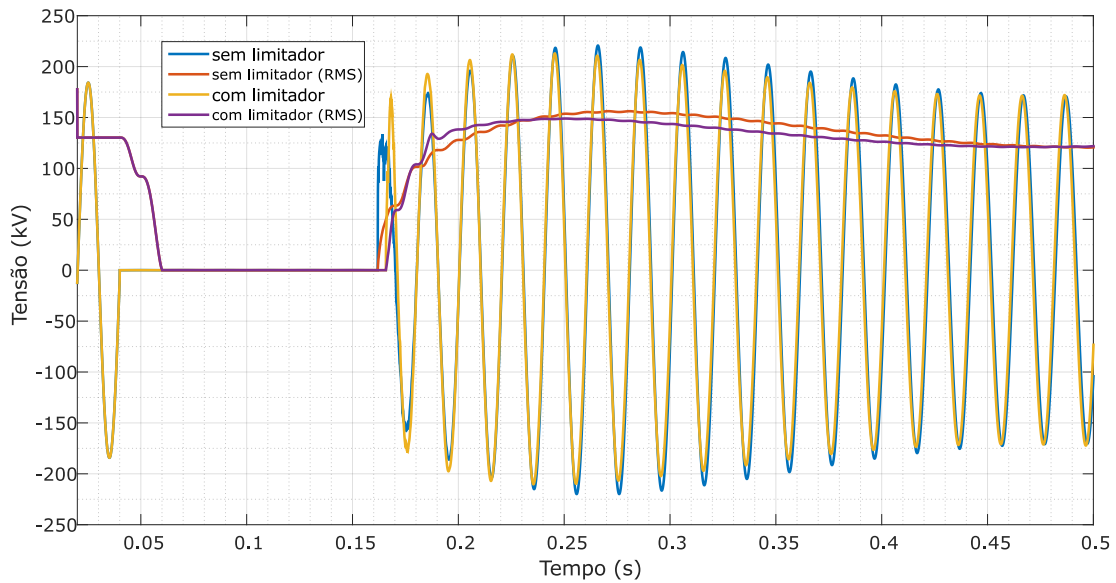


Figura 5.5: Caso A - Tensão fase-terra na barra B6 com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.

Pode-se verificar que a presença do limitador altera ligeiramente a dinâmica do reestabelecimento da tensão após o curto-circuito. Este efeito ocorre em função da dinâmica do sistema de controle da excitatriz do gerador, que reage de forma diferente com a presença do limitador. Este efeito pode ser percebido com maior detalhes quando se observa a tensão nos terminais do gerador, conforme Figura 5.6. A tensão nos terminais do gerador durante o curto-circuito na barra B6 chega a $2,5 \text{ kV}_{rms}$ sem a atuação do limitador. Com a atuação do limitador, o afundamento de tensão durante o curto-circuito reduz consideravelmente, de forma que a tensão nos terminais do gerador cai apenas para cerca de 10 kV_{rms} .

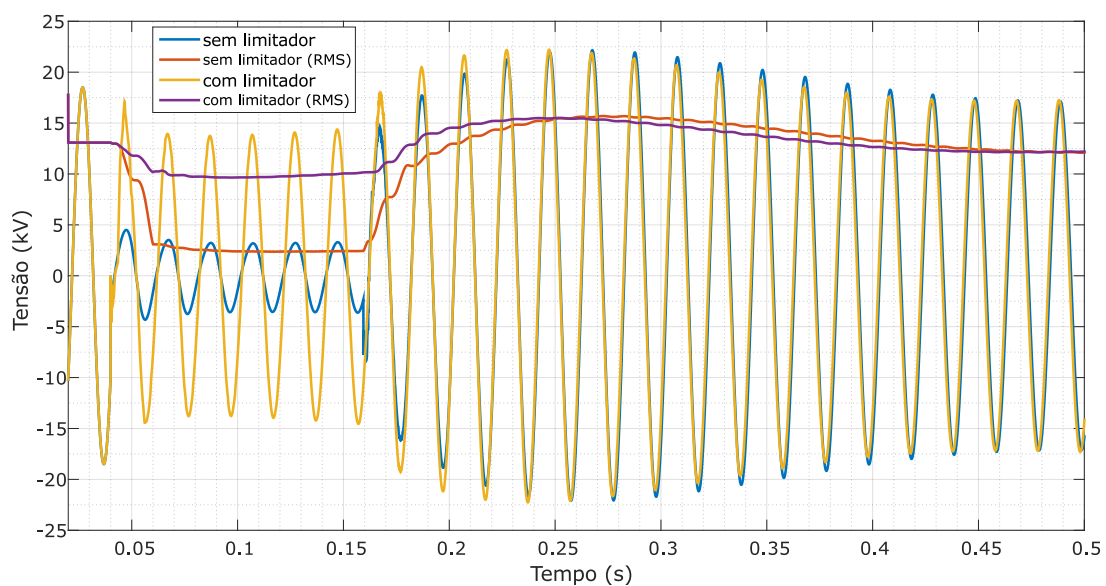


Figura 5.6: Caso A - Tensão fase-terra nos terminais do gerador com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.

Esta diferença é causada pela queda de tensão que surge no limitador durante a falta, conforme apresentada na Figura 5.7. Nesta Figura, percebe-se a rápida atuação do limitador durante a falta através das quedas de tensão com pico de 13 kV que passam a surgir sobre o limitador. Após o curto-circuito, durante o período de recuperação, percebe-se um decréscimo da queda de tensão até que esta se torna novamente nula após 0.4 s.

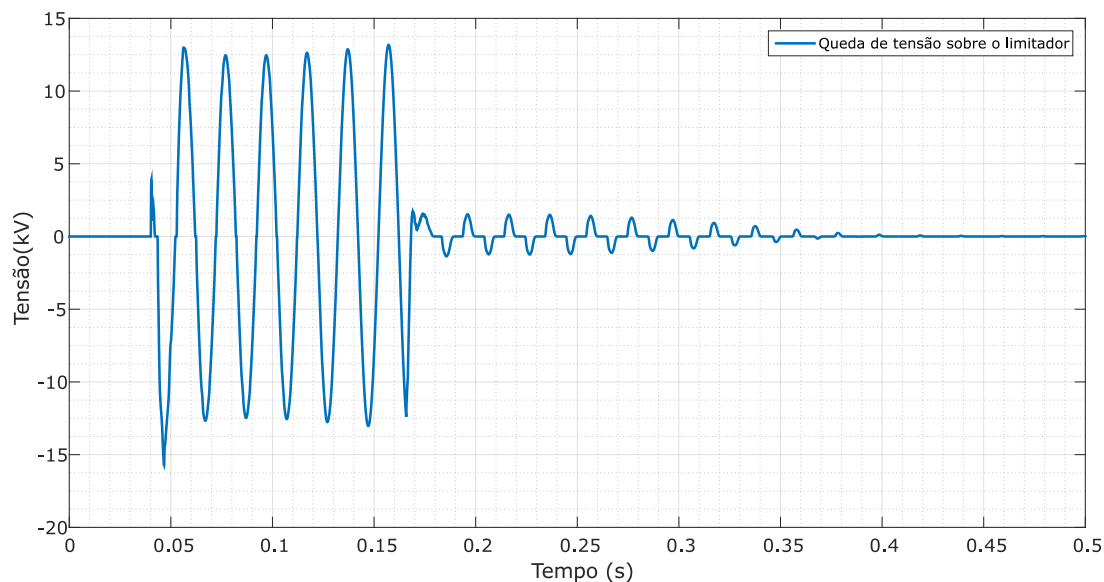


Figura 5.7: Caso A - Queda de tensão sobre o limitador na fase A.

5.1.4 Temperatura

O aumento da temperatura das quatro camadas das fitas 2G HTS são mostrados na Figura 5.8. Pode-se verificar um rápido aumento da temperatura imediatamente após o início do curto-circuito desde a temperatura do nitrogênio líquido (77 K) até temperaturas superiores à temperatura crítica do supercondutor (91 K), o que indica que o supercondutor transita para o estado normal pouco após $t = 0.05$ s. Durante o período do curto-circuito, as temperaturas das camadas de prata superior e do material supercondutor YBCO são bem próximas e são superiores às temperaturas da camada do substrato *Hastelloy* e de prata inferior. A temperatura do YBCO aumenta de forma oscilante atingindo o valor máximo de 98,2 K quando o curto-circuito é extinto. A partir daí, ocorre um rápido decréscimo da temperatura até próximo de 82 K e posteriormente um decréscimo mais lento, até que a temperatura volta a valores na ordem de 77 K em $t = 0,5$ s.

A espessura extremamente fina das fitas explica o comportamento oscilatório da temperatura durante o período de falta. Em razão da pequena quantidade de massa nas camadas, pode-se dizer que as fitas apresentam uma baixa inércia térmica, de forma que sua temperatura é muito afetada pelas correntes passantes

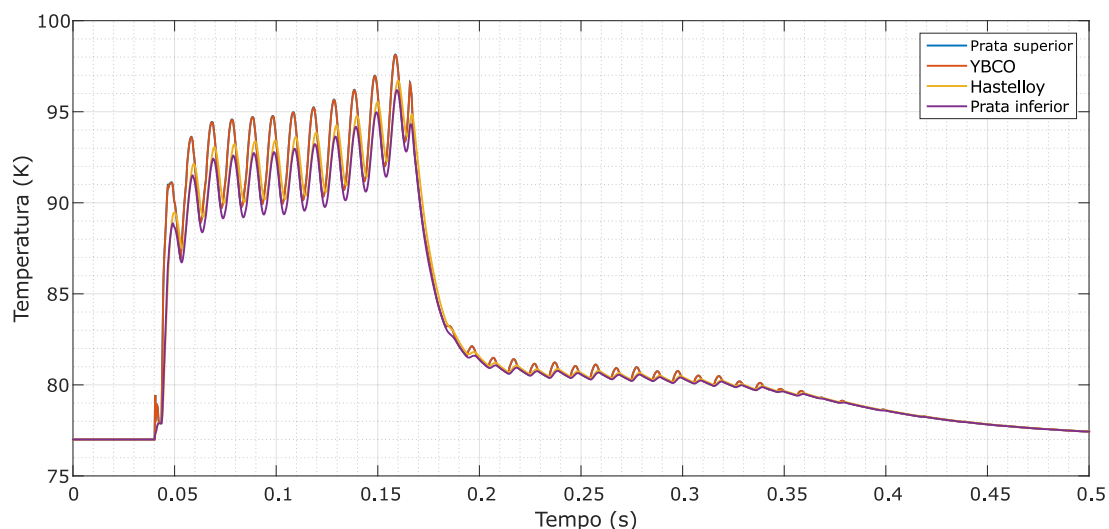


Figura 5.8: Caso A - Temperatura das camadas das Fitas HTS 2G no limitador da fase A.

e pelo líquido refrigerante (LN_2).

O rápido decréscimo da temperatura imediatamente após a extinção da falta ocorre porque o coeficiente de troca de calor convectivo h_c encontra-se na região de *bubble boiling* e não chega a atingir o regime de *film boiling*, pois a temperatura não chega a atingir 105,4 K ($\Delta T = 28,4K$). Como descrito na Equação 4.25 e representado na Figura 4.7, h_c atinge os seus maiores valores na região de *bubble boiling*, o que contribui para a troca de calor entre o limitador e o líquido refrigerante.

A redução menos acentuada da temperatura do limitador entre $t = 0,16$ s e $t = 0,5$ s pode ser explicada devido à condição de recuperação sob carga do limitador. Como correntes da ordem da corrente nominal continuam a passar pelo limitador após a extinção da falta, o aquecimento precisa ser compensado pelo sistema de refrigeração, o que acarreta numa recuperação mais lenta neste período do que caso o limitador não estivesse submetido a correntes.

5.1.5 Impedância

A impedância que o limitador impõe ao sistema no caso de curto-circuito pode ser observada na Figura 5.9. A impedância *shunt* é constante em $0,1 \Omega$ durante todo o período. A impedância das fitas 2G HTS é praticamente nula antes do curto-circuito. Após o início da falta, pode-se perceber um comportamento oscilante da impedância entre estados de baixa e alta impedância, até que o supercondutor transita definitivamente para o estado normal em $t = 0,13$ s. Este comportamento ocorre em razão da oscilação da temperatura em torno da temperatura crítica do supercondutor, resultando em algumas transições do supercondutor até

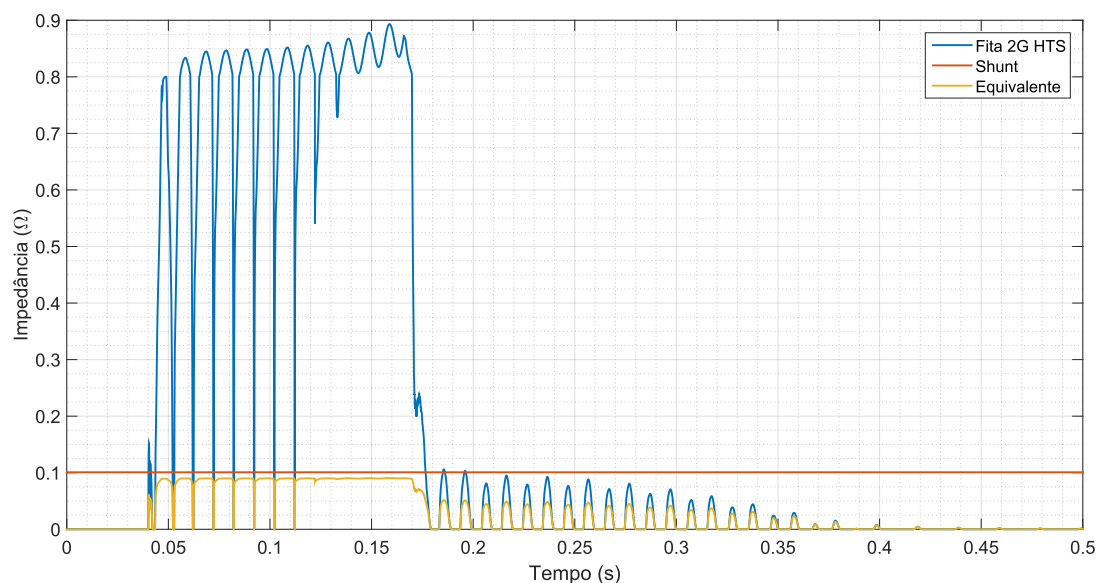


Figura 5.9: Caso A - Impedância total das Fitas 2G HTS, do elemento *shunt* e impedância equivalente do limitador da fase A.

que ocorre uma transição definitiva para o estado normal. Durante o período de recuperação, a impedância vai assumindo valores cada vez menores até tornar-se nula. Neste período o YBCO já se encontra novamente no estado supercondutor e a impedância que surge é devido aos estágios de *flux flow* e *flux creep*.

5.2 Caso B - curto-circuito na linha 1-2

5.2.1 Descrição da simulação

Com o objetivo de se analisar o caso mais severo a que o limitador supercondutor neste sistema pode ser submetido, foi simulado um curto-circuito trifásico na barra B12 (22 kV), ou seja, na mesma barra em que o gerador foi instalado, conforme diagrama na Figura 5.10.

Esta situação é extrema para o sistema em estudo, de forma que o limitador deve ser capaz de limitar a corrente proveniente do gerador e ao mesmo tempo suportar o aquecimento até a atuação do sistema de proteção. O tempo do curto-circuito é de 120 ms, sendo que após este período o sistema de proteção do gerador atua e o mesmo é desconectado do sistema com a abertura do disjuntor DJ3. Portanto, a recuperação do limitador deve ocorrer sem carga neste caso. Conforme visto na Tabela 4.2, o nível de curto-circuito trifásico assimétrico era de 27,4 kA_{rms} antes da instalação do gerador e foi para 560 kA_{rms} após a instalação do gerador na barra. O nível de curto-circuito desta barra é extremamente alto por estar diretamente conectada ao gerador na média tensão (22 kV).

Em razão dos altíssimos níveis de corrente de curto-circuito na média tensão,

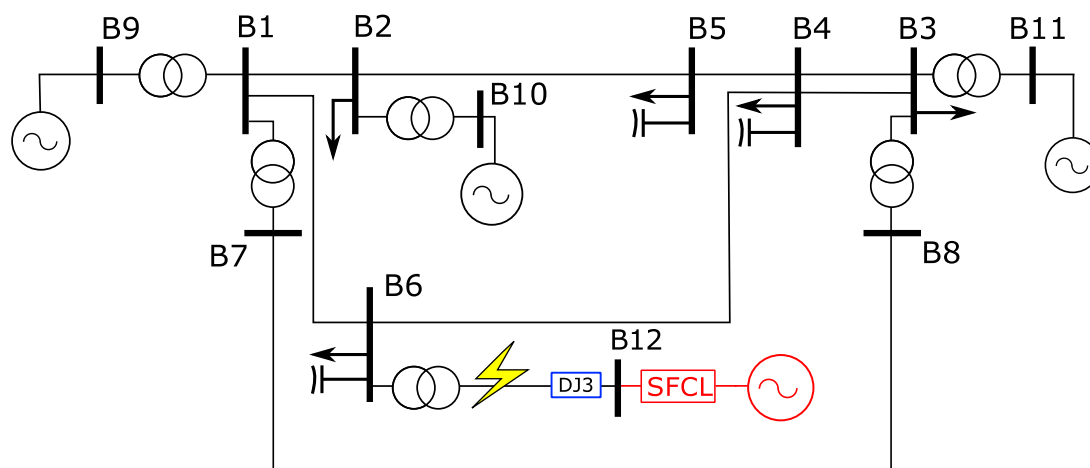


Figura 5.10: Caso B: Diagrama do sistema para um curto-circuito na barra 12 com abertura dos disjuntores após 120ms.

muitas vezes os geradores não são protegidos por disjuntores na média tensão, mas somente na alta tensão. Embora o objetivo principal da instalação do limitador seja a limitação da corrente nas barras de alta tensão, a limitação da corrente na geração pode ser benéfica porque torna possível (e necessária) a utilização de disjuntores para proteção dos geradores antes dos transformadores elevadores. Em termos estatísticos, é raríssima a ocorrência de faltas tão próximas aos geradores, mas quando ocorrem podem levar a danos seríssimos no transformador, no gerador, juntamente com longas paradas de fornecimento de energia [51]. Os disjuntores para geradores comerciais possuem capacidade de interrupção de corrente de até 350 kA_{rms}^2 , e este limite foi utilizado como parâmetro para a limitação da corrente na barra.

5.2.2 Correntes

A corrente na barra B12 com e sem a atuação do limitador supercondutor é mostrada na Figura 5.11. O sistema encontra-se em regime permanente até $t = 0.04 \text{ s}$, quando o curto-circuito ocorre e o limitador passa a atuar. Verifica-se pela Figura 5.11 que o primeiro pico da corrente é limitado de 990 kA para 230 kA . Em valores eficazes, a corrente assimétrica máxima foi limitada de 560 kA_{rms} para 125 kA_{rms} . Após a extinção da falta, percebe-se que a corrente que passa no limitador é interrompida com a atuação do disjuntor DJ3.

A Figura 5.12 apresenta a divisão das correntes do limitador entre o elemento *shunt* e as fitas 2G. Antes da falta toda a corrente passa pelas fitas 2G e, durante a falta, verifica-se novamente que a maior parte da corrente é desviada para o reator *shunt*, até que a falta é extinta e o gerador e o limitador são isolados do sistema.

²Valor máximo verificado para disjuntores especiais para proteção de geradores em catálogos de fabricantes.

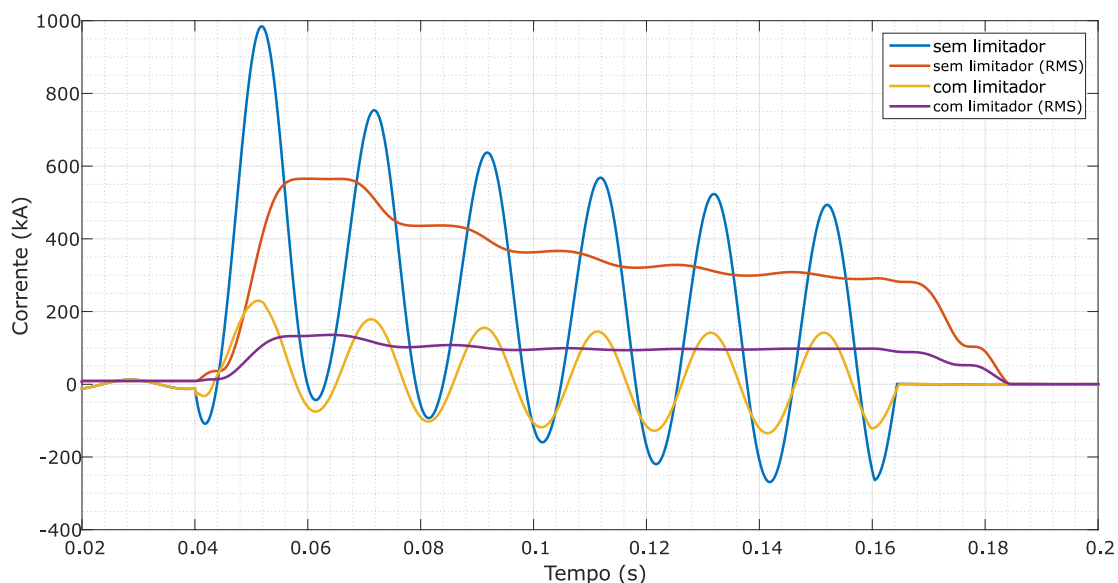


Figura 5.11: Caso B - Corrente na barra B6 com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.

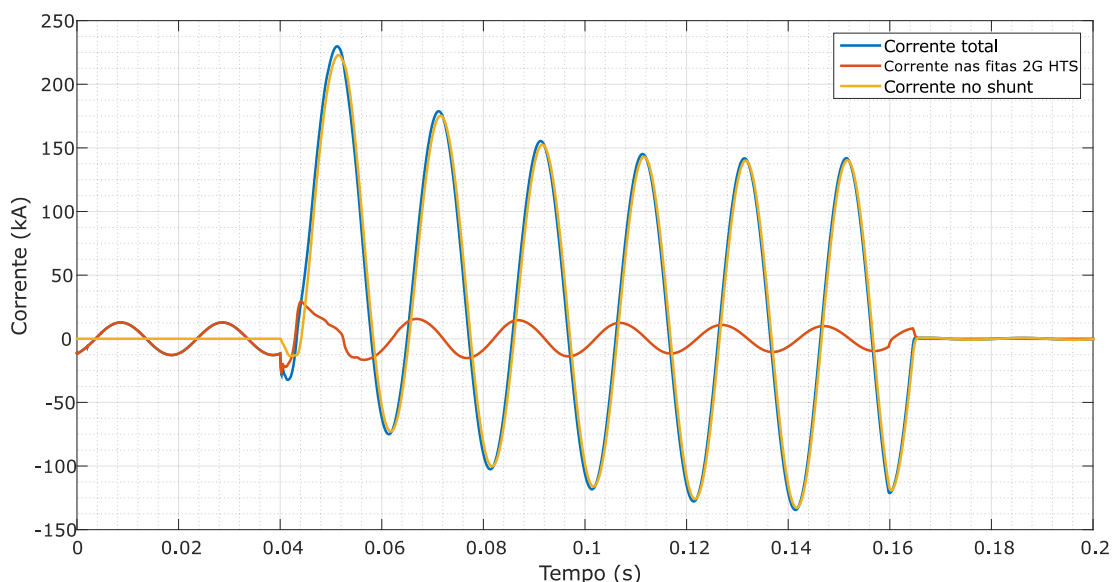


Figura 5.12: Caso B - Corrente nas Fitas 2G HTS, no elemento *shunt* e corrente total no limitador da fase A.

5.2.3 Tensões

A queda de tensão sobre o limitador pode ser vista na Figura 5.13 e apresenta formato similar ao do caso A, com os picos de tensão chegando a 14 kV. Diferentemente do caso A, observa-se que período de recuperação do limitador não fica evidenciado nas curvas de tensão e corrente (Figuras 5.11, 5.12 e 5.13). Isso ocorre porque a recuperação do limitador ocorre sem carga, ou seja, o gerador e o limitador são isolados do sistema após a falta, de forma que não são submetidos às correntes e tensões de carga após a eliminação da falta. Apesar disso, o

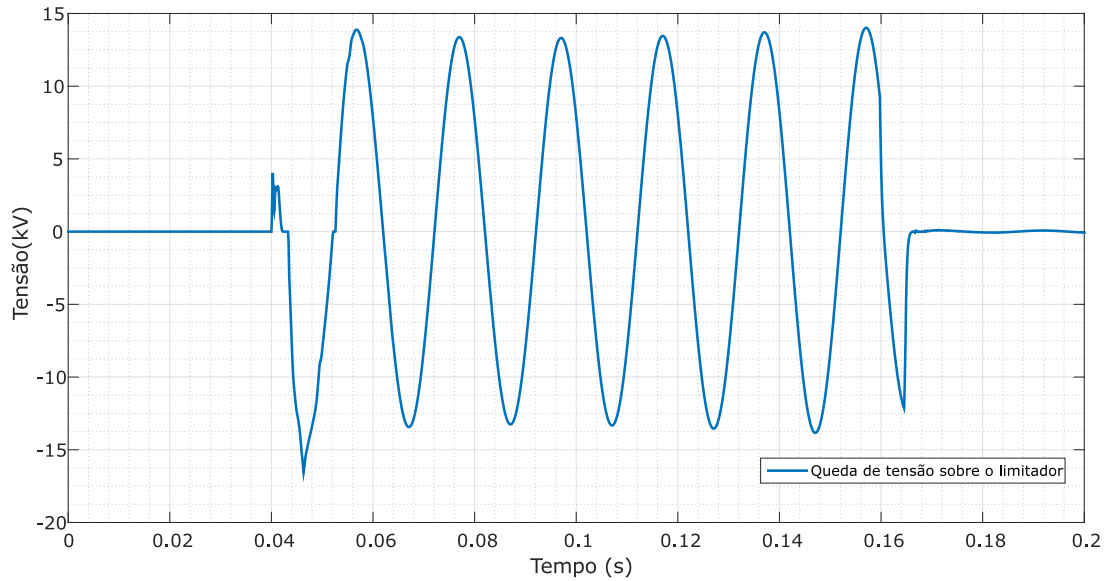


Figura 5.13: Caso B - Queda de tensão sobre o limitador na fase A.

período de recuperação de fato ocorre como será visto nas curvas de temperatura e impedância.

5.2.4 Temperaturas

Percebe-se que neste caso a temperatura das camadas das fitas 2G HTS atingem valores substancialmente maiores do que no caso anterior, conforme observado na Figura 5.14. A temperatura chega a atingir o máximo de 147 K no momento em que a falta é extinta.

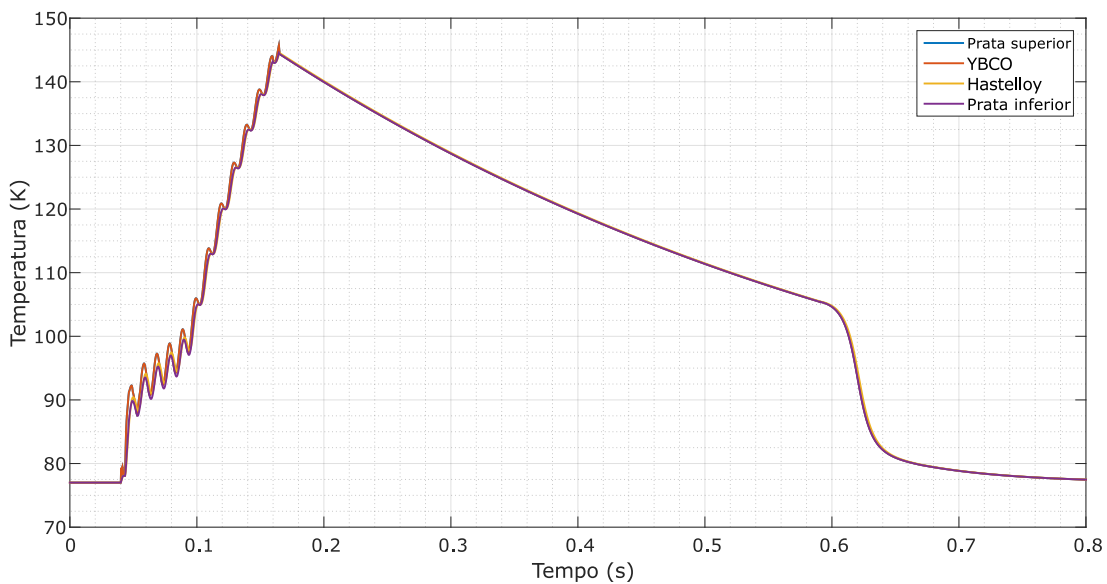


Figura 5.14: Caso B - Temperatura das camadas das Fitas HTS 2G no limitador da fase A.

Nesta situação, o sistema de proteção precisa atuar para desconectar o gerador

e cessar as altas correntes provenientes da falta, de forma evitar que a temperatura das camadas das fitas continuem a aumentar, o que poderia causar danos sérios e permanentes ao limitador.

É possível observar claramente pela Figura 5.14 o momento em que o aumento de temperaturas das camadas passa a ser mais acentuado, próximo de $t = 0,1$ s. Este comportamento pode ser explicado pelo coeficiente de troca de calor h_c . Até a temperatura de 105,4 K ($\Delta T = 28.4K$), h_c encontra-se no regime de *bubble boiling* e atinge seus maiores valores, de forma que as trocas de calor entre o refrigerante e as fitas é facilitada. A partir da temperatura 105,4 K, h_c entra no regime de *film boiling* e passa a apresentar valores muito pequenos, o que acarreta numa piora considerável das trocas de calor e conseqüentemente um aumento mais acentuado da temperatura.

Após a extinção do curto-circuito ocorre um comportamento similar. Desde o momento da extinção da falta até o tempo $t = 0,6$ s, ocorre um decréscimo lento da temperatura, uma vez que h_c encontra-se no regime de *film boiling*. A partir daí, h_c entra no regime de *bubble boiling*, de forma que o decréscimo da temperatura passa a ser acentuado.

É importante ressaltar que o comportamento do coeficiente de troca de calor convectivo h_c é altamente não linear. O comportamento considerado neste trabalho é de acordo com a curva apresentada na Figura 4.7, tanto no período de aumento da temperatura (durante a falta) quanto no período de redução da temperatura (após a eliminação da falta), ocorrendo, portanto, dois períodos de *bubble boiling*. Numa situação prática, é possível que este coeficiente pudesse apresentar comportamentos diferentes entre os períodos de aumento e de redução da temperatura.

5.2.5 Impedâncias

A impedância que o limitador impõe ao sistema no caso de curto-circuito é apresentada na Figura 5.15. Nos primeiros ciclos após o início da falta, verifica-se um comportamento oscilante da impedância das fitas 2G entre estados de baixa e alta impedância, até que o supercondutor transita definitivamente para o estado normal em $t = 0.07$ s. Após a transição definitiva do supercondutor, o aumento da impedância equivalente das fitas 2G é bastante similar ao que é observado na curva de temperatura (Figura 5.14), assim como o decréscimo que ocorre após a extinção da falta. Isto ocorre porque a impedância das fitas é praticamente resistiva e varia linearmente com a temperatura, assumindo valores desde $0,8 \Omega$ à $1,5 \Omega$ após a transição do supercondutor para o estado normal. Apesar da variação expressiva da impedância das fitas 2G, pode-se perceber que a impedância equivalente

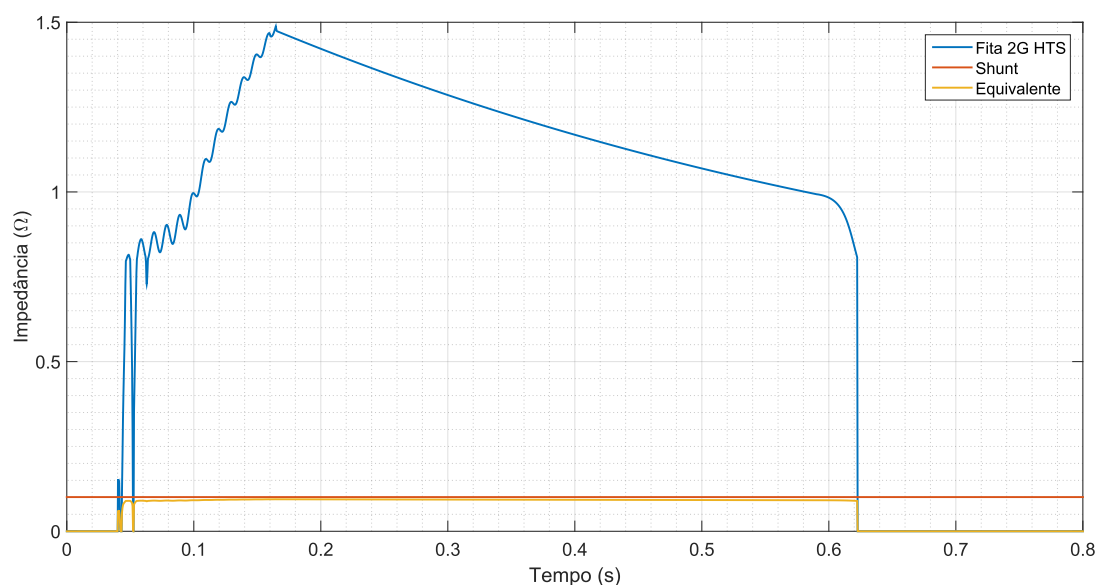


Figura 5.15: Caso B - Impedância total das Fitas 2G HTS, do elemento shunt, e impedância equivalente do limitador da fase A.

do limitador sofre pouca variação. Isto ocorre porque a impedância *shunt* é constante e é bastante inferior à impedância das fitas 2G, o que faz com que o valor equivalente em paralelo destas seja influenciado majoritariamente pela impedância *shunt*. Em $t = 0,62$ s a resistência das fitas 2G e a resistência equivalente caem bruscamente para zero, sendo este o momento em que o supercondutor volta para o estado de resistência nula.

5.3 Caso C - curto-circuito na linha 3-4

5.3.1 Descrição da Simulação

No último caso analisado, é simulado um curto-circuito em uma das duas linhas que conectam as barras B3 e B4, próximo à barra B4. Esta linha está distante cerca de 300 km da barra B12 em que está instalado o limitador e o gerador adicionado.

Assim como nos demais casos, foi considerado um curto-circuito trifásico com duração de 120ms. Após este período, a proteção da linha atua extinguindo o curto-circuito e o sistema sofre uma reconfiguração e continua em operação sem a linha 3-4. Neste caso, o nível de curto-circuito trifásico do sistema antes da instalação do gerador na barra 12 é $8,99 \text{ kA}_{rms}$, e após a instalação do gerador foi para $9,63 \text{ kA}_{rms}$. Como a contribuição do gerador para o aumento nível de curto-circuito desta barra foi pequena, é esperado que haja pouca influência do limitador neste caso.

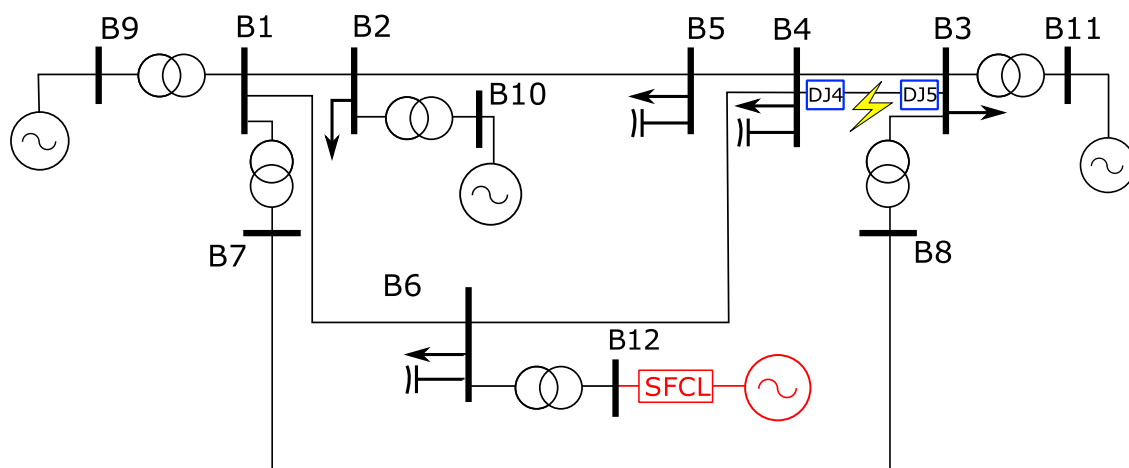


Figura 5.16: Caso C - Diagrama do sistema para curto-circuito em uma das linhas 3-4, com abertura dos disjuntores após 120ms.

5.3.2 Correntes

A Figura 5.17 mostra a corrente de falta na linha 3-4 com e sem o limitador instalado. Pode-se verificar que neste caso a influência do limitador é muito pequena. O primeiro pico de corrente foi limitado de 16,03 kA para 15,92 kA. Em valores eficazes, a limitação ocorreu de 9,63 kA_{rms} para 9,54 kA_{rms}.

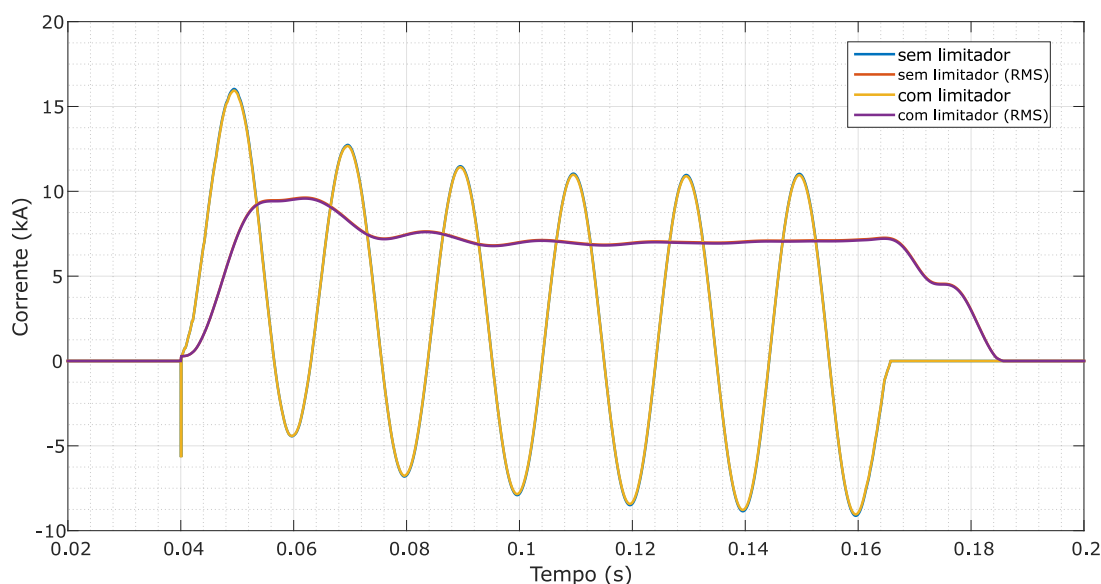


Figura 5.17: Caso C - Corrente de falta na linha 3-4 com e sem a atuação do limitador supercondutor.

Observando a corrente no gerador na Figura 5.18, com e sem o limitador, é possível perceber que de fato o limitador chega a atuar para limitar a contribuição da corrente de falta, mas este efeito é praticamente imperceptível no local da falta. Este comportamento pode ser explicado por dois motivos principais:

- a contribuição para a corrente de falta na linha 3-4 advinda do gerador da

barra 12 é pequena em relação à corrente de falta advinda dos demais geradores do sistema;

- a limitação da corrente de falta ocorre na rede de média tensão, de forma que a corrente vista na rede de alta tensão é consideravelmente menor, de acordo com a relação de transformação (10:1, no caso).

A divisão da corrente no limitador entre o reator *shunt* e as fitas 2G é dada pela Figura 5.19. É possível perceber que parte da corrente de fato é desviada para o *shunt*, o que evidencia uma atuação do limitador. Entretanto, diferentemente dos casos A e B, percebe-se que apenas uma parte pequena da corrente passa pelo *shunt*, sendo que a maior parte é conduzida pelas fitas 2G. Este comportamento será discutido na Subseção 5.3.5.

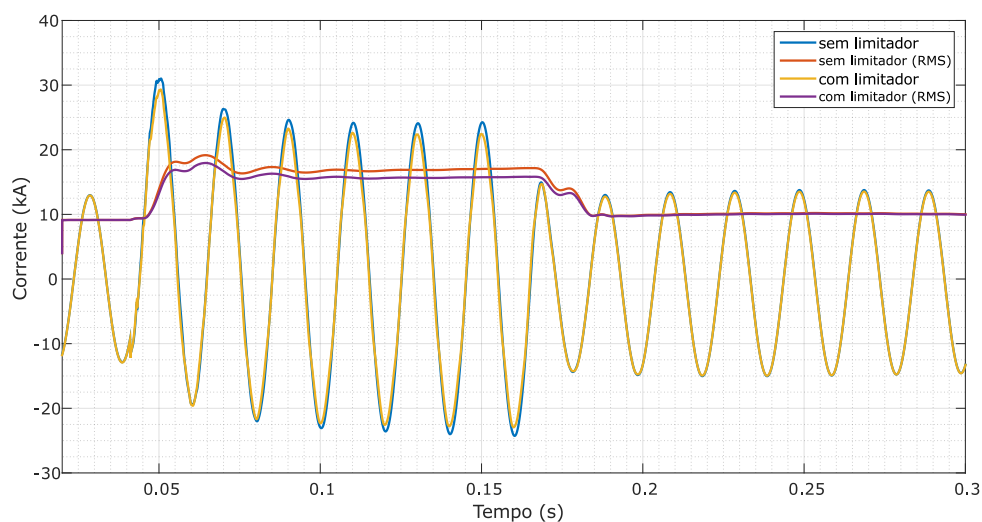


Figura 5.18: Caso C - Corrente no gerador com e sem a atuação do limitador supercondutor na fase A.

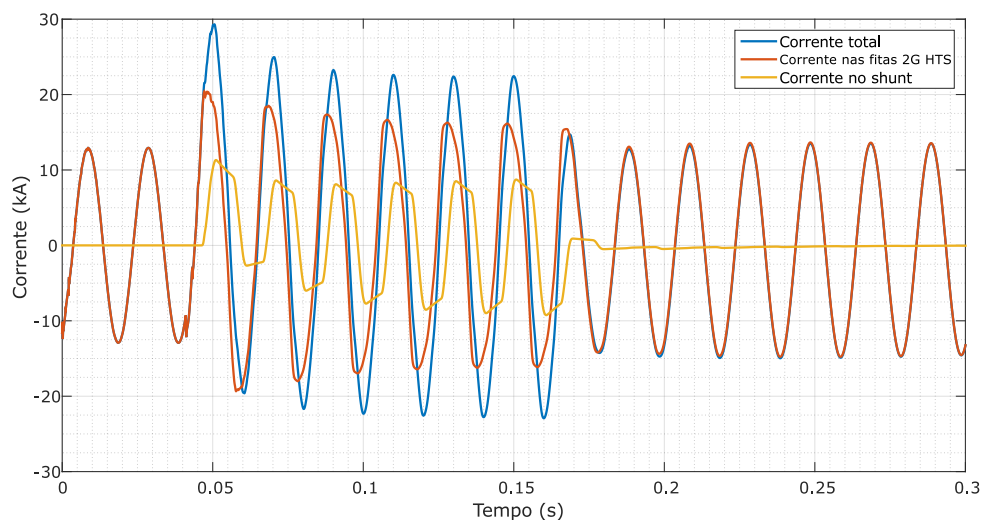


Figura 5.19: Caso C - Corrente nas Fitas 2G HTS, no elemento shunt, e corrente total no limitador da fase A.

5.3.3 Tensões

Assim como ocorreu com a corrente de falta, a influência do limitador na tensão no local da falta não é significativa, conforme mostrado na Figura 5.20. Os motivos são os mesmos explicitados na Subseção anterior. A queda de tensão sobre o limitador é apresentada na Figura 5.21 e chega a atingir valores de 1,5 kV de pico, valores estes que são bastante inferiores aos observados nos casos A e B.

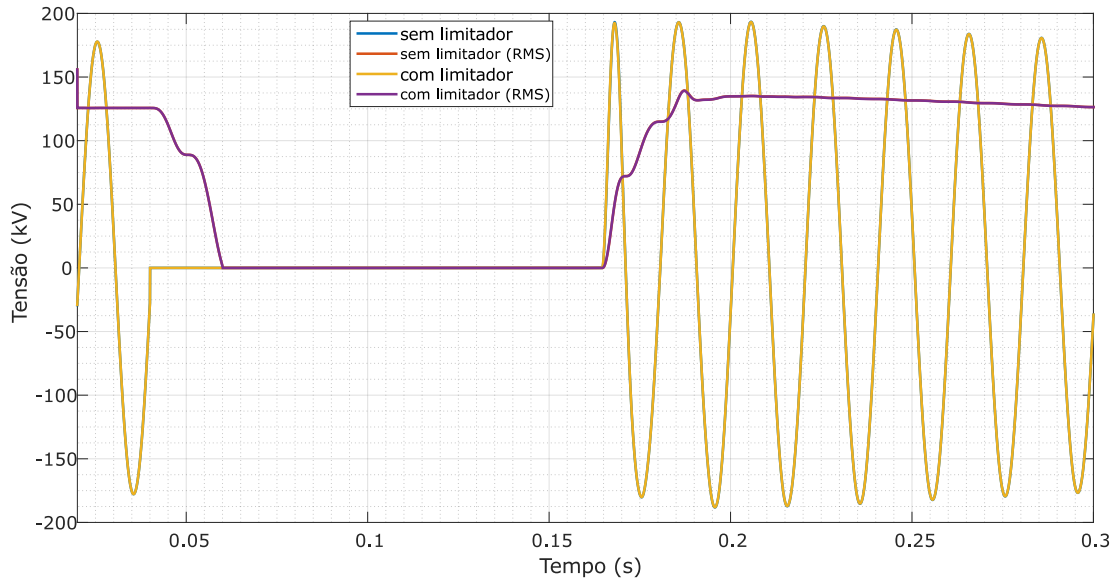


Figura 5.20: Caso C - Tensão na barra 4 com e sem o limitador supercondutor.

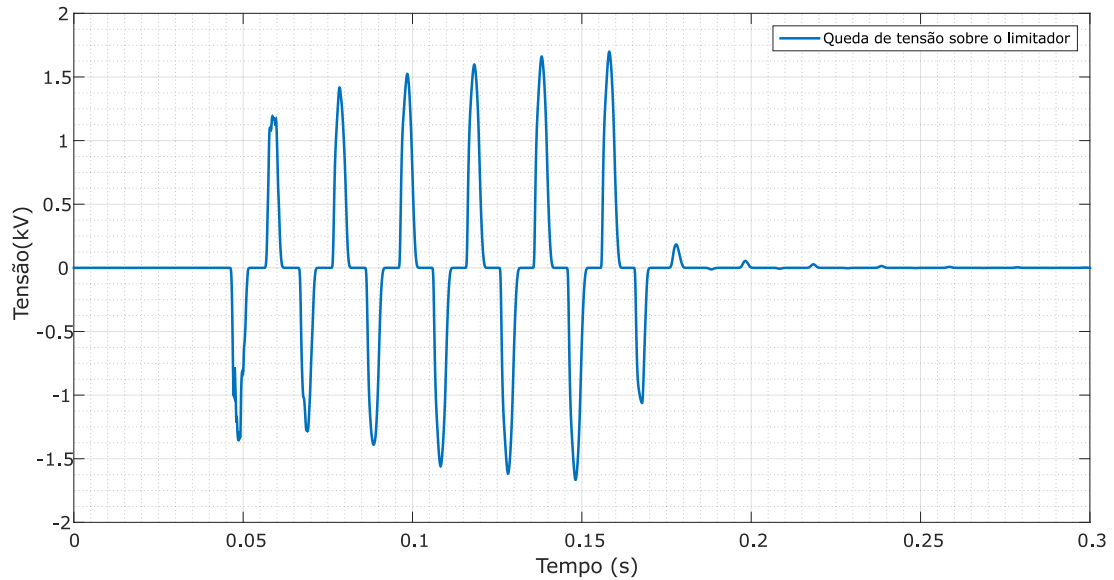


Figura 5.21: Caso C - Queda de tensão sobre o limitador na fase A.

5.3.4 Temperatura

Neste estudo de caso, a temperatura das camadas da fita 2G não aumentam significativamente. Conforme pode ser observado na Figura 5.22, o valor máximo atingido pela temperatura do YBCO é 81,5 K, o que indica que o supercondutor não chega a transitar para o estado normal. Além disso, pode-se verificar que o coeficiente de troca de calor convectivo h_c permanece no estágio de *bubble boiling* durante e após a eliminação da falta. Isso faz com que a temperatura reduza rapidamente para 77 K.

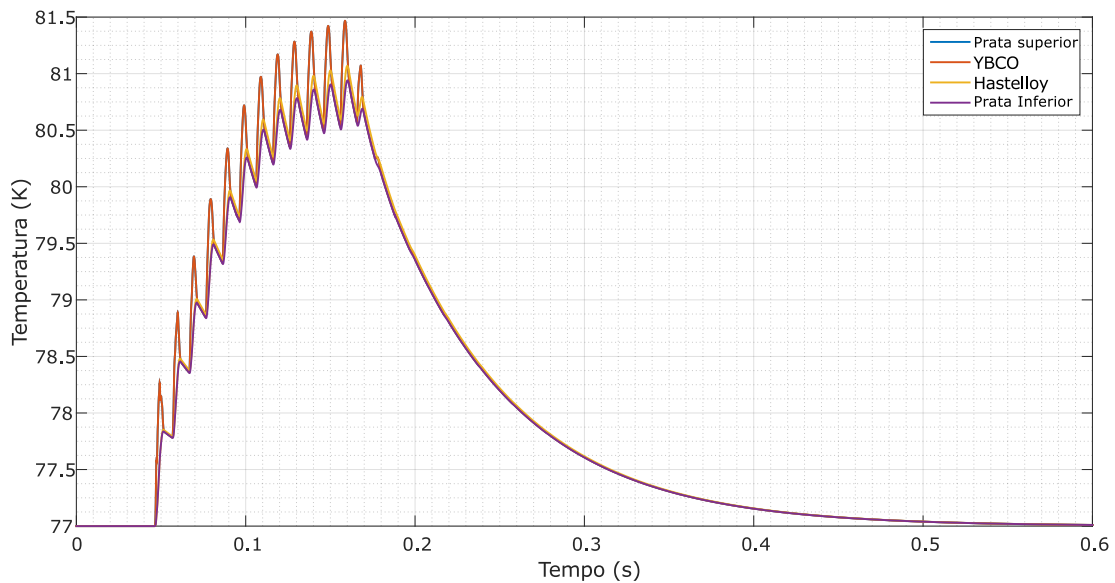


Figura 5.22: Caso C - Temperatura das camadas das Fitas HTS 2G no limitador da fase A.

5.3.5 Impedância

A Figura 5.23 mostra a impedância das fitas 2G, impedância do reator *shunt* e a impedância equivalente do limitador para o caso em estudo. Embora o supercondutor não transite para o estado normal, é possível observar uma pequena impedância do limitador supercondutor durante o curto-circuito na linha 3-4. Esta impedância é resultante dos estágios iniciais da curva E-J do supercondutor e explica a pequena limitação de corrente e queda de tensão no limitador supercondutor. Esta impedância possui característica semelhante à impedância que surge no período de recuperação do limitador sob carga analisada no Caso A (Figura 5.9). Isto explica o comportamento da divisão da corrente entre a fita 2G e o *shunt* observado na Subseção 5.3.2.

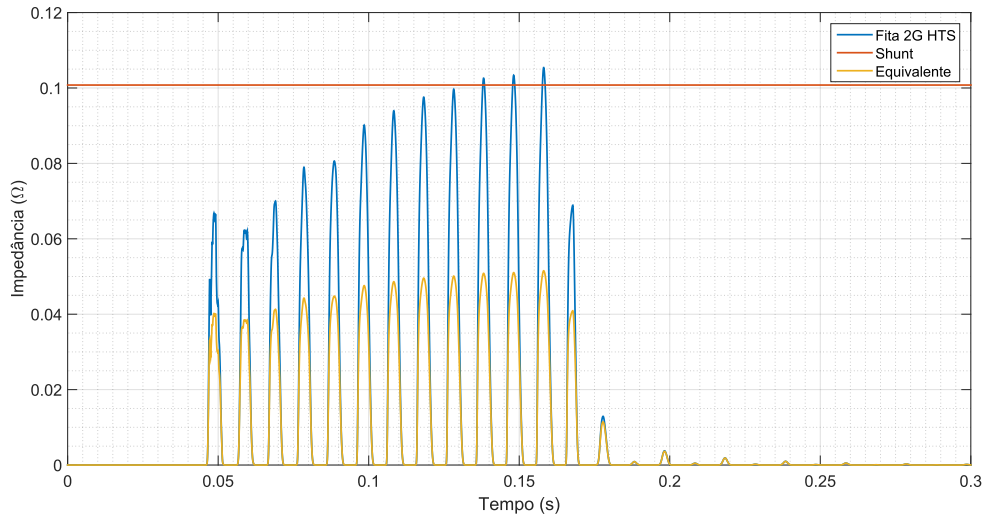


Figura 5.23: Caso C - Impedância total das Fitas 2G HTS, do elemento *shunt*, e impedância equivalente do limitador da fase A.

5.4 Resumo dos resultados

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as 3 fases do sistema para os casos A, B e C analisados. São dadas as correntes de falta prospectivas e correntes limitadas máximas em valores eficazes para as 3 fases.

Tabela 5.1: Resumo dos resultados das simulações.

Variáveis	CASO A (falta na linha 1-6)			CASO B (falta na barra 12)			CASO C (falta na linha 3-4)		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente de falta prospectiva max.	56 kA	42,9 kA	35,5 kA	560 kA	452 kA	402 kA	9,6 kA	8,1 kA	7,3 kA
Corrente de falta limitada max.	17,3 kA	13,5 kA	12,9 kA	125 kA	114kA	101 kA	9,5 kA	8,0 kA	7,2 kA
Temperatura máxima YBCO	98,2 K	97,6 K	98,3 K	146 K	145 K	146 K	81,5 K	81,4 K	81,4 K
Transição	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	não	não
Regime h_c	<i>bubble</i> <i>boiling</i>	<i>bubble</i> <i>boiling</i>	<i>bubble</i> <i>boiling</i>	<i>film</i> <i>boiling</i>	<i>film</i> <i>boiling</i>	<i>film</i> <i>boiling</i>	<i>bubble</i> <i>boiling</i>	<i>bubble</i> <i>boiling</i>	<i>bubble</i> <i>boiling</i>
Impedância máxima fitas 2G	0.89 Ω	0.88 Ω	0.89 Ω	1,48 Ω	1,49 Ω	1,47 Ω	0.105 Ω	0.105 Ω	0.104 Ω
Impedancia eq. máxima	0.090 Ω	0.090 Ω	0.090 Ω	0.094 Ω	0.094 Ω	0.094 Ω	0.05 Ω	0.05 Ω	0.05 Ω

Pode-se perceber que estas correntes apresentam valores bastante distintos. Isto ocorre em razão dos diferentes ângulos de tensão de cada fase no momento da falta. Apesar disso, a temperatura máxima atingida pelo supercondutor em cada fase são muito próximas, assim como os valores de impedância e o tempo de recuperação do limitador após a falta. Isto ocorre porque, embora as correntes iniciais sejam diferentes, estas tendem a se igualar com o passar do tempo da falta pelo decaimento da componente de corrente contínua da corrente de falta. Assim, a temperatura dos limitadores das 3 fases tende a se igualar no período anterior à eliminação da falta.

Conforme pode ser observado na Tabela 5.1, as maiores temperaturas do limitador foram atingidas no caso B, seguidas do caso A e finalmente do caso C. Da mesma forma, o coeficiente de transferência de calor h_c chegou a atingir o regime de *film boiling* somente no caso B, enquanto nos demais casos permaneceu no regime de *bubble boiling*. Houve transição completa do supercondutor para o estado normal tanto no caso A quanto no caso B, mas no caso C isto não ocorreu em razão da distância do ponto da falta ao limitador.

As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam dois gráficos de barras que ajudam a compreender a influência do limitador supercondutor de uma forma mais ampla no sistema teste. Na Figura 5.24, são mostrados os níveis máximos de correntes de falta em valores eficazes em cada barra de alta tensão (220 kV e 380 kV) no sistema teste. São comparados o nível de falta trifásica nas barras antes da instalação do gerador, após a instalação do gerador sem a atuação do limitador supercondutor e, por fim, o nível de falta com a atuação do limitador. Os dados foram obtidos a partir de simulações de falta trifásica em cada barra. Na Figura 5.25 são apresentados os mesmos dados para as barras de média tensão em que os geradores do sistema estão localizados.

Dentre as barras de alta tensão, a barra B6 é a que a limitação do nível de falta foi mais contundente. Isto pode ser explicado pelo fato de que esta barra é localizada nas proximidades do gerador adicionado. Assim, como a contribuição para o nível de falta com a instalação do gerador foi muito alta, a limitação da corrente também é considerável. A atuação do limitador para um curto-circuito na barra 6 foi analisada com detalhes no Caso A (Seção 5.1).

Nas demais barras é possível perceber uma pequena influência da atuação do limitador, mas que não pode ser considerada significativa. Isto ocorre porque a própria influência da instalação do gerador da barra B12 contribuiu pouco para o aumento do nível de falta nestas barras. Assim, a presença do limitador junto ao gerador também contribuiu pouco para a redução dos níveis de falta. Um exemplo desta situação foi tratado com detalhes no Caso C, (Seção 5.3). Neste caso, o limitador supercondutor chegou a iniciar a atuação, mas sem, no entanto, ocorrer

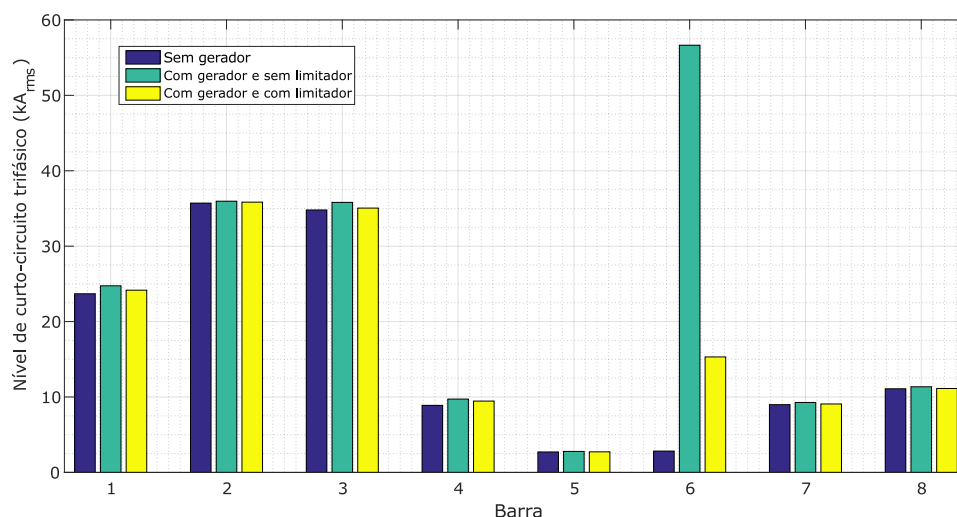


Figura 5.24: Comparativo dos níveis de curto-circuito trifásico nas barras de alta tensão.

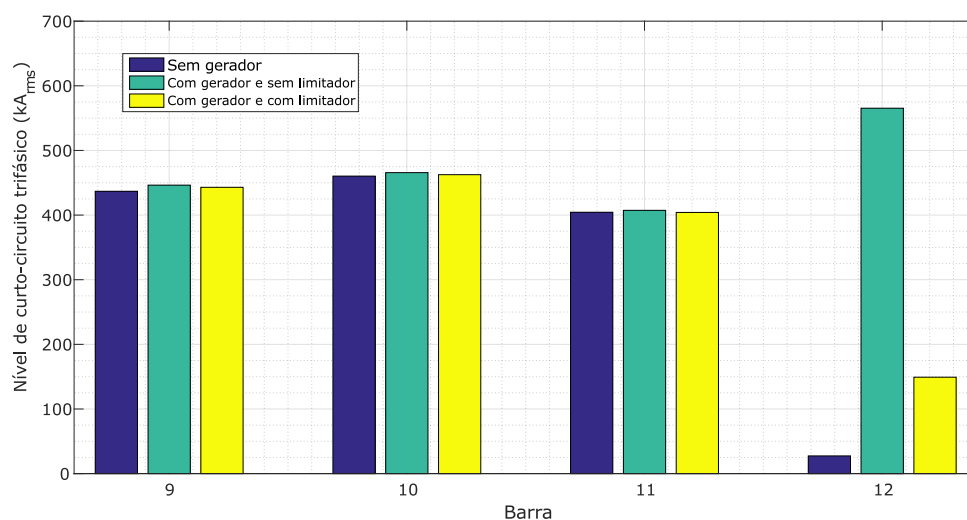


Figura 5.25: Comparativo dos níveis de curto-circuito trifásico nas barras de média tensão (geração).

a transição completa do supercondutor, resultando numa limitação pequena da corrente de falta.

Dentre as barras de média tensão em que os geradores do sistema se encontram, ocorre algo similar. Na barra B12, percebe-se uma redução considerável do nível de falta com a instalação do limitador, uma vez que o novo gerador foi instalado exatamente nesta barra. Nas demais barras, a influência do limitador é pequena, embora seja perceptível.

De uma forma geral, pode-se dizer que a atuação do limitador neste sistema de teste é bastante local, influenciando de forma significativa na redução dos níveis de falta nos pontos próximos a instalação do mesmo, na barra B6 e na barra B12. Nos demais pontos do sistema, embora a atuação do limitador possa ser percebida, é pouco significativa em termos de limitação de corrente.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho, procuramos abordar os problemas relacionados às altas correntes de curto-circuito nos sistemas elétricos, assim como as soluções que têm sido adotadas para limitação de corrente, em especial, a utilização dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito baseados na tecnologia de materiais supercondutores. Dentre os limitadores supercondutores, verificamos que os limitadores do tipo resistivo apresentam características interessantes, como a simplicidade topológica, pequeno volume e peso, impedância desprezível em condições normais de operação, rápido tempo de atuação e falha-segura.

Foi descrito e implementado um modelo de simulação do limitador supercondutor resistivo baseado em fitas supercondutoras de segunda geração, o qual representa o funcionamento do dispositivo de forma detalhada e ao mesmo tempo provê informações importantes sobre variáveis internas do equipamento, como a temperatura e resistências das camadas das fitas. O modelo foi validado através da comparação da simulação com resultados de ensaio realizado com um componente semelhante.

Utilizando o modelo de simulação do limitador, o trabalho apresentou um estudo detalhado do desempenho do equipamento inserido em um sistema elétrico de potência de transmissão *Benchmark* de 12 barras da CIGRE. Através de simulações transitórias, constatamos que a entrada em operação de um novo gerador aumentou os níveis da corrente de curto-circuito do sistema, o que acarretou em possível superação de equipamentos elétricos no que diz respeito ao nível de curto-circuito. Assim, propusemos a utilização de um limitador inserido em série no ponto de acoplamento do novo gerador ao sistema, na média tensão, de forma a limitar a contribuição da corrente de falta advinda desta fonte geradora.

Por meio das simulações, avaliamos que o desempenho do limitador supercondutor dentro do sistema teste foi satisfatório, na medida em que reduziu os níveis de curto-circuito pontos próximos à instalação do gerador. O dispositivo foi capaz de limitar consideravelmente a corrente de falta em uma barra na alta ten-

são, evitando a necessidade de substituição de equipamentos de proteção. Além disso, verificou-se que, após a extinção da falta, o limitador foi capaz de passar pelo período de recuperação sob carga, sem a necessidade do desligamento do mesmo do sistema. Por outro lado, constatamos que o limitador exerceu pouca influência na limitação da corrente de falta em pontos mais distantes da instalação do equipamento. De uma forma geral, o grau de influência da atuação do limitador instalado junto ao gerador para redução dos níveis de falta em cada ponto do sistema está relacionado com o tamanho da contribuição do gerador para as correntes de falta nestes mesmos pontos.

Em termos do aquecimento das fitas que compõem o limitador, verificou-se pelas simulações que as temperaturas máximas atingidas durante o curto-circuito não ultrapassaram os limites aceitáveis para a operação segura, mesmo considerando o caso mais severo de falta. Isto foi possível porque o limitador proposto foi composto de uma quantidade grande de fitas supercondutoras, que impediram um aquecimento acentuado do equipamento. Além disso, o reator *shunt* conectado em paralelo com o sistema mostrou ser uma solução interessante, uma vez que conduz a maior parte da corrente durante a falta, contribuindo para que a temperatura das fitas 2G não atinja patamares prejudiciais e prolongando o tempo possível de exposição do limitador às correntes de falta.

É importante destacar que este trabalho teve o principal objetivo de apresentar a eficácia do limitador supercondutor resistivo no tocante à redução da corrente de curto-circuito e à interferência da inserção do mesmo em um sistema de teste. No entanto, a escolha desta ou de qualquer outra solução deve ser precedida de uma análise de viabilidade bastante criteriosa de acordo com cada situação real, que leve em conta não somente o custo do dispositivo limitador, mas também de todos os custos associados à implantação do mesmo.

6.1 Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho e a partir das conclusões obtidas, foram identificados alguns pontos que podem ser interessantes para trabalhos futuros.

Um ponto importante está relacionado com a necessidade promover estudos da atuação de limitadores em sistemas reais de transmissão, assim como análises comparativas entre os diferentes tipos de limitadores supercondutores existentes com outras soluções possíveis.

Outro ponto de estudo interessante está relacionado com a influência que os limitadores supercondutores podem exercer na estabilidade transitória dos sistemas elétricos em que estão inseridos. A partir das simulações realizadas neste trabalho, foi possível verificar que a dinâmica do funcionamento dos geradores

após uma grande perturbação (curto-circuito) do sistema é alterada com a presença do limitador. Isto indica que, juntamente com a limitação dos níveis de falta, o limitador modifica as condições de estabilidade transitória do sistema. De fato, alguns estudos neste sentido já foram realizados, mas sempre considerando modelos simplificados dos limitadores em sistemas de potência reduzidos. Assim, consideramos que este seja um ponto interessante a ser investigado de forma mais aprofundada.

Referências Bibliográficas

- [1] REY, C. *Superconductors in the power grid: Materials and applications*. London, Elsevier, 2015.
- [2] ONNES, H. K. "Further experiments with Liquid Helium. G. On the Electrical Resistance of Pure Metals, etc. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears", *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences*, v. 14, pp. 818–821, 1911.
- [3] COSTA, M. B., PAVAO, A. C. "Supercondutividade: um século de desafios e superação", *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 2, pp. 2602, 2012.
- [4] ROSE-INNES, A., RHODERICK, E. *Introduction to superconductivity*. 1 ed. New York, Pergamon Publishing Company, 1969.
- [5] MEISSNER, W., OCHSENFELD, R. "Ein neuer effekt bei eintritt der supra-leitfähigkeit", *Naturwissenschaften*, v. 21, n. 44, pp. 787–788, 1933.
- [6] DE SOUSA, W. T. B. "Processamento, Caracterização e Estudo de Fenômenos Críticos no Sistema Supercondutor HoPrBaCuO". 2008. Monografia (Bacharel em Física), UEPG (Universidade Estadual de Ponta Grossa), Ponta Grossa - PR, Brazil.
- [7] LONDON, F., LONDON, H. "The electromagnetic equations of the supraconductor". In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 149, pp. 71–88. The Royal Society, 1935.
- [8] TINKHAM, M. *Introduction to superconductivity*. International series in pure and applied physics. 2nd ed ed. New York, McGraw Hill, 1996.
- [9] BARDEEN, J., COOPER, L. N., SCHRIEFFER, J. R. "Microscopic theory of superconductivity", *Physical Review*, v. 106, n. 1, pp. 162, 1957.

Referências

- [10] ABRIKOSOV, A. "The magnetic properties of superconducting alloys", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v. 2, n. 3, pp. 199–208, 1957.
- [11] RJABININ, J., SHUBNIKOW, L. "Magnetic properties and critical currents of superconducting alloys", *Nature*, v. 135, n. 3415, pp. 581–582, 1935.
- [12] WANG, Y. *Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering*. North China Electric Power University. 1st ed ed. New Delhi, John Wiley & Sons, 2013.
- [13] BEDNORZ, J. "Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", *Zeitschrift fur Physik*, v. 64, pp. 189–193, 1986.
- [14] FOSSHEIM, K., SUDBØ, A. *Superconductivity: physics and applications*. a, John Wiley & Sons, 2005.
- [15] SAXENA, A. K. *High-Temperature Superconductors*, v. 125. a, Springer Science & Business Media, 2012.
- [16] SHI, D. *High-temperature superconducting materials science and engineering: new concepts and technology*. a, Elsevier, 1995.
- [17] DE SOUSA, W. T. B. *Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- [18] RETTELBACH, T., SCHMITZ, G. "3D simulation of temperature, electric field and current density evolution in superconducting components", *Superconductor Science and Technology*, v. 16, n. 5, pp. 645, 2003.
- [19] PAUL, W., CHEN, M., LAKNER, M., et al. "Fault current limiter based on high temperature superconductors—different concepts, test results, simulations, applications", *Physica C: Superconductivity*, v. 354, n. 1, pp. 27–33, 2001.
- [20] DURON, J., DUTOIT, B., GRILLI, F., et al. "Computer modeling of YBCO fault current limiter strips lines in over-critical regime with temperature dependent parameters", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 1839–1842, 2007.
- [21] FREI, C., WHITNEY, R., SCHIFFER, H.-W., et al. *World energy scenarios: Composing energy futures to 2050*. Relatório técnico, Conseil Francais de l'énergie, 2013.

- [22] MONTEIRO, A. M. *Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com Ênfase no IPC*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [23] LANES, M. M. *Limitador Eletrônico de Corrente de Curto-Circuito baseado em Circuito Ressonante Controlado por Dispositivos Semicondutores de Potência*. Dissertação de M.Sc., PPEE/UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2007.
- [24] PAITHANKAR, Y. G. *Transmission network protection: theory and practice*, v. 2. New Delhi, CRC Press, 1997.
- [25] GRAINGER, J. J., STEVENSON, W. D. *Power system analysis*. New Delhi, McGraw-Hill, 1994.
- [26] ANDRADE, V. S. D. *Limitação da Corrente de Curto-Circuito Através de Dispositivos Supercondutores*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [27] DE SOUSA, W. T. B. *Simulações e ensaios com limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores do tipo resistivo*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [28] HINGORANI, N. G. "Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems", *Proceedings of the IEEE*, v. 76, n. 4, pp. 481–482, 1988.
- [29] TENORIO, A., JENKINS, N. "Investigation of the TCSC as a Fault Current Limiter". In: *Proc. of International Conference on Power System Transients (IPST'97)*, pp. 345–350, 1997.
- [30] KIM, C.-K., SOOD, V. K., JANG, G.-S., et al. *HVDC transmission: power conversion applications in power systems*. New Delhi, John Wiley & Sons, 2009.
- [31] KAPOOR, R., SHUKLA, A., DEMETRIADES, G. "State of art of power electronics in circuit breaker technology". In: *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 615–622. IEEE, 2012.
- [32] MEYER, C., SCHRODER, S., DE DONCKER, R. W. "Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 5, pp. 1333–1340, 2004.
- [33] MEYER, C., DE DONCKER, R. W. "Solid-state circuit breaker based on active thyristor topologies", *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 21, n. 2, pp. 450–458, 2006.

- [34] NOE, M., STEURER, M. "High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status", *Superconductor Science and Technology*, v. 20, n. 3, pp. R15, 2007.
- [35] NÄCKEL, O., NOE, M. "Conceptual design study of an air coil fault current limiter", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, pp. 5602404–5602404, 2013.
- [36] POLASEK, A., DA SILVA, F., DE SOUSA, W., et al. "Comparação entre limitadores de corrente empregando diferentes materiais supercondutores". In: *Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ*. CIGRE, 2013.
- [37] DE SOUSA, W., DIAS, R., DA SILVA, F., et al. "Comparison between the fault current limiting performance of Bi-2212 bifilar components and 2G YBCO coils", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, pp. 5602204–5602204, 2013.
- [38] GOTO, Y., YUKITA, K., MIZUNO, K., et al. "Experimental studies on power system transient stability due to introduction of superconducting fault current limiters". In: *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000*. IEEE, v. 2, pp. 1129–1134. IEEE, 2000.
- [39] MUTA, I., DOSHITA, T., NAKAMURA, T., et al. "Influences of superconducting fault current limiter (SFCL) on superconducting generator in one-machine double-line system", *IEEE transactions on applied superconductivity*, v. 13, n. 2, pp. 2206–2209, 2003.
- [40] YE, L., LIN, L., JUENGST, K.-P. "Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 12, n. 1, pp. 900–903, 2002.
- [41] KAMEDA, H., TANIGUCHI, H. "The setting method of the specific parameters of a superconducting fault current limiter installed at the bus-tie and response of protective relays at operation of the SFCL", *Physica C: Superconductivity*, v. 372, pp. 1673–1679, 2002.
- [42] LANGSTON, J., STEURER, M., WOODRUFF, S., et al. "A generic real-time computer simulation model for superconducting fault current limiters and its application in system protection studies", *IEEE transactions on applied superconductivity*, v. 15, n. 2, pp. 2090–2093, 2005.

- [43] RETTELBACH, T., SCHMITZ, G. “3D simulation of temperature, electric field and current density evolution in superconducting components”, *Superconductor Science and Technology*, v. 16, n. 5, pp. 645, 2003.
- [44] DE SOUSA, W., POLASEK, A., DICLER, F., et al. “Application of the FDM-ADI Method for Simulating SFCL Under Inrush Conditions”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 26, n. 3, pp. 1–5, 2016.
- [45] DE SOUSA, W., POLASEK, A., DIAS, R., et al. “Thermal–electrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters”, *Cryogenics*, v. 62, pp. 97–109, 2014.
- [46] DE SOUSA, W. T. B., ASSIS, T. M. L., POLASEK, A., 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*, v. 26, n. 2, pp. 1–8, 2016.
- [47] QUADROS, R. S. D., BORTOLI, A. L. D. “Fundamentos de Cálculo Numérico para Engenheiros”. 2009.
- [48] DE SOUSA, W., POLASEK, A., ASSIS, T., et al. “Simulations of resistive and air coil SFCLs in a power grid”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, pp. 1–5, 2015.
- [49] STRUNZ, K., ABBASI, E., ABBEY, C., et al. *Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*. Relatório técnico, Technical Brochure 575- Cigre Task Force C6.04, 2014.
- [50] MARTINI, L., NOE, M., TIXADOR, P., et al. “The ECCOFLOW project: Design and simulations results of a Superconducting Fault Current Limiter for Operation in Electricity Networks”. In: *21st International Conference on Electricity Distribution*, 2011.
- [51] JEŽEK, V. “Short-circuit capability of generator circuit breaker”, *Intensive Programme “Renewable Energy Sources”*, v. 1, pp. 155–158, 2011.
- [52] ANDERSON, P., FOUAD, A., OF ELECTRICAL, I., et al. *Power system control and stability*. IEEE Press power engineering series. Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 2003. ISBN: 9780471238621.

Apêndice A

Rotina de Simulação

```
%%Função que calcula a tensão, resistências, correntes e  
→ temperaturas das camadas da fita 2G a cada passo  
function [V, RagT, Rybco, Rhy, RagB, Rfita, IagT, Iybco, Ihy, IagB,  
→ TagT1, Tybco1, Thy1, TagB1] = fcn(I, TagT, Tybco, Thy, TagB, l,  
→ c, fs, fp, T0, DagT, Dybco, Dhy, DagB, Tc, Ic0, Ec, Eo, n1, n2,  
→ beta0, delta, tol, dt)  
%% Variáveis de saída  
% V Tensão sobre o limitador  
% RagT Resistência elétrica da camada superior de prata  
% Rybco Resistência elétrica da camada do YBCO  
% Rhy Resistência elétrica da camada de Hastelloy  
% RagB Resistência elétrica da camada de prata superior  
% Rfita Resistência equivalente da fita 2G  
% IagT Corrente na camada superior de prata  
% Iybco Corrente na camada superior do YBCO  
% Ihy Corrente na camada superior do Hastelloy  
% IagB Corrente na camada inferior de prata  
% TagT1 Temperatura na camada superior de prata nova  
% Tybco1 Temperatura na camada superior do YBCO nova  
% Thy1 Temperatura na camada superior do Hastelloy nova  
% TagB1 Temperatura na camada inferior de prata nova  
%% Variáveis de entrada  
% I Corrente total de entrada no limitador  
% TagT Temperatura na camada superior de prata antiga  
% Tybco Temperatura na camada superior do YBCO antiga  
% Thy Temperatura na camada superior do Hastelloy antiga  
% TagB Temperatura na camada inferior de prata antiga
```

Apêndice A- Rotina de Simulação

```
%% Constantes de entrada
% l      Comprimento de cada fita
% fs     Número de fitas em série
% fp     Número de fitas em paralelo
% T0     Temperatura do refrigerante NH2 (77 K)
% Tc     Temperatura crítica do YBCO (91 K)
% Ic0    Corrente crítica do YBCO (300 A)
% Ec     Campo crítico de flux creep
% Eo     Campo crítico de flux flow
% n1     Índice de transição de flux creep
% n2     Índice de transição de flux flow

% c      Largura da fita 2G
% DagT   Espessura da camada superior de prata
% Dybco  Espessura da camada superior do YBCO
% Dhy    Espessura da camada superior do Hastelloy
% DagB   Espessura da camada inferior de prata

% dt     Passo de integração
% beta0  Constante beta da iteração de corrente
% delta  Constante delta da iteração de corrente
% tol    Tolerância da iteração de corrente

%YBCO
Aybco = c*Dybco;    %Área da seção transversal
Mybco = 1e-2;      %Constante 1 da resistividade
Zybco = -1e-1;     %Constante 2 da resistividade
%Prata
AagT = DagT*c;
AagB = DagB*c;
Mag = 6.17e-9;
Zag = -2.082e-7;
%Hastelloy
Ahy = Dhy*c;
Mhy = 8.958e-9;
Zhy = 1.103e-4;

L = l*fs; % comprimento total de fitas 2G
```

Apêndice A- Rotina de Simulação

```
%% Cálculo das Resistências Elétricas a partir das temperaturas
Rybco = 1e-13*L/Aybco;
RagT = (Mag*TagT+Zag)*L/AagT;
RagB = (Mag*TagB+Zag)*L/AagB;
Rhy = (Mhy*Thy+Zhy)*L/Ahy;
Rfita = (1/(1/RagT + 1/Rybco + 1/Rhy + 1/RagB))/fp;

%% Iteração de Corrente
Ifita = I;
Iybco_velho = Rfita/Rybco*Ifita;

beta = beta0;
erro_velho = 1;
while abs(erro_velho)>tol
    if Tybco<=Tc
        Ic = Ic0*(Tc - Tybco)/(Tc - T0); %variação da corrente
        ↪ crítica com a temperatura
        Jybco = Iybco_velho/Aybco;
        %Flux creep - Curva E-J
        rhohts1 = abs(Ec/(Jybco+0.0001)*(Iybco_velho/Ic)^n1)+1e-20;
        %Flux flow - Curva E-J
        rhohts2 = abs(Eo/(Jybco+0.0001)*(Iybco_velho/Ic)^n2)+1e-20;
        %Estado Normal
        rhohts3 = Zybco + Mybco*Tybco;
        rhohtsAux = min(rhohts1,rhohts2);
        rhohts = min(rhohtsAux,rhohts3);
    else
        %Estado Normal
        rhohts = Zybco + Mybco*Tybco;
    end

    Rybco = rhohts*L/Aybco;
    Rfita = (1/(1/RagT + 1/Rybco + 1/Rhy + 1/RagB))/fp;
    Iybco_novo = Rfita/Rybco*I;

    erro_novo = (Iybco_novo - Iybco_velho)/Iybco_novo*100;
    if (erro_novo>0 && erro_velho>0)|| (erro_novo<0 && erro_velho<0)
        beta = beta + delta;
end
```

Apêndice A- Rotina de Simulação

```
else
    beta = beta0;
end

Iybco_velho = Iybco_velho + beta*(Iybco_novo - Iybco_velho);
erro_velho = erro_novo;
end

%% Cálculo da tensão sobre o limitador
V = Rfita*Ifita;

%% Cálculo das correntes nas camadas
IagT = Rfita/RagT*Ifita;
Iybco = Rfita/Rybco*Ifita;
Ihy = Rfita/Rhy*Ifita;
IagB = Rfita/RagB*Ifita;

%% Cálculo das potências dissipadas nas camadas
PagT = IagT^2*RagT;
Pybco = Rybco*Iybco^2;
Phy = Ihy^2*Rhy;
PagB = IagB^2*RagB;

PP = [PagT;Pybco;Phy;PagB];

%% Atualização das variáveis térmicas com a temperatura
SHagT = (220.5+0.046*TagT)/1000;
SMagT = 10.47;
KagT = (420.9 + 501.8*0.956^TagT)/100;
SHybco = 0.39*(250/Tybco)^2*exp(250/Tybco)/(exp(250/Tybco)-1)^2;
SMybco = 6.3;
Kybco = 5/100;
SHhy = 0.19 + 2*0.194*(1-exp(-Thy/310));
SMhy = 8.9;
Khy = (3.873 + 0.017*Thy)/100;
SHagB = (220.5+0.046*TagB)/1000;
SMagB = 10.47;
KagB = (420.9 + 501.8*0.956^TagB)/100;
```


Apêndice A- Rotina de Simulação

```
%% Atualização de hc
if (Tybco-T0)<=2.757
    h = 0.18;
elseif (Tybco-T0)<=28.4
    h = (3.8147 -2.8209*(Tybco-T0) + 0.72328*(Tybco-T0)^2 -
    ↪ 0.049438*(Tybco-T0)^3 + 1.325e-3*(Tybco-T0)^4 -
    ↪ 12.773e-6*(Tybco-T0)^5)/(Tybco-T0);
else
    h = 0.03;
end
%% Cálculo das capacidades térmicas de cada camada
CagT = AagT*L*SMagT*SHagT;
Cybco = Aybco*L*SMybco*SHybco;
Chy = Ahy*L*SMhy*SHhy;
CagB = AagB*L*SMagB*SHagB;
CC = [CagT 0 0 0 ; 0 Cybco 0 0; 0 0 Chy 0; 0 0 0 CagB];
%% Cálculo das resistências térmicas de cada camada
RRagT = DagT/(KagT*c*L);
RRybco = Dybco/(Kybco*c*L);
RRhy = Dhy/(Khy*c*L);
RRagB = DagB/(KagB*c*L);
Rconv = 1/(h*L*c);
%% Montagem da matriz do circuito térmico-elétrico
Gagtn = 1/(Rconv + RRagT/2);
Gagsp = 1/(RRagT/2 + RRYbco/2);
Gsphy = 1/(RRhy/2 + RRYbco/2);
Ghyagb = 1/(RRhy/2 + RRagB/2);
Gagbn = 1/(Rconv + RRagB/2);
GG = [(Gagtn+Gagsp), (-Gagsp), 0, 0; (-Gagsp), (Gagsp+Gsphy), (-Gsphy), 0;
    ↪ 0, -Gsphy, (Gsphy+Ghyagb), -Ghyagb; 0, 0, -Ghyagb, (Ghyagb+Gagbn) ];
TT = [TagT; Tybco; Thy; TagB];
AA = [Gagtn; 0; 0; Gagbn];
%% Integração por Euler Implícito
TTn = (CC*dt*GG)\(CC*TT + dt*(PP + T0*AA));
%% Saída das novas temperaturas nas camadas
TagT1 = TTn(1);
Tybco1 = TTn(2);
Thy1 = TTn(3);
TagB1 = TTn(4);

end
```

Apêndice B

Dados do Sistema Teste

Neste apêndice, os dados do sistema de transmissão utilizado como base de teste para o limitador de curto-circuito supercondutor são organizados em tabelas e os modelos utilizados para representação de cada componente da rede são brevemente descritos. Estes dados são baseados no sistema de transmissão proposto em [49].

B.1 Linhas de Transmissão

Na Tabela B.1 são dados os parâmetros de sequência positiva e sequência negativa de resistência, indutância e capacitância das linhas de transmissão, bem como os comprimentos e os níveis de tensão. As linhas de transmissão foram representadas utilizando o modelo integrado do Simulink, que é baseado no modelo de Bergereon usado no EMTP (*Electromagnetic Transient Program*). Este modelo considera os parâmetros da linha distribuídos ao longo do comprimento.

Tabela B.1: Dados do sistema teste - Linhas de transmissão.

Barra de	Barra para	Tensão [kV]	R_1 [Ω/km]	L_1 [H/km]	C_1 [F/km]	R_0 [Ω/km]	L_0 [H/km]	C_0 [F/km]	Comp [km]
1	2	220	6.53e-3	1.26e-3	9.07e-9	2.13e-3	4.19e-3	5.30e-9	100
1	6	220	6.53e-3	1.26e-3	9.07e-9	2.13e-3	4.19e-3	5.30e-9	300
2	5	220	6.53e-3	1.26e-3	9.07e-9	2.13e-3	4.19e-3	5.30e-9	300
3	4	220	6.53e-3	1.26e-3	9.07e-9	2.13e-3	4.19e-3	5.30e-9	100
3	4	220	6.53e-3	1.26e-3	9.07e-9	2.13e-3	4.19e-3	5.30e-9	100
4	5	220	6.53e-3	1.26e-3	9.07e-9	2.13e-3	4.19e-3	5.30e-9	300
4	6	220	6.53e-3	1.26e-3	9.07e-9	2.13e-3	4.19e-3	5.30e-9	300
7	8	380	3.27e-2	9.92e-4	1.14e-10	1.80e-1	3.67e-3	8.02e-9	600

B.2 Transformadores

Os dados dos transformadores são dados na Tabela B.2. As reatâncias são dadas em valores p.u. (por unidade) na base de cada transformador. O tipo de conexão de cada equipamento e a impedância de aterramento também são descritos na Tabela. Os transformadores trifásicos são modelados como três transformadores monofásicos e não são levados em conta efeitos da saturação.

Tabela B.2: Dados do sistema teste - Transformadores.

Barra		Potência Nominal	Tensão Primário	Tensão Secundário	Tipo de Conexão	Reatância	Impedância de aterramento
de	para		V_1	V_2		X_{tr}	Z_{gnd}
		[MVA]	[kV]	[kV]		[p.u]	[Ω]
1	7	1000	220	380	3f YNyn0	0.13	3
9	1	1000	22	220	3f YNd11	0.13	3
10	2	1000	22	220	3f YNd11	0.13	3
3	8	1000	220	380	3f YNyn0	0.13	3
11	3	1000	22	220	3f YNd11	0.13	3
12	6	500	22	220	3f YNd11	0.13	3

B.3 Geradores

Os geradores nas barras 10, 11 e 12 foram modelados como máquinas síncronas de acordo com o modelo básico pré-definido no Simulink. O modelo leva em conta a dinâmica dos enrolamentos do estator, enrolamento de campo e enrolamentos amortecedores. O circuito equivalente do modelo é representado nos eixos de referência do gerador (eixos dq), sendo que todos os parâmetros são referenciados ao lado do estator. As máquinas possuem parâmetros típicos que foram retirados do *Benchmark* da CIGRE [49] e da referência [52], sendo que os parâmetros principais são relacionados na Tabela B.3. As impedâncias do gerador adicionado na barra B12 foram consideradas com valores mais baixos do que as dos demais geradores, de forma a possibilitar a avaliação da entrada em operação de geradores com alta contribuição para corrente de falta do sistema. A simulação considera o sistema de excitação das máquinas e o regulador de tensão (AVR), que foram modelados de acordo com o modelo DC1A do IEEE. A turbina hidráulica das três máquinas e o regulador de velocidade também foram considerados. Não foi considerado nas simulações o controle de Sistema de Estabilização de Potência (PSS). O gerador na barra 9 foi modelado como uma barra infinita, de forma a possibili-

tar o cálculo do fluxo de potência do sistema e o início da simulação com o sistema em regime permanente.

Tabela B.3: Dados do sistema teste - Geradores.

Barra	S_{non}	P_{out}	V_{out}	H	X_d	X'_d	X''_d	T'_{d0}	T''_{d0}	X_q	X''_q	T''_{q0}
	[MVA]	[MW]	[p.u.]	[s]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[s]	[s]	[p.u.]	[p.u.]	[s]
10	700	500	1.03	5.0	1.25	0.333	0.292	5.0	0.002	1.0	0.292	0.002
11	500	200	1.03	3.0	1.667	0.25	0.233	6.0	0.002	1.125	0.225	0.002
12	500	300	1.03	5.0	1.12	0.232	0.171	5.9	0.033	1.52	0.171	0.078

B.4 Cargas e Compensação Capacitiva

Todas as cargas do sistema e compensação capacitiva nas barras foram modeladas como impedância constante. Os valores das cargas do sistema são dados pela Tabela B.4 e os dados de compensação capacitiva constam na Tabela B.5.

Tabela B.4: Dados do sistema teste - Cargas.

Barra	P_{max}	Q_{max}
	[MW]	[MVar]
1	0	0
2	285	200
3	325	244
4	326	244
5	103	62
6	435	296
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

Tabela B.5: Dados do sistema teste - Compensação capacitiva.

Barra	Q_c
	[MVar]
4	160
5	80
6a	180

B.5 Inicialização da simulação

Antes do início da simulação, foi utilizada uma ferramenta do Simulink para o cálculo do fluxo de potência (*Power Flow*) do sistema em regime permanente, de acordo com os dados das cargas, geração, e impedâncias do sistema. A barra B9 foi considerada a barra de referência (*swing*). Após o cálculo do fluxo de potência, todos os estados iniciais das variáveis do sistema foram inicializadas utilizando outra ferramenta do software (*Machine Initialization*), de forma a possibilitar que a simulação dinâmica do sistema fosse iniciada com o sistema em regime permanente. A Figura B.1 apresenta o diagrama de blocos do sistema teste simulado em regime permanente. Os ângulos e tensões iniciais em cada barra do sistema também podem ser observados na Figura. A partir deste sistema, os casos de curto-circuito foram estudados com a aplicação de faltas conforme cada caso. Em todas as simulações o método de integração numérica utilizado foi o de Euler implícito e o passo de integração considerado foi de 5×10^{-5} s.

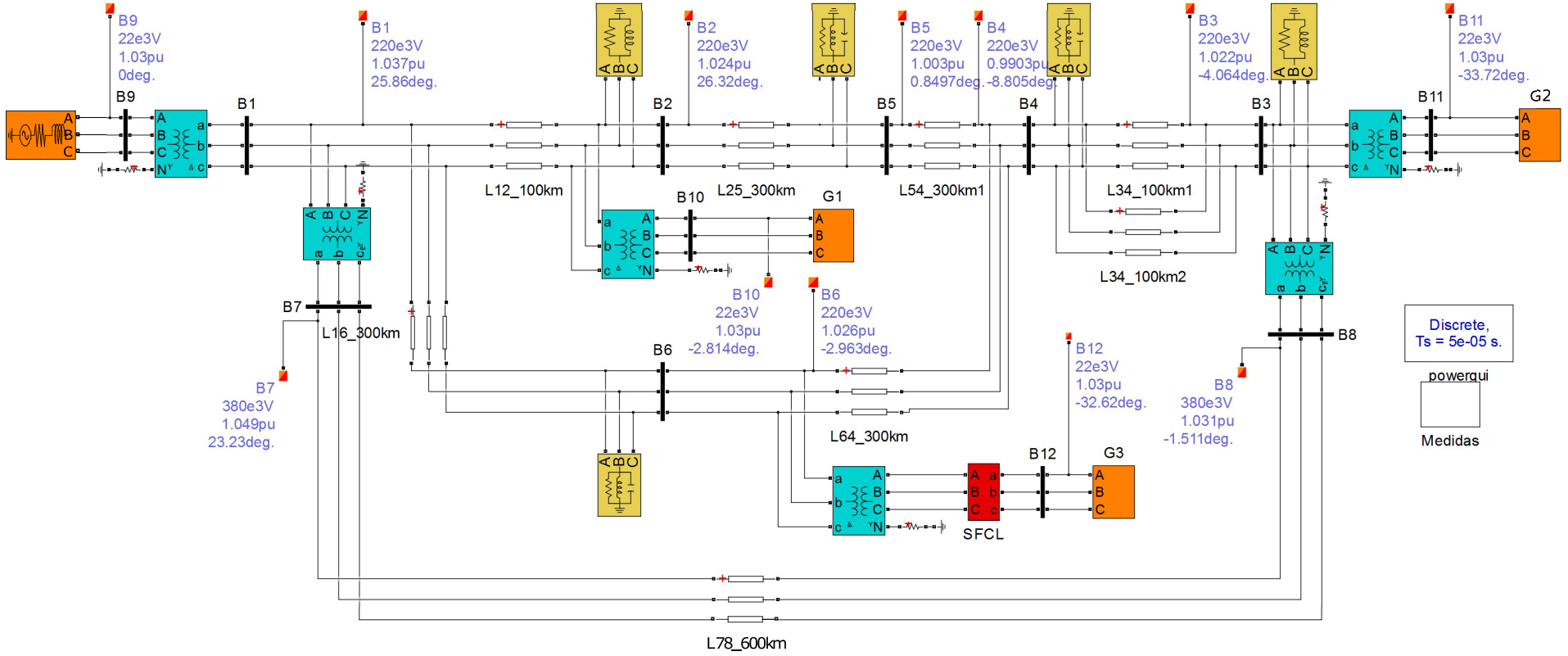


Figura B.1: Diagrama do sistema elétrico de potência simulado.