



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica



UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE LIMITADORES DE CORRENTE ELÉTRICA SUPERCONDUTORES
USANDO TRANSFORMADOR E FITA SUPERCONDUTORA DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA

Autor: Antonio Elias Junior

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Baldan

Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Energia Elétrica.**

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (presidente) — DSCE/FEEC/UNICAMP

Profa. Dra. Cristina Bormio Nunes — EEL/USP

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Júnior — DSEE/FEEC/UNICAMP

Campinas, 03 de Março de 2011 – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

EL42c Elias Junior, Antonio
 Uma contribuição ao estudo de limitadores de
 corrente elétrica supercondutores usando transformador e
 fita supercondutora de alta temperatura crítica / Antonio
 Elias Junior. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

 Orientador: Ernesto Ruppert Filho.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
 Computação.

 1. Supercondutores de alta temperatura. 2. Simulação
 por computador. 3. Transformadores elétricos. I.
 Ruppert Filho, Ernesto. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
 Computação. III. Título.

Título em Inglês: A contribution to the study of superconductive fault current
 limiters using transformer and high critical temperature
 superconductive tape

Palavras-chave em Inglês: High temperature superconductors, Computer
 simulation, Electrical transformers

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Cristina Bormio Nunes, Carlos Alberto de Castro Júnior

Data da defesa: 03/03/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Antonio Elias Junior

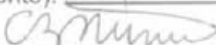
Data da Defesa: 3 de março de 2011

Título da Tese: "Uma contribuição ao estudo de limitadores de corrente elétrica supercondutores usando transformador e fita supercondutora de alta temperatura crítica"

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (Presidente):



Profa. Dra. Cristina Bormio Nunes:



Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Júnior:



Dedico esse trabalho a meu pai Antonio Elias
Neto, minha mãe Ana Maria Dib Jorge Elias e as
minhas irmãs Soraya Jorge Elias e Samyra Jorge
Elias

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Antonio Elias Neto e Ana Maria Dib Jorge Elias e minhas irmãs Soraya Jorge Elias e Samyra Jorge Elias pelo amor incondicional dado a mim durante toda a vida, amor este que me alimenta quando já não posso estar na presença deles.

Agradeço ao meu orientador Ernesto Ruppert Filho e ao meu co-orientador Carlos Alberto Baldan por tudo o que fizeram por mim. Jamais irei me esquecer as palavras que compuseram a nossa relação.

Agradeço a todos os meus familiares, meus primos, meus tios e minhas tias, muito da minha história é também a história deles.

Agradeço aos meus amigos cujos nomes já não precisam serem escritos, pois como disse Vinícius de Moraes, “amigo não se faz, se reconhece”. A vida seria muito chata se não houvesse os amigos, pois são com eles e através deles que reconhecemos o nosso passado.

Agradeço aos meus colegas pelo respeito e pelo bom caráter que tiveram durante nossa vida acadêmica.

Agradeço a todos os docentes que me ensinaram instrumentos que servem, alguns para a ciência outros para a vida. Valorizo a educação e reconheço sua fonte.

A todos, meu respeito.

Resumo

Esta dissertação apresenta um estudo sobre limitadores de corrente elétrica supercondutores que funcionam com um transformador e com material supercondutor de alta temperatura crítica (HTS) em forma de fita. Neste caso utilizou-se a fita supercondutora do composto de YBCO. Neste trabalho é apresentado um resumo da evolução da supercondutividade desde a origem dos materiais supercondutores de baixa temperatura crítica (LTS) até os de alta temperatura crítica (HTS), as fitas supercondutoras de segunda geração (2G), seus processos de produção, suas composições e suas propriedades. Também faz parte desta dissertação um estudo sobre diferentes equipamentos utilizados para limitar a corrente elétrica em sistemas de energia elétrica aprofundando o estudo sobre limitadores de corrente elétrica supercondutores que funcionam usando transformador. Por fim, simulou-se a operação do limitador de corrente elétrica em questão acoplado ao sistema elétrico usando o pacote MATLAB/Simulink/SimPowerSystems. A simulação foi baseada em características reais dos elementos do sistema, como transformador de distribuição e no comportamento resistivo do material supercondutor de alta temperatura crítica de YBCO.

Palavras chaves – supercondutor de alta temperatura, limitador de corrente, transformador de baixa reatância, HTS, simulação do limitador de corrente.

Abstract

This work presents a study about transformer type superconductive fault current limiter using high critical temperature (HTS) tape. In this case the YBCO superconductive tape was used. The history of superconductivity since the beginning of low temperature (LTS) superconductive materials until the high critical temperature superconductive second generation (2G) tapes is presented, also their production process and their compositions are studied. It is part of this work a study about different equipments used to limit the electrical current in electrical power systems going deeply in the transformer type superconductive fault current limiter. Finally, the operation of superconductive electrical current limiter coupled to the electrical power system using MATLAB/Simulink/SimPowerSystems was simulated. The simulation was based on the real characteristics of power system elements, as distribution transformer and on the resistive behavior of high critical temperature superconductive material of YBCO type.

Keywords: superconductor, superconductive fault current limiter, transformer, HTS, simulation

Sumário

Lista de figuras.....	xv
Lista de Tabelas.....	xix
Introdução	1
Supercondutividade.....	5
1.1. Introdução	5
1.2. A evolução da supercondutividade	6
1.3 Materiais supercondutores do tipo I	9
1.4 Materiais supercondutores do tipo II.....	11
1.5 Teorias sobre a supercondutividade	17
1.5.1 Efeito Meissner-Ochsenfeld	17
1.5.2 Teoria de Ginzburg-Landau.....	19
1.5.3 Teoria BCS e Pares de Cooper	20
Materiais supercondutores.....	21
2.1 Introdução	21
2.2 Fitas supercondutoras de alta temperatura crítica (HTS)	22
2.2.1 Materiais supercondutores de primeira geração (1G)-BSCCO	22
2.2.2 Materiais supercondutores de segunda geração (2G) - YBCO.....	25
Limitadores de corrente elétrica.....	32
3.1 Introdução	32
3.2 Tipos de limitadores de corrente elétrica.....	34
3.2.1 Reator série como limitador de corrente elétrica	34
3.2.2 Limitador de corrente elétrica pirotécnico.....	36
3.2.3 Limitadores de corrente elétrica supercondutores	39
3.2.4 Limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo	41
3.2.5 Limitador de corrente elétrica supercondutor indutivo	45

3.2.6	Limitador de corrente elétrica supercondutor do tipo transformador	47
	Plataforma de simulação e experimento modelado matematicamente.....	66
4.1	Introdução	66
4.2	O aplicativo simpowersystems	68
4.3	Modelagem matemática dinâmica para estudo do comportamento do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo em transição do estado supercondutor para o estado normal	68
4.3.1	Estudo de caso – Limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo conectado em série com o circuito alimentador	69
	Estudo de caso em sistema elétrico de distribuição usando limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo com transformador.....	77
5.1	Introdução	77
5.2	Sistema elétrico de distribuição.....	78
	Conclusões e propostas para novos trabalhos	88
	Referências bibliográficas.....	90

Lista de figuras

Figura 1 - Superfície que delimita a região supercondutora com os eixos campo magnético (H), temperatura (T) e densidade de corrente elétrica (J). -----	9
Figura 2 - Relação entre o campo magnético crítico H_c e a temperatura em materiais supercondutores do tipo I.-----	11
Figura 3 - Relação entre o campo magnético crítico H_{c1} e H_{c2} e a temperatura em materiais supercondutores do Tipo II, mostrando a região de estado misto.-----	12
Figura 4 - À esquerda o material ainda não se encontra no estado diamagnético perfeito permitindo que haja campo magnético em seu interior. Na Figura da direita o material se encontra no estado diamagnético perfeito e por isso repele as linhas de campo magnético do seu interior.-----	18
Figura 5 - Desenhos esquemáticos: a Figura da esquerda mostra o método PIT, a da direita é uma vista topográfica do tubo de Ag/Mg [12-Adaptado].-----	23
Figura 6 - Estrutura das fitas de BSCCO, a) microestrutura mostrando os filamentos em matriz de prata com revestimento (AMSC), b) microestrutura mostrando os filamentos do material supercondutor em matriz de prata sem revestimento (EAS) [13]-----	24
Figura 7 - Estrutura esquemática da fita BSCCO -----	24
Figura 8 - Método de preparação do substrato pelo método MOD e deposição das camadas buffer por LASER pulsado [15-Adaptado]. -----	26
Figura 9 - Composição das camadas da fita de HTS da AMSC 2G, chamada de supercondutores 344. -----	27
Figura 10 - Secção transversal da fita supercondutora produzida pela AMSC 2G, denominada fita supercondutora 344.-----	28
Figura 11 - Estágios do processo RABiTS/MOD [19].-----	29
Figura 12 - Estrutura da fita YBCO SuperPower [20-Adaptado].-----	29
Figura 13 - Curvas $I \times V$ para fitas de Bi-2223 e de YBCO-AMSuper (4mm) e Superpower (12mm).-----	31
Figura 14 - O retângulo indicado mostra a localização do reatores em série conectados a alimentadores.[25] -----	35

Figura 15 - Desenho ilustrativo de um limitador pirotécnico e seus componentes [28] -----	37
Figura 16 – Limitador de corrente elétrica pirotécnico [29] -----	38
Figura 17 - Limitação da corrente elétrica de curto-circuito pelo limitador pirotécnico [28]. ----	38
Figura 18 - Comportamento da corrente elétrica de falta em um circuito protegido por um LCES[31].-----	40
Figura 19 - Conceitos de limitadores em série e shunt.-----	43
Figura 20 - Sequência de fotos mostrando o aquecimento do material supercondutor. Notar a presença de bolhas de ar nas duas últimas fitas [30].-----	44
Figura 21 - Comportamento da razão de resistências elétricas (R/R_{295K}) durante a transição do material do estado supercondutor para o condutor, onde R é a resistência elétrica que surge no material durante a transição [32-adaptado].-----	45
Figura 22 - Modelo numérico de um SFCL indutivo [33-adaptado].-----	46
Figura 23 - Comportamento da corrente elétrica (linha pontilhada) e da tensão (linha contínua) durante a atuação do LCI. O gráfico da direita mostra o comportamento da corrente de falta sem o limitador de corrente [34-adaptado].-----	47
Figura 24 - SCFCL conectado a um circuito.-----	48
Figura 25 - Circuito elétrico equivalente convencional de um transformador monofásico. -----	51
Figura 26 - Circuito elétrico equivalente reduzido de um transformador monofásico -----	53
Figura 27 - Circuito elétrico equivalente convencional de um transformador monofásico em regime permanente-----	54
Figura 28 - Circuito elétrico equivalente reduzido de um transformador monofásico em regime permanente-----	54
Figura 29 - Circuito equivalente de um limitador de corrente elétrica híbrido do tipo transformador com três secundários [35-adaptado]. -----	55
Figura 30 - (a) circuito equivalente de um SCFCL e (b) suas curvas de falta [38- adaptado]. ----	57
Figura 31 - Circuito equivalente de um transformador monofásico[40].-----	58
Figura 32 - Característica do núcleo, corrente elétrica em função do fluxo magnético,-----	59
Figura 33 - Módulo limitador de corrente supercondutor constituído por 16 elementos associados em série (ver referência 13).-----	61
Figura 34 - Efeito de altas correntes elétricas sobre uma fita de YBCO (a) sem proteção shunt (b) com proteção shunt[42-Adaptado] -----	62
Figura 35 - Comportamento da corrente elétrica AC (800 A - pico) em um circuito com resistor shunt e fita YBCO [42-adaptado].-----	63

Figura 36 - Limitação de corrente de falta de 7,4 kA-----	64
Figura 37 - Resistência inserida no circuito pelo módulo supercondutor após transição para estado normal [43]-----	65
Figura 38 - Circuito de ensaio do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo para faltas de 1 a 10kA com carga resistiva [43]. -----	70
Figura 39 - Circuito formado por uma fonte de 10 V, um circuito equivalente do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo e uma carga inserida para ajustar a corrente elétrica de controle.-----	72
Figura 40 - Simulação do circuito do resistor equivalente. A seta preta indica o instante em que o material supercondutor começa a transitar do estado supercondutor (resistência elétrica aproximadamente 0) para o estado normal. -----	73
Figura 41 - Circuito 2 formado por uma fonte de 10 V, um circuito equivalente ao LCSR utilizando chaves ideais do Simulink -----	74
Figura 42 - Simulação do circuito do resistor equivalente modelo 2. A seta preta indica o instante em que o material supercondutor começa a transitar do estado supercondutor (resistência elétrica aproximadamente 0) para o estado normal. -----	74
Figura 43 - Representação da resistência dinâmica associada à transição do material supercondutor do estado supercondutor para o estado normal num circuito com chaveamento ideal. -----	75
Figura 44 - Circuito com o elemento transformador e chaveamento ideal para todas as resistências que representam a transição do supercondutor. -----	75
Figura 45 - Alimentador de um sistema de energia elétrica protegida pelo transformador limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo com transformador e carga do tipo indutiva (R- L série). -----	78
Figura 46 - Circuito equivalente do transformador do limitador de corrente elétrica ligado à uma fonte de tensão que alimenta uma carga indutiva (Rc, Lc série).-----	80
Figura 47 - Circuito equivalente simplificado por fase, em pu, de um alimentador de alta tensão -----	81
Figura 48 - Tensão terminal da fonte de tensão e tensão na carga. -----	82
Figura 49 - Diferença entre a tensão de entrada e a tensão na carga. -----	83
Figura 50 - Tensão de alimentação do circuito e corrente elétrica no circuito. -----	83
Figura 51 - Tensão nos terminais do transformador -----	84
Figura 52 - Corrente de curto-circuito sem o material supercondutor e corrente de curto-circuito com o material supercondutor com resistência elétrica variável do limitador de corrente -----	85

Figura 53- Tensão sobre o transformador limitador de corrente em operação nominal, curto-circuito, limitação do curto-circuito e nominal no final. -----86

Lista de Tabelas

Tabela I - Lista de elementos supercondutores do tipo I com suas respectivas temperaturas críticas e campos críticos	10
Tabela II - Materiais supercondutores Tipo I com suas temperaturas críticas (T_c) [6-Adaptado].	15
Tabela III - Algumas propriedades das fitas: Y-123, Bi-2212, Bi-2223 a 77 K [7].	16
Tabela IV - Características das fitas BSCCO de dois diferentes fabricantes.	17
Tabela V - Características das fitas HTS de YBCO.	30

Introdução

Quando um disjuntor atua num sistema elétrico qualquer, ele abre o circuito elétrico impedindo a corrente elétrica de circular. Um disjuntor, por mais rápido que seja, não abre seus contatos elétricos antes de alguns ciclos de corrente elétrica ou de falta. A maioria dos que estão no mercado atuam após cinco ciclos (em 60Hz o tempo típico está entre 50 a 100ms) e todos tem uma dada capacidade de interrupção de corrente, chamada de limite de ruptura do disjuntor.

Se a corrente elétrica no circuito atingir esse valor muito rapidamente, caso de correntes de faltas e de curto-circuitos, o disjuntor propriamente dito funciona como um curto-circuito, deixando a corrente elétrica circular, danificando o sistema elétrico que lhe vem à frente.

Toda vez que um disjuntor atua, interrompendo a corrente elétrica num circuito elétrico, ele precisa ser rearmado manualmente ou através de um dispositivo automático denominado religador.

Quando o rearme é manual o circuito fica desligado até que alguém execute esta ação. Quando há um religador este realiza tentativas de religar o disjuntor até que a corrente volte a valores permissíveis, conforme os intervalos de tempo pré-ajustados pelo projeto.

Trata-se de operações que, muitas vezes, tiram o sistema elétrico dos padrões de qualidade que ele deve apresentar perante a agência reguladora de serviços de eletricidade, no caso de sistemas de energia elétrica, ou para os proprietários da instalação elétrica que os disjuntores protegem.

Em casos de curto-circuitos provocados por galhos de árvores que tocam os condutores elétricos não isolados, muitas vezes o disjuntor se abre. Depois de um tempo muito curto os galhos se separam retirando o curto-circuito, porém o disjuntor ainda está aberto, o que exige seu religamento após a interrupção.

Outras vezes, devido a ampliações do sistema elétrico protegido por dado disjuntor a capacidade de curto-circuito dele é ultrapassada de modo que se ocorrer um curto-circuito o

disjuntor entra em ruptura danificando-se e danificando o sistema elétrico. Nesses casos é necessário dividir o alimentador em dois duplicando toda a instalação elétrica e aumentando o custo da mesma.

Os limitadores de corrente elétrica são dispositivos que grampeiam a corrente elétrica num dado valor quando uma falta ocorre, à custa de absorverem a energia liberada, permitindo que o disjuntor possa atuar de forma segura. Se a falta for extinta no seu tempo de atuação não haverá interrupção no circuito elétrico.

Em alimentadores onde ocorre ampliação de carga, que os tornam sobrecarregados, os limitadores de corrente podem atuar limitando a corrente elétrica de falta permitindo que o circuito seja preservado até que o tempo de atuação do disjuntor decorra e ele atue.

Existem diversas possibilidades de limitação de corrente elétrica amplamente discutidas na literatura. Dentre todas a que parece mais adequada e completa é a limitação através de limitadores de corrente elétrica resistivo utilizando fitas supercondutoras produzidas sobre substratos de alta resistividade.

Os materiais supercondutores transitam do estado supercondutor para o estado condutor normal quase que instantaneamente (entre 1 e 3 ms) introduzindo uma resistência elétrica no circuito. Essa resistência elétrica, desde que o limitador seja bem projetado, entra instantaneamente no circuito, limita a corrente elétrica a um valor desejado por um tempo de até 100ms, tempo este que permite a atuação do disjuntor de proteção, limitando a corrente de falta sem que haja qualquer dano para o sistema elétrico sem a necessidade de intervenção manual, nem tampouco de religadores.

As pesquisas sobre materiais supercondutores e sobre limitadores de corrente elétrica supercondutores têm aumentado bastante nos últimos anos. Procura-se cada vez mais produzir materiais supercondutores adequados e estruturas que permitam a transição do material supercondutor para o estado de condutor normal de modo que eles possam atuar de forma eficiente e segura nos limitadores de corrente elétrica supercondutores de média e alta tensão em desenvolvimento.

Dentre os possíveis tipos de limitadores de corrente elétrica supercondutores resistivos está o limitador que utiliza um transformador acoplador para ser ligado em série com o disjuntor e que tem o seu enrolamento secundário curto circuitado por um módulo de material supercondutor.

O objetivo deste trabalho foi o de estudar os requisitos preliminares para a construção de um transformador acoplador que sirva para ser integrante de um limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo.

A finalidade do transformador é a de refletir no seu enrolamento primário uma resistência elétrica colocada no enrolamento secundário, aumentando o seu valor e contribuindo melhor para a limitação de corrente elétrica no circuito onde o limitador for colocado, com a redução do volume de material supercondutor necessário.

No capítulo 1 apresenta-se um resumo da evolução da supercondutividade com os principais compostos supercondutores desenvolvidos.

No capítulo 2 apresenta-se uma descrição sobre os tipos de materiais supercondutores focando as fitas cerâmicas supercondutoras, em particular as fitas de YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) de segunda geração utilizadas nas pesquisas mais recentes em diversos laboratórios no exterior e pela equipe que trabalha neste projeto na FEEC/UNICAMP e na EEL/USP.

No capítulo 3 discute-se os diversos tipos construtivos de limitadores de corrente não supercondutores utilizados no mundo e os tipos de limitadores de corrente supercondutores em estudo no exterior e no país, incluindo os resistivos que utilizam fitas supercondutoras de segunda geração (YBCO).

No capítulo 4 mostra-se como é possível simular, usando aplicativos simuladores de circuitos elétricos voltados para a área de sistemas de energia elétrica como o SimPowerSystems que usa o MatLab como suporte, a atuação de um limitador de corrente supercondutor resistivo. Um modelo resistivo é elaborado e uma discussão sobre transformadores e circuitos equivalentes para uso em simulações é realizada.

No capítulo 5 discute-se o limitador de corrente supercondutor resistivo acoplado ao circuito do alimentador de uma corrente elétrica através de um transformador. O seu funcionamento é estudado, através de simulações e análises de curvas de corrente elétrica e de quedas de tensão, juntamente com as dificuldades que devem ser superadas para o projeto e funcionamento deste tipo de limitador de corrente elétrica.

No capítulo 6 apresenta-se um resumo geral do que se concluiu no decurso deste trabalho e sugestões para novos trabalhos.

Capítulo 1

Supercondutividade

1.1. Introdução

A supercondutividade foi descoberta em 1911 e tornou-se um foco de pesquisas até a década de setenta quando já se pensava que nada de novo poderia ser descoberto nessa área do conhecimento. Porém a descoberta dos materiais supercondutores de alta temperatura crítica na segunda metade dos anos oitenta possibilitou a retomada das pesquisas na área de sistemas de energia elétrica tornando-a novamente um dos principais focos de pesquisas atuais [1].

Laboratórios espalhados por todo o mundo desenvolvem suas pesquisas com o intuito de descobrirem materiais com temperaturas críticas cada vez mais elevadas, aplicações econômicas e teorias que justifiquem as propriedades encontradas para supercondutores de alta temperatura críticas.

Diversas aplicações de materiais supercondutores (NbTi e Nb₃Sn) estão consolidadas com aplicações em larga escala como nos equipamentos de ressonância magnética nuclear e espectroscopia associada ao campo magnético interno para estudo de proteínas. Outra grande aplicação está associada a geração de campo magnético intenso (30 T) para caracterização de materiais e aplicação em aceleradores de partículas utilizando hélio líquido como fluido criogênico

Apesar do excelente desempenho dos limitadores de corrente supercondutores utilizando fios supercondutores de NbTi/CuNi [2], sua viabilidade econômica não foi alcançada.

A descoberta de materiais supercondutores de alta temperatura crítica abriu perspectivas para viabilizar economicamente a aplicação da supercondutividade em cabos para linhas de

transmissão de energia elétrica, limitadores de corrente, motores, geradores e transformadores que ainda demandam desenvolvimento sobretudo para redução das perdas em corrente alternada.

1.2. A evolução da supercondutividade

As pesquisas sobre a resistência elétrica dos materiais supercondutores de baixas temperaturas críticas foi iniciada por James Dewar. Zygmunt Florenty Wroblewski foi responsável por uma série de pesquisas nessa área, focando não só a resistência elétrica como também outras propriedades dos materiais que pudessem sofrer alterações quando em baixas temperaturas. Por volta de 1864, Karol Olszewski e Wroblewski previram o fenômeno elétrico da queda de resistência elétrica em baixas temperaturas [3].

Dewar e John Ambrose Fleming previram que na temperatura de zero absoluto metais puros se tornariam condutores eletromagnéticos perfeitos, sendo que alguns anos depois Dewar mudou sua opinião ao dizer que o desaparecimento da resistência elétrica não seria total, pois sempre haveria uma resistência elétrica residual. Walther Hermann Nernst formalizou e comprovou entre os anos 1906 e 1912 a terceira lei da termodinâmica. Esta lei estabelece que quando a temperatura de um sistema se aproxima do zero absoluto, todos os processos cessam e a entropia do sistema aproxima-se do valor mínimo.

Em 10 de Julho de 1908 Heike Kamerlingh Onnes da Universidade de Leiden em Leiden, Holanda, conseguiu liquefazer o hélio pela primeira vez. Após essa realização Onnes e Clay começaram a investigar os antigos experimentos de Dewar sobre a redução da resistência elétrica de alguns materiais em baixas temperaturas. Onnes e sua equipe começaram as investigações com platina e ouro, passando mais tarde a investigar o mercúrio, pois era o material mais refinado que eles possuíam na época.

Para a investigação das alterações da resistência elétrica do mercúrio em baixas temperaturas, Onnes utilizou seu próprio processo de criogenia e ao chegar à temperatura de 4,19 K ele observou que a resistência elétrica do material decaía abruptamente até desaparecer, pois o medidor que Onnes usou não indicava resistência elétrica alguma. No ano de 1911 ele

publicou os resultados de sua pesquisa em um artigo cujo título é “On the Sudden Rate at Which the Resistance of Mercury Disappears”.

Onnes descreveu em seu artigo que a resistência específica do mercúrio se tornou mil vezes menor quando no estado supercondutor. Mais tarde Onnes reverteu o processo e descobriu que na temperatura de 4,2 K a resistência elétrica do material tornava-se não nula novamente. Nos anos seguintes Onnes publicou mais artigos sobre o fenômeno. Inicialmente ele chamou esse fenômeno de “supracondutividade” (1913) e, somente mais tarde, adotou o termo supercondutividade. Por sua pesquisa ele foi laureado com o Premio Nobel de Física em 1913 [4].

O próximo passo para a compreensão do fenômeno da supercondutividade ocorreu em 1933 quando Meissner e Ochsenfeld descobriram que os supercondutores repelem o campo magnético. Esse fenômeno ficou conhecido como efeito Meissner e será tratado mais adiante. Em 1950 foi elaborada a teoria termodinâmica de Ginzburg-Landau sobre supercondutores, que se mostrou bastante eficaz na explicação de algumas propriedades macroscópicas dos supercondutores.

A primeira teoria microscópica completa da supercondutividade foi proposta em 1957 por Bardeen, Cooper e Schrieffer. Essa teoria ficou conhecida como Teoria BCS em homenagem aos seus criadores e será tratada em um subitem deste capítulo. Também vários efeitos foram importantes para que se pudesse descrever o fenômeno da supercondutividade tais como o Efeito Josephson e o Efeito de Flutuação.

Apesar da evolução das pesquisas em materiais supercondutores até 1986, a temperatura crítica (T_c) máxima de um material era de 23,2 K para o Nb_3Ge (1973). Existia um consenso geral de que essa temperatura pudesse ser aumentada em somente um ou dois graus com adição de algum metal exótico, mais conhecido como metais de terras raras, pertencentes ao grupo dos lantanídeos, com exceção do escândio e do ítrio. Nesse momento histórico a supercondutividade foi considerada um ramo da física onde poucas novas descobertas pudessem ser feitas, e se tornou, por consequência dessa mentalidade, uma área pouco procurada para pesquisa.

No entanto em abril de 1986 dois cientistas europeus fizeram uma descoberta revolucionária. Eles partiram do princípio que os valores de altas temperaturas críticas deveriam ocorrer para materiais cujo efeito Jahn-Teller (deformação da rede cristalina ocasionada ao redor de certos átomos) pudesse melhorar a interação elétron-fônon. Depois de anos de pesquisa o químico J. Georg Bednorz e o físico K. Alex Muller descobriram no IBM Research Laboratory em Zurich, Suíça um material com temperatura crítica de aproximadamente 30 K na classe dos óxidos de cobre. O material descoberto foi o La_2CuO_4 . Porém, como até aquele momento eles não haviam verificado o efeito Meissner nesse material, não foi possível confirmar sua supercondutividade.

No entanto em outubro desse mesmo ano eles constataram o efeito Meissner confirmando que a cerâmica La_2CuO_4 era um material supercondutor. Várias outras cerâmicas foram descobertas nos meses seguintes e, em janeiro de 1987, Paul Chu da Universidade de Houston mostrou que o $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) era um material supercondutor com uma temperatura crítica de 90 K.

Atualmente são conhecidos materiais e compostos supercondutores com temperatura crítica acima de 130 K. A grande vantagem de um material ou composto supercondutor possuir temperatura crítica acima de 77 K é o fato de ser possível seu resfriamento utilizando-se nitrogênio líquido que é extremamente abundante e de custo muito inferior ao hélio. Até hoje não há teoria alguma que explique o fenômeno da supercondutividade nos materiais cerâmicos na região mista.

A partir das propriedades fundamentais dos compostos supercondutores, obtidas das curvas de $(J_c \times H_c)$, $(H_c \times T_c)$ e $(J_c \times T_c)$, pode-se definir uma superfície crítica que delimita a região supercondutora. Na Figura 1 pode-se observar a região supercondutora delimitada pelos valores do campo magnético crítico (H_c), da temperatura crítica (T_c) e da densidade de corrente elétrica crítica (J_c).

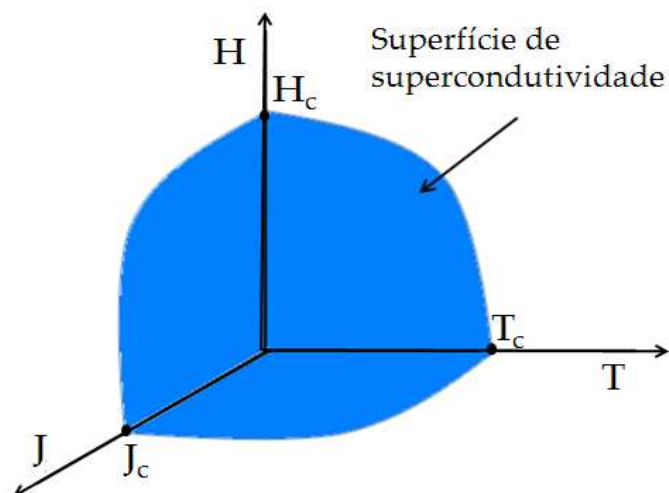


Figura 1 - Superfície que delimita a região supercondutora com os eixos campo magnético (H), temperatura (T) e densidade de corrente elétrica (J).

O campo magnético crítico (H_c) define o valor máximo de campo magnético ao qual o material pode estar submetido para exibir propriedades supercondutoras. A temperatura crítica (T_c) corresponde ao valor máximo da temperatura na qual o material apresenta propriedades supercondutoras. A densidade de corrente elétrica crítica (J_c) corresponde ao valor da corrente crítica dividida pela seção transversal da fita supercondutora. Para valores de corrente elétrica $I < I_c$ o material apresenta propriedades supercondutoras e para $I > I_c$ apresenta propriedade de condutor normal.

O campo magnético crítico (H_c) e a temperatura crítica (T_c) são características intrínsecas dos materiais supercondutores, enquanto que a densidade de corrente elétrica crítica (J_c) é uma característica extrínseca dos materiais supercondutores, pois pode depender do processo de fabricação.

1.3 Materiais supercondutores do tipo I

Os materiais supercondutores do tipo I não podem ser penetrados por linhas de fluxo magnético (Efeito Meissner-Ochsenfeld). O Efeito Meissner deixa de existir quando o campo magnético aplicado sobre o material atinge o valor crítico H_c , característico de cada material,

chamado de campo magnético crítico. Nos supercondutores do tipo I o estado de supercondutividade do material é abruptamente interrompido quando o valor de campo magnético H_c é atingido. Dessa maneira esse tipo de supercondutor possui apenas 1 (um) campo magnético crítico a partir do qual o material transita do estado supercondutor e se torna resistivo, ou seja, em condutor normal. Elementos puros como o alumínio e o chumbo são típicos supercondutores do tipo I. A origem de suas propriedades é explicada pela teoria de BCS. A Tabela I apresenta alguns elementos supercondutores do tipo I. Os materiais supercondutores do tipo I não possuem aplicação prática, sendo uma das principais razões seu baixo valor de campo magnético crítico [5].

Tabela I - Lista de elementos supercondutores do tipo I com suas respectivas temperaturas críticas e campos críticos

Material	Temperatura crítica (K)	Campo magnético crítico (mT)
W	0,015	0,115
Ir	0,1	1,6
Lu	0,1	35
Ru	0,5	6,9
Os	0,7	7
Mo	0,92	9,686
Zr	0,54	4,7
Cd	0,56	2,805
U	0,2	10
Ti	0,39	5,6
Zn	0,85	5,41
Ga	1,083	5,93
Al	1,2	10,49
Th	1,4	16
Re	1,4	20,1
Tl	2,39	17,65
In	3,408	28,15
Sn	3,722	30,55
Hg	4,153	41,1
Ta	4,47	82,9
V	5,38	140
La	6	9,8
Pb	7,19	80,34
Nb	9,46	206

Na Figura 2 pode-se ver o comportamento do campo magnético crítico (H_c) nos materiais supercondutores do tipo I.

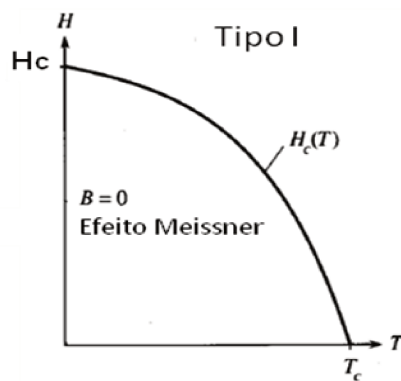


Figura 2 - Relação entre o campo magnético crítico H_c e a temperatura em materiais supercondutores do tipo I.

1.4 Materiais supercondutores do tipo II

Os materiais supercondutores podem ser divididos em dois tipos (tipo I e tipo II), conforme seja o comportamento do campo magnético crítico H_c . Dependendo da geometria da amostra é possível obter um estado intermediário descrito primeiramente por Lev Landau, no qual se encontra no material uma região mista onde existe a penetração de campo magnético.

Os materiais supercondutores do tipo II são caracterizados por apresentarem uma transição gradual do estado supercondutor para o estado normal, chamado de estado misto, devido ao aumento do campo magnético apresentando dois campos magnéticos críticos como mostrado na Figura 3. Os supercondutores do tipo II permanecem no estado supercondutor em temperaturas mais elevadas e em campos magnéticos mais intensos do que os supercondutores do tipo I.

Estes materiais apresentam um aumento gradativo da penetração de fluxo magnético em seu interior, iniciando no campo crítico inferior H_{c1} e como aumento da intensidade de campo alcançando um segundo campo crítico denominado campo crítico superior H_{c2} (supercondutores do Tipo II) ao invés de apresentar um desaparecimento abrupto do estado supercondutor numa intensidade de campo crítico H_c . Essa característica permite que o material no estado supercondutor possa transportar maior densidade de corrente sob elevados campos

magnéticos, o que impulsionou o surgimento de aplicações práticas para a supercondutividade, que incluem limitadores de corrente.

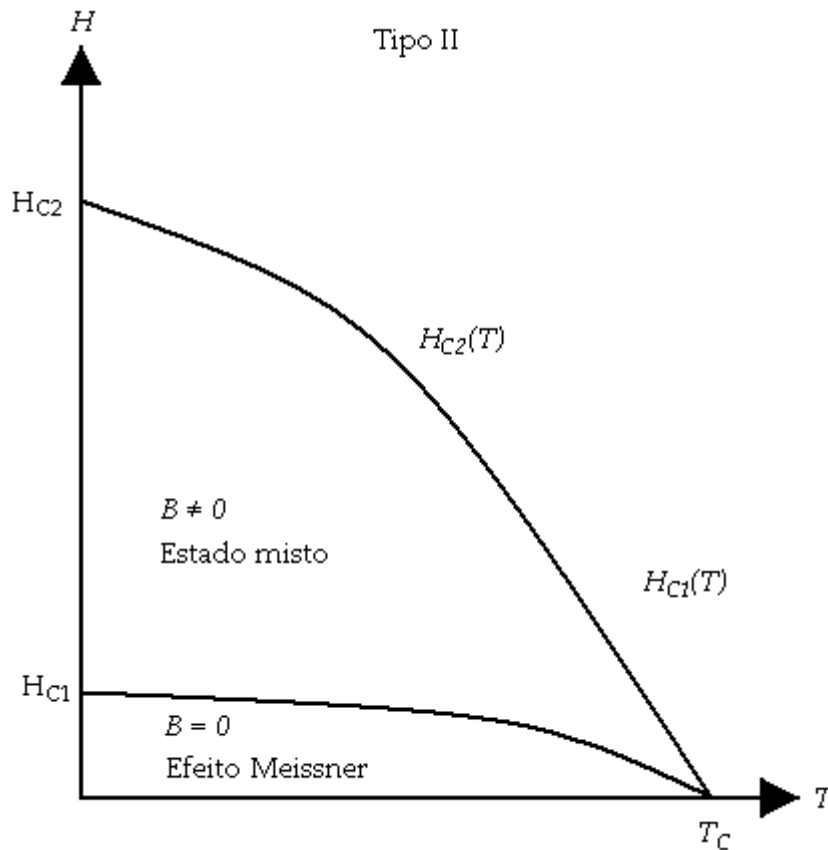


Figura 3 - Relação entre o campo magnético crítico H_{c1} e H_{c2} e a temperatura em materiais supercondutores do Tipo II, mostrando a região de estado misto.

Os compostos supercondutores tipo II são geralmente ligas metálicas ou compostos intermetálicos com estrutura na forma A_3B . Entre os supercondutores de baixa temperatura crítica merecem destaque a liga de nióbio-titânio (NbTi) e o composto de nióbio-estanho (Nb_3Sn), que pelas suas excelentes propriedades supercondutoras são produzidos em escala industrial desde 1970. Após a descoberta da supercondutividade de alta temperatura crítica, em 1986, os óxidos cerâmicos devido às suas propriedades supercondutoras foram classificados também como do tipo II.

Os fios supercondutores produzidos a partir da liga de NbTi, utilizando cobre eletrolítico como matriz, devido a suas excelentes propriedades mecânicas (ductilidade e resistência),

viabilizou rapidamente sua produção em escala industrial. Utilizando a capacidade industrial de conformação mecânica (extrusão e trefilação) da indústria de processamento cobre, sem grandes investimentos foi possível a produção de fios supercondutores com milhares de filamentos de NbTi (diâmetro de alguns micra), para garantir excelentes propriedades supercondutoras. Com temperatura crítica de 9,6K exige refrigeração com hélio líquido (4,2K) para unidades de grande porte ou refrigeradores para unidades compactas. Sendo seu campo magnético crítico de 15T , permite a construção de magnetos para gerar 9T(4,2K) ou 11T(2K), suas aplicações foram concentradas na geração de campos magnéticos intensos em grandes volumes, para diagnósticos e análise por imagem (RMN e IRM) na área médica, ou na construção de aceleradores de partículas, quando milhares de unidades são utilizadas na mesma instalação (solenóide, dipolos, quadrupolos, sextupolos, etc.)

O composto intermetálico de Nb₃Sn descoberto em 1954, por ser um material extremamente frágil exigiu o desenvolvimento de processo especial de fabricação, sendo disponível em escala industrial a partir de 1970. Os fios supercondutores de Nb₃Sn produzidos pelo processo do bronze, que utiliza a liga Cu13%Sn como matriz, consiste na inserção de barras de Nb em um cilindro de bronze, com centenas ou milhares de furos, sendo posteriormente o conjunto selado (soldagem sob vácuo) deformado por extrusão a quente. As barras obtidas são trefiladas até a dimensão do fio desejado, que depois passa pela etapa de isolamento elétrica com tecido de fibra de vidro. Após o enrolamento do magneto ou dispositivo, o conjunto é submetido ao tratamento térmico por 100h em temperatura de 700 °C, para possibilitar a difusão do Sn presente no bronze que reage com o Nb, formado então uma camada de Nb₃Sn que confere as propriedades supercondutoras ao fio. Por ser um composto muito frágil, o dispositivo com o fio reagido deve ser agora impregnado com resina epóxi, para que um compósito seja formado com o tecido de vidro do isolamento, conferindo ao conjunto propriedades mecânicas para suportar os esforços em baixas temperaturas.

Com temperatura crítica de 18,3K e campo magnético crítico de 24,5T os fios supercondutores de Nb₃Sn são utilizados na construção de dispositivos para gerar campos magnéticos intensos 19 T (4,2K) ou 23T (2K), utilizados em laboratórios para caracterização de

materiais e estudo de proteínas, espectroscopia por RMN e análise funcional por RMN. Na construção destes magnetos ($B > 15\text{T}$) geralmente as bobinas externas, que trabalham sob intensidade de campo magnético de até 7T , são produzidas com fio de NbTi e somente na região central são utilizados enrolamentos de Nb₃Sn ou ainda (NbTa)₃Sn, com densidade de corrente crítica $J_c > 10^4 \text{ A/cm}^2$.

Devido ao alto custo de produção US\$ 700/kA.m em 1980, porém com excelente desempenho durante décadas a produção de fios de Nb₃Sn continua sendo objeto de estudo e desenvolvimento, mesmo com a restrição de elevado custo operacional pois utiliza hélio líquido, ainda é largamente utilizado nos projetos de RMN, aceleradores de partícula e no reator de estudo de fusão nuclear. Resultados recentes de novos processos de produção apresentam perspectivas de redução de custos para US\$ 3/kA.m, visando sua utilização em protótipo para construção de armazenador de energia gerada por fontes renováveis (solar e fotovoltaica), em regiões remotas e longe dos centros consumidores.

Os supercondutores de alta temperatura (HTS) de primeira geração, desenvolvidos comercialmente baseados no composto de Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ (Bi2223 e Bi2212), são produzidos a partir de tubos de prata, contendo os elementos químicos em proporção estequiométrica, que após sua deformação mecânica por trefilação para obtenção de fios e fitas. Na etapa seguinte estas fitas passam por tratamento térmico (700°C) em atmosfera oxidante, para promover a reação e formação do composto supercondutor. Devido ao uso massivo de prata (60%) seu custo de produção é muito elevado, restringindo sua perspectiva de utilização para equipamentos médicos e magnetos destinados a geração de altos campos magnéticos em corrente contínua ($B > 20\text{T}$).

As fitas HTS de segunda geração baseada no composto de YBa₂Cu₃O_{7- δ} (Y123), com processo produtivo sofisticado de deposição química dos elementos (CVD ou PVD), sobre substrato de Ni5%W ou aço inoxidável, passando também por tratamento térmico (700°C) em atmosfera oxidante, para promover a reação e formação do composto supercondutor, começam a ser disponibilizado em longos comprimentos, ao custo de US\$ 300~500/kA.m para aplicação

em dispositivos de potência, com a perspectiva de preço reduzido para utilização em larga escala.

Na Tabela II estão listados os principais compostos supercondutores do tipo II, com respectivos valores de temperatura crítica, campo magnético crítico e ano de sua descoberta. A produção em escala industrial foi alcançada para os supercondutores de baixa temperatura crítica (LTS) de NbTi e Nb₃Sn, sendo ainda objeto de desenvolvimento os compostos de alta temperatura crítica (HTS) de BSCCO, YBCO e MgB₂.

Tabela II - Materiais supercondutores Tipo I com suas temperaturas críticas (T_c) [6-Adaptado].

Material	T_c(K)	H_{c2} (T)	Ano
NbN _{0,96}	15,7	1,5	1950
Nb ₃ Sn	18	24,5	1954
NbTi	10	15	1962
Nb ₃ Al	18,7	32,4	---
Nb ₃ (Al _{0,75} Ge _{0,25})	20,7	44	1966
Nb ₃ Ga	20,3	30	1971
Nb ₃ Ge	23,2	38	1973
Ba _x La _{5-x} Cu ₅ O _y	30-35	-	1986
(La _{0,9} Ba _{0,1}) ₂ CuO _{4-δ} (1GPa)	52	-	1986
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	95	140±30	1987
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	-	1988
Ti ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	-	1988
Ti ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (7 Gpa)	131	-	1993
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{δ+5}	133	-	1993
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{δ+5} (25 Gpa)	155	-	1993
Hg _{0,8} Pb _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	133	-	1994
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{δ+5} (30 Gpa)	164	-	1994
Hg _{0,5} Ti _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8,33} (30 Gpa)	138	-	1995
MgB ₂	39	-	2001

Na Tabela II observa-se que, na pressão atmosférica, o composto Hg_{0,8}Pb_{0,2}Ba₂Ca₂Cu₃O_x apresenta o maior valor de temperatura crítica (133 K). No entanto os compostos mais comumente utilizados e já produzidos em escala industrial são: YBa₂Cu₃O_{7-Δ} (Y-123),

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212) e $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223). Esses compostos com Bi, Sr, Ca, Cu e O são chamados de compostos BSCCO. Os materiais supercondutores do tipo II por apresentarem campos magnéticos críticos superiores aos dos materiais supercondutores do tipo I, podem suportar maiores valores de corrente sem transitarem de estado. Na Tabela III são apresentadas algumas propriedades das fitas HTS de Bi2223 e Y123 utilizadas nos protótipos desenvolvidos de limitadores supercondutores [7].

Tabela III - Algumas propriedades das fitas: Y-123, Bi-2212, Bi-2223 a 77 K [7].

Propriedade [unidade]	Y-123	Bi-2212	Bi-2223
Temperatura crítica T_c [K]	92	85	110
Densidade de campo magnético crítico $\mu_0 H_{c2}$ [T]	~56	~35	>20
Densidade de campo magnético irreversível $\mu_0 H_{irrev}$ [T]	>10	~0,005	~0,2
Densidade de corrente crítica J_{co} [A/mm ²] em campo próprio	40000	1000	10000
Densidade de corrente crítica J_c [A/mm ²] a 0,1 T	20000	0	1000

Um parâmetro importante de caracterização elétrica das fitas supercondutoras é o expoente n ou índice n . Walter C. R. do Brookhaven National Laboratory (NY-USA) foi o primeiro a propor um modelo matemático empírico para o índice n . Sendo o mais usado e representado por.

$$E \propto I^n \text{ ou } E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (4)$$

Em (4) E_c é o valor do campo elétrico (1V/cm ou 0,1 V/cm) para a corrente elétrica crítica e I_c é a corrente elétrica crítica do material supercondutor [8].

O expoente n , permite analisar a rapidez da transição do supercondutor para o estado de condutor normal. Para fitas HTS de BSCCO estes valores variam em 10-20. As principais características das fitas de Bi-2223 estão mostradas na Tabela V.

Tabela IV - Características das fitas BSCCO de dois diferentes fabricantes.

	<i>American Superconductors</i>	<i>European Superconductors</i>
Dimensões	4,1 mm x 0,21mm	4,0 mm x 0,22 mm
Matriz	Ag-AgMg	AgMg
Número de Filamentos	65	121
Reforço	Aço Inoxidável	Sem Reforço
Fração Supercondutora	38% - 25%	30%
Expoente Índice n	16,4	17
Corrente crítica	116 A	72 A
Densidade de Corrente elétrica Crítica (77 K)	134,7 A/mm ²	81,8 A/mm ²

1.5 Teorias sobre a supercondutividade

Diversas teorias foram elaboradas para explicar os fenômenos da supercondutividade como a expulsão do campo magnético do interior do material, a resistência elétrica nula, a alteração da rede cristalina dos materiais. O relacionamento dessas várias teorias foi determinante para a elaboração do primeiro modelo explicativo do fenômeno da supercondutividade que foi a teoria BSC, resumida a seguir.

1.5.1 Efeito Meissner-Ochsenfeld

Em 1933 Meissner e Ochsenfeld mediram a distribuição de fluxo magnético externa de vários materiais supercondutores que se encontravam em temperaturas abaixo de suas temperaturas críticas na presença de um campo magnético. Eles perceberam que abaixo de suas temperaturas críticas esses materiais se transformavam em diamagnéticos perfeitos, cancelando todo o fluxo magnético em seus interiores como mostrado na Figura 4 abaixo.

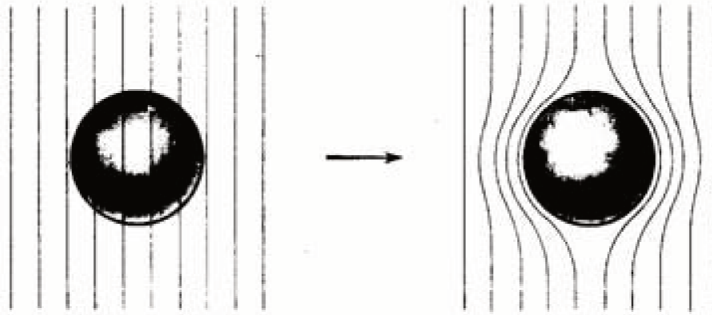


Figura 4 - À esquerda o material ainda não se encontra no estado diamagnético perfeito permitindo que haja campo magnético em seu interior. Na Figura da direita o material se encontra no estado diamagnético perfeito e por isso repele as linhas de campo magnético do seu interior.

Essa experiência foi a primeira a demonstrar que os materiais supercondutores são algo mais que materiais condutores perfeitos; eles possuem uma propriedade específica que os materiais com baixa resistência elétrica não possuem, que é o fato de um material no estado supercondutor nunca permitir que um fluxo magnético de densidade de fluxo magnético (B) penetre em seu interior. Pode-se dizer que no interior desses materiais tem-se:

$$\vec{B} = \mu (\vec{H} \times \vec{M}) = 0 \rightarrow \vec{H} = -\vec{M} \quad (2)$$

Na equação (2) μ é a permeabilidade magnética do meio, H é o campo magnético e M é a magnetização.

Existe diferença entre um material diamagnético perfeito e um material supercondutor. Em um condutor perfeito, quando exposto a um campo magnético fraco, surge em sua superfície uma pequena corrente elétrica que ao circular é capaz de gerar um campo magnético suficiente para se cancelar com o campo externo resultando um campo magnético nulo no interior desse material. Já nos materiais supercondutores o campo magnético não é cancelado, e sim repellido de seu interior independente da intensidade com que for aplicado.

1.5.2 Teoria de Ginzburg-Landau

A teoria de Ginzburg-Landau (GL) foi considerada um triunfo no campo da física devido ao fato da função de onda Ψ ser complexa $|\Psi|^2$ representa a densidade local dos elétrons no estado supercondutor, $n_s(r)$ representa a densidade dos elétrons.

A teoria foi desenvolvida por meio da utilização do método variacional para uma expansão da densidade de energia livre em potência de $|\Psi|^2$ e $|\Delta\Psi|^2$, gerando assim um par de equações diferenciais acopladas para $\Psi(r)$ e para o vetor potencial $A(r)$. O resultado foi a generalização da teoria de London para uma situação ideal onde n_s (densidade dos elétrons) varia no espaço e também para uma situação de resposta não linear para campos capazes de mudar o n_s . Contudo essa teoria foi rejeitada, pois apesar de descrever os estados intermediários, não era capaz de descrever sistemas não homogêneos.

Essa situação mudou em 1959 quando Gor'kov mostrou que a teoria GL provinha da teoria microscópica e se devidamente reformulada para duas condições limite e descrita em termos das funções de Green, poderia ser utilizada em um sistema não homogêneo. As condições para validade da teoria GL foi restringir a temperatura em valores próximos a temperatura crítica do material e garantir uma não variação rápida de Ψ e A .

A grande contribuição dessa teoria está em seu tratamento macroscópico do comportamento dos supercondutores baseado na energia livre do sistema. Com isso torna-se bastante confiável a previsão do campo crítico e da estrutura espacial da função $\Psi(r)$ em um estado não uniforme. Contribui também no entendimento do comportamento da corrente crítica, como consequência das propriedades quânticas, em escala macroscópica.

O postulado básico da teoria de GL é que se Ψ é pequeno e varia lentamente no espaço, a densidade de energia livre f pode ser expandida na seguinte série:

$$f = f_{n0} + \alpha |\Psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\Psi|^4 + \frac{1}{2m} \left| \left(\frac{\hbar}{i} \nabla - \frac{e}{c} A \right) \Psi \right|^2 + \frac{\hbar^2}{8\pi} \quad (3)$$

Onde α e β são os pesos associados à função de onda, " m " é a massa dos elétrons, " $\hbar$ " é a constante de Planck, " A " é o vetor potencial elétrico, " i " é o número imaginário, " e " é a carga do elétron e " c " a velocidade da luz [9].

1.5.3 Teoria BCS e Pares de Cooper

Desenvolvida por J. Basdeen, L. N. Cooper e J. R. Schieffer, publicada em 1957 essa teoria descrevia os fenômenos físicos que envolviam o fenômeno da supercondutividade do Tipo I e Tipo II, porém para esse último essa teoria só explicava o estágio de repulsão completa do campo e não a região de campo misto. Essa teoria propunha que:

- a) Interação efetiva atrativa entre elétrons na vizinhança da superfície de Fermi.
- b) Embora a interação coulombiana direta entre os elétrons seja repulsiva, é possível que os fônons blinde a interação coulombiana de tal forma a produzir uma interação efetiva atrativa.

Portanto elétrons que apresentam uma diferença de energia em relação a outros elétrons do substrato podem experimentar uma interação efetiva atrativa, existindo então a possibilidade dos elétrons formarem pares ligados chamados de "Pares de Cooper".

A teoria de "Pares de Cooper" foi desenvolvida em 1956. Nela Cooper mostrou que o mar de elétrons de Fermi é instável contra a formação de pelo menos um par vinculado, independentemente de quão fraca é a interação contanto que seja uma força atrativa. Esse resultado é uma consequência da estatística de Fermi e da existência do mar de Fermi, pois essa ligação entre os elétrons não ocorre no problema de dois corpos em três dimensões até que a força potencial atinja um certo valor.

Capítulo 2

Materiais supercondutores

2.1 Introdução

Uma questão que sempre deve ser lembrada quando se objetiva trabalhar com materiais supercondutores é o resfriamento necessário desses materiais para que eles exibam as propriedades supercondutoras. O avanço da tecnologia na elaboração de novos materiais supercondutores limitava-se, até 1986, a materiais com máxima temperatura crítica de 23,2 K (composto Nb_3Ge). A necessidade de temperaturas tão baixas resultava em aumento do custo de utilização desses materiais, uma vez que era requerido para atingi-las sofisticados equipamentos de refrigeração de elevado custo, e a necessidade de utilização de hélio líquido como líquido refrigerante. O preço do hélio líquido por litro é comercializado no exterior está entre US\$ 9,42/l a US\$ 13,45/l [10]. No Brasil o preço do litro de hélio está em torno de US\$ 30,00/l.

A partir de 1986, com a descoberta dos materiais cerâmicos supercondutores de alta temperatura (HTS), a viabilidade econômica de utilização desses compostos aumentou consideravelmente, pois com o aumento da temperatura crítica passou a ser suficiente a utilização de nitrogênio líquido para a refrigeração. O nitrogênio líquido pode ser obtido no IFGW (Instituto de Física Gleb Wataghin da Unicamp), a US\$ 3,00/l, valor esse aproximadamente 10 vezes inferior ao do hélio líquido.

2.2 Fitas supercondutoras de alta temperatura crítica (HTS)

2.2.1 Materiais supercondutores de primeira geração (1G)-BSCCO

A primeira geração de fitas supercondutoras HTS para aplicação comercial apresentava uma estrutura multifilamentar inserida em uma matriz de Ag/AgMg produzida pelo processo PIT (powder-in-tube) ilustrado na Figura 5.

O processo PIT que é frequentemente utilizado na produção de condutores elétricos, foi adaptado para processamento de fitas supercondutoras de BSCCO. Após a mistura dos óxidos de Bi, Sn, Ca e Cu na proporção estequiométrica, o material é compactado e depositado em filmes de prata (Ag). Este processo também é utilizado para processamento de fios supercondutores de MgB_2 (diboreto de magnésio) e de Nb_3Sn (supercondutor tipo II), com as devidas adaptações.

Este processo é usado porque os supercondutores de alta temperatura são muito frágeis para que sejam fabricados através dos processos normais. Tubos de prata preenchidos com pó do precursor são trefilados e depois arranjados e recozidos a $650\text{ }^\circ\text{C}$ em vácuo ($0,013\text{ Pa}$). Esses conjuntos de diâmetro de $1,4\text{ mm}$ são embutidos novamente em tubo de Ag/Mg. O conjunto é então deformado e posteriormente laminado para adquirir o formato de fita. Já no formato de fita é então termicamente tratado ao ar a $840\text{ }^\circ\text{C}$ para a formação da fase supercondutora que ocorre com a difusão do oxigênio [11].

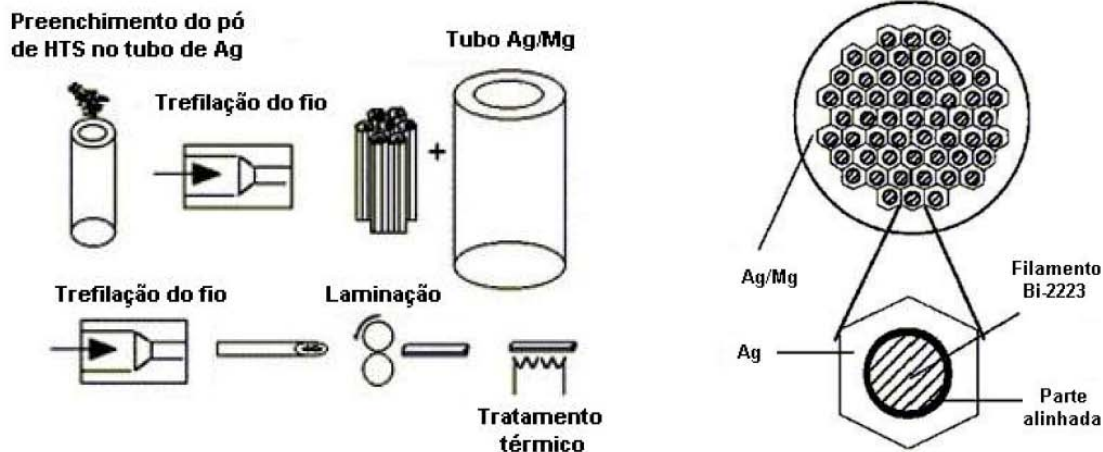


Figura 5 - Desenhos esquemáticos: a Figura da esquerda mostra o método PIT, a da direita é uma vista topográfica do tubo de Ag/Mg [12-Adaptado].

As fitas HTS de Bi-2223 (BSCCO) começaram a ser desenvolvidas industrialmente no período de 2000 a 2005. No entanto devido ao alto custo da matriz de prata, responsável por 70% do volume da fita, seu custo de produção pelo processo atual é de US\$ 70/m e dificilmente será reduzido. Outro fator limitante das fitas de BSCCO para sua aplicação em limitadores de corrente elétrica é a baixa resistividade de sua matriz, o que demanda longos comprimentos de fitas para a obtenção da resistência elétrica desejada, quando o material está no estado normal.

Por suas características físicas e custo, sua utilização se restringe aos equipamentos de ressonância magnética nuclear, que utilizam corrente elétrica contínua para geração de campos magnéticos intensos em grandes volumes, operando em 77 K e sendo refrigerados com nitrogênio líquido.

As fitas supercondutoras HTS de Bi-2223 produzidas comercialmente pela European Superconductors (EAS) em matriz de prata, não possuíam reforço mecânico externo, já as fitas do mesmo material produzidas pela American Superconductors (AMSC) apresentavam reforço de aço inoxidável.

Na Figura 6 pode-se observar as microestruturas das fitas de BSCCO, e sua estrutura esquemática está ilustrada na Figura 7.

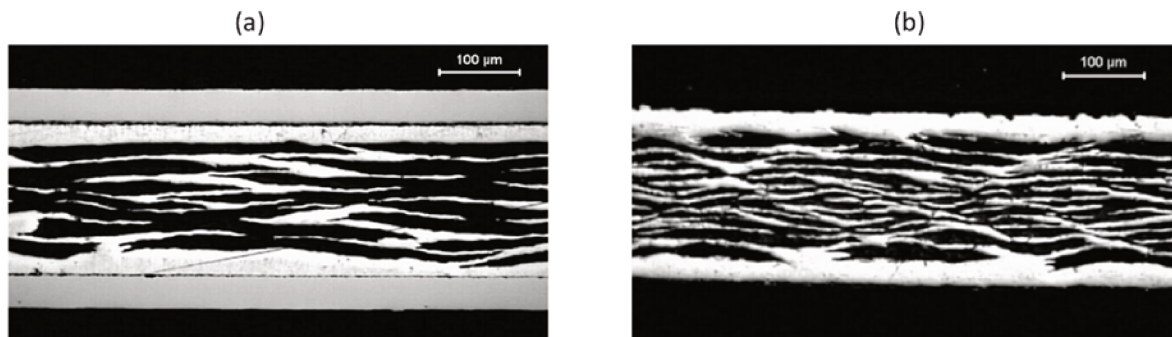


Figura 6 - Estrutura das fitas de BSCCO, a) microestrutura mostrando os filamentos em matriz de prata com revestimento (AMSC), b) microestrutura mostrando os filamentos do material supercondutor em matriz de prata sem revestimento (EAS) [13]

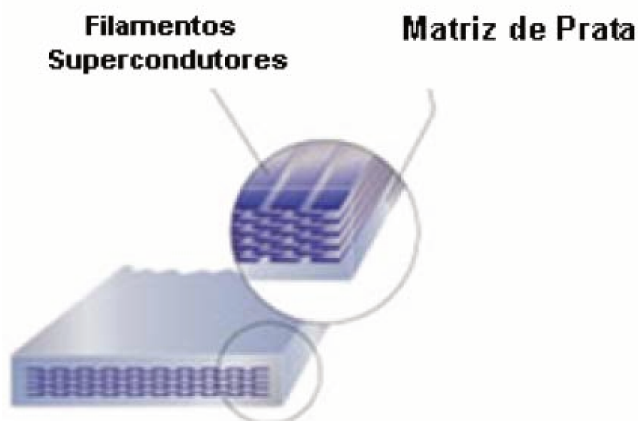


Figura 7 - Estrutura esquemática da fita BSCCO

As fitas da European Superconductors, por não apresentarem revestimento externo, possuem a superfície rugosa. A ausência de revestimento externo tornam-nas frágil podendo serem facilmente rompidas quando flexionadas. Um fato positivo resultante da ausência de revestimento externo é a alta capacidade de resfriamento dessas fitas após a transição para o estado normal, pelo fato do composto supercondutor estar em contato direto com o líquido refrigerante (nitrogênio).

Já as fitas da American Superconductors, por apresentarem um revestimento externo, de aço inox possuem uma maior resistência mecânica o que permite seu manuseio podendo ser flexionadas o que possibilita um número maior de geometrias para construção dos limitadores

de corrente elétrica. No entanto, a flexão dessas fitas causa uma variação de suas propriedades e por isso elas devem respeitar alguns limites de deformação por flexão ou torção [14].

Durante o período de desenvolvimento do processo industrial para produção das fitas de Bi-2223 houve um aumento significativo de sua densidade de corrente elétrica crítica e a otimização deste processo possibilitou a fabricação de longos comprimentos com alta homogeneidade.

As fitas de Bi-2223 apresentam atualmente uma densidade de corrente elétrica crítica de 135 A/mm² (77 K) [11], fabricados pela empresa AMSC com espessura de 0,21 mm a 0,33 mm. As fitas produzidas pela EAS apresentam uma densidade de corrente elétrica de 85 A/mm² (77 K).

2.2.2 Materiais supercondutores de segunda geração (2G) - YBCO

A segunda geração de fitas supercondutoras YBCO ou Y123 foi desenvolvida com uma estrutura de camadas orientadas depositadas sobre um substrato metálico. Esta tecnologia de deposição de filmes finos possibilitou o desenvolvimento de fitas com longos comprimentos e grande área de deposição. Este processo é conhecido como “reel-to-reel” e consiste basicamente das seguintes etapas: a) preparação do substrato metálico, b) preparação e aplicação das camadas buffer, c) preparação e aplicação do material HTS e posterior tratamento térmico, d) preparação e aplicação de camadas passivantes, estabilizantes e de isolamento [15].

O material do substrato deve apresentar compatibilidades térmica e química com os compostos da fase supercondutora das deposições intermediárias ou com os componentes e condições do processo de crescimento, de tal forma, que otimize o contato entre a sua superfície e o filme supercondutor, para que haja uma máxima transferência de calor e controle do estado condutor da fita.

As fitas supercondutoras de YBCO – Y123 produzidas pela AMSC, graças ao sistema de produção baseado na tecnologia RABITS/MOD (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate), apresentou uma significativa redução de custo tornando-se mais competitiva comercialmente do

que a sua predecessora de primeira geração BSCCO. Estas fitas são produzidas com largura de 40 mm e posteriormente podem ser cortadas com largura de 4mm e 12mm para atender as necessidades do mercado.

A capacidade mundial das indústrias permite o processamento de até 500 km/ano, com corrente crítica de 70 a 100 A (77 K), sendo o tipo 344 produzido pela AMSC ofertado com diferentes materiais estabilizadores externos como, aço inoxidável, cobre ou latão. Agora com disponibilidade de fitas de segunda geração (YBCO) em escala industrial, as pesquisas e desenvolvimentos de equipamentos para a aplicação em sistemas de energia elétrica puderam ser retomadas, com perspectivas de redução de custos da fita HTS em curto prazo em função do aumento da demanda.

O êxito do desenvolvimento de um processo de produção de baixo custo, juntamente com as melhorias previstas no desempenho, incluindo a introdução de filmes mais espessos de YBCO, possibilitou uma diminuição de custo de manufatura dos fios 2G com desempenho superior, ou seja corrente crítica de 200 A (500 A/cm de largura) [16].

O processo de produção de deposição organometálica MOD está ilustrado na Figura 8 e baseia-se na deformação-texturização (deformation-texturing) de um substrato de liga metálica de Ni (Ni5%W).

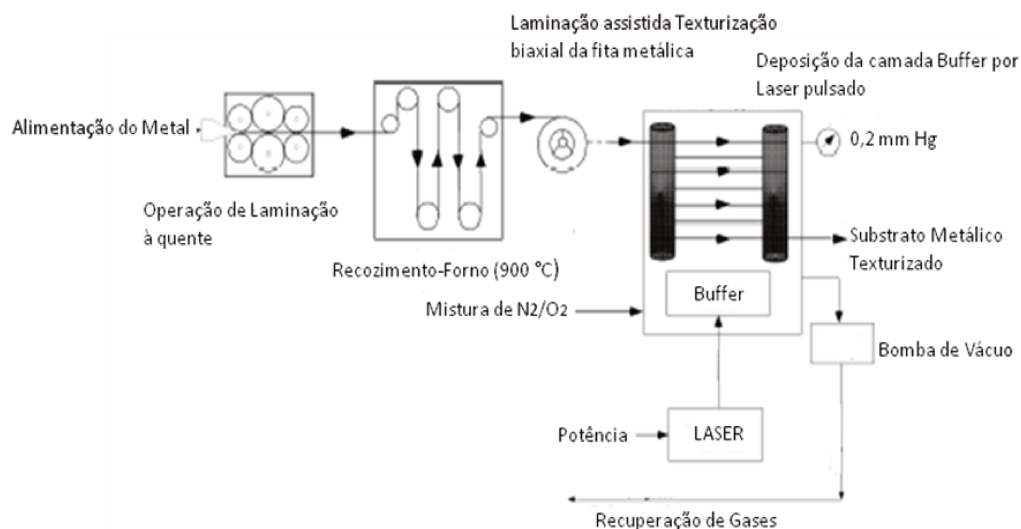


Figura 8 - Método de preparação do substrato pelo método MOD e deposição das camadas buffer por LASER pulsado [15-Adaptado].

As camadas intermediárias para compatibilizar a estrutura e viabilizar a deposição da liga são respectivamente: 75 nm de espessura de Y_2O_3 (“seed-layer”), 75 nm de YSZ (ítrio estabilizado com zircônio compondo a camada barreira – “barrier layer”) e 75 nm de CeO_2 (óxido de cério, compondo a camada capa – “cap layer”) depositados por LASER pulsado ou pela deposição organometálica, como ilustrado na Figura 9. [17]

O composto precursor do filme fino de YBCO é uma solução estequiométrica composta pelos elementos de terras raras, revestido sobre um substrato tamponado de 4800 mg de $\text{Y}(\text{Dy}_{0.5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, polarizado a 600 °C e convertido para um filme epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ a 750-800 °C através do processo “reel-to-reel”. A tira de YBCO é coberta por uma camada de 1 μm de Ag [18] e passa por uma atmosfera de oxigênio na temperatura de aproximadamente 500 °C. A fita revestida é então cortada na largura desejada e laminada com duas tiras metálicas estabilizantes formando finalmente a fita supercondutora 2G.

O núcleo da fita supercondutora do tipo 344 consiste de várias camadas finas de materiais diversos, incluindo materiais supercondutores de alta temperatura, sobrepostos em uma base de substrato metálico. Uma representação gráfica dos revestimentos múltiplos e com a aplicação do estabilizador de cobre, aço inoxidável ou bronze é vista na Figura 10.

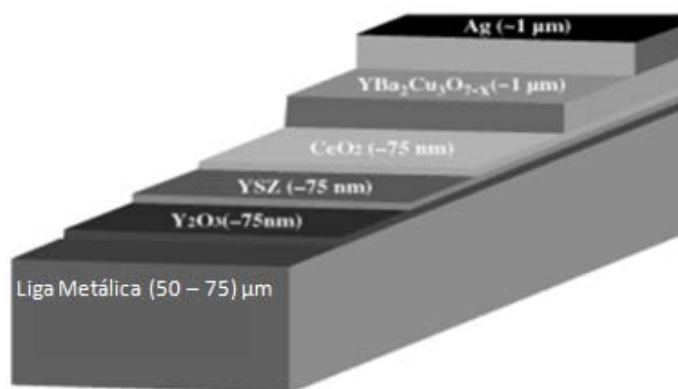


Figura 9 - Composição das camadas da fita de HTS da AMSC 2G, chamada de supercondutores 344.

As principais características de cada camada da fita 344 (Figura 10) produzida pela empresa AMSC são: a) substrato de Ni5%atW: placa de liga metálica com orientação preferencial (texturização cristalográfica). Fornece uma base para a formação de uma alta ordenação no recobrimento com supercondutor, b) tratamento da superfície com enxofre: gera reticulado de átomos de enxofre que asseguram uma alta qualidade das camadas “buffers” sobre o substrato, c) camada semente de óxido de Ítrio: Y_2O_3 cresce epitaxialmente sobre a superfície tratada do substrato. Tem a finalidade de transferir a textura do substrato para o supercondutor YBCO, d) camada barreira de YSZ (ítrio estabilizado com zircônia): YSZ reproduz a texturização cristalográfica do substrato. Serve como barreira impedindo contaminação do YBCO supercondutor pelos metais do substrato, e) camada capa de céria: CeO_2 garante compatibilidade química e estrutural para a formação de YBCO. Desta forma, permite a formação de uma camada de YBCO de alto desempenho através da decomposição do precursor metalorgânico depositado na camada de céria, f) supercondutor YBCO recoberto com nanopontos: $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) contendo dispersão de nanopontos de óxido de ítrio (Y_2O_3) e cuprato de ítrio ($Y_2Cu_2O_5$) transporta corrente elétrica contínua e apresenta resistência elétrica nula. Os nanopontos melhoram a capacidade de transporte de corrente elétrica através do aprisionamento (“pinning”) dos vórtices (linhas de fluxo) dentro do YBCO.

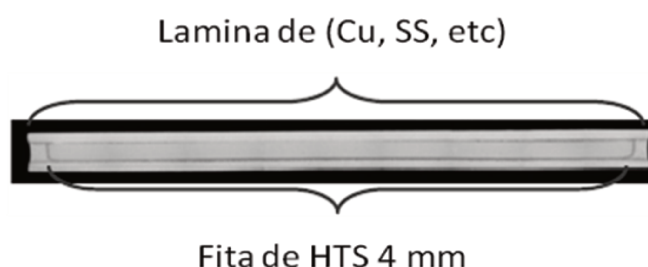


Figura 10 - Secção transversal da fita supercondutora produzida pela AMSC 2G, denominada fita supercondutora 344.

A Figura 11 a seguir ilustra o método RABiTS/MOD utilizado na produção de fitas de YBCO da AMSC [19].

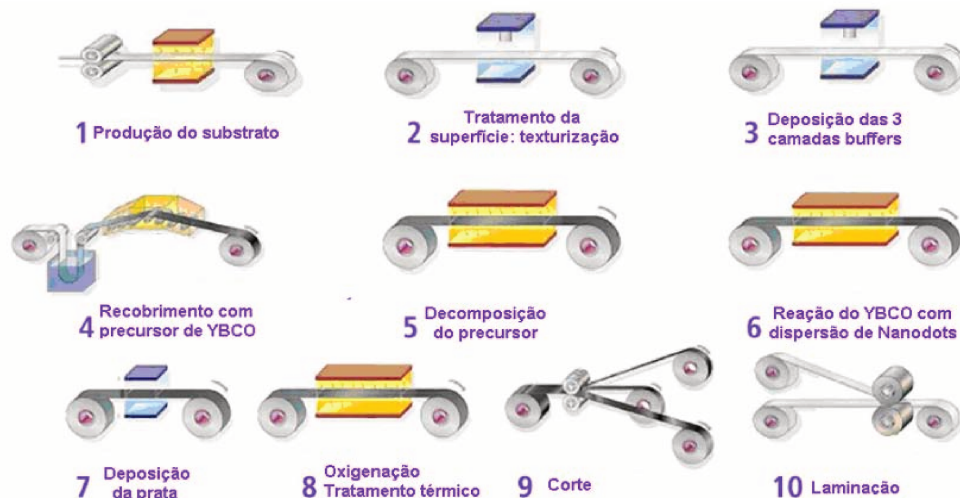


Figura 11 - Estágios do processo RABiTS/MOD [19].

A empresa SuperPower desenvolveu o processo industrial para a produção de fitas supercondutoras de YBCO utilizando como substrato Hastelloy 276, com a arquitetura ilustrada na Figura 12

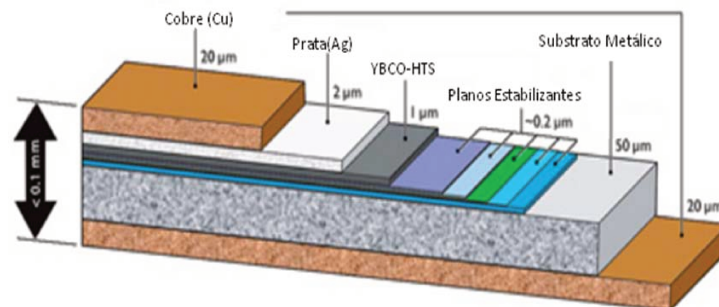


Figura 12 - Estrutura da fita YBCO SuperPower [20-Adaptado].

As fitas da SuperPower são fabricadas também por meio de um processo de deposição, como os utilizados na indústria de semicondutores e apresentam as seguintes características a) desempenho superior quando exposto a campos magnéticos. Tal propriedade acredita-se estar ligada ao aprisionamento do fluxo de nanoescala criados através da utilização dos elementos de terras raras. A dopagem com elementos de terras raras gera uma diminuição da dinâmica dos fluxos que se movem através da fita, b) as fitas 2G possuem a metade da espessura da fita 1G dessa mesma empresa, c) utiliza fios de cobre como estabilizadores, fundamental para a utilização em alta tensão, d) utiliza substrato de Hastelloy com alta resistência elétrica (menores perdas por corrente elétrica de Foucault ou corrente elétrica parasita), o que gera uma melhor

estabilidade mecânica e menores perdas em corrente alternada. Esse substrato não magnético gera menores perdas ferromagnéticas, e) apresenta uma alta robustez mecânica, pode ser cortada em pequenas largura e suporta pequenas torções, o que permite sua adaptação a diferentes geometrias de dispositivos [20].

Na Tabela V são apresentadas as principais características que permitem a comparação das fitas supercondutoras de alta temperatura produzidas comercialmente pela AMSC e pela SuperPower.

A diferença que há entre a densidade de corrente elétrica crítica das fitas de YBCO produzidas pelas duas empresas se deve aos tipos de deposições usados no processo de fabricação. As fitas da AMSC são produzidas por meio de uma deposição grosseira de camadas. Já as fitas da SuperPower apresentam um controle de deposição de suas camadas (deposição controlada). Esse controle gera uma grande orientação de suas camadas, portanto, possuem uma corrente elétrica crítica superior

Tabela V - Características das fitas HTS de YBCO.

	AMSC	SuperPower	
		SCS12050	SF12100
Espessura	0,13-0,17	0,095 mm	0,105 mm
Largura	4,3 mm	12 mm	12 mm
Substrato	Ni5% at W	Hastelloy	Hastelloy
Propriedades magnéticas	Magnético	Não-Magnético	Não-Magnético
Produção	MOD/RABiTS	MOCVD	MOCVD
Estabilizador	Aço inoxidável	Cobre	Sem estabilizador
Densidade de corrente elétrica crítica(77K)	136 A/mm ²	210 A/mm ²	290 A/mm ²

Para o desenvolvimento de limitadores de corrente elétrica resistivos foram selecionadas as fitas de YBCO (2G), cujas principais características foram apresentadas na Tabela V. A partir dos ensaios realizados em [13] pode-se observar a transição para o estado normal através das curvas ($I \times V$) na Figura 13, para as fitas de Bi-2223 e YBCO.

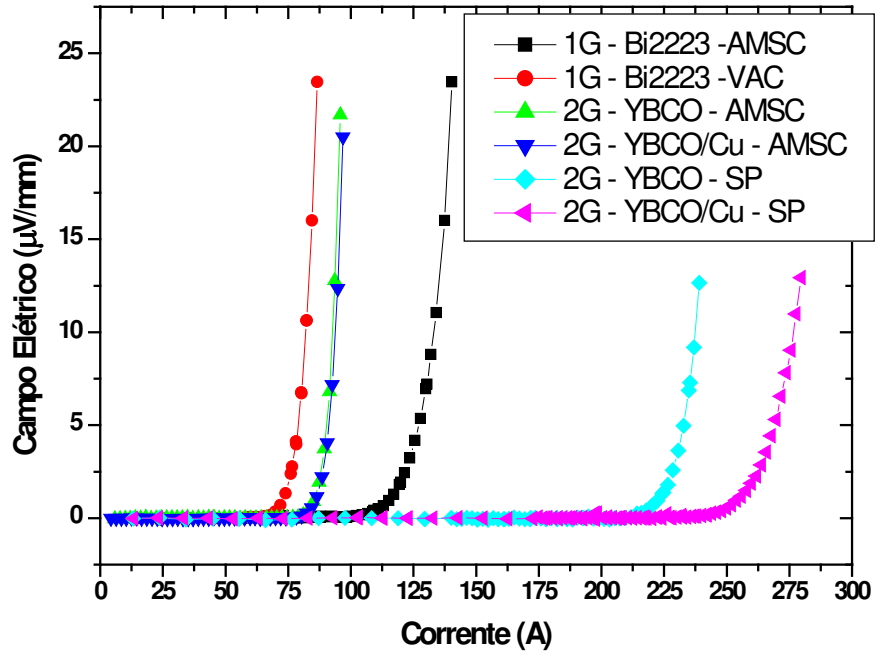


Figura 13 - Curvas $I \times V$ para fitas de Bi-2223 e de YBCO-AMSuper (4mm) e Superpower (12mm).

Para este trabalho foram considerados os resultados obtidos nos ensaios em corrente alternada do protótipo de limitadores de corrente resistivo construído utilizando-se 25,6m de fita de YBCO, AMSuper com 4mm de largura e característica de $I_{c(DC)}=86$ A [13].

Capítulo 3

Limitadores de corrente elétrica

3.1 Introdução

A partir da década de 90 iniciou-se, no mundo todo, uma política de privatização da infraestrutura das empresas de energia elétrica. Além disso, no Brasil iniciou-se também um clamor por aumento de geração de energia elétrica e de expansão e modernização de todos os segmentos voltados a esse setor, com o objetivo de sustentar as projeções de crescimento do país [21]. Houve também um início de esforços no sentido de otimizar todos os setores das empresas de energia elétrica e de empresas com elas envolvidas. O cenário descrito anteriormente não passa de um reflexo de uma tendência mundial de crescimento populacional e comercial ambos com forte dependência de energia elétrica.

A expansão do setor de energia elétrica tem ocorrido de várias maneiras: com a instalação de novas linhas de transmissão, execução de um número maior de interconexões entre as linhas já existentes, instalação de novas usinas geradoras, re-potenciação das já existentes, conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição, fechamento em paralelo de linhas de distribuição radiais, re-capacitação de subestações e outras providências.

Como resultado dessas providências tomadas e com o aumento na capacidade de geração e fornecimento de energia elétrica um problema a ser enfrentado é o da elevação dos níveis de corrente elétrica de curto-circuito, que podem exceder a capacidade dos dispositivos de proteção que se encontram em operação na rede elétrica.

Para que o fornecimento de energia elétrica seja eficiente e não acarrete danos materiais aos usuários, as empresas se preocupam com a qualidade do fornecimento de energia elétrica e a agência reguladora, no caso do Brasil a ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica, é responsável por verificar se todas as ações que beneficiam o consumidor estão sendo realizadas. Para tanto as empresas despendem uma parcela significativa de seus investimentos em equipamentos para tornar o sistema de energia elétrica mais robusto e confiável. Essa qualidade pode ser atingida através de equipamentos de controle, proteção e segurança.

Um equipamento de proteção possui três funções: a) proteger todo o sistema a fim de manter o fornecimento contínuo, b) minimizar os danos e custos de reparação quando houver curto-circuito, c) garantir a segurança dos profissionais envolvidos.

Essas funções são necessárias, em primeiro lugar para que haja uma rápida detecção e localização das faltas, restabelecendo o fornecimento de energia para as regiões afetadas e, em segundo lugar para remoção dos equipamentos defeituosos do sistema.

Para que os equipamentos de proteção atendam às necessidades mencionadas anteriormente é necessário que eles possuam as seguintes qualidades [22]: a) seletividade: para detectar e isolar somente o equipamento defeituoso, b) estabilidade: para garantir a integridade de toda a rede e o contínuo fornecimento, c) sensibilidade: para detectar até mesmo pequenas anomalias na rede e d) velocidade: o equipamento deve atuar rapidamente a fim de minimizar os danos que podem ser causados.

Os equipamentos convencionais de proteção utilizados em sistemas de energia elétrica são: os transformadores de potencial e de corrente elétrica que têm como função monitorar a rede elétrica e retornar precisas informações de tensão e de corrente elétrica; os relés que realizam a conversão dos sinais dos dispositivos de monitoramento e permitem a abertura e o fechamento de circuitos sob condições de falta através de disjuntores ou disparam alarmes quando equipamentos estão próximos a possíveis danos; os fusíveis que interrompem o circuito quando há sobrecorrente (esses dispositivos se fundem devido à dissipação de energia por efeito Joule), as chaves e os disjuntores que realizam abertura e fechamento de circuitos manualmente ou à distância quando comandados por relés e os limitadores de corrente elétrica que são usados para reduzir a corrente elétrica de falta introduzindo no circuito uma impedância

possibilitando a ação de um disjuntor com capacidade de interrupção menor do que se não houvesse a limitação da corrente elétrica.

Os limitadores de corrente elétrica são portanto dispositivos capazes de limitar a corrente elétrica de falta, que corresponde, em geral, à corrente elétrica de curto-circuito em um sistema de energia elétrica [23]. Os limitadores de corrente elétrica que podem ser construídos utilizando-se condutores normais são denominados limitadores de corrente elétrica convencionais (reatores de núcleo de ar ou núcleo magnético). Os limitadores de corrente elétrica convencionais se dividem em duas categorias: os reatores série e os pirotécnicos. Outro tipo de limitadores de corrente elétrica são os que usam materiais supercondutores e são denominados limitadores de corrente elétrica supercondutores. Eles apresentam capacidade de condução de corrente elétrica 100 vezes superior à capacidade de condução do cobre, porém demandam refrigeração criogênica.

Os limitadores de corrente elétrica supercondutores estão ainda em desenvolvimento e existem somente alguns protótipos pelo mundo que não são ainda comerciais. Os mais comuns são os limitadores de corrente elétrica supercondutores resistivos onde o componente supercondutor está ligado diretamente ao circuito, e a transição do estado supercondutor para estado normal de condução de corrente insere uma resistência elétrica no circuito limitando a corrente de falta. Os limitadores de corrente elétrica supercondutores do tipo transformador, são construídos deslocando o componente supercondutor para atuar no secundário de um transformador, que está conectado em série com o circuito que ele deverá proteger. Esta última categoria será o objeto de estudo desta dissertação.

3.2 Tipos de limitadores de corrente elétrica

3.2.1 Reator série como limitador de corrente elétrica

Os primeiros limitadores de corrente elétrica com reatores em série ligados a um circuito foram instalados na Cos Cob Station em Nova Iorque, Nova Haven e Hartford Railroad. Esse sistema de proteção foi desenvolvido pela Westinghouse Electric e entraram em operação no ano de 1908 [24].

Os reatores limitadores de corrente elétrica, são ligados em série com a rede elétrica a ser protegida e são projetados para reduzir as correntes elétricas de faltas, inserindo uma impedância ao circuito elétrico no momento em que ocorre uma falta. Isso acarreta uma alteração do fator de potência do circuito e uma conseqüente queda de tensão, que exigirá um banco de capacitores para sua correção. Os reatores podem ser instalados em diversos pontos da rede elétrica (linhas de transmissão, alimentadores, transformadores, etc) para limitação da corrente elétrica por ocasião de faltas. A empresa canadense “B. C. Hydro” [25] utilizava um circuito de reatores ligados em série em cada unidade de seus alimentadores individualmente como ilustrado na Figura 14.

Subestações de alta capacidade são geralmente usadas para suprir os sistemas de distribuição elétrica. Em uma rede elétrica a ocorrência de curto-circuito não é um evento raro e pode produzir correntes elétricas muito altas. Essas correntes elétricas, se não controladas, podem causar danos a toda a rede elétrica, como por exemplo: redução do tempo de vida dos transformadores ligados à rede ou sua imediata degradação, falha dos transformadores de distribuição e degradação dos cabos condutores [25].

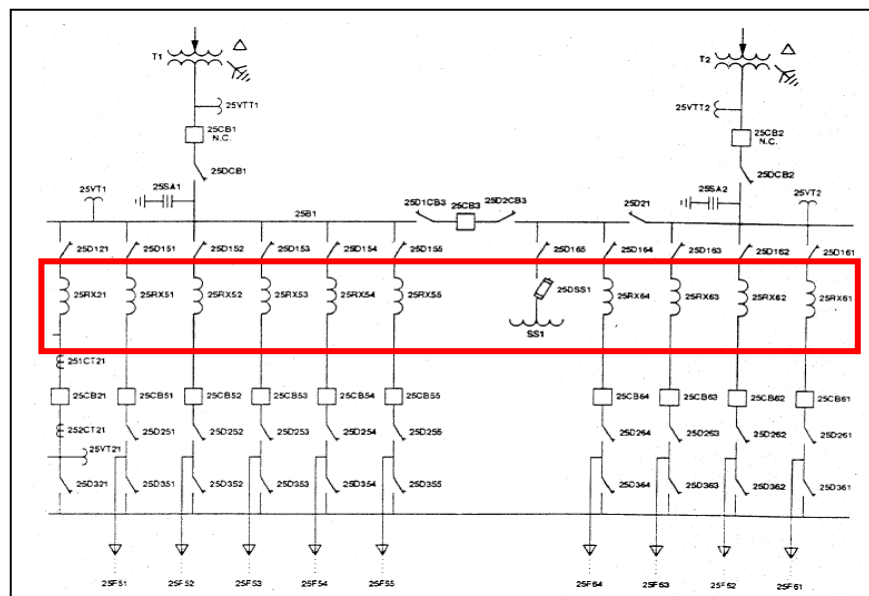


Figura 14 - O retângulo indicado mostra a localização do reatores em série conectados a alimentadores.[25]

O limitador de corrente elétrica reativo é praticamente inativo em condições normais de funcionamento do sistema. A presença do reator provoca a necessidade de aumento na regulação das tensões do sistema, mas não controla a corrente elétrica da carga. Nessa condição de funcionamento normal do sistema a queda de tensão no reator é relativamente baixa quando comparada à tensão do sistema elétrico. O limitador de corrente elétrica deve ser projetado para operar em função da corrente de falta [26].

Abaixo dos valores da corrente de curto-circuito, quando a linha está operando em condições normais sob uma determinada tensão e corrente elétrica, é importante saber qual o valor de tensão e consequentemente de corrente elétrica que o sistema suporta até atuação do limitador, ou seja, o valor instantâneo da corrente de curto-circuito. Esse valor pode ser determinado através de simulação dinâmica do sistema considerando-se que, em regime permanente é recomendável que a queda de tensão no reator possa ser de no máximo 4% em relação à tensão nominal do circuito. O limitador de corrente elétrica deve limitar a corrente a um valor que não cause a ruptura do dielétrico do disjuntor [27].

A forte aplicação de limitadores de corrente elétrica ocorre nos circuitos que já possuem disjuntores de corrente de ruptura máxima possível (limite de capacidade da classe de tensão), exigindo uma divisão do circuito em dois gerando custos quando ocorrem novas ligações de cargas, às vezes muito elevados, que compensariam a aquisição do limitador de corrente elétrica. No caso de linhas de transmissão de tensão muito elevada não existe limitação de custo para estes dispositivos, mas sim limitação de tecnologia que permita desenvolver limitadores de corrente para esta aplicação.

3.2.2 Limitador de corrente elétrica pirotécnico

Um outro dispositivo de limitação de corrente elétrica é o limitador de corrente elétrica pirotécnico. Este dispositivo é composto por um suporte estrutural das unidades limitadoras de corrente, um transformador de impulsos responsável pela transmissão do impulso de disparo do “dispositivo de disparo” ao “detonador”. Ao mesmo tempo, para garantir o isolamento elétrico entre esse dois componentes, a unidade limitadora que é o próprio elemento de comutação fixado ao isolador pelo condutor principal que contém um detonador que dispara

quando ocorre a sobrecorrente provocando a abertura (fusão por explosão) do condutor principal, como ilustrado na Figura 15.

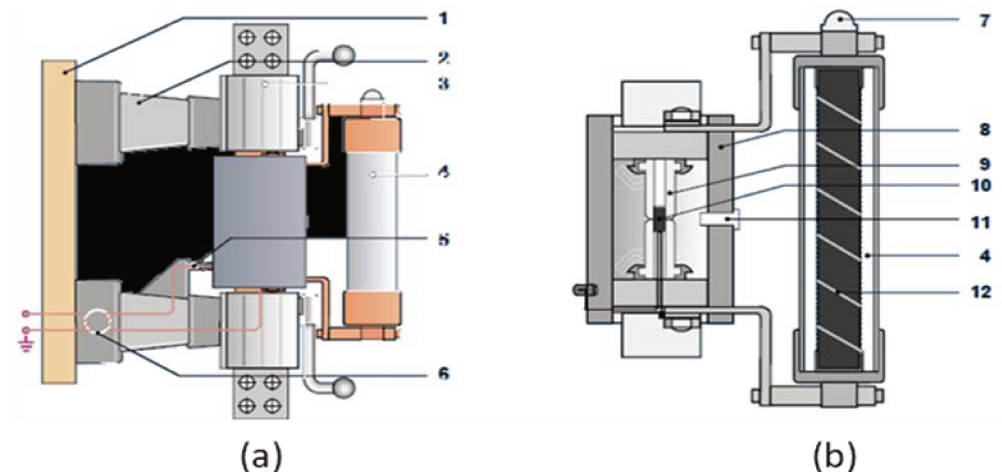


Figura 15 - Desenho ilustrativo de um limitador pirotécnico e seus componentes [28]

A Figura 15 (a) ilustra um suporte de unidade limitadora para 12 kV, 2000 A e a Figura 15 (b) ilustra a respectiva unidade limitadora. Estão representados nessas Figuras os seguintes componentes; 1-Placa de base; 2-Isolador; 3-Cabeça de polo com dispositivo de fixação; 4-Fusível; 5- Contator telescópico; 6-Isolador com transformador de impulsos; 7-Indicador do fusível; 8-Tubo isolador; 9-Ponte fulminante; 10-Detonador; 11-Indicador do condutor principal; 12-Elemento fusível [28].

Esse tipo de limitador atua em 0,5 ms e é capaz de limitar 210 kA de corrente elétrica alternada [28] e 5 kA de corrente elétrica contínua [29]. O modo de funcionamento do limitador consiste em um interruptor extremamente rápido com capacidade de conduzir altas correntes elétricas nominais, porém possui baixa capacidade de corte e, para suprir esta deficiência, um fusível é colocado, em paralelo, com alta capacidade de corte de corrente elétrica. O baixo tempo de limitação é possível graças a um detonador, este acumula energia para abertura do interruptor (condutor principal). Na Figura 16 abaixo mostra-se a imagem de um limitador pirotécnico.

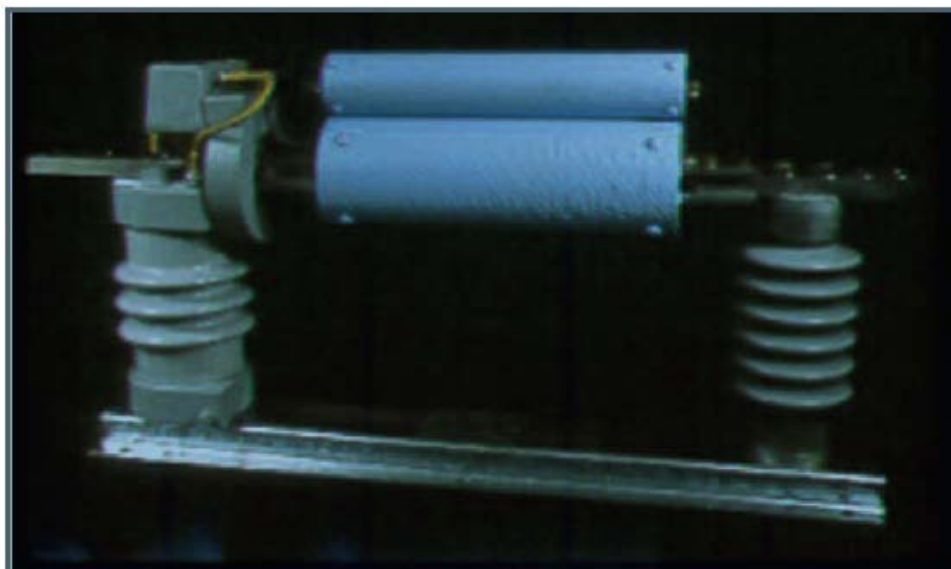


Figura 16 – Limitador de corrente elétrica pirotécnico [29]

O tempo de atuação desse limitador, por ser extremamente rápido, é capaz de limitar a corrente elétrica em menos de um quarto de ciclo. Logo após o corte de condução do condutor principal a corrente passa a circular pelo fusível, que interrompe a corrente. A Figura 17 a seguir mostra o gráfico correspondente à atuação desse limitador de corrente elétrica.

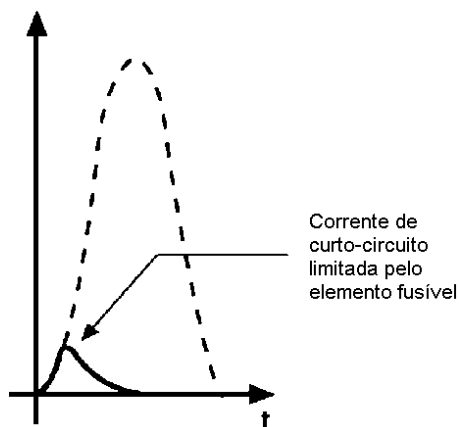


Figura 17 - Limitação da corrente elétrica de curto-circuito pelo limitador pirotécnico [28].

Mesmo não apresentando impedância adicional ao sistema elétrico durante o funcionamento normal, o limitador pirotécnico não se caracteriza como ideal, pois a cada disparo ocorre a degradação do conjunto interruptor-fusível e, sendo assim, não é um equipamento auto-recuperável. Dessa maneira o tempo de restabelecimento desse sistema depende de variáveis como tempo técnico de reparo, necessitando para isso de uma equipe de manutenção, indisponibilidade temporária do equipamento que, por sua vez, gera a necessidade de estoque. O maior problema desse tipo de limitador de corrente elétrica ocorre quando um curto-circuito se extingue rapidamente de tal maneira que o circuito poderia ser religado imediatamente, caso de curto-circuitos ocorridos devido a galhos de árvores sob ventanias fortes.

3.2.3 Limitadores de corrente elétrica supercondutores

Como visto na seção precedente os limitadores de corrente elétrica de falta ou “fault current limiter”, em inglês, são dispositivos capazes de reduzir rapidamente (em aproximadamente 5 ms ou $\frac{1}{4}$ de ciclo) a corrente elétrica de falta em um circuito.

Os modelos de limitadores de corrente elétrica mais estudados atualmente são os que utilizam materiais supercondutores como componente limitante da corrente elétrica. Esses modelos são chamados de limitadores de corrente elétrica supercondutores (LCES) ou “Superconducting Fault Current Limiter” (SFCL), em inglês.

Existem muitos modelos de LCES, porém os mais explorados são os modelos baseados em princípios indutivos e resistivos. Como o próprio nome diz, os limitadores supercondutores indutivos limitam a corrente elétrica de falta através da introdução, no circuito, de uma indutância, e os limitadores supercondutores resistivos o fazem através da introdução de uma resistência elétrica no circuito [30].

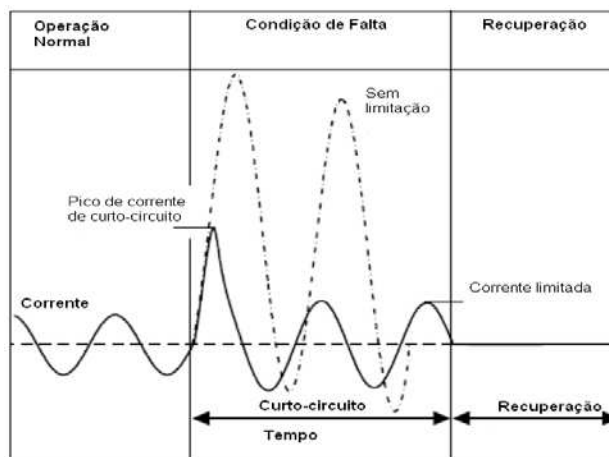


Figura 18 - Comportamento da corrente elétrica de falta em um circuito protegido por um LCES[31].

Os LCES oferecem os seguintes benefícios: redução da corrente elétrica de falta por um fator de 3 a 10, como mostrado na Figura 18; recuperação automática do LCES, não necessitando de substituição, capacidade de operação em distribuição e transmissão de energia elétrica com tensões de aproximadamente 138kV.

Algumas possíveis aplicações e benefícios dos LCES são [31]: em barramentos, transformadores e alimentadores, evitando danos em equipamentos, auferindo maior confiança aos sistemas elétricos quando as chaves dos barramentos são fechadas, evitando a substituição de equipamentos, principalmente disjuntores e com isso retardando investimentos.

Os principais parâmetros que afetam o projeto do LCES são: a corrente elétrica inicial do circuito, o valor da corrente elétrica de falta, a tensão de operação do circuito, o tempo de duração da falta, e a necessidade de restabelecimento do circuito imediatamente após o final da falta [31].

Dentre os vários tipos de LCES os resistivos são os que apresentam melhor desempenho (não exigem banco de capacitores) reduzindo custos e exigindo dimensões reduzidas para sua instalação. Existem duas formas de materiais que podem ser usados nesse tipo de LCES, que são: os tubos “bulk” de supercondutores de alta temperatura crítica (BSSCO – Bi 2212) e as fitas supercondutoras de alta temperatura crítica de primeira geração (1G) com substrato de prata e supercondutor de BSCCO (Bi – 2223) e mais recentemente as fitas 2G com substrato de Ni5%W

e supercondutor de YBCO (Y-123) das empresas AMsuper ou Super Power. As fitas supercondutoras de segunda geração, por serem utilizadas com substrato de materiais de alta resistividade, apresentam, na transição para o estado normal de condução da corrente elétrica, uma resistência elétrica equivalente de $0,35 \Omega/\text{m}$ que será inserida no circuito elétrico. Esse valor é muito superior ao valor obtido com as fitas de primeira geração de $0,006\Omega/\text{m}$, para a mesma corrente de operação. Portanto para essa aplicação a melhor fita é a da segunda geração.

Os materiais de segunda geração correspondem a uma grande evolução dos materiais supercondutores tanto em preço como em propriedades físicas como, por exemplo, maior resistividade elétrica quando em estado condutor normal para aplicações em limitadores de corrente elétrica.

3.2.4 Limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo

A principal característica dos materiais supercondutores é a de apresentarem resistência elétrica nula quando no estado supercondutor e um valor elevado de resistência elétrica quando no estado normal de condução, sobretudo os compostos de segunda geração.

Na construção de limitadores de corrente elétrica supercondutores são utilizados materiais em forma de blocos (tubos ou “bulks”) e em forma de fitas, constituídos por materiais supercondutores com substrato de prata (supercondutores de primeira geração). Já os de segunda geração usam a tecnologia de filmes finos onde uma camada de material supercondutor é depositada sobre um substrato de alta resistividade, com espessura muito fina resultando em um compósito flexível. A escolha apropriada do substrato deve considerar determinadas propriedades como: resistência à temperatura do tratamento térmico, resistência à atmosfera oxidante, compatibilidade de comportamento mecânico com os materiais cerâmicos que serão depositados, para fornecer orientação cristalográfica adequada, antes da camada supercondutora para possibilitar a obtenção de fitas supercondutoras com excelentes propriedades mecânicas e bom desempenho elétrico, como descrito no capítulo 2.

O princípio de funcionamento do limitador de corrente elétrica construído com fita de YBCO consiste em conectar um módulo, constituído por diversos setores de fitas supercondutoras em paralelo para suportar a corrente nominal, com comprimentos compatíveis

com a resistência elétrica, a ser inserida em série com o circuito onde se pretende limitar a corrente elétrica mantendo-as no estado supercondutor (resistência elétrica aproximadamente nula) durante a operação normal.

Quando pelo módulo passar a corrente elétrica nominal do circuito, esta vê o limitador de corrente elétrica como um condutor de resistência elétrica nula. O material supercondutor transitará do estado supercondutor para o estado condutor normal quando houver uma sobrecorrente ($I > I_c$) e uma resistência elétrica será inserida no circuito limitando a sobrecorrente, mantendo-se a limitação até a abertura do disjuntor sob corrente reduzida ($t < 100\text{ms}$).

Uma das principais qualidades dos limitadores de corrente elétrica supercondutores é o fato deles se auto-recuperarem, em fração de segundo, após limitarem uma sobrecorrente permitindo nova atuação, se necessário, após alguns segundos. O tempo de recuperação é muito importante, pois garante a proteção da rede elétrica. Para que haja recuperação imediata da rede elétrica após uma falta a temperatura interna da fita do LCES deve ser limitada entre 300K a 500K (devido a soldas internas), para que não haja degradação do material supercondutores, sendo o calor gerado trocado com o líquido refrigerante, permitindo a recuperação do estado supercondutor.

A recuperação ultra-rápida principalmente para faltas de curta duração ($t < 100\text{ms}$) é uma grande vantagem em relação a um disjuntor, que ao se abrir para extinguir a corrente elétrica exige um rearme para poder voltar a operar, enquanto o supercondutor pode se recuperar sob carga sem interrupção do fornecimento de energia.

Um material de alta temperatura crítica (HTS) como o composto de YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$), cuja temperatura de transição ocorre por volta de 90K, deve ser mantido em uma temperatura abaixo de 85K, para que seja garantida sua corrente crítica e uma rápida recuperação após uma transição. Essa necessidade de baixas temperaturas resulta em uma maior complexidade de projeto e da construção do limitador gerando maior custo, associado ao aumento do comprimento efetivo do supercondutor e a complexidade da engenharia de refrigeração. É necessário usar um fluido criogênico para isso, no caso o nitrogênio líquido, mantendo o supercondutor imerso na temperatura de 77K.

Duas possibilidades construtivas de limitadores de corrente elétrica resistivos estão representadas na Figura 19. Os limitadores de corrente elétrica em série, Figura 19(a) foram inicialmente desenvolvidos utilizando-se fitas de BSSCO (Bi-2223) com substrato de prata. Deste modo, após a transição para o estado normal, a corrente elétrica passa a ser transportada pelo substrato, que neste caso, com alta condutividade elétrica e térmica, dissipa o calor rapidamente, permitindo a recuperação do estado supercondutor com a extinção da falta.

Esta característica de dissipação rápida do calor elimina a propagação da zona normal, ou seja, somente 10% do comprimento da fita contribuía para o valor da resistência a ser inserida para limitar a corrente, comprometendo o desempenho do limitador de corrente elétrica.

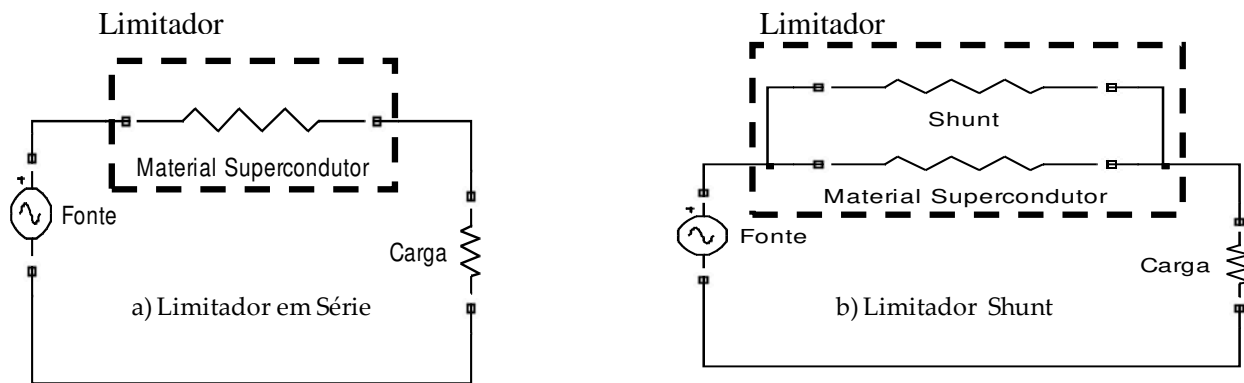


Figura 19 - Conceitos de limitadores em série e shunt.

Para as fitas de segunda geração que são fabricadas com substrato de alta resistividade, a impedância shunt mostrada na Figura 19(b) atua como uma proteção do material supercondutor permitindo o desvio de uma parte da corrente de falta. O valor do resistor shunt adequado pode ser obtido através de medidas experimentais, onde são determinados o tempo de recuperação e a temperatura máxima atingida internamente na fita supercondutora, o que será estudado detalhadamente mais adiante.

Os LCES necessitam de fitas HTS de alta resistividade que suportem uma alta densidade de corrente elétrica, alta resistividade no estado de condutor normal para limitar a corrente

elétrica, e alto coeficiente de troca térmica para retornar rapidamente ao seu estado supercondutor.

Como o tempo de recuperação da fita supercondutora é um fator importante no projeto do limitador de corrente elétrica, existem vários métodos de análise e determinação desse tempo, sendo um deles através da visualização do que ocorre durante o processo de transição do material HTS. Na Figura 20 pode-se observar o processo de aquecimento do material supercondutor de YBCO de segunda geração.

A dissipação de calor por efeito Joule pode ser observado através do surgimento de bolhas associado ao aumento crescente da temperatura devido o aumento da resistência elétrica do material supercondutor devido à transição deste do estado supercondutor ($t=0$ ms) para o estado normal para uma falta com duração menor do que 100ms. O comportamento resistivo da fita, após sua transição para o estado normal, é ilustrado na Figura 21.

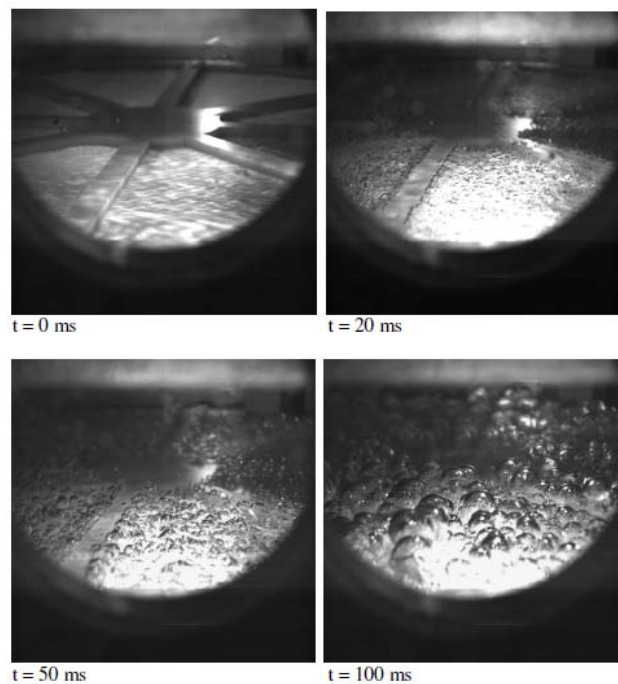


Figura 20 - Sequência de fotos mostrando o aquecimento do material supercondutor. Notar a presença de bolhas de ar nas duas últimas fitas [30].

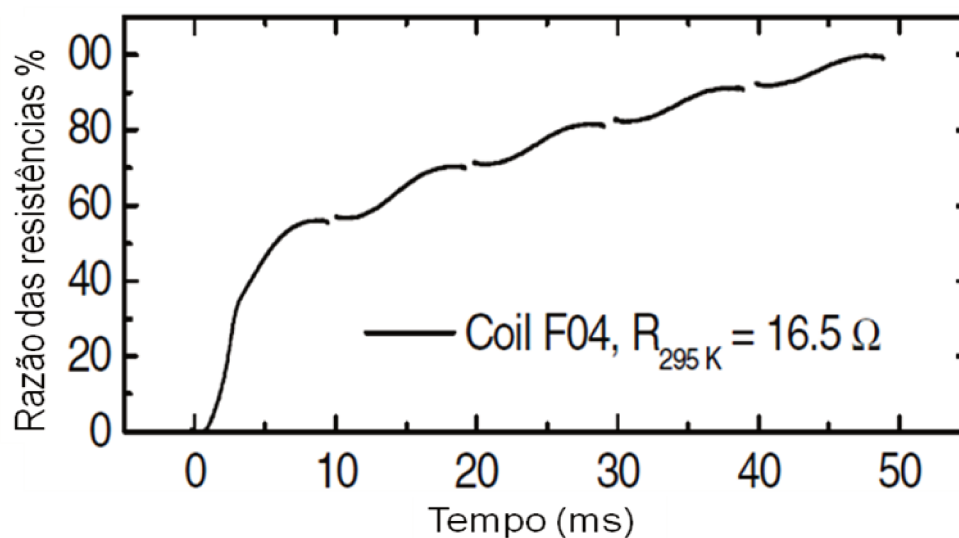


Figura 21 - Comportamento da razão de resistências elétricas (R/R_{295K}) durante a transição do material do estado supercondutor para o condutor, onde R é a resistência elétrica que surge no material durante a transição [32-adaptado].

De forma geral os limitadores de corrente elétrica supercondutores resistivos apresentam um volume reduzido devido às suas características ideais, pois não necessitam de chaves para inserção de resistência elétrica ou de reatâncias de limitação da corrente, são os mais indicados para a aplicação na rede de transmissão e de distribuição de energia elétrica, e também, por não necessitarem de bancos de capacitores para correção do fator de potência, como ocorre com os limitadores indutivos.

3.2.5 Limitador de corrente elétrica supercondutor indutivo

O limitador de corrente elétrica indutivo (LCI) consiste em uma bobina primária de condutor de cobre acoplada, por meio de um núcleo ferromagnético, a um tubo supercondutor em forma de um único anel ou mecanismos com múltiplos de anéis em paralelo, como mostrado na Figura 22. Este dispositivo não exige nenhuma conexão galvânica entre os elementos supercondutores em baixa temperatura e os elementos que estão em temperatura ambiente. Um LCI constitui-se em um reator elétrico cuja impedância depende do estado do anel supercondutor. Quando o circuito encontra-se em regime normal de operação, os anéis supercondutores permanecem no estado supercondutor, blindando as linhas de fluxo magnético

que não atingem o núcleo magnético. O fluxo magnético produzido pela bobina primária é compensado pelo fluxo induzido na bobina secundária. Sob condições de curto-circuito a corrente elétrica induzida no anel eleva-se rapidamente acima do valor da corrente elétrica crítica e a bobina secundária transita para o estado normal, permitindo a penetração das linhas de fluxo no núcleo magnético, aumentando a impedância e limitando a corrente de falta.

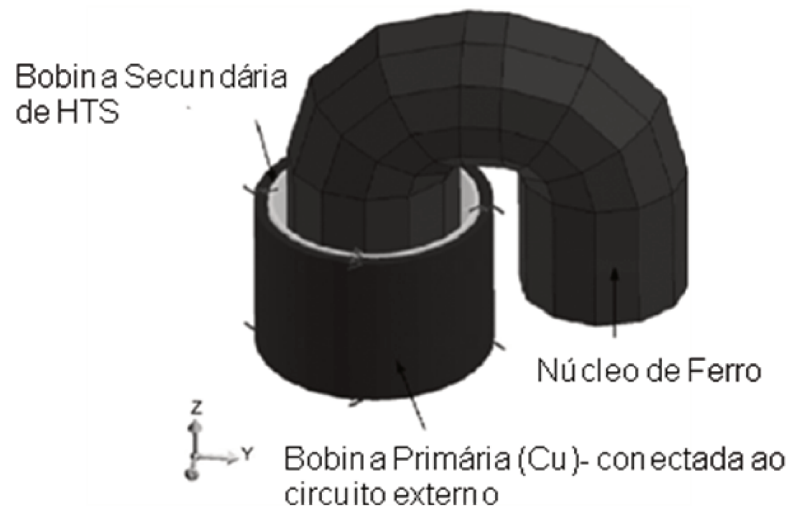


Figura 22 - Modelo numérico de um SFCL indutivo [33-adaptado].

Apresenta-se na Figura 22 um modelo em escala reduzida que ilustra o conceito descrito anteriormente. Para se entender melhor o modo de operação e funcionamento desse tipo de limitador toma-se como exemplo um protótipo de 1.000V / 25A, com um anel de BSCCO de 20cm de diâmetro operando em uma rede de 380V.

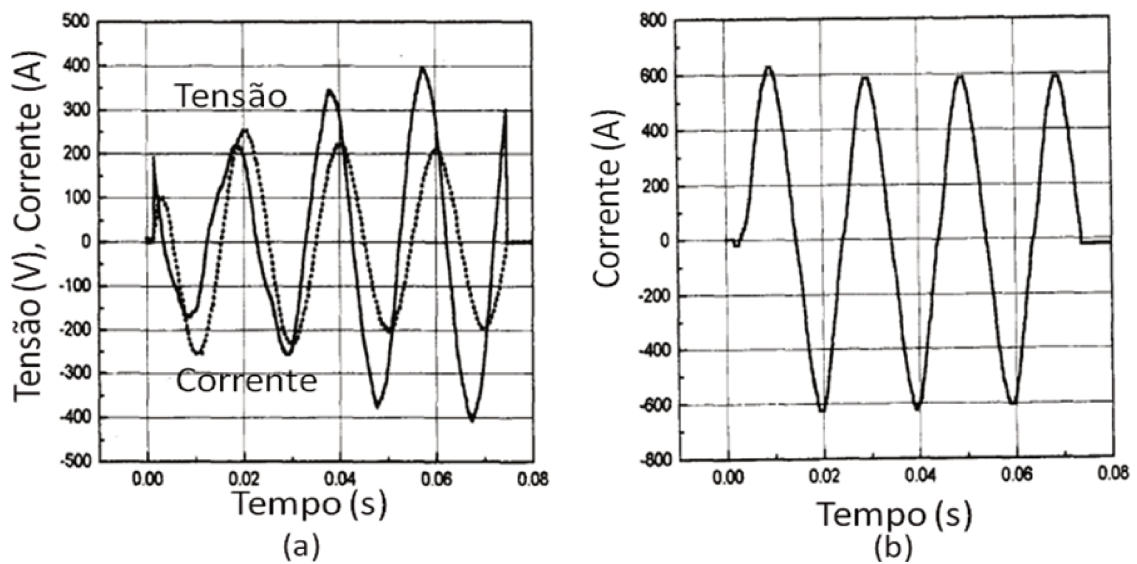


Figura 23 - Comportamento da corrente elétrica (linha pontilhada) e da tensão (linha contínua) durante a atuação do LCI. O gráfico da direita mostra o comportamento da corrente de falta sem o limitador de corrente [34-adaptado].

Da análise dos resultados mostrados na Figura 23(a) pode-se observar que o limitador LCI reduziu a corrente elétrica de falta no primeiro ciclo sendo a redução de aproximadamente 65%. Apenas parte do material supercondutor transitou para o estado normal. Isso ocorreu devido à distribuição não homogênea da corrente elétrica pelo material. Quanto maior o valor da tensão aplicada maior será a fração de material supercondutor que transitará para o estado normal.

3.2.6 Limitador de corrente elétrica supercondutor do tipo transformador

Existem diversos trabalhos em andamento no mundo aplicados ao dimensionamento e construção de transformadores que utilizam fitas supercondutoras no primário e no secundário, ou somente no secundário. Durante a operação normal, as perdas ativas são muito reduzidas e durante o curto-circuito com a transição do material supercondutor para o estado normal uma

resistência elétrica (do material supercondutor no estado condutor) é adicionada à reatância série do transformador aumentando a impedância total e limitando a corrente elétrica. Devido ao elevado custo da unidade sua viabilidade econômica somente poderá ser alcançada para transformadores de potência superiores a 50 MVA [35].

O limitador de corrente elétrica supercondutor do tipo transformador (LCST) ou “transformer type superconducting fault current limiter (TTSCCL)”, objeto deste trabalho, consiste em um transformador conectado a um dispositivo limitador de corrente elétrica supercondutor, conforme circuito ilustrado na Figura 24.

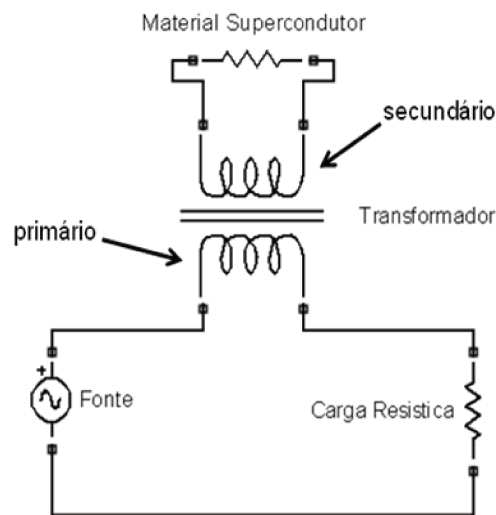


Figura 24 - SCFCL conectado a um circuito.

O primário do transformador limitador é conectado em série com o circuito principal e o dispositivo (ou material) supercondutor é conectado ao secundário do transformador. A carga alimentada nesse circuito exemplo é resistiva, porém poderia ser qualquer tipo de impedância ou mesmo uma carga não linear. Quando o material supercondutor se encontrar no estado supercondutor (resistência elétrica nula), o limitador de corrente elétrica apresentará uma impedância igual à impedância de curto-circuito do transformador do limitador. Por outro lado, quando ocorrer uma falta no circuito e consequentemente um abrupto crescimento da corrente

elétrica, o material supercondutor transitará para o estado condutor normal inserindo agora uma resistência elétrica em série com a impedância do enrolamento secundário do transformador que será refletida ao lado do primário para limitar a sobrecorrente [35].

Esse tipo de limitador de corrente elétrica possui muitas vantagens, tais como: a) alta flexibilidade de projeto do limitador de corrente elétrica devido às possíveis variações de modelo de transformador e arranjo do material supercondutor, b) isolamento entre o dispositivo limitador de corrente elétrica e o circuito (rede elétrica de transmissão) e c) necessidade de uma menor quantidade de material supercondutor.

i. Transformadores

A idéia da utilização dos transformadores em limitadores de corrente elétrica supercondutores vem do fato de se poder aumentar o valor do módulo de uma impedância elétrica na mesma relação do quadrado da relação entre os número de espiras do primário e do secundário do transformador.

Sendo N_1 o número de espiras do enrolamento primário do transformador e N_2 o número de espiras do enrolamento secundário, o valor do módulo de uma impedância Z_2 conectada ao secundário do transformador é vista, do lado do primário, como Z'_2 mostrado na expressão (5).

$$Z'_2 = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (5)$$

Desse modo colocando-se no secundário de um transformador abaixador, no qual N_1 é maior do que N_2 , um material supercondutor, como por exemplo um arranjo construído com fitas supercondutoras com resistência elétrica total R_2 no secundário do transformador, esse arranjo é visto, do lado primário do transformador, com resistência elétrica total R'_2 dada pela expressão (6) e portanto limitando a corrente de curto-circuito.

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (6)$$

Como as fitas supercondutoras apresentam resistência elétrica baixa, o uso de um transformador acoplador com relação de espiras 11:1 permite aumentar o valor da resistência elétrica da fita supercondutora no estado normal $0,35 \Omega/m$ ligada nos terminais do enrolamento secundário do transformador, conforme se pode calcular com a expressão (6) quando vista do enrolamento do primário para valor de $0,35 \times 11^2 = 42,35 \Omega/m$. Isso permite uma maior limitação da corrente elétrica, tornando o limitador de corrente elétrica, em alguns casos, mais baratos e mais funcionais. A corrente elétrica ficará limitada em cerca de 120 vezes a corrente real de curto-circuito.

O princípio de uso do limitador de corrente transformador é promissor e parece que resolveria o problema do custo de um limitador de corrente elétrica supercondutor tornando-o acessível no mercado. Entretanto diversos problemas ocorrem e são analisados neste trabalho.

Antes de desenvolver a idéia de um limitador de corrente elétrica supercondutor com transformador é importante realizar uma análise de um transformador já que se pretende utilizá-lo em simulações dinâmicas de sistemas de energia elétrica com limitadores de corrente elétrica supercondutores.

Para fins de análise dinâmica da operação de um transformador é interessante analisar o circuito elétrico equivalente convencional de um transformador monofásico. É importante lembrar também que um transformador trifásico, normalmente usado em sistemas de energia elétrica, pode ser visto como três transformadores monofásicos ligados em estrela ou em delta.

No caso de transformadores trifásicos balanceados, normalmente, utiliza-se o circuito elétrico equivalente de uma das fases para representá-lo.

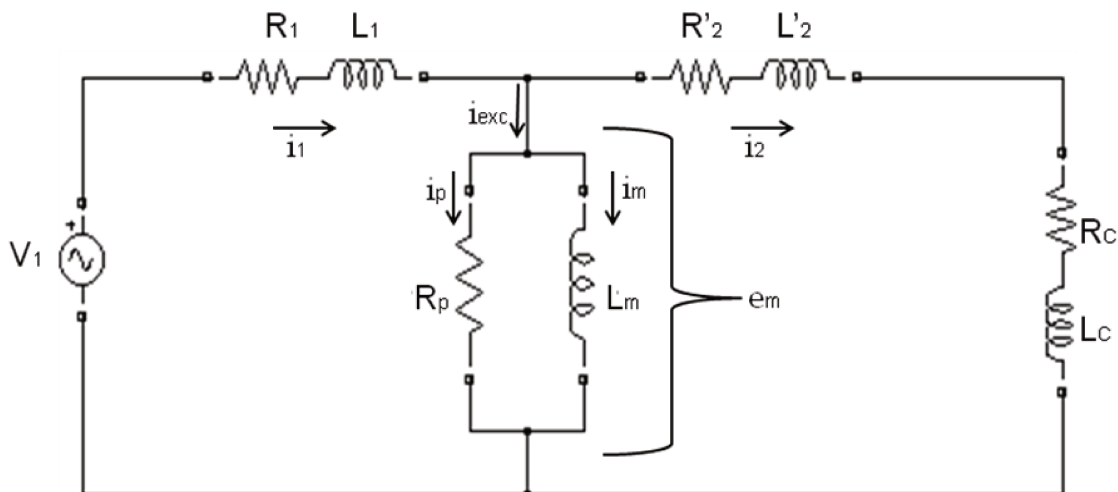


Figura 25 - Circuito elétrico equivalente convencional de um transformador monofásico.

O circuito equivalente de um transformador monofásico é mostrado na Figura 25. Trata-se de um circuito elétrico equivalente visto de um dos lados do transformador. Chamando o lado esquerdo de primário e o direito de secundário do transformador diz-se que o enrolamento secundário está refletido para o lado do primário. Esse circuito equivalente é composto pelas resistências elétricas do enrolamento primário (R_1), pela indutância de dispersão do enrolamento primário (L_1) e pelos mesmos parâmetros de circuito equivalente do lado secundário (R'_2 e L'_2) refletidos (ou referidos) para o lado do primário. O sobrescrito (') é usado para designar parâmetros do enrolamento secundário referidos ao lado do primário usando a equação (6).

O ramo em paralelo do circuito equivalente do transformador, visto do lado do primário, é formado pela resistência elétrica representativa das perdas magnéticas por correntes parasitas (correntes de Foucault) e por histerese magnética denotada por (R_p) e pela indutância de magnetização (L_m) que modela matematicamente a força eletromotriz de magnetização do transformador (e_m). A corrente de magnetização é dada por i_m que passa pela indutância L_m .

A corrente elétrica que circula por R_p é a corrente de perdas (i_p). A soma de i_p com i_m resulta na corrente de excitação do transformador (i_{exc}). A corrente elétrica do enrolamento primário é denotada por (i_1) e a corrente elétrica que circula no enrolamento secundário, vista

do lado do enrolamento primário, é denotada por (i'_2) . Pode-se escrever, dessa forma as equações:

$$i_{exc} = i_p + i_m \quad (7)$$

$$e_m = L_m \frac{d}{dt} i_m = R_p i_p \quad (8)$$

Usando o aplicativo MatLab/Simulink/SimPowerSystems pode-se resolver todas as equações diferenciais que descrevem o circuito elétrico equivalente do transformador obtendo-se todas as correntes elétricas que por ele circulam (i_1 , i'_2 , i_p , i_m e a corrente i_c na carga representada por um circuito RL série com R_c e L_c) bem como a força eletromotriz e_m .

Em estudos de transformadores em regime permanente as indutâncias mostradas no circuito equivalente da Figura 25 são substituídas por reatâncias $X = \omega L$, sendo ω a frequência angular da rede elétrica a qual o transformador estará ligado. Normalmente os valores de R_p e de $X_m = \omega L_m$ são elevados (muito maiores do que os valores de R_1 , R'_2 , X_1 e X'_2 ($X_1 = \omega L_1$ e $X'_2 = \omega L'_2$) com $\omega = 2\pi f$ sendo f a frequência da tensão de alimentação do transformador v_1 . Como eles estão em paralelo no circuito elétrico drenam uma corrente elétrica i_{exc} pequena comparada com as correntes elétricas i_1 e i_2 e podem ser desprezados do circuito equivalente para cálculos envolvendo o sistema de energia elétrica. Como resultado o circuito equivalente do transformador acaba reduzido ao circuito elétrico que se vê na Figura 26.

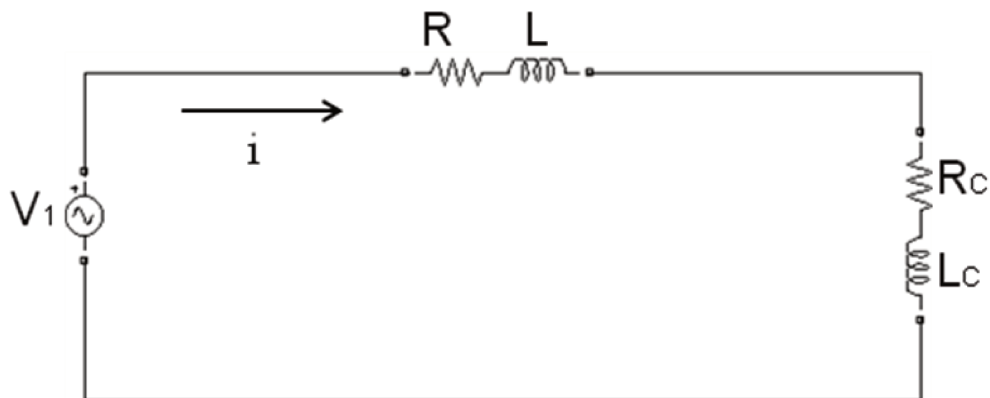


Figura 26 - Circuito elétrico equivalente reduzido de um transformador monofásico

Nesse circuito elétrico equivalente $R = R_1 + R'_2$ e $L = L_1 + L'_2$ (ou $X = X_1 + X'_2$ se o transformador for considerado em regime permanente). Normalmente os valores dos parâmetros são dados em pu em relação a um par de valores de base que normalmente são a potência aparente do transformador (S), a tensão eficaz de linha do primário ou do secundário do transformador (no caso trifásico (V_l)) e a frequência angular da rede elétrica ω . No caso monofásico os valores de base são a potência aparente (S) e a tensão eficaz do primário (V_1), além da frequência angular ω [36].

Em regime permanente o circuito elétrico equivalente completo do transformador monofásico é mostrado na Figura 27 e o circuito equivalente simplificado é mostrado na Figura 28.

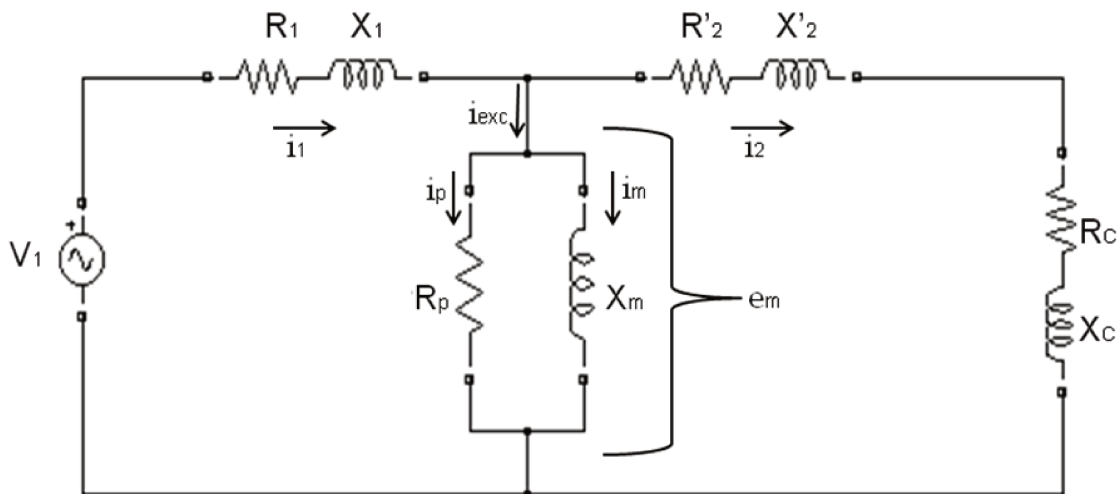


Figura 27 - Circuito elétrico equivalente convencional de um transformador monofásico em regime permanente

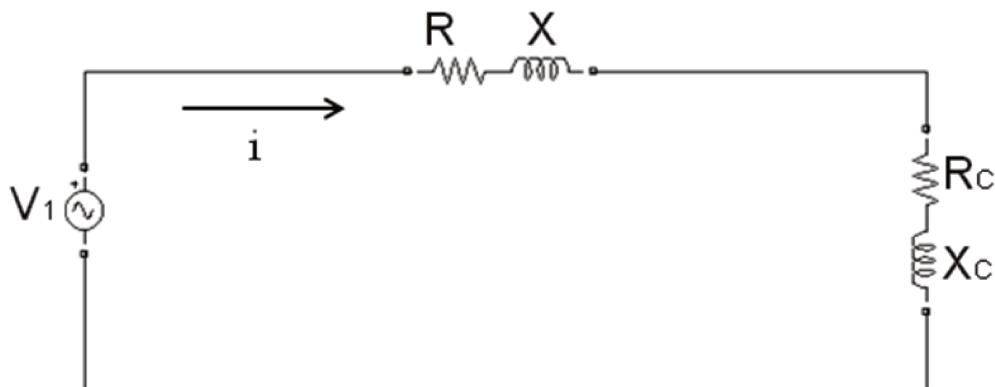


Figura 28 - Circuito elétrico equivalente reduzido de um transformador monofásico em regime permanente

ii. Limitador de corrente elétrica supercondutor com transformador utilizando subdivisão de enrolamento secundário

Os limitadores de corrente elétrica supercondutores que utilizam transformadores podem ser construídos com um enrolamento primário e mais de um enrolamento secundário, sendo que cada um deles estará em curto-circuito por um módulo de material supercondutor. Como é praticamente nula a resistência do material supercondutor, quando em temperaturas

abaixo da temperatura crítica, a corrente elétrica (I_p) da linha do alimentador (Figura 29) flui sem impedância ou perdas adicionais às convencionais do transformador. As correntes elétricas I_{SA} , I_{SB} e I_{SC} atravessam respectivamente os enrolamentos que compõem os secundários A, B e C do transformador, como mostrado na Figura 29.

Quando a falta ocorre, consequentemente a corrente do secundário é elevada ocasionando a transição do material supercondutor para o estado de condutor normal, devido ao aquecimento do mesmo em consequência ao acréscimo de corrente elétrica gerado pela falta, e esta transição de estado introduz uma resistência elétrica no circuito. As resistências elétricas introduzidas nos secundários desse transformador são refletidas no primário, através das relações de espiras, como descrito no item anterior. A função dessa resistência é limitar a corrente elétrica de falta até que o sistema saia desse estado ou até a atuação do disjuntor para abrir o circuito e isolar a região afetada [37].

No circuito ilustrado pela Figura 29, L_p é a indutância do enrolamento primário e L_{SA} , L_{SB} e L_{SC} são as respectivas indutâncias dos secundários A, B e C. Seguindo-se a mesma sequência do secundário estão as resistências R_{SA} , R_{SB} e R_{SC} . A indutância mútua correspondente entre o primário e o secundário representada por M_p e M_s será a indutância mútua entre os enrolamentos secundários.

A principal motivação para a aplicação de um transformador com múltiplos secundários em um limitador de corrente elétrica é a rápida transição das fitas resistivas e compostas por material supercondutor, pois com vários secundários os comprimentos das fitas são fracionados proporcionando uma transição mais homogeneia do composto supercondutor.

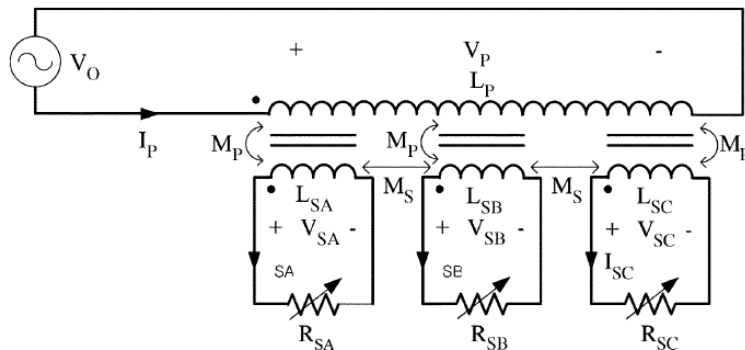


Figura 29 - Circuito equivalente de um limitador de corrente elétrica híbrido do tipo transformador com três secundários [35-adaptado].

A Figura 30 (b) mostra o comportamento das correntes elétricas e das tensões no primário e no secundário para enrolamento secundário de um a três setores, conforme ilustrado pelos esquemas dos transformadores Figura 30 (a).

Nota-se que com a utilização do transformador com secundário subdividido tem-se um maior aproveitamento do secundário e conseqüentemente a geração de uma resistência refletida, do secundário para o primário, ainda maior sem que para isso utilize-se mais de um transformador ou ainda um comprimento maior de fita supercondutora [38].

Quanto ao número de espiras dos enrolamentos secundários em relação ao primário o aproveitamento do limitador proposto será maior, pois mesmo sendo a relação entre as correntes linear a relação entre as impedâncias é quadrática. Assim mesmo que a corrente fosse reduzida, ainda se conseguiria um ganho na impedância devido a soma dos enrolamentos secundários. O que ocorre na prática é que a corrente não se reduz significativamente para uma mesma tensão no primário devido às indutâncias mútuas geradas pelos múltiplos secundários [39].

O aumento do campo magnético causa uma diminuição da temperatura crítica do material, fazendo com que esse transite para o estado normal com uma corrente elétrica menor. Como em limitadores que utilizam circuitos magnéticos a malha magnética é maior devido às indutâncias mútuas, faz-se necessário um estudo mais detalhado do projeto do limitador para que o fluxo resultante não prejudique o funcionamento do dispositivo.

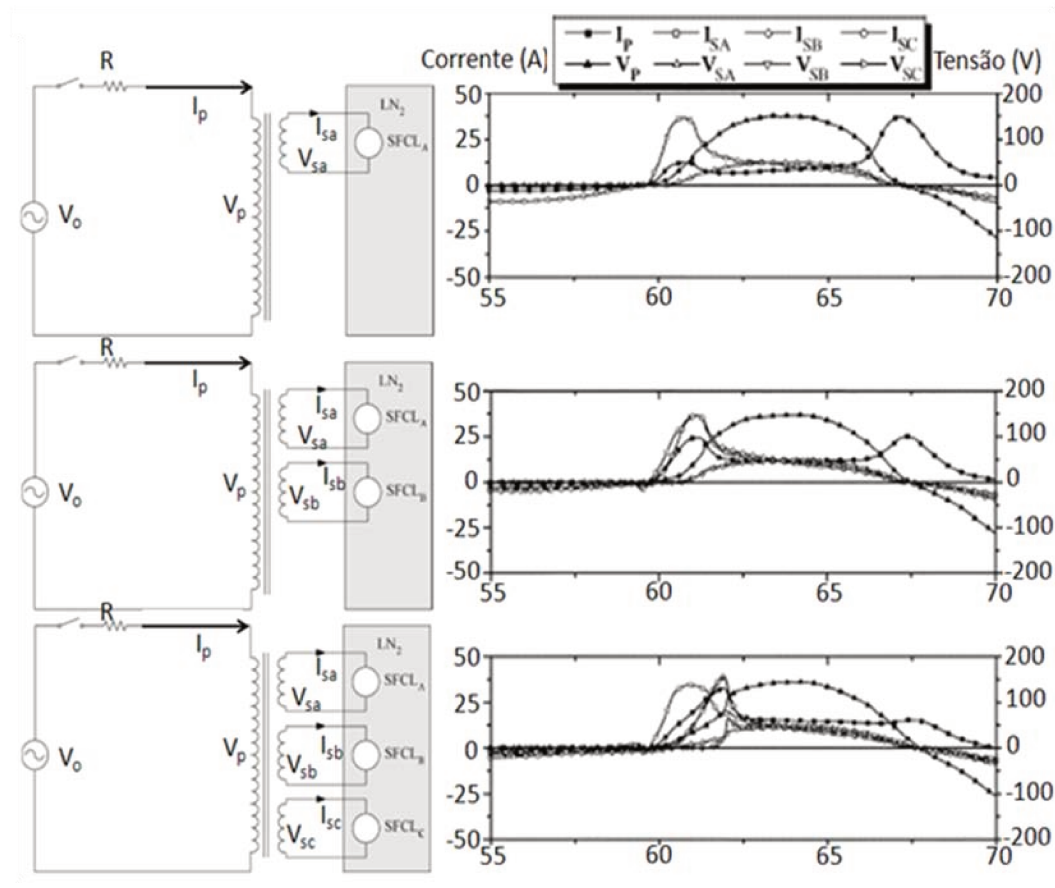


Figura 30 - (a) circuito equivalente de um SCFCL e (b) suas curvas de falta [38- adaptado].

iii. Limitador de corrente com saturação do núcleo do transformador

Uma das técnicas para a estabilização de tensão em um equipamento responsável por manter a tensão em sua saída estável, mesmo que haja variações na rede elétrica, seria a de utilizar um transformador de núcleo saturado. Assim, se a rede oferece picos ou tende a operar com a tensão acima (sobretensão) ou abaixo (subtensão) do valor ideal, esse equipamento oferece uma compensação e mantém a sua saída com um valor aceitável, ou seja, dentro dos padrões necessários. Nos estabilizadores de núcleo saturado, também conhecidos como ferro-ressonantes, a correção é feita por saturação no núcleo do transformador. Esses equipamentos possuem uma tecnologia ultrapassada, e inserem distorção harmônica considerável na saída.

No estudo de limitadores de corrente supercondutores utilizando transformadores um dos principais objetivos a serem alcançados seria a limitação da tensão do secundário deste transformador durante a falta, quando a carga é curto-circuitada e toda a tensão do alimentador é aplicada ao primário deste transformador limitador. Quando o núcleo do transformador é levado a saturação a tensão em seu secundário é mantida praticamente constante, ou seja, durante a falta se uma sobretensão for aplicada a tensão em seu secundário não será mais proporcional a relação de espiras, o que neste caso seria o efeito desejado. As fitas supercondutoras de YBCO (segunda geração) apresentam excelente desempenho quando submetidas ao campo elétrico máximo entre 0,5 a 1,5 V/cm, ou seja, se a tensão de secundário permanecer constante durante a falta o comprimento necessário para construção deste limitador será reduzido significativamente.

Por outro lado, operar um transformador próximo de sua saturação para que durante uma falta a tensão em secundário seja pouco alterada, implicará também na redução do efeito da resistência a ser inserida no circuito pela transição do material supercondutor conectado ao secundário, pois se a relação de transformação não mais prevalece o mesmo ocorrerá com o aumento do efeito de reflexão no primário desta impedância inserida.

O circuito equivalente do transformador pode ser modificado para incluir os efeitos não-lineares da característica do núcleo, através da substituição da indutância de magnetização na Figura 31 por uma reatância de magnetização não-linear. A característica fluxo-corrente desta impedância é escolhida de acordo com a característica magnética do núcleo do transformador.

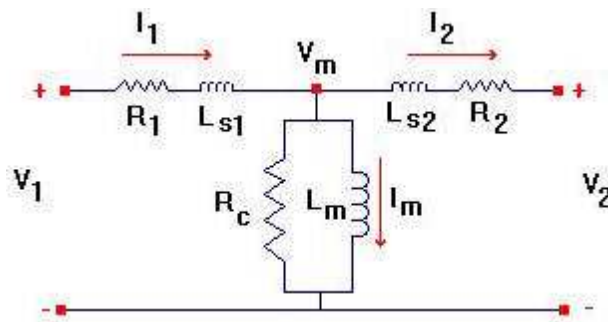


Figura 31 - Circuito equivalente de um transformador monofásico[40].

Para representar a característica de magnetização do transformador pode-se utilizar um número de segmentos lineares, preservando suas propriedades essenciais da saturação e reduzindo a complexidade da simulação

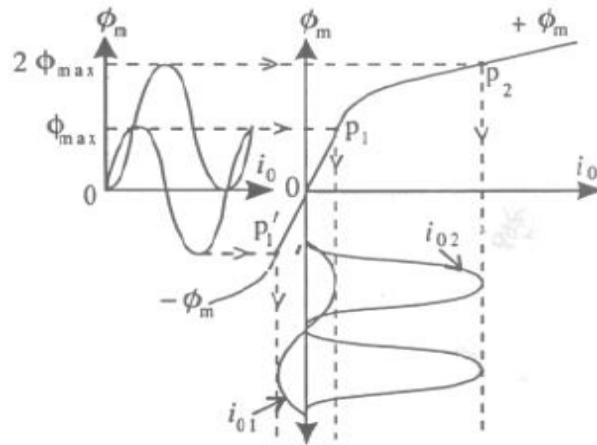


Figura 32 - Característica do núcleo, corrente elétrica em função do fluxo magnético, mostrando as condições simétricas de saturação [40].

Esta representação por três segmentos da saturação do transformador é mostrada pelas linhas tracejadas na Figura 32. O segmento A'A representa a porção não saturada da curva de magnetização do transformador. A inclinação deste segmento é escolhida para se igualar à indutância de magnetização não saturada do transformador. Os segmentos B'A' e BA representam respectivamente a porção saturada das regiões positiva e negativa da característica do transformador. A inclinação destes segmentos é escolhida para se igualar à indutância do núcleo de ar do transformador. O ponto no plano fluxo-corrente onde o segmento com saturação intercepta o segmento linear da característica é definido como o ponto do joelho de saturação. O ponto do joelho define o mínimo fluxo e corrente de magnetização para a qual a saturação é apreciável.

Em limitadores de corrente supercondutores que utilizam circuitos magnéticos, pode-se também levar à saturação do núcleo com a construção de um terceiro enrolamento, que durante

a ocorrência de uma falta seria simultaneamente alimentado por um pulso de corrente que produziria um fluxo adicional de corrente contínua no núcleo magnético levando-o à saturação.

iv. Limitador de Corrente Supercondutor com Impedância Shunt

Diversos trabalhos de projeto e construção de limitadores de corrente supercondutor para associação em série com o circuito alimentador de sistemas de distribuição foram realizados por parcerias entre as empresas concessionárias, fornecedores de equipamentos para sistemas de potência e departamento de energia do governo. No Brasil este trabalho em parte vem sendo realizado com a participação de pesquisadores da FEEC/Unicamp e EEL/USP com atividades financiadas por projetos de P&D realizados com a CPFL – Companhia a Paulista de Força e Luz dentro do programa da ANEEL.

Em trabalhos recentes foram construídos módulos supercondutores de fita YBCO (segunda geração) com quatro fitas em paralelo por elemento (comprimento 0,4 m), sendo então 16 elementos associados em série, como mostrado na Figura 29, permitindo que após a transição para o estado normal uma resistência entre 0,2 a 0,4 Ω fosse inserida no circuito para limitar a corrente durante a falta.

Conforme já descrito anteriormente, as fitas de segunda geração que são fabricadas sobre substrato de alta resistividade necessitam de proteção shunt para desviar parte da corrente conduzida após a transição para o estado normal de condução, sendo o valor da resistência shunt determinado experimentalmente para cada aplicação e projeto específico de limitador.

No exemplo apresentado pode-se observar na Figura 33, que cada elemento está protegido por uma resistência shunt que somente atuará depois da transição do supercondutor limitando o campo elétrico em cada elemento em $E = 50\text{V/m}$ que é um valor conservativo pois o limitador deve atuar pelo menos por 5 ciclos ou seja 80 ms. Em alguns projetos no exterior resultados são relatados onde o campo elétrico máximo pode atingir $E = 250\text{V/m}$, porém para limitação de corrente de alguns milisegundos seguido da abertura do disjuntor.



Figura 33 - Módulo limitador de corrente supercondutor constituído por 16 elementos associados em série [13].

Na Figura 34-(a) pode-se observar a amostra supercondutora de YBCO danificada após o ensaio de corrente crítica, pois ela estava sem a proteção de resistor shunt, consequentemente com o aumento da resistência no estado normal e o simultâneo aquecimento por efeito Joule, mesmo imersa em nitrogênio líquido, ocorreu a fusão interna do material. Na Figura 34-(b) o mesmo ensaio foi repetido porém com a proteção do resistor shunt, que evitou a degradação da amostra mesmo quando a corrente aplicada ultrapassou três vezes o valor da corrente crítica.



(a)



(b)

Figura 34 - Efeito de altas correntes elétricas sobre uma fita de YBCO (a) sem proteção shunt (b) com proteção shunt[42-Adaptado]

Na Figura 35 pode-se observar a divisão da corrente entre o elemento supercondutor e o resistor shunt [13], sendo o valor da corrente crítica das quatro fitas ligadas em paralelo de $I_c = 4 \times 72 \text{ A} = 288 \text{ A}$ e a falta aplicada de valor de pico de 737 A.

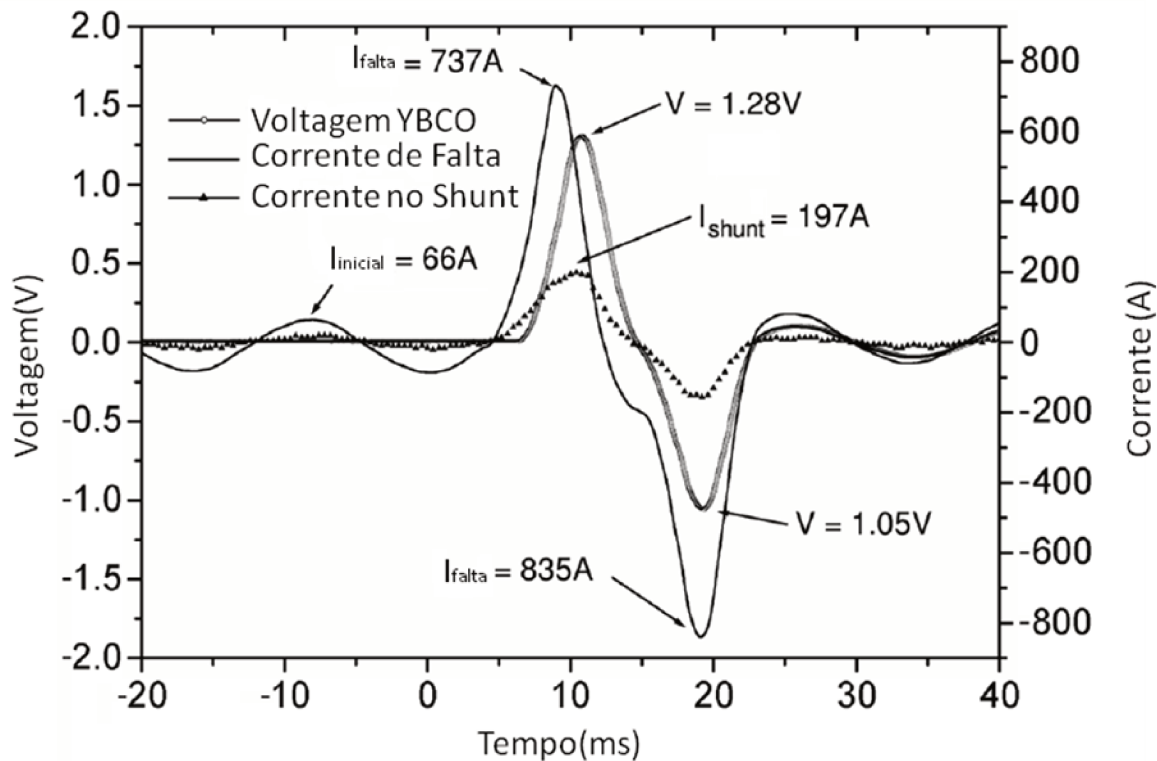


Figura 35 - Comportamento da corrente elétrica AC (800 A - pico) em um circuito com resistor shunt e fita YBCO [42-adaptado].

Nos ensaios realizados para este limitador operar em circuito de 220V limitando corrente de falta na faixa de 4kA a 7kA, por um fator de 10, ou seja, limitando o primeiro pico da falta em 700A, [43] os resultados podem- ser observados na Figura 36 , com a limitação da corrente após 1 ou 2 ms do início da falta, para corrente prospectiva de 7,4 kA.

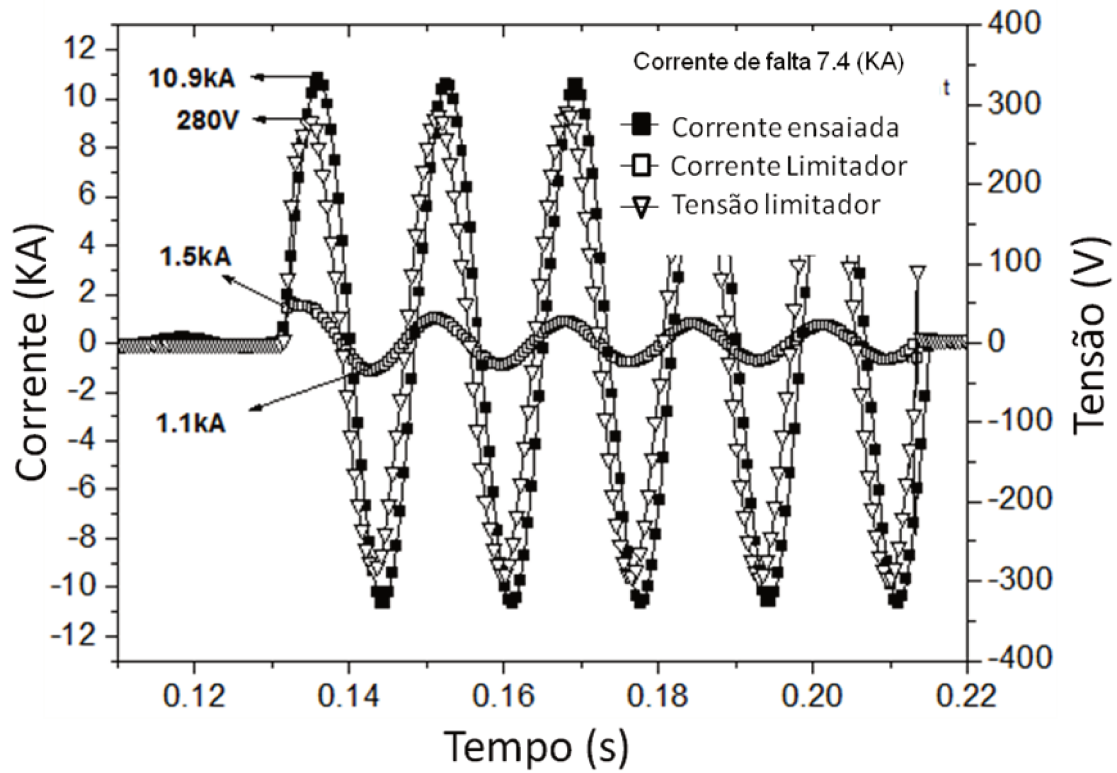


Figura 36 - Limitação de corrente de falta de 7,4 kA [42]

A partir das curvas obtidas para a tensão e corrente pode-se obter a curva característica da resistência elétrica inserida no circuito, que resultou na limitação de corrente de falta, apresentada na Figura 37 e que foi utilizada como referência para o presente trabalho.

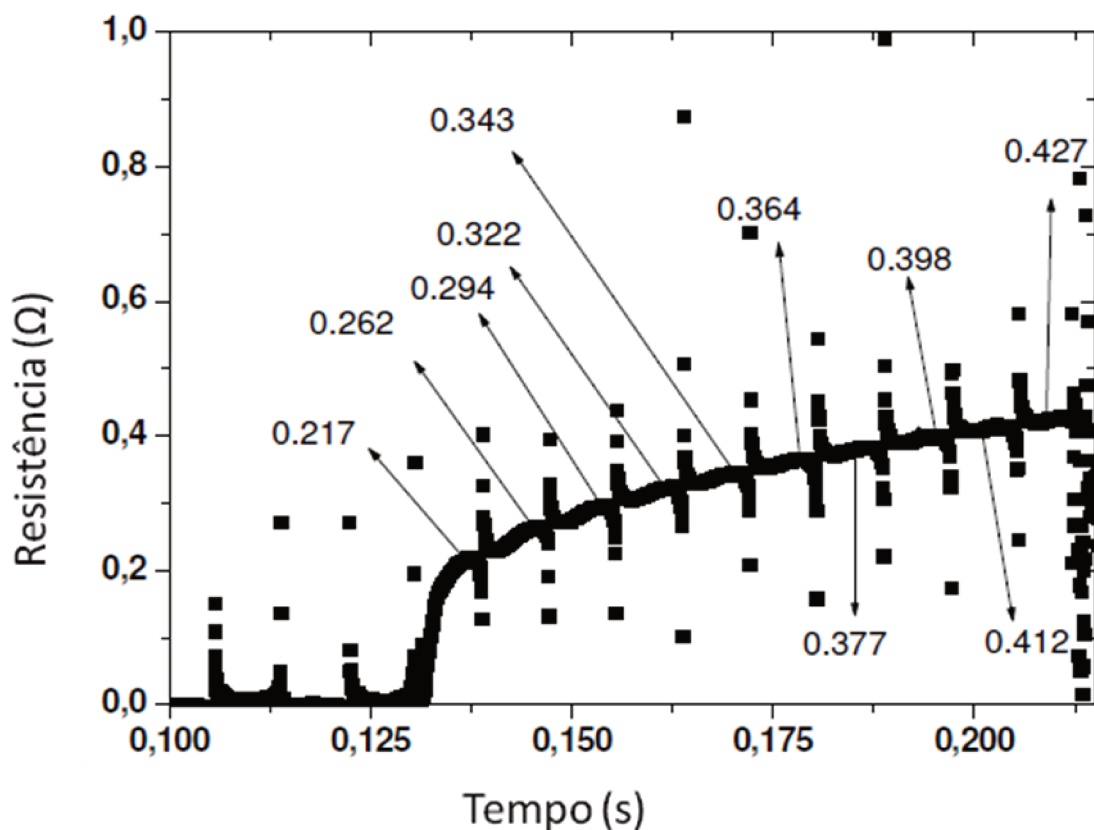


Figura 37 - Resistência inserida no circuito pelo módulo supercondutor após transição para estado normal [43]

Considerando que o módulo supercondutor existente tem uma resistência elétrica e sua característica de limitação conhecida, foi estudado sua utilização como limitador de corrente agora associado ao secundário de um transformador especial, com baixa reatância de dispersão, ou seja, do tipo de transformador de corrente convencional que permite por curto período de tempo a circulação de corrente de até 80 vezes a corrente nominal.

Capítulo 4

Plataforma de simulação e experimento modelado matematicamente

4.1 Introdução

Uma maneira adequada de estudar a operação dinâmica de um limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo (LCESR) é através de simulação dinâmica. O LCESR considerado para esta simulação foi construído e ensaiado em um trabalho de pesquisa realizado em laboratório conforme descrito em [13] utilizando 25 m de fita supercondutora de alta temperatura crítica do composto supercondutor de YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). Os resultados dessa pesquisa foram utilizados para a simulação aqui apresentada.

Simulou-se o efeito da transição do material supercondutor para o estado condutor normal quando uma resistência elétrica de valor variável com variação conhecida, é inserida no circuito elétrico.

Utilizando-se um modelo matemático para descrever a transição supercondutora, pode-se realizar a simulação da atuação do LCESR para limitar a corrente de falta em um circuito elétrico de potência.

Na simulação considerou-se um banco de resistores ligados em paralelo, que foram chaveados sequencialmente, para simular a operação do LCESR durante a atuação na limitação da corrente de falta.

Os valores das correntes elétricas de regime permanente e de falta destas simulações foram ajustados aos valores críticos determinados nos experimentos realizados, descritos em [13] e apresentados no capítulo 3 (figuras 36 e 37).

Também faz parte deste trabalho o desenvolvimento e teste de um ambiente computacional e de ferramentas adequadas para estudos dinâmicos de sistemas de energia elétrica com LCESR, permitindo uma simulação precisa e rápida de seu efeito com atuação entre 1 e 3 ms.

Para isso a plataforma de simulação utilizada nesse trabalho foi o aplicativo computacional MatLab, daqui para a frente denominado “programa” que nasceu como um programa para operações matemáticas sobre matrizes. Matrizes e vetores em geral compõem o núcleo do MatLab, uma vez que todos os dados no MatLab são armazenados na forma de matrizes.

Além de operações algébricas comuns com matrizes, esse programa fornece operações com vetores que permitem a manipulação rápida de conjuntos de dados de muitas maneiras diferentes. Também o MatLab fornece recursos de programação similares aos de outras linguagens de programação além de funções predefinidas para que a programação técnica se torne mais fácil e eficiente.

O MatLab possui uma ferramenta muito importante para a sua manipulação que é a interface gráfica com o usuário (GUI) que permite a sua utilização como ferramenta de desenvolvimento de aplicativos. Essa combinação de estruturas de dados vetoriais, recursos de programação e ferramentas GUI o torna uma ferramenta extremamente eficaz para a resolução de problemas em muitos campos.

Nesse trabalho a ferramenta principal utilizada é um pacote adicional chamado SimPowerSystems, para uso com o aplicativo Simulink, que é um aplicativo de simulação dinâmica do MatLab. Permite realizar simulações a partir de estruturas prontas representadas por símbolos que podem ser arrastados e ligados com outros permitindo uma programação gráfica. Porém, é fundamental o estudo e compreensão de toda a plataforma básica do MatLab,

pois todos os dados gerados pelo SimPowerSystems poderão ser tratados na área de trabalho desse programa.

4.2 O aplicativo SimPowerSystems

O aplicativo SimPowerSystems foi projetado para fornecer uma moderna ferramenta computacional que permite a cientistas, engenheiros e técnicos construírem de forma rápida e fácil modelos baseados em circuitos elétricos que simulem a operação dinâmica de sistemas de energia elétrica. O SimPowerSystems usa o ambiente Simulink, que lhe permite construir um modelo usando simples procedimentos de clique e arraste. Não apenas se pode desenhar a topologia do circuito rapidamente, mas também sua análise pode incluir interações com modelos da mecânica, controle térmico e de outras áreas de engenharia. Isso é possível porque todas as partes elétricas da simulação interagem com a extensa biblioteca de modelos Simulink. Como o Simulink usa a plataforma MATLAB como seu mecanismo de computação, os projetistas podem usar a caixa de ferramentas do MATLAB e os “Simulink blocksets”.

Os usuários podem rapidamente inicializar o SimPowerSystems. As bibliotecas contêm modelos típicos de equipamentos de energia tais como transformadores, parâmetros de redes elétricas, eletrônica de potência, máquinas elétricas e outros. Estes modelos são comprovados a partir de livros didáticos de artigos científicos, e suas validades são baseadas em experiências em sistemas de energia elétrica. Os recursos do SimPowerSystems para modelar uma rede elétrica típica são ilustrados em arquivos de demonstração. Para os usuários que desejam atualizar seus conhecimentos sobre a teoria do sistema de potência, há também a auto-aprendizagem através de estudos de caso.

4.3 Modelagem matemática dinâmica para estudo do comportamento do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo em transição do estado supercondutor para o estado normal.

O limitador de corrente elétrica supercondutor após sua transição para o estado normal insere uma resistência elétrica em série com o alimentador do circuito do qual se deseja limitar a corrente elétrica de falta ou de curto-circuito para ajudar em sua proteção.

Quando ocorre uma falta na rede elétrica o material supercondutor, conectado em série com a fonte e com a carga num alimentador de sistema de energia elétrica, fica sob a ação de uma alta corrente elétrica e transita do estado supercondutor para o estado de condutor normal inserindo uma resistência elétrica em série com o circuito considerado.

O valor dessa resistência não é constante variando com a temperatura do material. Dessa maneira pode-se chamar essa resistência de resistência dinâmica. O valor da resistência dinâmica a ser inserido pode ser ajustado à necessidade de cada circuito de distribuição de energia, porém a corrente de regime permanente definirá o número de fitas a serem associadas em paralelo e o valor da resistência desejada definirá o comprimento de fita supercondutora de YBCO necessário, na razão de $0,3\Omega/\text{m}$, ou razão equivalente, para diversas fitas associadas em paralelo.

4.3.1 Estudo de caso – Limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo conectado em série com o circuito alimentador

Nesta configuração o limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo atuará, durante a falta, inserindo uma resistência série no circuito, sem qualquer chaveamento, pois esta resistência esta associada à sua transição do estado supercondutor para o estado de condutor normal, limitando a corrente elétrica de falta por um fator entre 3 e 10 vezes, após alguns milissegundos.

No sistema de proteção convencional, após ser detectada a falta, a abertura do disjuntor ocorrerá somente após 100ms por se tratar de um sistema eletromecânico. Durante a detecção da falta até a abertura do circuito, todo o sistema elétrico estará submetido à corrente elétrica de falta ocasionando danos aos equipamentos dos consumidores. Isso não ocorrerá quando da utilização do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo que reduz o tempo de limitação para cerca de 1 ms, ou seja, protegendo de imediato a rede alimentada que

posteriormente será interrompida ou não com a abertura do disjuntor considerando-se as situações de curto-circuito permanente ou passageiro.

Os resultados experimentais deste tipo de limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo obtidos a partir de [13], foram utilizados para obtenção do comportamento dinâmico de um limitador de corrente elétrica colocado num sistema elétrico alimentado pela rede de 220V, submetido aos ensaios em corrente elétrica de curto-circuito de 1 a 10 kA (pico).

Os ensaios acima referidos foram realizados utilizando o circuito apresentado na Figura 38 e, como alimentador, um transformador trifásico de 3 MVA, 13.800/380V no laboratório do IEE/USP e os resultados estão publicados em [43], sendo que para cada nível de corrente elétrica de falta foram ajustados os valores de R_1 e de R_2 , mostrados na Figura 38 para que, inicialmente somados permitissem a circulação da corrente elétrica nominal de 200A eficazes e após o início da falta (curto circuitando-se R_2) a corrente elétrica atingisse o valor desejado entre 1 e 10kA, durante cinco ciclos.

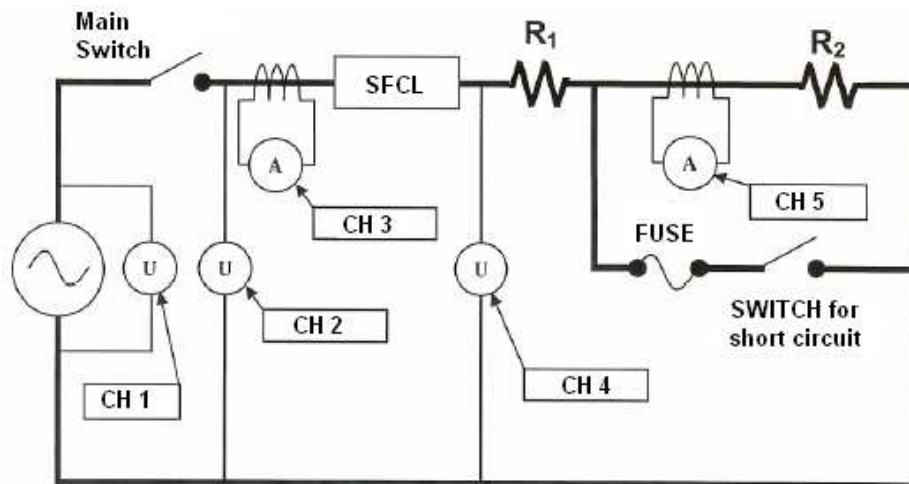


Figura 38 - Circuito de ensaio do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo para faltas de 1 a 10kA com carga resistiva [43].

A partir das curvas de tensão e de corrente publicadas em [43], obteve-se a curva da variação da resistência elétrica inserida no circuito para limitar a corrente elétrica de falta, cujos valores estão representados na Figura 37 do capítulo 3.

Durante a atuação do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo, que foi projetado para operar durante cinco ciclos (80ms), pode-se obter a curva da resistência elétrica equivalente do limitador.

No capítulo 3 foram detalhados os experimentos realizados em laboratório que possibilitaram a obtenção da curva e os valores de resistência elétrica inseridos automaticamente pelo limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo, resultando em uma resistência dinâmica.

Para simular a ação do limitador de corrente, operando durante um intervalo de tempo de cinco ciclos, no sistema experimental, foi realizada inicialmente uma modelagem com uma resistência de valor constante $R_{lim} = 0,2\Omega$, que corresponde à resistência inserida logo após a transição.

Para gerar a resistência dinâmica foram calculados os valores para uma associação contendo 10 resistores em paralelos, todos conectados resultando no valor de $R_{lim} = 0,2\Omega$, e posteriormente com a abertura de chaves ideais o valor do equivalente ajustado para reproduzir o comportamento obtido experimentalmente, ou seja, variando em cinco ciclos de 0,217 a 0,427 Ω .

Na Figura 39 pode-se observar o circuito independente utilizado para reproduzir a resistência dinâmica, que será obtida pela divisão da curva obtida de tensão pela de corrente elétrica, sendo que o comportamento desta última pode ser observado na Figura 40.

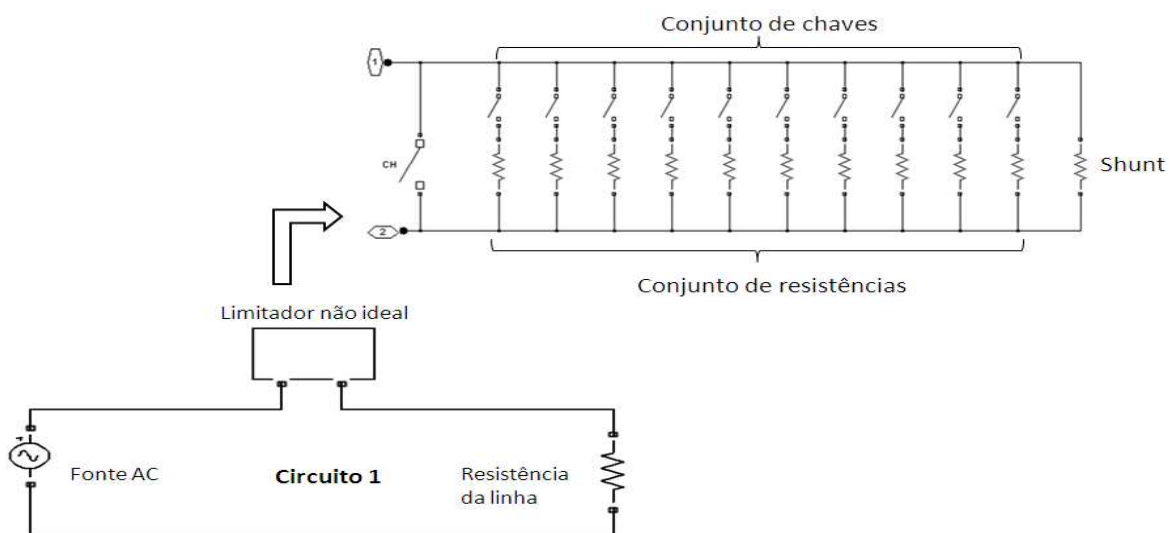


Figura 39 - Circuito formado por uma fonte de 10 V, um circuito equivalente do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo e uma carga inserida para ajustar a corrente de controle.

Na Figura 40 pode-se observar o decréscimo da corrente elétrica de curto-circuito em 5 ciclos, que corresponderá ao comportamento da resistência dinâmica quando da divisão do sinal de tensão pelo sinal de corrente elétrica neste circuito independente, que será acoplado ao simulador pelo Simulink.

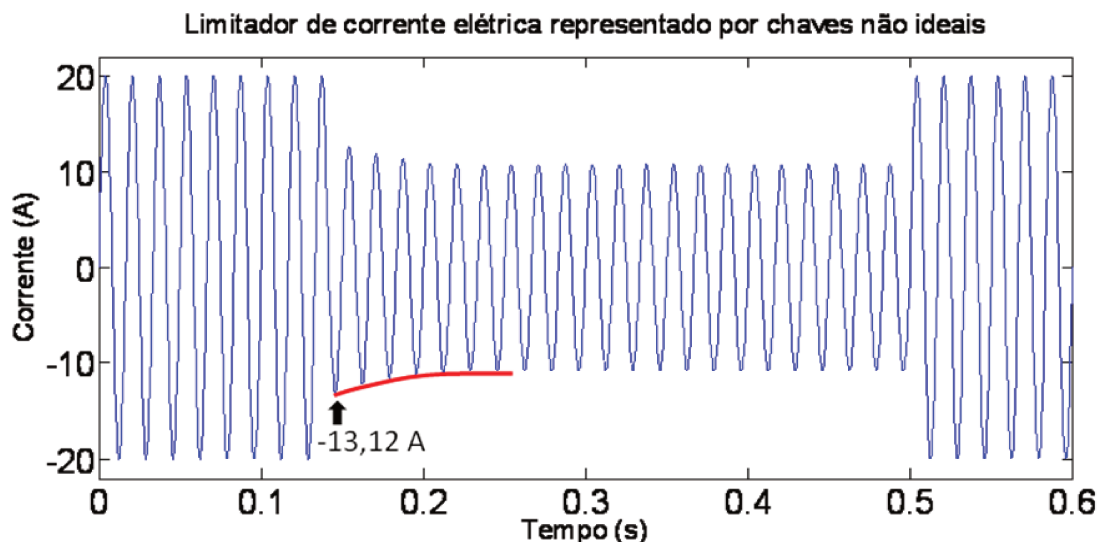


Figura 40 - Simulação do circuito do resistor equivalente. A seta preta indica o instante em que o material supercondutor começa a transitar do estado supercondutor (resistência elétrica aproximadamente 0) para o estado normal.

No circuito 2, apresentado na Figura 41, as chaves com os tempos devidamente ajustados para reproduzir a resistência dinâmica foram substituídas por chaves ideais com o objetivo de permitir um melhor ajuste nos tempos de atuação. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 42. O software Simulink oferece dois tipos de chaves, que são: a chave ideal e a não ideal. Na Figura 40 pode-se observar que a atuação das chaves não ideais, resulta que a amplitude do primeiro pico de corrente limitada foi em 13,12 A valor maior do que o da Figura 42 que foi em 12,48 A, para o mesmo valor de resistência elétrica inserida.

A diferença entre os dois resultados é devido ao tempo de atuação das duas chaves. A chave não ideal somente irá se abrir quando a onda cruzar o eixo dos tempos, após o instante programado para ela se abrir, já a chave ideal abre exatamente no instante programado. Para as simulações realizadas neste capítulo foram utilizadas as chaves ideais, para que o valor máximo da corrente de falta seja correspondente ao valor instantâneo da corrente quando a falta ocorrer, ou seja, mais próximo do caso real.

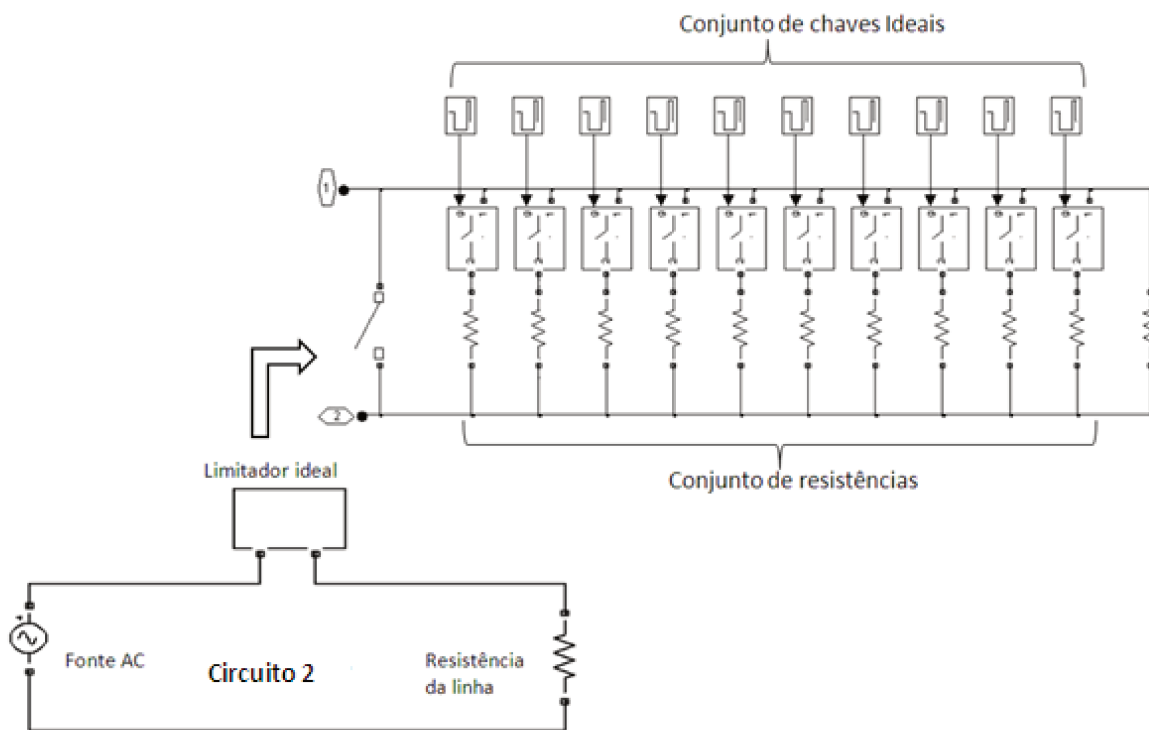


Figura 41 - Circuito 2 formado por uma fonte de 10 V, um circuito equivalente ao LCSR utilizando chaves ideais do Simulink

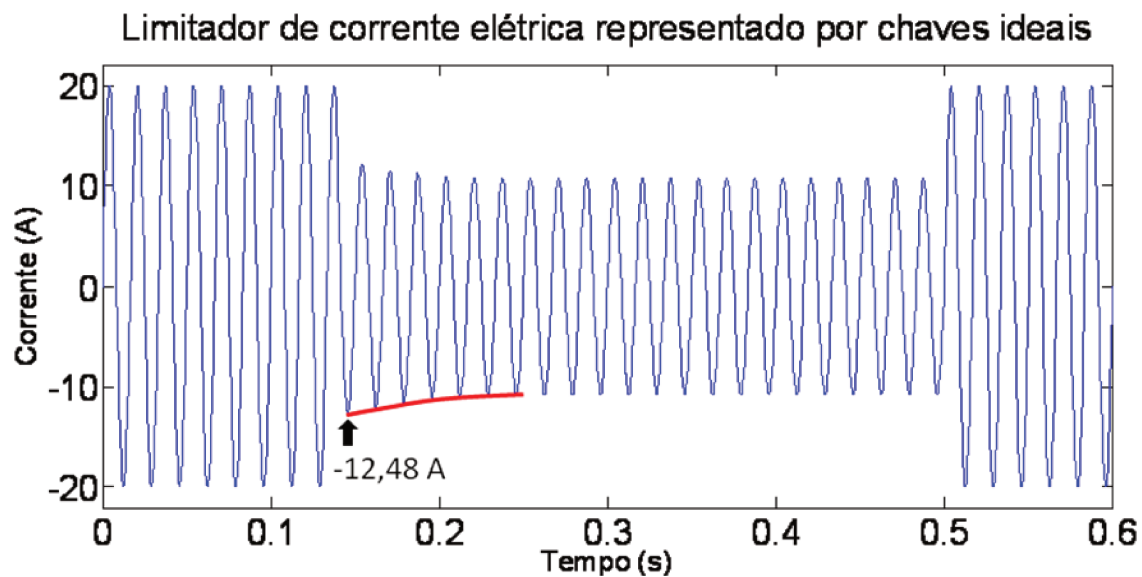


Figura 42 - Simulação do circuito do resistor equivalente modelo 2. A seta preta indica o instante em que o material supercondutor começa a transitar do estado supercondutor (resistência elétrica aproximadamente 0) para o estado normal.

Na Figura 43 pode-se observar que o comportamento obtido através do simulador para reproduzir a resistência dinâmica inserida pelo LCSR atende os requisitos mínimos para permitir agora a simulação do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo.

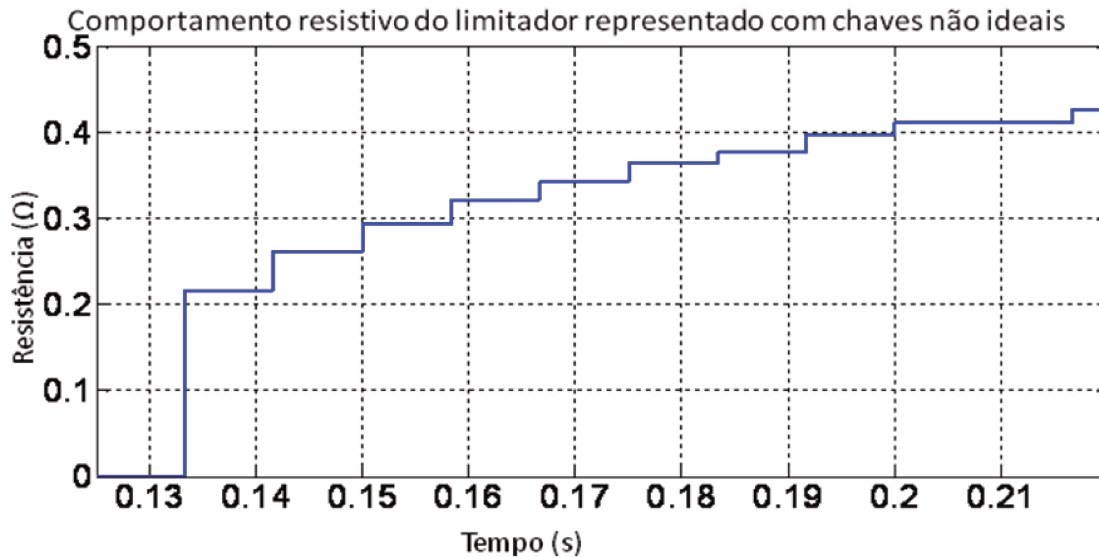


Figura 43 - Representação da resistência dinâmica associada à transição do material supercondutor do estado supercondutor para o estado normal num circuito com chaveamento ideal.

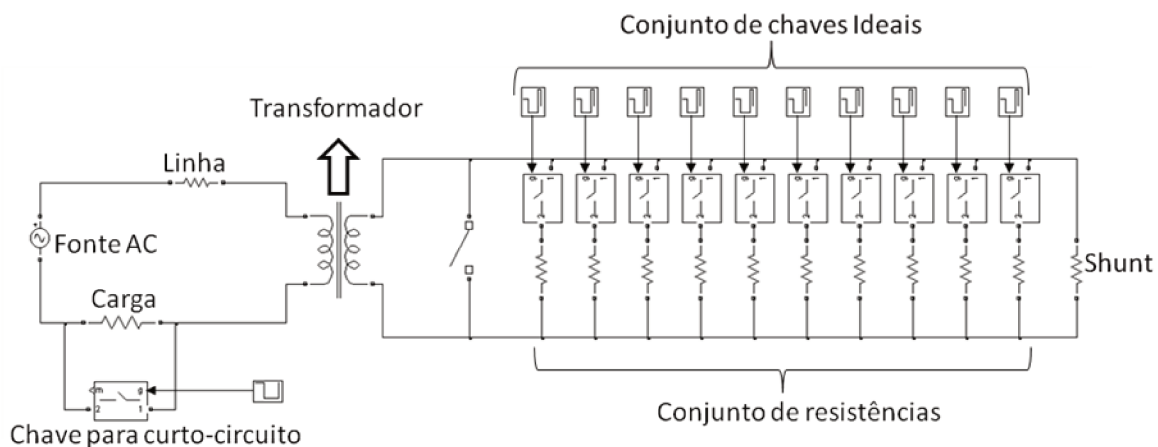


Figura 44 - Circuito com o elemento transformador e chaveamento ideal para todas as resistências que representam a transição do supercondutor.

A Figura 44 mostra o diagrama do circuito usado para simular a operação de um limitador de corrente supercondutor resistivo acoplado a um transformador. Como a resistência elétrica do material supercondutor varia com a temperatura durante a transição do estado supercondutor para o estado de condutor normal, a maneira encontrada de simular a transição foi a representação dessa resistência variável através de um conjunto de resistores chaveados em paralelo, que vão sendo desligadas à medida que o tempo passa e o curto-circuito permanece.

Capítulo 5

Estudo de caso em sistema elétrico de distribuição usando limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo com transformador

5.1 Introdução

A presença do transformador acoplado na estrutura do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo faz com que a resistência elétrica inserida em seu secundário curto-circuitado, quando o material supercondutor transita do estado supercondutor para condutor normal, seja maior quando vista pelo enrolamento primário ligado ao circuito que se deseja proteger. Isso faz com que se necessite de menor quantidade de material supercondutor permitindo também a possibilidade de controlar as condições de operação associadas a transição e recuperação do estado supercondutor.

Um dos parâmetros fundamentais para o projeto de um limitador de corrente elétrica supercondutor é o valor do campo elétrico máximo ($1,5 < E < 5$ V/cm) na região do material supercondutor, ou seja, quanto menor for a tensão no secundário menor será o comprimento da fita supercondutora necessária para limitar a corrente elétrica. Por outro lado, a corrente elétrica do secundário do transformador será elevada o que demandará associação de um número maior de fitas supercondutoras para suportar a corrente nominal. O projeto é que deve ditar como deverá ser o limitador para que a quantidade de fita supercondutora seja otimizada.

Com a diminuição de material supercondutor diminui-se a quantidade de líquido criogênico (nitrogênio no caso em questão) e as dimensões do criostato necessário para resfriar a unidade (~ 77 K), diminuindo-se consideravelmente tanto o custo de construção do limitador de corrente elétrica supercondutor como o de operação do mesmo.

5.2 Sistema elétrico de distribuição

A Figura 45 mostra a composição de um sistema de energia elétrica com uma fonte de tensão, o limitador de corrente elétrica supercondutor com transformador, a linha elétrica e a carga.

Ele representa, por exemplo, um alimentador de um sistema de distribuição onde a fonte de energia elétrica é o transformador de força do alimentador com uma potência da ordem de 20 MVA e tensão de linha de enrolamento secundário da ordem de 13,8 kV.

A carga pode ser representada por uma impedância constante com fator de potência 0,85 indutivo e com 1 pu de módulo, nas bases de potência e de tensão do transformador de potência do alimentador considerado, podendo portanto, ser representada por um resistor de resistência elétrica de 0,85 pu em série com uma reatância indutiva de 0,527 pu.

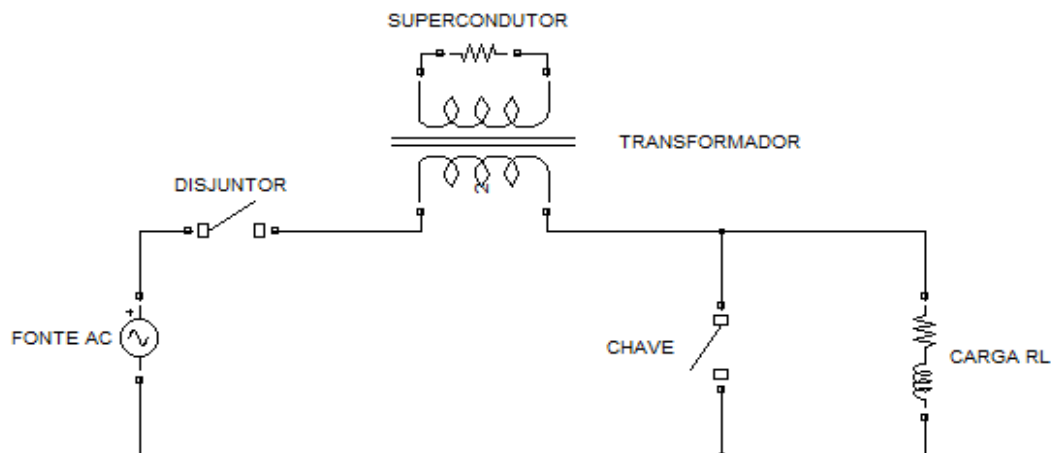


Figura 45 - Alimentador de um sistema de energia elétrica protegida pelo transformador limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo com transformador e carga do tipo indutivo (R- L série).

Na Figura 45, a chave é responsável por realizar o curto-circuito da carga do sistema elétrico em estudo. O objetivo do limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo com transformador é o de proteger o sistema de distribuição e o transformador de força contra sobrecorrente, mantendo a mesma em valor inferior ao valor de corrente elétrica de ruptura do disjuntor mas dentro da faixa de atuação do mesmo até o instante em que o disjuntor desarme abrindo o circuito.

É interessante lembrar que o disjuntor desarma em um tempo de alguns ciclos da corrente elétrica (cada ciclo em 60 Hz dura cerca de 16,67 ms) e que o material supercondutor transita para o estado condutor em cerca de 1 a 5 ms.

Evidentemente que uma aplicação importante do limitador de corrente elétrica é em situações quando o limite de ruptura do disjuntor é ultrapassado pela corrente de curto-circuito ou em casos que se deseja evitar a atuação do disjuntor durante um tempo curto até a retirada do curto-circuito sem necessitar religar o disjuntor, como é o caso de curto-circuitos provocados por galhos de árvores durante ventanias. Em qualquer desses casos o limitador de corrente elétrica deve ficar próximo ao transformador de força assim como o disjuntor fica.

A Figura 46 mostra o esquema de simulação do sistema elétrico usando um limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo com transformador para uso no aplicativo SimPowerSystems. Nele o transformador do limitador de corrente elétrica supercondutor é representado pelo seu circuito equivalente completo. Neste caso ele é substituído por uma fonte de tensão alternada de amplitude constante, o circuito elétrico completo para representar o sistema elétrico proposto necessita de um transformador de entrada. O esquema da Figura 46 para simular a atuação do limitador de corrente elétrica usa o circuito equivalente completo do transformador limitador visto do lado do seu primário, conforme mostrado no capítulo 4.

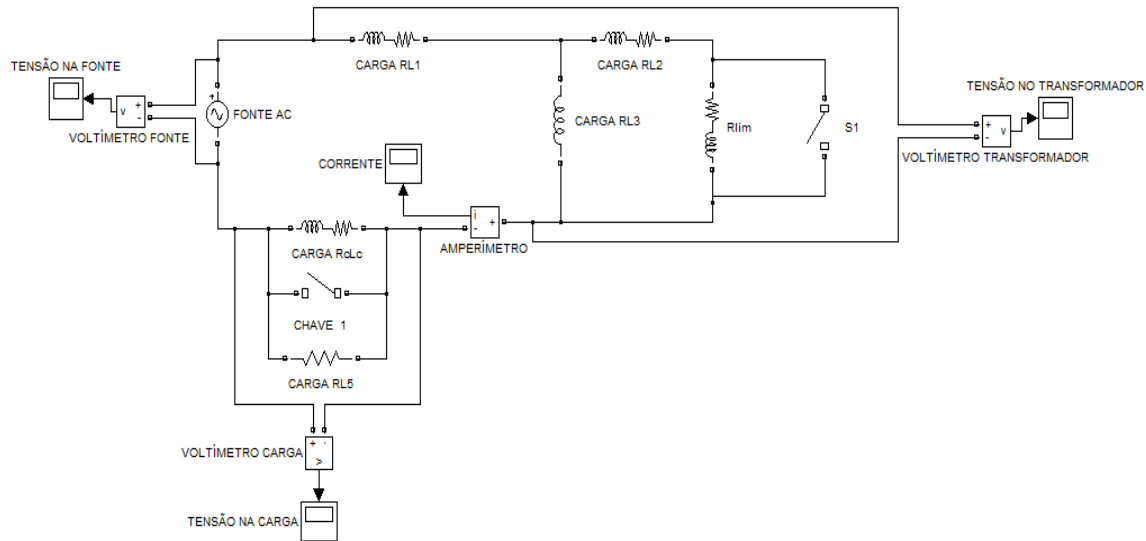


Figura 46 - Circuito equivalente do transformador do limitador de corrente elétrica ligado à uma fonte de tensão que alimenta uma carga indutiva (R_c , L_c série).

No caso de se representar o transformador de força no circuito acima mostrado o circuito equivalente do transformador de força de entrada deverá também ser utilizado, assim como a impedância da linha elétrica que liga o transformador de força à carga deve aparecer.

Em geral a impedância dessa linha elétrica é baixa quando comparada com a do transformador de entrada de modo que a sua impedância pode ficar incluída na impedância do transformador.

Como já visto também, o circuito equivalente do transformador pode ser representado, sem perda de generalidade, simplesmente pela sua impedância série (soma das impedâncias do primário e do secundário referidos a um dos lados do transformador).

Dessa forma o circuito equivalente do sistema proposto é constituído de um transformador de força trifásico de 20 MVA, 138/13,8 kV, um alimentador de distribuição, um transformador limitador de corrente elétrica e uma carga trifásica indutiva de fator de potência 0,85.

Um transformador de 20 MVA acima mencionado apresenta resistência elétrica de enrolamentos de primário e de secundário referidos de cerca de 2% (0,02 pu nas bases de suas características elétricas nominais que são: $S_b=20$ MVA e $V_b=13800$ V) e reatância indutiva de

enrolamentos de primário e de secundário de cerca de 10% (0,10 pu nas bases do transformador de força acima mencionadas). A impedância do cabo do alimentador foi incluída na impedância do transformador.

Para o transformador do limitador, que deverá ser da ordem de 1 MVA, 13,8 kV, admite-se como resistência elétrica de enrolamentos de primário e de secundário cerca de 1% (0,01 pu também nas bases do transformador de força) e reatância indutiva de enrolamentos de primário e de secundário referidos ao enrolamento de primário de cerca de 5% (0,05 pu nas bases do transformador de força).

Dessa forma o circuito elétrico equivalente por fase para simulação do sistema elétrico constituído de um alimentador de alta tensão de distribuição fica representado como se vê na Figura 47.

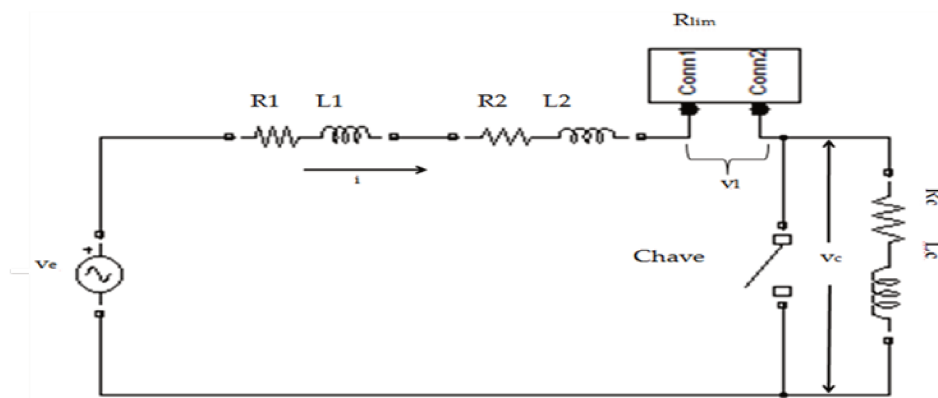


Figura 47 - Circuito equivalente simplificado por fase, em pu, de um alimentador de alta tensão de distribuição com limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo com transformador limitador ($R_1=0,02$ pu ; $L_1=0,1$ pu; $R_2=0,01$ pu; $L_2=0,05$ pu; $R_c=0,85$ pu; $L_c=0,527$ pu nas bases do transformador de força).

Aplicando-se a tensão representada no tempo por $v_1 = \sqrt{2} \times 0,6409 \times \cos(377t + 0,100755)$ pu no circuito com o transformador limitador de corrente elétrica em curto-circuito obtém-se os resultados mostrados nas Figuras 48 a 53. A razão de se utilizar a tensão de fase v_1 acima

mencionada e não $v_1 = \sqrt{2} \times (1/\sqrt{3}) \times \cos(377t)$ pu foi porque se desejou ter essa última tensão na carga do sistema elétrico, como é comum em estudos de sistemas de energia elétrica.

Resolvendo o sistema elétrico da Figura 46 usando o aplicativo SimPowerSystems obteve-se as curvas: a) da tensão terminal da fonte de alimentação do sistema (tensão do barramento de alta tensão visto do lado de 13,8 kV) e da tensão na carga do sistema colocado como referência no valor nominal eficaz de $(1/\sqrt{3})$ pu com ângulo zero (Figura 48), b) da diferença entre a tensão instantânea de entrada e a tensão instantânea na carga que mostra a queda de tensão instantânea que se tem no circuito elétrico em regime permanente (Figura 49), c) da tensão de alimentação do sistema e da corrente elétrica nominal do circuito passando por todos os seus elementos (Figura 50), d) da tensão nos terminais do transformador em regime permanente (Figura 51) para mostrar sob qual tensão ficará o transformador do limitador de corrente em regime permanente do sistema elétrico em estudo.

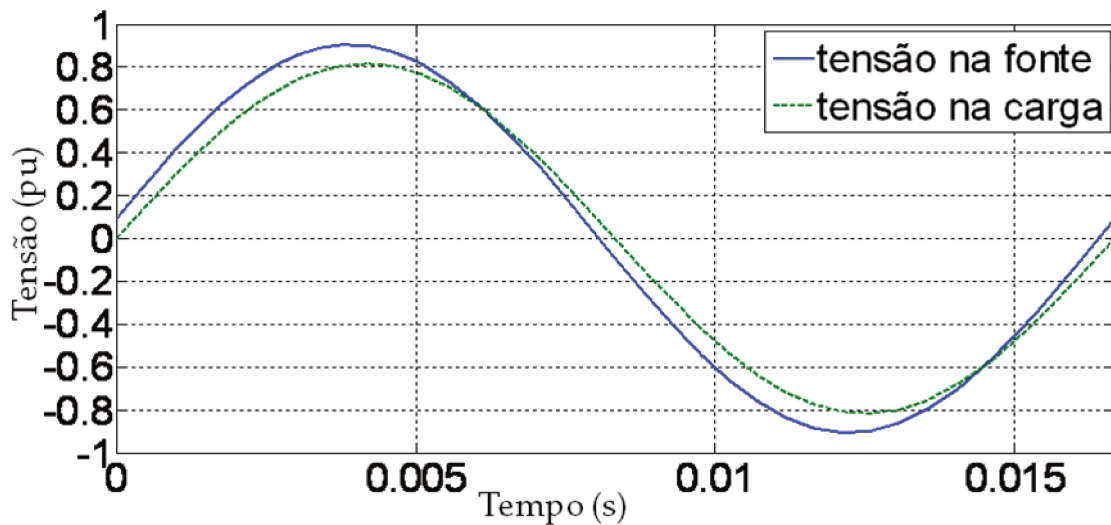


Figura 48 - Tensão terminal da fonte de tensão e tensão na carga.

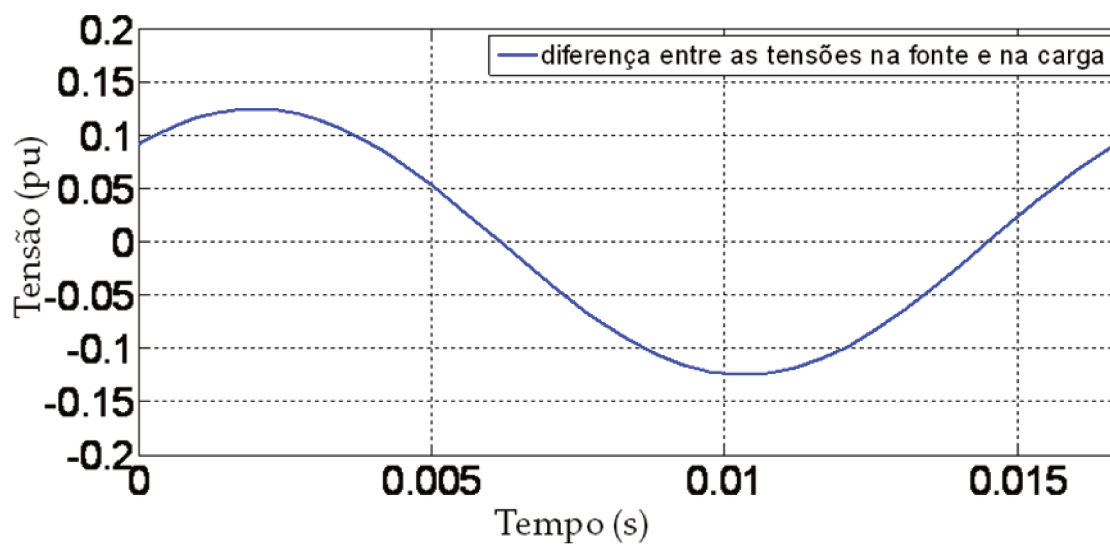


Figura 49 - Diferença entre a tensão de entrada e a tensão na carga.

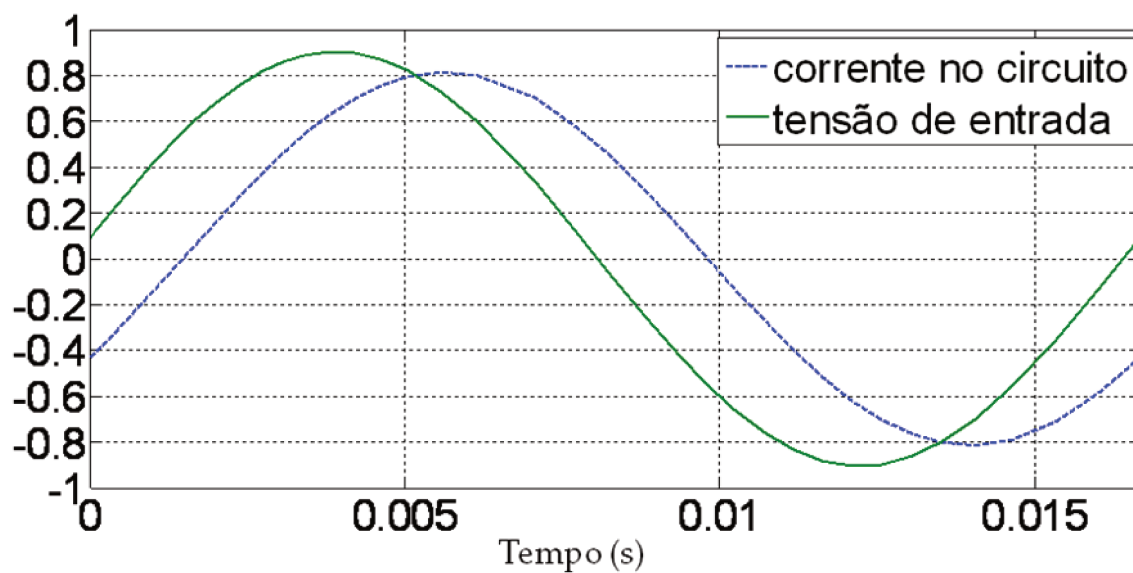


Figura 50 - Tensão de alimentação do circuito e corrente elétrica no circuito.

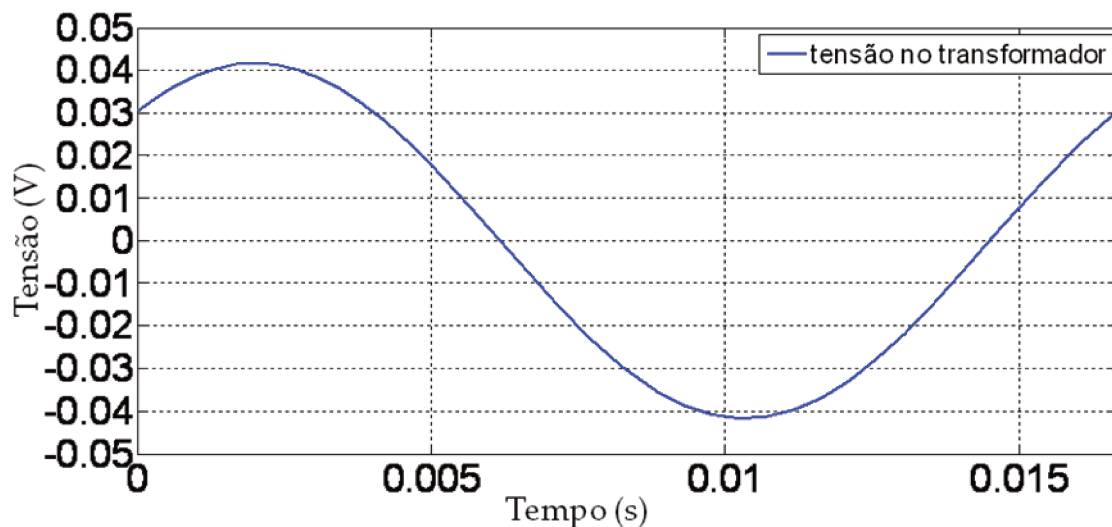


Figura 51 - Tensão nos terminais do transformador

Observa-se na Figura 51 que houve uma queda de tensão considerável de aproximadamente (8,83 %), em valor eficaz, em todo o circuito que inclui o transformador de força e o transformador do limitador de corrente elétrica, como mostra a Figura 49. Entretanto essa queda de tensão é suportável para o sistema, bastando para isso regular a tensão do transformador alimentador. Com essa tensão de entrada obtém-se a tensão nominal desejada na carga de 1 pu (valor eficaz).

Nas condições nominais de operação do sistema a potência aparente do transformador do limitador de corrente, em pu, é dada pela expressão abaixo onde: V_t é a tensão eficaz de regime permanente do transformador e I é a corrente eficaz do circuito

$$S_t = 3 \times V_t \times i_t = 3 \times 0,02944 \times 0,5773 = 0,05099 \text{ pu (1,02 MVA)}$$

Ajustada a tensão de entrada para seu valor correto $V_1 = \sqrt{2} \times 0,6409 \times \cos(377t + 0,100755)$, insere-se num dado instante (instante da ocorrência do curto-circuito), no enrolamento secundário do transformador limitador de corrente elétrica, a fita supercondutora, através do fechamento da chave mostrada na Figura 48.

Na simulação essa operação consiste em inserir um resistor de resistência elétrica variável em pu (nas mesmas bases do secundário do transformador de força) em série com a impedância do transformador limitador de corrente, como já descrito no capítulo 4.

Observa-se na Figura 52 o fenômeno da limitação de corrente elétrica mostrando que o esquema proposto, baseado em experimento realizado em laboratório [13], funciona bem também na simulação.

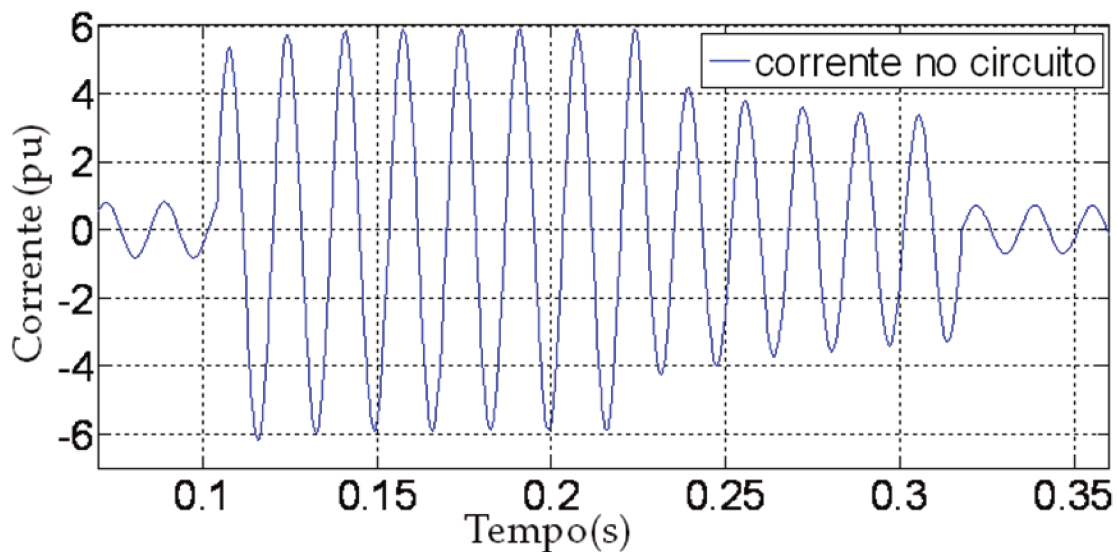


Figura 52 - Corrente de curto-circuito sem o material supercondutor e corrente de curto-circuito com o material supercondutor com resistência elétrica variável do limitador de corrente

A ocorrência do curto-circuito se deu no instante (0,104 s) e a entrada da primeira resistência elétrica do limitador resistivo ocorreu em 0,225s. A resistência elétrica do limitador de corrente da Figura 52 é apresentada no capítulo 4.

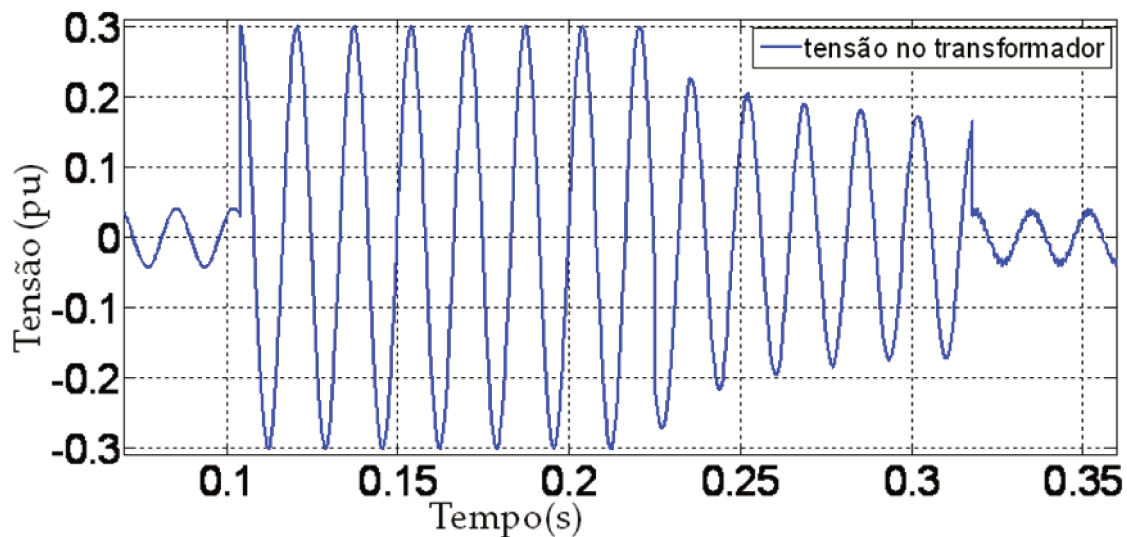


Figura 53- Tensão sobre o transformador limitador de corrente em operação nominal, curto-circuito, limitação do curto-circuito e nominal no final.

Entretanto há que se realizar uma discussão a respeito desse resultado obtido. Efetivamente houve uma redução da corrente de curto-circuito provocado pela inserção do material supercondutor que era o objetivo desejado. Porém o transformador limitador de corrente elétrica supercondutor introduziu no circuito elétrico uma queda de tensão em regime permanente sob condição nominal de operação, que deve ser compensada com regulador de tap ou regulador de tensão.

Essa queda de tensão poderia ser menor se o transformador do limitador de corrente tivesse uma impedância menor do que a que ele apresentou, ou seja, resistência elétrica menor do que 1 % e reatância de dispersão menor do que 5% nas bases do transformador de força de entrada (20 MVA, 13,8 kV).

Entretanto o circuito equivalente e a simulação indicam dois problemas importantes para esse transformador limitador: a) o transformador limitador deve suportar uma tensão de 13,8 kV durante o tempo em que houver um curto-circuito na rede elétrica; portanto a isolamento desse transformador deve ser de 13,8 kV, embora em regime permanente ele vá trabalhar somente em cerca de 400 V no seu primário como mostrou a simulação da (Figura 53), b) como já se viu anteriormente a potência do transformador trifásico limitador de corrente elétrica deve ser da

ordem de 1 MVA, c) a resistência elétrica e a reatância de dispersão do transformador limitador de corrente elétrica (R_L e X_L), nas suas respectivas bases nominais, devem apresentar valores extremamente baixos como mostram os cálculos a seguir, ao se realizar a mudança de bases desses parâmetros para as respectivas bases do transformador do limitador (1 MVA e 13,8 kV):

$$R_L = 0,01 pu \times (13800^2 / 20MVA) / (13800^2 / 1MVA) = 0,0005 pu = 0,05\%$$

$$X_L = 0,05 pu \times (13800^2 / 20MVA) / (13800^2 / 1MVA) = 0,0025 pu = 0,25\%$$

A pergunta que fica então é a seguinte: é possível construir um transformador de 1 MVA, 13,8 kV de tensão no enrolamento primário e tensão de enrolamento de secundário a definir e dependente do problema de limitação de corrente que se tenha?

Capítulo 6

Conclusões e propostas para novos trabalhos

Neste trabalho de mestrado foi realizado um estudo de uma das possibilidades de construção de um limitador de corrente elétrica supercondutor resistivo usando fitas supercondutoras de segunda geração e um transformador para “amplificar”, no primário, o efeito do valor da resistência elétrica da fita supercondutora, instalada no secundário do transformador, quando esse material transita do estado supercondutor para o estado condutor normal, permitindo usar o efeito da introdução instantânea de resistência elétrica em série num circuito elétrico sob falta ou curto-circuito.

Após os estudos e simulações realizadas terminou-se o trabalho com a seguinte questão: é possível construir um transformador de 1 MVA, 13,8 kV de tensão no enrolamento primário e tensão de enrolamento de secundário a definir e que dependa da limitação de corrente que se deseja ter e que tenha reatância de dispersão da ordem de 0,25 % nas bases nominais de potência aparente e de tensão de enrolamento primário acima mencionadas?

Essa pergunta, evidentemente, cabe porque a limitação de corrente, neste caso aqui desenvolvido e discutido, está intimamente ligada à relação de espiras do transformador limitador, à quantidade de fita supercondutora a ser usada e ao preço da fita supercondutora e, conseqüentemente ao limitador de corrente produzido.

Porém mais ainda está ligada à possibilidade de se poder construir um transformador com reatância de dispersão muito baixa e destoante completamente dos transformadores que

atualmente são usados nas diversas funções dentro de um sistema de energia elétrica ou dentro de indústrias e prédios comerciais e residenciais.

É importante frisar que a literatura sobre esse tipo de limitador é vasta porém, salvo melhor juízo, os pesquisadores trataram de limitadores de corrente elétrica supercondutores resistivos com transformador de pequena potência em geral, não analisando a possibilidade de uso em alimentadores de sistemas de distribuição de energia elétrica.

A diminuição drástica da reatância de dispersão, como os números apresentados no capítulo 5 mostram que essa não é uma tarefa simples. No que diz respeito à resistência elétrica de um transformador é sempre possível diminuí-la. Para isso basta aumentar a seção transversal dos condutores do transformador. Obviamente é uma solução cara e que aumenta o custo do transformador, porém é uma solução factível do ponto de vista tecnológico.

Entretanto a diminuição da reatância de dispersão é mais complicada porque exigirá uma relevante pesquisa sobre configurações de transformadores envolvendo núcleo magnético e enrolamentos que precisará ser realizada usando necessariamente técnicas de elementos finitos.

Essa sugestão é feita neste trabalho e certamente será tema de desenvolvimento de pesquisa do grupo que trabalha nessa área na FEEC/UNICAMP em conjunto com a EEL/USP.

Referências bibliográficas

- [1] GERALD, B. High-Temperature Superconductivity. 1ª edição. Academic Press-Harcourt Brace Jovanovich, 4 dez. 1991. p. 199.
- [2] HOMRICH, Roberto Petry. Limitador de corrente supercondutor resistivo monofásico: projeto, construção e ensaio. 26 de nov. 2001. p. 385. Tese. Unicamp. Campinas, Brasil, 26 de nov 2001.
- [3] JOHN, B.M. Theory of Superconductivity. 17ª edição. Academic Press-New York and London, 1964. p. 486.
- [4] TINKHAM, Michael. Introduction to Superconductivity. 1ª edição. International Student Edition, jun. 1975. p. 296.
- [5] WIKIPÉDIA. Suprecondutores do Tipo 1. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Type_I_superconductor>. Acesso em: 20 mar. 2011.
- [6] POOLE Jr., C. P. et al. Superconductivity. California: Academic Press, 1995. p. 230.
- [7] OOMEN, M. P. AC loss in superconducting tapes and cables. 2000. p. 354. Tese. Universiteit Twente, Netherlands, 2000.
- [8] BRUZZONE, Pierluigi. The index n of the voltage-current curve in the characterization and specification of technical superconductors, *Physica C*, v. 401, p. 7-14, 2003.
- [9] ROSE, Innes; RHODERICK, E. H. Introduction to Superconductivity. 2ª edição. Pergamon Press, 1978. p. 237.
- [10] KÜHLWEIN, L. Helium recovery: Tailor made and absolutely gastibht. Bauer Kompressoren GmH. 2007. Disponível em: <www.bauer-kompressoren.de/en/aktuell/news/2007/.070411.php>. Acesso em: 15 jun. 2010.

- [11] OH, S.S. et al. Developmet of Bi-2223 HTS tape and its application to coil and current leads. *Cryogenics*, v.42, n. 6-7, p. 377-382, 2002.
- [12] WORLD TECHNOLOGY EVALOATION CENTER. Disponível em: <www.wtec.org/loyola/scpa/05_02.htm>. Acesso em 07 out. 2010.
- [13] LAMAS, Jérika Suely. Projeto de construção de limitador de corrente supercondutor utilizando fitas de YBCO. 2009. p. 268. Dissertação. DEMAR/EEL/USP, Lorena, Brasil, 2009.
- [14] SHIGUE, Carlos Y. Effect of Combined Bending Strain and Thermal Cycling on the Voltage-Current Characteristic. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, jun. 2005.
- [15] METAL OXIDE TECHNOLOGIES. HTS Technology update. Disponível em: <http://www.metox.biz/tech_update>. Acesso em 09 out. 2010.
- [16] LI, X. et al. The Development of Second Generation HTS Wire at American Superconductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 6, out. 2008.
- [17] RUPICH, M. W. et al. The development of second generation HTS wire at American superconductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 3379-3382, 2007.
- [18] AMERICAM SUPERCONDUCTOR. Disponível em: <www.faqs.org/sec-filings/100527/AMERICAN-SUPERCONDUCTOR-CORP-DE-10-K/>. Acesso em: 10 out. 2010.
- [19] XU, Y. Processing Dependence of Texture, and Critical Properties of YBa₂Cu₃O_{7-d} Films on RABiTS Substrates by a Non-Fluorine MOD Method. *The American Ceramic Society*, v. 11 n. 89, p. 914-920, 2006.
- [20] SUPER POWER. Disponível em: <<http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>>. Acesso em: 11 out. 2010.
- [21] SIQUEIRA, et al. A Demanda Setorial por Energia Elétrica no Pós-Racionamento de 2001 In: X Encontro Regional de Economia, 2005. Fortaleza, Brasil. Fórum BNB de Desenvolvimento.
- [22] HEWTISON, L., BROWN, M, BALAKRISHNAN, R. Practical Power Systems Protection. Newnes: Elsevier, 2004.
- [23] GRAINGER, J.J. et al. Power System Analysis. 1ª edição. Mcgraw-Hill, 1994. p. 784.
- [24] DANN, W. M. Current- Limiting Reactors. *Transaction A.I.E.E.*, p. 23-27. jun. 1924.

- [25] B. C. HYDRO REVENUE REQUIREMENT HEARING, Disponível em: <<http://www.bchydro.com>>. Acesso em: 20 set. 2010.
- [26] TRENCH ELECTRIC. Disponível em: <http://www.trenchgroup.com/Trench%20Group/Trench_Reactors/Trench_Reactors.html>. Acesso em: 11 out. 2010.
- [27] WELLINGS, J. G. et al. The Short-Circuit Rating and Testing of Current-Limiting Reactors. *Transmission Section*, v. 89, Parte II. p. 473-479. jan. 1942.
- [28] ABB CALOR EMAG. Catálogo de produtos – Limitador Is. Disponível em: <www.abb.com>. Acesso em: 11 out. 2010.
- [29] G&W Electric Co. Catálogo de produtos. – Limitador CLiP. Disponível em: <www.gwelec.com/pdfs/Clip/CLiP2010_web.pdf>. Acesso em: 03 out. 2010.
- [30] KALSI, Swarn S. et al. HTS Fault Current Limiter Concept. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, v. 2, p. 1426-1430, jun. 2004.
- [31] NOE, Mathias et al. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Superconductor Science and Technology*, v. 20, n. 3, p. 15-29 2007.
- [32] NEUMUELLER, Heinz-Werner et al. Economically Viable Fault Current Limiters using YBCO coated Conductors. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, p. 1-5, jun. 2007.
- [33] JANOWSKI, Tadeusz et al. Superconducting Winding for Inductive Type SFCL Made of HTS Tape With Increased Resistivity. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, p. 1884-1887, jun. 2009.
- [34] MEEROVICH, Victor et al. High-Tc Superconducting Inductive Current Limiter for 1kV/25A Performance. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 5, n. 2, p. 1044-1046, jun. 1995.
- [35] YAMAGUCHI, Hiroshi et al. Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 18, n. 2, p. 668-671, jun. 2005.
- [36] BORGEST, W. Transformadores e Máquinas Elétricas. Apostila publicada pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica. 1967. p. 1-3.

- [37] CHOI, Hyo-Sang et al. Operational Characteristics of Hybrid-Type SFCL by Number of Secondary Windings With YBCO Films. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 16, n. 2, p. 719-722, jun. 2006.
- [38] CHOI, Hyo-Sang et al. Switching Properties of a Hybrid Type Supercconducting Fault Current Limiter Using YBCO Stripes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 12, n. 3, p. 1833-1838, set. 2002.
- [39] LIM, Sung-Hoon et al. Improvement of Current Limiting Capability of HTSC Elements in Hybrid Type SFCL. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 1807-1810, jun. 2007.
- [40] CAMACHO, J. R. Modelamento de saturação em transformadores. Disponível em: <http://www.camacho.prof.ufu.br/GEE074/trafo_dist.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2010.
- [41] JORDÃO, R. Guedes; Transformadores. 1ª edição. Editora Edgard Blücher. 2002. p.214.
- [42] BALDAN, Carlos A. et al. Test Results of a Supercconducting Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 1903-1906, jun. 2007.
- [43] BALDAN, Carlos A. et al. Test of modular fault current limiter for 220V line using YBCO coated conductor tapes with shunt protection. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, trabalho aceito para publicação em Julho 2011.