

Universidade Federal do Rio de Janeiro

LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO  
ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS SUPERCONDUTORES

Valcimar Silva de Andrade

2011



## LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS SUPERCONDUTORES

Valcimar Silva de Andrade

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

Orientador(es): Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Antônio Carlos Siqueira de Lima

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2011

LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ATRAVÉS DE  
DISPOSITIVOS SUPERCONDUTORES

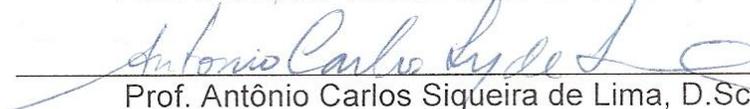
Valcimar Silva de Andrade

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

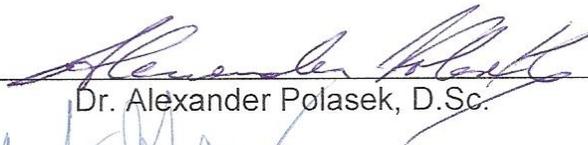
Examinada por:



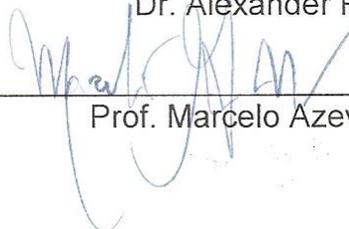
Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc



Prof. Antônio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.



Dr. Alexander Polasek, D.Sc.



Prof. Marcelo Azevedo Neves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2011

Andrade, Valcimar Silva de

Limitação da Corrente de Curto-Circuito Através de Dispositivos Supercondutores. Valcimar Silva de Andrade. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XVI, 143 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Sebastião Ércules Melo de Oliveira  
Antônio Carlos Siqueira de Lima.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 139-143.

1. Proteção de Sistemas Elétricos. 2. Limitadores de Corrente de Curto-Circuito. 3. Limitadores com Tecnologia Supercondutora. I. Oliveira, Sebastião Ércules Melo de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

A Nair das Dôres Silva de Andrade, minha mãe, e Vacir Cassimiro de Andrade, meu pai, por permanecerem ao meu lado, apoiando meus estudos e minhas escolhas, dando conselhos e orientando meus caminhos na vida.

Aos amigos que sempre acreditaram junto comigo nos meus sonhos e ideais.

Aos colegas e amigos de docência, que lutaram e lutam por uma educação de qualidade com boa formação para os alunos e melhores condições de trabalho para os professores.

Ao amigo Charles Araújo Pereira, que embora não esteja mais aqui, continua sempre presente na minha memória e no meu coração. Nossa amizade será eterna.

## **Agradecimentos**

A Deus, pelo dom precioso da vida e pelas oportunidades de formação humana e profissional.

Aos meus pais, irmãos e familiares pelos conselhos, incentivos, advertências e inúmeras orações.

Ao Professor Sebastião Ércules Melo de Oliveira, pela grandiosa atenção, paciência, estímulo, ensinamentos e valiosa orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Antônio Carlos Siqueira de Lima pela orientação e colaboração.

Ao Professor Marcelo Azevedo Neves, pela oportunidade de fazer uma iniciação científica na área de supercondutividade aplicada, pela enorme contribuição em minha formação, pelos conselhos e amizade.

Ao Físico Marco Antônio Pereira do Rosário, pelo suporte técnico imprescindível ao desenvolvimento deste trabalho, pelas ricas discussões em física e engenharia, e pela amizade sincera.

Ao Professor Alexander Polasek, que prontamente aceitou o convite para participação na banca de defesa desta dissertação.

Ao Professor Marcio Antônio Sens, pela contribuição nos ensaios e testes de laboratório através da utilização da grande infraestrutura do CEPEL.

Ao LMDS-UFRRJ pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho e de atuação como professor colaborador.

Aos amigos de pós-graduação: Silvângela, Rafael, Everton e Leonardo, pela ajuda e produtivas discussões.

Aos amigos: Adilson, Willian, Wellington, Wemerson, Paulo Igor, Gilberto, Dilma e Kléber, grandes amigos na graduação e na vida.

Aos amigos de Governador Valadares: Bruna, Marina, Manre, Kellen, Willian e Rafael, pelos estímulos e momentos de alegria.

Aos alunos e colegas de trabalho do CIEP 155 – Nelson Antelo Romar e do PVS-CEDERJ, pela oportunidade de trabalho em conjunto e pelo aprendizado sobre as realidades da educação em nosso país.

Aos amigos Paulo e Aparecida, um casal que me acolheu como neto inúmeras vezes.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação técnica e humana, e que também contribuíram para a conclusão deste trabalho. O meu sincero obrigado e que Deus ilumine o caminho de todos.

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

## LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS SUPERCONDUTORES

Valcimar Silva de Andrade

Setembro / 2011

Orientadores: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Antônio Carlos Siqueira de Lima

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta o estudo de um dispositivo limitador de corrente de falta supercondutor (SFCL – *Superconducting Fault Current Limiter*), desenvolvendo uma análise básica do mesmo. Trata-se de um protótipo de limitador supercondutor tipo resistivo de bancada, proposto através de projeto desenvolvido pelo LMDS-UFRJ. O protótipo é formado basicamente por uma Unidade Básica Supercondutora (UBS) em paralelo com uma impedância. Uma breve revisão sobre o fenômeno da supercondutividade, correntes de curto-circuito e limitação de corrente também é feita ao longo do corpo do texto. O objeto de estudo deste trabalho se insere no novo cenário de novas exigências dos sistemas elétricos de potência em termos de curto-circuito e no desenvolvimento crescente da supercondutividade aplicada, em especial a tecnologia de limitação de corrente. Adianta-se que os resultados dos ensaios de curto-circuito mostraram de fato a capacidade de limitação de corrente do dispositivo. Trata-se de um arranjo relativamente simples desenvolvido pelo LMDS, mas que contribui para o estudo de um tema cada vez mais relevante no Brasil e no mundo.

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

## CURRENT LIMITATION SHORT CIRCUIT DEVICES USING SUPERCONDUCTORS

Valcimar Silva de Andrade

September / 2011

Advisors: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Antônio Carlos Siqueira de Lima

Department: Eletrical Engeneering

This work studies a superconducting fault current limiter (SFCL) of the called resistive type, and develops an analysis of it. Such a prototype is of a bench type and it is a result of project developed by the LMDS-UFRRJ. The prototype consists basically of a Superconducting Basic Unit (UBS) in parallel with an impedance. A brief review on the phenomenon of superconductivity, short circuit current and short circuit current limit is also made throughout the text. The subject of this work fits with the new set of new requirements for eletric power systems in terms of short-circuit and the growing development of applied superconductivity, in particular the current limiting technology. The tests results of a short circuit experiments in fact showed the ability of the current limiting device. Using a relatively simple arrangement, the study of that SFCL of LMDS contributes to the study of an issue increasingly relevant for Brazil and worldwide.

## Sumário

Sumário .....	ix
Lista de Figuras .....	xii
Lista de Tabelas .....	xvi
Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1 – Breve Histórico do Trabalho .....	1
1.2 – Apresentação dos Capítulos .....	4
1.3 – Resumo dos Resultados Obtidos Neste Trabalho .....	7
Capítulo 2 – O Fenômeno da Supercondutividade .....	8
2.1 – A Descoberta do Fenômeno .....	8
2.2 – Caracterização do Estado Supercondutor – Parâmetros .....	11
2.3 – Propriedades Térmicas, Eletromagnéticas e Quânticas do Estado Supercondutor .....	16
2.4 – Supercondutores Tipo I e Tipo II .....	24
2.5 – Supercondutores de Alta Temperatura Crítica – O composto YBCO .....	29
Capítulo 3 – Limitação dos Níveis de Curto-Circuito .....	35
3.1 – Correntes de Curto-Circuito .....	35
3.1.1 – Tipos de Curto-Circuito .....	38
3.1.2 – Análise Básica do Curto-Circuito .....	40
3.1.2.1 – Curto-Circuito sem Carga .....	40
3.1.2.2 – Curto-Circuito com Carga .....	48
3.2 – Exigências dos Novos Níveis de Curto-Circuito .....	51
3.3 – Métodos de Limitação de Corrente Convencionais .....	53
3.3.1 – Reator Série com Núcleo de Ar .....	56
3.3.2 – Circuito Ressonante LC .....	61
3.3.3 – Dispositivo Pirotécnico .....	63
3.3.4 – Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida .....	65
3.3.5 – Dispositivos FACTS .....	66
3.3.5.1 – Princípio de Funcionamento do TCSC .....	67
3.3.5.2 – Princípio de Funcionamento do TPSC .....	68
3.3.6 – IPC - <i>Interphase Power Controller</i> .....	69
3.3.7 – HVDC - Transmissão em Corrente Contínua .....	70

3.4 - Dificuldades com os Métodos de Limitação de Corrente Convencionais ..	71
3.5 – Limitação de Corrente com Tecnologia Supercondutora .....	73
3.5.1 – SFCL – Resistivo.....	74
3.5.2 – SFCL – Núcleo Blindado .....	75
3.5.3 – SFCL – Núcleo Saturado .....	75
Capítulo 4 – Descrição do Protótipo Analisado e Teoria Básica .....	77
4.1 – Introdução .....	77
4.2 – Princípio de Operação e Parâmetros de Projeto do Limitador.....	77
4.3 – Construção do Protótipo de Limitador de Corrente Supercondutor .....	82
4.4 – Bancada de Testes .....	88
Capítulo 5 – Metodologia e Procedimentos Experimentais .....	90
5.1 – Introdução .....	90
5.2 – Ensaio e Medidas Realizadas no LMDS .....	91
5.3 – Ensaio e Medidas Realizadas no CEPEL .....	94
5.3.1 – Medidas de Resistência Elétrica e Indutância .....	94
5.3.2 – Ensaio de Rampa de Corrente .....	94
5.3.3 – Ensaio de Curto-Circuito .....	95
5.3.3.1 – Ensaio de Curto-Circuito Franco .....	96
5.3.3.2 – Ensaio de Curto-Circuito com o ramo RL.....	97
5.3.3.3 – Ensaio de Curto-Circuito com Disjuntor .....	97
5.3.3.4 – Ensaio de Curto-Circuito com o Limitador .....	97
5.3.4 – Levantamento de Possíveis <i>Hot Spots</i> .....	98
Capítulo 6 – Apresentação e Discussão dos Resultados .....	99
6.1 – Introdução .....	99
6.2 – Medidas de Resistência e Indutância do Ramo RL .....	99
6.3 – Determinação da Corrente Crítica da Amostra .....	100
6.4 – Ensaio de Rampa de Corrente .....	102
6.5 – Ensaio de Curto-Circuito SFCL Trifásico - LMDS .....	103
6.6 – Ensaio de Curto-Circuito - CEPEL .....	105
6.6.1 – Ensaio de Curto-Circuito - Grupo – 1 .....	109
6.6.1.1 – Ensaio de Curto-Circuito Franco 1 .....	109
6.6.1.2 – Ensaio de Curto-Circuito com Disjuntor 1 .....	110
6.6.1.3 – Ensaio de Curto-Circuito com o Ramo RL 1 .....	111
6.6.1.4 – Ensaio de Curto-Circuito com o Limitador 1 .....	112

6.6.2 – Ensaio de Curto-Circuito - Grupo - 2 .....	115
6.6.2.1 – Ensaio de Curto-Circuito Franco 2 .....	115
6.6.2.2 – Ensaio de Curto-Circuito com Disjuntor 2 .....	116
6.6.2.3 – Ensaio de Curto-Circuito com o Ramo RL 2 .....	117
6.6.2.4 – Ensaio de Curto-Circuito com o Limitador 2.....	118
6.7 – Problemas de Contato Elétrico .....	120
6.8 – Formação de <i>Hot Spot</i> .....	121
6.9 – Perfil dos Sinais de Corrente e Tensão .....	122
Capítulo 7 – Conclusões e Trabalhos Futuros .....	123
7.1 – O Desempenho do Limitador de Corrente Analisado.....	123
7.2 – Perspectivas para Emprego em Níveis Maiores de Potências .....	124
7.3 – Melhorias das Medidas .....	125
7.4 – Trabalhos Futuros: Cabo Supercondutor com Função Limitadora .....	125
Anexo I – Aplicações da Supercondutividade em Sistemas Elétricos de Potência .....	127
Anexo II – Resumo dos Possíveis Impactos de Dispositivos Limitadores de Corrente nos Arranjos de Proteção .....	137
Anexo III – Alguns Projetos de Limitadores de Corrente Supercondutores ao Redor do Mundo .....	138
Referências Bibliográficas .....	139

## Lista de Figuras

Figura 1 – Modelo linear para a dependência da resistividade ( $\rho$ ) de metais com a temperatura ( $T$ ) e resistividade residual .....	9
Figura 2 – (a) Heike Kamerlingh Onnes [3] (b) Adaptação da curva original de resistência elétrica versus temperatura de uma amostra de mercúrio, reportada por Kamerlingh Onnes no anúncio da descoberta da supercondutividade em 1911. Adaptado de [4].....	10
Figura 3 – Representação esquemática da variação de resistência elétrica de amostras de Pb e Sn em função da temperatura – comparação com a curva de uma amostra de Hg. Adaptada de [3].....	10
Figura 4 – Propriedades características do estado supercondutor. ....	12
Figura 5 – Exemplos de emprego de bobinas supercondutoras – (a) Aparelho de Ressonância Magnética Nuclear [5] e (b) Acelerador de Partículas do CERN (LHC) [5]. .....	13
Figura 6 – Comportamento de uma amostra de material supercondutor em termos da temperatura. ....	14
Figura 7 – A relação entre os três parâmetros que caracterizam o estado supercondutor para alguns materiais supercondutores [4]. ....	16
Figura 8 – Comportamento da resistividade em função da temperatura para um metal puro e perfeito (idealização) e para um metal impuro (caso real) [7]. ....	18
Figura 9 – Esquema ilustrativo do comportamento de um hipotético condutor ideal quando um campo magnético é aplicado após a transição. Adaptado de [7]. ....	20
Figura 10 – Esquema ilustrativo do comportamento de um hipotético condutor ideal quando o campo magnético atua antes da transição. Adaptado de [7]. ....	21
Figura 11 – Expulsão de fluxo magnético em uma amostra supercondutora devido à transição para o estado supercondutor ( $H < H_C$ ) - Efeito Meissner. Adaptada de [7]. .....	22
Figura 12 – Penetração de campo magnético em uma amostra de supercondutor tipo I. .....	23
Figura 13 – Comportamento típico da magnetização ( $M$ ) de um supercondutor tipo I em termos do campo magnético aplicado ( $H$ ), em unidades arbitrárias (u.a.). Adaptado de [9]. .....	25
Figura 14 – Comportamento típico da magnetização ( $M$ ) de um supercondutor tipo II em termos do campo magnético aplicado ( $H$ ), em unidades arbitrárias (u.a.). Adaptado de [9]. .....	26
Figura 15 – Diagrama $H \times T$ de dois sistemas supercondutores: (a) tipo I e (b) tipo II. O campo magnético é dado em unidades arbitrárias (u.a.). Adaptado de [7] .....	27

Figura 16 – Esquema com a evolução dos valores de temperatura crítica até 1990. Adaptado de [9].	29
Figura 17 – Estrutura cristalográfica do YBCO. Adaptada de [14].	30
Figura 18 – Esquema representando a movimentação da rede de vórtices em um supercondutor tipo II.	31
Figura 19 – Exemplos de blocos cilíndricos de YBCO comercializados pela CAN SUPERCONDUCTORS. Figura extraída do site da empresa [16].	33
Figura 20 – Indicação dos tipos de curto-circuito e circulação das correntes. Adaptado de [17]	39
Figura 21 – Modelo de circuito de corrente alternada monofásico para análise de curto-circuito sem carga. Adaptado de [17].	41
Figura 22 – Variação da corrente de curto-circuito monofásico sem carga, de suas componentes e da tensão da fonte. Adaptado de [17].	42
Figura 23 – Constante de tempo da componente contínua em unidades arbitrárias (u.a) em função da razão entre a resistência e a reatância indutiva da rede.	46
Figura 24 – Modelo de circuito de corrente alternada monofásico para análise de curto-circuito com a presença de carga. Adaptado de [17].	48
Figura 25 –(a) Esquema elétrico de um reator de núcleo de ar. (b) Foto de um reator de núcleo de ar instalado em subestação de Mogi das Cruzes-SP, adaptada de [24].	57
Figura 26 - Análise de circuito monofásico em operação normal sem reator de núcleo de ar.	58
Figura 27 - Análise de curto-circuito monofásico sem a presença de reator de núcleo de ar	59
Figura 28 - Análise de curto-circuito monofásico com a presença de reator núcleo de ar	59
Figura 29 – As duas topologias de limitadores de corrente de curto-circuito baseados em circuitos ressonantes: (a) série e (b) paralelo.	62
Figura 30 – Esquema básico de um dispositivo limitador de corrente de curto-circuito pirotécnico. Adaptado de [28].	64
Figura 31 – Esquema básico de um TCSC para função de limitação de curto-circuito. Adaptado de [24].	67
Figura 32 – Esquema básico de um TPSC para função de limitação de curto-circuito. Adaptado de [24].	68
Figura 33 – Esquema básico de um IPC. Adaptado de [24].	70
Figura 34 – Esquema básico de um SFCL tipo híbrido. Adaptado de [2]	74

Figura 35 – Esquema de um SFCL de núcleo blindado. Adaptado de [2] .....	75
Figura 36 – Protótipo de SFCL da Zenergy Power em operação [2]. .....	76
Figura 37 – Esquema da circulação de corrente na unidade limitadora: (a) antes da falta e (b) após a falta. ....	81
Figura 38 – Esquema da Unidade Básica Supercondutora – UBS. L é altura, a o raio da haste de injeção de corrente e b o raio do anel coletor. ....	84
Figura 39 – Distribuição radial de corrente no modelo de UBS. ....	85
Figura 40 – Bancada de testes do limitador no LMDS-UFRRJ [1]. ....	89
Figura 41 – Esquema do método de quatro pontas. ....	91
Figura 42 – Resistor utilizado como carga nos ensaios realizados no LMDS-UFRRJ. ....	92
Figura 43 – Esquema do aparato de teste do SFCL Trifásico [1]. ....	93
Figura 44 – Esquema de medição para ensaio de rampa de corrente com a UBS. ....	95
Figura 45 – Fonte de corrente utilizada no levantamento da corrente crítica (CC) da amostra supercondutora utilizada na UBS. ....	101
Figura 46 – Esquema empregado para determinação da corrente crítica da Unidade Básica Supercondutora (UBS). ....	101
Figura 47 - Curva $V_{xl}$ (CC) para a amostra supercondutora utilizada na construção do limitador. ....	102
Figura 48 – Curva de tensão por corrente para ensaio de rampa com a UBS. ....	103
Figura 49 – Rampa de corrente aplicada a UBS. ....	103
Figura 50 – Representação da montagem utilizada para os ensaios de curto-circuito no CEPEL. ....	105
Figura 51 – (a) Montagem para ensaio de corrente com o limitador. (b) Detalhe da ponta de corrente enlaçando o cabo que sai da fonte de corrente. (c) Detalhe da ponta de tensão conectada ao circuito em teste. ....	106
Figura 52 – Fonte de alta corrente utilizada nos ensaios com o limitador no CEPEL (Ilha do Fundão). ....	107
Figura 53 – Curva de calibração da fonte de alta corrente. ....	107
Figura 54 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito direto 1. ....	109
Figura 55 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o disjuntor 1. ....	110
Figura 56 – Curvas de corrente e tensão para o ensaio de curto-circuito com o ramo RL 1. ....	111

Figura 57 - Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 1 (Ensaio 1A). .....	112
Figura 58 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 1 (Ensaio 1B). .....	113
Figura 59 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 1 (Ensaio 1C). .....	114
Figura 60 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito direto 2. ....	115
Figura 61 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o disjuntor 2. ....	116
Figura 62 – Curvas de corrente e tensão para o ensaio de curto-circuito com o ramo RL 2. ....	117
Figura 63 - Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 2 (Ensaio 2A). .....	118
Figura 64 - Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 2 (Ensaio 2B). .....	119
Figura 65 – (a) Primeiro arranjo da UBS. (b) Segundo arranjo da UBS. ....	120
Figura 66 – Fotografias em sequência da UBS no momento de ocorrência de curto-circuito .....	121
Figura 67 – Curvas de tensão e corrente para ensaios de curto-circuito com limitador utilizando YBCO [34] .....	122
Figura 68 – Esquema de um cabo supercondutor e suas partes integrantes. Adaptado de [4]. ....	128
Figura 69 – Protótipo de SMES desenvolvido pela NASA [35] .....	132
Figura 70 – Esquema de um protótipo de transformador supercondutor [4]. ....	133
Figura 71 – Esquema comparativo de tamanho para dois motores de mesma potência: um convencional (a) e outro supercondutor (b). Figura adaptada de [4]. ....	135
Figura 72 – Rotor de um protótipo de Gerador Supercondutor de 1,5 MVA (GE – Global Research Center) [4]. ....	136

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dispositivos limitadores de corrente convencionais. ....	56
Tabela 2 – Valores das grandezas utilizadas no modelo de cálculo de resistência da UBS. .....	87
Tabela 3 – Medidas de resistência, indutância e impedância do resistor e indutor empregados no ramo RL do limitador. ....	100
Tabela 4 – Resultado dos testes de limitação de corrente de curto-circuito realizados no LMDS (SFCL Trifásico). ....	104
Tabela 5 – Resumo dos ensaios de curto-circuito realizados no CEPEL (SFCL monofásico) .....	108
Tabela 6 – Resumo de possíveis impactos de limitadores de corrente nos sistemas de proteção. Adaptado de [26]. ....	137
Tabela 7 – Detalhes de Alguns Projetos de SFCL no mundo [2].....	138

## **Capítulo 1 – Introdução**

### **1.1 – Breve Histórico do Trabalho**

Uma das consequências diretas de toda atividade humana e do crescimento econômico no mundo moderno é o crescimento gradativo da demanda por energia elétrica. Isso tem se tornado visível nas últimas décadas, especialmente na primeira década do século XXI, através de ajustes e mudanças nos sistemas elétricos de potência para viabilizar o atendimento das novas demandas. Entre esses ajustes e demandas podemos citar: aumento do número de interligações entre diferentes sistemas (sistemas interligados), proliferação de autoprodutores de energia elétrica (cogeração e “smartgrids”), novas tecnologias de geração, novas tecnologias de transmissão (longa distância), entre outros. De modo específico o aumento de demanda e, conseqüentemente, da oferta de energia elétrica em um sistema elétrico de potência, acaba elevando gradativamente os níveis de corrente de curto-circuito nos diversos barramentos dos sistemas de potência, o que é algo a ser considerado no sentido de garantir a funcionalidade destes e uma qualidade de energia mediante a atuação correta da proteção.

Em alguns casos os novos níveis de corrente de curto-circuito já superam as capacidades máximas dos disjuntores instalados bem como as capacidades de outros equipamentos ou dispositivos da rede elétrica. Como os dispositivos convencionalmente utilizados nas redes elétricas não apresentam especificações que respondam bem às solicitações transitórias decorrentes dos altos valores de correntes de curto-circuito que estão surgindo, basicamente a solução tem sido a adoção de três caminhos: reprojeto dos dispositivos superados, desenvolvimento de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito e em casos emergenciais mudanças na topologia da rede (seccionamento de barramentos, desligamentos de interconexões, etc.) e utilização de transformadores com

maior impedância. O primeiro caminho em algumas situações pode se apresentar bastante oneroso do ponto de vista técnico e econômico, justificando a opção pelo segundo. Um dispositivo com a capacidade de redução da corrente de curto-circuito e sem influência significativa na operação em regime normal de um sistema elétrico pode, entre outras coisas, viabilizar a continuação do uso de disjuntores e demais equipamentos superados. Já existem algumas soluções em termos de limitadores de corrente de curto-circuito, mas nenhuma delas se apresentou tão promissora quanto a que envolve tecnologia supercondutora em razão das características especiais dos materiais supercondutores.

A limitação com base em materiais supercondutores é relativamente recente e consiste no foco deste trabalho, onde será feita a análise de um protótipo de limitador supercondutor desenvolvido em projeto de pesquisa. De uma maneira geral todas as aplicações de materiais supercondutores no setor elétrico sofreram um impulso com o desenvolvimento da supercondutividade, principalmente após 1986, quando a supercondutividade de alta temperatura crítica foi descoberta. Os materiais supercondutores são utilizados na pesquisa e desenvolvimento de vários tipos de equipamentos (motores, cabos, etc.) para o setor elétrico. No caso de limitadores de corrente de curto-circuito o uso de supercondutores se justifica pelo fato destes apresentarem notáveis propriedades que vêm de encontro às necessidades operativas para um dispositivo deste tipo.

Quando este trabalho foi iniciado, em 2009, através de uma continuidade do projeto de pesquisa LiMS – Limitador de Sobrecorrente com Material Supercondutor , financiado pela Sociedade Fluminense de Energia e Petrobras S.A, já era grande o número de projetos sobre limitadores supercondutores, sejam eles de pequena ou grande capacidade de corrente. O projeto que permitiu o desenvolvimento deste trabalho foi concluído em 2006 e realizado pelo LMDS-UFRRJ. O resultado consistiu em um protótipo

de limitador de corrente supercondutor utilizando blocos cerâmicos supercondutores à base de Y-Ba-Cu-O. Foi diante dos bons resultados obtidos com testes preliminares do protótipo ao final do referido projeto, que ensejou o desenvolvimento de uma dissertação de mestrado em engenharia elétrica, dada a necessidade de uma melhor investigação da capacidade de limitação do protótipo desenvolvido.

A bancada e instrumentos utilizados inicialmente para ensaios com o protótipo não permitiam a utilização de correntes elétricas superiores a 350 A, nem a obtenção de curva de corrente versus tempo de maneira suficientemente precisa para determinar a capacidade de limitação do protótipo desenvolvido e seu real funcionamento ao longo do tempo de duração de um pulso de alta corrente. No momento de finalização do referido projeto foram feitas apenas medidas de corrente de pico, enquanto o ideal seria a obtenção de uma curva de corrente ao longo do tempo durante o ensaio de curto-circuito. Para realizar melhor a investigação sobre o funcionamento do protótipo desenvolvido no referido projeto é que este trabalho de dissertação foi proposto. Além disso, desejava-se obter conhecimentos que permitam um domínio futuro da tecnologia supercondutora aplicada ao problema de limitação de corrente, através da capacidade de desenvolvimento, construção, ensaio e análise de limitadores supercondutores. No sentido de conseguir as condições mínimas necessárias para a investigação sobre o desempenho do protótipo de limitador, através de medidas de altas correntes de curto-circuito, foi feita importação de ponta de prova para osciloscópio com faixa de corrente adequada e uma solicitação de auxílio junto ao CEPEL. Este último deu suporte mediante liberação de uso de fonte de alta corrente, entre outros auxílios técnicos.

Como resultado principal do presente trabalho foram obtidas curvas de corrente e tensão para o dispositivo limitador em ensaios de curto-circuito (pulsos de corrente). Nestes ensaios foram verificadas as capacidades de limitação para diferentes valores de corrente de pico, a resposta do limitador em termos de tensão, comportamento em termos

de aquecimento e sua possível interferência na rede. Os limitadores testados foram do tipo monofásico e trifásico para baixa tensão, a princípio o primeiro seria testado novamente na bancada utilizada no projeto anterior (trifásico) [1], mas por algumas limitações para os ensaios finais e dificuldades com as amostras supercondutoras o mesmo foi testado apenas nos ensaios de alta corrente no CEPEL.

O limitador testado constitui um dos primeiros limitadores de corrente supercondutor com cerâmicas supercondutoras de alta temperatura crítica construído e testado no Brasil. Em seu projeto inicial foi feita análise de comportamento térmico e elétrico através do software COMSOL Multiphysics, o que viabilizou a análise de limites térmicos e corrente suportável [1]. Também foi pensado um arranjo modular tendo em vista planos futuros de aumento da capacidade de limitação do protótipo conforme as necessidades e os resultados positivos obtidos. Cabe lembrar que o referido limitador é um protótipo para testes em níveis de bancada (laboratório), e não em rede. Consultando a literatura especializada verifica-se que o limitador analisado neste trabalho se enquadra no grupo dos limitadores de corrente supercondutores tipo resistivo [2].

Um dos aspectos interessantes do presente trabalho foi a colaboração entre física e engenharia elétrica no desenvolvimento e análise de um protótipo de limitador de corrente com tecnologia supercondutora. Esta atividade colaborativa que envolveu o autor, orientadores, COPPE-UFRJ, LMDS-UFRRJ e CEPEL com certeza pode contribuir, mesmo que modestamente, para ajudar na contínua busca pelo domínio da tecnologia supercondutora de limitação de corrente no Brasil.

## **1.2 – Apresentação dos Capítulos**

Neste tópico será feita uma breve descrição de cada um dos capítulos desta dissertação. A ideia é fornecer uma espécie de roteiro de leitura e explicar como está

estruturado o texto do trabalho. Começamos pelo capítulo 2, que apresenta de uma forma básica e sem aprofundamentos uma visão geral, porém necessária, a respeito do fenômeno da supercondutividade. A ideia é possibilitar ao leitor, não especialista ou não familiarizado, a caracterização básica deste fenômeno, de modo a subsidiar uma visão geral que permita a compreensão dos conceitos relativos ao uso da supercondutividade nos sistemas elétricos de potência, em especial no desenvolvimento de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito. Todas as propriedades características do estado supercondutor, classificação dos materiais supercondutores, condições de manutenção do estado supercondutor, transição, supercondutores de alta temperatura crítica, materiais supercondutores e aplicações da supercondutividade são apresentados neste capítulo.

O capítulo 3 é destinado inicialmente a uma revisão básica sobre curto-circuito, mas há também a apresentação de alguns métodos convencionais de limitação de correntes de curto-circuito (métodos que não empregam a tecnologia supercondutora) e apresentação das principais dificuldades com esses métodos convencionais. No primeiro momento deseja-se didaticamente recordar alguns conceitos básicos do estudo de correntes de curto-circuito em paralelo com uma pequena revisão bibliográfica a respeito dos métodos convencionalmente ou classicamente utilizados na limitação de corrente bem como de suas dificuldades. Toda revisão bibliográfica está baseada na literatura especializada, que é composta por livros, teses, dissertações, artigos científicos e folhetos informativos de alguns fabricantes. Já ao final do capítulo é apresentado o conceito de limitador de corrente supercondutor e também as configurações básicas de limitadores de corrente supercondutores, de acordo com o encontrado na literatura.

Os capítulos 2 e 3 foram escritos de forma a apresentar de maneira sucinta ao leitor os conhecimentos básicos para a compreensão do objeto de estudo deste trabalho e de

certa forma do estado da arte desse ramo de pesquisa em supercondutividade. Em momento algum se teve a pretensão de esgotar os temas discutidos.

O capítulo 4 é um dos mais importantes por ter em seu conteúdo o princípio de operação, aspecto construtivo e parâmetros de projeto do protótipo de limitador de corrente supercondutor analisado neste trabalho. Também é mencionada a bancada de testes construída e utilizada no LMDS-UFRRJ durante os ensaios preliminares. Um modelo matemático simples é apresentado para justificar a geometria do arranjo utilizado para abrigar a amostra supercondutora.

O capítulo 5 apresenta todas as medidas que foram definidas para os testes com o protótipo e a metodologia de ensaios realizados no LMDS-UFRRJ (por ocasião do referido projeto e do desenvolvimento desta dissertação) e no CEPEL. São discutidos os ensaios de corrente crítica em regime CC, medidas do ramo RL, ensaios de curto-circuito com disjuntor, ensaios de curto-circuito franco ou direto e ensaios de curto-circuito com o limitador analisado. Todos os detalhes e observações a respeito dos processos de medida são apresentados.

O capítulo 6 expõe todos os resultados obtidos com os ensaios realizados em corrente contínua e corrente alternada. Alguns comentários são feitos após a apresentação de cada uma das medidas como forma de esclarecer o leitor e facilitar a leitura das mesmas. São utilizados como forma de apresentação tabelas, gráficos, figuras e imagens (fotografias).

Finalmente o capítulo 7 apresenta comentários e conclusões a respeito dos resultados obtidos. São enfatizados os casos de excelentes resultados e os casos onde a resposta teve desempenho inferior ao esperado. Também são discutidas algumas dificuldades encontradas. Por fim são feitas propostas de melhorias e continuidade dos estudos em trabalhos futuros na linha de pesquisa em limitação de corrente com materiais supercondutores.

### **1.3 – Resumo dos Resultados Obtidos Neste Trabalho**

O protótipo de limitador de corrente de curto-circuito supercondutor analisado neste trabalho passou por ensaios de corrente, contínua e alternada, como forma de teste. Entre eles estão a determinação da corrente crítica (CC) e aplicação de curto-circuito de alta corrente (CA), sendo este último ensaio o principal teste realizado. Tomando como base os resultados com os ensaios de curto-circuito, os mais importantes em termos de limitação, as medidas mostraram que de fato o dispositivo apresentou a propriedade de limitação de corrente, atuando em valores de corrente superiores ao esperado e reduzindo-os a valores bastante satisfatórios.

Foram detectados como resultados negativos a resistência significativa da unidade limitadora (detectada em um dos ensaios em CC), o que pode prejudicar a atuação em regime normal, problemas de contato elétrico e formação de pontos de aquecimento na unidade limitadora no momento de aplicação de curto-circuito. Mesmo diante desses foi possível verificar a capacidade de limitação levantada no projeto LiMS (trifásico) e as possibilidades do protótipo proposto, uma vez que os problemas de contato elétrico e o estado de conservação das amostras podem ser a causa dos resultados negativos. Além disso, há necessidade futura de realização de mais testes com maior número de amostras para confirmar resultados ou eliminar alguns resultados encontrados nesta análise do protótipo.

## Capítulo 2 – O Fenômeno da Supercondutividade

### 2.1 – A Descoberta do Fenômeno

O fenômeno da supercondutividade é notável e centenário (1911-2011). Dentre as propriedades do estado supercondutor, a resistividade elétrica nula foi a primeira a ser descoberta, o que notoriamente refletiu na denominação do fenômeno através do termo “supercondutividade”. Lembremos que a relação entre resistividade ( $\rho$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é dada pela equação (2.1):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \rho^{-1} \quad (2.1)$$

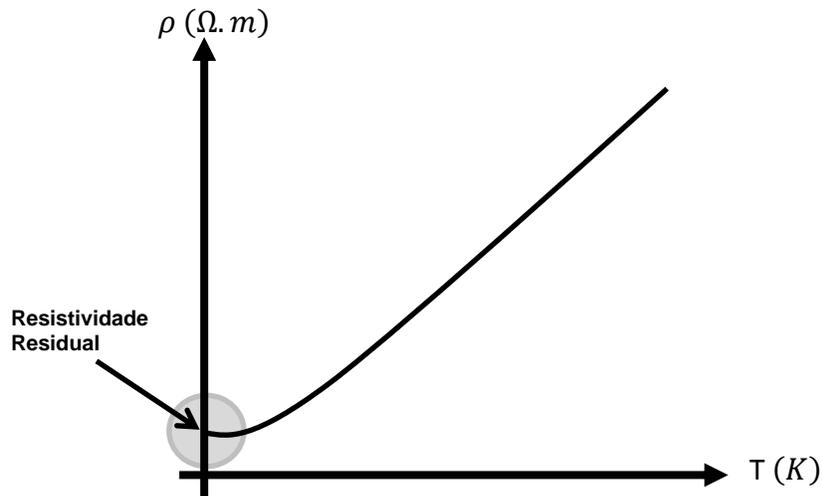
Logo, se  $\rho \rightarrow 0$  tem-se  $\sigma \rightarrow \infty$ , daí o termo “supercondutividade”.

No começo do Século XX era intensa a pesquisa a respeito do comportamento dos elétrons (portadores de carga) nos metais e conseqüentemente da condução de eletricidade nestes materiais. Era conhecido na época o clássico comportamento de decrescimento linear da resistividade em função da temperatura, sobrando dúvidas a respeito do domínio deste modelo nas proximidades do zero absoluto (0K). As pesquisas nesta escala de temperatura passavam necessariamente pelo domínio tecnológico da criogenia em baixíssimas temperaturas, o que era inicialmente uma barreira técnica a ser superada.

Um passo decisivo ocorreu quando, na Holanda, o físico Heike Kamerlingh Onnes realizou o feito da liquefação do hélio. Com o hélio na fase líquida foi possível obter as temperaturas baixas necessárias ao estudo de condução elétrica nos metais, já que a temperatura de liquefação do hélio é da ordem de 4,2K. A partir deste momento (1908) começaram a ser colhidos dados sobre o comportamento de alguns metais em baixas

temperaturas e o próprio Onnes acabou descobrindo o comportamento supercondutor em uma amostra de mercúrio no início de 1911, reportando seus resultados em abril do mesmo ano.

Neste processo de estudos sobre o comportamento da resistividade elétrica de metais em baixas temperaturas ele obteve medidas da variação de resistividade com a temperatura absoluta para amostras de ouro e prata, que apresentaram um comportamento passível de explicação: a queda da resistividade obedecia de fato a um modelo linear<sup>1</sup> até um limite a partir do qual a resistividade não variava mais, independente da variação de temperatura (Figura 1). Foi atribuída a este efeito uma resistividade residual, gerada possivelmente por impurezas presentes na amostra. Nesse sentido Kamerling Onnes passou a buscar processos de purificação de suas amostras.



**Figura 1 – Modelo linear para a dependência da resistividade ( $\rho$ ) de metais com a temperatura ( $T$ ) e resistividade residual.**

Ao estudar a resistividade do mercúrio, metal mais fácil de ser purificado, veio a grande surpresa, Onnes (Figura 2a) deparou-se com um fenômeno surpreendente: a queda

---

<sup>1</sup> Sobre uma determinada faixa de temperatura a resistividade de um metal varia de forma aproximadamente linear com a temperatura de acordo com a expressão  $\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$ .

acentuada da resistividade do mercúrio quando a temperatura da amostra se aproximava do valor de 4,25 K (Figura 2b). Estava descoberto assim o fenômeno da supercondutividade.

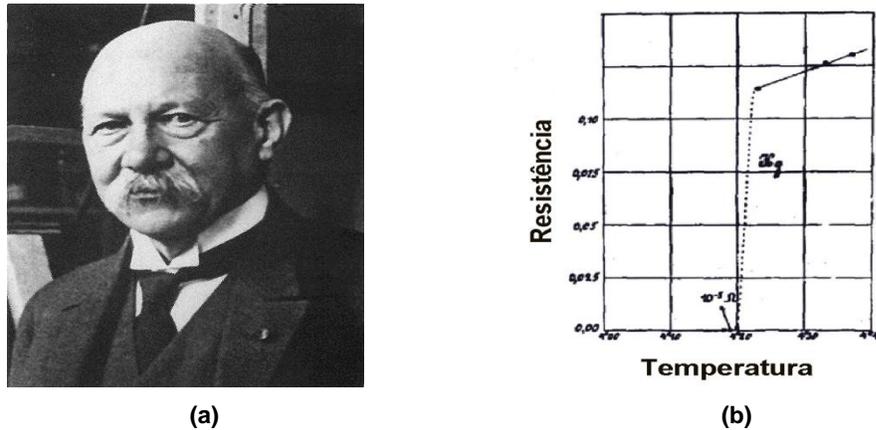


Figura 2 – (a) Heike Kamerlingh Onnes [3] (b) Adaptação da curva original de resistência elétrica versus temperatura de uma amostra de mercúrio, reportada por Kamerlingh Onnes no anúncio da descoberta da supercondutividade em 1911. Adaptado de [4].

Outras medidas realizadas em metais como o chumbo e o estanho também apresentaram comportamento similar para as temperaturas de 7,2K e 3,7K respectivamente (Figura 3).

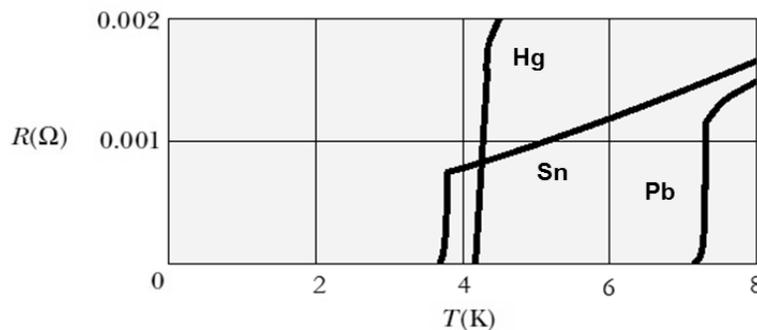


Figura 3 – Representação esquemática da variação de resistência elétrica de amostras de Pb e Sn em função da temperatura – comparação com a curva de uma amostra de Hg. Adaptada de [3].

Estes últimos resultados mostrados na figura anterior foram importantes no sentido de não restringir a alteração para resistividade nula como um comportamento exclusivo do mercúrio.

## 2.2 – Caracterização do Estado Supercondutor – Parâmetros

É importante ressaltar que a caracterização da resistividade nula de uma amostra supercondutora também é dependente da sensibilidade e precisão dos equipamentos utilizados no passado e hoje em dia. Atualmente, com arranjos de medida mais precisos, a resistividade dos materiais supercondutores tem se apresentado nula com incertezas da ordem de  $10^{-23}$   $\Omega.m$ , limite de sensibilidade dos equipamentos empregados [1]. Para uma noção quantitativa e de aplicação em engenharia, por exemplo, temos o cálculo da razão entre a incerteza na medida da resistividade  $u(\rho_{sc})$  típica de um supercondutor e a resistividade do cobre,  $\rho_{Cu}$ , (largamente empregado na confecção de fios e cabos):

$$\frac{u(\rho_{sc})}{\rho_{Cu}} \cong 10^{-17} \rightarrow u(\rho_{sc}) \cong 10^{-17} \cdot \rho_{Cu} \quad (2.2)$$

$u(\rho_{sc})$  → incerteza na resistividade de um supercondutor (valor típico)

$\rho_{Cu}$  → resistividade do cobre

Desta forma, mesmo do ponto de vista técnico, não há como negar o uso do termo resistividade nula. É importante lembrar que o comportamento supercondutor em corrente contínua (CC) difere do comportamento supercondutor em corrente alternada (CA), principalmente em regimes de alta frequência. Voltaremos a este assunto quando tratarmos em detalhes da aplicação descrita neste trabalho.

Sabe-se hoje que além da resistividade nula (DC) o estado supercondutor de um material apresenta outra propriedade notória: a blindagem magnética (Efeito Meissner). Descoberto em 1933 este fenômeno consiste na expulsão do campo magnético de uma amostra supercondutora quando esta transita entre a fase normal e a fase

supercondutora. Assim, dizemos que um sistema é supercondutor se apresentar simultaneamente estas duas propriedades (Figura 4).

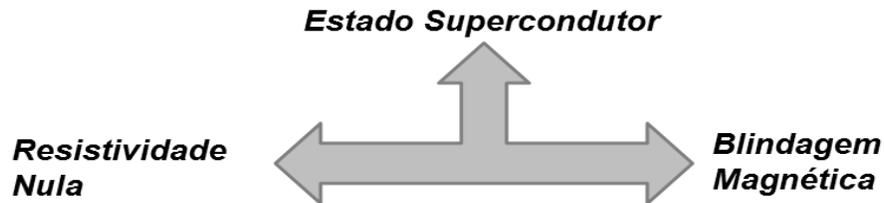


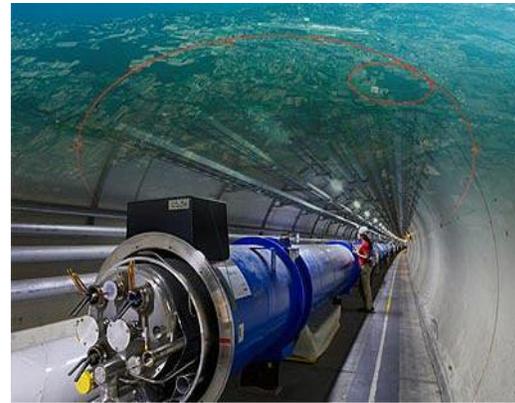
Figura 4 – Propriedades características do estado supercondutor.

Supercondutores, como será visto em mais detalhes adiante, são classificados como pertencendo a dois grandes grupos: supercondutores tipo I e tipo II. De imediato convém dizer que os supercondutores tipo II são os mais importantes em termos de aplicações como é o caso deste trabalho. Esta classificação e as características de cada tipo serão descritas de forma mais completa na sequência do texto.

Imediatamente após a confirmação de sua descoberta, Kamerling Onnes pensou em uma possível aplicação direta do fenômeno da supercondutividade, tratava-se de uma aplicação tecnológica de grande interesse: produção de campos magnéticos intensos através de bobinas supercondutoras em baixa temperatura. Para a surpresa de Onnes suas medidas mostraram que a bobina de chumbo que fizera transitava ao estado normal quando o campo magnético da própria bobina atingia algumas centenas de Gauss (1 Tesla =  $10^4$  Gauss). Este fato deve ter desencorajado Onnes a tentar produzir “*super-magnetos*” partindo de bobinas supercondutoras, mas graças ao desenvolvimento da supercondutividade ao longo desses 100 anos isso hoje já é uma realidade com o uso de outros materiais supercondutores. Encontramos bobinas supercondutoras em alguns aparelhos, como por exemplo em aparelhos de ressonância magnética e em dispositivos de pesquisa básica como no caso dos aceleradores de partículas (Figura 5).



(a)



(b)

**Figura 5 – Exemplos de emprego de bobinas supercondutoras – (a) Aparelho de Ressonância Magnética Nuclear [5] e (b) Acelerador de Partículas do CERN (LHC) [5].**

Adiantemos o fato de que a manutenção do estado supercondutor depende da temperatura e do campo magnético, e também da densidade de corrente elétrica. Dessa forma são três parâmetros críticos: temperatura, campo magnético e corrente elétrica (ou sua densidade).

A Temperatura Crítica ( $T_c$ ) é a temperatura na qual ocorre a transição entre o estado supercondutor e o estado normal (e vice-versa). Na maioria dos casos, o termo temperatura crítica é utilizado para denominar a temperatura de transição entre os estados normal e supercondutor na completa ausência de campo magnético ( $T_c$  para  $|\vec{H}| = 0$ ).

Se o estado inicial de uma amostra de material é supercondutor e a temperatura supera o valor crítico, teremos uma transição para o estado normal:

$$T < T_c \rightarrow \text{Manutenção do estado supercondutor}$$

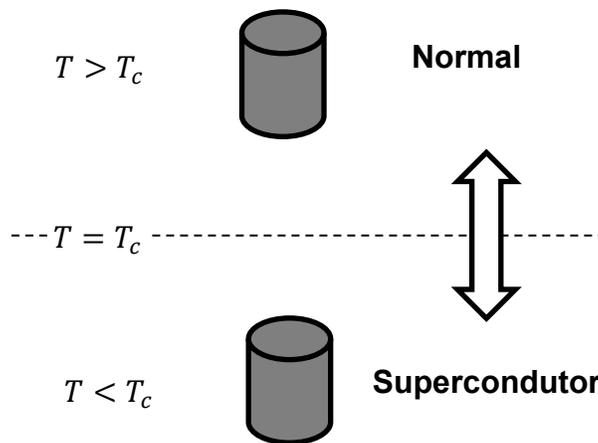
$$T \geq T_c \rightarrow \text{Transição para o estado normal}$$

Se o estado inicial de uma amostra de material é normal e a temperatura cai para um valor abaixo do crítico, teremos uma transição para o estado supercondutor:

$T \geq T_c \rightarrow$  Manutenção do estado normal

$T < T_c \rightarrow$  Transição para o estado supercondutor

A figura 6 a seguir ilustra as transições em termos da temperatura.



**Figura 6 – Comportamento de uma amostra de material supercondutor em termos da temperatura.**

Campo Magnético Crítico ( $\vec{H}_c$ ) é o campo magnético mínimo capaz de destruir total ou parcialmente o estado supercondutor de uma amostra quando esta se encontra na condição que  $T < T_c$ . Este campo crítico está relacionado com o valor de temperatura, sendo possível expressá-lo como função desta temperatura. Para alguns sistemas supercondutores metálicos é válida a equação 2.3, onde  $H_{c0}$  é o campo crítico extrapolado para  $T = 0K$ , já que este valor de temperatura não pode ser atingido.

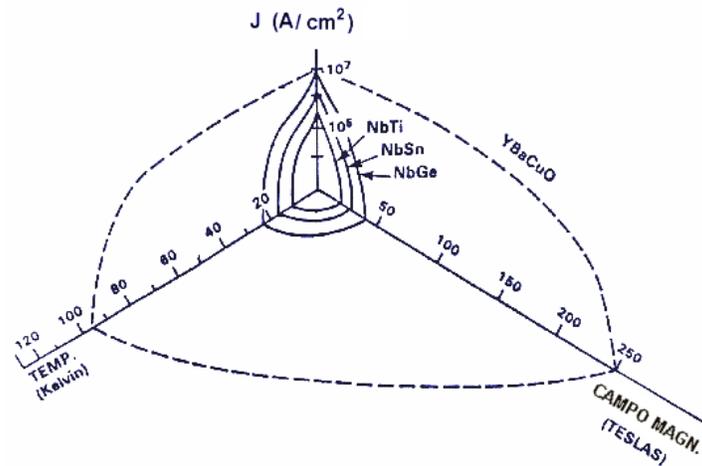
$$H_c = H_{c0} \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

É importante lembrar que campos magnéticos são grandezas vetoriais. Se for possível a fixação da direção e sentido do campo magnético aplicado (arranjo geométrico entre a fonte de campo e a amostra), a variação de campo se dará apenas na intensidade. Assim, quando o campo magnético atingir o valor crítico (transição da amostra) a intensidade de campo magnético crítico é obtida. Abaixo deste valor de campo não há transição ao estado normal (supercondutores tipo I). Em muitos casos na literatura utiliza-se o termo “campo crítico” para se referir à intensidade de campo crítico  $H_c$ .

A Corrente Crítica ( $I_c$ ) é o valor de corrente elétrica que inicia a dissipação de potência em um material supercondutor. Podemos associar à presença de um campo crítico o estabelecimento, no sistema supercondutor em questão, de uma corrente elétrica induzida pelo referido campo. Assim, a destruição do estado supercondutor está ligada ao estabelecimento de uma corrente elétrica cujo valor teria um “caráter crítico”. Esta corrente pode ter origem em um campo elétrico induzido ou em um campo elétrico aplicado. Também é possível associar a mudança para o estado dissipativo a uma densidade de corrente crítica,  $\vec{J}_c$ , já que esta tem um caráter mais geral do que a corrente por ser uma característica do material e não da amostra.

É importante ressaltar que de um modo geral os parâmetros campo magnético crítico e densidade de corrente crítica estão inter-relacionados com a temperatura crítica. Quanto mais elevado for o valor de  $T_c$  mais elevado será o valor de  $\vec{J}_c$  para uma dada temperatura  $T < T_c$ . E por consequência, quanto mais elevado  $\vec{J}_c$  mais elevado será o valor de campo magnético crítico  $\vec{H}_c$  [6].

A figura 7 constitui um esboço de uma série de resultados experimentais com alguns materiais supercondutores, o que ilustra a interdependência entre os três parâmetros que caracterizam o estado supercondutor.



**Figura 7 – A relação entre os três parâmetros que caracterizam o estado supercondutor para alguns materiais supercondutores [4].**

É possível, ainda através da figura 7, verificar duas regiões bem distintas, uma de manutenção da supercondutividade (valores dos parâmetros inferiores aos valores críticos) e outra de transição do estado supercondutor para o estado dissipativo, para cada material.

### **2.3 – Propriedades Térmicas, Eletromagnéticas e Quânticas do Estado Supercondutor**

Um supercondutor é muitas vezes confundido com um condutor ideal, mas na realidade existem diferenças que mostram que o estado supercondutor é muito mais do que apenas um estado de condutividade ideal, conforme se verifica através do Efeito Meissner. É importante mencionar que a condutividade ideal é um fenômeno previsto teoricamente dentro da premissa de sólidos cristalinos ideais (sem imperfeições estáticas e dinâmicas), onde a idealização corresponde ao caso de íons formando uma estrutura em um arranjo perfeitamente regular e absolutamente sem vibrações [7]. Neste caso, com a aplicação de um campo elétrico teríamos um movimento de elétrons sem

“espalhamento” pela rede, ou seja, uma corrente elétrica fluindo pelo material não sofreria resistência elétrica (o elétron não transfere para a rede nenhuma parte da energia recebida do campo). Porém, na prática os sólidos reais estão longe desse comportamento e são vários os fatores para isso. Talvez o mais simples deles seja o fato da rede estar em constante agitação térmica, caracterizada pela oscilação dos íons em torno de suas posições de equilíbrio. Como isso leva a desvios do arranjo da rede, temos então um espalhamento da corrente que permite a troca de energia entre o portador de carga (elétron) e a rede, ou seja, temos uma dissipação de energia segundo o Efeito Joule (resistência elétrica).

De fato o tratamento adequado da interação entre elétrons e as vibrações da rede cristalina de um material deve ser dado através da Mecânica Quântica, que prevê a necessidade de cessamento da vibração da rede como condição necessária para a ocorrência de condutividade ideal. Porém, a própria Mecânica Quântica prevê que tal situação não ocorreria mesmo que o sistema pudesse atingir o zero absoluto de temperatura (0K), já que existe a chamada “energia de oscilação de ponto zero” de cada átomo “aprisionado” em sua posição média de equilíbrio na rede cristalina. Além disso, existe geralmente o espalhamento eletrônico em virtude das imperfeições estruturais. Em linhas gerais podemos assumir duas dependências para a resistividade, conforme a equação 2.4.

$$\rho(T) = \rho_I + \rho_V(T) \quad (2.4)$$

$\rho(T)$  → Resistividade em função da temperatura

$\rho_I$  → Termo referente as imperfeições da rede

$\rho_V(T)$  → Termo referente a vibração da rede

A figura 8 mostra o comportamento de resistividade em função da temperatura (resistividade nula) em 0K para um metal puro e perfeito, em contraste está a curva de um metal impuro (caso real) que por extrapolação mostra uma resistividade residual [6].

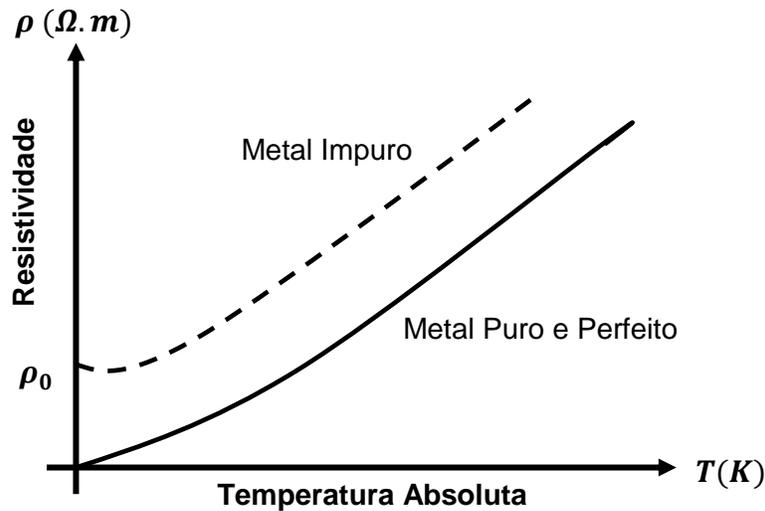


Figura 8 – Comportamento da resistividade em função da temperatura para um metal puro e perfeito (idealização) e para um metal impuro (caso real) [7].

Podemos também fazer uma análise simplificada dos sistemas supercondutores em termos do Eletromagnetismo Clássico, o que permite obter uma boa diferenciação entre um supercondutor e um condutor ideal. Tomemos um corpo que por hipótese possua resistividade nula. Consideremos a expressão matemática da lei de Faraday [8]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

Considerando meios lineares e isotrópicos, a resistividade ( $\rho$ ) e condutividade ( $\sigma$ ) são grandezas escalares [8]. Dessa forma a lei de Ohm pode ser escrita da seguinte forma:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.6)$$

Como  $\rho = \sigma^{-1}$  a equação 2.6 pode ser reescrita:

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J} \quad (2.7)$$

Pela hipótese de resistividade nula:

$$\vec{E} = \vec{0} \quad (2.8)$$

Dessa forma:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{0} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad (2.10)$$

A última relação (2.10) prevê que o vetor indução magnética  $\vec{B}$  deve ser constante no interior de um condutor ideal ( $\rho = 0$ ). Um fluxo magnético pode ser calculado sobre uma superfície no condutor:

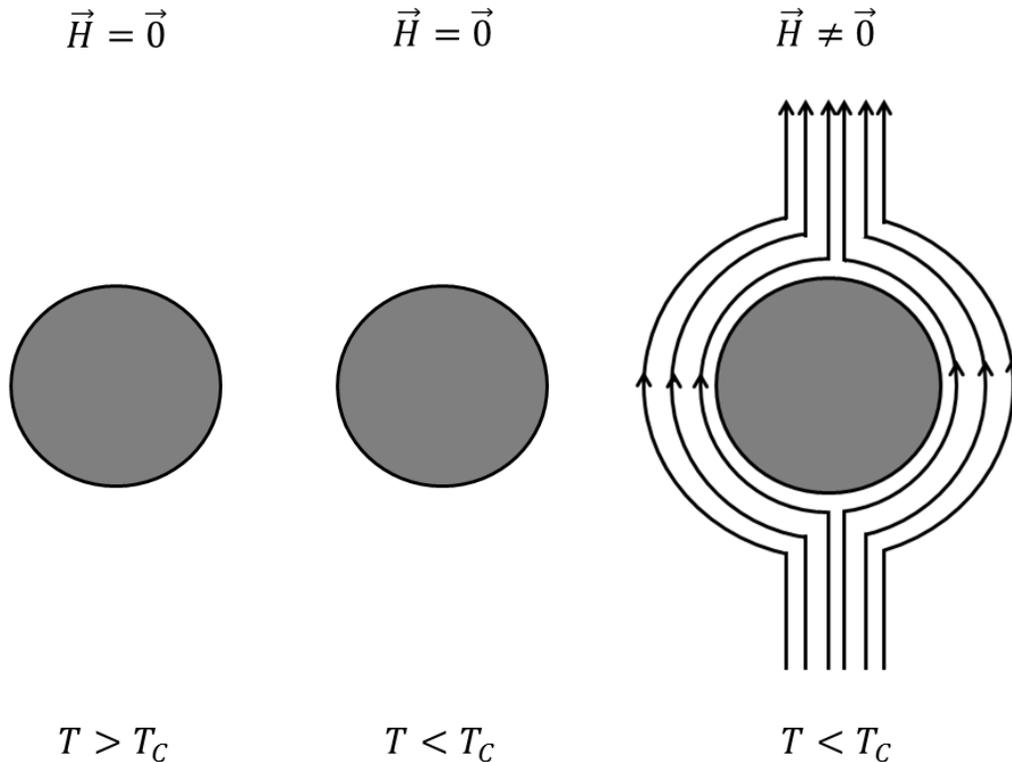
$$\Phi_B = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.11)$$

Assim, podemos caracterizar  $\vec{B}$  como uma densidade de fluxo magnético e um condutor ideal deve manter esta densidade de fluxo magnético constante em seu interior. Para compararmos com o supercondutor utilizaremos a hipótese que o condutor passa para o estado ideal somente abaixo de certa temperatura  $T_c$ . Serão examinados dois casos.

**1º caso** - O condutor atinge resistividade nula na ausência de um campo magnético externo

Nesta situação, a densidade de fluxo magnético inicial é nula e assim deverá permanecer. Se for aplicado um campo magnético externo  $\vec{H}$  o condutor “reage” através da formação de uma corrente induzida pela variação de fluxo em seu interior (Lei de Lenz). Essa corrente induzida gera uma magnetização interna de forma a conduzir o

sistema para um estado em que a densidade de fluxo magnético no seu interior tenha valor igual ao original (Figura 9).



**Figura 9** – Esquema ilustrativo do comportamento de um hipotético condutor ideal quando um campo magnético é aplicado após a transição. Adaptado de [7].

Ressalta-se o fato de que para a aplicação do campo magnético em  $T < T_c$  a corrente que surge não encontra resistência elétrica e persiste circulando pelo condutor.

**2º caso** - O condutor atinge resistividade nula na presença de um campo magnético

Agora a densidade de fluxo magnético no interior do condutor não é nula. Dessa maneira, ao ser eliminado o campo magnético ( $\vec{H}$ ) uma corrente surge induzida pela variação de fluxo magnético. A corrente flui sem resistência elétrica pelo sistema e dá origem a uma magnetização que acaba por restaurar a densidade de fluxo magnético original (Figura 10).

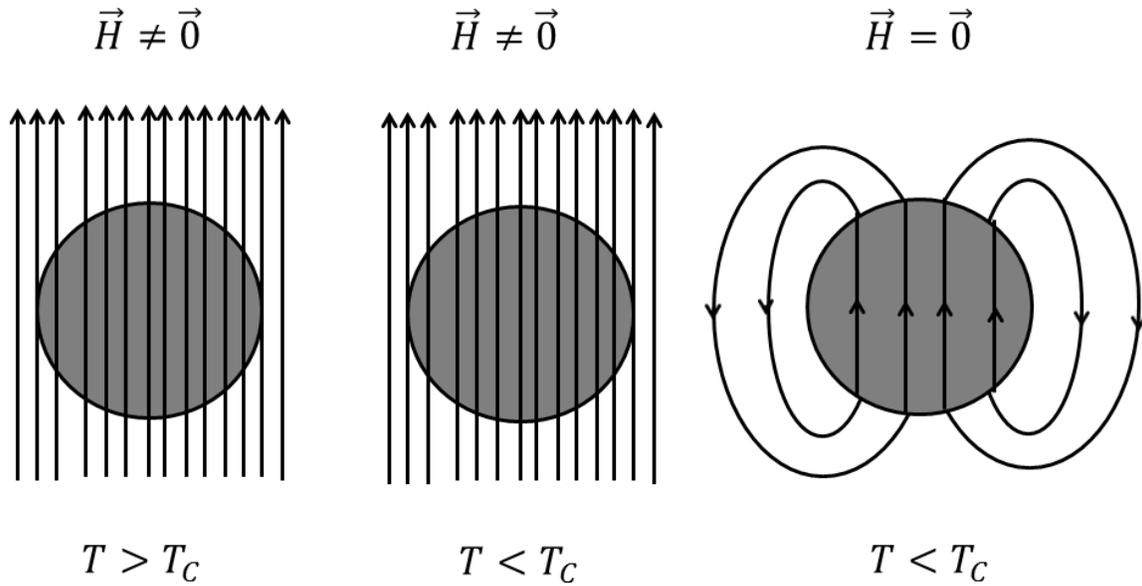
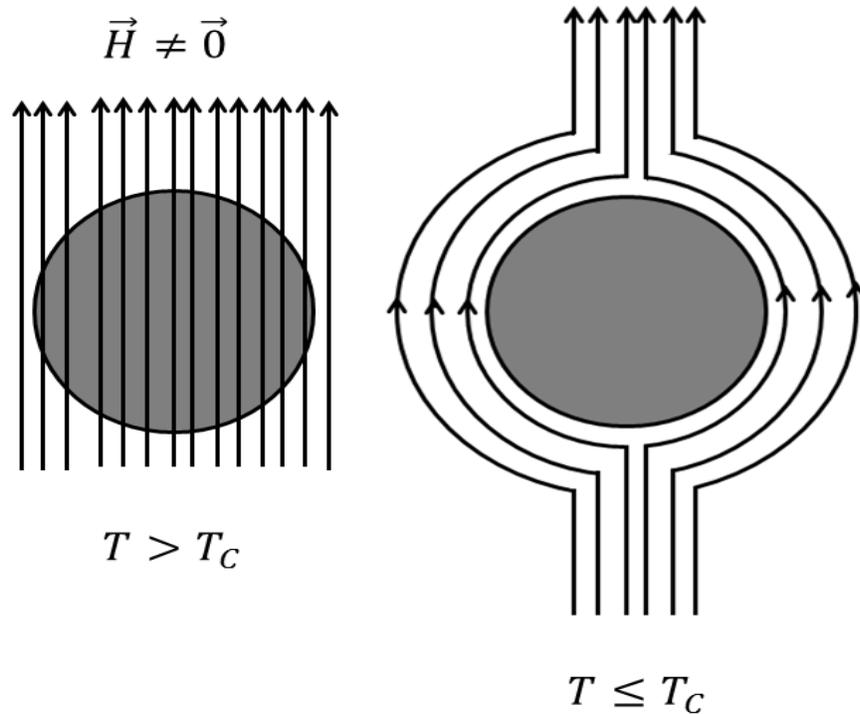


Figura 10 – Esquema ilustrativo do comportamento de um hipotético condutor ideal quando o campo magnético atua antes da transição. Adaptado de [7].

Estudando o comportamento magnético de amostras supercondutoras de estanho em função da temperatura, Walther Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram, em 1933, um efeito que vai contra o comportamento previsto pela análise anterior (condutor ideal) [9]. Tal como ilustra a figura 11, se aplicarmos um campo magnético de baixa intensidade a um sistema supercondutor quando este se encontra no estado normal ( $T > T_c$ ) e o resfriarmos na presença do campo, observaremos uma expulsão abrupta do fluxo magnético do interior do material quando este transita ao estado supercondutor ( $T = T_c$ ). Este fenômeno demonstra que um sistema supercondutor não pode ser considerado um condutor ideal, embora apresente resistividade nula ( $\rho = 0$ ).

Esta propriedade de blindagem magnética, como foi citado anteriormente, é conhecida como Efeito Meissner ou Efeito Meissner-Ochsenfeld. A compreensão deste efeito foi um passo importante na caracterização do estado supercondutor, pois até então, acreditava-se que o fenômeno descoberto por Kamerlingh Onnes consistia simplesmente na

passagem de um sistema físico do estado de condução normal para outro de “supercondução”, ou seja, caracterizado somente pela resistividade nula. As medidas de Meissner e Ochsenfeld levaram à conclusão que, além das condições  $\vec{E} = \vec{0}$  e  $\vec{B}$  constante no interior de um supercondutor, encontra-se  $\vec{B} = \vec{0}$  (Figura 11).



**Figura 11 – Expulsão de fluxo magnético em uma amostra supercondutora devido à transição para o estado supercondutor ( $H < H_c$ ) - Efeito Meissner. Adaptada de [7].**

Lembremos que a relação entre densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$ ), campo magnético ( $\vec{H}$ ) e magnetização ( $\vec{M}$ ) em um meio material é dada no sistema internacional de unidades (S.I.) por:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} + \vec{M} \quad (2.12)$$

Na equação (2.12)  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio considerado. A permeabilidade do meio pode ser expressa com base na permeabilidade magnética do

vácuo  $\mu_0$  (permeabilidade de referência) e na susceptibilidade magnética ( $\chi_m$ ) do meio em questão. No S.I. escreve-se:

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 + \chi_m) \quad (2.13)$$

A susceptibilidade é definida pela relação linear entre o campo  $\vec{H}$  e a magnetização  $\vec{M}$ :

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H} \quad (2.14)$$

Se  $\vec{B} = \vec{0}$ , e  $\vec{H} \neq \vec{0}$ , então devemos ter:

$$\mu = 0 \quad (2.15)$$

O que significa que, no S.I.:

$$\chi_m = -1 \quad (2.16)$$

Assim, o efeito de exclusão total de fluxo magnético indica que um sistema físico supercondutor possui comportamento de um diamagneto ideal. É importante ressaltar que a propriedade de blindagem magnética correspondente ao Efeito Meissner não ocorre, rigorosamente, em todo o volume do sistema. Dessa forma não há um salto (descontinuidade) no valor de campo magnético na interface entre o sistema e o meio externo. Para o caso de supercondutores tipo I é possível demonstrar que o campo magnético cai exponencialmente com a distância de fora para dentro (Figura 12).

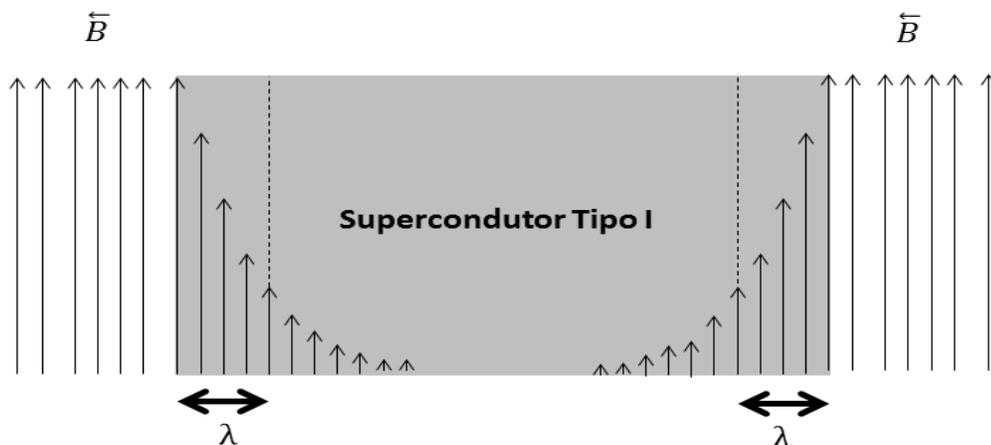


Figura 12 – Penetração de campo magnético em uma amostra de supercondutor tipo I.

Pela figura 12 é possível ver que existe então um parâmetro ( $\lambda$ ) que caracteriza a atenuação do campo magnético dentro do material supercondutor ( $e^{-k/\lambda}$ ), tal parâmetro é denominado comprimento ou profundidade de penetração de London [6].

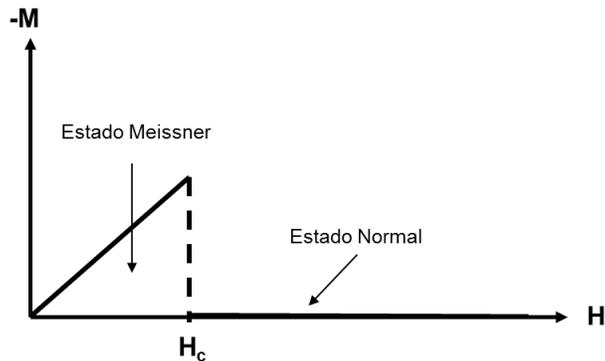
Uma análise mais profunda passa necessariamente pela mecânica quântica, a qual mostra que, em linhas gerais, a supercondutividade é um fenômeno quântico de muitos corpos com conseqüências observáveis no mundo macroscópico. Embora tal análise seja interessante para um entendimento mais geral a respeito do fenômeno, o tratamento quântico não se justifica neste trabalho, uma vez que se trata de uma análise de uma aplicação da supercondutividade em engenharia elétrica. Maiores informações podem ser obtidas em referências que tratam do assunto, desde um nível básico [9] [10] até um nível mais avançado [6] [11] [12] [13].

## 2.4 – Supercondutores Tipo I e Tipo II

Supercondutores são classificados como pertencendo a dois grandes grupos: os de “tipo-I” e os de “tipo-II”. Tal classificação dos materiais supercondutores é feita com base em seu comportamento com respeito a penetração de um campo magnético aplicado.

Supercondutores tipo-I são aqueles que sob aplicação de um campo magnético crítico ( $H_c$ ), a corrente induzida de blindagem atinge um valor também crítico ( $I_c$ ) e se estes valores de campo e corrente forem elevados o material transita ao estado normal de forma abrupta. O mesmo fenômeno ocorre se estabelecermos uma corrente elétrica (corrente de transporte) com valor igual ao crítico, pois há nesse caso a geração de um campo magnético de valor  $H_c$ . O fato de que  $H_c$  gera  $I_c$  e vice-versa, em supercondutores tipo-I chama-se “regra de Silsbee” [6].

Para os materiais supercondutores do tipo-I há dois estados distintos: um em que o fluxo magnético não penetra a amostra (campo aplicado inferior ao campo crítico) e outro em que a penetração é total (campo magnético superior ao campo crítico).



**Figura 13 – Comportamento típico da magnetização ( $M$ ) de um supercondutor tipo I em termos do campo magnético aplicado ( $H$ ), em unidades arbitrárias (u.a). Adaptado de [9].**

A figura 13 ilustra o comportamento desta classe em termos da magnetização e do campo magnético aplicado. Há uma penetração abrupta do campo magnético quando este se torna superior ao valor crítico. Grande parte dos supercondutores de baixa  $T_c$ , como alguns elementos metálicos puros, está enquadrada nesta classe.

Em supercondutores do tipo-II a corrente crítica usualmente medida não é a que corresponde a destruição do estado supercondutor, mas sim aquela que promove a entrada do material em um estado dissipativo. Neste tipo de supercondutor, se o campo magnético aplicado atinge um valor chamado de campo crítico inferior, ( $H_{c1}$ ), linhas de campo conseguem penetrar no supercondutor. Estas linhas são isoladas, formando núcleos de material em estado normal, cada um cercado por supercorrentes, enquanto o restante do material permanece em estado supercondutor. Cada um desses núcleos, em geral de formato cilíndrico, chama-se vórtice (ou vórtice de Abrikosov), e seu coletivo é chamado de rede de vórtices [7].

Como os vórtices são pequenos “filetes” de campo magnético o movimento da rede é causado pela interação destes com a corrente elétrica através da força de Lorentz. Essa movimentação da rede de vórtices altera o fluxo magnético no material ( $\Phi_B$ ) e pela Lei de Faraday temos uma força eletromotriz induzida (*f. e. m.*):

$$f. e. m = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.17)$$

Como existe corrente elétrica e uma voltagem a ela associada, existe dissipação de potência, e o material tem comportamento dissipativo: na prática é como se existisse uma resistência elétrica. À medida que o campo aplicado aumenta, um número maior de vórtices penetra o material, até que, para um campo  $H_{c2}$ , dito campo crítico superior, todo o material é preenchido por campo magnético e a supercondutividade desaparece. Convém lembrar que supercondutores tipo-II não obedecem a regra de Silsbee [6].

Percebemos assim que os supercondutores tipo-II constituem uma classe de materiais que apresenta três estados distintos, ou seja, o Estado Meissner, um estado misto e o estado normal. Temos portanto dois valores de campo crítico: o primeiro determina o início da penetração parcial do fluxo magnético na amostra e o segundo determina a penetração total. Entre a penetração parcial e a total a amostra ainda mantém a supercondutividade, sendo o Efeito Meissner parcial neste caso.

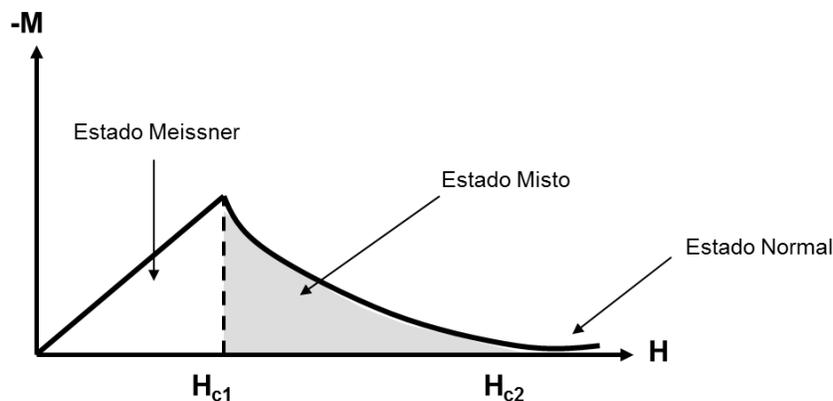


Figura 14 – Comportamento típico da magnetização ( $M$ ) de um supercondutor tipo II em termos do campo magnético aplicado ( $H$ ), em unidades arbitrárias (u.a.). Adaptado de [9].

A figura 14 ilustra o comportamento da magnetização desta classe de supercondutor frente ao campo magnético, é possível ver uma região entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$  (penetração parcial do campo). Quando o supercondutor se encontra nesta última condição dizemos que ele está no estado misto e, é nesta região de operação que normalmente um supercondutor tipo-II atua nas diversas aplicações.

Verifica-se também que a penetração de campo magnético no estado misto se dá de forma quantizada, através dos vórtices que possuem um valor característico de fluxo ou fluxóide  $\phi_0$  (equação 2.18), o que de certa forma evidencia o caráter quântico do fenômeno da supercondutividade. Cada fluxóide vale, no S.I.:

$$\phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb} \quad (2.18)$$

A diferença entre os dois tipos de supercondutores pode ser mais bem entendida com ajuda de diagramas de campo magnético versus temperatura (H x T) para cada um destes sistemas. Por simplicidade são definidas três regiões que permitem uma análise direta do comportamento dos distintos materiais na figura 15. Tal análise é feita através de comentários feitos na sequência do texto após a referida figura.

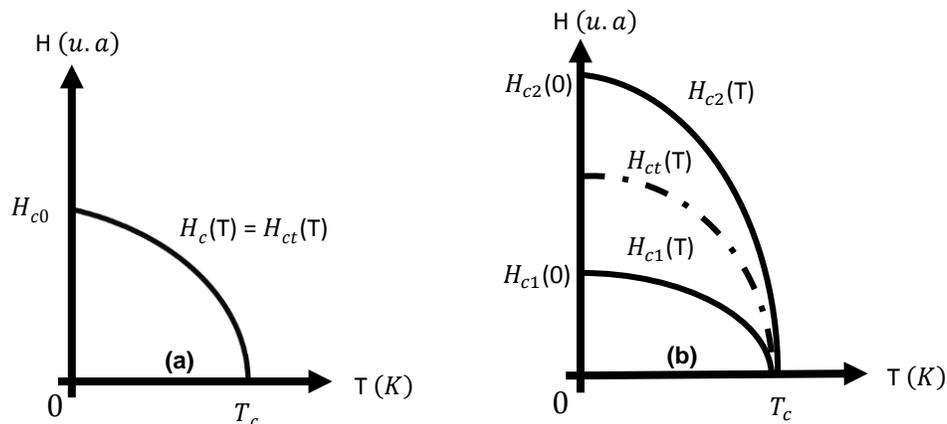


Figura 15 – Diagrama H x T de dois sistemas supercondutores: (a) tipo I e (b) tipo II. O campo magnético é dado em unidades arbitrárias (u.a.). Adaptado de [7].

A primeira região corresponde a área abaixo da curva  $H_c(T)$ , no caso de supercondutores tipo I, e abaixo da curva  $H_{c1}(T)$  para os supercondutores tipo II. Neste caso temos uma densidade de fluxo magnético nula, o que corresponde ao Efeito Meissner (a partir da profundidade de penetração).

A segunda região diz respeito somente aos supercondutores tipo II, e corresponde a zona formada entre as curvas  $H_{c1}(T)$  e  $H_{c2}(T)$ . É Nesta região que ocorre a penetração parcial do fluxo magnético, conforme já foi dito. O Estado Misto ou Fase de Shubnikov persiste até que o segundo campo crítico seja atingido

A terceira e última região está acima do campo  $H_c(T)$ , para supercondutores tipo I, e acima do campo  $H_{c2}(T)$  para os supercondutores tipo II. Nesta região, ocorre a penetração abrupta do campo magnético para os supercondutores do primeiro tipo e do segundo tipo, sendo feita a penetração neste último através dos vórtices. Em ambos os casos o supercondutor passa ao seu estado normal.

A penetração de fluxo magnético sem a destruição do estado supercondutor é uma característica marcante de um material do tipo II. Mas vale ressaltar que mesmo os supercondutores tipo I podem apresentar coexistência de regiões normais e supercondutoras. Isto varia com a geometria do sistema é chamado “Estado Intermediário” [6].

Do ponto de vista de engenharia os supercondutores do tipo II são os de maior interesse tecnológico, resultado dos elevados valores de  $H_{c2}$  e  $J_c$  que estes materiais geralmente apresentam. No caso da cerâmica supercondutora YBCO o valor do campo  $H_{c2}$  chega a atingir mais de 100 Teslas para certas direções na amostra (anisotropia) e a densidade de corrente crítica  $J_c$  supera os 50 kA/cm<sup>2</sup> [12].

## 2.5 – Supercondutores de Alta Temperatura Crítica – O composto YBCO

Descoberta em 1986 por Bednorz e Müller nos laboratórios de pesquisa da IBM em Zurique [12], a supercondutividade de alta temperatura crítica causou grande impacto nas perspectivas de estudos e aplicação da supercondutividade. Porém, a grande barreira em termos de aplicação só foi superada em 1987 por Chu *et al*, com a descoberta do composto  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Tal fato possibilitou a substituição dos sistemas de refrigeração com base em hélio líquido por outros com base em nitrogênio líquido (N<sub>2</sub>L), já que o composto descoberto possuía temperatura crítica acima do ponto de ebulição do nitrogênio líquido. A figura 16 mostra um pequeno resumo da evolução temporal dos valores mais altos de temperatura crítica dos diversos sistemas supercondutores. São evidenciadas as barreiras de temperatura do hélio e do nitrogênio líquidos.

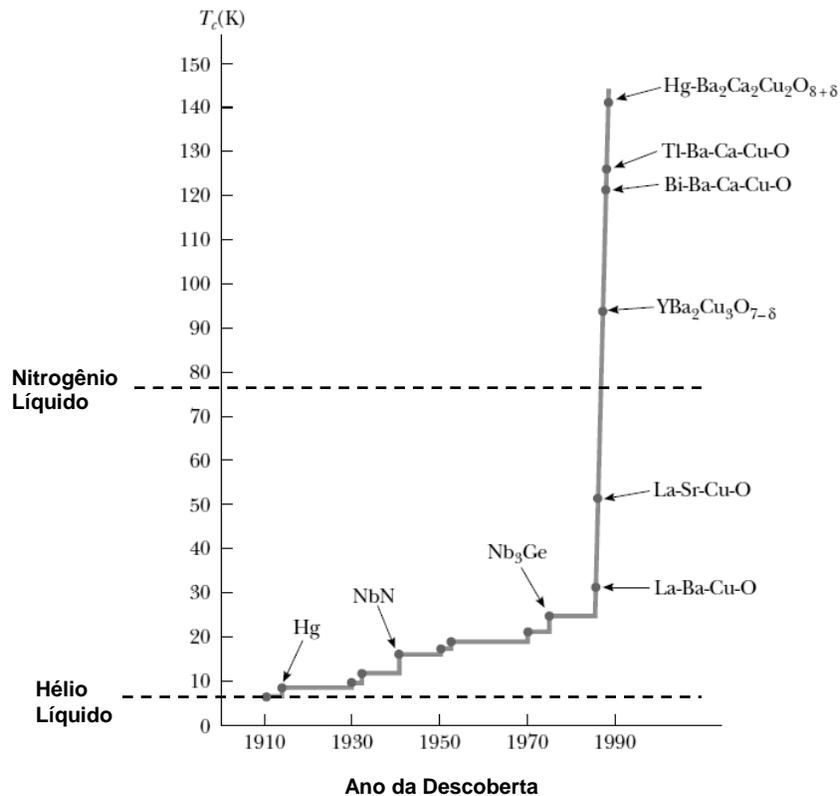


Figura 16 – Esquema com a evolução dos valores de temperatura crítica até 1990. Adaptado de [9].

Destaca-se na figura anterior o composto  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (hoje comumente representado por “YBCO” ou “Y-123”), pois foi este um dos responsáveis pela inauguração da era da supercondutividade em alta temperatura crítica. A descoberta de tal composto é atribuída a Paul Chu (C. W. Chu) em 1987 na universidade de Houston, com uma  $T_c$  da ordem de 92K para a estequiometria  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  [14]. A lista de materiais de alta  $T_c$  é grande, e a seguir será dada maior atenção a este último composto em razão de sua utilização dentro do presente trabalho.

Em razão de ter sido o primeiro supercondutor com  $T_c$  acima dos 77K, o YBCO é também um dos materiais mais estudados até hoje. Trata-se de um supercondutor do tipo II, que em termos materiais é um óxido cerâmico a base de Ítrio, Bário e Cobre. Sua estrutura cristalográfica é do tipo perovskita estendida [15], conforme mostra a figura 17.

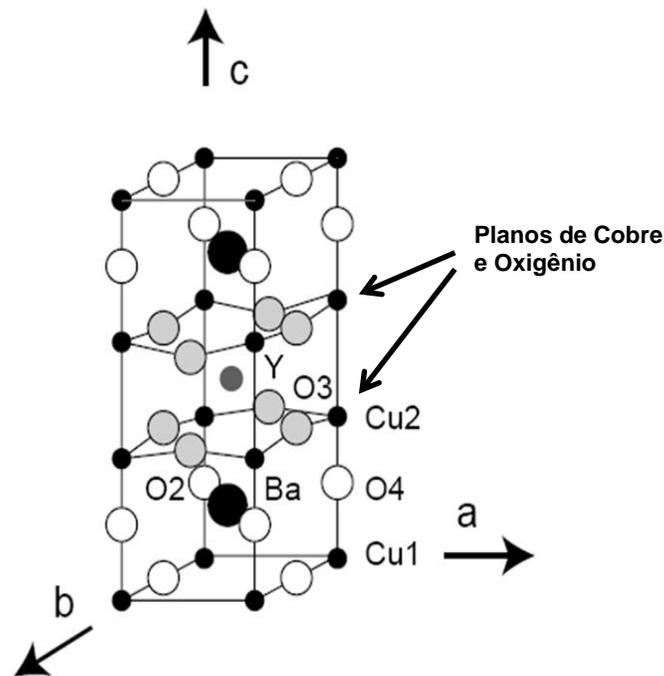
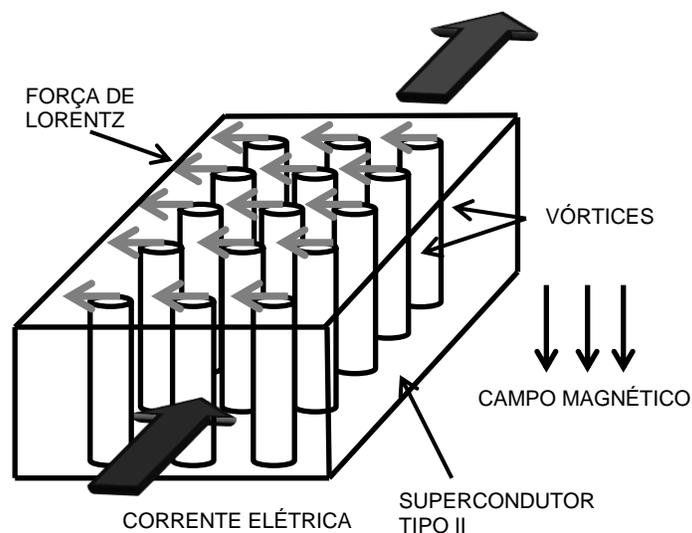


Figura 17 – Estrutura cristalográfica do YBCO. Adaptada de [14].

O mecanismo determinante para a supercondutividade neste composto é desconhecido, mas sabe-se que está relacionado com os chamados planos de cobre e

oxigênio (CuO) [15]. Devido ao caráter anisotrópico da estrutura, o transporte de corrente no material depende fortemente do alinhamento dos referidos planos. Por isso as técnicas de fabricação destes materiais, para emprego em transporte de corrente, dependem de processos de texturização para formação de planos de cobre e oxigênio em uma direção privilegiada e de uma ótima conexão entre os grãos do material [1].

A densidade de corrente é um importante parâmetro tanto para o transporte de corrente, quanto para a transição entre o estado supercondutor e o estado dissipativo (misto). Para um supercondutor tipo II, como é o caso do YBCO, a densidade de corrente crítica corresponde ao valor máximo de corrente elétrica que o material suporta transportar sem que haja efeito resistivo (dissipação de potência). Como já explicado, a dissipação inicia-se quando a densidade de corrente que circula pelo material é tal que a força magnética (Força de Lorentz) sobre cada vórtice é suficiente para fazer com que ele se mova pelo material. Dessa forma um fluxo magnético variável no tempo passa a existir e uma tensão é detectada, indicando a transição ao estado dissipativo. A figura 18 ilustra essa movimentação da rede de vórtices.



**Figura 18 – Esquema representando a movimentação da rede de vórtices em um supercondutor tipo II.**

É preciso outra técnica, além da texturização, para garantir altos valores de corrente crítica ( $J_c$ ) ao YBCO. Como visto acima, a dissipação é desencadeada pela movimentação da rede de vórtices e uma forma de “ancorar” estes vórtices na estrutura do material pode elevar  $J_c$ . É exatamente isso que é feito, uma ancoragem dos vórtices mediante a geração de defeitos na amostra de YBCO durante sua fabricação<sup>2</sup>, através da inclusão de impurezas, heterogeneidades, etc. [14].

A determinação do valor de  $J_c$  emprega basicamente duas técnicas, uma utiliza o que os físicos chamam de modelo de estado crítico, onde através de um modelo matemático e de uma curva de magnetização versus temperatura é possível a determinação da corrente crítica e em seguida a densidade de corrente crítica. A outra técnica, de maior interesse na engenharia elétrica, corresponde a determinação da curva  $I \times V$  (corrente versus tensão) pelo método de 4 pontas: técnica de injeção de corrente na amostra com monitoramento da corrente elétrica (densidade de corrente) e da tensão na amostra. O surgimento de tensão, conseqüentemente de um campo elétrico, indica a presença de efeito dissipativos, sendo a densidade de corrente para esta situação a densidade de corrente crítica. Não existe consenso com respeito ao campo elétrico que serve de critério para esta transição, mas o valor usual e aceito é de em torno de  $1 \mu V/cm$  [14].

As propriedades térmicas do YBCO também são importantes para aplicação em engenharia elétrica, em especial no caso de limitadores de corrente (a própria supercondutividade do material é função da temperatura). Duas propriedades ajudam a caracterizar o comportamento térmico do material: a sua condutividade térmica ( $\kappa$ ) e o seu calor específico ( $c$ ). A primeira possibilita a previsão da troca de calor da amostra com o sistema de refrigeração (banho de N<sub>2</sub>L), a segunda possibilita uma estimativa da temperatura que a amostra pode alcançar em um ensaio de limitação de corrente por

---

<sup>2</sup> Entendido como todo período de preparo antes do uso na aplicação, e não só o tempo de síntese.

exemplo. Segundo GOMEZ [14] a condutividade térmica varia bastante com a orientação e conteúdo de oxigênio, enquanto o calor específico quase não varia com o conteúdo de oxigênio. Ainda segundo GOMEZ [14] para uma temperatura de 77K a condutividade térmica do YBCO possui valores da ordem de 5,5 W/mK, e calor específico da ordem de 150 J/kg.K. Nota-se que o valor de condutividade é bastante baixo quando comparado com um material como o cobre, que para essa temperatura possui condutividade térmica da ordem de 350 W/mK.

Para a construção do protótipo de limitador de corrente estudado no presente trabalho foram utilizados blocos cerâmicos de YBCO texturizados, com geometria cilíndrica (discos). A técnica empregada foi a de texturização por fusão, que permite obter blocos supercondutores relativamente grandes (da ordem de cm). Nesta técnica há uma fusão parcial dos materiais empregados, com posterior resfriamento e solidificação lenta. É importante ressaltar que os blocos cerâmicos de YBCO citados não foram produzidos durante o desenvolvimento do trabalho, eles foram importados junto a empresa CAN SUPERCONDUCTORS e preparados para o uso no arranjo limitador. A figura 19 mostra dois discos de YBCO semelhantes aos importados.



**Figura 19 – Exemplos de blocos cilíndricos de YBCO comercializados pela CAN SUPERCONDUCTORS. Figura extraída do site da empresa [16].**

Em termos do que foi abordado acima é possível compreender um efeito indesejável nas amostras supercondutoras de YBCO: a possibilidade de formação de pontos quentes

(*hot spots*) [14]. Devido ao baixo valor de condutividade térmica, a alta potência a ser dissipada pelo material e um possível baixo intercâmbio térmico entre a amostra e o banho térmico (N2L), temos a possibilidade de aquecimento excessivo de alguns pontos da amostra, que acabam por transitar ao estado normal. Há inclusive a possibilidade de que esse efeito possa se propagar e acabar destruindo a amostra. Também devido a heterogeneidades do material, ou seja, a variações locais de composição, teor de oxigênio e  $T_c$ , o material não transita de forma homogênea.

## Capítulo 3 – Limitação dos Níveis de Curto-Circuito

### 3.1 – Correntes de Curto-Circuito

Em projetos de sistemas elétricos precisam ser levados em conta efeitos de ação prolongada, consequência direta da corrente e tensão nominais. Além disso, há também a necessidade de dimensionamento e determinação dos efeitos resultantes dos curtos-circuitos em algum ponto da rede. As correntes elétricas de curto-circuito apresentam, na maioria dos casos, valores muito superiores às correntes nominais, o que implica a ocorrência de efeitos térmicos, eletromecânicos e dinâmicos também. Estas correntes podem causar danos ou até destruição dos equipamentos instalados na rede, corte de fornecimento e pode levar risco a vida das pessoas. Todos os dimensionamentos devem estar de acordo com os conceitos científicos e de engenharia pertinentes, e consequentemente respeitando as principais normas técnicas vigentes (ABNT, IEC, ANEEL, etc) [17].

De uma forma geral os curtos-circuitos, conexões de baixa impedância entre potenciais elétricos diferentes, tem como efeito direto a modificação das condições de operação das redes elétricas. A passagem para um novo estado de operação está diretamente ligada com processos de natureza eletromagnética, térmica e eletromecânica na rede. Destes processos que representam a “adaptação” da rede vão depender a intensidade e a variação temporal da corrente de curto-circuito.

A resposta da rede e os processos de compensação são influenciados por alguns fatores:

- tipos de curto-circuito
- instante de manifestação do curto-circuito

- potência das fontes das quais provém a corrente que alimenta o curto-circuito
- local da rede onde ocorreu o curto (impedância “vista” pela rede)
- tipo de rede (impedância)
- comportamento dos componentes do circuito e equipamentos de controle
- valores nominais (característicos)

Quando ocorre um curto-circuito nos terminais de um gerador síncrono, a corrente em uma fase apresenta geralmente duas componentes superpostas, uma oscilatória e outra contínua [18]. Esta última depende, entre outros fatores, do instante de aplicação do curto. De fato o instante de manifestação do curto-circuito, referido à variação da tensão (ponto da senóide de tensão onde ocorre a falta), influi decisivamente sobre o máximo valor de pico da corrente de curto-circuito, o que é uma questão de fundamental importância para análise dos limites máximos de elementos de circuito e do projeto de proteção. As fontes que alimentam os pontos de falta são geralmente máquinas síncronas nas suas diversas formas construtivas (turbogeradores, máquinas de pólos salientes, etc).

Para sistemas de grande porte as características dos geradores e seus sistemas reguladores (reguladores de tensão, frequência, etc.) perante um curto-circuito prolongado podem ter uma influência decisiva sobre os processos de compensação. A posição do curto-circuito pode ser classificada como “próxima ao gerador” e “afastada do gerador”, e também é decisiva no que se refere a influência do curto no funcionamento da rede. [17].

O tempo de duração de um evento de curto-circuito é importante para o comportamento da rede e possíveis danos aos componentes desta. Este tempo depende fortemente dos dispositivos de manobra e de proteção existentes na rede, que por sua vez dependem do próprio estudo das correntes de curto-circuito. Tais estudos influenciam diretamente na ação coordenada e seletiva destes dispositivos. Em termos dos efeitos

térmicos o tempo é ainda mais determinante, pois dependendo da potência exigida em uma situação de falta é o intervalo de tempo de duração desta que vai determinar o dano por efeitos térmicos a um dado componente conforme a equação 3.1:

$$\Delta Q = \int_{t_i}^{t_f} P. dt \quad (3.1)$$

Onde:

$\Delta Q \rightarrow$  Quantidade de calor

$P \rightarrow$  Potência Elétrica

$dt \rightarrow$  Intervalo de tempo infinitesimal

A topologia da rede estabelece os possíveis caminhos das correntes de curto-circuito e correntes parciais. A impedância da rede até o ponto da falta é função direta dos componentes instalados e da sua extensão (linhas de distribuição, transformadores, linhas de transmissão, etc). No momento de uma falta é esta impedância característica que ajuda a limitar parcialmente o nível da corrente, sendo um fator importante para a questão do curto-circuito.

Na próxima seção são apresentados os principais tipos de curto-circuito e uma breve discussão sobre estes, tendo como base as referências [17] [18] [19]. Em seguida é descrita a análise simples da variação da corrente de curto-circuito em função do tempo perante tensão constante (curto circuito afastado do gerador), tendo em vista os objetivos deste trabalho (limitador de bancada). Trata-se fundamentalmente da análise de um pequeno modelo de rede elétrica alternada monofásica. Não será passado ao caso de análise das condições em uma rede trifásica por fugir ao objetivo fundamental deste trabalho. Maiores informações sobre análise de curto-circuito podem ser encontradas em literatura especializada [17] [18] [19] [20].

### 3.1.1 – Tipos de Curto-Circuito

Uma classificação importante dos tipos de curto-circuito está baseada no número de fases envolvidas. Em sistemas trifásicos ou tripolares, como é o caso brasileiro, existem basicamente 5 tipos de curto circuito [21]:

- curto-circuito trifásico ou tripolar (FFF)
- curto-circuito bifásico ou bipolar sem contato com a terra (FF)
- curto-circuito bifásico ou bipolar com contato com a terra (FFN)
- curto-circuito monofásico ou unipolar (FN)
- dupla falta a terra

Para um sistema elétrico de potência um dos casos mais importantes é o curto-circuito trifásico. Se a rede é balanceada as três tensões resultam em tensão nula no ponto de falta (curto-circuito), o que significa que as três fases apresentam correntes alternadas simétricas defasadas em  $120^\circ$ . Este fato simplifica muito os cálculos relativos às correntes de curto-circuito, uma vez que devido ao balanceamento as fases possuem comportamentos análogos. Neste caso o estudo de curto pode ser elaborado em apenas um dos condutores. Para os outros casos de curto-circuito as condições são assimétricas, levando a uma complexidade maior nos cálculos, em especial no caso onde há contato com a terra. Diante destes tipos de curto as tensões no ponto de falta podem não ser nulas.

Durante um curto-circuito bifásico sem contato com a terra aparecem correntes de curto-circuito alternadas transitórias, que geralmente possuem intensidades menores do que no caso de curto trifásico [17]. Um detalhe importante é a posição do curto frente a



Em termos de frequência de ocorrência o curto-circuito mais comum é o monofásico, sendo geralmente associado a estes menores valores de corrente de curto. As correntes de curto monofásico e bifásico com contato a terra devem ser levadas em consideração na determinação das tensões de contato, assim como na análise dos efeitos e do dimensionamento de sistemas de aterramento [17].

### **3.1.2 – Análise Básica do Curto-Circuito**

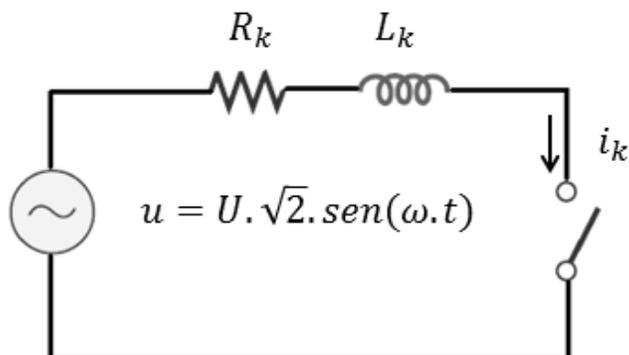
Será feita aqui uma breve abordagem do modelo para curto-circuito em uma pequena rede de corrente alternada monofásica nas premissas de tensão constante, que em termos práticos significa um curto afastado do gerador (fonte). A análise será feita em duas etapas, uma considerando a rede sem carga e outra com carga.

Pretende-se com essa análise um subsídio para o estudo de um dispositivo limitador de corrente. Nesse sentido o foco é análise do comportamento básico de uma corrente de curto-circuito em rede monofásica, através de um modelo simplificado, mas que se aproxime bastante das condições de teste do referido dispositivo.

#### **3.1.2.1 – Curto-Circuito sem Carga**

A figura 21 fornece um esquema de circuito equivalente de uma rede alternada monofásica sem carga. O circuito contém uma fonte de alimentação idealizada (resistência interna tomada como nula) com uma tensão senoidal  $u$  de valor eficaz  $U$ , portanto um valor de pico igual  $\sqrt{2}.U$ , e frequência angular ( $\omega$ ) constante, relacionada com a frequência da fonte pela relação  $\omega = 2\pi.f$ . A resistência e reatância até o ponto de falta são, respectivamente, iguais a  $R_k$  e  $X_k = \omega.L_k$ , tomadas como constantes e

lineares. O curto-circuito é executado com uma chave ideal, tomando o tempo  $t = 0s$  quando a senóide de tensão passa pelo zero.



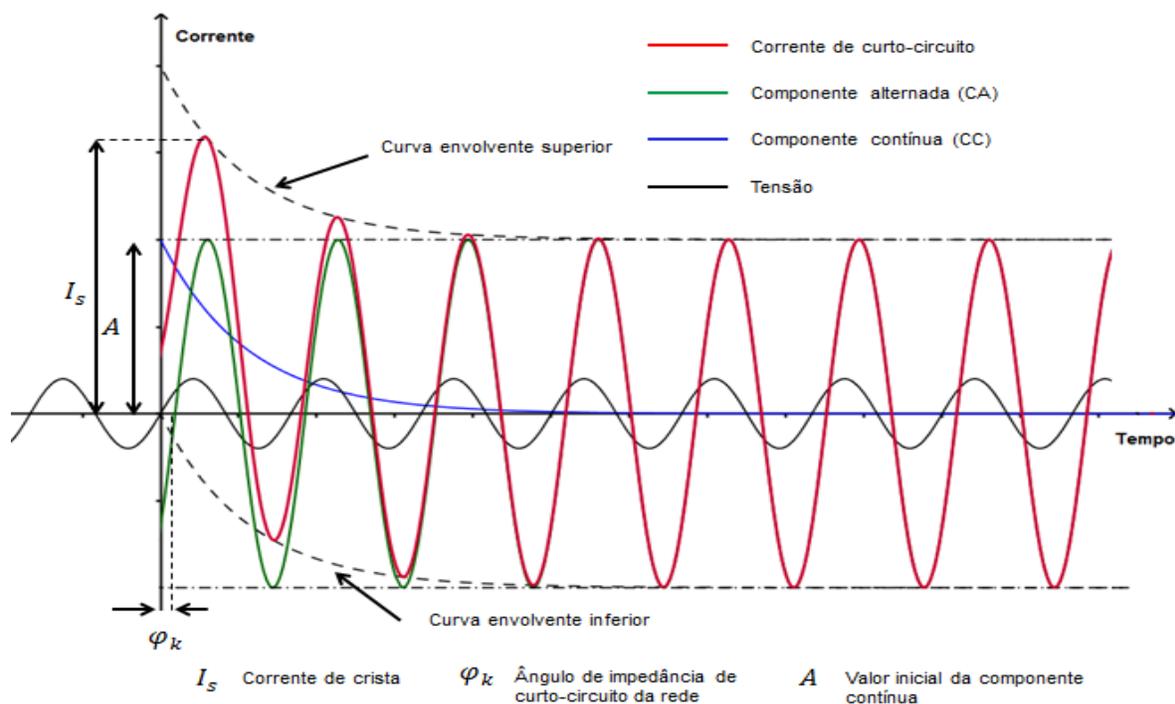
**Figura 21 – Modelo de circuito de corrente alternada monofásico para análise de curto-circuito sem carga. Adaptado de [17].**

Neste caso onde não existe carga a corrente de curto-circuito instantânea  $i_k$  surge com valor inicial nulo. Após o fechamento da chave a corrente  $i_k$  começa a crescer, partindo de zero, até atingir um valor de pico  $I_s$  que é a chamada corrente de estabelecimento do curto-circuito (surto). Este valor de corrente é então amortecido até o estabelecimento de uma corrente estacionária senoidal, cujo valor de pico é igual ao valor do componente instantâneo da corrente de curto  $i_{\sim}$ . Esta corrente possui então um valor de pico constante.

O grau de assimetria e o valor de pico da corrente de curto-circuito são determinados pelo instante em que este se manifesta. Se a impedância  $Z_k$  possuir um componente indutivo relativamente alto, então existirá um grande ângulo de defasagem entre a corrente  $i_{\sim}$  e a tensão ativa. O valor de  $i_k$  deveria assumir o valor instantâneo da corrente estacionária  $i_{\sim}$  quase que imediatamente após  $t = 0s$ . Porém, a indutância dificulta a variação instantânea da corrente, dessa forma a corrente instantânea de curto-circuito  $i_k$  se inicia realmente com valor nulo. Segundo ROEPER [17], podemos tratar o problema

em termos de uma “corrente de compensação”  $i_{\sim}$ , cujo valor inicial tem amplitude  $A$  e deve corresponder ao negativo do valor instantâneo do componente alternado da corrente instantânea  $i_{\sim}$ . A corrente de compensação é chamada de componente contínua, a qual é amortecida segundo um fator temporal que corresponde a uma função exponencial negativa (função da resistência e indutância de linha). Seu valor parte do inicial  $A$  até zero, dependendo da constante de tempo de amortecimento, denominada  $T_a$ .

A corrente  $i_{\sim}$  é fruto da tensão ativa sobre a impedância da rede  $Z_k$ . Seu valor eficaz inicial (momento do curto-circuito) é denominado corrente de curto-transitória  $I_k''$ . Perante valores tomados como constantes para  $U$  e  $Z_k$ , o valor desta corrente corresponde a corrente de curto-circuito  $I_k$ . Isto não ocorre quando o curto ocorre nas proximidades do gerador [17].



**Figura 22 – Variação da corrente de curto-circuito monofásico sem carga, de suas componentes e da tensão da fonte. Adaptado de [17].**

A figura 22 mostra as curvas de tensão (referência), corrente de curto-circuito e suas componentes alternada e contínua. Nesta figura as curvas tracejadas indicam as amplitudes dos valores de pico da corrente  $i_k$ . A curva tracejada superior corta o eixo das ordenadas no ponto  $A + \sqrt{2}I_k''$ , onde na prática,  $A < \sqrt{2}I_k''$ . A curva tracejada inferior corta a ordenada no ponto  $A - \sqrt{2}I_k''$ . Assim, a componente de corrente contínua representa a nova linha sobre a qual oscila a corrente, ou seja, corresponde a linha média entre as curvas tracejadas superior e inferior. Para um tempo suficientemente grande, mais de 3 ciclos no caso da figura 22, a corrente estacionária se estabelece e volta a oscilar em torno do eixo do tempo.

Ao equacionarmos o problema temos de imediato a equação 3.2:

$$i_k = i_{\sim} + i_{-} \quad (3.2)$$

onde:

$i_k$  é a corrente de curto-circuito

$i_{\sim}$  é a componente alternada da corrente de curto-circuito

$i_{-}$  é a componente contínua da corrente de curto-circuito

Pode-se demonstrar, segundo ROEPER [17], que :

$$i_k = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{Z_k} \cdot [\text{sen}(\omega t + \psi - \varphi_k) - e^{-t/T_a} \cdot \text{sen}(\psi - \varphi_k)] \quad (3.3)$$

$$i_k = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{Z_k} \text{sen}(\omega t + \psi - \varphi_k) - \frac{\sqrt{2} \cdot U}{Z_k} \cdot \text{sen}(\psi - \varphi_k) e^{-t/T_a} \quad (3.4)$$

$$Z_k = (R_k + X_k)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5) \quad \omega = 2\pi \cdot f \quad (3.6)$$

$$\varphi_k = \text{arctg} \frac{X_k}{R_k} \quad (3.7)$$

$$T_a = \frac{L_k}{R_k} = \frac{X_k}{\omega \cdot R_k} \quad (3.8)$$

onde:

$U$  valor da tensão eficaz

$Z_k$  valor da impedância de curto-circuito da rede

$\omega$  frequência angular da fonte

$t$  tempo

$\varphi_k$  ângulo da impedância de curto-circuito da rede

$T_a$  constante de tempo da corrente contínua

$\psi$  ângulo de início do curto-circuito com referência a tensão

Como pode ser analisado das equações anteriores as grandezas  $Z_k$ ,  $\varphi_k$  e  $T_a$  são determinados exclusivamente através dos parâmetros do circuito,  $R_k$  e  $X_k$ , ou seja, da impedância da rede. O ângulo de ligação  $\psi$  depende somente do instante em que se estabelece o curto-circuito (fechamento da chave ideal no caso do modelo). De posse da equação para  $i_k$  pode-se concluir que, diante de uma impedância fixada  $Z_k$ , a magnitude da corrente de pico não muda, mesmo que o ângulo de impedância  $\varphi_k$  mude ( $\text{sen}^2\varphi_k + \text{cos}^2\varphi_k = 1$ ). Existe um “ângulo de ligação” que leva ao maior valor da componente de corrente contínua  $i_-$  (equação 3.4) e seu valor é dado pela equação 3.9:

$$\psi = \varphi_k - 90^\circ \quad (3.9)$$

Embora a equação 3.9 pareça demonstrar que o ângulo  $\psi$  dependa da relação entre a resistência e a reatância indutiva da rede, é preciso esclarecer que geralmente não se tem controle sobre  $\psi$ . A equação 3.9 só vale para determinar em qual ângulo de estabelecimento do curto a componente contínua será maior, e isso depende das características da rede através de  $\varphi_k$ .

Quando  $\psi = \varphi_k$  não existe componente de corrente contínua, ou seja, a corrente  $i_k$  é idêntica a corrente  $i_{\sim}$  (primeiro termo da equação 3.4). A correlação entre as grandezas mencionadas pode ser verificada pela análise das correntes de curto-circuito para diversas situações da razão  $R_k/X_k$  ou  $R_k/L_k$ , diante de um valor fixo de impedância do circuito. A título de ilustração tomemos dois casos distintos [17]:

-  **$R_k/X_k$  baixo**: considerando tipicamente uma resistência da ordem de 3% da reatância indutiva (isso ocorre, por exemplo, em um curto-circuito envolvendo bobinas limitadoras de corrente). Neste caso o ângulo de impedância tem um valor de  $88,3^\circ$ , muito próximo de  $90^\circ$ .

-  **$R_k/X_k \cong 1$** : considerando uma resistência equiparável ao valor de reatância indutiva (isso ocorre, por exemplo, com redes de cabos em baixa tensão). Neste caso o ângulo de impedância tem um valor de  $45^\circ$ .

No primeiro caso temos um ângulo de impedância próximo a  $90^\circ$ , dessa maneira se o curto-circuito ocorrer para  $\psi = 0^\circ$  (zero da senóide de tensão) o valor inicial da componente de corrente contínua e o pico do primeiro ciclo de corrente de curto-circuito,  $i_k$ , alcançam valores muito próximos do máximo. A intensidade e a variação da corrente de curto são acentuadamente influenciadas pelo lento amortecimento da componente de corrente contínua.

O segundo caso retrata o caso em que  $\varphi_k = 45^\circ$  e novamente uma ocorrência do curto em  $\psi = 0^\circ$ . Nesta situação o primeiro pico da corrente  $i_k$  apresenta, como no caso anterior, um valor alto. Entretanto, a componente contínua não apresenta no início do curto seu valor máximo, que ocorreria para  $\psi = 45^\circ$  uma vez que  $\varphi_k$  está fixado. O máximo valor da componente contínua ocorreria para  $\psi$  atrasado em  $45^\circ$ . Embora o valor da corrente de curto seja alto, ele não atinge o valor máximo para este caso de

$\psi = 0^\circ$ , pois a componente contínua é praticamente amortecida antes do instante em que se atinge o pico.

Considerando os dois casos,  $\varphi_k \cong 90^\circ$  e  $\varphi_k = 45^\circ$ , não se percebe a componente contínua quando ocorre a igualdade entre o ângulo de início do curto-circuito ( $\psi$ ) e o ângulo de impedância de curto-circuito da rede ( $\varphi_k$ ). A componente contínua ( $i_-$ ) não existe, e isso não se deve ao amortecimento rápido. Contudo, devemos ter um “controle” preciso do momento do curto nesta situação para tornar  $\psi = \varphi_k$ , o que não é uma regra prática.

De fato a tomada de  $i_-$  como sendo nula não é facilmente obtida na prática pelo ajuste de  $\psi$ , mas pode ser conseguido um amortecimento rápido de acordo com a relação entre a resistência e reatância elétricas ( $R_k/X_k$  ou  $R_k/L_k$ ), da qual depende a constante de tempo de amortecimento  $T_a$ . A figura 23 ilustra essa dependência através do esboço de um gráfico de  $T_a$  em função da razão  $R_k/X_k$ , que matematicamente é expressa pela equação 3.8 que foi dada anteriormente. Podemos verificar através desta figura que no caso de interesse para o teste com o limitador proposto ( $R_k/X_k \gg 1$ ) a constante de amortecimento é bastante pequena. Então a componente contínua esperada deve ser rapidamente amortecida.

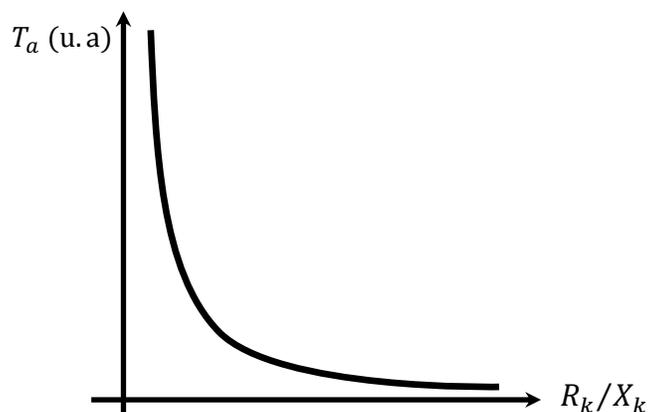


Figura 23 – Constante de tempo da componente contínua em unidades arbitrárias (u.a) em função da razão entre a resistência e a reatância indutiva da rede.

Ainda através da figura 23 é possível perceber que os valores de  $T_a$  são extremamente elevados para o caso em que  $R_k/X_k$  é muito baixo. Esse é o caso de uma rede mais indutiva. De um modo geral para uma impedância de rede constante podem ser analisados dois casos extremos (limites):

- **Impedância puramente indutiva:** Nesta situação particular a impedância da rede pode ser expressa pela equação 3.10.

$$Z_k = jX_k \quad (3.10)$$

Após o curto-circuito o valor inicial  $A$  da componente de corrente contínua é igual ao valor de pico da corrente alternada  $\sqrt{2}I_k''$ . Além disso, a componente de corrente contínua tende a não ser amortecida, pois a constante de tempo tende para um valor infinito, conforme pode ser verificado por inspeção da figura 23 e equações 3.4 e 3.8.

- **Impedância puramente resistiva:** Para essa situação extrema a impedância agora dá lugar a uma resistência elétrica:

$$Z_k = R_k \quad (3.11)$$

Com essa condição temos dois resultados diretos:

$$\varphi_k = 0^\circ \quad (3.12)$$

$$\text{sen}(\psi - \varphi_k) = 0 \quad (3.13)$$

As equações 3.12 e 3.13 indicam que não existe componente contínuo e a corrente de curto-circuito  $i_k$  é igual a corrente alternada  $i_{\sim}$ . Portanto, em uma situação que se enquadre nestas aproximações a corrente de curto-circuito deve apresentar-se sem assimetria após o curto-circuito.

### 3.1.2.2 – Curto-Circuito com Carga

A situação de curto-circuito com carga difere um pouco do caso sem carga, analisado no modelo anterior. A figura 24 representa o esquema elétrico equivalente para o circuito de corrente alternada monofásico utilizado nesta situação.

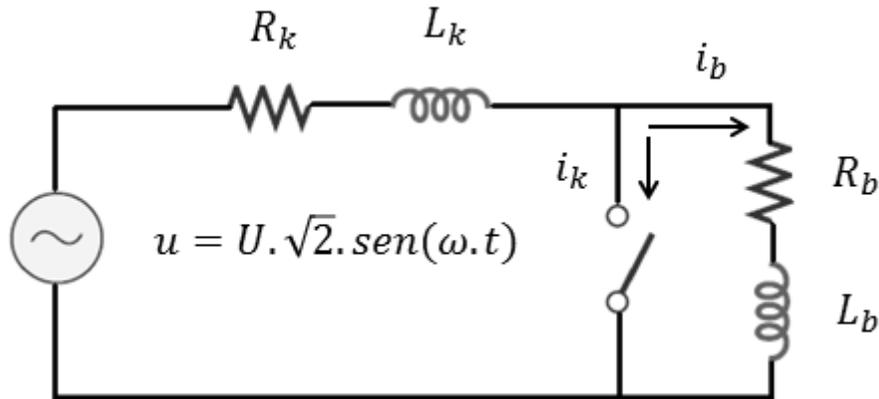


Figura 24 – Modelo de circuito de corrente alternada monofásico para análise de curto-circuito com a presença de carga. Adaptado de [17].

Além da impedância de rede vem representada na figura 24 uma carga do tipo impedância constante (RL), cuja corrente nominal é  $i_b$ . Dessa forma, no instante de estabelecimento do curto-circuito, representado pelo fechamento da chave ideal, temos uma condição de corrente não nula ( $i_k = i_b$ ). Esta é uma das principais diferenças entre o caso de curto com carga e sem carga.

Uma condição entre as impedâncias da rede e de carga interessante para o caso deste trabalho, e que foi abordada por ROEPER [17], é aquela em que a impedância da carga é semelhante a da rede na ocasião do curto. Além disso, a resistência da rede é muito maior que a reatância indutiva. Dessa forma podemos escrever as equações 3.14 e 3.15.

$$\frac{R_k}{X_k} \cong \frac{R_b}{X_b} \quad (3.14)$$

$$R_k \gg X_k \quad (3.15)$$

No momento do curto a carga sai do circuito, dessa forma a constante de tempo não depende dos valores de resistência e reatância desta. Da equação 3.15 verifica-se que a atenuação da corrente contínua é muito rápida como no caso sem carga (3.15). Agora, comparando a situação com carga e a situação sem carga verifica-se que os componentes alternados da corrente instantânea de curto-circuito ( $i_{\sim}$ ) são idênticos, enquanto que os valores transitórios da componente contínua e as cristas mais elevadas da corrente de curto-circuito ( $i_k$ ) são reduzidos pela corrente de carga.

O modelo matemático para a variação da corrente instantânea de curto-circuito com a presença de carga difere um pouco do caso sem carga, ele pode ser descrito pelas seguintes equações [17]:

$$i_k = i_{\sim} + i_b + i_{-} \quad (3.16)$$

$$i_k = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{Z_k} \left\{ \text{sen}(\omega \cdot t + \psi - \varphi_k) + \left[ \frac{Z_k}{Z} \cdot \text{sen}(\psi - \varphi) - \text{sen}(\psi - \varphi_k) \right] \cdot e^{-t/T_a} \right\} \quad (3.17)$$

$$i_k = \sqrt{2} \cdot I_k'' \left\{ \text{sen}(\omega \cdot t + \psi - \varphi_k) + \left[ \frac{I_b}{I_k''} \cdot \text{sen}(\psi - \varphi) - \text{sen}(\psi - \varphi_k) \right] \cdot e^{-t/T_a} \right\} \quad (3.18)$$

onde:

$Z_b$  é o valor da impedância de carga

$Z$  é a impedância de todo circuito

$\varphi$  é o ângulo de impedância de todo o circuito

O primeiro termo da equação 3.16 corresponde a corrente alternada instantânea de curto-circuito ( $i_{\sim}$ ), que é uma componente estacionária. O segundo termo ( $i_b$ ) representa o valor de corrente de carga (corrente nominal) no instante de aparecimento do curto. A terceira e última parte da equação continua correspondendo a componente de corrente contínua ( $i_{-}$ ). Nota-se através da equação 3.18 que, diferentemente do outro caso analisado, o termo exponencial decrescente acompanha a componente contínua e a corrente de carga. Dessa forma, podemos dizer que não existe uma diferença significativa no comportamento geral da corrente de curto nos dois casos, sem carga e com carga. A corrente de carga no momento do curto entra também como um valor constante (inicial). Uma consequência importante é o possível aumento do pico de corrente de curto-circuito no instante da falta.

Para a aplicação estudada neste trabalho, a constante de tempo (como será visto adiante) é muito pequena, se considerada a impedâncias de um ramo RL utilizado. Contudo, não se pode desconsiderar a impedância da rede e da fonte utilizada na alimentação do curto. Dessa forma os modelos acima não são capazes de dar uma estimativa fiel do comportamento do circuito em um ensaio, apenas servem de orientação ao comportamento geral da corrente. Medidas da corrente de curto-circuito direto em laboratório podem permitir a determinação do real comportamento da rede, através da análise do grau de assimetria no sinal de corrente obtido, por exemplo. Por outro lado o teste de limitação de corrente realizado neste trabalho está voltado para a intensidade da corrente, não sendo um fator determinante o comportamento fiel do circuito envolvido (fonte + limitador + carga).

Por fim, lembramos que a análise de curto-circuito mais interessante diz respeito as redes trifásicas, o que foge aos objetivos deste trabalho e, portanto não será abordado. No caso geral trata-se de uma análise bastante complexa, exceto no caso particular de

redes equilibradas, onde pode ser utilizado um esquema equivalente. No modelo simplificado para esse esquema equivalente utiliza-se geralmente 3 fontes de alimentação ideais que são modeladas por três tensões senoidais defasadas em 120°. As equações 3.19, 3.20 e 3.21 correspondem a essas tensões senoidais nas fases R, S e T [19].

$$U_R = \sqrt{2}.U.\text{sen}(\omega t) \quad (3.19)$$

$$U_S = \sqrt{2}.U.\text{sen}(\omega t + 240^\circ) \quad (3.20)$$

$$U_T = \sqrt{2}.U.\text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (3.21)$$

Como já foi dito, maiores detalhes de uma análise geral do problema de curto-circuito podem ser esclarecidos consultando as outras literaturas especializadas no assunto.

### **3.2 – Exigências dos Novos Níveis de Curto-Circuito**

Atualmente existe um incremento da demanda de energia elétrica em todo o mundo, sobretudo nos grandes centros e metrópoles. A demanda de energia elétrica a curto, médio e longo prazo, traz consigo uma necessidade imediata do aumento da capacidade de geração das usinas, do número de interligações entre os sistemas de geração e conseqüentemente dos níveis de curto-circuito do sistema elétrico de potência associado. Todas essas novas exigências acabam exigindo reforços em todo o sistema de potência e o desenvolvimento de novas tecnologias que atendam a este novo cenário de condições operativas [22].

Tecnicamente o aumento de potência nos sistemas leva em geral a um aumento direto dos níveis de curto-circuito nas barras dos sistemas, o que pode ocasionar uma situação na qual a capacidade dos disjuntores e demais equipamentos instalados seja ultrapassada. No caso específico das correntes de curto-circuito os esforços de natureza eletromecânica e térmica no momento de um defeito podem levar ao dano permanente de equipamentos da rede, acarretando inconvenientes e enormes prejuízos, seja pela

interrupção de fornecimento, danos materiais e custos de operação. As correntes de curto em um cenário anterior eram da ordem máxima de 20 vezes a corrente nominal, hoje esse limite já está sendo superado em algumas situações [22].

Nesse sentido o desenvolvimento de todos os equipamentos envolvidos no transporte de corrente em um sistema elétrico (cabos, transformadores, disjuntores, chaves, etc.) devem ser repensados, tendo em vista as novas exigências criadas pelos novos níveis de corrente de curto-circuito. Em um primeiro momento o simples aumento da capacidade e dos limites operativos parece ser uma saída. Por outro lado, o aumento da capacidade dos equipamentos em termos de corrente é limitado, seja pelos altos custos ou mesmo pela inviabilidade técnica. Esse é um panorama em que soluções inovadoras se fazem necessárias e acabam surgindo. Uma alternativa ao aumento da capacidade dos equipamentos é a limitação dos níveis de corrente de curto-circuito a valores compatíveis com os níveis operativos dos equipamentos existentes na rede. Isso pode ser conseguido com o emprego dos chamados limitadores de corrente de curto-circuito ou limitadores de corrente de falta (FCL – *Fault Current Limiters*). Tais dispositivos podem, a princípio, “atenuar” o nível de corrente de curto de forma rápida, permitindo, por exemplo, a ação dos disjuntores atuais sem necessidade de redimensionamento. O interesse no desenvolvimento de limitadores de corrente é real, e já existem alguns dispositivos limitadores disponíveis. Outros estão em fase de desenvolvimento, como é o caso da maioria dos dispositivos limitadores propostos que empregam em sua concepção a tecnologia supercondutora.

É importante lembrar que embora as exigências com respeito aos níveis de curto-circuito tenham aumentado bastante, as metodologias convencionais de limitação e proteção contra correntes de curto-circuito estão, de certa forma, bem estabelecidas, sendo difícil a sua completa substituição por tecnologias emergentes, como a tecnologia supercondutora. Toda tecnologia que se proponha a solucionar problemas de proteção

contra altas correntes de curto-circuito deverá então satisfazer as condições atendidas pelas soluções atuais, com acréscimo de vantagens e comprovada confiabilidade.

Os limites de incremento na capacidade dos equipamentos utilizados atualmente parecem estar próximos, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Dessa forma, o atual cenário de novos níveis de corrente de curto-circuito parece apontar um caminho de ação conjunta entre novas tecnologias e os sistemas convencionais, ou seja, um casamento entre as vantagens dessas duas partes de modo a superar as dificuldades impostas. Há então a possibilidade de unir a larga experiência dos equipamentos classicamente adotados com as novas possibilidades que emergiram juntamente com as novas tecnologias desenvolvidas para a área de energia elétrica, como é o caso da tecnologia supercondutora.

### **3.3 – Métodos de Limitação de Corrente Convencionais**

Tradicionalmente ou classicamente os métodos mais utilizados no tratamento do problema de curto-circuito são os que envolvem a interrupção, o que é indesejável sob diversos aspectos. A filosofia de proteção dos circuitos elétricos busca através da ação coordenada e seletiva dos esquemas de proteção, uma minimização do número de circuitos afetados com altas correntes e interrupção do fornecimento (momentânea e/ou permanente). Por outro lado o crescimento considerável dos níveis de curto-circuito nos sistemas de energia elétrica tem suscitado a necessidade de dispositivos e/ou elementos limitadores, conforme já foi mencionado. A ideia é conseguir uma redução dos níveis de corrente de curto-circuito e permitir a ação de dispositivos superados. No que se refere as soluções em termos de proteção contra corrente de curto temos uma classificação dividida em 2 grupos [23]:

- **Soluções Provisórias:** Compostas por restrições operativas ou alterações na rede, o que pode ser feito com abertura e/ou fechamento de chaves e disjuntores.
- **Soluções Permanentes:** Substituição de equipamentos superados, geradores e transformadores com maior reatância, e instalação de dispositivos limitadores.

No caso em que disjuntores, chaves e outros dispositivos do sistema tenham sido superdimensionados inicialmente pode não ser necessária a implantação de mecanismo de limitação. Porém, se o nível de corrente de curto-circuito dos dispositivos que compõem a rede estiver sendo ultrapassado é necessária a análise de duas situações: substituição dos dispositivos por outros com capacidade ainda maior ou limitação de corrente para utilização dos dispositivos existentes sem ultrapassagem de limites (solução mitigadora). Somente após cálculos de viabilidade técnica, cálculo de custo da substituição de equipamentos, levantamento de dificuldades com a substituição de equipamentos, levantamento de tempos de desligamentos e de impacto na ação dos sistemas de proteção (seletividade e coordenação, sensibilidade, rapidez e confiabilidade operativa) é possível apontar a viabilidade da solução mitigadora.

Na sequência do texto serão discutidos dentro do grupo de soluções permanentes os dispositivos limitadores, com foco nos dispositivos convencionalmente utilizados nos sistemas de energia elétrica para limitação de corrente elétrica. Os problemas com os altos níveis de curto-circuito tem contribuído para tornar o assunto limitação de níveis de corrente de curto-circuito um assunto importante e em voga. Pretende-se com essa discussão fornecer informações básicas suficientes a respeito dos métodos ditos aqui como convencionais, para dar possibilidade de comparação com a limitação de corrente com tecnologia supercondutora. Este tema é hoje investigado por empresas

concessionárias de energia elétrica, centros de pesquisa, universidades, consultores e fabricantes de equipamentos.

O termo convencional citado anteriormente se refere aos dispositivos que não empregam a tecnologia supercondutora em nenhuma de suas partes constituintes, em especial os classicamente utilizados no tratamento dos altos níveis de curto. Do ponto de vista da engenharia, pode ser considerado como limitador de corrente todo dispositivo capaz de reduzir ou atenuar a corrente elétrica durante um curto-circuito, antes que o disjuntor atue ou que haja danos aos componentes do sistema [22]. Existem características gerais que são desejáveis para um dispositivo limitador de corrente de curto-circuito ideal:

- ✓ Interferência pequena no funcionamento da rede.
- ✓ Baixa Impedância durante a operação normal da rede (idealmente um curto).
- ✓ Alta Impedância durante a ocorrência de uma falta (curto-circuito).
- ✓ Transição rápida entre baixa e alta impedância na ocorrência de uma falta.
- ✓ Retorno rápido ao modo normal após a extinção da falta (recuperação).
- ✓ Falha segura e alta confiabilidade.
- ✓ Manutenção mínima e baixo custo.
- ✓ Dimensões e peso reduzidos.

Alguns dos dispositivos convencionalmente empregados na solução de problemas com limitação de corrente estão listados na tabela 1 a seguir. Com exceção do reator de núcleo de ar todos os outros dispositivos são de ação ativa.

**Tabela 1 – Dispositivos limitadores de corrente convencionais.**

<b>Dispositivos Limitadores de Corrente Convencionais</b>
Reator Série com Núcleo de Ar
Circuito Ressonante LC
Dispositivo Pirotécnico
Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida (Chaves Eletrônicas)
Dispositivos com Tecnologia FACTS
IPC - Intherphase Power Controller
HVDC <sup>3</sup>

Inicia-se a seguir a discussão básica a respeito de cada dispositivo limitador de corrente convencional. Por ser um dos dispositivos mais utilizados o reator de núcleo de ar abre a discussão. Ressaltamos que não há o objetivo de listar todos os dispositivos convencionais, apenas os mais citados nas consultas bibliográficas sobre o assunto.

### **3.3.1 – Reator Série com Núcleo de Ar**

Os reatores podem desempenhar várias funções em um sistema elétrico, na função de limitação de corrente (proteção do sistema elétrico) ele diminuirá e retardará o crescimento da corrente durante uma falta. Evitam-se assim possíveis danos térmicos e eletromecânicos ao sistema no futuro e a necessidade de substituição de equipamentos superados pelos novos valores de corrente de curto-circuito (vantagem técnica e econômica).

---

<sup>3</sup> Na realidade não se trata de um dispositivo limitador, mas sim de uma tecnologia de transmissão de energia que possui a capacidade natural de limitação de correntes de curto-circuito.

Construtivamente um reator é uma grande bobina, que em um circuito CA pode criar uma impedância. Seu núcleo, a princípio, pode ser feito de material magnético ou não. Para a aplicação em limitação se emprega o núcleo de ar (não-magnético), tendo em vista os altos valores de corrente envolvidos que podem saturar um núcleo magnético com facilidade e com isso reduzir a reatância indutiva do enrolamento do reator. A refrigeração pode ser feita a óleo (como nos transformadores) ou a seco (ventilação natural ou forçada). A primeira forma de refrigeração é mais vantajosa, pois facilita a troca de calor e permite o arrefecimento mais rápido do sistema no caso de faltas sucessivas e evita a formação de circuitos magnéticos com outros elementos da instalação. A figura 25-a mostra o esquema de um reator série com núcleo de ar, enquanto a figura 25-b mostra a foto de um reator instalado em uma subestação.

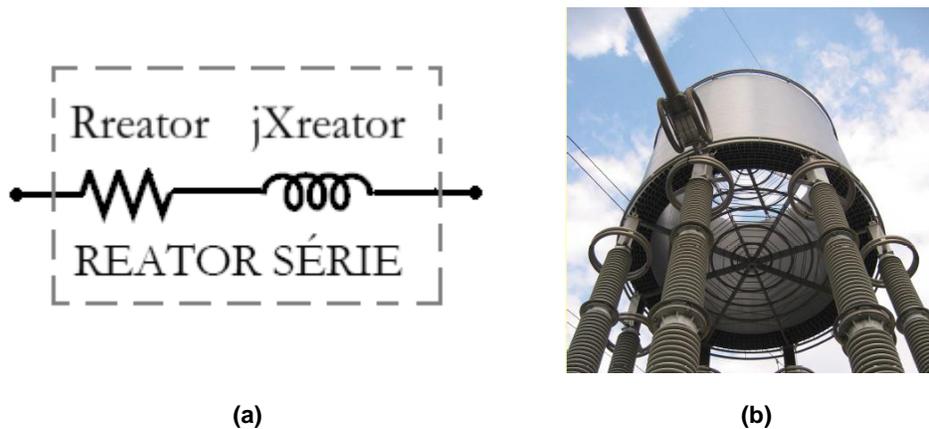


Figura 25 –(a) Esquema elétrico de um reator de núcleo de ar. (b) Foto de um reator de núcleo de ar instalado em subestação de Mogi das Cruzes-SP, adaptada de [24].

A fim de esclarecer o princípio básico de funcionamento do reator como limitador de corrente de curto-circuito, vamos considerar um circuito monofásico como o representado pela figura 26. Temos um circuito composto por uma fonte alternada, uma impedância de linha (na realidade linha e fonte), uma impedância como carga ( $Z_c$ ), uma impedância de curto-circuito ( $Z_{cc}$ ) e duas chaves de manobra (chave 1 e chave 2).

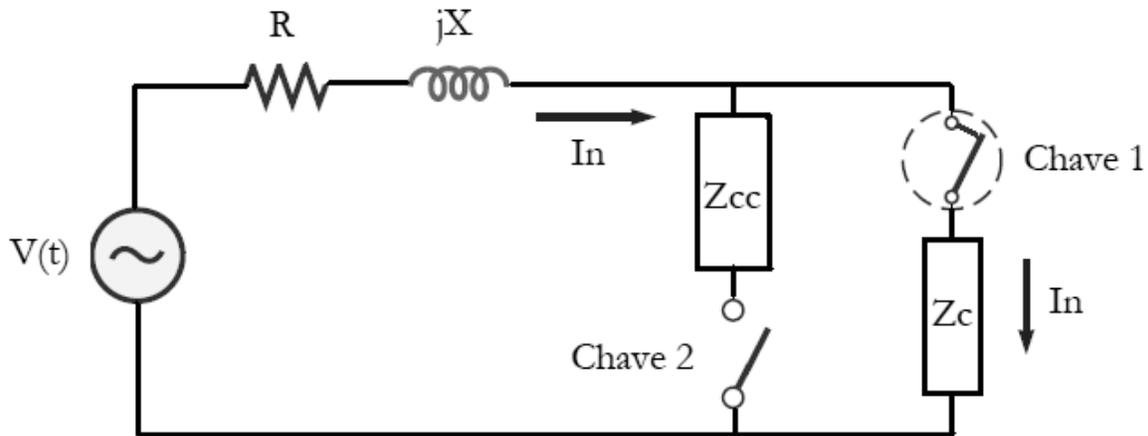


Figura 26 - Análise de circuito monofásico em operação normal sem reator de núcleo de ar.

Em situação normal de operação a chave 1 está fechada e a chave 2 está aberta. Dessa forma a análise do circuito permite escrever a corrente de regime ou corrente nominal ( $I_n$ ) para o circuito em termos da impedância da linha ( $Z_{linha}$ ) e da impedância de carga ( $Z_{carga}$ ), conforme as equações 3.22 e 3.23.

$$|I_n| = \frac{|U|}{|Z_{linha} + Z_{carga}|} \quad (3.22)$$

$$Z_{linha} = R + jX \quad (3.23)$$

Na hipótese de  $|Z_{cc}| \ll |Z_c|$  pode ser feita uma “simulação” de curto-circuito com o fechamento da chave 2 e abertura da chave 1 de modo simultâneo. Dessa forma o circuito passa a ter a configuração dada pela figura 27. De modo análogo ao caso anterior, a intensidade da corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) é calculada como sendo:

$$|I_{cc}| = \frac{|U|}{|Z_{linha} + Z_{cc}|} \quad (3.24)$$

É possível perceber das equações 3.22 e 3.24 que  $|I_{cc}| > |I_n|$ , uma vez que  $|Z_{cc}| \ll |Z_c|$ . O reator série é instalado no circuito de modo a incrementar uma impedância no circuito o que reduz e também retarda (impedância indutiva) o crescimento da corrente.

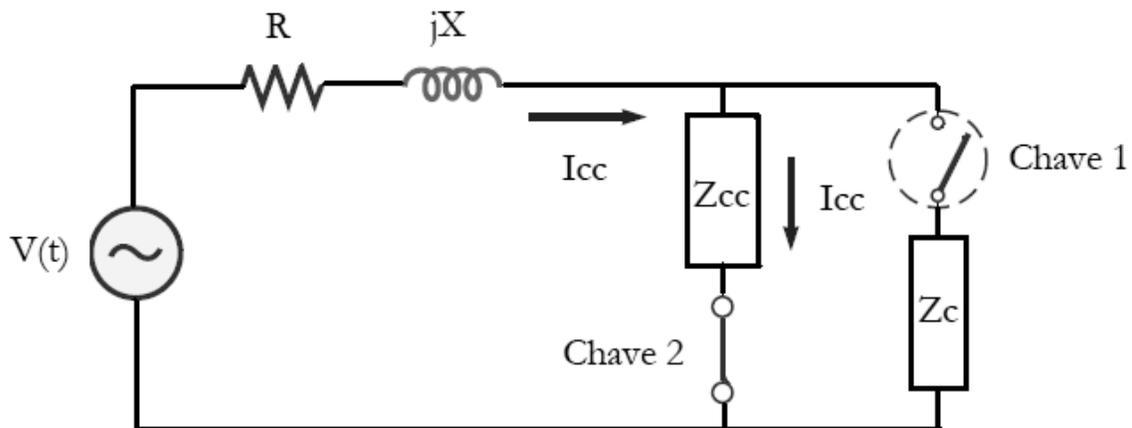


Figura 27 - Análise de curto-circuito monofásico sem a presença de reator de núcleo de ar.

A figura 28 ilustra o circuito em condição de curto já com a presença do reator série, instalado entre a fonte e a carga. Há um aumento da impedância do circuito antes, durante e após a falta. Dessa forma o reator irá influenciar no comportamento da rede em regime normal e durante a falta, sendo que sua maior influência deve ser exatamente durante a ocorrência de um curto-circuito.

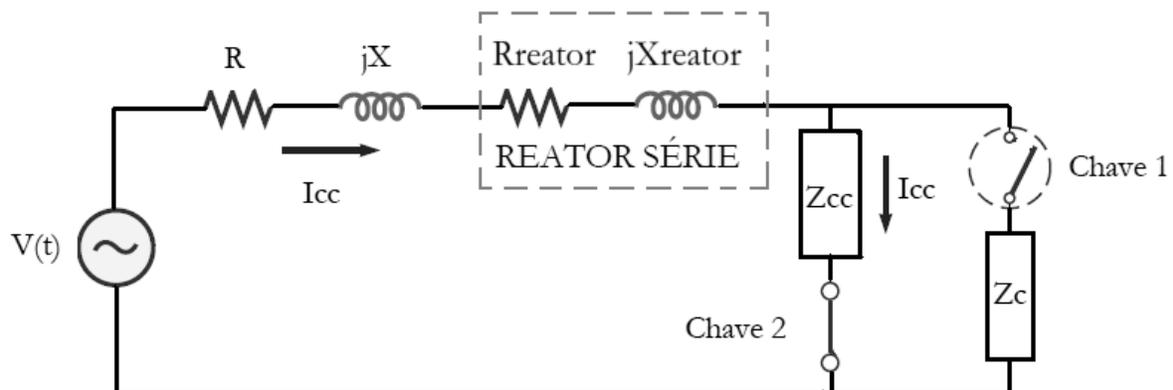


Figura 28 - Análise de curto-circuito monofásico com a presença de reator de núcleo de ar.

Com a presença do reator a corrente de curto-circuito ( $|I_{cc}^{reator}|$ ) passa a ser dada pela equação 3.25:

$$|I_{cc}^{reator}| = \frac{|U|}{|Z_{linha} + Z_{reator} + Z_{cc}|} \quad (3.25)$$

$$Z_{linha} = R + jX \quad (3.26)$$

$$Z_{reator} = R_{reator} + jX_{reator} \quad (3.27)$$

Comparando as equações 3.24 e 3.25:

$$\frac{|I_{cc}^{reator}|}{|I_{cc}|} = \frac{|Z_{linha} + Z_{cc}|}{|Z_{linha} + Z_{reator} + Z_{cc}|} < 1 \quad (3.28)$$

O que resulta em uma corrente menor durante o curto-circuito, conforme equação 3.29:

$$|I_{cc}^{reator}| < |I_{cc}| \quad (3.29)$$

A vantagem obtida no momento do curto não apaga os outros efeitos negativos do reator durante o funcionamento normal do circuito. Há notoriamente uma queda de tensão sobre o reator, com conseqüente dissipação de potência (Efeito Joule) e interação com o restante do circuito. Entre os problemas mais graves gerados pelos reatores em operação no regime normal está o efeito deste na transferência de potência na linha. Uma vez que o fluxo de potência ativa ( $P$ ) transferida depende diretamente do ângulo de defasagem ( $\phi$ ) entre corrente ( $I$ ) e tensão ( $V$ ) [25]:

$$P = V.I.\cos(\phi) \quad (3.30)$$

Um dos motivos pelos quais a instalação de reatores de núcleo de ar não se torna solução inviável é que seus efeitos podem ser compensados economicamente ao se evitar a substituição de equipamentos sobrecarregados, já que em termos construtivos um reator é bem simples. AMON *et al* [26] relata um caso em FURNAS onde um barramento de 345 kV teve seu nível de curto-circuito reduzido de 54 kA para 45 kA mediante o emprego de dois reatores de núcleo de ar (um principal e outro reserva). Neste caso houve uma economia da ordem de 2,5 milhões de reais em cada um dos 37 disjuntores que não precisaram ser substituídos. É claro que um estudo se fez necessário para analisar o impacto do emprego dos reatores no que diz respeito as perdas, campos eletromagnéticos, efeitos sobre os disjuntores e impacto nos sistemas de proteção, uma vez que há introdução de uma nova impedância na rede.

### **3.3.2 – Circuito Ressonante LC**

Uma das características ideais para um dispositivo limitador diz respeito ao seu funcionamento durante o regime de operação normal da rede (corrente nominal). Idealmente devemos ter uma impedância nula em regime normal e alta impedância na ocorrência de curto-circuito, com imediata recuperação do estado de baixa impedância após a extinção do curto. Um circuito ressonante LC pode obedecer a essa condição, e essa ideia tem sido relatada desde o início da década de 1990 por Karaday [27]. O princípio básico de funcionamento deste método de limitação de corrente é o controle, via eletrônica de potência, de um circuito ressonante LC. Ele apresenta baixa impedância para regime permanente e na presença de uma falta ele é forçado (disparado) a incrementar sua impedância, o que limita a corrente de falta.

A alteração entre os estados de baixa e alta impedância é obtida pela alteração da frequência de ressonância do circuito LC empregado. O mecanismo de alteração é possível graças a utilização de elementos reativos variáveis, indutores e capacitores,

disparados com o uso da eletrônica de potência. Segundo LANES [27] um circuito ressonante para limitação que emprega tiristores apresenta vantagens:

- tiristores são os dispositivos semicondutores com mais alta capacidade de corrente disponíveis.
- tiristores permitem associações em série e em paralelo formando módulos de maior capacidade de tensão e corrente.
- alguns tiristores apresentam disparo ótico, o que permite total isolamento entre o circuito de controle e o circuito de potência.

Existem duas topologias de circuitos LC ressonantes, uma série e outra paralela, como mostra a figura 29.

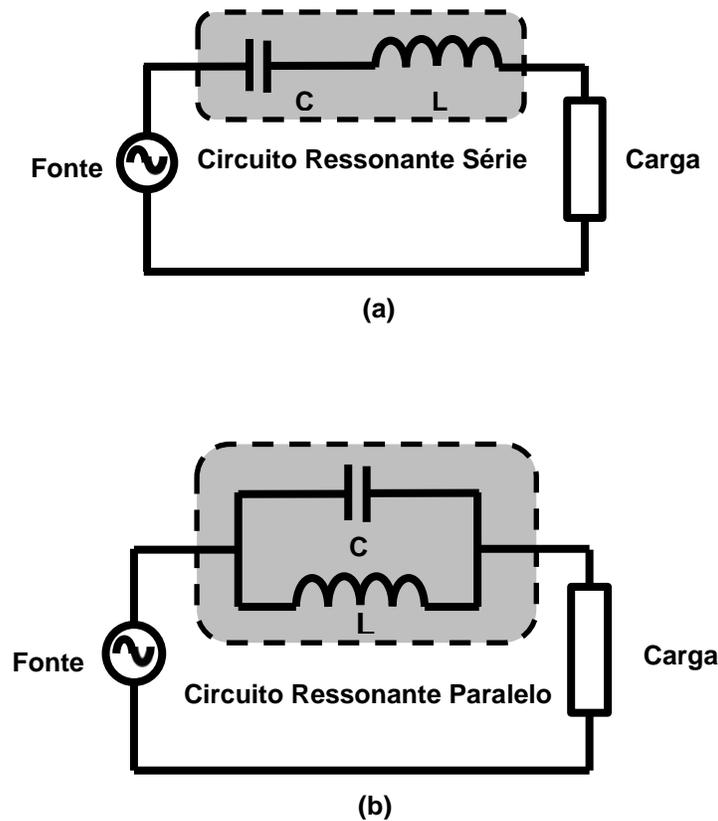


Figura 29 – As duas topologias de limitadores de corrente de curto-circuito baseados em circuitos ressonantes: (a) série e (b) paralelo.

É imediata uma comparação entre o método descrito na seção 3.3.1, reator de núcleo de ar, e este método que emprega um circuito ressonante LC. Este último parece contornar o problema da operação em regime normal, apresentado pelo reator de núcleo de ar. Trata-se de um elemento ativo. Mediante as características variáveis de seus componentes e um mecanismo de ativação o circuito ressonante LC permite a entrada de uma alta impedância somente no instante de ocorrência da falta.

Segundo LANES [27] as topologias série e paralela já são exploradas como limitadores de corrente de curto-circuito, e em alguns casos já passaram da fase de testes iniciais e operam em redes.

### **3.3.3 – Dispositivo Pirotécnico**

Os dispositivos pirotécnicos são basicamente constituídos por dois circuitos em paralelo. Um caminho contém o condutor principal de cobre que conduz a corrente nominal, e esse caminho possui dois estrangulamentos. Associadas a estes estrangulamentos estão explosivos que são detonados a partir de comando enviado por sensores de corrente que detectam o crescimento alto e brusco da corrente durante um curto-circuito. O outro circuito, em paralelo, é constituído de um elemento fusível responsável pela abertura total do circuito, extinguindo a corrente de curto através da separação entre a fonte de alimentação e o circuito sob falta. Segundo MONTEIRO [24] o tempo de atuação deste tipo de dispositivo é menor que  $\frac{1}{4}$  de ciclo da CA (4 ms).

O princípio de funcionamento deste tipo de dispositivo é tal que em regime normal, a corrente circula pelo circuito principal (barra condutora de cobre). É justamente neste condutor que são instaladas cargas de explosivos químicos. O nome pirotécnico surge em razão do uso desse recurso de pirotecnia. O circuito paralelo formado por um elemento fusível, devidamente dimensionado, possui impedância superior a do circuito principal e por ele não circula corrente nominal (corrente de regime). Na ocorrência do curto,

detectado por sensores eletrônicos associados aos transformadores de corrente (TCs) na sua rampa de subida, há o disparo da carga de explosivos, que parte o condutor principal e introduz um arco elétrico no ponto (ou pontos) de ruptura. Como consequência do arco a corrente é desviada, já com certa redução, para o fusível limitador que a extingue [24]. A figura 30 mostra o esquema básico de um limitador pirotécnico.

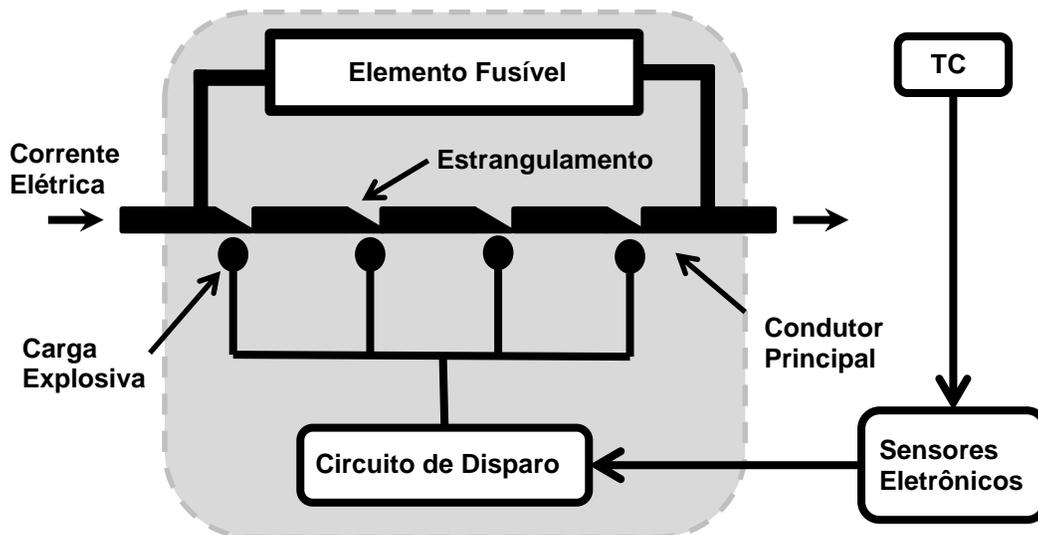


Figura 30 – Esquema básico de um dispositivo limitador de corrente de curto-circuito pirotécnico. Adaptado de [28].

Como vantagens o dispositivo pirotécnico tem: alta velocidade de atuação, relativa facilidade de construção, funcionamento simples, fácil instalação, relativo baixo custo e muito interessante no caso de aumento de níveis de curto em parques fabris, onde o custo de outras técnicas é muito alto [28]. Uma espécie de regra geral para o uso deste tipo de dispositivo é que a sua instalação deve estar condicionada a uma rede onde o tipo de falha que ele deve proteger é pouco frequente. Justamente porque ele sofre de uma grande desvantagem: precisa ser rearmado a cada operação.

Um arranjo interessante pode ser feito combinando o dispositivo pirotécnico com o reator de núcleo de ar. Como visto este último opera também no regime normal da rede

interferindo no funcionamento desta através de perdas ôhmicas, quedas de tensão, etc. Colocando os dois dispositivos em paralelo é possível explorar os dois princípios de funcionamento de forma a evitar a interrupção do fornecimento no caso de falta rápida e pouco intensa. Caso a falta persista e tenha nível muito alto o ramo fusível faz a interrupção.

O dispositivo pirotécnico é do tipo ativo, sendo que em alguns casos sua ação se assemelha ao caso de dispositivos de interrupção como fusíveis e disjuntores. Nesse sentido pode não ser encarado efetivamente como um dispositivo limitador de corrente de curto-circuito.

### **3.3.4 – Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida**

Frutos da evolução da eletrônica de potência e dos dispositivos de estado sólido, os disjuntores eletrônicos tem se apresentado como mais uma alternativa no tratamento de limitação ou extinção de correntes de curto-circuito. Uma das grandes vantagens é relativa ao tempo de atuação. Enquanto disjuntores eletromecânicos convencionais (com os novos meios de extinção de arco) possuem tempo de atuação da ordem de  $3/2$  ciclos da CA (25 ms) os disjuntores contendo chaves eletrônicas jogam esse tempo para  $1/2$  ciclo (8 ms).

As chaves de estado sólido têm perdas que são inerentes ao aspecto construtivo, o que implica em perdas altas em regime normal. Além disso, não se atinge valores tão altos de corrente a ser protegida como no caso de disjuntores convencionais. Dessa forma a tática tem sido o emprego combinado destes dois tipos de disjuntores, os primeiros atuam no seccionamento de barramento ou abertura de linhas para redução do nível de curto-circuito total permitindo a operação dos disjuntores convencionais.

### 3.3.5 – Dispositivos FACTS

O conceito de equipamento FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) surgiu na década de 1980 nos Estados Unidos. Basicamente essa tecnologia se valeu do grande desenvolvimento da eletrônica de potência (e também da teoria de controle) para aplicá-la na solução de diversos problemas em sistemas de potência, visando um controle rápido e eficiente do fluxo de potência ativo e reativo nas redes.

A filosofia de controle de fluxo de potência passa por dispositivos eletrônicos que controlam rapidamente o ângulo de carga, a impedância ou a tensão do sistema CA, tap<sub>s</sub> de transformadores, oscilações eletromecânicas, etc. Isso tem tornado os sistemas de transmissão mais flexíveis em termos de manobra e com respostas mais rápidas. A seguir é dada uma listagem dos principais dispositivos FACTS:

- ✓ Capacitor chaveado por tiristor, TSC (*Thyristor Switched Capacitor*);
- ✓ Capacitor série chaveado por tiristor, TSSC (*Thyristor Series Switched Capacitor*);
- ✓ Capacitor série controlado por tiristor, TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*);
- ✓ Compensadores estáticos, SVC (*Static Var Compensator*);
- ✓ Reator controlado por tiristor, TCR (*Thyristor Controlled Reactor*);
- ✓ Transformador defasador, PST (*Phase Shift Transformer*);
- ✓ Tiristor protegido para compensações série, TPSC (*Thyristor Protected Serie Compensations*).

Dispositivos FACTS também podem ser usados para limitação de corrente de curto. Segundo MONTEIRO [24] entre todos os dispositivos FACTS podemos citar dois que atuam ou podem atuar no processo de limitação de corrente: TCSC e o TPSC. Ainda

segundo MONTEIRO [24] o mais promissor para limitação de corrente de curto-circuito é o TCSC, que já vem sendo utilizado para controle de fluxo de potência e amortecimento de potência. Mesmo possuindo vocação para a atuação como limitador o TCSC não deve operar apenas com essa função, devendo executar outras funções importantes para se tornar viável, dado o seu alto custo.

Será feita uma breve discussão a respeito dos princípios básicos de funcionamento dos dois dispositivos FACTS mencionados acima, uma vez que não é objetivo deste trabalho detalhar o funcionamento desses dispositivos.

### 3.3.5.1 – Princípio de Funcionamento do TCSC

Como mostra a figura 31 o TCSC é constituído basicamente por reatores (3), um banco de tiristores (2), um banco de capacitores (4) e um para-raios de proteção (1) para o banco de capacitores. Em termos de circuito, um ramo com o reator e com o banco de tiristores (série) é colocado em paralelo com os capacitores e o pára-raios. A ideia é controlar a entrada do reator no circuito, inserindo uma impedância no momento da falta por ação da chave tiristorizada.

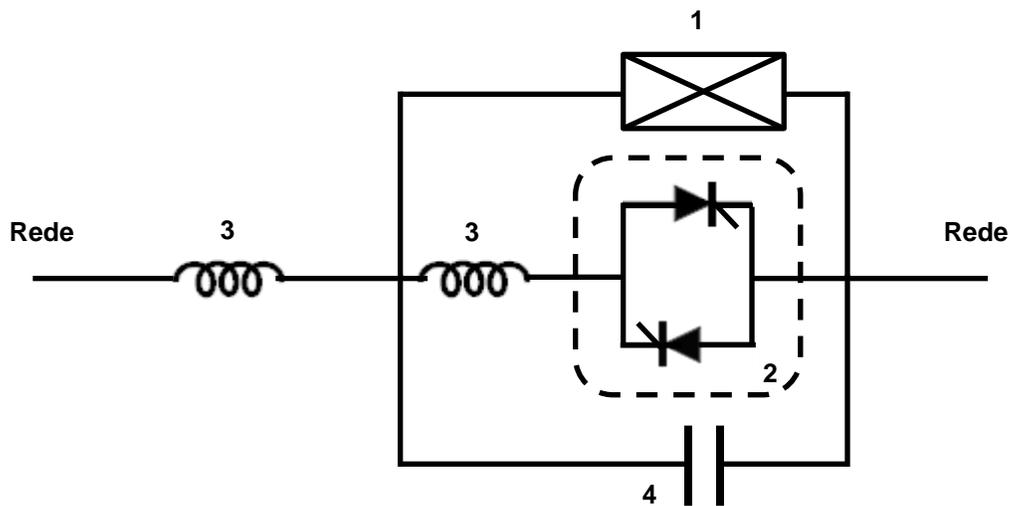


Figura 31 – Esquema básico de um TCSC para função de limitação de curto-circuito. Adaptado de [24].

É justamente a combinação do capacitor série convencional com os reatores controlados pelos tiristores que permite o controle contínuo da impedância deste dispositivo. Com esse controle o TCSC possui a habilidade de ajustar rapidamente sua impedância, limitando as correntes de curto-circuito durante uma falta. Segundo OLIVEIRA [29] é conhecido o emprego destes dispositivos no Brasil, mas com uso voltado para amortecimento de oscilações de potência no SIN (Sistema Interligado Nacional).

### 3.3.5.2 – Princípio de Funcionamento do TPSC

Com arquitetura semelhante a do TCSC (capacitor, tiristores e reator) o TPSC explora o controle dos tiristores (2) sobre um circuito LC série, formado pelo reator (1) e capacitor(3) operando em ressonância para o regime normal, ou seja, com impedância nula (Figura 32). Na ocorrência da falta o capacitor é curto-circuitado e sai do circuito, sendo a corrente atenuada pelo incremento de impedância devido a presença do reator operando sozinho.

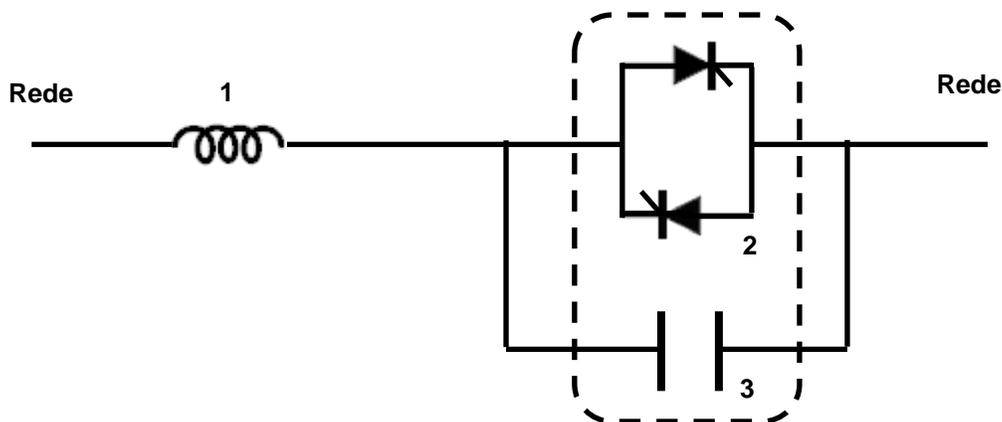


Figura 32 - Esquema básico de um TPSC para função de limitação de curto-circuito. Adaptado de [24].

Nota-se uma situação de justaposição de princípios de funcionamento, o TPSC agrega princípios do circuito ressonante e do reator de núcleo de ar, juntamente com o emprego da eletrônica de potência. Para a situação normal de operação da rede atua o circuito ressonante, já no curto-circuito atua um reator de forma a limitar o crescimento da corrente. Com isso elimina-se os inconvenientes gerados pela simples presença do reator no regime normal.

### **3.3.6 – IPC - *Interphase Power Controller***

O Controlador de Potência Interfases (IPC) é uma tecnologia recente, desenvolvida pela ABB em conjunto com a Hydro Quebec - CITEQ. [30]. Utiliza capacitores, indutores, transformadores defasadores e dispositivos de eletrônica de potência (alguns módulos). Este tipo de dispositivo pode desempenhar várias funções, entre elas a de limitação de corrente. Os IPCs são conectados entre duas barras e possuem dois ramos paralelos, um capacitivo e o outro indutivo, ambos controlados [24]. Existem nove topologias de IPC que derivam da principal, e as aplicações deste tipo de dispositivo é listada a seguir:

- Interligação de redes assíncronas;
- Interligação de sistemas síncronos: interligador de desacoplamento, limitação de corrente de curto-circuito, aumento da capacidade de transferência de transformadores defasadores;
- Aumento da capacidade de transformação sem elevação dos níveis de curto-circuito;
- Controle do fluxo de potência em linhas de transmissão;

Tendo em vista o foco principal desta seção, que é abordagem básica dos dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito convencionais, serão apresentadas apenas alguns detalhes de um IPC que pode atuar como limitador de corrente: TLCC - Transformador Limitador de Corrente de Curto-Circuito. A figura 33 mostra o esquema básico de um IPC deste tipo, que deve ter no mínimo dois ramos, com a presença de elemento defasador.

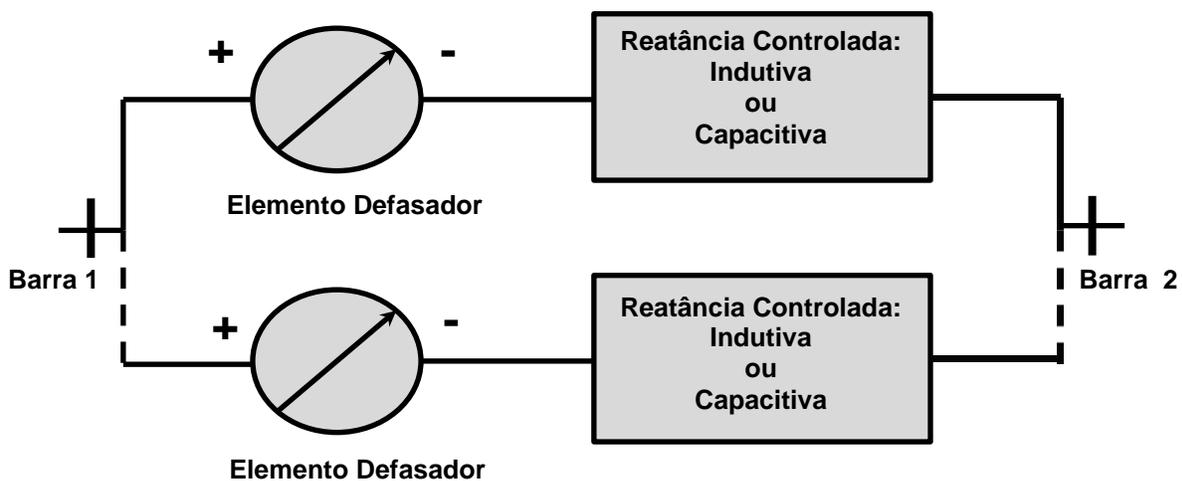


Figura 33 – Esquema básico de um IPC. Adaptado de [24].

De modo simplificado podemos dizer que a conexão do TLCC em série com a linha de transmissão permite um controle do fluxo de carga, uma vez que a atuação de reatâncias diferentes em cada ramo em conjunto com uma defasagem em um dos ramos podem limitar a corrente que chega até a barra 2 pela alteração da impedância após a detecção da falta.

### 3.3.7 – HVDC - Transmissão em Corrente Contínua

Após ter sido bastante criticada e esquecida após o surgimento dos sistemas de corrente alternada proposto por Nikola Tesla, os sistemas de transmissão de corrente

contínua ressurgiram com o desenvolvimento da tecnologia de tiristores de alta potência e as necessidades impostas pelos sistemas de alta tensão em longas distâncias.

A chamada tecnologia HVDC (*Hight Voltage Direct Current*) está dividida em dois tipos: HVDC baseado em conversores fonte de corrente e o HVDC baseado em conversores fontes de tensão. O primeiro tipo faz uso de tiristores no sistemas conversor CA/CC enquanto que o segundo, ainda recente, faz uso de chaves autocomutadas.

Os sistemas de transmissão em corrente contínua do tipo fonte de corrente tem como uma de suas características a não contribuição para o aumento dos níveis das correntes de curto-circuito (ação rápida dos tiristores via controle). Com isso eles se apresentam como mais uma tecnologia disponível para o enfrentamento do aumento dos níveis de corrente de curto-circuito nos sistemas de potência de grande porte (tronco). Cabe ressaltar que não se trata de um dispositivo limitador e também que a viabilidade de um sistema HVDC depende, entre outros fatores, da tensão de operação, do comprimento da linha de transmissão e do custo das unidades conversoras. Portanto, sua utilização apenas como método de limitação de corrente de curto-circuito parece pouco interessante.

### **3.4 - Dificuldades com os Métodos de Limitação de Corrente Convencionais**

Os métodos usualmente empregados no tratamento da limitação de corrente apresentam alguns inconvenientes, que são aceitáveis ou não, dependendo das características do sistema no qual será empregado. Dessa forma o método a ser adotado na mitigação dos altos níveis de corrente de curto circuito atuais será fruto de uma análise técnica e econômica (custo-benefício), seja ele passivo ou ativo.

No caso da instalação de reatores em série (núcleo de ar), há a ocorrência de problemas como queda de tensão, perdas por Efeito Joule e elevados fluxos magnéticos.

Porém, esta solução pode ser viável no caso em que seus efeitos negativos podem ser compensados pela economia ao se evitar a substituição de equipamentos sobrecarregados. O uso de indutância elevada também é uma desvantagem no caso do circuito ressonante LC, pois aumenta o volume, peso final e as perdas no indutor.

Com os dispositivos pirotécnicos, que na realidade abrem o circuito, temos o problema de rearme, uma vez que o circuito principal e o circuito auxiliar abrem quando a corrente ultrapassa o limite pré-ajustado no sensor eletrônico. Assim, diante de uma falta severa e rápida o sistema será protegido, mas cessando a falta haverá perda de alimentação. Nesse sentido são semelhantes aos disjuntores e fusíveis. Outro ponto negativo diz respeito ao nível de tensão no qual pode ser empregado, geralmente baixo. A vantagem destes dispositivos se encontra na sua arquitetura simples e no relativo baixo custo.

Os disjuntores eletrônicos e chaves de estado sólido apresentam como desvantagens o nível de corrente e as elevadas perdas, respectivamente. Além disso, ainda está agregado um alto custo destes dispositivos, que em sua maioria encontra-se em fase de desenvolvimento.

Finalmente temos o caso dos dispositivos FACTs e do IPC, ambos utilizando a tecnologia da eletrônica de potência e do controle. Embora estas tecnologias tenham sido iniciadas a décadas, elas ainda não se consagraram no tratamento do problema específico da limitação de corrente de curto-circuito. Seu uso é bastante complexo e acima de tudo muito caro, sendo seu horizonte de viabilidade os casos limites de sistemas em que as tentativas com outros métodos fracassaram [24]. Além disso, são altas as perdas e não há falha segura.

Um ponto importante no que diz respeito a aplicação de qualquer elemento de limitação de corrente em uma rede é o impacto deste nos sistemas de proteção. De um modo geral os impactos gerados podem ser:

- ajustes de coordenação e seletividade, sub-alcance
- necessidade de novas configurações topológicas para inserção de limitadores
- acionamentos indesejáveis do limitador e do próprio sistema de proteção

O anexo II apresenta uma tabela extraída de [26] que compõem um breve resumo dos possíveis impactos dos limitadores de corrente sobre os diversos tipos de arranjos de proteção que estão presentes nas redes elétricas. Ainda na referência [26] é possível encontrar um exemplo de impacto em um sistema com relé de distância, onde verifica-se a possibilidade de sub-alcance.

### **3.5 – Limitação de Corrente com Tecnologia Supercondutora**

Como já foi mencionado a limitação de corrente também pode ser feita explorando as propriedades específicas dos materiais supercondutores. De um modo geral um SFCL (*Superconducting Fault Current Limiter*) é um dispositivo que opera utilizando a resistência dinâmica de um supercondutor para limitar altos níveis de corrente de curto a valores administráveis pelo sistema de proteção. O termo resistência dinâmica se refere ao fato do supercondutor sofrer a transição a um estado de maior resistência (ou impedância) mediante a ultrapassagem de um dos seus parâmetros críticos, neste caso a corrente crítica. O comportamento de um SFCL é tal que durante o funcionamento normal da rede (corrente nominal e ausência de curto) ele apresenta virtualmente impedância zero, apresentando um significativo incremento desta na ocasião de uma falta na rede.

Um SFCL pode ser construído através de fitas supercondutoras ou materiais supercondutores na forma de blocos (“*bulk*”), o que vai depender do projeto de dispositivo. EPRI 2009 [2] discute uma variedade de tecnologias em fase de desenvolvimento que utilizam arranjos únicos e inovadores para o tratamento do problema da limitação de correntes de falta. Tomando como base a última referência serão apresentados nesta

seção os três principais arranjos de limitadores supercondutores, evidenciando suas principais características e localizando o protótipo analisado neste trabalho dentro desta classificação. Alguns projetos de SFCLs são listados ao final do trabalho (anexo III), forma de visualização parcial do panorama atual do desenvolvimento da pesquisa na área.

Como pode ser visto EPRI 2009 [2] condensa os vários arranjos ou conceitos de SFCL em três tipos básicos: SFCL Resistivo, SFCL Núcleo Blindado e SFCL Núcleo Saturado. O primeiro tipo depende da ação de transição rápida dos supercondutores a um estado dissipativo (“*quench*”) e o segundo tipo usa enrolamentos supercondutores para alterar a impedância de um transformador.

### 3.5.1 – SFCL – Resistivo

Neste tipo de limitador o elemento supercondutor é instalado diretamente na linha, entre a fonte e a carga. O princípio de funcionamento está baseado na transição abrupta do material supercondutor empregado, para corrente nominal menor que a corrente crítica a resistência elétrica apresentada pelo supercondutor é nula, quando a corrente supera o valor de corrente crítica (surgimento de uma falta) o supercondutor transita a um estado dissipativo (resistivo) e acaba limitando a corrente. Outra topologia de SFCL resistivo é aquela que possui um dreno de corrente paralelo ao ramo do elemento supercondutor. A ideia é dividir a corrente de falta entre o supercondutor (SC) e um shunt, como mostra a figura 34. Pode ser utilizada chave rápida para retirada do supercondutor após o início da falta.

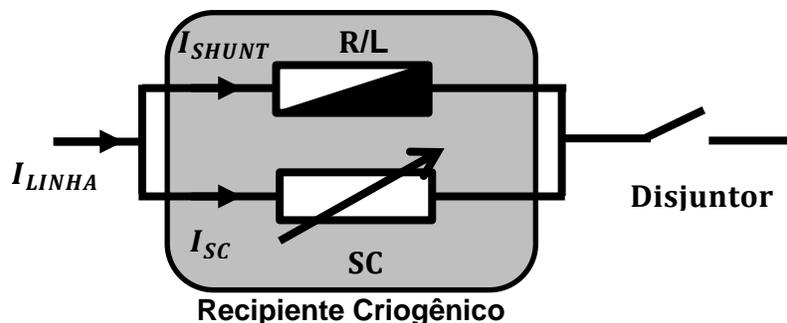


Figura 34 – Esquema básico de um SFCL tipo híbrido. Adaptado de [2].

O protótipo analisado neste trabalho se enquadra neste tipo de limitador de corrente supercondutor, onde o shunt é composto por um circuito RL.

### 3.5.2 – SFCL – Núcleo Blindado

Neste tipo de limitador utiliza-se um elemento supercondutor para, em regime normal, curto-circuitar o secundário de um transformador ( $L_S$  e  $R_{SC}$ ), cujo primário ( $L_P$  e  $R_P$ ) pertence a linha que liga a fonte até a carga (Figura 35). Durante uma falta a transição do supercondutor altera a impedância do transformador, limitando dessa forma a corrente.

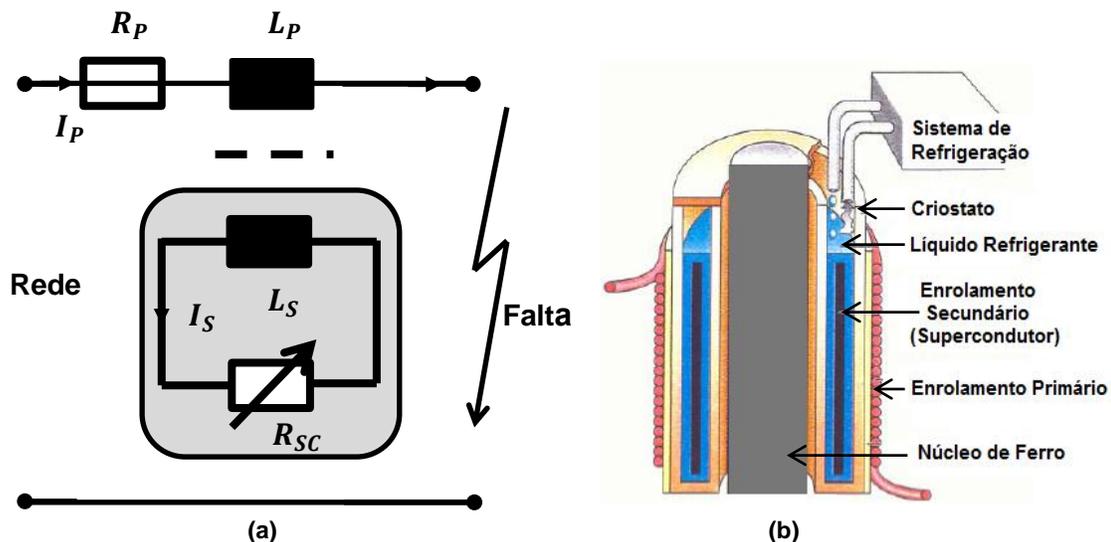


Figura 35 – (a) Esquema elétrico de um SFCL de núcleo blindado. Adaptado de [2] (b) Aspecto construtivo. Adaptado de [24].

### 3.5.3 – SFCL – Núcleo Saturado

A ideia do dispositivo é aproveitar as propriedades dinâmicas do núcleo de ferro para alterar a impedância de uma linha CA via ação de um elemento supercondutor. Este tipo de limitador utiliza dois núcleos de ferro e três enrolamentos. São dois enrolamentos CA para cada fase, eles estão enrolados nos dois núcleos de ferro. Estes indutores são feitos de condutores convencionais (cobre, alumínio, etc.) e estão dispostos em série com a

rede. Um enrolamento supercondutor alimentado por corrente contínua envolve os dois núcleos simultaneamente.

O princípio de funcionamento está baseado na alteração da condição de saturação do núcleo. Quando a corrente é a nominal a bobina supercondutora provê um campo magnético tal que o núcleo fica saturado e com permeabilidade próxima de 1. Na ocorrência de uma falta a corrente cresce e os picos de corrente (semiciclos positivo e negativo) acabam por retirar o núcleo da saturação, o que resulta na inserção de uma impedância extra nos dois semiciclos. Como consequência a corrente de falta é reduzida.

É importante ressaltar que durante a falta o núcleo entra e sai da saturação, o que acaba por gerar harmônicos. Já no estado de corrente nominal a tensão e a corrente são pouco afetadas pelo SFCL com núcleo saturado. Além disso, o material supercondutor não sai do estado supercondutor.

O primeiro SFCL a operar comercialmente é do tipo núcleo saturado, construído pela Zenergy Power (Figura 36). Ele é trifásico, possui tensão de 15 kV, corrente máxima de 23 kA (com redução de 30% no valor da corrente) e provavelmente está em operação na Califórnia neste momento, onde faz parte de um projeto entre a Zenergy Power e Southern California Edison, denominado “circuito do futuro” [2].



Figura 36 – Protótipo de SFCL da Zenergy Power em operação [2].

## **Capítulo 4 – Descrição do Protótipo Analisado e Teoria Básica**

### **4.1 – Introdução**

Nas próximas seções será feita uma descrição do protótipo de limitador de corrente supercondutor que foi o objeto de estudo neste trabalho, assim como sua teoria básica subjacente. Trata-se de um protótipo de Dispositivo Limitador de Corrente de Falta Supercondutor (*SFCL – Superconducting Fault Current Limiter*) do Tipo Híbrido, produzido em escala laboratorial para teste em bancada e possível utilização posterior na proteção contra sobrecorrente de sistema motogerador, dentro do projeto LiMS executado pelo LMDS-UFRRJ.

### **4.2 – Princípio de Operação e Parâmetros de Projeto do Limitador**

Como já foi mencionado é crescente nos sistemas elétricos o nível de curto-circuito, porém os “dispositivos convencionais” que atuam na limitação de corrente em momentos de falta possuem limites de atuação e características não muito próximas do ideal. No caso de ocorrência de um curto-circuito a corrente pode elevar-se a níveis da ordem de 10 a 20 vezes o valor nominal, o que pode ser um nível inaceitável pelos equipamentos da rede, provocando severos danos aos componentes da mesma e interrompendo o suprimento. De fato, o mau funcionamento ou dano de componentes de uma rede elétrica por sobrecorrente (efeitos térmicos e eletromecânicos) pode levar ao desligamento de trechos com inevitável interrupção de suprimento de energia, o que é extremamente indesejável.

De uma maneira geral os esquemas de proteção das redes elétricas são concebidos para atuarem em tempo real, evitando danos ao consumidor e aos equipamentos da rede.

Para isso o sistema de proteção recebe as leituras de grandezas elétricas da rede e, segundo uma “programação” ou “filosofia de proteção”, atuam diante de condições anormais. Na ocorrência de um curto-circuito, no tempo típico de 3 ciclos da CA (48 milissegundos) já é possível a ocorrência de danos aos equipamentos em razão dos altos níveis de corrente (I) atingidos nessa escala de tempo, da potência (P) e da energia (E) envolvidas (equações 4.1 e 4.2).

$$E = \int_{t_i}^{t_f} P \cdot dt \quad (4.1)$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (4.2)$$

Assim, diante de um curto-circuito é desejável a abertura rápida do circuito ou a atenuação do nível de corrente. No caso de atuação do relé de proteção a abertura rápida corresponderia a ¼ de ciclo da CA, ou seja, 4 milissegundos [1]. Para uma resposta tão rápida como essa não há relés disponíveis, o que leva a uma mudança de estratégia na solução deste tipo de problema. A estratégia consiste na instalação de um dispositivo limitador de corrente de falta (*FCL – Fault Current Limiter*) em série com a linha que o relé irá proteger. Isso garante que o relé possa atuar dentro de seu tempo e a rede não seja danificada por alto nível de corrente. Como visto no capítulo 3, o dispositivo limitador é um equipamento com impedância variável e que responde a uma elevação da corrente, reduzindo o valor máximo atingido por esta, durante o tempo exigido para extinção da falta ou atuação conjunta de um disjuntor. Terminada a falta, é desejável também que o dispositivo limitador retorne ao seu estado anterior em um tempo muito curto.

Diante desta necessidade e das características de comportamento dos materiais supercondutores tem-se notado que estes materiais podem ser de fato uma possível e excelente saída na concepção de um limitador com as características já citadas [31]. Como foi visto no capítulo 2 uma vez que o material tenha passado para o estado

supercondutor, a permanência neste dependerá não só da temperatura, mas também do campo magnético e corrente elétrica ao quais o material está submetido (Parâmetros Críticos). Valores superiores aos valores críticos levam a destruição do estado supercondutor (tipo-I) ou uma passagem ao estado misto (tipo-II) em nanossegundos. Há implicitamente um comportamento tipo “chave estática” atrelado ao caso de superação de um dos valores críticos, para o caso específico da limitação de corrente volta-se a atenção para a superação da corrente crítica ( $I_c$ ) ou da densidade de corrente crítica ( $J_c$ ) a ela associada.

Dentre os materiais cerâmicos supercondutores de alta temperatura crítica (HTS – *High Temperature Superconductors*), caracterizados assim por apresentarem o estado supercondutor em temperaturas acima da temperatura de liquefação do nitrogênio líquido (77K ou -196°C), o material YBCO apresenta através da estequiometria  $YBa_2Cu_3O_7$  (uma das estequiometrias possíveis) parâmetros críticos compatíveis com uma aplicação em limitação de corrente. Este foi o composto escolhido para utilização na fabricação dos blocos supercondutores (“*bulks*”) para uso no protótipo descrito aqui. Tal escolha ocorreu pelo fato deste composto manifestar vantagens com relação a  $T_c$ ,  $H_c$  e  $I_c$ . Os blocos texturizados e acondicionados em arranjo original foram adquiridos pelo LMDS-UFRRJ (Laboratório de Materiais e Dispositivos Supercondutores da Universidade Federal do Rio de Janeiro). É importante lembrar que no caso de cerâmicas supercondutoras ainda não existe uma teoria satisfatória que explique como estes materiais manifestam o estado supercondutor. Porém, isso não tem impedido o desenvolvimento de equipamentos e dispositivos supercondutores que os utilizem.

Na literatura é bastante comum encontrar o emprego de fitas supercondutoras (1G), geralmente baseadas em sistemas BSCCO (2212 e 2223), enroladas na forma de bobinas para uso em arranjos resistivo e indutivo. Também já existem as fitas

supercondutoras de YBCO, as chamadas fitas de segunda geração (2G), que são novas e ainda muito caras. Essas são algumas das razões pela qual foram empregados blocos maciços de YBCO.

Basicamente o limitador de sobrecorrente supercondutor estudado é do Tipo Híbrido [2], consistindo em um circuito paralelo com dois ramos. O primeiro ramo é composto por um resistor e um indutor conectados em série (circuito RL), o segundo ramo é do tipo supercondutor. Os blocos supercondutores são empregados neste ramo, necessitando de um sistema de refrigeração para manutenção da temperatura de operação em aproximadamente 77,4K e de um esquema de conexão elétrica através de contatos de cobre. A temperatura será mantida abaixo do valor crítico através de um “banho” em nitrogênio líquido, para isso foi construído um recipiente com placas de FRP - *Fiber Reinforced Plastics*, vulgo G10, que suporta satisfatoriamente a baixa temperatura envolvida (N2L). Porém, o recipiente construído é aberto, sem isolamento térmico e realimentação contínua do líquido refrigerante.

Em condições normais de operação ( $I_{nominal} < I_c$ ) o bloco supercondutor estará na fase supercondutora apresentando resistência elétrica nula. Quando ocorrer uma falta, a corrente se eleva e ao atingir o valor crítico ( $I_{falta} > I_c$ ), próprio para cada bloco, o material deverá reverter ao estado dissipativo (tipo-II). Inserindo uma resistência neste ramo o supercondutor contribui para a redução da corrente de curto.

Na concepção do limitador foi observada a condição de que quando um determinado valor de corrente seja atingido, o ramo resistivo apresentará um valor elevado de resistência. Espera-se que dessa forma a corrente seja “forçada” a circular também pelo ramo indutivo, atenuando o valor de pico na linha via inserção de resistência, e através da energia magnética como em um reator convencional, conforme a constante de tempo ou fator de amortecimento do circuito RL dada pela equação 4.3.

$$\gamma = \tau_L^{-1} = \frac{L}{R} \quad (4.3)$$

A figura 37 ilustra a circulação de corrente antes e após a ocorrência de uma falta. Na primeira situação é esperado que o ramo supercondutor (SC) tenha uma resistência elétrica muito menor que o ramo RL conectado em paralelo, ou seja, há um *by-pass* do ramo RL. Na condição de falta o oposto é desejado, ou seja, espera-se que o ramo supercondutor tenha agora uma impedância muito maior que a do ramo RL. Neste caso parte da corrente seria forçada a circular em sua maior parte pelo ramo RL, o que em tese limitaria a corrente de curto circuito.

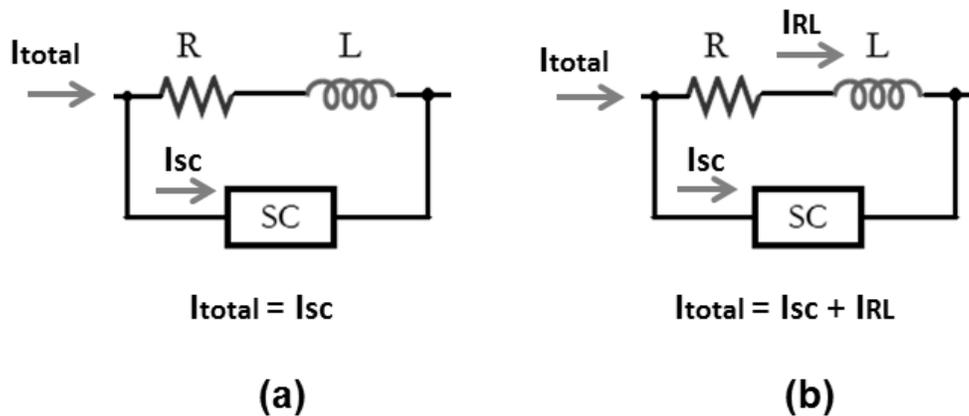


Figura 37 – Esquema da circulação de corrente na unidade limitadora: (a) antes da falta e (b) após a falta.

Além da constante de tempo dada pela equação 4.3, foi levada em consideração o nível de curto, o valor da carga resistiva a ser alimentada via limitador, a tensão de trabalho, corrente nominal, os resistores de potência e demais equipamentos disponíveis para a montagem. Em função disso a impedância do ramo RL (*shunt*) foi dimensionada para um valor próximo do valor da carga a ser protegida pelo limitador. Desta forma, na hipótese da maior parcela de corrente circular pelo ramo ou abertura do ramo

supercondutor, a corrente ficará limitada nas proximidades do valor nominal, o que se chama falha segura, ou seja, no caso de falha do dispositivo ele continua limitando a corrente.

#### **4.3 – Construção do Protótipo de Limitador de Corrente Supercondutor**

Para implementação do limitador de corrente supercondutor que está sendo descrito neste trabalho foi preciso a montagem de um circuito elétrico paralelo com dois ramos, um RL e outro supercondutor. O ramo RL foi montado com um resistor maciço de alta potência e uma bobina em série. As conexões elétricas foram feitas utilizando fio flexível de cobre (6 mm<sup>2</sup>). O resistor foi obtido comercialmente, já a bobina foi feita utilizando o mesmo fio de 6 mm<sup>2</sup> enrolado sobre um tubo de papelão (material disponível). Os valores de indutância e resistência elétrica da bobina e do resistor foram posteriormente medidos. No caso do resistor de potência a medida de indutância também foi necessária tendo em vista a geometria do mesmo.

O ramo supercondutor foi construído com o emprego de blocos supercondutores de YBCO texturizados, modelo. Para confecção deste ramo foi projetada uma estrutura denominada “Unidade Básica Supercondutora”, ou simplesmente “UBS”, composta por contatos de cobre e blocos supercondutores CSYL-35, produzidos pela empresa CAN SUPERCONDUCTORS e importados pelo LMDS-UFRRJ. A geometria dos blocos é cilíndrica com  $12,0 \pm 0,5$  mm de altura e  $35 \pm 0,5$  mm de diâmetro que juntamente com o ramo RL compõe a chamada unidade limitadora. Tal ideia tem origem na propriedade de maximização do transporte de corrente quando esta se dá nos planos de cobre e oxigênio do YBCO e na possibilidade de uma estrutura modular que permita a adequação futura para o uso em diferentes exigências de corrente de curto-circuito (tal como ocorre em pontes de tiristores), caso a pesquisa com o protótipo tenha condições de prosseguimento e resultados preliminares bastante positivos.

Os planos de cobre e oxigênio em amostras texturizadas cilíndricas estão perpendiculares ao eixo de simetria do bloco cilíndrico. Nesse sentido foi concebida pelo Dr. Marcelo Azevedo Neves do LMDS-UFRRJ uma estrutura de conexão elétrica que permita explorar esta vantagem da disposição destes planos na amostra e também o acondicionamento da amostra supercondutora de forma a permitir o uso em configurações diferentes. A estrutura pensada prevê uma injeção de corrente pelo eixo de simetria do bloco supercondutor e coleta ou saída de corrente que flui radialmente desse eixo para a superfície lateral externa. Para tal foi necessária a perfuração dos blocos, colocação de uma haste cilíndrica de cobre de 5,00 mm de diâmetro no eixo de simetria do bloco e ajuste de uma lâmina de cobre com espessura de 3,00 mm junto a lateral do bloco supercondutor (anel coletor).

Para permitir a conexão elétrica com o circuito foram colocados terminais com parafusos nas duas estruturas de cobre citadas. Visando uma melhoria do contato elétrico da haste com o material supercondutor foram adotadas táticas como encaixe sobre pressão, utilização de folhas de prata e tinta prata na interface cobre-supercondutor. Já no caso do anel coletor utilizou-se também uma abraçadeira para melhoria do contato elétrico. Todos os ajustes foram feitos fora do banho em nitrogênio líquido, mas se sabe que na situação de uso surgem fatores complicadores na questão do contato elétrico pela baixíssima temperatura de operação, onde são inevitáveis efeitos de contração térmica. A montagem de cada UBS foi implementada pelo Físico Marco Antônio Pereira do Rosário, colaborador do LMDS-UFRRJ.

A principal vantagem do arranjo pensado para a UBS está na maximização do transporte de corrente e na versatilidade da unidade para uso como estrutura modular. A princípio o arranjo de várias UBS pode ser configurado para diferentes valores de corrente de curto. Temos algumas possibilidades que a princípio podem ser adotadas. Por exemplo, se for necessário acoplar uma UBS em série com outra, tendo em vista o

aumento de resistência no modo normal, utiliza-se um módulo adicional na forma de uma base de cobre com uma haste centralizada que fornece a corrente de uma UBS para a seguinte. Já no caso de redução da corrente que passa por uma UBS pode se utilizar a conexão em paralelo. É importante ressaltar que a concepção de um arranjo modular partiu da premissa de resultados positivos com o teste do protótipo analisado neste trabalho.

Assumindo um fluxo radial da corrente, o que pode ser validado via simulação computacional do comportamento térmico e elétrico da UBS, através do método dos elementos finitos (FEM) em biblioteca do software COMSOL *Multiphysics* [1], é possível obter uma estimativa para o comportamento resistivo da UBS em termos de sua geometria e resistividade do YBCO. A consideração a respeito da distribuição de corrente pela amostra tem como base a informação sobre os planos de cobre e oxigênio, que para a geometria cilíndrica da amostra corresponde a planos perpendiculares ao eixo de simetria. A geometria da UBS é esquematizada pela figura 38.

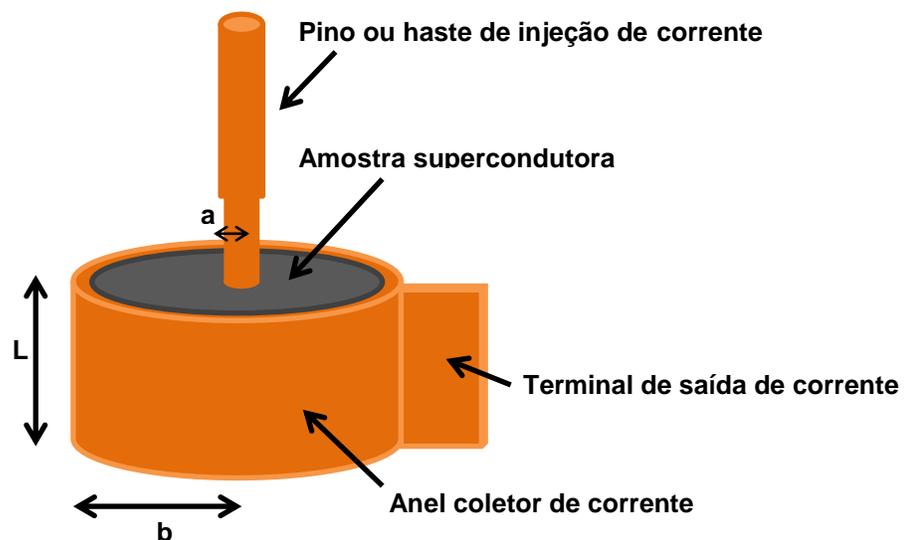


Figura 38 – Esquema da Unidade Básica Supercondutora – UBS.  $L$  é altura,  $a$  o raio da haste de injeção de corrente e  $b$  o raio do anel coletor.

Na figura 38 são evidenciadas duas partes: a haste de injeção de corrente e um anel coletor, ambos feitos de cobre. A seguir será feito um cálculo aproximado da resistência elétrica da amostra supercondutora em função da resistividade elétrica. É importante lembrar que a resistividade deste tipo de material evolui de forma bastante complexa, com dependência dos parâmetros de corrente, campo magnético e temperatura [32] A resistência elétrica total da UBS leva em conta também a resistência elétrica da haste e do anel, que são materiais ôhmicos, e as inevitáveis resistências de contato. Porém, como estes trabalham em nitrogênio líquido a resistência cai consideravelmente.

A figura 39 mostra a vista superior da UBS, evidenciando a distribuição radial de corrente a partir do pino ou haste de injeção de corrente. Nela está representada uma região de comprimento infinitesimal  $dr$ , que corresponde a uma resistência elétrica também infinitesimal  $dR$ . Para uma temperatura fixa podemos considerar a resistividade elétrica do material ( $\rho_{sc}$ ) como sendo constante.

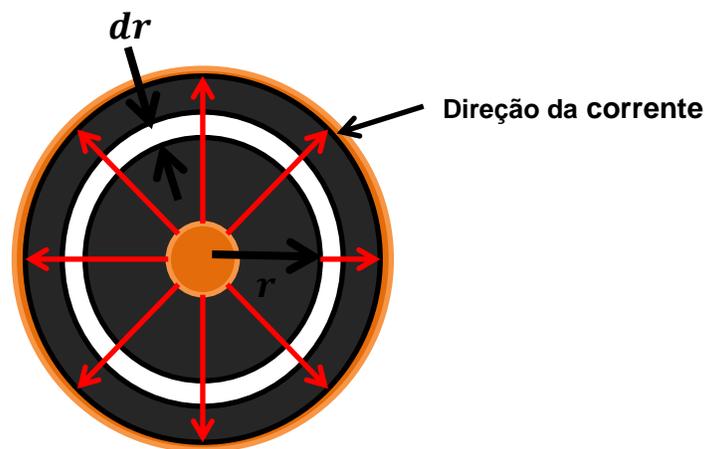


Figura 39 – Distribuição radial de corrente no modelo de UBS.

Considerando ainda a aproximação simplificadora de que a resistividade  $\rho_{sc}$  é isotrópica podemos aplicar a lei de ohm na forma diferencial para expressar a resistência infinitesimal ( $dR$ ):

$$dR = \rho \cdot \frac{dr}{A_r} \quad (4.4)$$

Na equação 4.4 a variável  $A_r$  corresponde a área atravessada pela corrente elétrica. Notemos que a área  $A_r$  é variável, aumentando linearmente com o raio a partir do centro, conforme a equação 4.5:

$$A_r = 2\pi \cdot r \cdot L \quad (4.5)$$

Dessa forma podemos substituir (4.5) em (4.4) e integrar para obter a resistência elétrica total da UBS ( $R$ ) segundo este modelo, tendo como limites de integração o raio interno ( $a$ ) e o raio externo ( $b$ ):

$$R = \int_a^b dR \quad (4.6)$$

$$R = \int_a^b \rho \cdot \frac{dr}{2\pi \cdot r \cdot L} \quad (4.7)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \int_a^b \frac{dr}{r} \quad (4.8)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.9)$$

A tabela 2 fornece os valores das grandezas presentes na equação 4.9. Ressaltamos que o valor da resistividade do material supercondutor (YBCO) corresponde a um valor para uma temperatura de 77K, retirado de [14]. Também é importante ressaltar que na prática a determinação da resistividade do YBCO é complexa, uma vez que tem forte dependência da temperatura e da direção cristalográfica (anisotropia). O modelo expresso pela equação 4.9 também pode fornecer apenas uma estimativa da resistência da UBS no momento da transição, desde que conhecida a resistividade do material nesta condição.

**Tabela 2 – Valores das grandezas utilizadas no modelo de cálculo de resistência da UBS.**

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>	<b>Fonte</b>
$\rho_{sc}(\Omega.m)$	$4.10^{-6}$	Literatura [14]
$a(mm)$	2,5	Medido
$b(mm)$	17,5	Medido
$L(mm)$	12,0	Medido

Utilizando o modelo dado pela equação (4.9) é possível verificar que a resistência elétrica estimada da UBS tem uma ordem de grandeza de  $10^{-7} \Omega$ . Embora esse modelo seja bastante simples ele fornece apenas uma estimativa do limite da amostra supercondutora em termos de resistência com base nos dados adotados. De fato a resistência elétrica total da UBS também tem contribuição da resistência oferecida pela haste de injeção e pelo anel coletor. A resistência da haste também pode ser facilmente calculada, bastando para isso a utilização da resistividade do cobre na temperatura de 77K juntamente com o modelo para resistência elétrica de um condutor cilíndrico maciço. Já a resistência do anel não pode ser facilmente calculada em razão da distribuição de corrente ser mais complexa.

É importante ressaltar que em princípio o bloco supercondutor estaria apto a retornar para o estado supercondutor após a extinção da corrente de curto-circuito. Porém, no estado resistivo ele pode dissipar energia térmica, o que pode levar a amostra a um aquecimento tal em que a temperatura ultrapasse a temperatura crítica ( $T_c = 90K$ ). Dessa forma percebemos a complexidade do tratamento completo desse assunto, pois tanto a transição ao estado dissipativo quanto a reversão ao estado supercondutor tem “origem elétrica e térmica”.

#### 4.4 – Bancada de Testes

Além da montagem do protótipo de limitador foi necessária a montagem de estrutura mínima para realização de ensaios e testes preliminares com o protótipo trifásico, tendo em vista a finalização do projeto LiMS. A estrutura montada consiste em uma bancada de testes. A referida bancada foi confeccionada em estrutura de aço capaz de abrigar os seguintes equipamentos:

- Variac
- Transformador
- Banho de Nitrogênio – Recipiente de FRP (G10)
- Carga Resistiva
- Disjuntor de Proteção
- Chave de Manobra
- Limitador de Corrente (RL & UBS)
- Alicates Amperímetros/Voltímetros
- Frasco Dewar com N<sub>2</sub>L (13)

O aparato de testes do limitador montado sobre a bancada é mostrado na figura 40. O sinal alternado (60Hz) utilizado para alimentação da bancada é obtido de um ponto de energia no quadro de distribuição do LMDS-UFRRJ. O sinal passa por um variac e por um transformador rebaixador, o primeiro tem a função de permitir regulação da tensão no primário do transformador (regulando assim o nível de curto-circuito) e o segundo permite trabalhar com níveis de tensão mais baixos e correntes suficientemente altas (acima do valor crítico da UBS). Há também um disjuntor de segurança instalado antes da conexão do quadro de distribuição com o variac, visando a proteção de todo circuito em teste no

caso de alguma anormalidade. Uma chave de manobra é utilizada como chave para curto-circuitar a carga, simulando assim o curto a ser limitado pelo protótipo de limitador. A UBS fica alojada em banho de nitrogênio líquido em recipiente aberto, feito de FRP. Para reposição do nitrogênio é utilizado um frasco dewar<sup>4</sup>.



**Figura 40 – Bancada de testes do limitador no LMDS-UFRRJ [1].**

É importante lembrar que alguns ensaios necessários (continuidade do projeto LiMS) não puderam ser feitos com a bancada descrita acima e foram motivos de atraso no andamento da dissertação, mas puderam ser feitos com auxílio do CEPEL. Os detalhes serão dados no próximo capítulo.

---

<sup>4</sup> Trata-se de um recipiente para acondicionamento do nitrogênio líquido utilizado na refrigeração das amostras supercondutoras (“garrafa térmica”).

## Capítulo 5 – Metodologia e Procedimentos Experimentais

### 5.1 – Introdução

Após os trabalhos de montagem do limitador de corrente supercondutor descrito no último capítulo foram realizados ensaios de curto-circuito com o módulo trifásico no LMDS (Ensaio Preliminares no LMDS). Como nestes ensaios foram levantadas apenas medidas de pico, a sequência do estudo, que culminou nesta dissertação, demandou novas medidas e a verificação experimental da operação do protótipo (monofásico) via curva de corrente de curto-circuito no tempo. Esta etapa foi de grande importância para a determinação do comportamento real do equipamento projetado, com posterior análise de comportamentos coerentes com o esperado e desvios deste.

Para o cumprimento desta etapa foram realizados procedimentos experimentais como:

- medidas de resistência elétrica
- medidas de indutância
- medida de corrente crítica
- ensaios de rampa de corrente em corrente contínua (CC),
- ensaios de curto-circuito controlado em corrente alternada (CA).

Parte dos procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Dispositivos e Materiais Supercondutores da UFRRJ (LMDS-UFRRJ), e a outra parte com o auxílio do Laboratório AT-15 do CEPEL (Ilha do Fundão), através de colaboração do Prof. Márcio Sens.

A seguir é dado um esboço de toda a metodologia desta etapa do trabalho, indicando as medidas e os ensaios realizados (LMDS-UFRRJ e CEPEL), e os sistemas de medição empregados.

## 5.2 – Ensaios e Medidas Realizadas no LMDS

O primeiro ensaio realizado no LMDS nesta etapa deste trabalho foi a medida da corrente crítica da amostra ( $I_c$ ) de YBCO utilizada na UBS. Neste caso foi utilizado o chamado método de quatro pontas [14] para obter uma curva  $V \times I$  (tensão por corrente), onde dois terminais são utilizados para injeção da corrente na amostra e os outros dois são utilizados para medida da tensão na amostra (Figura 41). O surgimento de uma tensão na amostra indica a transição ao estado dissipativo. Existe um valor de tensão (ou campo elétrico) utilizado como referência para determinar a transição ( $1\mu V/cm$ ). A corrente associada a esse valor de tensão na curva tensão por corrente elétrica é tomada como sendo a corrente crítica. Cabe ressaltar que essa medida é feita em corrente contínua (CC).

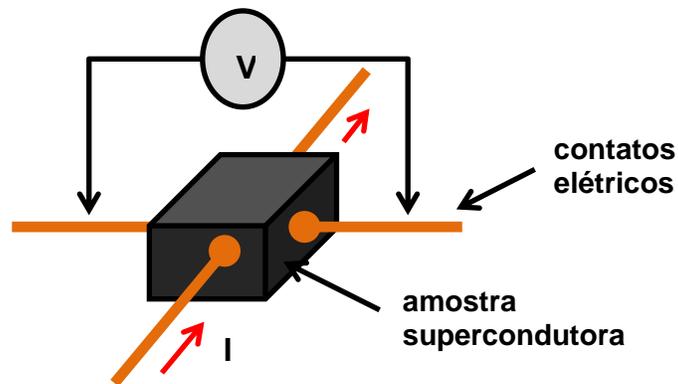


Figura 41 – Esquema do método de quatro pontas.

Como foi dito anteriormente também foram feitos ensaios no LMDS por ocasião de finalização do projeto LiMS, onde foi utilizada chave de manobra para geração de curto-circuito de uma carga resistiva. É importante lembrar que os ensaios na bancada do LMDS foram feitos com o SFCL trifásico em baixa tensão e alta corrente (curto-circuito), o

que foi conseguido com a utilização de um variac e um transformador com fechamento para operação como transformador abaixador.

O variac trifásico utilizado (AUJE, mod. T3415) foi encomendado ao fabricante para este ensaio específico e tem as seguintes características:

- Entrada – 220 V
- Saída – 0-240 V
- Corrente – 15 A
- Potência – 6,235 KVA
- Freqüência – 60 Hz
- Com caixa de proteção

O transformador trifásico utilizado (KING, mod. 7025), também foi encomendado ao fabricante para este ensaio específico e tem as seguintes características:

- Potência – 4,0 KVA
- Tensão Primária – 220 V c/ 4 Taps , ligação estrela.
- Tensão Secundária – 15 V (154 A de Corrente Nominal), ligação estrela.
- Freqüência – 60 Hz
- Tipo – IP 00 (s/ caixa de Proteção)
- Isolamento a seco

A carga utilizada foi um resistor de potência com resistência elétrica da ordem de  $4,4 \Omega$  e uma indutância da ordem de  $0,125 \text{ mH}$ . Como já foi dito o ramo RL do limitador tem valores semelhantes ao da carga, tendo em vista a possibilidade de uma corrente próxima do valor nominal caso a corrente passe a fluir em maior parte por esse ramo ou totalmente em uma eventual abertura dos contatos elétricos da UBS. A figura 42 mostra o tipo de resistor utilizado no ramo RL e na carga.



**Figura 42 – Resistor utilizado como carga nos ensaios realizados no LMDS-UFRRJ.**

O disjuntor trifásico utilizado (SIEMENS) possui corrente nominal de 40 A. A indutância de transmissão vale  $1,09 \pm 0,02$  mH e a resistência de carga é de  $4,4 \pm 0,2$   $\Omega$ . Nos pontos de monitoramento de corrente utilizou-se alicates-amperímetros ICEL 7900 (p. ex A2, na figura 43) e para registro de picos usou-se garras de corrente Minipa CA 1000 acopladas a multímetros ICEL MD 6130 (com função de registro de pico ativada – *peak hold*). Os picos foram registrados em dois pontos do barramento: na entrada do disjuntor (p. ex. A1, na figura 43) e na entrada de carga (p. ex. A3, na figura 43).

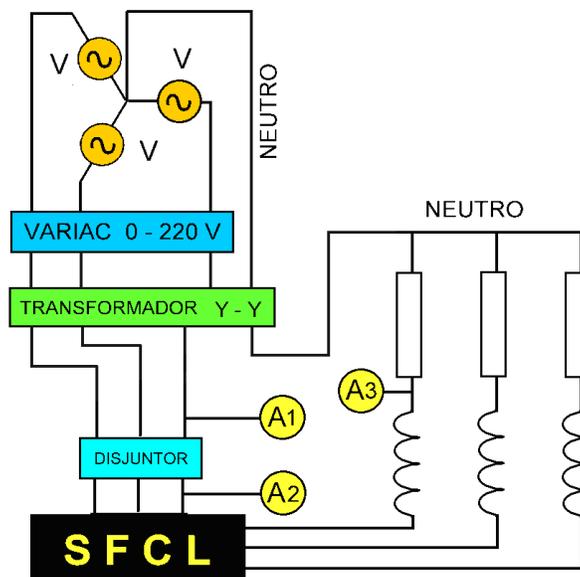


Figura 43 – Esquema do aparato de teste do SFCL Trifásico [1].

Para gerar os curtos foi utilizada uma chave trifásica que, ao ser acionada, promovia curtos do tipo fase-neutro durante aproximadamente 3 s. O primeiro ensaio consistiu em determinar a corrente em cada fase sem a presença do SFCL. O segundo ensaio consistiu em promover um curto em cada fase deste sistema, para verificar a corrente de pico. O terceiro ensaio foi realizado para determinar a corrente em cada fase com o SFCL em linha e operante, ou seja, com as UBS's em banho de nitrogênio líquido (N2L). Por fim o quarto ensaio consistiu em gerar um curto tipo fase-neutro e determinar as correntes de

pico antes do disjuntor e antes da carga, bem como o valor de corrente depois da ação do SFCL.

### **5.3 – Ensaio e Medidas Realizadas no CEPEL**

#### **5.3.1 – Medidas de Resistência Elétrica e Indutância**

Para caracterização do ramo RL foram realizadas medidas de resistência e indutância do resistor e do indutor empregados. Ambas as medidas foram feitas com o uso do multímetro (ohmímetro e medidor de indutância) disponível no laboratório AT-05 do CEPEL. A medida de resistência foi feita em regime CC enquanto que a indutância foi medida para uma escala de 100 Hz, a mais próxima dos 60 Hz da rede CA utilizada nos ensaios de corrente.

#### **5.3.2 – Ensaio de Rampa de Corrente**

Basicamente o ensaio de rampa de corrente consiste na aplicação de uma corrente contínua na UBS, com uma taxa de crescimento pré-programada e constante. Durante este ensaio são monitoradas a corrente que circula pela UBS e a tensão elétrica entre seus terminais. O objetivo é obter um valor de resistência em corrente contínua da UBS, e também verificar a possibilidade de uma resistência elétrica indesejável em função de possíveis problemas de mau contato elétrico e/ou eventuais defeitos na amostra.

Foi utilizada uma fonte de corrente CC da marca FUG (Modelo NLB 1400M-200) com tensão variável nominal entre 0 e  $\pm 6,5$  V e corrente com intensidade na faixa nominal de 0 a 120 A. A figura 44 representa um esquema do aparato de medição, onde não está

representado o computador utilizado para tratamento dos dados e montagem das curvas corrente versus tempo e tensão versus corrente.

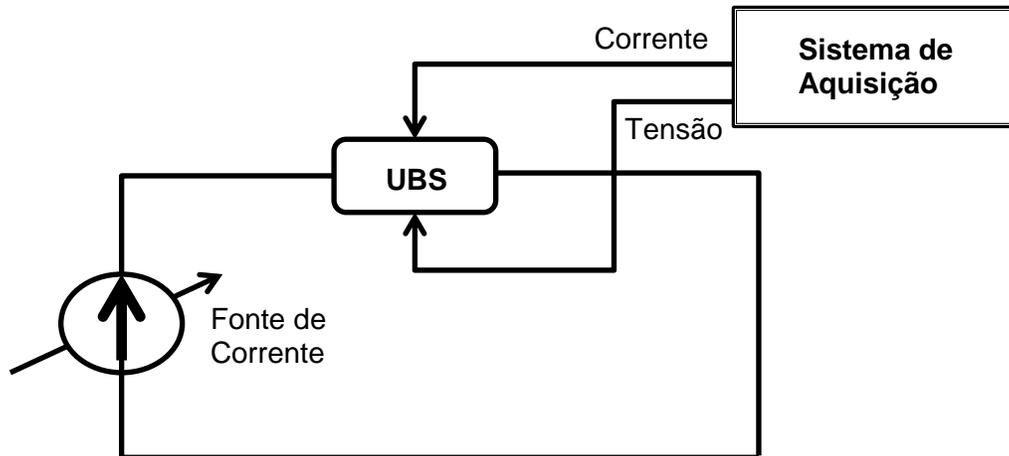


Figura 44 – Esquema de medição para ensaio de rampa de corrente com a UBS.

Em razão de algumas medidas iniciais apresentarem como resultado uma alta resistência, mesmo para correntes baixas (hipótese inicial de problemas de contato), o mesmo ensaio foi repetido. Cabe lembrar que um ensaio semelhante, feito no LMDS-UFRRJ, permitiu uma estimativa do valor de corrente crítica da amostra utilizada na confecção da UBS, sem a presença de um alto valor de resistência elétrica. O detalhe é que esse ensaio foi feito em oportunidade anterior ao ensaio de rampa realizado no CEPTEL. Os resultados são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

### 5.3.3 – Ensaios de Curto-Circuito

Nestes ensaios uma fonte de alta corrente programável e com chaveamento eletrônico, que forneceu ao circuito em teste uma corrente alternada (60Hz) durante 4 ciclos (aproximadamente 64ms). Trata-se de uma fonte com chave estática (EnergySat Technologies), controle do fechamento e a abertura do circuito, onde é possível ajustar o

ângulo inicial da tensão e o tempo de ensaio (4 ciclos). Tal fonte foi disponibilizada para uso no laboratório AT-05 do CEPEL. Para estimativa dos níveis de corrente a serem utilizados e regulagem da fonte foi feito um ensaio de calibração antes dos ensaios com o circuito limitador a ser analisado. Juntamente com a fonte foram empregados um osciloscópio digital Tektronix DPO 7104 de 4 canais, duas pontas de prova: uma de tensão e outra de corrente. Esta última foi importada pelo LMDS-UFRRJ especialmente para este tipo de ensaio devido aos altos valores de corrente envolvidos.

Em discussão com o professor Márcio Sens, especialista da área de medidas elétricas do CEPEL, foram propostos três tipos de ensaios envolvendo pulsos de corrente, um com o protótipo limitador e outros dois a título de comparação: ensaio de curto-direto e ensaio com disjuntor termomagnético. De forma complementar também foi proposto um ensaio com o ramo RL do limitador. A seguir são discriminados os quatro ensaios propostos.

#### **5.3.3.1 – Ensaio de Curto-Circuito Franco**

Neste ensaio é feito um curto-circuito franco entre os terminais da fonte de corrente utilizada através de um cabo elétrico de 6 mm com isolamento elétrico especial, afim de suportar as exigências térmicas no momento do ensaio de alta corrente. Tal cabo estava disponível no laboratório AT-05 do CEPEL e foi disponibilizado para o ensaio pelo professor Márcio Sens. Após a conexão do referido cabo ao circuito, com conseqüente *by-pass* do circuito limitador, a fonte tem um valor de tensão pré-ajustado e um pulso de 4 ciclos é aplicado a esse curto. São medidas então a corrente e a tensão para esse curto franco ou direto.

Os valores obtidos com este ensaio servirão de base para análise do nível de redução da corrente de curto alcançado com o uso do dispositivo limitador, sendo os valores neste

caso os limites máximos de corrente. POLASEK *et al* [33] fala neste caso em corrente presumida.

#### **5.3.3.2 – Ensaio de Curto-Circuito com o ramo RL**

Neste caso não se trata rigorosamente de um curto-circuito, uma vez que não se trata de uma conexão de baixa impedância entre dois pontos em potenciais elétricos diferentes. A ideia é obter a curva de corrente no caso de abertura dos contatos do ramo que contém a UBS, sendo possível a comparação com o ensaio envolvendo o limitador.

#### **5.3.3.3 – Ensaio de Curto-Circuito com Disjuntor**

Nesse ensaio foi utilizado um disjuntor termomagnético de 10 A no lugar do cabo elétrico empregado no ensaio anterior para gerar um curto direto. A ideia é ter uma curva de comparação entre o dispositivo limitador analisado e outro dispositivo de limitação ou extinção de corrente de curto. Por simplicidade e pela disponibilidade foi utilizado o disjuntor termomagnético. Ao abrir os seus contatos o disjuntor se comporta, em um caso extremo, como um elemento supercondutor que ao transitar para a fase dissipativa insere uma resistência infinita no circuito. Em função da abertura dos contatos do disjuntor a corrente acaba sendo transferida integralmente ao ramo RL.

Novamente foram obtidas as curvas de tensão e corrente, sendo armazenadas para posterior comparação com os resultados do limitador.

#### **5.3.3.4 – Ensaio de Curto-Circuito com o Limitador**

Esse é o ensaio de teste do limitador propriamente dito. A Unidade Básica Supercondutora (UBS) é colocada em paralelo com o circuito RL, configurando o

elemento limitador. O N2L é despejado no recipiente que contém a UBS para refrigeração do material supercondutor, sendo aguardado um intervalo de tempo suficiente para o equilíbrio térmico. Como a conexão da UBS ao circuito é feita através de um pino central de cobre e de um anel lateral também de cobre, ajustes foram necessários em função de efeitos da baixa temperatura.

Foram medidas a corrente circulante pelo dispositivo limitador e a tensão em seus terminais. Assim como nos outros ensaios foram utilizados diferentes níveis de corrente de acordo com a curva de calibração da fonte empregada.

#### **5.3.4 – Levantamento de Possíveis *Hot Spots***

Através de filmagem da UBS em operação durante os ensaios de curto foi possível analisar posteriormente os pontos onde houve maior aquecimento, o que pode ser uma ocorrência dos chamados pontos quentes ou “*hot spots*” da UBS. Tais pontos são caracterizados por maior dissipação de calor, o que conseqüentemente gera maior vaporização do nitrogênio líquido. Visualmente isso é detectado por pontos de maior ebulição do nitrogênio líquido durante a aplicação do pulso de corrente.

É importante lembrar que uma medida mais precisa deve ser feita com análise termográfica, o que não foi feito em virtude da indisponibilidade de uma câmera termográfica ou termovisor.

## **Capítulo 6 – Apresentação e Discussão dos Resultados**

### **6.1 – Introdução**

Serão apresentados aqui os resultados obtidos com as medidas e ensaios detalhados no capítulo 5. Também serão feitas algumas discussões a respeito da análise das medidas obtidas, dos detalhes de montagem e das dificuldades encontradas durante a realização dos ensaios. Os testes realizados com o protótipo de limitador de corrente supercondutor descrito envolveram medidas em corrente contínua (determinação da corrente crítica) e ensaio em corrente alternada (curto-circuito).

Como já foi dito anteriormente o protótipo analisado foi construído no LMDS-UFRRJ, sendo que algumas das medidas referentes a sua análise foram também realizadas neste mesmo laboratório por ocasião do projeto LiMS. Porém, alguns ensaios foram feitos com a utilização da infraestrutura disponível na sede do CEPEL na cidade do Rio de Janeiro (Ilha do Fundão).

### **6.2 – Medidas de Resistência e Indutância do Ramo RL**

A caracterização do ramo RL (resistivo-indutivo) foi feita através de uma medida suficientemente precisa (para o tipo de aplicação em questão) de suas características elétricas básicas. Dessa forma foram feitas as medidas de resistência elétrica e indutância do resistor, e também do indutor empregado. Conforme foi citado anteriormente o valor de resistência escolhido para esse ramo é bem próximo ao do valor da carga resistiva que inicialmente foi empregada no projeto, tendo em vista uma limitação de corrente a valores próximos do nominal e uma falha segura no caso de abertura do ramo supercondutor durante algum teste.

A medida de resistência elétrica foi levantada em corrente contínua (CC) e a de indutância em corrente alternada (CA) de 100Hz, valor mais próximo de 60Hz conseguido com o equipamento utilizado, o que não constituiu em dificuldade já que a indutância depende do aspecto construtivo do indutor. Foi empregado um multímetro digital disponibilizado no laboratório AT-05 do CEPEL. A tabela 3 mostra os valores obtidos para as medidas com o resistor e o indutor, além dos valores de impedância calculados. Todas as medidas da referida tabela foram feitas para a temperatura ambiente de 23°C.

**Tabela 3 - Medidas de resistência, indutância e impedância do resistor e indutor empregados no ramo RL do limitador.**

Resistor	Resistência	4,219 $\Omega$ (CC)
	Indutância	127,5 $\mu H$ (100Hz)
	Impedância	4,366 $\Omega$ (100Hz)
	Temperatura	23°C

Indutor	Resistência	0,189 $\Omega$ (CC)
	Indutância	129,4 $\mu H$ (100Hz)
	Impedância	0,825 $\Omega$ (100Hz)
	Temperatura	23°C

### 6.3 – Determinação da Corrente Crítica da Amostra

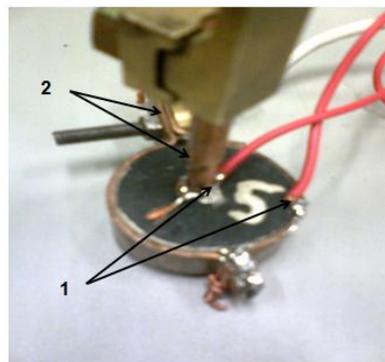
Para a verificação experimental da corrente crítica das amostras supercondutoras utilizadas foram realizados ensaios com base no método de quatro pontas. Como foi visto este ensaio consiste na utilização de uma fonte de corrente elétrica variável para

aplicação de corrente na amostra supercondutora, variando o valor de corrente de zero até um valor imediatamente acima da corrente crítica. A corrente crítica detectada corresponde ao valor de corrente associado ao surgimento de um valor característico de campo elétrico na amostra, o que indica a transição ao estado dissipativo.

Apesar da amostra se destinar a aplicação em corrente alternada (60Hz), a curva  $I \times V$  foi obtida em corrente contínua. A corrente crítica neste caso diz respeito ao valor de corrente limite que pode fluir pelo material supercondutor sem que haja perdas, em corrente alternada há perdas pequenas que ocorrem principalmente em frequências mais altas. As figuras 45 e 46 mostram a fonte de corrente utilizada e o esquema de conexão para medida da corrente crítica, respectivamente.



**Figura 45 – Fonte de corrente utilizada no levantamento da corrente crítica (CC) da amostra supercondutora utilizada na UBS.**



1 – Conexão para medida da tensão na amostra.

2 – Conexão para injeção e medida de corrente na amostra.

**Figura 46 – Esquema empregado para determinação da corrente crítica da Unidade Básica Supercondutora (UBS).**

Foi obtido um valor de corrente crítica da ordem de 54 A (CC), conforme mostra a figura 47. Dessa forma todo o dimensionamento para utilização do limitador de corrente em ensaio de curto-circuito girou em torno desse valor, obviamente utilizando níveis de correntes de curto superiores ao valor considerado.

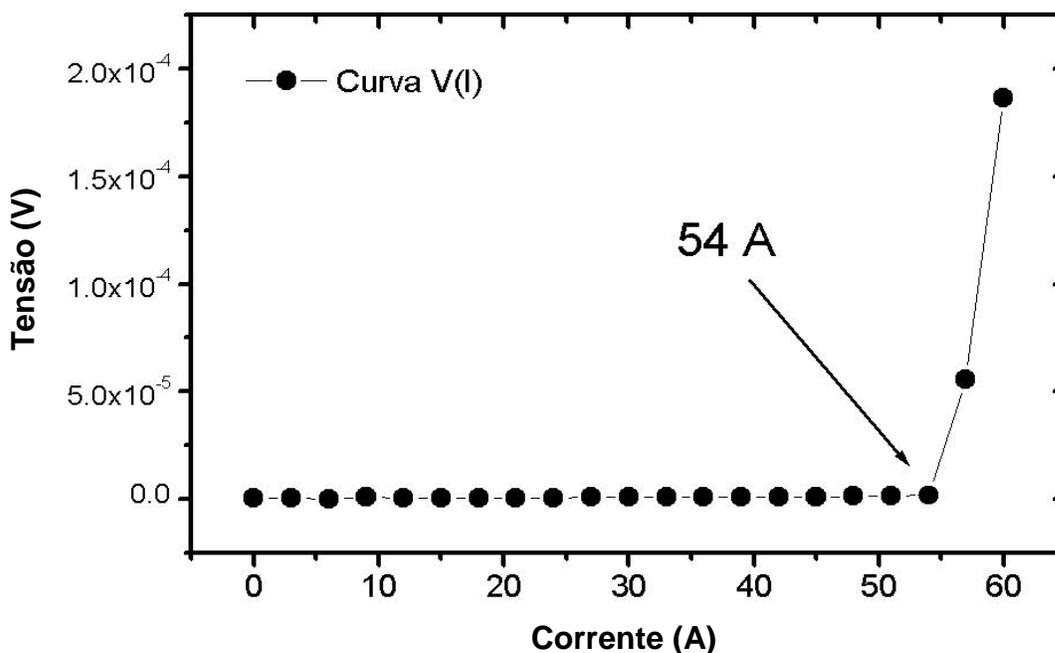


Figura 47 - Curva  $V \times I$  (CC) para a amostra supercondutora utilizada na construção do limitador.

É importante lembrar que a curva dada acima foi obtida antes dos ensaios com o SFCL trifásico realizados no LMDS, ainda na fase de projeto e construção do protótipo.

#### 6.4 – Ensaio de Rampa de Corrente

Como foi mencionado no capítulo anterior o ensaio de rampa de corrente consiste na aplicação de uma corrente contínua com taxa de crescimento temporal constante e

determinação da curva tensão por corrente da UBS. O comportamento resistivo da UBS pode ser verificado na figura 47, onde os valores de tensão oscilam, mas apresentam uma leve crescimento entre 2,0 e 3,0 V enquanto a corrente varia de 0 a 60 A. A figura 48 mostra o gráfico da corrente aplicada como função do tempo (rampa).

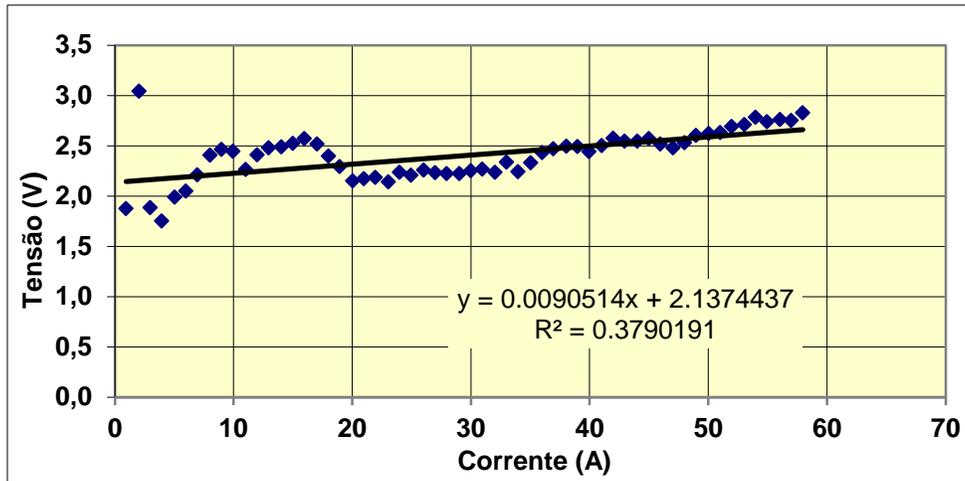


Figura 48 – Curva de tensão por corrente para ensaio de rampa com a UBS.

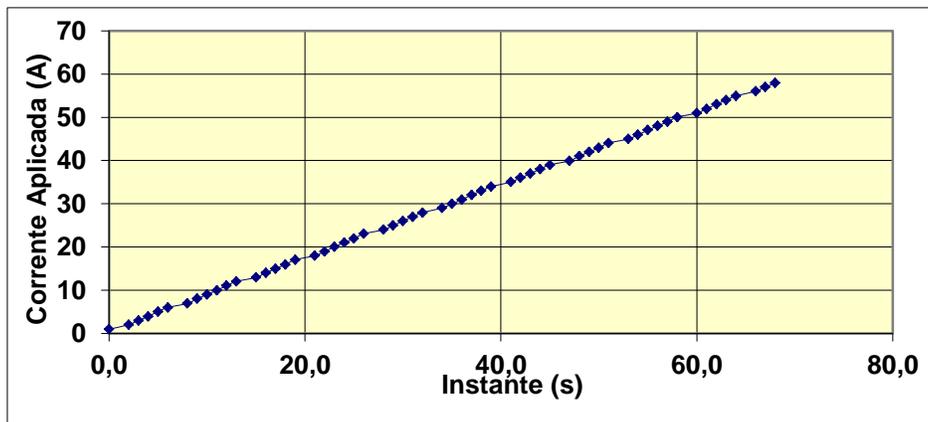


Figura 49 – Rampa de corrente aplicada a UBS.

## 6.5 – Ensaio de Curto-Circuito SFCL Trifásico - LMDS

Em um primeiro ensaio obteve-se o valor efetivo de corrente nominal, que foi de  $2,0 \pm 0,1$  A em cada fase sem a presença do SFCL.

No segundo ensaio realizado obteve-se um valor efetivo de  $340 \pm 10$  A em cada fase sem a presença do SFCL (corrente presumida). Este resultado é reprodutível e, em todas as vezes que foi realizado o disjuntor de 40 A foi acionado pela ocorrência do curto.

Do terceiro ensaio, teste do SFCL trifásico em corrente nominal, obteve-se que a entrada do SFCL na linha não alterou de forma sensível a corrente em cada fase, repetindo-se o valor de  $2,0 \pm 0,1$  A em cada uma. Portanto, o ramo supercondutor (de resistência elétrica nula) efetivamente age como um curto no barramento e não desestabiliza a rede utilizada, tendo também capacidade de recuperação.

O quarto e decisivo ensaio, teste de limitação, foi realizado e os resultados foram reprodutíveis, e em todas as ocasiões o disjuntor de 40 A não chegou a ser ativado pela corrente de curto-circuito. Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 4.

**Tabela 4 – Resultado dos testes de limitação de corrente de curto-circuito realizados no LMDS (SFCL Trifásico).**

<b>Pico de corrente antes do disjuntor</b>	<b>Pico de corrente na carga</b>	<b>Corrente máxima lida depois do pico</b>
$250 \pm 20$ A	$120 \pm 20$ A	$2,6 \pm 0,1$ A

Note-se que a entrada do SFCL na rede reduziu o valor do pico de sobrecorrente no curto. Observa-se também que na carga ocorre um pico de corrente que é 48% do valor de pico de curto no barramento antes do SFCL. Visto que o disjuntor não era mais acionado no curto, podemos assumir que a ação do limitador efetivamente reduziu a corrente a valores inferiores a 40 A em tempo inferior ao da operação do disjuntor. Por inspeção visual no alicate amperímetro em leitura contínua, observou-se um valor máximo de corrente valendo  $2,6 \pm 0,1$  A.

## 6.6 – Ensaios de Curto-Circuito - CEPEL

Os ensaios de corrente de curto-circuito consistiram, conforme descrição feita no capítulo 5, na aplicação de uma alta corrente pré-determinada ao limitador para verificação do seu comportamento como protótipo. Além disso, foram feitos outros três ensaios de corrente de curto-circuito envolvendo o ramo RL utilizado no limitador, um curto franco (fio de cobre) e um disjuntor, todos para constituição de uma base de comparação dos resultados. Os ensaios foram feitos no laboratório AT-05 do CEPEL, os resultados são apresentados nas seções que seguem juntamente com os detalhes de realização e alguns comentários.

A figura 50 mostra o esquema de medição de corrente e tensão nos ensaios de curto-circuito realizados com o protótipo de limitador no CEPEL. O ensaio feito com o curto direto (fio de cobre) serviu para determinar o comportamento da corrente sem um elemento de interrupção ou de limitação. O ensaio feito com o disjuntor determinou o comportamento da corrente com a presença de um elemento de interrupção (disjuntor). Já o ensaio com o ramo RL determina a corrente no caso de abertura dos contatos da UBS e também no caso de abertura do disjuntor empregado no ensaio anterior.

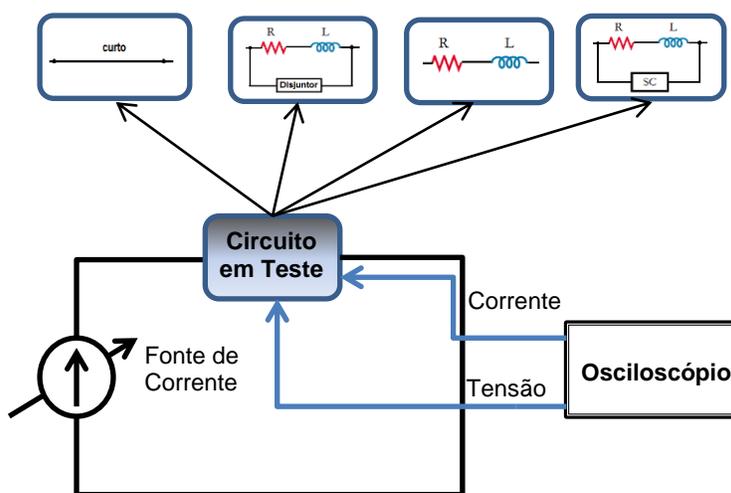


Figura 50 – Representação da montagem utilizada para os ensaios de curto-circuito no CEPEL.

Os dados de tensão e corrente foram adquiridos por um osciloscópio digital Tektronix DPO 7104 de 4 canais, através de uma ponta de prova de corrente e uma ponta de prova de tensão. A figura 51 mostra as pontas de prova utilizadas (5 e 6), o indutor do ramo RL (1) e o resistor do ramo RL (2) durante um ensaio com o limitador. Observa-se a UBS (3) e o recipiente de acondicionamento da UBS cheio de nitrogênio líquido (4).

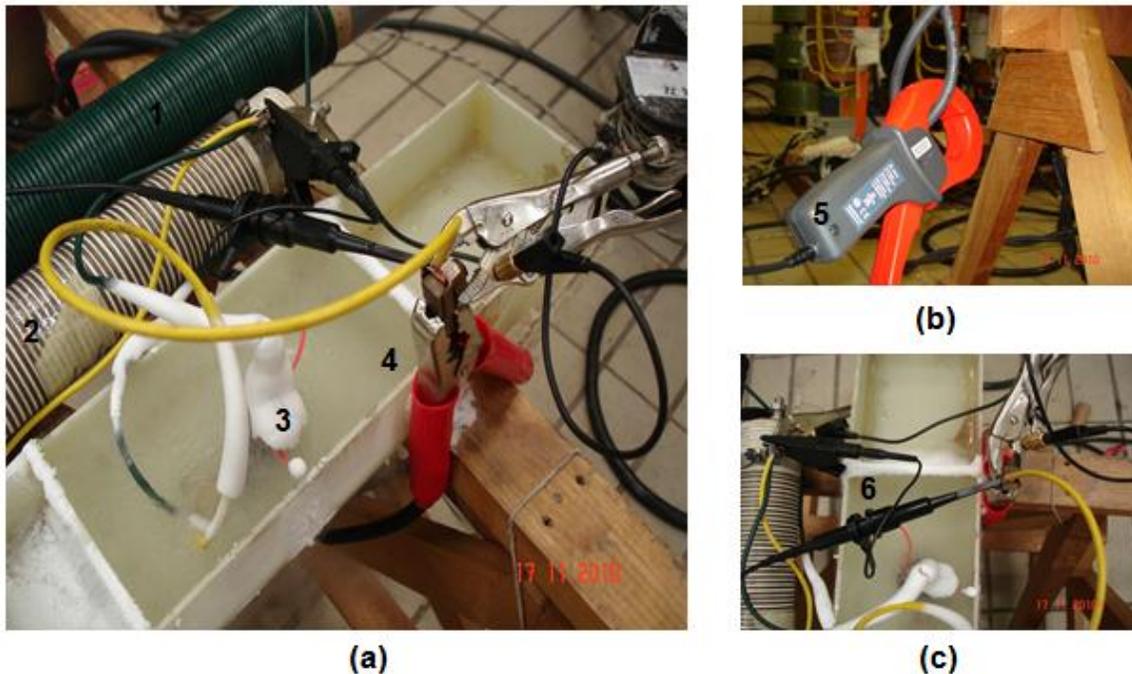


Figura 51 – (a) Montagem para ensaio de corrente com o limitador. (b) Detalhe da ponta de corrente enlaçando o cabo que sai da fonte de corrente. (c) Detalhe da ponta de tensão conectada ao circuito em teste.

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma fonte de alta corrente, disponível no laboratório AT-15 do CEPEL (Ilha do Fundão). A corrente alternada é produzida pela indução em um cabo enrolado num transformador de 480 V. O Ajuste da tensão de entrada permite a regulação do valor de corrente para o ensaio conforme a necessidade. Todas as operações para as medidas foram realizadas com a supervisão do Prof. Marcio Antônio Sens, responsável pelo laboratório. Para aplicação das altas correntes foi

utilizada uma chave estática, que controla o fechamento e a abertura do circuito. Nela foi possível ajustar o ângulo inicial da tensão e o tempo de ensaio (4 ciclos). Antes dos ensaios foi levantada uma curva de calibração da fonte, ou seja, a corrente de pico fornecida em função da tensão em seus terminais. A fonte utilizada e a curva de calibração da fonte são mostradas a seguir nas figuras 52 e 53, respectivamente.



Figura 52 – Fonte de alta corrente utilizada nos ensaios com o limitador no CEPEL (Ilha do Fundão).

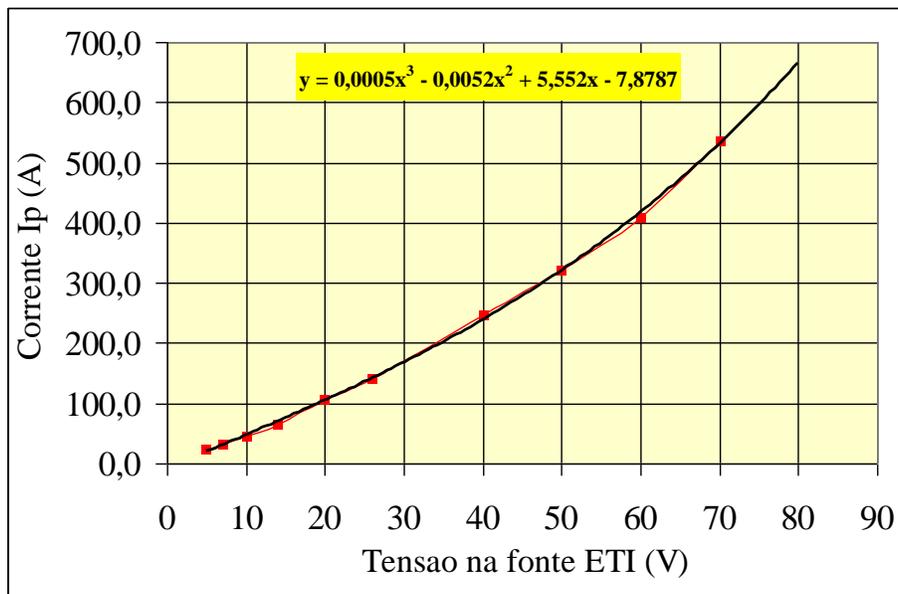


Figura 53 – Curva de calibração da fonte de alta corrente.

Os resultados obtidos nestes ensaios de curto-circuito são apresentados na seguinte sequência: curto franco, curto com disjuntor, curto com ramo RL e curto com o limitador. Os ensaios são organizados em dois grupos, o grupo 1 envolve os ensaios realizados com a fonte de corrente ajustada para 50 VCA e 300 A. Já o grupo 2 envolve os ensaios realizados com a fonte de corrente ajustada em 70 VCA e 535 A. Em geral não houve repetição, exceto para o caso do limitador, foco do trabalho, onde foram feitas repetições nos ensaios de modo a garantir uma reprodutibilidade dos resultados.

A tabela 5 resume todos os ensaios de curto-circuito realizados no CEPEL.

**Tabela 5 – Resumo dos ensaios de curto-circuito realizados no CEPEL (SFCL monofásico).**

		<b>Ensaio</b>
<b>Ensaio de Curto-Circuito - Grupo - 1</b>		Ensaio de Curto-Circuito Franco 1
		Ensaio de Curto-Circuito com Disjuntor 1
<b>Tensão da Fonte (CA)</b>	50 V	Ensaio de Curto-Circuito com o ramo RL 1
<b>Corrente Presumida</b>	300 A	Ensaio de Curto-Circuito com o Limitador 1
<b>Ensaio de Curto-Circuito - Grupo - 2</b>		Ensaio de Curto-Circuito Franco 2
		Ensaio de Curto-Circuito com Disjuntor 2
<b>Tensão da Fonte (CA)</b>	70 V	Ensaio de Curto-Circuito com o ramo RL 2
<b>Corrente Presumida</b>	535 A	Ensaio de Curto-Circuito com o Limitador 2

É importante lembrar que os ensaios realizados com o limitador no CEPEL foram realizados em circuitos monofásicos, ao contrário dos ensaios preliminares (projeto LiMS) realizados no LMDS, que foram trifásicos.

As curvas de tensão e corrente apresentadas foram extraídas diretamente da tela do osciloscópio por razões de dificuldade de armazenamento dos dados de tensão e corrente simultaneamente.

## 6.6.1 – Ensaios de Curto-Circuito - Grupo – 1

### 6.6.1.1 – Ensaio de Curto-Circuito Franco 1

A figura 54 mostra as curvas de tensão e corrente registradas no osciloscópio para este ensaio de curto franco do grupo 1. Assim como nos demais ensaios é possível checar as escalas no canto inferior esquerdo de cada imagem da tela do osciloscópio.

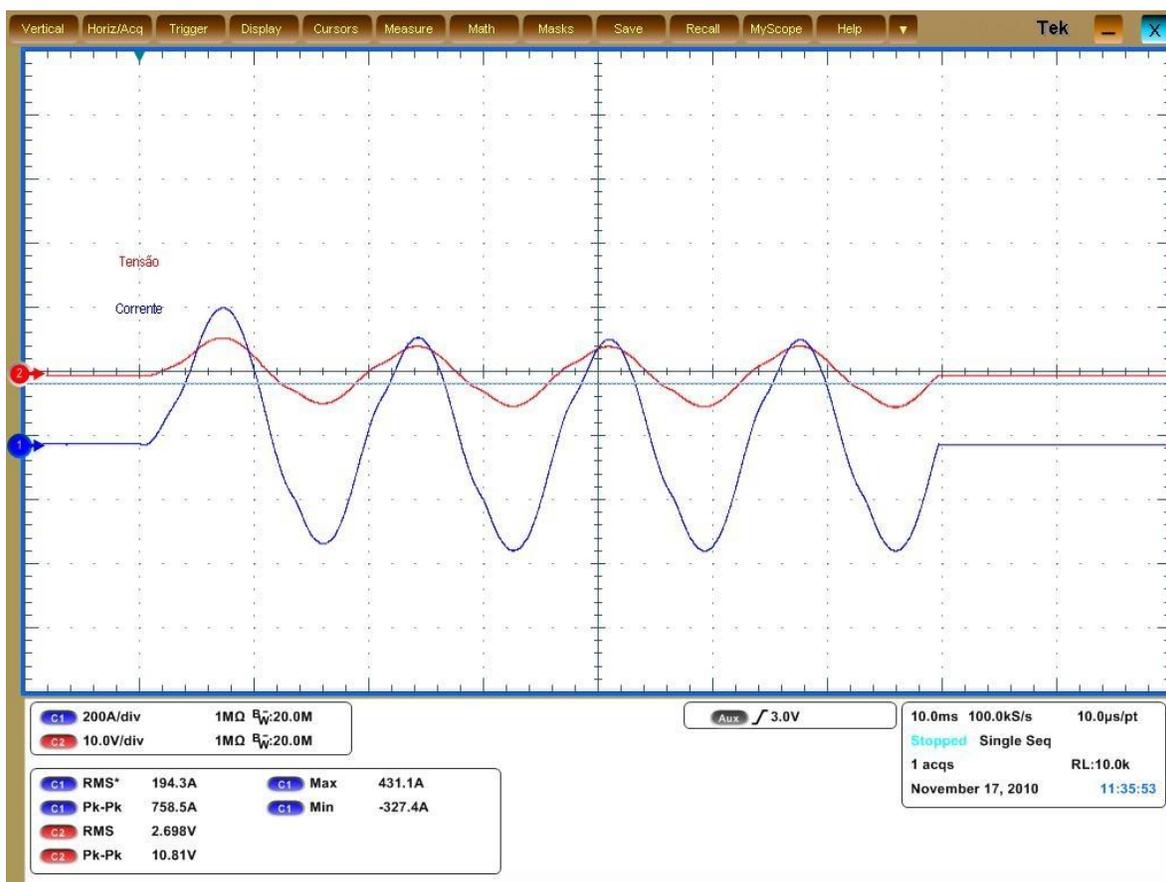


Figura 54 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito franco 1.

Observa-se uma corrente máxima de  $431,1 \pm 0,1$  A, em virtude da presença de uma componente contínua no primeiro semiciclo (assimetria na curva de corrente). Fora desta condição a corrente foi de aproximadamente 300 A.

### 6.6.1.2 – Ensaio de Curto-Circuito com Disjuntor 1

A figura 55 mostra as curvas de corrente e tensão para o primeiro ensaio de curto-circuito com disjuntor. Foi utilizado um disjuntor de 10 A.

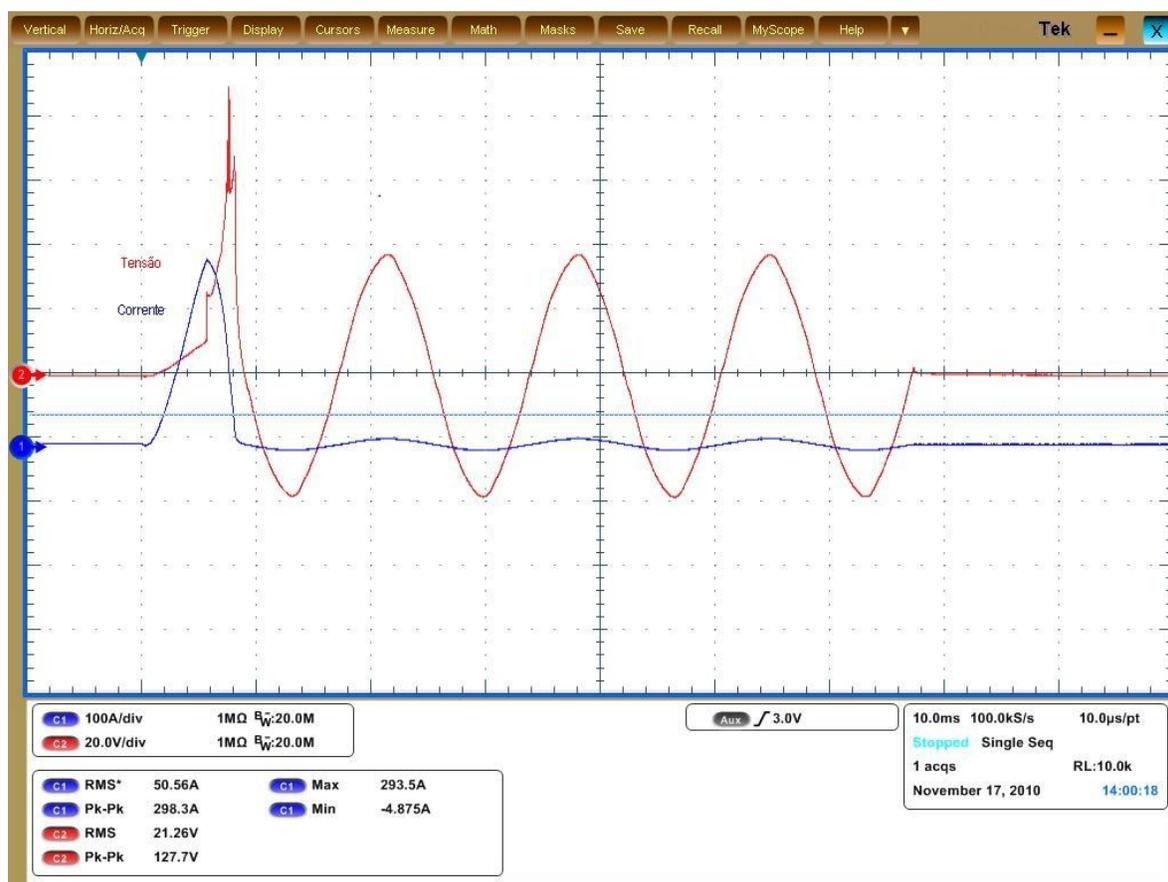


Figura 55 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o disjuntor 1.

Observa-se na figura 55 um pico de corrente de  $293,5 \pm 0,1$  A, quando ocorre a abertura do disjuntor. A corrente atenuada para  $8,80 \pm 0,01$  A corresponde a corrente para o caso de circulação apenas no ramo RL, como pode ser comparado com o próximo ensaio. A abertura do disjuntor foi em um tempo menor que 2 ms. Durante a abertura do disjuntor percebe-se também a ocorrência de uma sobretensão nos terminais do circuito.

### 6.6.1.3 – Ensaio de Curto-Circuito com o Ramo RL 1

A figura 56 corresponde a aplicação de corrente ao ramo RL de forma isolada no ensaio do grupo 1, dessa forma foi obtida a corrente de atenuação quando toda corrente é desviada para esse ramo.

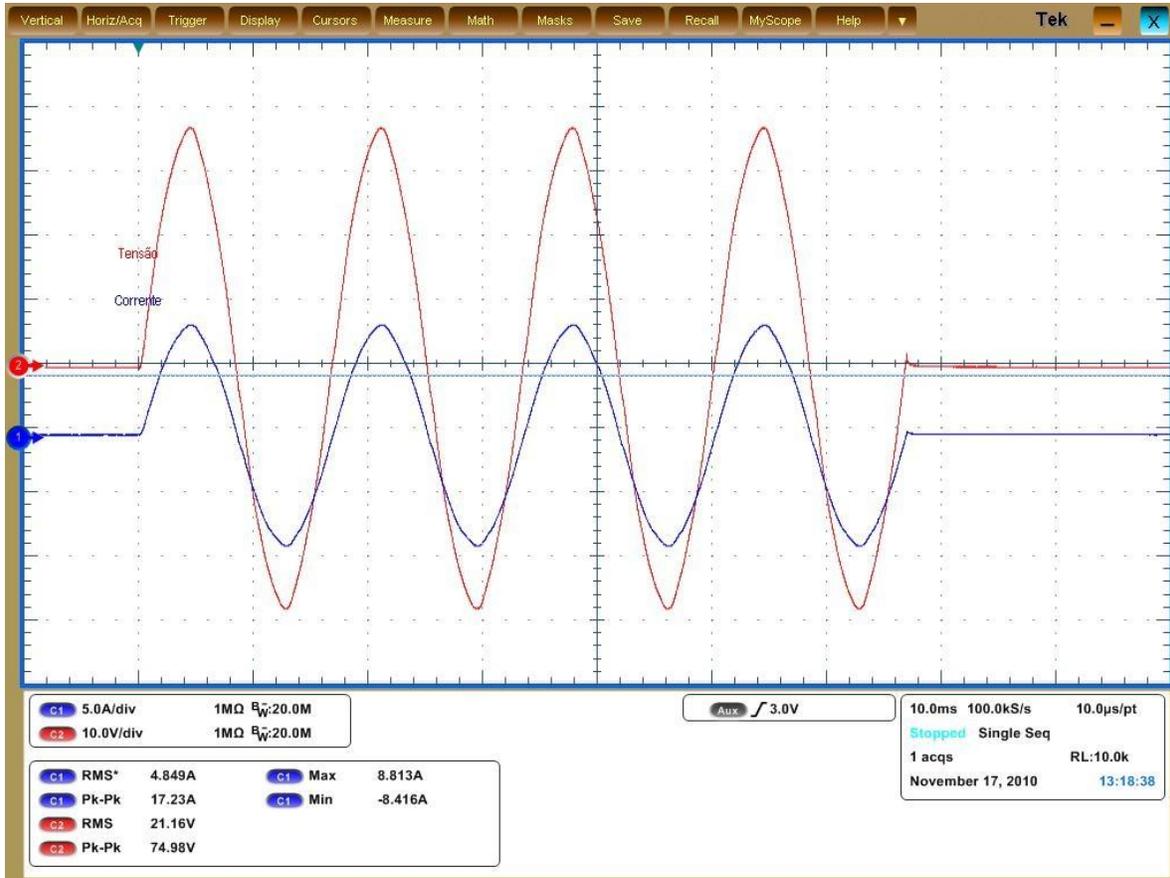


Figura 56 – Curvas de corrente e tensão para o ensaio de curto-circuito com o ramo RL 1.

Conforme mostra a figura 56 foi medida uma corrente de  $8,813 \pm 0,001$  A no ramo RL, que corresponde ao valor da corrente limitada no caso do ensaio anterior e ao possível caso de abertura dos contatos elétricos da UBS (figura 55).

#### 6.6.1.4 – Ensaio de Curto-Circuito com o Limitador 1

A seguir são mostrados resultados de 3 ensaios (1A,1B e 1C) com o dispositivo limitador realizados sob as condições de curto-circuito para os ensaios do grupo 1. O intervalo entre cada um foi de 5 minutos.

#### Ensaio 1A

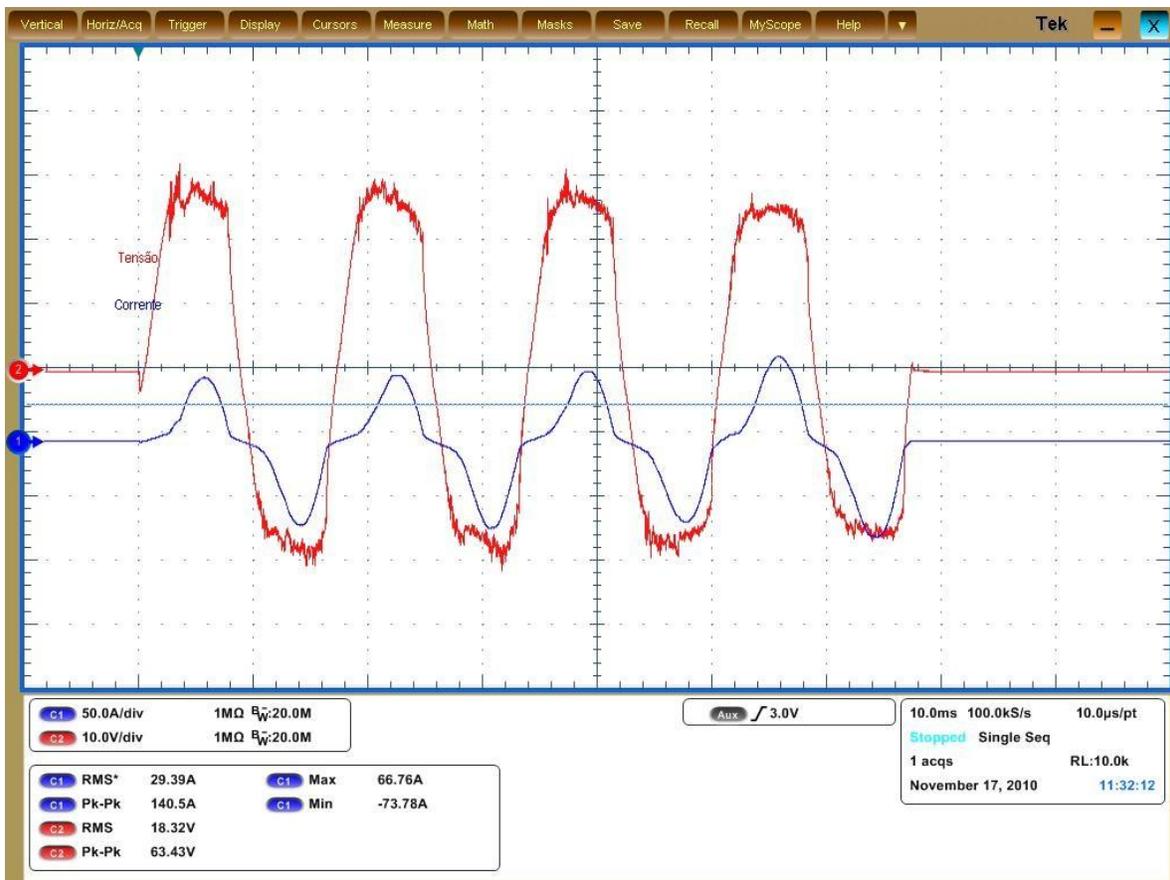


Figura 57 - Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 1 (Ensaio 1A).

A figura 57 mostra as curvas de tensão e corrente no limitador quando do ensaio 1A. A corrente é atenuada pelo elemento limitador de forma imediata, atinge um pico de  $73,68 \pm 0,01$  A. O sinal de corrente sofre significativa distorção (sinal não senoidal).

## Ensaio 1B

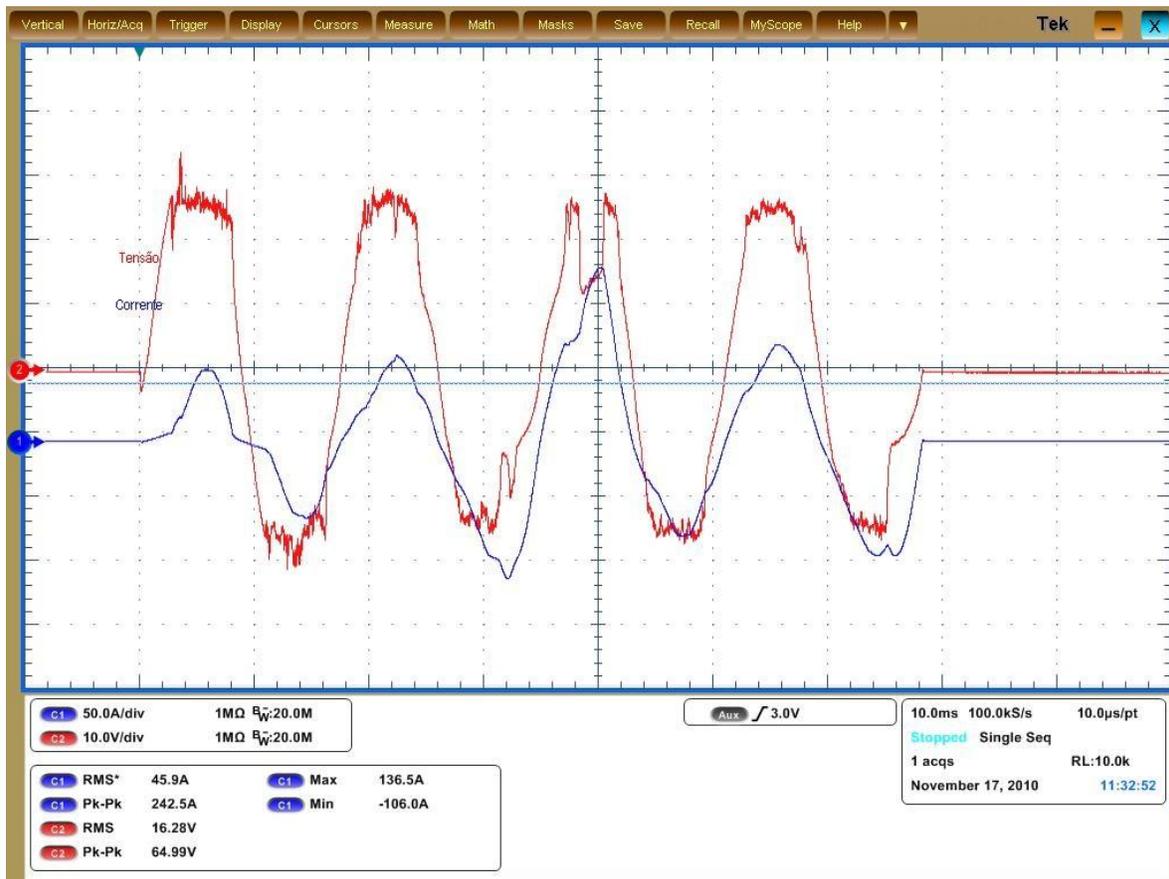


Figura 58 - Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 1 (Ensaio 1B).

A figura 58 mostra as curvas de tensão e corrente para o ensaio 1B. A corrente é atenuada pelo elemento limitador de forma imediata, atinge um pico maior de  $136,76 \pm 0,01$  A. É importante observar que esse valor maior corresponde ao pico do terceiro ciclo. O sinal de corrente sofre significativa distorção (sinal não senoidal) embora mantenha a periodicidade. O sinal de tensão também sofre significativa distorção, como no ensaio anterior. O sinal de tensão parece sofrer distorção, somente nos picos ( $dV/dt$  baixo), mas mantém a periodicidade.

## Ensaio 1C

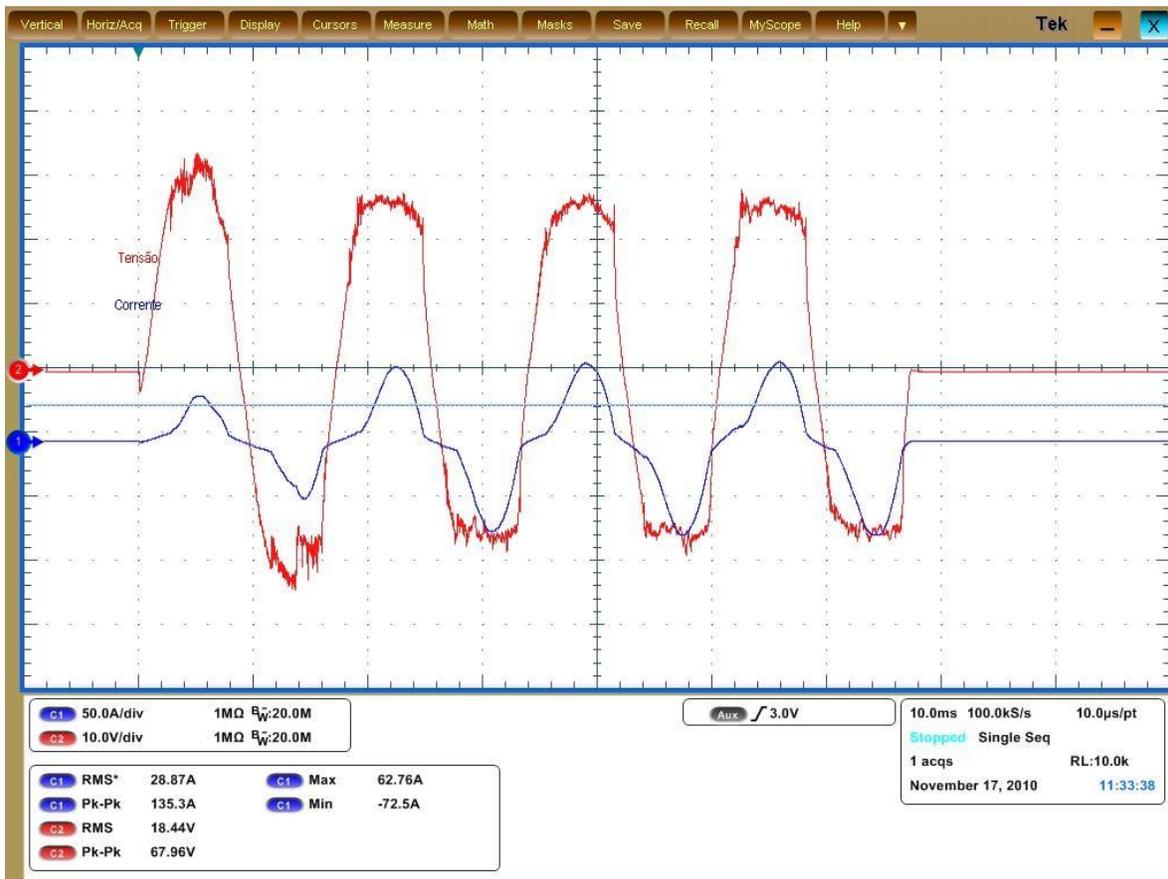


Figura 59 - Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 1 (Ensaio 1C).

A figura 59 mostra as curvas de tensão e corrente no limitador para o ensaio 1C, novamente com uma corrente de 300 A. A corrente é atenuada pelo elemento limitador e dessa vez a curva de corrente se apresenta mais uniforme, um pico de  $72,5 \pm 0,1$  A, bem próximo do registrado no ensaio 1A. Os sinais de corrente e tensão sofrem distorções semelhante às vistas nos ensaios 1A e 1B. Cabe lembrar que o ensaio 1C foi realizado com um intervalo levemente superior a 5 minutos, para tentar eliminar efeitos devido ao aquecimento da amostra e verificar uma reprodutibilidade dos resultados.

## 6.6.2 – Ensaios de Curto-Circuito - Grupo - 2

### 6.6.2.1 – Ensaio de Curto-Circuito Franco 2

A figura 60 mostra o resultado de um ensaio de curto franco 2 realizado com a fonte de alta corrente ajustada para uma corrente de 535 A.

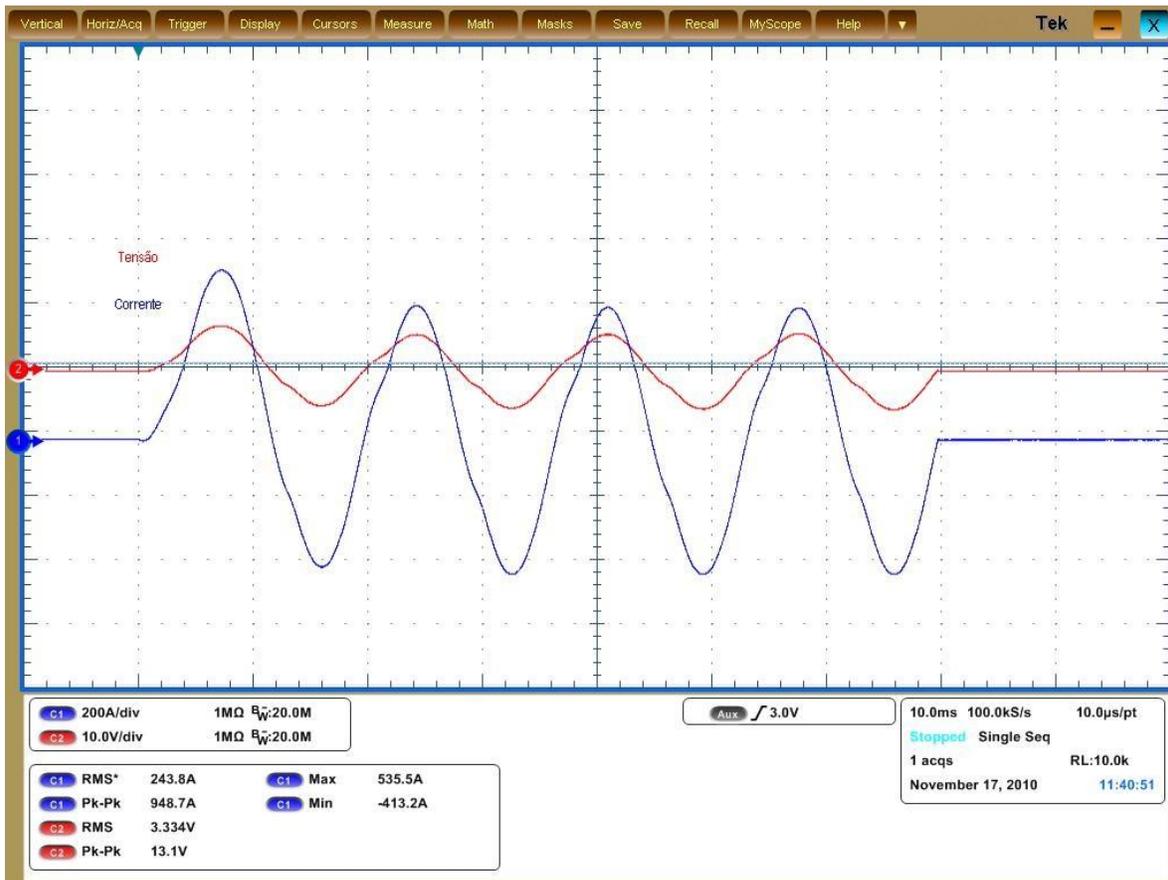


Figura 60 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito franco 2.

Observa-se pela figura 60 uma corrente máxima de curto-circuito franco ou direto no valor de  $535,5 \pm 0,1$  A, que apresentou componente contínua no primeiros ciclos (assimetria na curva de corrente).

### 6.6.2.2 – Ensaio de Curto-Circuito com Disjuntor 2

A figura 61 mostra as curvas de corrente e tensão para o segundo ensaio de curto-circuito com disjuntor. Foi utilizado novamente um disjuntor de 10 A.

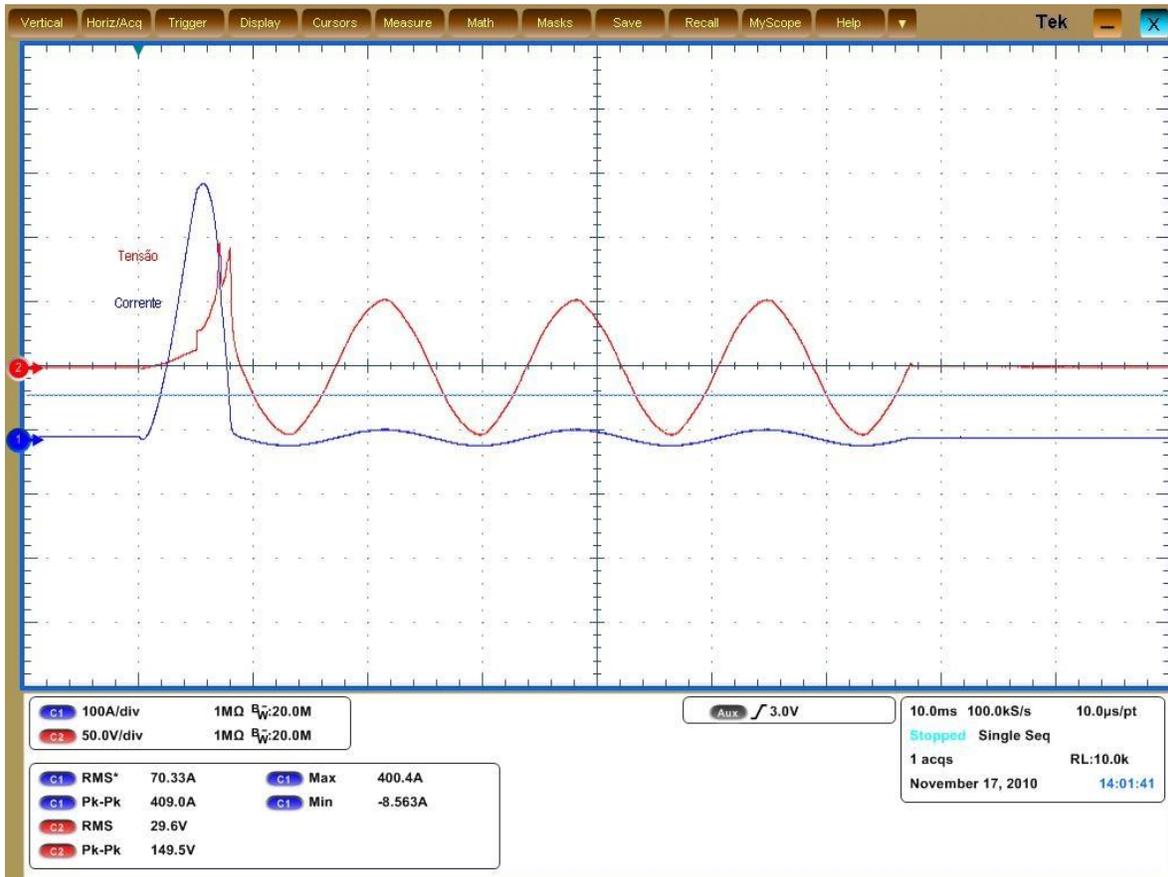


Figura 61 – Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o disjuntor 2.

Observa-se na figura 61 um pico de corrente de  $400,4 \pm 0,1$  A, quando ocorre a abertura do disjuntor. A corrente atenuada é da ordem de 12 A. A abertura do disjuntor foi em um tempo menor que 8 ms. Durante a abertura do disjuntor percebe-se a ocorrência de uma sobretensão nos terminais do circuito, como era esperado.

### 6.6.2.3 – Ensaio de Curto-Circuito com o Ramo RL 2

A figura 62 corresponde a segunda aplicação de corrente ao ramo RL de forma isolada no ensaio do grupo 2.

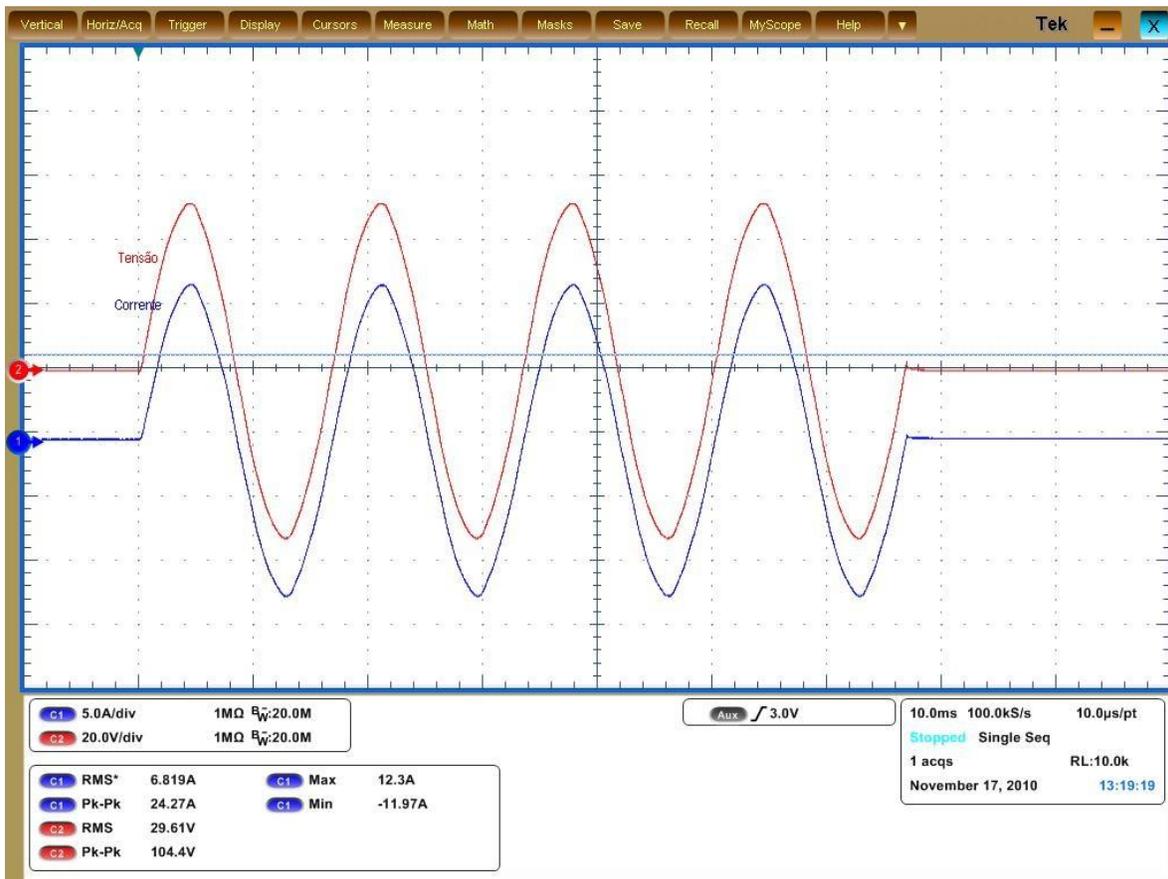


Figura 62 – Curvas de corrente e tensão para o ensaio de curto-circuito com o ramo RL 2.

Novamente foi obtida a corrente de atenuação quando toda corrente é desviada para o ramo RL, só que agora com um valor maior devido ao ajuste para os ensaios do grupo 2. Conforme mostra a figura foi medida uma corrente de  $12,3 \pm 0,1$  A no ramo RL, que deve corresponder ao valor da corrente limitada no caso do ensaio de curto-circuito com o disjuntor 2 (figura 61).

### 6.6.2.4 – Ensaio de Curto-Circuito com o Limitador 2

A seguir são mostrados resultados de 2 ensaios (2A e 2B) com o dispositivo limitador realizados sob as condições de curto-circuito para os ensaios do grupo 2.

#### Ensaio 2A

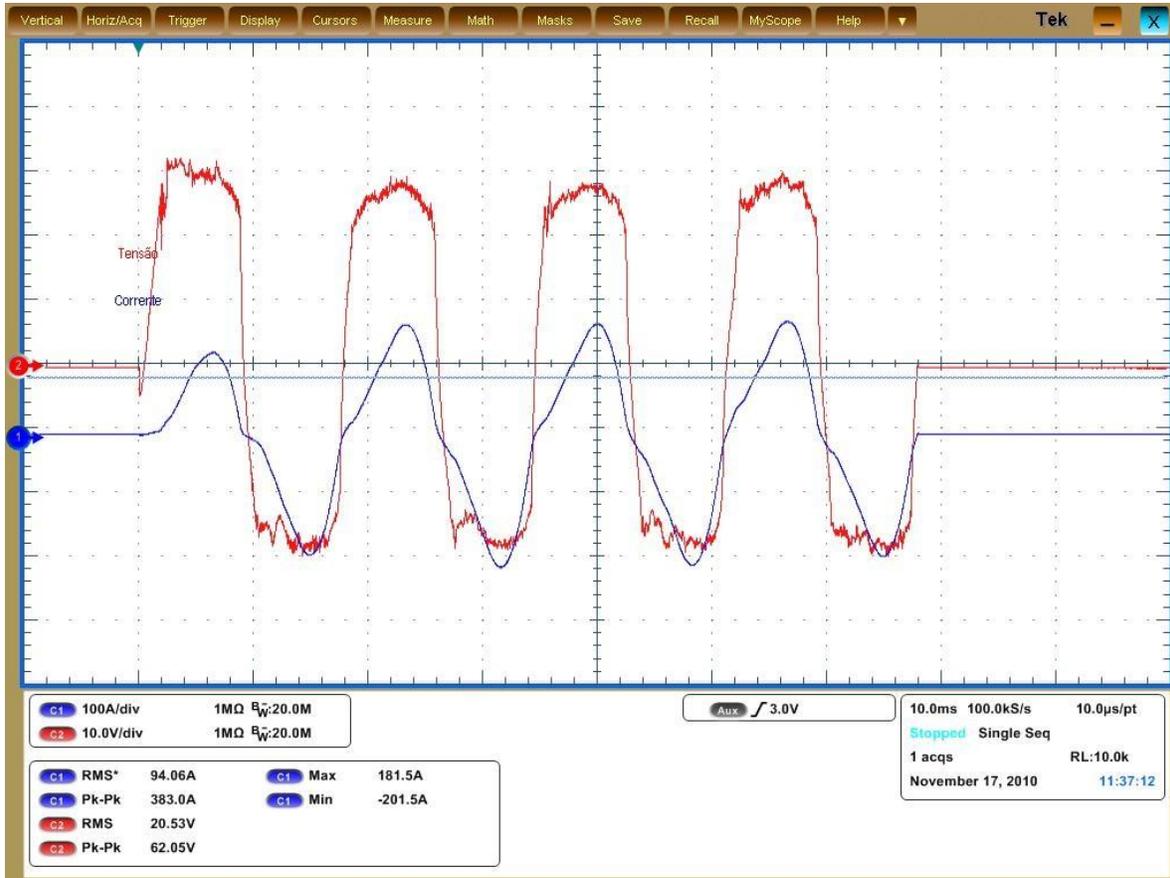


Figura 63 - Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 2 (Ensaio 2A).

A figura 63 mostra as curvas de tensão e corrente na UBS para o ensaio 2A. A corrente é atenuada e apresentou um pico de  $201,5 \pm 0,1$  A. O sinal de corrente se apresenta em forma aproximadamente triangular e mantém a periodicidade. O sinal de tensão mais uma vez sofre significativa distorção, principalmente nas regiões de maior valor de tensão.

## Ensaio 2B

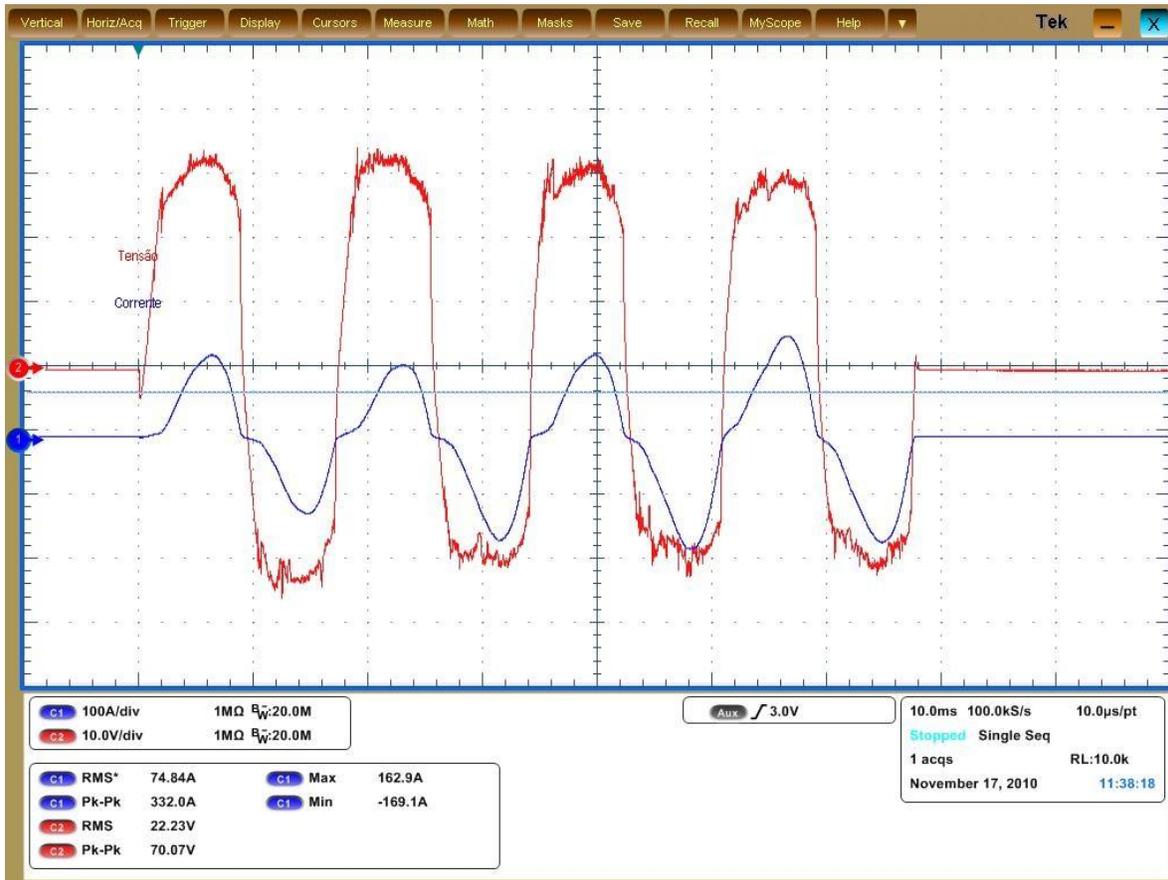


Figura 64 - Curvas de tensão e corrente para o ensaio de curto-circuito com o limitador 2 (Ensaio 2B).

A figura 64 mostra as curvas de tensão e corrente na UBS para o ensaio b, novamente com uma corrente sem limitação de 535 A. A corrente é atenuada pelo elemento limitador ao valor de aproximadamente 170 A, o que corresponde a uma redução percentual de 70% no valor do pico de corrente. Dessa vez a curva de corrente se apresenta mais uniforme, com formato que lembra um pulso triangular com um pico de  $169,1 \pm 0,1$  A, bem próximo do registrado no ensaio 2A. Observa-se novamente uma distorção nos picos do sinal de tensão e um leve crescimento na corrente de pico no último ciclo do curto-circuito aplicado.

## 6.7 – Problemas de Contato Elétrico

Durante os primeiros testes e ensaios, e também durante a pesquisa bibliográfica, foi possível perceber que os problemas de contato elétrico surgiram e seriam determinantes para a qualidade de algumas medidas. Nesse sentido foram propostas medidas como utilização de tinta prata, folha prata e reajuste dos contatos após imersão da UBS em nitrogênio líquido. A primeira proposta de arranjo para a UBS, como já foi mencionado, utilizava um anel coletor de corrente e um pino de injeção. O pino era acoplado na amostra supercondutora através de furo no eixo de simetria, o anel coletor abraçava a amostra cilíndrica por toda sua borda e era ajustada com solda e parafusos. Esse arranjo apresentou problemas de contato, sobretudo na medida de resistência elétrica da UBS.

Uma outra proposta, seguindo a mesma filosofia básica do primeiro arranjo, foi feita. Trocou-se o anel de cobre por um de alumínio (mais maleável e ajustável ao corpo da amostra) e uma braçadeira de aço foi utilizada para ajustar o contato. Os dois arranjos utilizados são mostrados na figura 65. É importante lembrar que não foram utilizados contatos de ouro em função da indisponibilidade destes (custo alto).



(a)



(b)

Figura 65 – (a) Primeiro arranjo da UBS. (b) Segundo arranjo da UBS.

## 6.8 – Formação de *Hot Spot*

A fim de monitorar problemas de contato elétrico e formação de “*hot-spot*” na UBS foram feitos vídeos e fotos sequenciais. Estes correspondem a um monitoramento visual da UBS em banho de nitrogênio líquido no momento de aplicação do curto circuito. Não foi possível obter informações quantitativas a respeito do contato elétrico e de formação de hot-spot, mas foi possível reajustar as conexões e os contatos na busca de uma minimização dos efeitos dissipativos no momento do ensaio.

A figura 66 corresponde a uma sequência de imagens obtidas durante e após aplicação de curto-circuito (0,120 s) em uma amostra utilizada. É possível perceber uma maior ebulição do N2L em uma região lateral do anel de cobre (setas) que envolve a o supercondutor. Logo em seguida ao curto é possível ver que a ebulição volta ao normal.

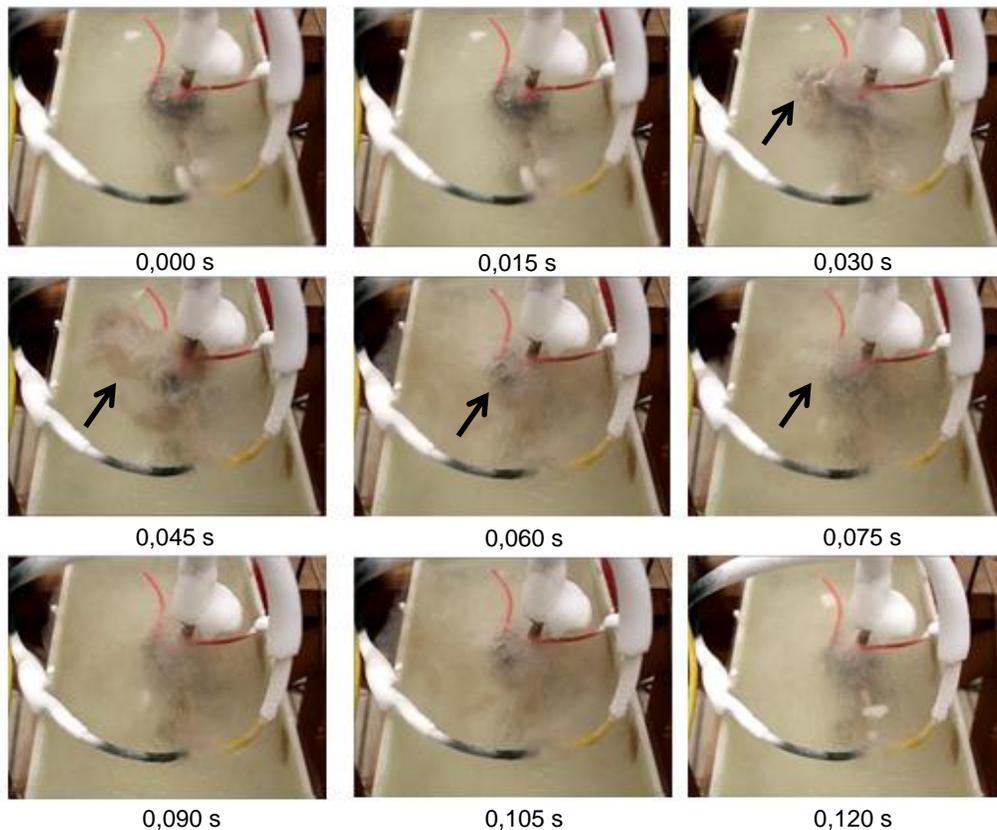


Figura 66 – Fotografias em sequência da UBS no momento de ocorrência de curto-circuito.

O fenômeno observado pode ser atribuído a três fatores: simples dissipação térmica da amostra no momento da aplicação do curto (fluxo de calor para o N2L), dissipação nos contatos elétricos (interfaces entre os materiais empregados na UBS) e provável formação de *hot-spot*. Não podemos afirmar com clareza quais deles é o fator mais determinante para o fenômeno observado, mas pode-se dizer que o fenômeno observado e registrado ajuda a confirmar a atuação (resposta) do material supercondutor no momento do curto, como era esperado.

### 6.9 – Perfil dos Sinais de Corrente e Tensão

Como foi visto o protótipo de limitador foi efetivo na redução da corrente de curto-circuito (atenuação imediata), mas uma distorção no sinal de corrente e no sinal de tensão foi detectada, o que a princípio pode ser atribuído ao comportamento elétrico diferenciado do ramo supercondutor em interação com o ramo RL (shunt). Por outro lado a pesquisa bibliográfica feita no desenvolvimento deste trabalho revelou, através de [34] perfis semelhantes de corrente para os ensaios de curto-circuito com limitador utilizando YBCO. Tais resultados são mostrados na figura 67 e podem ser comparados com os resultados obtidos nesta dissertação.

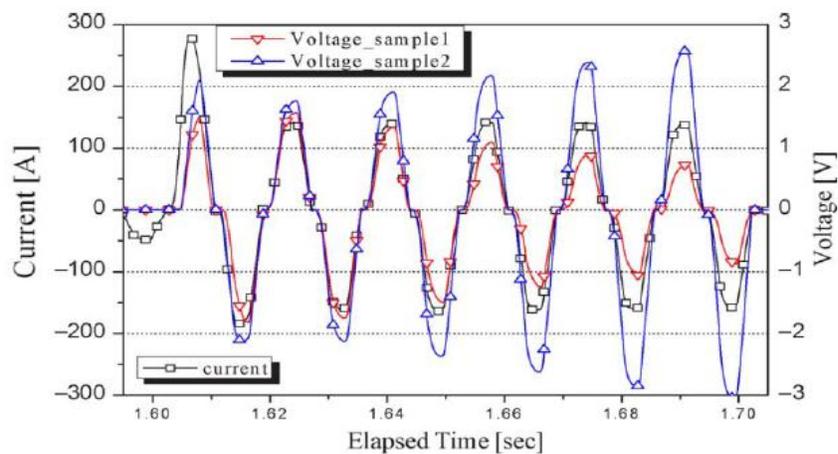


Figura 67 – Curvas de tensão e corrente para ensaios de curto-circuito com limitador utilizando YBCO [34].

## Capítulo 7 – Conclusões e Trabalhos Futuros

Todas as conclusões, comentários, observações e sugestões de atividades futuras a respeito do presente trabalho são apresentadas neste capítulo, e têm como base a análise dos resultados obtidos nos ensaios e medidas com o limitador de corrente supercondutor discutido. Neste trabalho, assim como os estudos e levantamentos sobre limitadores de corrente (convencionais e supercondutores), teoria da supercondutividade, aplicações da supercondutividade, análise de curto-circuito, etc.

### 7.1 – O Desempenho do Limitador de Corrente Analisado

Os resultados dos ensaios com o limitador trifásico, feitos no LMDS, revelaram a propriedade de limitação de corrente de curto-circuito do mesmo e pouca perturbação da rede em regime normal de operação. Um detalhe importante é que a redução de 250 A para 120 A (48% de redução) foi detectada com auxílio de alicates amperímetros com função *peak hold*, o que levou a uma incerteza na medição de  $\pm 20$  A.

De um modo geral o comportamento de limitação de corrente também foi verificado nos ensaios de curto-circuito realizados no CEPEL (limitador monofásico), uma vez que os valores de corrente de pico para aplicação de curto-circuito com o limitador foi inferior aos valores obtidos para os casos de curto com disjuntor e curto direto. Em um dos melhores casos a corrente de curto-circuito presumida teve seu pico reduzido de 535 A para 170 A (figura 64), caracterizando uma redução de 70%. Apesar da redução de corrente uma distorção no sinal de corrente e no sinal de tensão foi detectada, o que evidencia o comportamento elétrico diferenciado de um dispositivo supercondutor. Neste caso acredita-se que a movimentação da rede de vórtices possa ter relação com a alteração no sinal de tensão. A princípio a distorção sofrida por ambos os sinais poderá

ser estudada com detalhe no futuro, através de uma análise de Fourier dos mesmos pode ser possível analisar tanto a distorção quanto a geração de harmônicos.

Através dos ensaios de curto-circuito também foi possível verificar também que a amostra supercondutora apresentou comportamento de transição entre o estado supercondutor e o chamado estado dissipativo para diferentes valores de corrente de pico. Se considerado o caso de ensaios em sequência com intervalo de tempo curto, possivelmente inferior ao tempo de recuperação da amostra supercondutora, a limitação ocorre com valores de pico diferentes (figura 59).

Para valores baixos de corrente, caso do ensaio de rampa de corrente em CC, foi verificada uma resistência significativa da UBS e um comportamento resistivo anômalo. Apesar de ajustes nos contatos elétricos não foi possível eliminar essa resistência, que a princípio pode estar ligada aos problemas de contato elétrico e até mesmo a condição das amostras (as amostras são antigas e já passaram por vários ensaios com corrente).

Através da filmagem feita por ocasião do que se denominou levantamento de *hot spots* foi realmente detectada uma região de maior aquecimento da UBS na região do anel coletor de corrente. É possível a formação de *hot spot* na região do anel coletor que abraça a amostra supercondutora. Contudo não é possível afirmar com precisão, já que o efeito de aquecimento excessivo pode ser também de uma parte do cobre ou do contato elétrico entre cobre e amostra supercondutora.

## **7.2 – Perspectivas para Emprego em Níveis Maiores de Potências**

O limitador analisado foi concebido em um arranjo baseado em UBS que permite a formação de módulos para conexão série e paralela. A conexão paralela permite o aumento do nível de corrente a ser limitada, já a conexão série permite o emprego em um nível de tensão maior. Salvo o caso de alta resistência em regime de baixa corrente

normal os resultados da limitação são animadores no aspecto do comportamento limitador. Porém, o emprego real em níveis maiores de potência, levantamento das curvas de corrente do SFCL Trifásico depende de ajustes no protótipo de bancada aqui apresentado e de solução de problema de limitação instrumental, que não permitiu o levantamento de curvas de corrente de curto-circuito com o módulo trifásico em tempo suficiente para apresentação nesta dissertação. Além disso, seria necessário também ensaios de sobretensão em conjunto com os ensaios de curto-circuito.

### **7.3 – Melhorias das Medidas**

Devido aos problemas com a amostra (condições da amostra e contato elétrico) e a falta de disponibilidade de laboratório para mais ensaios com corrente controlada o número de medidas realizadas foi inferior ao desejado. E mesmo as medidas realizadas com maior precisão foram feitas com a colaboração do CEPEL, na pessoa do senhor Márcio Sens, e com alguns ajustes de última hora. Nesse sentido na continuidade de análise do protótipo é essencial a melhoria das medidas, o que pode ser conseguido com um número maior de amostras novas e com a disponibilidade maior de estrutura adequada para a realização de um número bem maior de medidas.

### **7.4 – Trabalhos Futuros: Cabo Supercondutor com Função Limitadora**

Como trabalho futuro pretende-se dar continuidade aos estudos com o protótipo e ainda fazer a análise de um possível protótipo de cabo supercondutor com função limitadora. Este último protótipo está previsto para ser desenvolvido dentro de um projeto estratégico nacional coordenado pelo LMDS-UFRRJ e financiado por diversas concessionárias.

Muito ainda resta verificar a respeito do comportamento do dispositivo descrito neste trabalho, mas enfatizamos o comportamento de efetiva limitação da corrente evidenciado pelas medidas expostas. Evidentemente, a simplificação e a metodologia propostas mediante as condições disponíveis e outros fatores precisam de um aprofundamento futuro para gerar conclusões que permitam dizer a viabilidade ou não do protótipo para eventual aperfeiçoamento para rede.

## **Anexo I – Aplicações da Supercondutividade em Sistemas Elétricos de Potência**

Na sequência é feita uma breve discussão a respeito de cada uma das principais tecnologias supercondutoras aplicáveis aos sistemas elétricos de potência não abordados no capítulo I. É importante ressaltar que não se pretendeu esgotar os temas, mas sim apresentá-los em linhas gerais, dentro dos objetivos deste trabalho. Maiores informações podem ser obtidas em literatura específica, partindo-se das referências bibliográficas apresentadas no final deste trabalho.

### **Cabos Supercondutores**

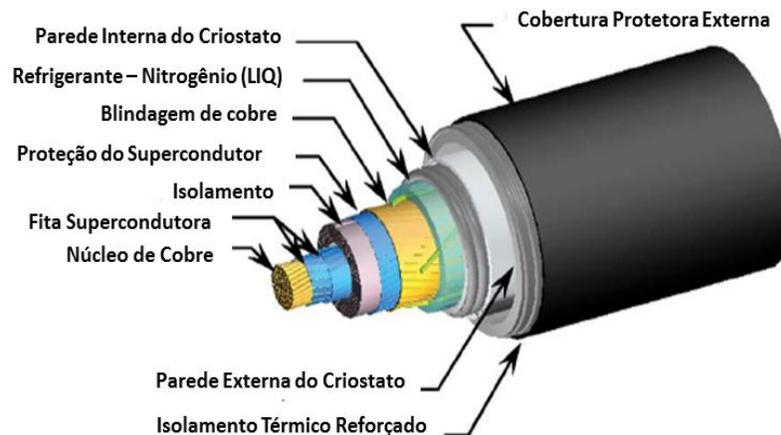
Um cabo de energia necessita cumprir duas funções básicas, garantir um meio condutor para a corrente e isolar este meio de outros condutores. Segundo [35] existem quatro elementos básicos na concepção e construção de cabos de energia:

- ✓ **Elemento Condutor:** é responsável pela condução da energia elétrica, podendo ser único ou multifilamentar.
- ✓ **Elemento Isolante (dielétrico):** tem como objetivo evitar o contato elétrico do elemento condutor com outro corpo, podendo ser simples (apenas isolação) ou composto (blindagem do condutor+isolação+blindagem da isolação)
- ✓ **Blindagem Metálica:** construída basicamente para evitar interferências de natureza eletromagnética, tendo outras funções em modelos mais elaborados.
- ✓ **Proteção Externa:** construída para proteger o cabo mecanicamente.

Convencionalmente, em razão das características elétricas, mecânicas, de abundância de matéria prima e custo, cobre (Cu) e alumínio (Al) são os materiais largamente empregados na fabricação de cabos. Um dos pontos decisivos na escolha dos materiais é

a capacidade de condução de corrente, chamada no jargão técnico de “ampacidade”. Porém, em virtude da resistividade inerente aos materiais utilizados existe uma perda de energia, na forma térmica, pelo chamado Efeito Joule. Esta perda é diretamente ligada a corrente que o condutor transporta (mais precisamente ao quadrado desta). Por isso existem limites térmicos para os condutores convencionais.

A ideia geral do cabo supercondutor (figura 68) é explorar diretamente a propriedade de resistividade nula dos materiais supercondutores, substituindo os materiais convencionais (metais como Al, Cu e ligas). Dessa forma seria possível reduzir as perdas por Efeito Joule nos processos de transmissão e/ou distribuição de energia elétrica. Além disso, um protótipo de cabo supercondutor poderá resolver outro problema: o limite de condução de corrente dos cabos convencionais (limite térmico).



**Figura 68 - Esquema de um cabo supercondutor e suas partes integrantes [4].**

Foi visto na seção 2.2 que os materiais supercondutores possuem uma propriedade que é a chamada densidade de corrente crítica ( $J_c$ ), que corresponde à densidade de corrente acima da qual o material transita entre a fase supercondutora e a fase dissipativa (estado normal no supercondutor tipo I). Nos materiais supercondutores disponíveis atualmente a densidade de corrente é alta, o que permite a construção de cabos que

podem conduzir um enorme valor de corrente com um volume de condutor relativamente menor. Com isso os novos cabos poderão ocupar basicamente o mesmo espaço que os anteriores e carregar uma corrente muito maior.

Como já foi dito a manutenção do estado supercondutor tem forte dependência da temperatura, sendo necessário um aparato de refrigeração (linha criogênica) para operação em temperatura adequada. Tal aparato deve ser levado em consideração no projeto de construção e na operação de um sistema com cabos dessa natureza. Nos primórdios do estudo com estes tipos de cabo, incluindo testes com protótipos em linhas curtas, o custo com refrigeração revelou-se bastante alto uma vez que os cabos eram feitos a base de supercondutores com temperaturas críticas muito baixas. Mesmo a partir de 1986, quando os supercondutores de alta temperatura crítica foram descobertos, os custos com a refrigeração não puderam ser desprezados, apenas atenuados.

Para esse tipo de aplicação há também a questão dos custos com o material supercondutor de alta temperatura crítica e as dificuldades técnicas de colocá-lo sob a forma de cabos, o que significa barreiras para uma implementação de redes elétricas com cabos supercondutores. Por outro lado, o fato de se trabalhar com material de  $T_c$  mais alta implica necessidades de refrigeração menores, somado a questão de inviabilidade de troca de cabos convencionais antigos por cabos convencionais de bitola maior e os recentes avanços na área (produção de fitas 2G, etc.) podem levar a uma situação em que a produção e o uso de cabos supercondutores em larga escala se torne realidade em um futuro próximo.

### **SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage**

Trata-se de um dispositivo concebido para explorar a possibilidade de armazenamento de energia, sob a forma magnética, através de uma propriedade dos materiais

supercondutores: carregamento de altas correntes com perdas muito baixas e geração de campos magnéticos intensos. Embora a ideia seja a mesma, existem variações de arranjos que acabam por gerar diferentes arquiteturas para este tipo de dispositivo. Contudo, existe uma estrutura comum (topologia), que independe da aplicação para a qual o SMES esteja voltado, que consiste basicamente de cinco partes:

- ❑ **Bobina Supercondutora:** Tem a função de armazenar a energia sob a forma magnética (estrutura principal). A equação (A1) mostra que a densidade de energia magnética depende do quadrado do módulo da densidade de fluxo magnético ( $B$ ), e esta depende fundamentalmente da corrente que circula pela bobina. O uso de uma bobina supercondutora implica em vantagens: alto valor da densidade de fluxo magnético, reduzido volume (densidade de energia alta) e perdas praticamente nulas. Já a equação (A2) tem a energia magnética expressa em termos de parâmetros mais úteis para o caso da engenharia, uma vez que fica explícita a dependência da energia magnética com a corrente ( $I$ ) e com a indutância da bobina ( $L$ ).

$$U_B = \oint_{\text{volume}} \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot dv \quad (\text{A1})$$

$\frac{B^2}{2\mu_0}$  é a densidade magnética de energia

$dv$  é um elemento de volume infinitesimal

$U_B$  é a energia magnética

$$U_B = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{A2})$$

$L$  é a indutância da bobina

$I$  é a corrente elétrica

$U_B$  é a energia magnética

- ❑ **Sistema de Refrigeração:** Tem a função de manter o sistema supercondutor na temperatura adequada ( $T < T_c$ ).
- ❑ **Sistema de Conversão de Potência:** Tem a função de fazer a conversão de energia para alimentação do SMES (armazenamento) e de uma carga (liberação da energia armazenada), geralmente são dispositivos que empregam eletrônica de potência. É importante ressaltar que os sistemas SMES são sempre conectados a um sistema em corrente alternada, mas a bobina supercondutora funciona em corrente contínua.
- ❑ **Sistema de Controle:** Responsável pelo controle dos processos (armazenamento, conversão, proteção, alimentação da carga).

Segundo OLIVEIRA [36] uma das principais aplicações do SMES está no próprio armazenamento de energia com posterior liberação na forma de pulsos de alta potência em intervalos de tempo muito curtos, o que tem aplicações no setor elétrico: auxílio a sistemas geradores em situação de alta demanda (pico de demanda), estabilidade e amortecimento em linhas de transmissão (atuação na entrada de carga elevada ou perda de gerador). Ainda segundo OLIVEIRA [36], ao oferecerem compensações de potência ajustáveis e rápidas os dispositivos SMES podem ser aplicados em sistemas de energia para fornecer estabilidade na rede elétrica e qualidade energética.

Toda a situação onde se deseja armazenar energia elétrica sob a forma magnética para uso posterior é uma situação de possível emprego de um dispositivo SMES. Um situação de interesse é o caso de viagens espaciais. A figura 69 mostra um dispositivo SMES desenvolvido pela agência espacial norte americana.



**Figura 69 – Protótipo de SMES desenvolvido pela NASA [35].**

Dentre as aplicações abordadas aqui o SMES é um dos que menos conseguiu avanços significativos, ficando restrito ao campo dos protótipos.

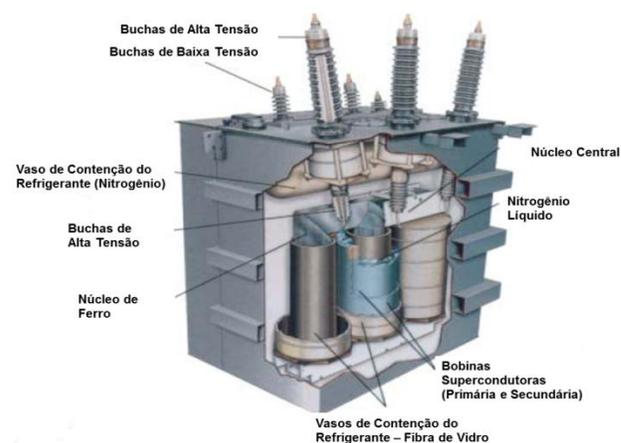
### **Transformadores Supercondutores**

Esta é uma das mais atraentes aplicações da supercondutividade para sistemas elétricos de potência, devido ao número de possíveis benefícios que um protótipo desta natureza pode trazer. Entre eles podemos citar a melhoria da eficiência, a capacidade de operação em sobrecarga de forma rápida (salvaguardando o isolamento), volume e pesos reduzidos (comparação com os transformadores convencionais), menor reatância e menor risco ambiental (não exige óleo refrigerante). Porém, assim como os cabos supercondutores, os transformadores supercondutores necessitam apresentar desempenho e custos competitivos com os bem estabelecidos transformadores convencionais para entrar de forma definitiva nas redes elétricas.

Basicamente a estrutura de um transformador supercondutor (figura 70) possui componentes comuns aos transformadores convencionais: núcleo de ferro, tanque, buchas de alta tensão, etc. A diferença está nos seguintes componentes:

- ❑ **Bobina Supercondutora:** Substitui as bobinas metálicas convencionais (geralmente de cobre). São feitas de fios ou fitas supercondutoras.
- ❑ **Sistema de Refrigeração:** Mantém as bobinas em temperaturas adequadas para a manutenção do estado supercondutor.
- ❑ **Isolamento Térmico:** Atua de forma conjunta com o sistema de refrigeração.

Da teoria básica de transformadores é sabido que as perdas em um transformador convencional se devem as “perdas no ferro” (histerese) e perdas no condutor (Efeito Joule). No caso de um transformador supercondutor as perdas no condutor são quase que totalmente eliminadas (a rigor existem as chamadas perdas AC), já as perdas no ferro persistem. Desta forma o sistema criogênico deve operar mantendo as bobinas supercondutoras na temperatura adequada e extraindo a quantidade de calor gerado.



**Figura 70 – Esquema de um protótipo de transformador supercondutor [4].**

Há outras consequências do emprego de supercondutores na concepção de transformadores, como é o caso da reatância de dispersão gerada pelos intensos campos magnéticos produzidos [376]. Isso implica na necessidade de várias compensações de projeto para se chegar a uma geometria e arranjo otimizados. Um dos pontos cruciais é a operação durante sobrecarga, nesse sentido há uma busca por um arranjo que possa operar em sobrecarga sem que ocorra dano aos enrolamentos supercondutores. De certa forma a própria refrigeração dedicada aos enrolamentos pode salvaguardar o isolamento (o que não ocorre nos transformadores convencionais).

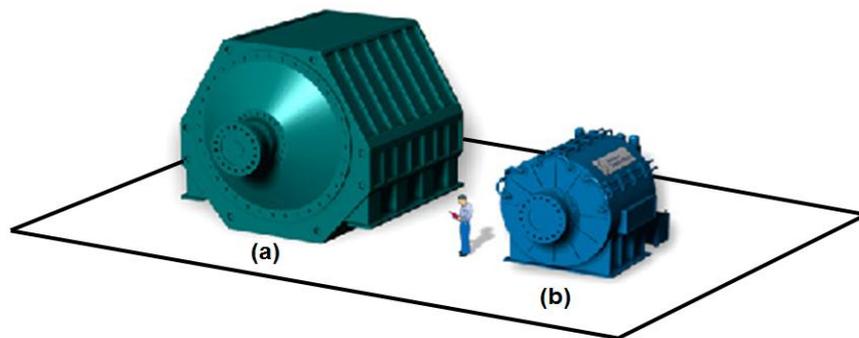
Isolamento elétrico em transformadores, de uma maneira geral, sempre foi uma questão complexa. Acontece que no caso dos transformadores supercondutores, que operam necessariamente em temperaturas muito baixas, esta questão se torna mais delicada. Para essas baixas temperaturas o número de materiais isolantes disponíveis e adequados é restrita: fibra de vidro, polímeros, etc. De qualquer forma um projeto de transformador supercondutor deve levar em conta o stress térmico sob o qual os materiais ficarão submetidos em ambiente criogênico e sua resposta dielétrica adequada.

## **Motores Supercondutores**

Um motor elétrico é um dispositivo capaz de converter a energia elétrica recebida em seus terminais para a forma de energia mecânica em um rotor (opera de forma inversa ao gerador eletromecânico). Existem duas grandes classes de motores elétricos, os de corrente contínua (CC) e os de corrente alternada (CA). O princípio de funcionamento está baseado no torque magnético resultante da interação entre os campos do estator e do rotor. Em um motor elétrico convencional os campos envolvidos são produzidos por magnetos permanentes e/ou bobinas alimentadas por correntes elétricas.

Diferentemente do motor elétrico convencional o motor supercondutor emprega bobinas supercondutoras no estator e rotor (armadura), permitindo elevados valores de campo magnético através de elevados valores de corrente. Há uma grande vantagem no aspecto construtivo de um motor supercondutor: devido as altas densidades de corrente suportadas pelo material supercondutor o volume de material empregado pode ser menor.

A figura 71 ilustra um comparativo de tamanho entre dois motores de mesma potência, um convencional e outro supercondutor. Além disso, o efeito de levitação magnética supercondutora pode ser utilizado na concepção de um mancal magnético, o que reduziria drasticamente o atrito e possibilitaria elevadas velocidades para o rotor. Dessa forma o desenvolvimento de motores supercondutores, o que já é uma realidade, tem como possíveis ganhos a redução de peso e tamanho dos motores elétricos, aumento do nível de potência deste tipo de motor [37].



**Figura 71 - Esquema comparativo de tamanho para dois motores de mesma potência: um convencional (a) e outro supercondutor (b). Figura adaptada de [4].**

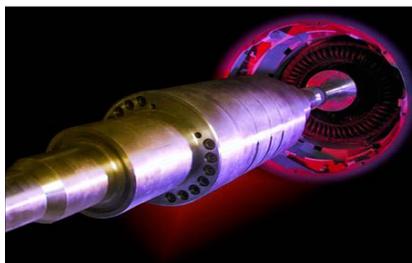
Sendo os motores uma das principais cargas em parques fabris no mundo inteiro, é muito interessante qualquer iniciativa de melhora na eficiência destes. Os motores convencionais tem a potência mecânica limitada pelo valor de campo (entre outros fatores), que por sua vez é limitada pela saturação dos núcleos magnéticos (ferro), pelas

perdas no núcleo (histerese) e no cobre (resistência). No caso de um motor supercondutor há a possibilidade de um campo elevado no entreferro e com perdas reduzidas. Entretanto, essas vantagens são contrabalanceadas pelos custos de refrigeração das bobinas e da complexidade de projeto para o motor supercondutor [37].

As pesquisas continuam para superar as barreiras que ainda impedem o emprego maciço dos motores supercondutores. Uma delas é a melhoria da faixa de potência em que os motores se tornam viáveis.

### **Gerador Supercondutor**

Como dito no primeiro parágrafo deste tópico um gerador eletromecânico opera basicamente de forma inversa a de um motor elétrico. Geradores deste tipo funcionam baseados no princípio de indução eletromagnética (Lei de Faraday-Lens), neste caso a variação de fluxo magnético concatenado é obtida pelo movimento relativo entre uma bobina e um campo magnético criado por outra bobina na qual circula uma corrente elétrica.



**Figura 72 - Rotor de um protótipo de Gerador Supercondutor de 1,5 MVA (GE – Global Research Center) [4].**

Assim como nos motores as bobinas de campo dos geradores podem ser substituídas por bobinas supercondutoras, o que traz vantagens e considerações semelhantes ao caso dos motores supercondutores [37]. A figura 72 mostra um gerador de energia com tecnologia supercondutora.

## Anexo II – Resumo dos Possíveis Impactos de Dispositivos Limitadores de Corrente nos Arranjos de Proteção

**Tabela 6 – Resumo de possíveis impactos de limitadores de corrente nos sistemas de proteção.**  
Adaptado de [26].

<b>TIPOS DE PROTEÇÃO</b>	<b>POSSIVEIS IMPACTOS CAUSADOS AO SISTEMA DE PROTEÇÃO PELA INSTALAÇÃO DE DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE (DLC)</b>
<b>SOBRECORRENTE DE FASE OU NEUTRO(50/51N), DIRECIONAIS DE FASE OU NEUTRO (67/67N)</b>	SUA ATUAÇÃO PODE SER AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEIA-SE NO SENTIDO DE FLUXO DA GRANDEZA FÍSICA “CORRENTE ELÉTRICA”, E TAMBÉM NOS SEUS VALORES RMS. NESTE CASO PODE SE FAZER NECESSÁRIO UM RE-ESTUDO DA COORDENAÇÃO DESTE TIPO DE PROTEÇÃO EM FUNÇÃO DA INSTALAÇÃO DE DLC.
<b>FALHA DO DISJUNTOR (50BF)</b>	SUA ATUAÇÃO NÃO É AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO NÃO SE BASEIA-NO VALOR DA GRANDEZA FÍSICA “CORRENTE ELÉTRICA”; NÃO SE FAZ NECESSÁRIA UMA RE-COORDENAÇÃO DESTE TIPO DE PROTEÇÃO.
<b>DISTÂNCIA (21)</b>	SUA ATUAÇÃO PODER SER AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEIA-SE NO VALOR RMS DA GRANDEZAS FÍSICAS “CORRENTE E TENSÃO ELÉTRICAS”; PODE SER NECESSÁRIA UMA RE-COORDENAÇÃO DESTE TIPO DE PROTEÇÃO, DEPENDENDO DA SUA LOCALIZAÇÃO, PRINCÍPIO DE CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA E ARRANJO DE BARRAMENTOS, FUNCIONAMENTO DEVIDO À INFLUÊNCIA QUE PODE OCORRER NOS VALORES DAS GRANDEZAS FÍSICAS “I” E “V”.
<b>DIFERENCIAL ALTA/BAIXA IMPEDÂNCIA (87)</b>	SUA ATUAÇÃO NÃO É AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEIA-SE NO SOMATÓRIO DOS VALORES RMS DA GRANDEZA FÍSICA “CORRENTE ELÉTRICA”; NÃO SE FAZ NECESSÁRIO UM REESTUDO DE COORDENAÇÃO DESTE TIPO DE PROTEÇÃO.
<b>SUB/SOBRE TENSÃO(27/59)</b>	SUA ATUAÇÃO NÃO É AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO BASEIA-SE APENAS NO VALOR DA GRANDEZA FÍSICA “TENSÃO ELÉTRICA”; NÃO SE FAZ NECESSÁRIA UMA RE-COORDENAÇÃO DESTE TIPO DE PROTEÇÃO.
<b>FREQÜÊNCIA (81) / SOBREFLUXO (24)</b>	SUA ATUAÇÃO NÃO É AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO NÃO SE BASEIA-NO VALOR DA GRANDEZA FÍSICA “CORRENTE ELÉTRICA”; NÃO SE FAZ NECESSÁRIA UMA RE-COORDENAÇÃO DESTE TIPO DE PROTEÇÃO.
<b>FUNÇÕES ESPECÍFICAS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS (GERADORES/MOTORES)</b>	SUA ATUAÇÃO PODE SER AFETADA PELA INSTALAÇÃO DE DLC, JÁ QUE ALGUNS DE SEUS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO BASEIAM-SE NA GRANDEZA FÍSICA “CORRENTE ELÉTRICA”, E TAMBÉM NOS SEUS VALORES RMS. NESTE CASO PODE SE FAZER NECESSÁRIO UM RE-ESTUDO DA COORDENAÇÃO DESTE TIPO DE PROTEÇÃO EM FUNÇÃO DA INSTALAÇÃO DE DLC.

### Anexo III – Alguns Projetos de Limitadores de Corrente Supercondutores ao Redor do Mundo

A seguir são listados alguns projetos de limitadores de corrente supercondutores que estão sendo desenvolvidos no mundo. Tal lista tem como base relatório do EPRI [2] até o ano de 2009.

**Tabela 7 – Detalhes de Alguns Projetos de SFCL no mundo [2].**

Projeto	Inglaterra	Alemanha	Korea	Japão
<b>Tensão</b>	12 kV	12 kV	22,9 kV	12 kV/6,6 kV
<b>Corrente Nominal</b>	100 A (2 MVA)	800 A (16MVA)	630 A (2 MVA)	52,5/175 A (2 MVA)
<b>Máxima Corrente de Falta Esperada (Pico)</b>	55 kA	63 kA	63 kA (RMS - assimétrico)	indisponível
<b>Capacidade de Limitação</b>	55 kA → 7 kA	63 kA → 30 kA	12,5 kA (RMS) → 5,6 kA (RMS)	indisponível
<b>Duração Máxima da Limitação</b>	0,12 s	0,12 s	1,5 s	5 ciclos (50-60 Hz)
<b>Tempo de Recuperação</b>	Minutos	Minutos	Aproximadamente 100 ms	Tempo de recuperação dependente das condições de carga.
<b>Material Supercondutor</b>	BSSCO-2212 (Bulk tubes)	BSSCO-2212 (Bulk tubes)	YBCO	Alta tensão: BSCCO Baixa tensão: YBCO
<b>Fabricante do Material Supercondutor</b>	Nexans	Nexans	indisponível	indisponível
<b>Tamanho</b>	Diâmetro: 1,2 m Altura: 2,5 m	Altura: 2,5 m Largura: 1 m Comprimento: 13 m	Altura: 2,5 m Largura: 1,2 m Comprimento: 2,4 m	Diâmetro: 690 mm Altura: 1000 mm
<b>Peso</b>	2 toneladas	2,5 toneladas	< 1 tonelada	425 kg

## Referências Bibliográficas

- [1] NEVES, M.A, ROSÁRIO, M. A. P., SILVA, E. P., "Projeto, Simulação, Construção e Teste de um Protótipo Trifásico de Limitador de Sobrecorrente com Material Supercondutor de Alta Temperatura". Artigo técnico de conclusão de projeto de P&D ANEEL, Agosto-2006.
- [2] Superconducting Fault Current Limiters: Technology Watch 2009. EPRI, Palo Alto, CA: 2009. 1017793.EPRI 2009
- [3] DAHL, P. F.. Superconductivity: Its Historical Roots and Development from Mercury to the Ceramic Oxides. American Institute of Physics: New York, 1992.
- [4] M. A. Neves. Comunicação Pessoal.
- [5] CERN-LHC The LHC Guide. Disponível em: <<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/Facts-en.html> >. Acesso em: 06 de jun. 2011.
- [6] ROSE-INNES, A. C., RHODERICK, E. H., *Introduction to Superconductivity*, 2 ed., Oxford, Pergamon Press, 1978.
- [7] NEVES, M. A., *Estudo de Fases Supercondutoras de Alta-Tc no Sistema Bi-Sr-Ca-Cu-O*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto de Física. Rio de Janeiro, RJ, 1994.
- [8] KRAUS, J. D., CARVER, K. R., *Eletromagnetismo*. 2 ed. Rio de Janeiro, Guanabara, 1978.
- [9] OSTERMANN, F., PUREUR, P., *Temas Atuais da Física: Supercondutividade*. 1 ed. São Paulo, Editora Livraria da Física, 2005.
- [10] LUIZ, A. M., *Aplicações da Supercondutividade*. Rio de Janeiro, Edigard Blucher Ltda, Rio de Janeiro, 1992.
- [11] OLIVEIRA, I. S., JESUS, V. L. B., *Introdução à Física do Estado Sólido*. 2 ed. São Paulo, Livraria da Física, 2005.

- [12] SHEAHEN, T. P., *Introduction to High-Temperature Superconductivity (Selected topics in superconductivity)*. New York, Plenum Press, 1994.
- [13] DELIN, K. A., ORLANDO, T. P., *Foundations of Applied Superconductivity*. United States, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [14] GÓMEZ, E. M., *Obtenció i optimització de ceràmiques texturades de YBCO per l'aplicació de limitació de corrent*. Tese de Doutorado. Institut de Ciència de Materials de Barcelona. Barcelona, Novembre 2002.
- [15] GALASSO, F. S., *Perovskites and High Tc Superconductors*, New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1990.
- [16] Disks Levitation. Disponível em: <[http://www.can-superconductors.com/products/levitation-disks/site da can superconductors](http://www.can-superconductors.com/products/levitation-disks/site%20da%20can%20superconductors)>. Acesso em: 12 de jul. 2011.
- [17] ROEPER, R., *Correntes de curto-circuito em redes trifásicas – Variação em função do tempo e cálculo de suas grandezas*. 2 ed. São Paulo, Livraria Nobel S.A, 1990.
- [18] CARVALHO, A. C. C. (et al). *Disjuntores e Chaves: Aplicação em Sistemas de Potência*. Niterói, EDUFF – Editora da Universidade Federal Fluminense, 1995.
- [19] DAS, J. C., *Power System Analysis: Short-Circuit Load and Harmonics*. Marcel Dekker. United States of America, 2002.
- [20] JÚNIOR, Luiz C. Z., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- [21] ARAÚJO, C. A. S. et al. *Proteção de Sistemas Elétricos*. Rio de Janeiro, Interciência: Light, 2002.
- [22] HOMRICH, R. P., *Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo Monofásico: projeto, construção e ensaio*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas, SP, Brasil, 2001.

- [23] D'AJUZ, A., MONTEIRO, A. M., KASTRUP, O. *et al.*, *Dispositivos Limitadores de Curto-Circuito (DLCC) – Estado da Arte e Aplicação nas Redes Elétricas*. In: Relatório ONS 006/2002, 2002.
- [24] MONTEIRO, A. M., *Um estudo de dispositivos limitadores de correntes de curto-circuito com ênfase no IPC (INTERPHASE POWER CONTROLLER)*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- [25] GARCIA, A., MONTICELLI, A., *Introdução a Sistemas de Energia Elétrica*. Campinas, SP, Editora da UNICAMP, 2003.
- [26] J. AMON F., P. C. FERNANDEZ, R. C. LIMA., “Possíveis impactos, consequência e soluções para o sistema de proteção (em sistemas elétricos de potência) decorrentes da instalação de dispositivos limitadores de curto-circuito”. *XIII ERIAC – Décimo tercer encuentro regional ibero-americano de Cigré*. Puerto Iguazú, Argentina. 24 a 28 de maio de 2009.
- [27] LANES, M. M., *Limitador Eletrônico de Corrente de Curto-Circuito Baseado em Circuito Ressonante controlado por dispositivos semicondutores de potência*. Dissertação de Mestrado. UFJF-Faculdade de Engenharia. Juiz de Fora-MG, 2006.
- [28] FERRAZ, A. J., COSTA, P. F., PIUZANA, J.B *et al.*, “Modernização do Sistema Elétrico da CENIBRA”. In: *34º Congresso Anual de Celulose e Papel*, Out. 2001
- [29] OLIVEIRA, F. D. C., *Limitador de Corrente de Falta Supercondutor*. Dissertação de Mestrado. UFES, Vitória, ES, 2005.
- [30] BROUCHU, J., *Interphase Power Controllers*, 2 ed , Citeq, Hydro Québec and ABB - Polytechnic International Press, p 320, Montréal, 2001.
- [31] GIESE, R.F., RUNDE, M., SHEAHEN, T. P., “Fault Current Limiters”, in: Sheahen, Thomas P. (editor), *Introduction to High-Temperature Superconductivity*. New York: Plenum Press, 1994.

- [32] STAVREV, S., *Modelling of High Temperature Superconductors for AC Power Applications*. Tese de Doutorado. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- [33] POLASEK, A., DIAS, R., SILVA, F. A. *et al*, “Ensaio com Módulos Supercondutores para Limitação de Corrente de Curto-Circuito”.XIV ERIAC. Ciudad del Este, Paraguay,29 de maio a 2 de junho de 2011.
- [34] LEE, E. R. *et al*., “Parameter Determination of a Condition for Simultaneous Quench in Series-Connected YBCO Coated Conductors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 20, n. 3, June, 2010.
- [35] TEIXEIRA JÚNIOR, M. D. R., *Cabos de Energia*. 2.ed. São Paulo, Artliber Editora, 2004.
- [36] OLIVEIRA, J. F. A. B., *Sistemas de Armazenamento de Energia em Bobinas Supercondutoras*. Tese de Doutorado. Universidade de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, 2010.
- [37] HASSENZAHN, W., WILLIAMS, V., HAZELTON, D. W. *et al*, “Electric Power Applications of Superconductivity”, *Proceeding of IEEE*. v. 92, n. 1, out.1990.
- [38] SIL, A. C. Os supercondutores vem aí. Disponível em: <http://www.energiahoje.com/brasilenergia/noticiario/2010/12/04/422323/ossupercondutores-vem-ai.html> Acesso em 06/06/2011.>. Acesso em: 12 de jan. 2011
- [39] LARBALESTIER, D. *et al*., “High-Tc superconducting materials for electric power applications”, *Nature*, v. 414, Novembro, 2001.
- [40] ZANETTA JÚNIOR, L. C., *Fundamentos de sistemas elétricos de potência*. 1 ed.. São Paulo, Editora Livraria da Física, 2005.
- [41] COSTA, P. F., SANTOS, I. M., TOURINO, G. P., Paralelismo com a concessionária, proteção, aterramento do neutro e limitação dos curtos-circuitos em centrais de cogeração e autoprodução com múltiplos geradores. Disponível em:

<[http://www.stpc.com.br/xstpcE/documentos/acervo/rio2003/37634001\\_SENIOR\(ParalelismoComAConcessionaria\).pdf](http://www.stpc.com.br/xstpcE/documentos/acervo/rio2003/37634001_SENIOR(ParalelismoComAConcessionaria).pdf)>. Acesso em: 12 de abr. 2011.

[42] COLLINGS, E. W.; ZHOU, L.; WEBER, H.W. (editors), “Critical Currents in Superconductors for Practical Applications” – *Proceedings of the international workshop. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, Singapore, 1998.

[43] DURON, J., DUTOIT, B., SJÖSTRÖM, M., “Equivalent Circuit Model for Superconductors”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. v.13, n. 2, Junho, 2003.

[44] FLOEGEL-DELOR, U. et al., “Current Transport and FCL Properties of Polycrystalline Melt Textured YBCO”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 13, n. 2, Junho, 2003.

[45] MARTINI, L. F. et al., “Analysis on the Impact of HTS Cables and Fault-Current Limiters on Power Systems”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 13, n. 2, Junho, 2003.

[46] HENRIQUES, Cláudio C.; SIMÕES, D. (orgs.), *et al. A redação de trabalhos acadêmicos: Teoria e Prática*. 5 ed. Rio de Janeiro. Editora da UERJ, 2010.

[47] FOLHA ON LINE. Ressonância magnética ajuda a detectar câncer de mama. Disponível em: < <http://novotempo.com/noticias/2010/11/22/ressonancia-magnetica-ajuda-a-detectar-cancer-de-mama/>>. Acesso em: 06 de jun. 2011.

[48] ZANETTA JR, L. C., PEREIRA, C. E. M., CAMPOS, V. A. F., *et al.*, Aplicação de Dispositivos para Limitação de Correntes de Curto-Circuito. In: Projeto 0068-012/2007, Artigo Técnico – CTEEP.

[49] SWARN, S.K., “Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment”. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.