

SÉRGIO PIRES DIAS

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO LIMITADOR DE
CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO MODULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Marcos T. D. Orlando
Co-orientador: Prof. Dr. Jussara F. Fardin

VITÓRIA
2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Dias, Sérgio Pires, 1982-
D541d Desenvolvimento de dispositivo limitador de corrente
supercondutor resistivo modular / Sérgio Pires Dias. – 2010.
99 f. : il.

Orientador: Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando.
Co-Orientador: Jussara Farias Fardin.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Supercondutores. I. Orlando, Marcos Tadeu D'Azeredo. II.
Fardin, Jussara Farias. III. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

SÉRGIO PIRES DIAS

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO LIMITADOR DE
CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO MODULAR**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 08 de junho de 2010

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Jussara Farias Fardin - Co-orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Rubens de Andrade Junior
Universidade Federal do Rio de Janeiro

“I have not failed, I’ve just found ten thousand ways that won’t work”

Thomas Alva Edison

A meus pais e irmãos, pelo incentivo, amor e dedicação que tanto me influenciaram para o crescimento pessoal, espiritual e profissional. A minha esposa Maya que acreditou na minha competência, me depositando coragem e perseverança para a conclusão desse trabalho.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, pela disponibilidade em me orientar e pelos esforços empenhados durante os desenvolvimentos do trabalho.

Aos professores Dra. Jussara Farias Fardin e Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti pela compreensão e orientação a esta área específica da engenharia.

Aos colegas José Luiz Passamai Júnior e Valdi Rodrigues Júnior pela ajuda costumeira e pela boa vontade.

À FAPES pelo auxílio e oportunidade oferecidos.

Resumo

O desenvolvimento de um dispositivo limitador de corrente de falta supercondutor do tipo resistivo de design modular é o principal objetivo desta dissertação. As soluções de engenharia para problemas crônicos deste tipo de limitador, dentre os quais podemos incluir o método de injeção de corrente na cerâmica supercondutora, a dissipação joulica no interior do criostato e a limitação na dimensão longitudinal das cerâmicas são abordadas na tentativa de se conseguir um dispositivo eficiente e com grande resistência de limitação. Paralelamente buscou-se criar e deixar disponível, para uso futuro, procedimentos e ferramental de testes padronizados para realização de testes com limitadores de corrente supercondutores de alta temperatura. Também foram demonstradas algumas topologias de limitadores que não são eficazes para passagem de correntes elevadas. Por fim, testes práticos de limitação foram realizados utilizando o limitador tipo pilha em configuração mono-camada. Simulações de limitação de corrente com o limitador tipo pilha operando em configuração multi-camada concluem a apresentação do dispositivo proposto demonstrando a sua superioridade com relação aos dispositivos resistivos convencionais.

Palavras-chaves: Supercondutor, Dispositivo limitador de corrente de falta supercondutor.

Abstract

The development of a superconducting fault current limiter device of resistive type with modular design was the main purpose of this thesis. As an attempt of reaching an efficient device that shows high limitation electrical resistance, current problems involving this particular kind of limiter were detailed such as: superconductor sample current injection technique, power losses inside the cryostat and limitation of the longitudinal dimension of the superconductor chip. Additionally, standard analysis procedures and hardware were created and left available for future use with a variety of superconducting fault current limiter types. All the development process that led to the definitive device configuration was presented including the devices that weren't effective when working with higher current levels. Finally, practical current limitation experiments were carried out at a "stack" type device configured as "mono-layer" limiter. In order to demonstrate the advantages of the proposed device in comparison with the conventional devices, simulations of current limitation of the stack device configured as multi-layer were conducted concluding the study.

Key words: Superconductor, Superconductor fault current limiter device

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Capítulo 1: Introdução.....	17
1.1 Objetivos.....	18
1.2 Desenvolvimento da Dissertação.....	19
Capítulo 2: Teoria da Supercondutividade.....	20
2.1 Um Breve Resumo Sobre a História da Supercondutividade.....	20
2.2 Os Supercondutores de Alta T_c	22
2.3 Supercondutores a Base de Mercúrio	24
2.4 A História dos Cupratos Dopados com Rênio.....	25
Capítulo 3: Limitadores de Corrente de Falta.....	28
3.1 Reator com Núcleo de Ar	29
3.2 Dispositivos Pirotécnicos	31
3.3 HVDC (<i>High Voltage Direct Current</i>).....	32
3.4 IPC (<i>Interphase Power Controller</i>).....	33
3.5 Tecnologia FACTS (<i>Flexible AC Transmission Systems</i>).....	34
3.6 Disjuntores Eletrônicos de Rápida Interrupção	36
3.7 Limitadores de Corrente Supercondutores	37
3.7.1 Limitadores de Corrente Supercondutores do Tipo Resistivo.....	38
3.7.2 Limitadores de Corrente Supercondutores do Tipo Indutivo – Núcleo Blindado	39
3.7.3 Limitadores de Corrente Supercondutores do Tipo Indutivo – Secundário Supercondutor.....	40
3.8 Dispositivo Limitador Desenvolvido.....	41
Capítulo 4: Metodologia e Instrumentação para Testes de Limitação de Corrente	42
4.1 Circuito de Testes	42

4.2 Interface de Gatilhamento de Curto Circuito	44
4.3 <i>Software</i> SUPERA.....	46
4.4 <i>Software</i> de Tratamento de Curvas.....	48
Capítulo 5: Projeto do Dispositivo Limitador de Corrente de Falta Supercondutor	52
5.1 Introdução.....	52
5.2 Dispositivo Limitador por Cerâmica Tipo Paralelepípedo.....	52
5.2.1 Projeto.....	52
5.2.2 Execução.....	53
5.2.3 Testes e Resultados.....	54
5.2.4 Análise dos Resultados.....	56
5.3 Dispositivo Limitador do Tipo Camada Depositada	59
5.3.1 Projeto.....	59
5.3.2 Execução.....	60
5.3.3 Testes e Resultados.....	61
5.3.4 Análise dos Resultados.....	62
5.4 Dispositivo Limitador por Cerâmica Tipo Pilha	65
5.4.1 Projeto.....	65
5.4.2 Execução.....	70
5.4.3 Testes e Resultados.....	72
5.4.4 Análise dos Resultados.....	75
Capítulo 6: Limitador Supercondutor Resistivo Tipo Pilha Monocamada.....	76
6.1 Introdução.....	76
6.2 Testes	76
6.3 Resultados.....	77
Capítulo 7: Limitador Supercondutor Resistivo Tipo Pilha Multicamada	87
7.1 Introdução.....	87
7.2 Resultados da Simulação	87
Capítulo 8: Conclusões.....	92
8.1 Introdução.....	92
8.2 Cerâmicas Supercondutoras	92
8.3 Injeção de Corrente.....	93
8.4 Bancada de Testes	93

8.5 Próximos Trabalhos.....	94
Referências Bibliográficas	95

Lista de Figuras

Figura 2.1 Desenvolvimento cronológico das descobertas de novos supercondutores e suas respectivas temperaturas de transição, conforme Tabela 2.1..	24
Figura 2.2 Estruturas cristalinas da família $HgBa_2Ca_n-1Cu_nO_{2n+2+\delta} - Hg - 12(n - 1)n$. Da esquerda para a direita temos $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ e $n = 4$, sendo a TC indicado abaixo da estrutura. Todas estruturas têm simetria $P4/mmm$ e os planos de CuO são ressaltados..	25
Figura 2.3 Célula unitária dos compostos $Hg-1223$ e $Hg,Re-1223$. As respectivas temperaturas de transição encontram-se indicadas abaixo da estrutura.....	26
Figura 3.1 Reatores limitadores de corrente de núcleo de ar – SE Mogi das Cruzes 345 kV [34].....	29
Figura 3.2 Ligação típica de um reator limitador de núcleo de ar [34].....	29
Figura 3.3 Limitador pirotécnico – Trench USA [34].....	31
Figura 3.4 Linha de transmissão utilizando HVDC.	32
Figura 3.5 Esquema de ligação de um IPC em uma subestação [35].....	33
Figura 3.6 Esquema de ligação de um limitador utilizando tecnologia FACTS [39].	35
Figura 3.7 Esquemático de montagem física de um limitador utilizando tecnologia FACTS montado em Vincent - Califórnia [39].	36
Figura 3.8 Circuito equivalente de um limitador resistivo	38
Figura 3.9 Núcleo de ferro blindado por um tubo supercondutor – invisível para o fluxo magnético quando em estado supercondutor [43].	39
Figura 3.10 Fluxo magnético penetra o núcleo de ferro no estado resistivo, refletindo a impedância do enrolamento secundário para o circuito [43].	40
Figura 3.11 Esquema de limitador indutivo com anel secundário supercondutor[44].....	41
Figura 4.1 Arranjo do circuito para teste com supercondutor inserido.	42
Figura 4.2 Arranjo do circuito para teste com resistores de comparação.....	44
Figura 4.3 Circuito do gatilhador.	45
Figura 4.4 Interface de gatilhamento ou simulador de curto.....	45
Figura 4.5 Janela de introdução – <i>Software</i> SUPERA.	46
Figura 4.6 Janela de operação – <i>Software</i> SUPERA.....	47

Figura 4.7 Exemplo de curva de tensão capturada do osciloscópio.....	49
Figura 4.8 Exemplo de curva de tensão capturada do osciloscópio após tratamento em ambiente Matlab.....	50
Figura 4.9 Curva antes do tratamento (azul) sobre curva após tratamento (vermelha).....	50
Figura 5.1 Arranjo para supercondutor tipo paralelepípedo.....	53
Figura 5.2 Execução do dispositivo com cerâmica tipo paralelepípedo.	53
Figura 5.3 Gráfico de resistência do dispositivo X corrente de teste – Teste realizado em 06/08/2009.	55
Figura 5.4 Gráfico de resistência do dispositivo X corrente de teste – Teste realizado em 12/08/2009.	55
Figura 5.5 Gráfico de resistência do dispositivo X corrente de teste – Teste realizado em 13/08/2009.	56
Figura 5.6 Representação da passagem da corrente na ponta tipo paralelepípedo antes da vaporização.	57
Figura 5.7 Representação da ponta tipo paralelepípedo após a vaporização.	58
Figura 5.8 Representação da ponta tipo camada depositada.	60
Figura 5.9 Execução do dispositivo com supercondutor tipo camada depositada.	60
Figura 5.10 Gráfico de resistência do dispositivo X corrente de teste – Teste realizado em 20/08/2009.....	62
Figura 5.11 Distribuição da passagem de corrente no dispositivo tipo camada depositada com a cerâmica em estado supercondutor.	63
Figura 5.12 Demonstração da passagem de corrente no dispositivo tipo camada depositada com pastilha em estado resistivo.	64
Figura 5.13 Demonstração da passagem de corrente no dispositivo tipo camada depositada com pastilha em estado resistivo e supercondutor danificado.....	64
Figura 5.14 Vista explodida do limitador tipo pilha.	66
Figura 5.15 Corpo externo do dispositivo.	67
Figura 5.16 Vista da tampa superior do dispositivo com os elementos internos montados.....	68
Figura 5.17 Conjunto montado com quatro pastilhas supercondutoras.	68
Figura 5.18 Conjunto montado com capacidade máxima de pastilhas supercondutoras.	69
Figura 5.19 Dispositivo tipo pilha após a construção.	70

Figura 5.20 Dispositivo tipo pilha após a construção (vista explodida).....	70
Figura 5.21 Dispositivo tipo pilha sendo inserido no criostato.	71
Figura 5.22 Dispositivo inserido no criostato.	71
Figura 5.23 Resistência do dispositivo tipo pilha X corrente de teste – Teste realizado em 22/09/2009.....	72
Figura 5.24 Resistência do dispositivo tipo pilha X corrente de teste – Teste realizado em 23/09/2009.....	73
Figura 5.25 Gráfico de resistência do dispositivo tipo pilha X corrente de teste – Teste realizado em 23/09/2009.	74
Figura 6.1 Fluxograma de testes com corrente do limitador tipo pilha.....	77
Figura 6.2 Curva I x t para corrente de pico de 630 mA.....	78
Figura 6.3 Curva I x t para corrente de pico de 1,16 A.....	79
Figura 6.4 Curva I x t para corrente de pico de 2,44 A.....	80
Figura 6.5 Curva I x t para corrente de pico de 4,94 A.....	81
Figura 6.6 Curva I x t para corrente de pico de 9,48 A.....	82
Figura 6.7 Curva I x t para corrente de pico de 13,29 A.....	83
Figura 6.8 Análise do momento da transição da cerâmica (curvas sobrepostas).....	84
Figura 6.9 Esquemático dos elementos do dispositivo limitador com respectivas resistências elétricas.....	85
Figura 7.1 Curva simulada das correntes para o limitador multi-camada.....	88
Figura 7.2 Curva simulada das correntes para o limitador multi-camada utilizando 16 pastilhas durante corrente de falta.....	89
Figura 7.3 Curva simulada das correntes para o limitador multi-camada utilizando uma cerâmica de altura 80 mm.	91

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Relação dos supercondutores e suas respectivas temperaturas de transição.....	23
Tabela 3.1 Tipos de limitadores de corrente de falta e suas fases de desenvolvimento [34].....	28
Tabela 3.2 Vantagens e desvantagens do reator limitador com núcleo de ar.....	30
Tabela 3.3 Vantagens e desvantagens do dispositivo pirotécnico.....	32
Tabela 5.1 Dados do supercondutor tipo paralelepípedo.....	52
Tabela 5.2 Dados do supercondutor tipo camada depositada.....	59
Tabela 6.1 Teste 01 com corrente de pico de 630 mA.....	78
Tabela 6.2 Teste 02 com corrente de pico de 1,16 A.....	79
Tabela 6.3 Teste 03 com corrente de pico de 2,44 A.....	80
Tabela 6.4 Teste 04 com corrente de pico de 4,94 A.....	81
Tabela 6.5 Teste 05 com corrente de pico de 9,48 A.....	82
Tabela 6.6 Teste 06 com corrente de pico de 13,29 A.....	83
Tabela 7.1 Teste utilizando dispositivo multi-camada com 16 cerâmicas de Mercúrio.....	88
Tabela 7.2 Teste utilizando dispositivo multi-camada com cerâmica única de 80 mm de altura.....	90

Capítulo 1: Introdução

O setor elétrico brasileiro está em permanente evolução, fruto tanto de mudanças legais e normativas quanto do avanço tecnológico. É um desafio levar energia elétrica a mais de 61 milhões de consumidores espalhados num território de dimensões continentais. O Brasil superou no ano de 2007 a marca de 100 mil megawatts (MW) em potência instalada (75% de fonte hídrica e 25% de fonte térmica). E muito ainda pode ser feito para expandir o parque hidroelétrico, já que menos de 30% foi aproveitado.

Em 2008 realizou-se o primeiro leilão de biomassa, energia gerada pela queima do bagaço de cana-de-açúcar neste caso. Para isso foi necessário licitar novas instalações de conexão à rede básica, para escoamento da energia produzida pelas usinas de cana-de-açúcar localizadas na região Centro Oeste do Brasil.

Numa escala ainda reduzida e experimental, têm sido criados incentivos à produção de energia pela queima do lixo urbano e pela utilização do metano associado a dejetos de suínos. Ambos os projetos apontam o caminho da correta sustentabilidade ambiental ao unir a despoluição das cidades e dos rios à geração de energia elétrica.

O equilíbrio entre oferta e demanda não é alcançado apenas aumentando a oferta. É possível e desejável atuar também pelo lado da demanda. Nesse sentido, é de grande relevância a busca da eficiência energética. Os projetos apresentados pelas distribuidoras de energia elétrica nessa área, desde o início do primeiro ciclo em 1998, totalizam investimentos de mais de R\$ 1,93 bilhão. Projetos aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) já atingiram uma economia de redução anual na ordem de 5.597 GWh/ano no consumo de energia elétrica. O setor finalizou o ano de 2008 com o leilão da maior linha de transmissão do mundo, uma conexão elétrica de 2.400 km das usinas do Complexo do rio Madeira com o Sistema Interligado Nacional [1].

É neste contexto que se faz imprescindível, cada vez mais, o desenvolvimento de sistemas de proteção contra faltas que sejam eficientes e que operem com baixo custo. No âmbito deste trabalho, será tratada exclusivamente a questão dos limitadores de corrente de falta que são dispositivos destinados a diminuir o nível de corrente elétrica na rede durante um curto circuito, preservando, assim, os equipamentos a ela conectados. Dentre os dispositivos limitadores de corrente de falta, aqueles que usam

cerâmicas supercondutoras serão aqui investigados, ou seja, os dispositivos limitadores de corrente de falta supercondutores (DLCFS).

1.1 Objetivos

Este trabalho propõe primariamente a construção de um DLCFS que apresente parâmetros próximos das aplicações reais no sistema elétrico em termos de nível de corrente, tensão, potência e capacidade de limitação.

Propõe-se também a construção de um dispositivo limitador que comporte vários tipos diferentes de cerâmicas supercondutoras em um mesmo corpo de maneira a tornar o dispositivo modular e que possa ser adaptado de acordo com a sua aplicação. Além disso, a acomodação de cerâmicas de composições diferentes cria perfis de operação específicos para cada limitador, abrindo a possibilidade de se projetar gradientes funcionais para o limitador, como, por exemplo, níveis de limitação diferentes em função de correntes instantâneas diferentes. Em outras palavras, procurou-se criar um dispositivo que apresente uma variação de resistência significativa (da ordem de 5Ω) com capacidade de corrente elevada.

Detalhes técnicos sobre a produção e as características das cerâmicas supercondutoras são abordados superficialmente focando estritamente aqueles aspectos que interferem ou afetam o desempenho do DLCFS do ponto de vista de engenharia.

Paralelamente, o trabalho objetiva criar uma bancada de testes padronizada para possibilitar futuros trabalhos na área de DLCFS sem a necessidade de se empenhar esforços no desenvolvimento das ferramentas de medição e análise permitindo, assim, que o pesquisador mantenha o foco na parte mais importante deste tipo de trabalho, ou seja, o desempenho das cerâmicas supercondutoras.

Tão importante quanto descrever os resultados positivos da pesquisa é o registro das etapas as quais resultaram em dispositivos falhos e sem aplicação prática. Em outras palavras, este trabalho também objetiva criar um registro dos tipos de dispositivos (pontas) e composição química das cerâmicas supercondutoras que não são adequadas para a construção de um limitador. É importante observar que nem toda a cerâmica que apresenta ótima característica supercondutora servirá como um bom limitador de corrente.

1.2 Desenvolvimento da Dissertação

O desenvolvimento da dissertação será realizado em 8 capítulos.

O Capítulo 1 trata da introdução do trabalho, situando o mesmo no contexto atual de aplicações de engenharia elétrica e explicando seus objetivos.

O Capítulo 2 traz explicações sobre a teoria da supercondutividade, os supercondutores de alta temperatura crítica e sua evolução. Também expõe quantitativamente o fenômeno da supercondutividade e apresenta os modelos mais aceitos para explicá-la.

O Capítulo 3 descreve sucintamente os principais tipos de limitadores de corrente de falta em uso atualmente. São descritos limitadores convencionais (não-supercondutores) e limitadores supercondutores.

O Capítulo 4 introduz a metodologia e o ferramental utilizado nos testes dos supercondutores demonstrando todos os detalhes técnicos de construção e aplicação da bancada de testes e os programas de interpretação dos resultados.

O Capítulo 5 mostra todo o desenvolvimento de um projeto eficiente para um limitador de corrente de alta resistência e alta capacidade de corrente. Este Capítulo também deixa registradas todas as etapas de evolução até a fase final, na qual um limitador apropriado é finalmente projetado.

A versão final do limitador projetado é então testada efetivamente com uma cerâmica supercondutora real e no Capítulo 6 os resultados provenientes de testes práticos são mostrados.

O Capítulo 7 promove uma simulação detalhada dos resultados da utilização do limitador final munido de sua capacidade de limitação máxima (16 pastilhas supercondutoras associadas em série). Também traz a comparação dos resultados entre esta simulação e os resultados reais obtidos no capítulo anterior.

Por fim, o Capítulo 8 traz as conclusões sobre os resultados do trabalho, descreve as vantagens e desvantagens do limitador estudado e sugere futuros trabalhos com topologias diferentes para os dispositivos limitadores.

Capítulo 2: Teoria da Supercondutividade

2.1 Um Breve Resumo Sobre a História da Supercondutividade

Três anos depois de liquefazer o gás de Hélio pela primeira vez (1911), Heike Kammerling Onnes estava estudando o comportamento da resistência elétrica do mercúrio (Hg) com a diminuição da temperatura, quando ao atingir a temperatura de 4,19 K a resistência caiu abruptamente para valores incomensuráveis em seu sistema de medida [2]. Esta observação experimental confirmou ser característica de uma transição de fase de um estado no qual a matéria apresenta resistência elétrica para um estado com resistência nula. Este estado foi chamado estado supercondutor. Uma vez que a queda da resistência ocorreu de forma descontínua (a transição de estado se apresentou sem a existência de calor latente) a temperatura relacionada a essa transição de fase foi denominada de temperatura crítica de transição, T_C . Sabe-se que um supercondutor deixa seu estado de resistência elétrica nula quando o valor de pelo menos um dos seus parâmetros críticos se excede. Estes parâmetros são: Temperatura, campo eletromagnético e densidade de corrente os quais devem respeitar aos valores limites temperatura crítica (T_C), campo crítico (H_C) e densidade de corrente crítica (J_C) respectivamente.

Em 1933, Meissner e Ochenfeld [3] descobriram que se uma substância supercondutora for esfriada abaixo de sua temperatura crítica na presença de um campo magnético aplicado, ela expulsa todo e qualquer fluxo magnético de seu interior. Se o campo for aplicado depois que a substância estiver abaixo da T_C , o fluxo é excluído também. Esta propriedade foi denominada de Efeito Meissner, a qual caracteriza um novo estado termodinâmico.

Uma teoria foi desenvolvida (1935) pelos irmãos Fritz e Heinz London [4] para explicar essas duas propriedades. Entretanto, a primeira sugestão de um entendimento teórico do fenômeno da supercondutividade veio em 1950 quando V. L. Ginzburg e L. D. Landau [5] propuseram sua teoria fenomenológica. Esta teoria teve o mérito de ressaltar o fato básico de que a supercondutividade teria de ser entendida como um

fenômeno macroscópico de natureza cooperativa. Segue como consequência natural da teoria de Ginzburg-Landau (GL) a obtenção das equações de London [4].

No mesmo ano de 1950, H. Fröhlich publicou um trabalho no qual era sugerido uma correlação microscópica entre a massa dos íons na rede e a T_C [6], isto é, havia uma interação entre elétrons e a rede cristalina mediada por fônons.

Em 1956, Cooper [7] demonstrou que dois elétrons interagindo logo abaixo do nível de Fermi poderiam apresentar um estado ligado na presença de uma interação atrativa fraca. Nesse modelo ele indicava a formação de pares de elétrons, hoje denominados de pares de Cooper.

Logo após essa publicação, J. Bardeen, L. Cooper e J. R. Schrieffer [8] propuseram uma teoria microscópica da supercondutividade na qual assumiam a existência de pares de elétrons ligados, que formavam uma super corrente e um *gap* de energia formado entre o estado normal e o estado supercondutor. Satisfatoriamente, as teorias de Ginzburg-Landau e London foram reproduzidas pela teoria de Bardeen, Cooper e Schrieffer, hoje conhecida como Teoria BCS.

Desde então, vários pesquisadores vêm se esforçando para produzir materiais com o propósito de obter os valores mais altos possíveis da temperatura de transição (T_C), visando aplicações tecnológicas. Apesar desta procura, nenhuma temperatura crítica maior que 30 K foi atingida por mais de setenta anos desde o descobrimento inicial da supercondutividade.

Em abril de 1986, um novo tipo de supercondutor foi descoberto por J. G. Bendnorz e K. A. Müller [9] que publicaram um trabalho intitulado *Possible High T_C Superconductivity*. Começa, então, a era da supercondutividade de altas temperaturas críticas. Muitos pesquisadores não acreditaram neste novo composto visto que em anos antecedentes vários erros de interpretação de resultados foram cometidos em outras publicações. Entretanto, os resultados de Bendnorz e Müller foram reproduzidos por um grupo de pesquisadores do Japão [10] e por um grupo de pesquisadores americanos [11]. Rapidamente outros grupos iniciaram pesquisas nesta área fazendo surgir novas e mais altas temperaturas críticas com sucesso.

2.2 Os Supercondutores de Alta T_C

Em 1987, foram produzidos compostos a base de Lantânio (LaBaCuO) com temperaturas críticas próximas de 40 K à pressão atmosférica [12, 13]. Ao se aplicar pressão externa hidrostática sobre esse tipo de cerâmica supercondutora obteve-se uma nova temperatura de transição em torno de 52 K [14]. Este mesmo grupo de pesquisa fez uma série de substituições químicas usando átomos com raios iônicos menores, procurando causar uma pressão química na posição ocupada pelo Lantânio (La⁺³). Este procedimento mais tarde resultou no surgimento do sistema ítrio (YBaCuO) [15, 16], cuja T_C é aproximadamente 92 K.

Assim, no mesmo contexto, estudos de substituições químicas levaram em 1993 à descoberta de compostos da família HgBaCaCuO, que à pressão atmosférica apresentam uma temperatura crítica de até 135 K [17, 18], e ao se aplicar nestes materiais pressão hidrostática externa, a T_C atingiu valores da ordem de 160 K [19]. Sabe-se que a pressão externa hidrostática provoca nesses compostos um incremento da ordem de 30 K na temperatura de transição. Isto revela ser possível encontrar novos compostos que atinjam temperaturas críticas maiores. Para tanto, usa-se a substituição química de outros elementos nos compostos atuais, gerando com isso a possibilidade de encontrar novos compostos com maiores T_C .

No ano de 2008 pesquisadores do Japão descobriram um novo composto a base de ferro e arsênio (LaOFeAs) que apresenta temperatura crítica de 26K, sendo que com substituição de Sm no sítio de Lantânio tem-se uma temperatura crítica de 50K [20].

Considerando apenas a cronologia das descobertas, pode-se classificar o período de 1930 a 1986 como bem representado pela supercondutividade das ligas a base de Nióbio tendo o modelo BCS com orbitais do tipo s e interação elétron-fônon. A partir de 1986, passa-se a lidar com supercondutores a base de óxido de cobre e os orbitais passam a ser do tipo p e d com hibridizações. Nesses supercondutores a base de óxido a interação entre os portadores não é bem estabelecida, gerando uma variedade de interpretações. Por outro lado, um novo composto a base de boro (B) [20], com a temperatura crítica de transição de aproximadamente 40 K, a princípio pode ser descrito pela teoria BCS com possibilidade de aumentar T_C quando submetido a pressão hidrostática externa. Pode-se analisar a Tabela 2.1 a seguir a fim de comparar os mais

representativos compostos e suas respectivas temperaturas críticas bem como o ano de descoberta.

Tabela 2.1 – Relação dos supercondutores e suas respectivas temperaturas de transição [21].

Número	Composto	T _C (K)	Ano
1	Hg	4,2	1911
2	Pb	7,2	1913
3	Nb	9,2	1930
4	NbN _{0,96}	15,2	1950
5	Nb ₃ Sn	18,1	1954
6	Nb ₃ (Al _{0,75} Ge _{0,25})	20-21	1966
7	Nb ₃ Ga	20,3	1971
8	Nb ₃ Ge	23,2	1973
9	Ba _x La _{5-x} Cu ₅ O _y	30-35	1986
9 ^a	(Ba _{0,1} La _{0,9})Cu _{4-d} com pressão 1 GPa	52	1986
10	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	92	1987
11	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	1988
12	Tl ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	1988
12 ^a	Tl ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ com pressão de 7 GPa	131	1993
13	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+d}	133	1993
14	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+d} com pressão 25 GPa	155	1993
14 ^a	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+d} com pressão 30 GPa	164	1994
14b	(Hg _{0,8} Pb _{0,2})Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+d}	134	1994
14c	(Hg _{0,8} Re _{0,2})Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+d}	134	1995
15	MgB ₂	40	2001
16	SmO(x)FeAs	50	2008

De forma esquemática pode-se ver na Figura 2.1 o avanço da temperatura crítica de transição T_C obtido ao longo dos anos, sem o uso da pressão externa hidrostática.

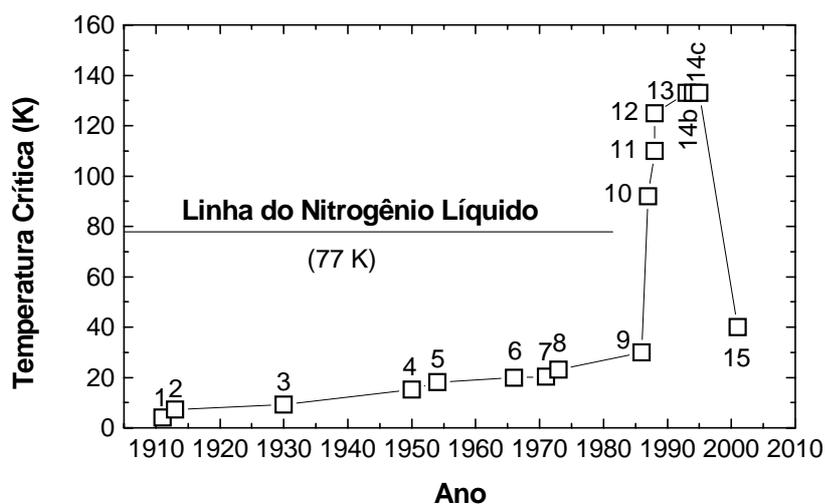


Figura 2.1: Desenvolvimento cronológico das descobertas de novos supercondutores e suas respectivas temperaturas de transição, conforme Tabela 2.1.

As temperaturas críticas acima da linha do Nitrogênio líquido (77K) representam um marco histórico, no que se refere à aplicabilidade dos supercondutores, já que o litro do N_2 é 100 vezes mais barato do que o He líquido, usado para esfriar os supercondutores à base de Nióbio que possuem temperaturas críticas mais baixas.

2.3 Supercondutores a Base de mercúrio

Em 1991, S. N. Putilin e outros [22] sintetizaram os primeiros compostos da família $HgBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2+\delta} - Hg - 12(n-1)n$. A partir daí, novos cupratos desta série foram desenvolvidos através de uma exaustiva investigação realizada por vários grupos de pesquisa.

Nota-se que oito décadas depois da descoberta da supercondutividade no mercúrio (Hg) metálico, este volta a ser um tema central de pesquisa, porém desta vez combinado com outros elementos químicos. Agora são utilizados óxidos metálicos para formar um composto cerâmico que possui maior temperatura crítica à pressão atmosférica.

2.4 A História dos Cupratos Dopados com Rênio

E. M. Kopnin et al. [23] observaram, em cerâmicas supercondutoras a base de mercúrio (Hg-1223), oriundas de carbonatos tratados termicamente, que a T_C diminuía e apresentavam a fase Hg-1234 ($n = 4$). A causa responsável por esse problema era a entrada do carbono na posição do mercúrio, que provocava distorções locais na camada de CuO_2 [25].

Na Figura 2.2 mostra-se uma estrutura típica da série $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+\delta}$ com $n = 1, 2, 3$ e 4 . Estas estruturas devem ser analisadas com cuidado para entender a formação do composto.

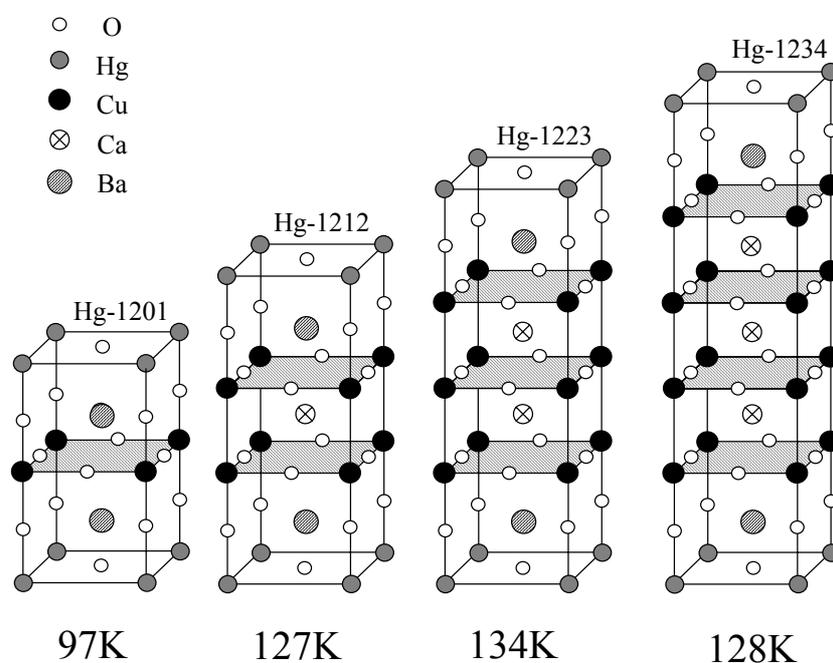


Figura 2.2: Estruturas cristalinas da família $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+\delta}$ - Hg - $12(n-1)n$. Da esquerda para a direita temos $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ e $n = 4$, sendo a T_C indicado abaixo da estrutura. Todas estruturas têm simetria $P4/mmm$ e os planos de CuO são ressaltados.

Para solucionar o problema causado pelo carbono, pesquisadores propuseram a substituição do Hg por um cátion de mais alta valência a fim de estabilizar a estrutura dessa família. Shimoyama et al. [26] introduziram vários dopantes na fase supercondutora a base de mercúrio, sendo que eles encontraram que o melhor dopante era o Rênio (Re).

Yamura et al. [27] foram os primeiros autores a indicar uma clara tendência do Re de se ligar e substituir o sítio ocupado pelo Hg, como tentado pelo grupo de Shimoyama et al. [26]. Para melhor visualização desta estrutura veja a Figura 2.3. A adição parcial de Re no lugar do Hg evita a contaminação de carbono, tornando a fase supercondutora mais resistente à contaminação do CO₂, chamado de processo de envelhecimento.

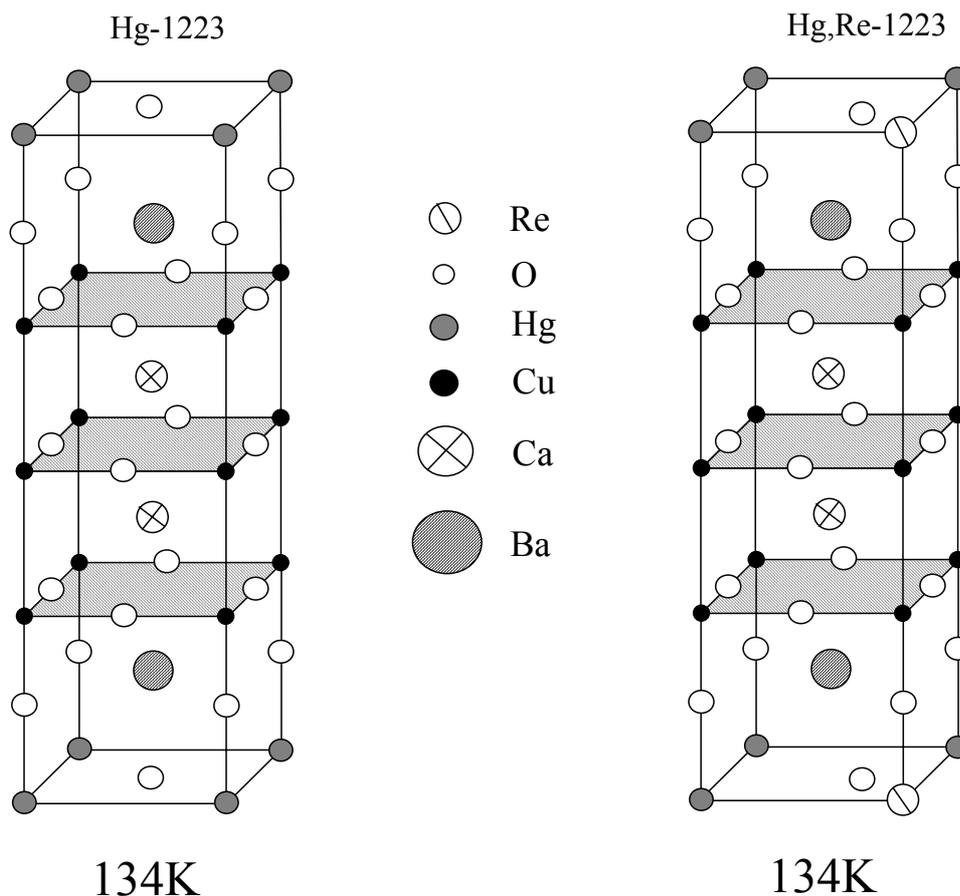


Figura 2.3: Célula unitária dos compostos Hg-1223 e Hg,Re-1223. As respectivas temperaturas de transição encontram-se indicadas abaixo da estrutura.

Várias pesquisas foram realizadas para saber a concentração de Re mais adequada para a produção de cerâmicas supercondutoras com as melhores propriedades físicas [28, 29]. Sabe-se que a concentração de 18% nominal é a que produz maior temperatura crítica e maior intensidade de blindagem magnética [30, 31, 32, 33, 34]. Esta concentração nominal na verdade corresponde a uma concentração real de 23% Re, o que se aproxima do limite de solubilidade do Re no Hg, que é de 30%. Neste trabalho, realizou-se um estudo sistemático da concentração de oxigênio em cerâmicas

supercondutoras com concentrações nominais de Re iguais a 18%. Seguindo a mesma idéia de Sin et al. [28], procurou-se restringir o intervalo de variação do oxigênio entre 0% e 20%, produzindo cerâmicas supercondutoras com teor de O₂ controlado, melhorando as características da cerâmica.

A primeira cerâmica analisada neste trabalho é um supercondutor com base em ítrio de composição YBa₂Cu₃O₇. A segunda cerâmica se trata de um filme fino de supercondutor com base em Rênio de composição Re_{0,2}Ba₂Ca₂Ca₂Cu₃O_{5+x} depositado sobre um substrato não-supercondutor de composição PrBa₂Cu₃O₇. Por fim, é investigada a cerâmica com base em mercúrio de composição Hg_{0,8}Re_{0,2}Ba₂Ca₂Cu₃O_{8,7}.

Capítulo 3: Limitadores de Corrente de Falta

Limitadores de corrente de falta são todos os dispositivos, eletrônicos ou eletromecânicos, destinados a diminuir ou interromper a corrente de falta no circuito onde o mesmo encontra-se instalado.

As principais características que se desejam para estes dispositivos são [35]:

- Impedância pequena em condições normais de operação;
- Impedância alta sob condição de falta;
- Transição rápida entre os regimes normal e sob falta, após a ocorrência de uma falta;
- Recuperação rápida para o regime normal de operação, após a interrupção da falta;
- Alta confiabilidade e manutenção mínima;
- Dimensões reduzidas, visando sua instalação em SEs existentes;
- Baixo custo.

A Tabela 3.1 classifica os tipos de limitadores de corrente de falta convencionais de acordo com sua fase de desenvolvimento atual.

Tabela 3.1 – Tipos de limitadores de corrente de falta e suas fases de desenvolvimento [35].

Limitadores de corrente de falta disponíveis no mercado com ampla experiência de uso	Limitadores de corrente de falta disponíveis no mercado com experiência de uso ainda limitada	Limitadores de corrente de falta em fase de pesquisa e desenvolvimento
Reator com núcleo de ar	IPC (<i>Interphase Power Controller</i>)	Disjuntores com interrupção rápida (chaves eletrônicas)
Dispositivo pirotécnico	Dispositivo com tecnologia FACTS	
HVDC	HVDC <i>Light</i>	

3.1 Reator com Núcleo de Ar

Dispositivos limitadores utilizando reatores de núcleo de ar constituem a solução mais tradicional para limitação de correntes de falta em média e alta tensão no sistema elétrico. São dispositivos que trabalham através de uma acentuada limitação no nível CC da corrente de curto circuito [36]. A Figura 3.1 mostra um reator real em uma subestação, onde a ligação típica do reator limitador de corrente de falta é mostrada na Figura 3.2.



Figura 3.1: Reatores limitadores de corrente de núcleo de ar – SE Mogi das Cruzes 345 kV [35].

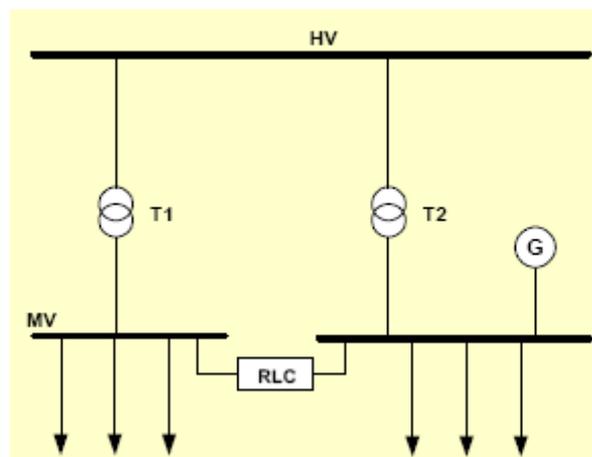


Figura 3.2: Ligação típica de um reator limitador de núcleo de ar [35].

A Tabela 3.2 demonstra as vantagens e desvantagens deste tipo de limitador.

Tabela 3.2: Vantagens e desvantagens do reator limitador com núcleo de ar.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de aquisição e instalação	Custos operacionais ao longo do tempo de operação causados por perdas inerentes ao limitador.
Diminuição dos investimentos na aquisição dos outros componentes do sistema elétrico devido à redução no nível da corrente de curto do sistema.	Queda de tensão introduzida pelo limitador na linha.
Tecnologia de amplo domínio	Elevado fluxo magnético gerado pelo limitador demandando amplo espaçamento físico para instalação.
Fabricantes nacionais fornecendo em tempo reduzido.	

Uma característica importante a ser observada é que a impedância introduzida por este limitador está sempre presente no circuito mesmo em operação normal. Outro aspecto interessante é a dispersão do fluxo magnético causado pelas bobinas deste dispositivo. Como não há um núcleo ferro-magnético para centralizar as linhas de fluxo, estas acabam interferindo com os objetos ao redor do limitador. Cuidados especiais devem ser tomados com outros dispositivos metálicos próximos ao reator, pois podem apresentar sobreaquecimento devido à indução eletromagnética. Até mesmo a armação metálica do prédio da subestação que contém os dispositivos pode ser afetada por correntes induzidas e sobreaquecer.

A determinação da reatância do dispositivo é efetuada, em geral, através de estudos de curto-circuito, fluxo de potência e transitórios eletromagnéticos, sempre levando em consideração os limites de tecnologia de cada fabricante. Em função do valor de reatância do reator, calculam-se ainda os valores de quedas de tensão e as perdas introduzidas na rede, utilizando também programas de fluxo de potência [36].

3.2 Dispositivos Pirotécnicos

Dispositivos pirotécnicos consistem de um elemento fusível de alta tensão em paralelo com um barramento de grande seção transversal. Esses fusíveis são especialmente desenvolvidos para ter uma capacidade de absorção de energia muito maior do que a maioria dos fusíveis comerciais encontrados para atender ao mesmo nível de corrente nominal. Durante operação normal, o barramento conduz a maior parte da corrente da carga e uma parcela bem pequena desta flui pelo fusível. Isto é devido a relativamente alta impedância do fusível quando comparada à impedância do barramento.

Quando uma falta ocorre no circuito, um transformador de corrente detecta a corrente de curto e dispara cargas explosivas, também conhecidas como cargas pirotécnicas. Esta explosão controlada no interior da câmara onde se encontra o barramento principal separa o mesmo em cinco seções deixando quatro espaços vazios entre estas seções. A tensão do arco resultante da abertura destes quatro espaços vazios causa uma rápida transferência de corrente para o fusível de alta tensão. O fusível se rompe e interrompe a corrente de curto em $\frac{1}{4}$ de ciclo para casos de faltas simétricas ou em até $\frac{1}{2}$ ciclo para casos de correntes de falta completamente assimétricas [37]. A Figura 3.3 mostra um dispositivo pirotécnico comercial.

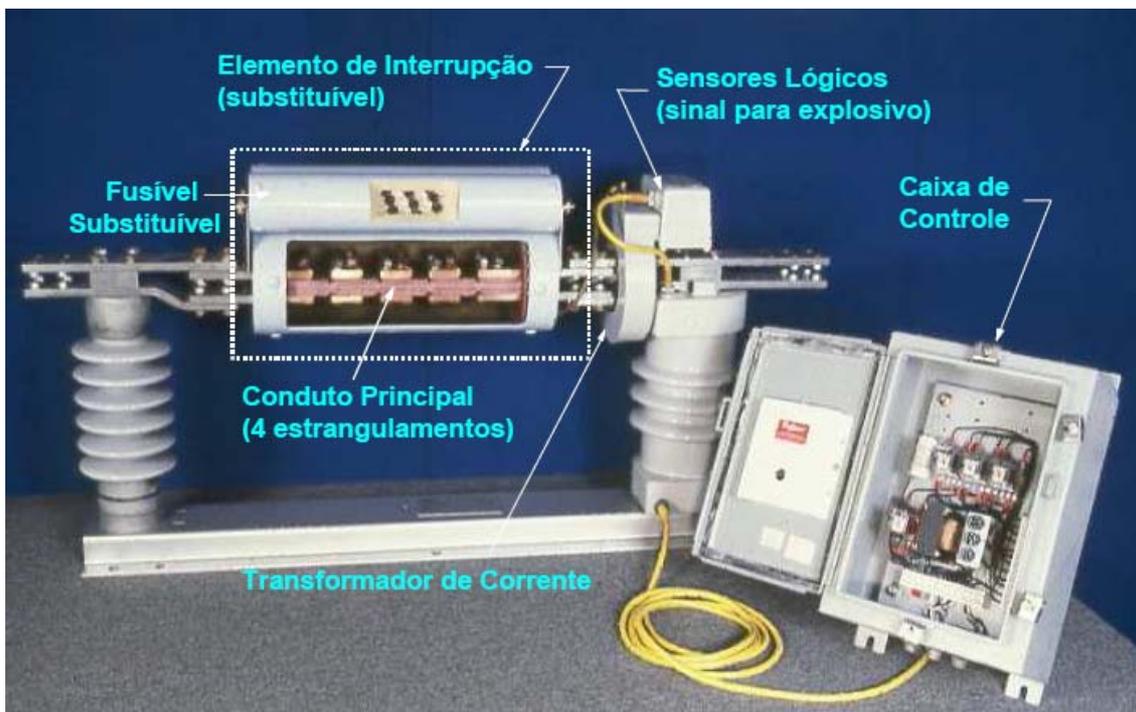


Figura 3.3: Limitador pirotécnico – Trench USA [35].

A Tabela 3.3 apresenta as vantagens e desvantagens deste tipo de limitador.

Tabela 3.3: Vantagens e desvantagens do dispositivo pirotécnico.

Vantagens	Desvantagens
Rápida extinção da corrente de falta em tempos menores do que $\frac{1}{2}$ ciclo.	Alto valor de reposição após falta uma vez que a câmara do barramento principal e o fusível devem ser substituídos.
Alta capacidade dos fusíveis de ruptura geralmente com até 210 kA.	Limitação tecnológica em termos de tensão comercialmente disponível. Atualmente é comum encontrar dispositivos que operam até 40kV.
Baixíssima impedância inserida no circuito em funcionamento normal.	

3.3 HVDC (*High Voltage Direct Current*)

Uma linha de transmissão em HVDC usualmente consiste em dois cabos e duas estações conversoras. Cada estação conversora é composta por um conversor de tensão, ou um *voltage source converter* (VSC), o qual é construído com chaves estáticas, reatores, filtros AC e transformadores como mostrado na Figura 3.4.

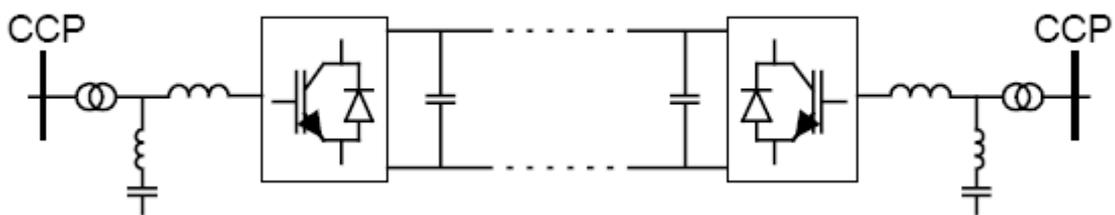


Figura 3.4: Linha de transmissão utilizando HVDC.

Através da utilização de modulação por largura de pulso (PWM), a amplitude, ângulo de fase e até mesmo a frequência do conversor de tensão podem ser ajustados simultaneamente.

Embora o sistema HVDC não seja primordialmente um dispositivo destinado a limitação de corrente, sua crescente utilização em linhas de transmissão e sua capacidade de controlar eletronicamente o nível de corrente que está sendo entregue ao

circuito o faz digno de menção. Nos sistemas HVDC convencionais, existe uma função de controle bem conhecida que é denominada *Voltage Dependent Current Order Limiter* (VDCOL). O propósito desta função é evitar instabilidades de tensão e potência durante situações de falta na rede AC. Graças ao VDCOL, o nível de corrente fornecido pelo sistema HVDC diminui quando a tensão AC se reduz durante a ocorrência de uma falta [38]. Esta função permite que este sistema trabalhe com uma grande capacidade de limitação de corrente de falta e resposta rápida.

O sistema HVDC Light criado pela ABB foi uma evolução do sistema HVDC convencional e foi desenvolvido para atender a demandas ambientais e econômicas mais atuais. É um sistema mais moderno que utiliza IGBT em seu conversor ao invés de tiristores de alta tensão como eram utilizados no HVDC original.

3.4 IPC (*Interphase Power Controller*)

O IPC se constitui de elementos convencionais como capacitores, indutores e transformadores defasadores os quais, quando conectados convenientemente ao sistema de potência, podem realizar as seguintes funções [39]:

- Interligação entre sistemas síncronos;
- Controle do fluxo de potência entre linhas de transmissão;
- Interligação de redes assíncronas;
- Limitação de corrente de falta.

Focando no tema específico da limitação de corrente de falta, a Figura 3.5 exemplifica a ligação de um IPC em uma subestação.

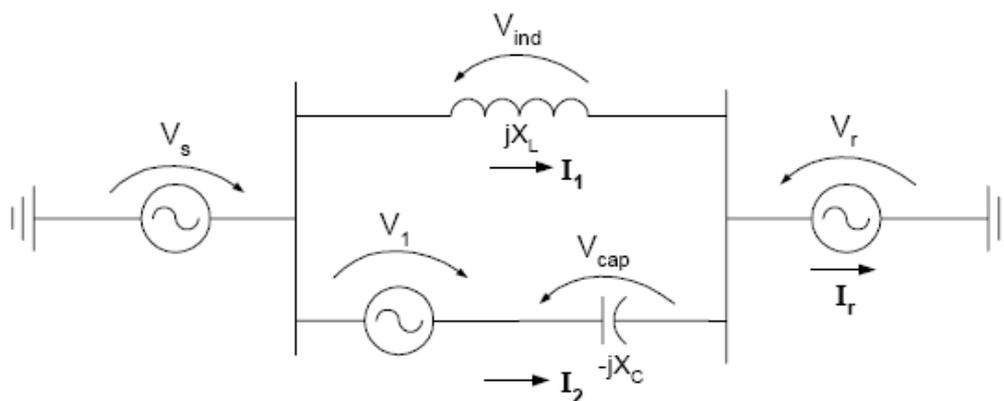


Figura 3.5: Esquema de ligação de um IPC em uma subestação [36].

Um ramo composto por um transformador defasador ajustável em série com um capacitor controla a amplitude e fase da corrente I_2 . Este ramo fica instalado em paralelo com os transformadores da subestação, representados pela impedância equivalente jX_L e submetidos à corrente I_1 . A correta configuração dos parâmetros do transformador defasador e do valor do capacitor faz com que, em situação normal de funcionamento, o ramo do IPC cause poucas perdas e interferências no circuito. Entretanto, em situação de curto-circuito no barramento receptor, a corrente resultante I_r que passará pela linha é limitada, pois esta é resultado do somatório fasorial entre I_1 e I_2 . Em outras palavras, o ramo do IPC provoca uma corrente I_2 de amplitude semelhante à corrente I_1 , porém 180° defasada, causando a anulação da corrente I_r .

3.5 Tecnologia FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*)

FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) é como se denomina a tecnologia modular e fortemente baseada em eletrônica de potência sobre a qual são desenvolvidos diversos equipamentos para o sistema de potência. A flexibilidade se encontra no fato de que, a partir da popularização da eletrônica de potência, dispositivos eletromecânicos custosos e ineficientes podem ser substituídos por soluções eletrônicas ágeis e mais acessíveis [40].

Dentre os principais dispositivos FACTS encontrados, destacam-se [36]:

- Compensadores estáticos – SVC (*Static Var Compensator*);
- Reator controlado por tiristor – TCR (*Thyristor Controlled Reactor*);
- Capacitor chaveado por tiristor – TSC (*Thyristor Switched Capacitor*);
- Capacitor série chaveado por tiristor – TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*);
- Capacitor série controlado por tiristor – TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*);
- Transformador defasador – PST (*Phase Shift Transformer*);

- Compensador Síncrono Estático – STATCOM (*Static Synchronous Compensator*);
- Controlador universal de fluxo de potência – UPFC (*Unified Power Flow Controller*).
- Compensador série protegido por tiristor – TPSC (*Thyristor Protected Series Compensator*).

Dentre todas as possibilidades de aplicações da tecnologia FACTS, uma topologia é especialmente vantajosa para os propósitos de limitação de corrente. Trata-se da utilização de um compensador série protegido por tiristor, ou TPSC, em série com um reator convencional, Figura 3.6.

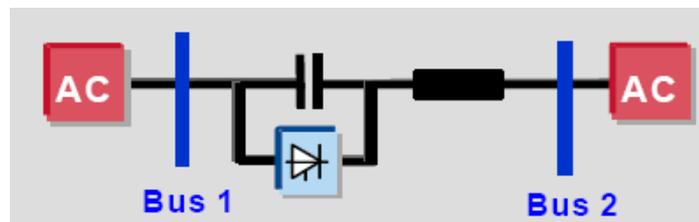


Figura 3.6: Esquema de ligação de um limitador utilizando tecnologia FACTS [40].

Na compensação em série, um capacitor é utilizado para compensar a impedância do reator criando uma impedância total nula para o dispositivo. Entretanto, durante condições de transientes, correntes de curto-circuito causam altas tensões sobre o capacitor, as quais devem ser limitadas para um valor específico. No passado, esta limitação era provida por um para-raio montado em paralelo com o capacitor. Este recurso está sendo substituído por tiristores de alta potência ligados em paralelo ao capacitor, os quais são projetados e testados para correntes de pico de até 110 kA por tempos suficientemente longos [40]. Uma vez que estes tiristores entram em condução, ocorre o *by-pass* do capacitor e a impedância do reator limita a corrente de curto circuito da linha. Garantindo-se uma perfeita sintonia entre o capacitor e o reator, o dispositivo apresentará uma impedância alta apenas durante situação de curto-circuito. Registros retirados de situações reais mostram que este tipo de limitador apresenta velocidade de resposta próxima a dos limitadores supercondutores, ou seja, da ordem de milissegundos.

Uma unidade deste limitador foi colocada em operação na subestação de Vincent ao sul da Califórnia em uma linha de transmissão de 500 kV. A Figura 3.7 mostra o esquemático da montagem física do limitador.

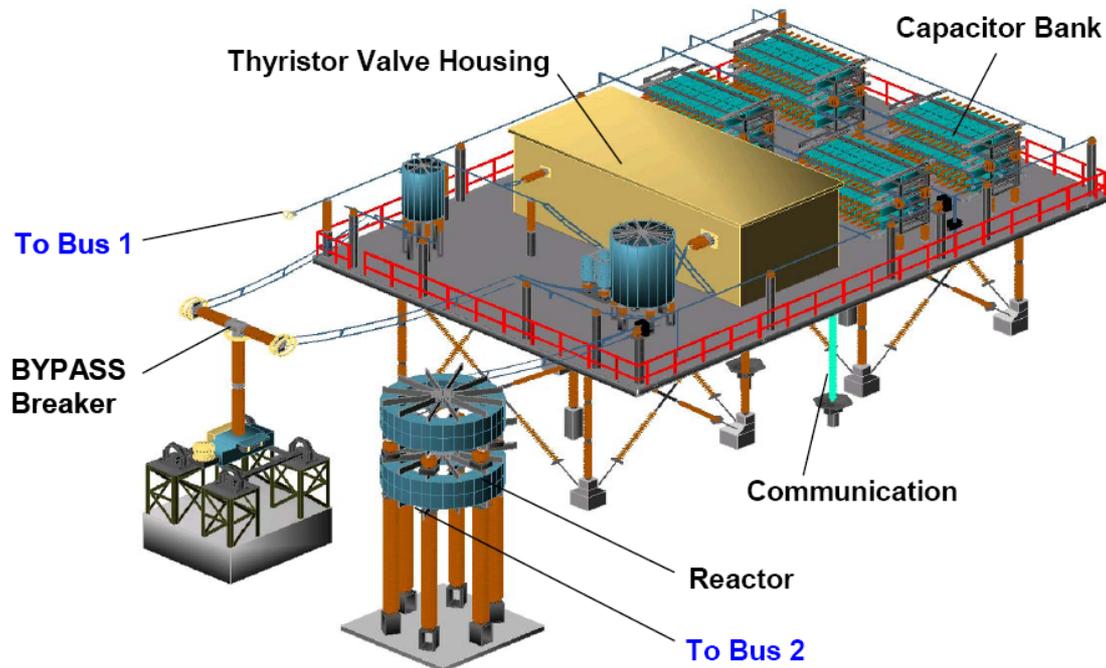


Figura 3.7: Esquemático de montagem física de um limitador utilizando tecnologia FACTS montado em Vincent - Califórnia [40].

3.6 Disjuntores Eletrônicos de Rápida Interrupção

Disjuntores eletrônicos de rápida interrupção têm a mesma função que os disjuntores eletromecânicos normais, porém o seu mecanismo de abertura do circuito é eletrônico. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, os contatos móveis dos disjuntores convencionais, os quais levam entre 1,5 e 4 ciclos para interromperem a corrente de curto, foram substituídos por dispositivos de estado sólido como tiristores, IGBT, SCR e GTO, os quais levam até 0,5 ciclo para cessar a condução [36].

Embora não esteja diretamente relacionado à limitação de corrente, os disjuntores eletrônicos possuem a vantagem do fechamento controlado de maneira que todas as fases comecem a conduzir no início de cada ciclo quando a corrente passa pelo zero. Isto diminui os transitórios na rede e aumenta a vida útil do equipamento. Por

outro lado, a operação ininterrupta com semicondutores causa perdas e distorções harmônicas que podem ser prejudiciais ao sistema [35].

3.7 Limitadores de Corrente Supercondutores

O uso de dispositivos limitadores de corrente de falta utilizando supercondutores de alta temperatura crítica (T_c) vem sendo amplamente pesquisado tanto nos meios acadêmicos quanto na indústria de equipamentos elétricos internacional [41].

No ano de 1996 foi colocado em operação um dos primeiros dispositivos limitadores de corrente de falta supercondutor (DLCFS) para aplicações industriais [42]. Trata-se de um DLCFS instalado em uma usina hidrelétrica na Suíça, construído pela empresa ABB, refrigerado a nitrogênio líquido, com tensão de operação de 10,5kV e potência de 1MVA. Este dispositivo foi considerado o primeiro DLCFS utilizando supercondutores de alta temperatura totalmente operacional e comercializável a ser instalado em um sistema público de fornecimento de energia elétrica.

Alemanha, Reino Unido, Estados Unidos, Coreia do Sul e a China representavam os países mais avançados na pesquisa com supercondutores de alta temperatura para construção de DLCFS segundo dados de 2007 [43]. Também neste ano, relatórios do Departamento de Energia dos Estados Unidos reportavam que 29 milhões de dólares estavam sendo investidos em três principais projetos de limitadores para serem empregados na rede pública de energia daquele país [43].

Assim como em outros campos de tecnologia de ponta, os DLCFS de alta temperatura encontram aplicações imediatas em equipamentos de propósitos militares, principalmente para proteção dos circuitos elétricos de embarcações que utilizam motores elétricos para locomoção (diesel-elétrico ou nuclear) dentre as quais se encontram submarinos e cruzadores de alta velocidade [43].

Dentre as vantagens do DLCFS podem-se citar:

- Menor solicitação térmica, mecânica e eletrodinâmica dos equipamentos e sistemas;
- Menor necessidade de equipamentos sobressalentes;

- Capacidade de limitar a corrente de falta sem causar interrupção no fornecimento de energia elétrica para situações de curto-circuito de curta duração;
- Tempo de resposta de limitação de corrente imediato;
- O fato de não ser necessário a instalação de circuitos eletrônicos de detecção de falta, circuitos eletrônicos de disparo da proteção, ou mecanismos de substituição de elementos fusíveis. As características físicas intrínsecas da cerâmica supercondutora realizam todas estas funções sem necessidade de acessórios;

Entretanto, por se tratar de uma tecnologia ainda incipiente em termos comerciais, as principais desvantagens são de ordem econômica como alto custo de projeto, instalação e manutenção. Existem várias configurações de DLCFS, entretanto, duas vertentes são as mais exploradas [43]: Os limitadores resistivos e os limitadores indutivos.

3.7.1 Limitadores de Corrente Supercondutores do Tipo Resistivo

Os limitadores resistivos são todos limitadores nos quais as cerâmicas supercondutoras são submetidas à passagem da corrente de falta diretamente sobre si e em sua totalidade. A passagem de uma corrente elétrica cujo valor excede a densidade de corrente crítica da cerâmica provoca um aumento instantâneo da resistividade do material cerâmico. Devido ao fato desta cerâmica ser ligada em série com o circuito a ser protegido, a corrente total que o percorre sofre uma diminuição acentuada. Nestes limitadores somente um dos três parâmetros físicos que caracterizam o estado supercondutor é explorado, a saber: a densidade de corrente (J).

A Figura 3.8 exemplifica uma montagem básica de um DLCFS do tipo resistivo.

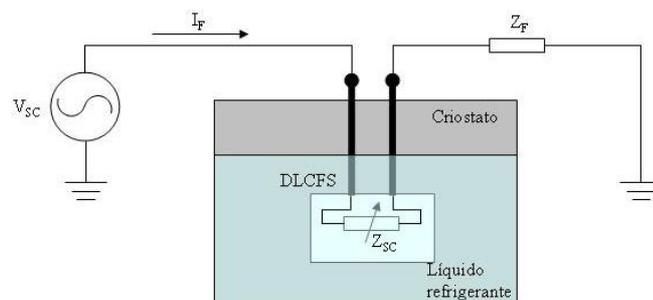


Figura 3.8: Circuito equivalente de um limitador resistivo.

A impedância do DLCFS do tipo resistivo pode ser considerada, em termos de aproximação, como nula em caso de operação normal, ou sendo igual a Z_{SC} no caso da passagem da corrente de falta I_F . Esta impedância adicional, inserida no circuito automaticamente em caso de falta, é responsável pela limitação da corrente de falta.

3.7.2 Limitadores de Corrente Supercondutores do Tipo Indutivo – Núcleo Blindado

Este limitador consiste de dois enrolamentos coaxiais sobrepostos e um núcleo magnético. O enrolamento primário conectado em série ao circuito é feito de cobre e o enrolamento secundário é feito de material supercondutor. Durante funcionamento normal, como mostrado na Figura 3.9, o limitador é quase invisível para o circuito ao qual ele está conectado. A resistência do enrolamento secundário é zero e o fluxo magnético não penetra o núcleo ferro-magnético, pois o tubo supercondutor, o qual também é o enrolamento secundário, age como uma blindagem magnética. Durante a operação normal, a resistência do enrolamento primário e a reatância de dispersão determinam a impedância total do limitador. A tensão no limitador no estado supercondutor é baixa. Quando uma falta ocorre, como mostrado na Figura 3.10, o valor da corrente induzida no tubo excede a densidade de corrente crítica (J_C) do elemento supercondutor, o fluxo magnético penetra o núcleo de ferro e a impedância do enrolamento secundário é refletida para o primário aumentando a impedância total do limitador. O rápido aumento da impedância no circuito limita o valor da corrente de falta [44].

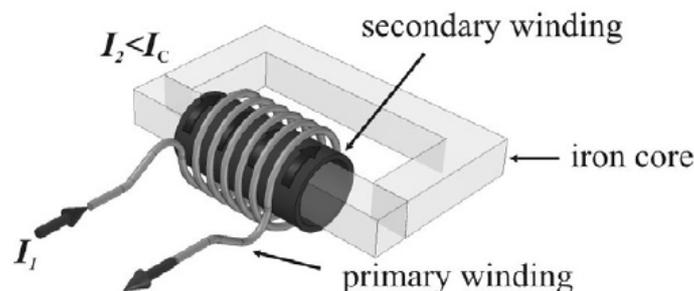


Figura 3.9: Núcleo de ferro blindado por um tubo supercondutor – invisível para o fluxo magnético quando em estado supercondutor [44].

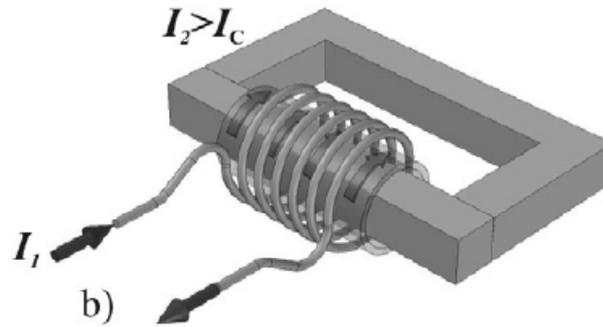


Figura 3.10: Fluxo magnético penetra o núcleo de ferro no estado resistivo, refletindo a impedância do enrolamento secundário para o circuito [44].

3.7.3 Limitadores de Corrente Supercondutores do Tipo Indutivo – Secundário Supercondutor

O dispositivo consiste de um enrolamento primário de material convencional, como o cobre, por exemplo, e um anel supercondutor como enrolamento secundário os quais estão acoplados magneticamente a um núcleo ferro-magnético de três pernas, conforme o desenho da Figura 3.11. Uma das pernas está sob os enrolamentos e a outra perna possui um entreferro. O enrolamento primário é ligado em série com o circuito a ser protegido.

Sob condições normais, o fluxo induzido no anel supercondutor resulta no cancelamento do fluxo no núcleo ferro-magnético. Desta maneira, a impedância total do limitador é pequena e determinada apenas pela resistência do enrolamento primário e pela reatância de dispersão. Sob condições de falta, a corrente induzida no anel supercondutor cresce e ultrapassa a corrente crítica do mesmo. Instantaneamente, o supercondutor passa a operar no modo resistivo e a sua resistência total é refletida ao primário, aumentando a impedância total do circuito [45].

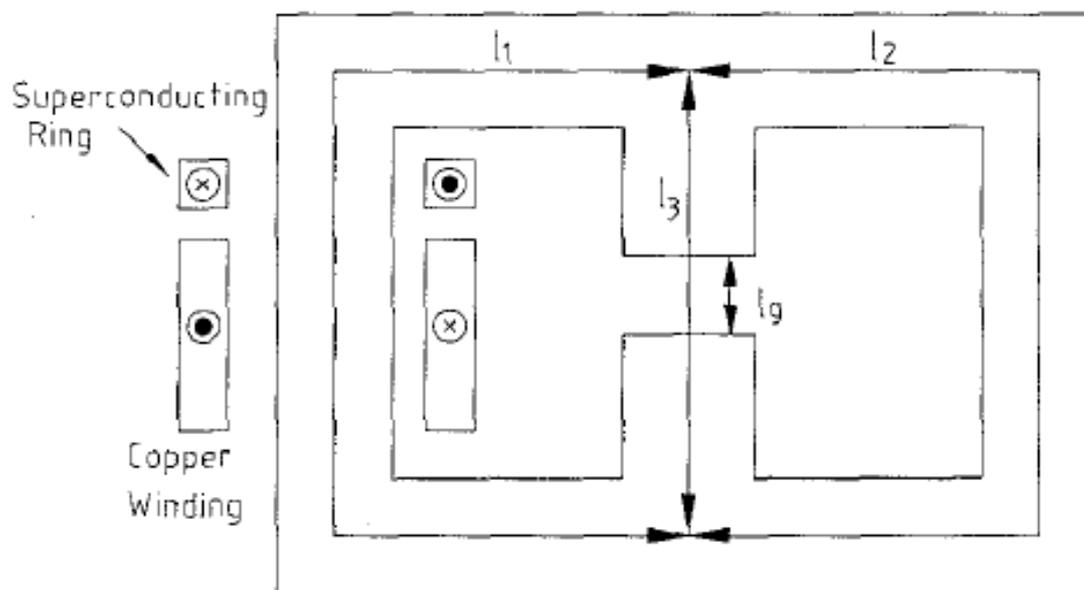


Figura 3.11: Esquema de limitador indutivo com anel secundário supercondutor [45].

3.8 Dispositivo Limitador Desenvolvido

Dentre todos os tipos de limitadores apresentados, os limitadores supercondutores fazem parte do que há de mais moderno neste ramo. Sua alta velocidade de resposta em situações de curto circuito e o fato de não seccionarem a rede em situações de curto não-prolongados os tornam especialmente atrativos. Outra vantagem desta tecnologia é a não utilização de equipamentos auxiliares de detecção e disparo da proteção, já que as próprias características físicas do material supercondutor se encarregam da detecção e disparo da proteção automaticamente.

Seguindo a linha de evolução das experiências realizadas pelo Grupo de Supercondutividade Aplicada (SUPERA), da UFES, ao longo do tempo, este trabalho analisará o limitador do tipo resistivo devido a sua simplicidade de construção e análise. Este tipo de limitador, que já foi abordado em trabalhos prévios [46, 47], apresenta ampla margem de inovação e melhorias em questões práticas desde contatos para injeção de corrente até aspectos térmicos do líquido refrigerante.

Capítulo 4: Metodologia e Instrumentação para Testes do Limitador de Corrente

O circuito de testes e seus periféricos são a instrumentação necessária para visualizar os efeitos da limitação de corrente no dispositivo limitador supercondutor durante as simulações de curto-circuito em laboratório.

Em outras palavras, o circuito de testes é responsável por traduzir as mudanças físicas experimentadas pelo supercondutor em suas condições críticas (transição) em grandezas elétricas, mais especificamente em sinais de tensões elétricas que possam ser colhidos, armazenados e analisados.

4.1 Circuito de Testes

O desenvolvimento do circuito de testes foi uma evolução natural do circuito encontrado no laboratório SUPERA e foi realizado com o intuito de ser utilizado como uma plataforma semi-profissional para realização de testes dos mais variados tipos de limitadores de corrente de falta.

O circuito de testes e seus periféricos são a instrumentação necessária para visualizar os efeitos da limitação de corrente do dispositivo limitador supercondutor durante as simulações de curto-circuito em laboratório como mostrado na Figura 4.1.

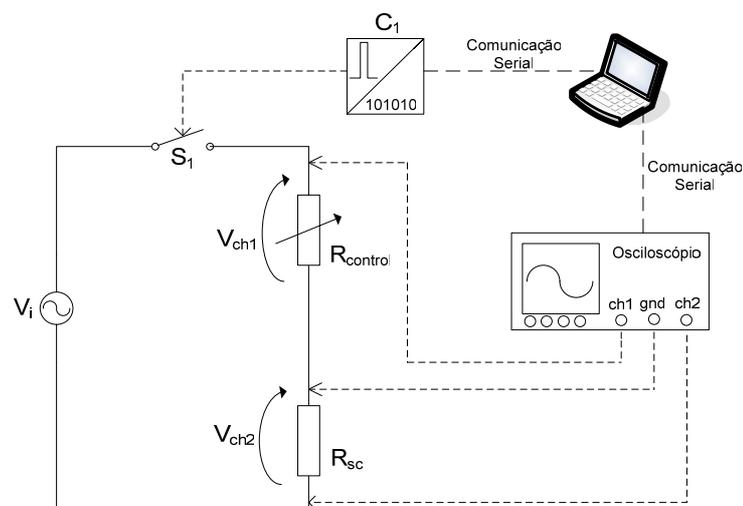


Figura 4.1: Circuito para teste com supercondutor inserido.

Uma fonte variável senoidal (V_i) ligada à rede elétrica fornece tensão ao circuito com uma faixa variável entre 0 e 25V com até 12A de corrente.

Um reostato (R_{control}) em série com o circuito é utilizado para controlar a corrente que passa pelo supercondutor no momento da simulação de curto.

O dispositivo limitador supercondutor é representado pela sua resistência instantânea (R_{sc}). Esta resistência é na verdade o somatório de todas as resistências encontradas na ponta de prova, ou seja, as resistências dos cabos de alimentação, dos blocos de cobre, dos contatos de prata, das folhas de índio e do supercondutor em si, quando este se encontrar fora da região de supercondutividade.

A chave S_1 é uma chave estática industrial de 25A operada remotamente através do comando do *software* SUPERA. Esta chave é acionada por um circuito conversor serial-pulso (C_1) desenvolvido especialmente para esta finalidade. Este conversor recebe um sinal do computador rodando o *software* SUPERA e aplica um pulso de gatilho na chave S_1 durante o momento da simulação do curto circuito. Este pulso tem duração selecionável através do *software* SUPERA sendo possível selecionar um tempo mínimo de 1ms até um pulso contínuo de vários minutos.

O osciloscópio trabalha com dois canais colhendo as ondas de tensão simultaneamente sobre o resistor de controle (R_{control}) e sobre o dispositivo limitador supercondutor (R_{sc}). Este equipamento fica conectado ao computador através de portas de comunicação seriais.

Com o osciloscópio trabalhando com o seu gatilho no modo disparo único o *software* SUPERA envia uma mensagem via porta serial comandando o osciloscópio para fazer o registro das formas de onda no instante exato do curto circuito.

O circuito acima descrito foi utilizado para os testes com o supercondutor inserido. Entretanto, para se fazer uma comparação entre as curvas de um circuito com o limitador supercondutor e as curvas de um circuito sem este dispositivo, é necessário lançar mão de um resistor de comparação. Este resistor de comparação tem a função de reproduzir fielmente a resistência elétrica do dispositivo quando o supercondutor está no estado de resistência nula, ou seja, o somatório dos cabos, contatos e outras resistências permanentes presentes no dispositivo. Em outras palavras, o uso do resistor de comparação serve para mostrar que, ao se comparar as curvas com e sem o limitador, a diferença entre elas seja exatamente a limitação causada pelo supercondutor.

O circuito demonstrado na Figura 4.2 mostra o arranjo utilizado no teste com os resistores de comparação. Tratam-se dos resistores de ajuste grosso (R_{compg}) e o de

ajuste fino (R_{compf}) os quais são, na verdade, dois reostatos. Ajustando-se corretamente estes dois reostatos, é possível conseguir uma precisão de 0,001 ohms durante a operação de equiparação entre a resistência de comparação e a resistência do dispositivo limitador em estado supercondutor. Este nível de precisão conseguido no ajuste das resistências de comparação possibilita a reprodução com elevada fidelidade das curvas de corrente sobre o circuito com e sem o dispositivo limitador.

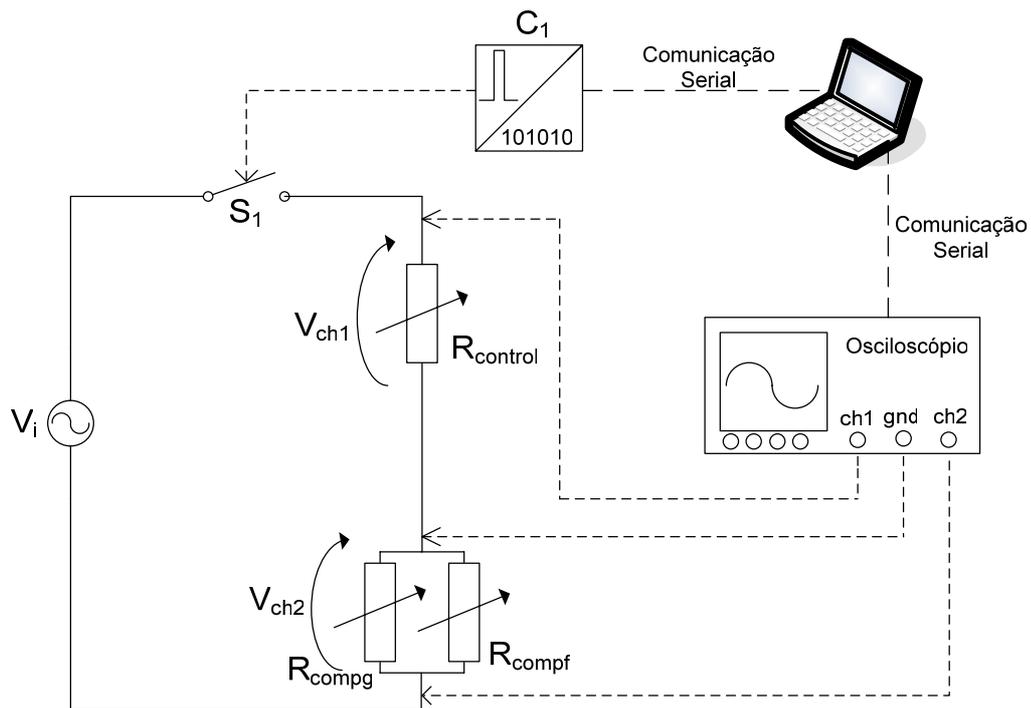


Figura 4.2: Circuito de teste com resistores de comparação.

4.2 Interface de Gatilhamento de Curto-Circuito

A interface de gatilhamento de curto-circuito, também chamada de simulador de curto, é representada pelo componente C_1 nas Figuras 4.1 e 4.2 e é, na realidade, um conversor serial-pulso.

A função deste componente é converter um sinal de gatilho proveniente de uma das portas seriais do computador rodando o *software* SUPERA em um comando para fechar a chave que provocará o curto-circuito no dispositivo limitador de corrente. Seu circuito interno é mostrado na Figura 4.3.

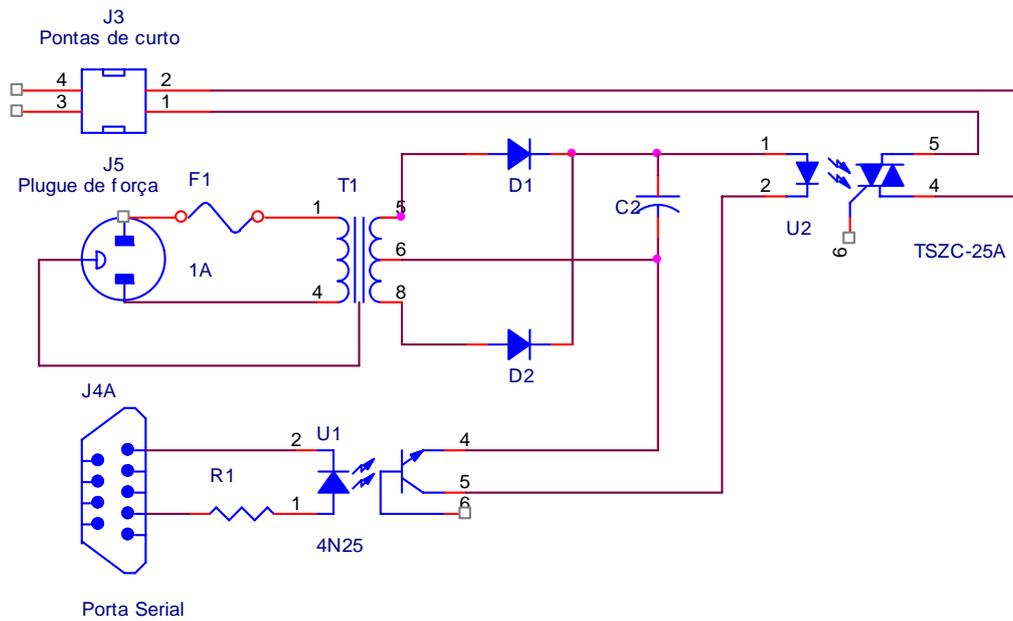


Figura 4.3: Circuito do gatilhador.

Alimenta-se a interface de gatilhamento através da tomada (110Vca) que, através de um retificador formado por T1, D1, D2 e C2 disponibiliza uma tensão de 12Vcc em sua saída.

O computador rodando o *software* SUPERA fornece um tensão de cerca de 8Vcc durante o tempo de pulso selecionado no programa o que, através do optoacoplador U1, energiza a entrada do relé de estado sólido U2 e provoca o curto-circuito por tempo controlado nas pontas de curto 3 e 4 do conector J3.

Este circuito foi encapsulado em uma caixa de aço e instalado sobre a bancada de testes conforme mostra a Figura 4.4.



Figura 4.4: Interface de gatilhamento ou simulador de curto.

4.3 Software SUPERA

O *software* SUPERA é um aplicativo desenvolvido em linguagem Visual Basic 6.0 para rodar em sistema operacional Windows (95 ou superior). É o *software* que controla todas as funcionalidades da bancada de testes e, após pronto e compilado, é fornecido na forma de um arquivo de instalação padrão do Windows, podendo ser instalado e utilizado em qualquer microcomputador rodando o sistema operacional citado.

O *software* SUPERA foi desenvolvido para realizar as seguintes funções:

- Comandar um curto-circuito de duração controlada e selecionável através da interface de gatilhamento;
- Comandar o osciloscópio para gravar as formas de onda no exato momento do curto-circuito;
- Receber e mostrar graficamente as curvas capturadas no osciloscópio;
- Salvar os vetores com os valores que formam as curvas de tensão em arquivo texto para posterior tratamento.

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a janela de introdução e a janela de operação do *software* SUPERA.



Figura 4.5: Janela de introdução – *Software* SUPERA.

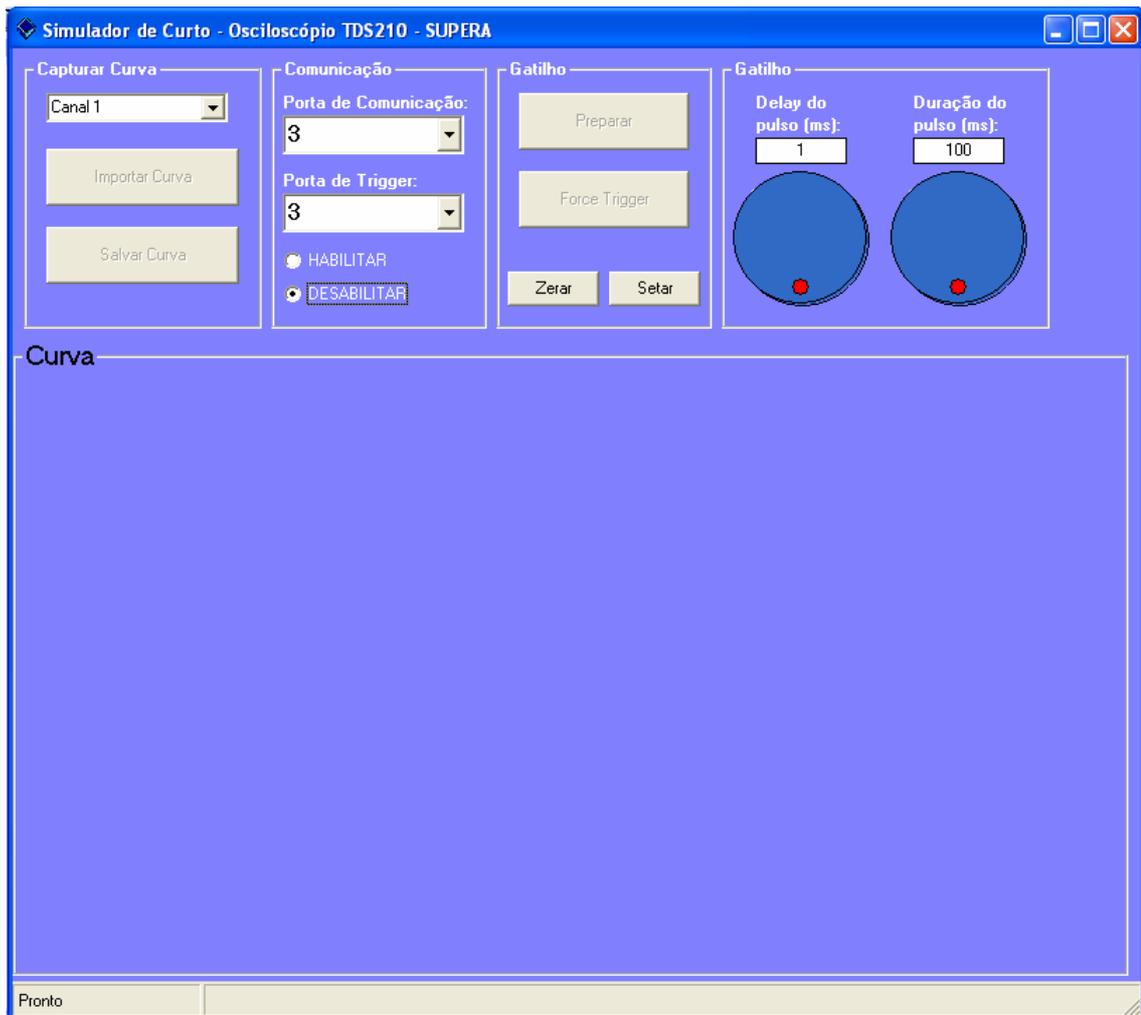


Figura 4.6: Janela de operação – *Software SUPERA*.

Abaixo são apresentadas as funcionalidades do *software*:

Campo Capturar Curva:

- Caixa de escolha de canal: Seleciona qual canal de tensão do osciloscópio deverá ser capturado (canal 1 ou canal 2);
- Botão Importar Curva: Comanda o osciloscópio para transmitir a curva lida para o *software SUPERA* através da comunicação serial;
- Botão Salvar Curva: Abre a janela para salvar a curva recebida pelo *software* em arquivo texto.

Campo Comunicação:

- Caixa de escolha de porta de comunicação: seleciona a porta serial do computador que será utilizada para a recepção da curva do osciloscópio;

- Caixa de escolha de porta de *trigger*: seleciona a porta serial do computador que será utilizada para o gatilhamento do curto-circuito;
- Opções habilitar e desabilitar: Habilita ou desabilita as portas seriais selecionadas acima.

Campo Gatilho:

- Botão Preparar: Envia um comando para o osciloscópio se preparar para captura da onda;
- Botão Force *Trigger*: Envia um comando para o osciloscópio capturar a onda no momento do curto-circuito;
- Botões Zerar e Setar: Habilita e desabilita manualmente a saída serial que provoca o curto-circuito;
- Cursor *delay* do pulso: Seleciona o tempo em milissegundos entre o momento do curto-circuito e o início da leitura da onda pelo osciloscópio (*trigger*);
- Cursor duração do pulso: Seleciona a duração do período que a interface de gatilhamento manterá o curto-circuito no circuito de teste.

Campo Curva:

- Mostra a curva capturada do osciloscópio;

4.4 *Software* de Tratamento de Curvas

As curvas de tensão capturadas pelo *software* SUPERA durante os ensaios geralmente apresentam-se com ruídos em sua amplitude, os quais são causados pelos ruídos naturais da rede, pelos ruídos inerentes aos canais de entrada do osciloscópio e pela perda de resolução que os valores da curva sofrem durante o processo de comunicação entre o osciloscópio e o computador.

Percebe-se que quanto menor é a amplitude da curva capturada, maior é a influência do ruído na interpretação dos resultados, o que prejudica consideravelmente a análise da corrente que passa sobre o dispositivo limitador de corrente em situações de

baixa corrente. A Figura 4.7 mostra uma onda de tensão típica coletada pelo osciloscópio.

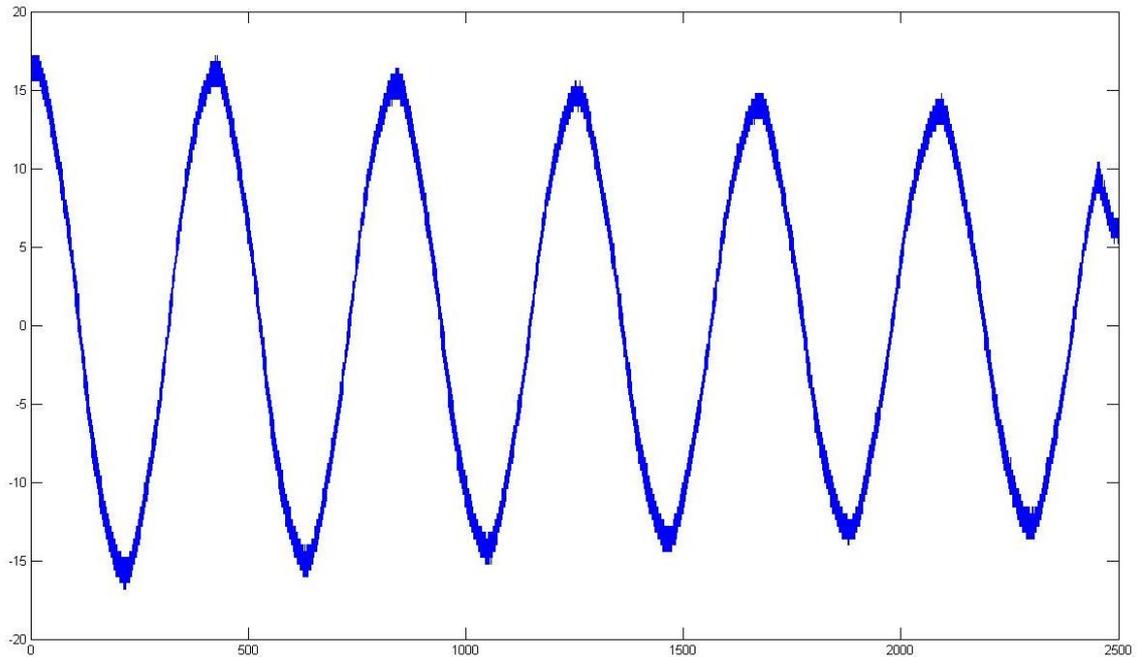


Figura 4.7: Exemplo de curva de tensão capturada do osciloscópio.

Como é possível perceber, a curva possui ruídos em toda sua extensão prejudicando, principalmente, a determinação do seu valor de pico devido ao engrossamento da onda. Estes ruídos são indesejáveis já que o objetivo de todo o instrumental é detectar variações de resistividades da ordem de centésimos de ohms nas cerâmicas supercondutoras. Em outras palavras, a amplitude dos ruídos não pode ser superior à amplitude da queda de tensão causada pela pequena variação de resistência do dispositivo limitador de corrente.

Para se amenizar este efeito e diminuir a influência dos ruídos sobre a análise do desempenho do supercondutor, todas as curvas são tratadas em ambiente Matlab® antes da análise.

As curvas são salvas em formato texto (.txt) pelo *software* SUPERA e são importadas pelo Matlab® como matrizes de dados. Após importadas, uma rotina especial chamada *shifter_manual* é executada e, como resultado, a onda de corrente do teste com o limitador e a onda de corrente do teste sem o limitador são filtradas e suas fases são ajustadas para torná-las sobrepostas, disponibilizando-as para a análise da limitação de corrente ocorrida.

Após a filtragem feita via Matlab® é possível se obter uma onda muito mais pura e útil para os fins de comparação como pode ser verificado na Figura 4.8.

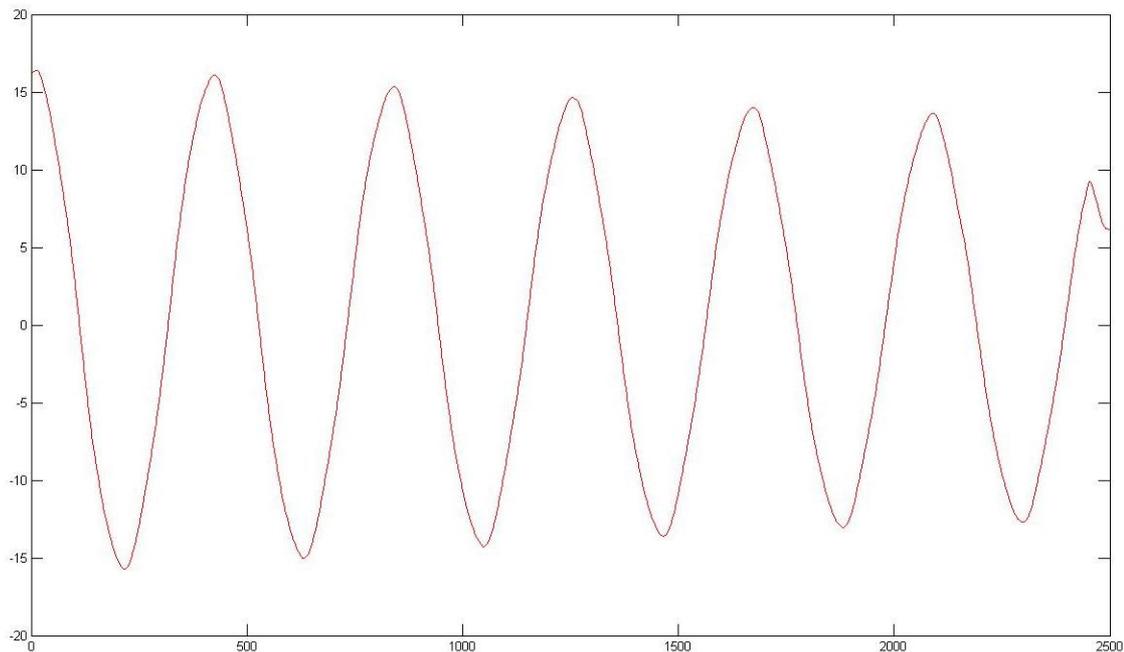


Figura 4.8: Exemplo de curva de tensão capturada do osciloscópio após tratamento em ambiente Matlab.

Para se demonstrar a coerência da curva filtrada em relação à curva original, a Figura 4.9 demonstra as duas curvas sobrepostas em um determinado espaço de tempo.

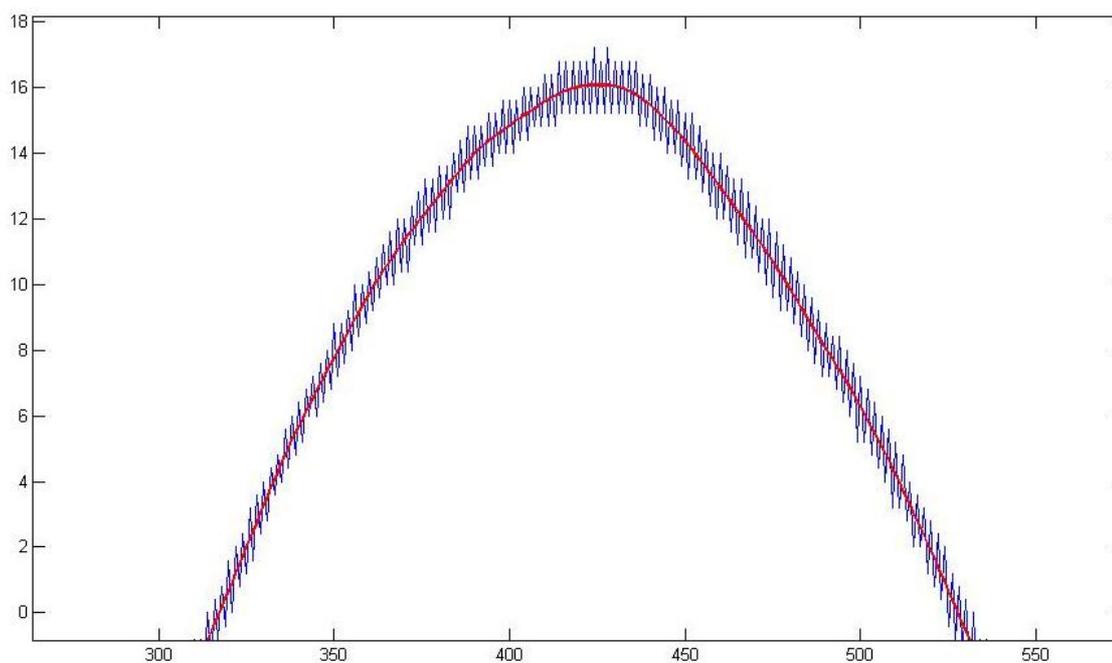


Figura 4.9: Curva antes do tratamento (azul) sobre curva após tratamento (vermelha).

É possível verificar que a curva filtrada (curva em vermelho) representa uma interpolação da curva real coletada do osciloscópio (curva em azul) em cada intervalo de tempo.

Capítulo 5: Projeto do Dispositivo Limitador de Corrente de Falta Supercondutor

5.1 Introdução

Um dos principais objetivos na concepção deste novo projeto de limitador de corrente supercondutor é o aumento da resistência de transição da cerâmica supercondutora. Geralmente este tipo de limitador apresenta uma variação de resistência pequena (da ordem de décimos de ohm), o que é indesejável para os propósitos de limitação de corrente. Ao mesmo tempo, existe uma necessidade de elevar o nível de corrente de operação do dispositivo para aproximar o limitador das condições de funcionamento dos circuitos práticos utilizados no dia a dia.

5.2 Dispositivo Limitador por Cerâmica Tipo Paralelepípedo

Com a intenção de se resolver o primeiro problema, ou seja, aumentar a resistência de transição do dispositivo, foi proposto um arranjo no qual a dimensão longitudinal da cerâmica supercondutora utilizada fosse a maior possível, dentro dos limites da infra-estrutura disponível, para provocar uma maior queda de tensão durante o momento do curto-circuito.

5.2.1 Projeto

Usou-se uma cerâmica supercondutora disponível com base de ítrio de dimensões apresentadas na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Dados do supercondutor tipo paralelepípedo.

Composição	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
Seção	4 mm^2
Comprimento	32 mm

Para a preparação do conjunto supercondutor e contatos, a cerâmica deve ser colada sobre um corpo de cobre isolado com verniz e suas extremidades devem ser pintadas com tinta prata para estabelecimento dos contatos elétricos. Sobre as regiões pintadas com tinta prata, ponteiros também de prata devem ser posicionadas e pressionadas, através de um conjunto de mola e parafuso, para estabelecer um melhor contato elétrico.

Após a preparação final do conjunto descrito, o corpo de cobre deve ser fechado e selado através de uma capa externa também de cobre. O esquemático do dispositivo pode ser verificado na Figura 5.1.

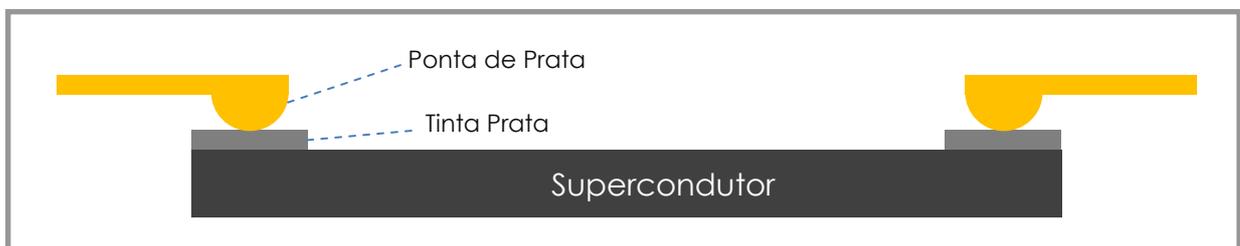


Figura 5.1: Arranjo para cerâmica tipo paralelepípedo.

5.2.2 Execução

O projeto descrito foi executado na prática conforme a Figura 5.2:

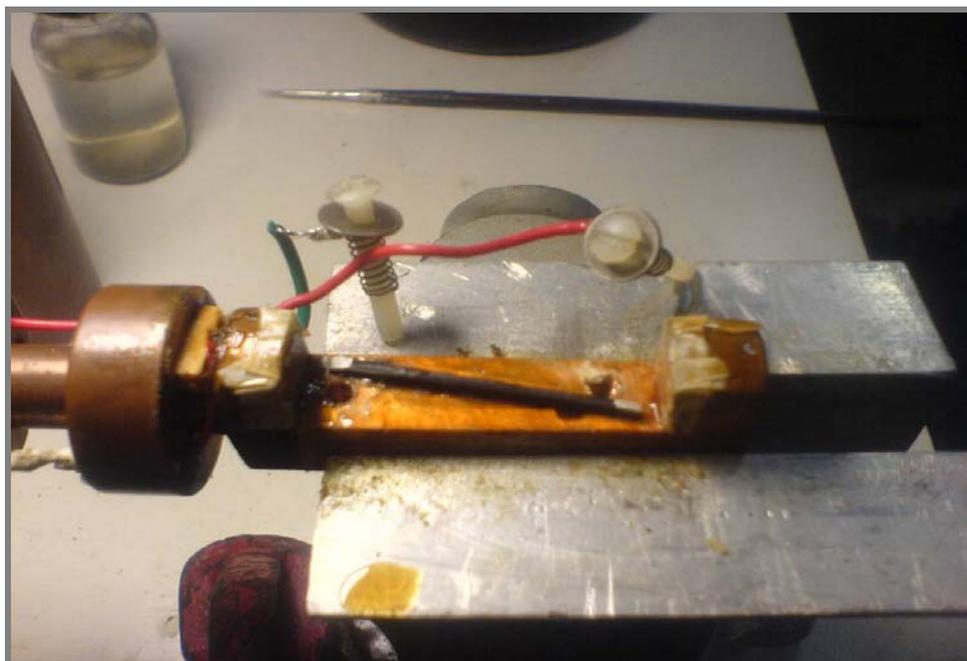


Figura 5.2: Execução do dispositivo com cerâmica tipo paralelepípedo.

Uma montagem com parafusos de nylon, molas e arruelas foi utilizada para manter pressionadas as pontas de prata sobre as extremidades do supercondutor. Fios soldados às arruelas são utilizados para conduzir a corrente que flui pela cerâmica supercondutora para fora do criostato. Depois de fechada a ponta, todo o conjunto foi mergulhado no criostato e resfriado até 77K sob nitrogênio líquido.

5.2.3 Testes e Resultados

O dispositivo desenvolvido foi resfriado e, durante este processo, a resistência do conjunto foi continuamente monitorada com o auxílio de um micro-ohmímetro. Durante os testes com corrente contínua, a resistência do dispositivo também foi medida. As seguintes observações são relevantes:

a) Durante o processo de resfriamento, a resistência do conjunto não assumiu valores decrescentes, como era de se esperar à medida que a cerâmica entrasse no estado supercondutor.

b) A resistência medida do dispositivo aumentou bastante durante o processo de resfriamento, indicando que a contração do conjunto interfere na pressão de contato das pontas e no deslocamento relativo das mesmas.

c) Vários testes foram realizados, entretanto, todos eles demonstraram uma forte variação da resistência total do dispositivo de acordo com a corrente sob a qual o dispositivo era submetido durante os testes sob corrente elétrica.

A Figura 5.3 apresenta a variação de resistência num teste realizado em uma cerâmica tipo paralelepípedo montada sobre a ponta de cobre e demonstra uma tendência decrescente da resistência total do dispositivo à medida que a cerâmica é submetida a níveis de correntes diferentes.

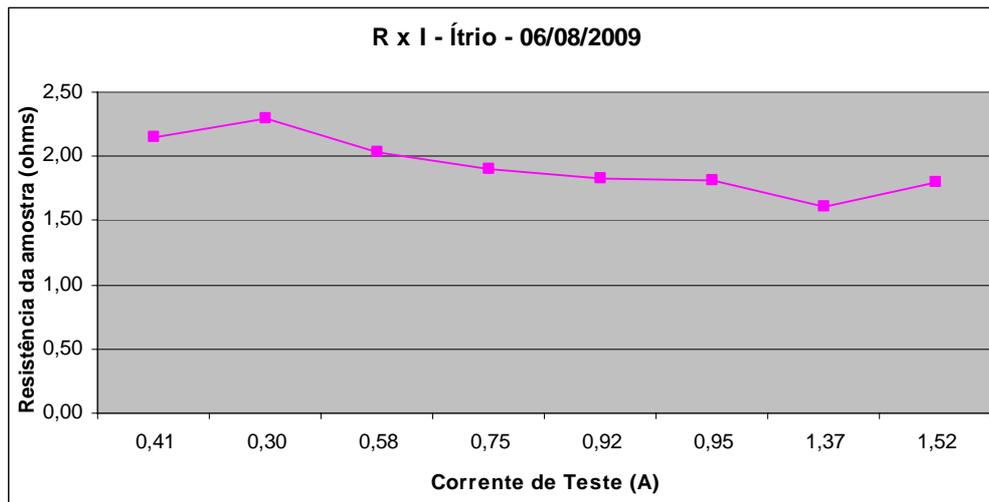


Figura 5.3: Gráfico de resistência do dispositivo X corrente de teste – Teste realizado em 06/08/2009.

Como é possível perceber na Figura 5.3, para uma faixa de corrente curta (410mA a 1,52A), a resistência da cerâmica supercondutora variou entre 1,61 Ω e 2,29 Ω . Além disso, a variação ocorrida foi contrária à natureza do supercondutor, ou seja, a resistência do dispositivo decresceu à medida que a corrente que passava sobre o mesmo aumentava e se aproximava da corrente crítica da cerâmica.

Outro teste realizado com uma outra cerâmica feita do mesmo material resultou na curva da Figura 5.4. É possível observar que desta vez, mesmo uma variação de corrente bem curta (110mA a 420mA) resultou em uma variação de resistência entre 3,10 Ω e 4,63 Ω , novamente com tendência decrescente com relação ao aumento da corrente.

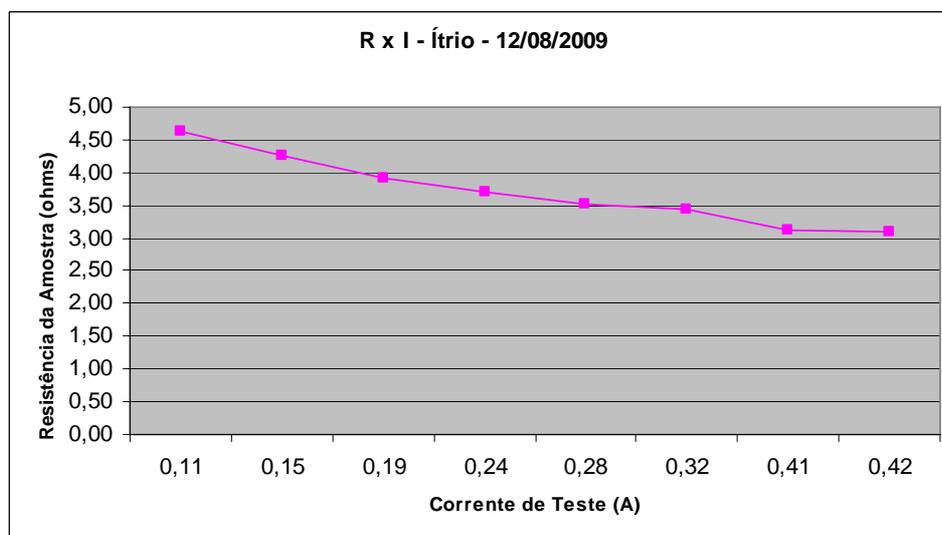


Figura 5.4: Gráfico de resistência do dispositivo X corrente de teste – Teste realizado em 12/08/2009.

Mais um teste realizado com outra cerâmica feita do mesmo material resultou no comportamento representado pelo gráfico na Figura 5.5. Desta vez, uma variação de corrente entre 30mA e 700mA resultou em uma variação de resistência entre 4,59 Ω e 9,62 Ω , novamente com tendência decrescente com relação ao aumento da corrente.

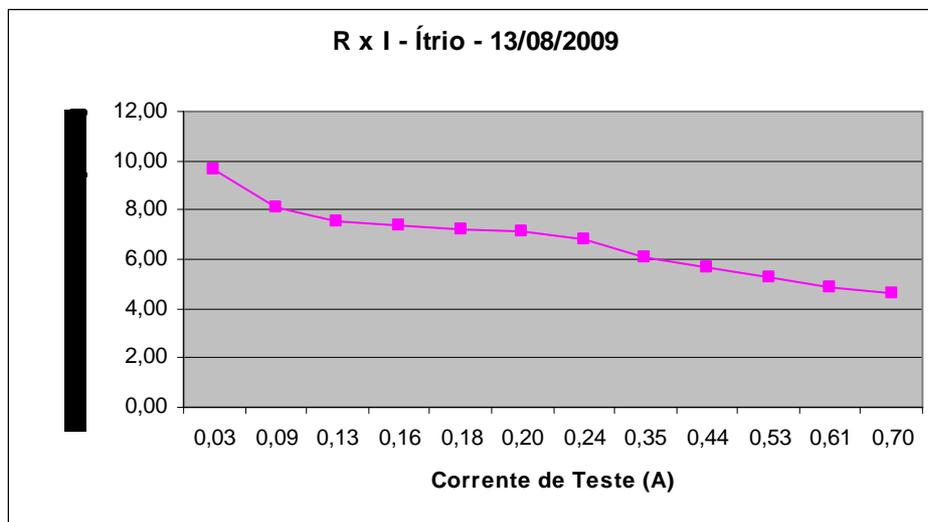


Figura 5.5: Gráfico de Resistência do Dispositivo X Corrente de Teste – Teste realizado em 13/08/2009.

Alguns outros experimentos foram realizados com esta topologia e foi verificado que se o nível de corrente de teste continua crescendo, a resistência medida do dispositivo limitador continua diminuindo até um ponto em que ela cresce novamente para valores significativamente mais altos, cerca de 10 vezes o valor da resistência inicial.

5.2.4 Análise dos Resultados

O comportamento apresentado pelo dispositivo ao variar sua resistência total durante os testes com corrente provou ser um obstáculo que impossibilita a análise de sua operação. Este comportamento é contrário às características conhecidas dos elementos supercondutores, pois a resistência apresentada pelo dispositivo deveria aumentar durante o aumento da corrente de testes, e não diminuir.

Foram realizados, então, testes de corrente com o dispositivo aberto e fora do criostato. No momento da passagem da corrente pela cerâmica, foi possível observar a

vaporização do solvente orgânico da tinta prata. Mesmo para correntes baixas (cerca de 500mA) a vaporização observada foi bem acentuada.

Por fim, foi concluído que a variação de resistência em função da corrente de teste apresentada pela cerâmica decorre da variação do volume da tinta prata entre a ponta e o supercondutor e também devido à progressiva acomodação da ponta sobre a tinta. A cada teste, cada vez mais solvente orgânico é vaporizado e o que sobram são as partículas de prata com concentração cada vez maior, contribuindo, assim, para a melhoria momentânea da condutividade apresentada pela parte decrescente da curva de resistência *versus* corrente levantada. Ao final deste processo, todo o solvente orgânico entre a ponta e o supercondutor é evaporado e a ponta de prata entra em contato direto com a superfície do supercondutor. Quando isto acontece, a resistência do dispositivo cresce a valores muito altos, entre 10 e 10^5 vezes o valor da resistência original.

Conforme pode ser observado na Figura 5.6, a alta concentração de corrente elétrica no ponto de contato entre a ponta de prata e a tinta prata provoca a vaporização da tinta.

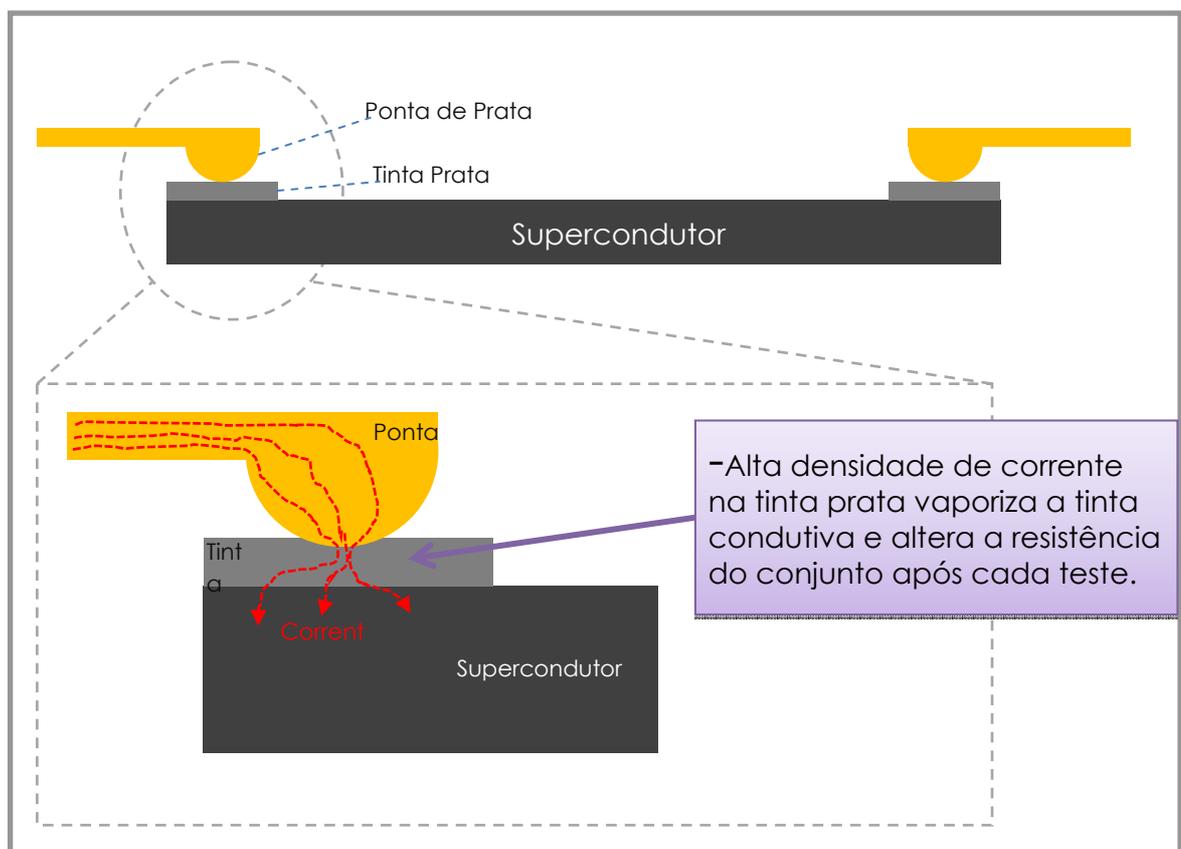


Figura 5.6: Representação da passagem da corrente na ponta tipo paralelepípedo antes da vaporização.

Após vários ciclos de vaporização, a ponta de prata entra em contato direto com a cerâmica supercondutora, como mostra a Figura 5.7.

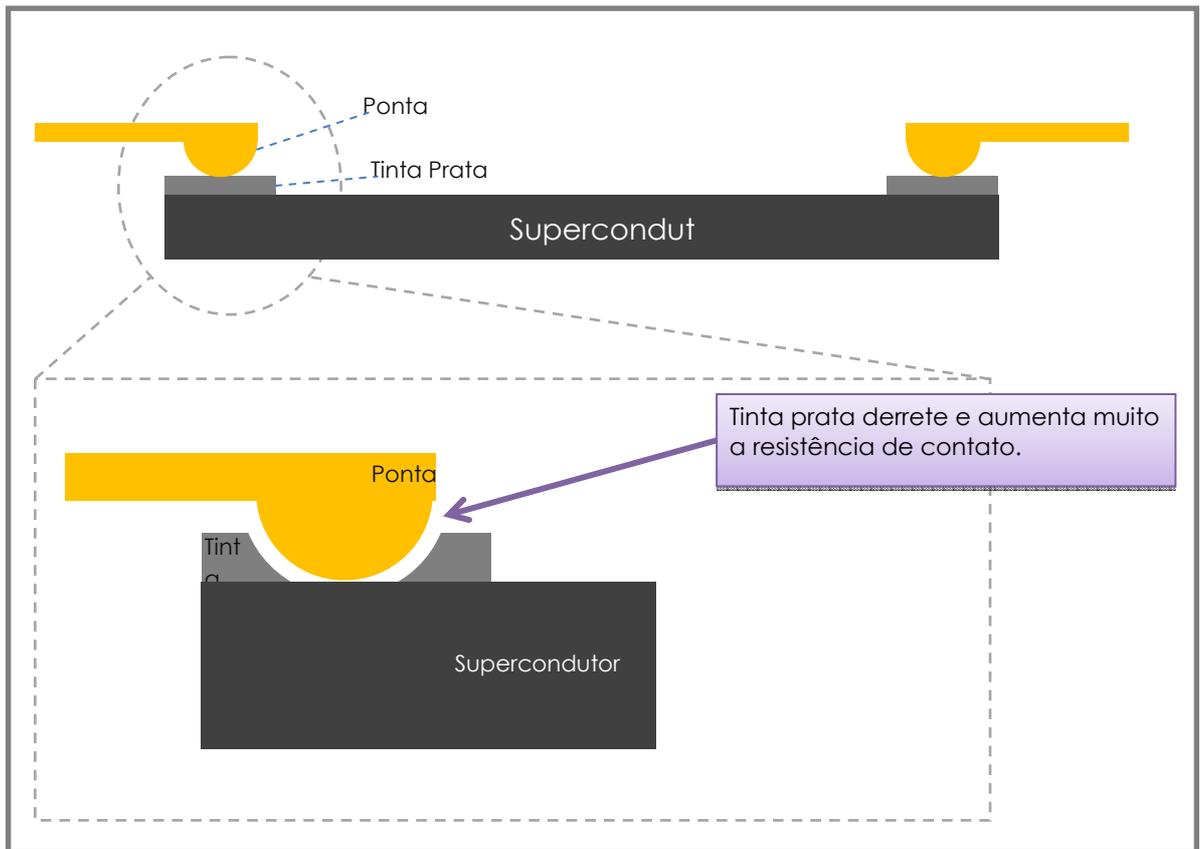


Figura 5.7 – Representação da ponta tipo paralelepípedo após a vaporização.

Concluiu-se, portanto, que o arranjo das pontas de prata para uma cerâmica tipo paralelepípedo não é operacional devido à reduzida área de contato entre as pontas de prata e a camada de tinta prata. Além disso, o fato da resistência de contato aumentar durante o processo de resfriamento do dispositivo indica que, de alguma forma, a contração do conjunto altera a condição dos contatos pressionados contra a cerâmica supercondutora.

5.3 Dispositivo Limitador do Tipo Camada Depositada

O dispositivo limitador de corrente supercondutor do tipo camada depositada é uma evolução do primeiro dispositivo apresentado e se propôs a resolver o problema da alta concentração de corrente na tinta condutiva e também apresentar uma cerâmica de alta resistência elétrica durante o momento da limitação.

A cerâmica supercondutora utilizada é composta por um grosso substrato de um material mal-condutor elétrico com uma finíssima camada supercondutora de 100 microns de espessura em sua face superior. Esta camada é depositada sobre o substrato através do método conhecido como *laser ablation*.

O objetivo de se utilizar uma camada tão fina de supercondutor é diminuir a sua corrente crítica e aumentar a resistência total do dispositivo durante o período da limitação de corrente.

5.3.1 Projeto

Usou-se uma cerâmica supercondutora com base de Rênio conforme dados apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Dados do supercondutor tipo camada depositada.

Composição	Filme de $\text{Re}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{5+x}$ sobre substrato de $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
Seção	100 microns por 6 mm
Comprimento	20 mm

A cerâmica é posicionada sobre o corpo de cobre isolado com verniz apresentado no modelo anterior e as extremidades da face supercondutora são pintadas com tinta prata.

Com o objetivo de resolver o problema da alta concentração de corrente na tinta prata, uma folha de Índio de cerca de 0,5 mm de espessura é posicionada entre as pontas de prata e as extremidades pintadas com a tinta condutiva.

O contato entre a ponta de prata e a folha de Índio é muito mais resistente à passagem de corrente do que o contato entre a ponta e a tinta prata. Além disso, devido ao fato da folha de índio ser moldável, a pressão da ponta sobre a folha arredonda a camada de Índio revestindo a superfície curva da ponta de prata e aumentando a área para passagem da corrente elétrica. A corrente agora passa uniformemente por toda a seção da folha de Índio e chega à camada da tinta prata com uma densidade bem menor do que a do primeiro modelo, não causando a sua evaporação e mantendo as resistências de contato constantes.

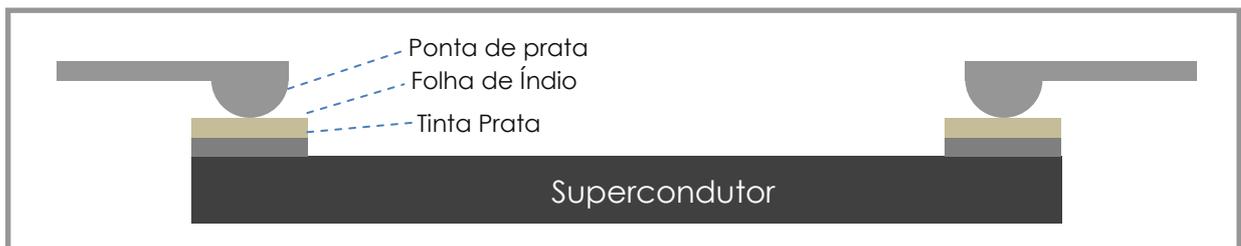


Figura 5.8: Representação do dispositivo limitador tipo camada depositada.

5.3.2 Execução

O projeto descrito foi executado na prática conforme a Figura 5.9:

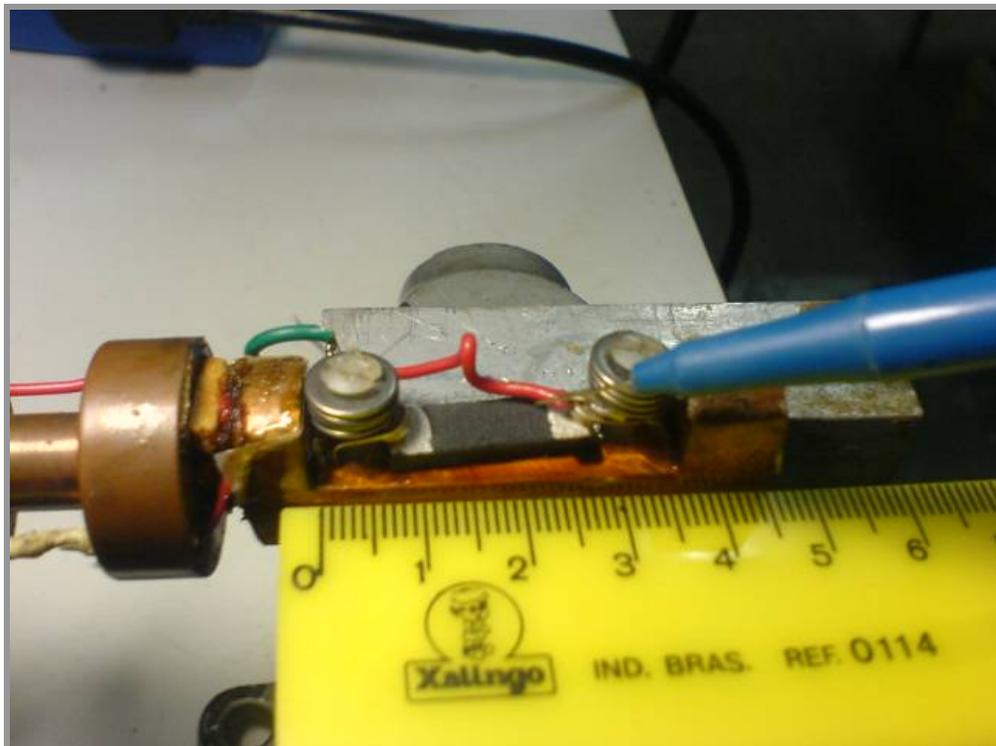


Figura 5.9: Execução do dispositivo com supercondutor tipo camada depositada.

A mesma estrutura de parafusos de nylon, molas, fios e pontas de prata utilizada no primeiro dispositivo foi novamente utilizada no dispositivo com a cerâmica de camada depositada. A diferença está na utilização das folhas de Índio para eliminar a evaporação da tinta prata.

Depois de fechada a ponta, todo o conjunto foi mergulhado no criostato e resfriado até 77K sob nitrogênio líquido.

5.3.3 Testes e Resultados

Assim como o primeiro dispositivo, o dispositivo limitador com a cerâmica de camada depositada foi resfriada e sua resistência monitorada com um micro-ohmímetro durante este processo de resfriamento.

a) Assim como o primeiro modelo, durante o processo de resfriamento, a resistência do conjunto não assumiu valores decrescentes, como era de se esperar à medida que a cerâmica entrasse no estado supercondutor;

b) Diferentemente do primeiro modelo, a resistência medida do dispositivo permaneceu praticamente constante durante o resfriamento, o que indica que houve uma melhora no conjunto de pressão das pontas sobre o supercondutor;

c) Os testes realizados com corrente contínua demonstraram que por uma faixa de corrente considerável, a resistência do conjunto não sofreu alteração significativa, indicando que a utilização da folha de Índio para diminuir a concentração de corrente sobre a tinta prata foi eficaz;

d) Os testes também demonstraram que após determinado nível de corrente, a resistência da cerâmica aumenta para infinito, indicando que o supercondutor ficou aberto, e verificou-se que a cerâmica foi danificada no ponto imediatamente após o fim da tinta prata.

Conforme pode ser verificado na Figura 5.10, para a faixa de corrente entre 72mA e 1,3A a resistência da cerâmica permaneceu próxima a 1,25 ohms. Entretanto, caiu significativamente quando a corrente de teste subiu chegando até 2,1A.

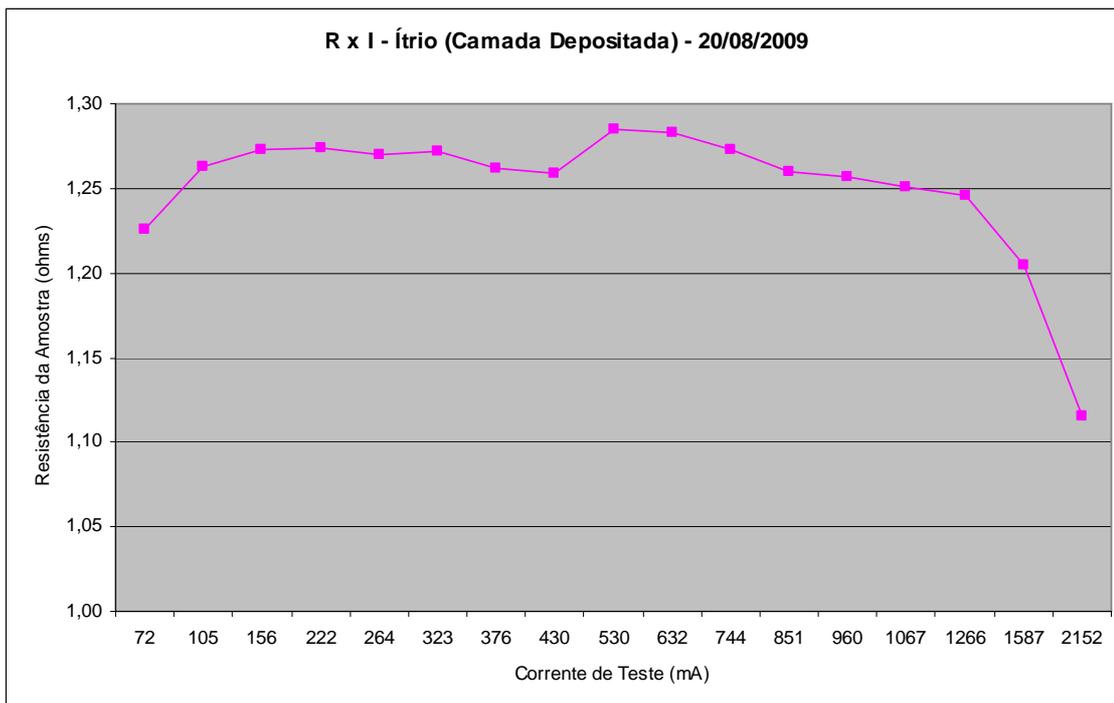


Figura 5.10: Gráfico de resistência do dispositivo X corrente de teste – Teste realizado em 20/08/2009.

Sérgio, na Figura 5.10 não é ítrio, acerte a legenda dentro da figura por favor.

Após este ponto, a cerâmica foi danificada na região adjacente à tinta prata na superfície supercondutora quando se tentou elevar a corrente de teste para valores acima de 3A.

5.3.4 Análise dos Resultados

O novo dispositivo provou ser mais eficiente no tocante à eliminação da evaporação da tinta condutiva, chegando a correntes bem maiores do que o primeiro dispositivo sem ter a resistência global do conjunto significativamente modificada. Entretanto, o dano do supercondutor após certo nível de corrente indica que o modelo ainda não é o mais apropriado para os propósitos do trabalho.

Como é possível verificar na Figura 5.11, a folha de Índio resolveu o problema da concentração de corrente que entra na camada superior da tinta prata. Além disso, como a folha de Índio tem uma boa maleabilidade, a superfície curva da ponta de prata molda a superfície de contato do Índio e aumenta a área de contato com a ponta, proporcionando, assim, um melhor contato.

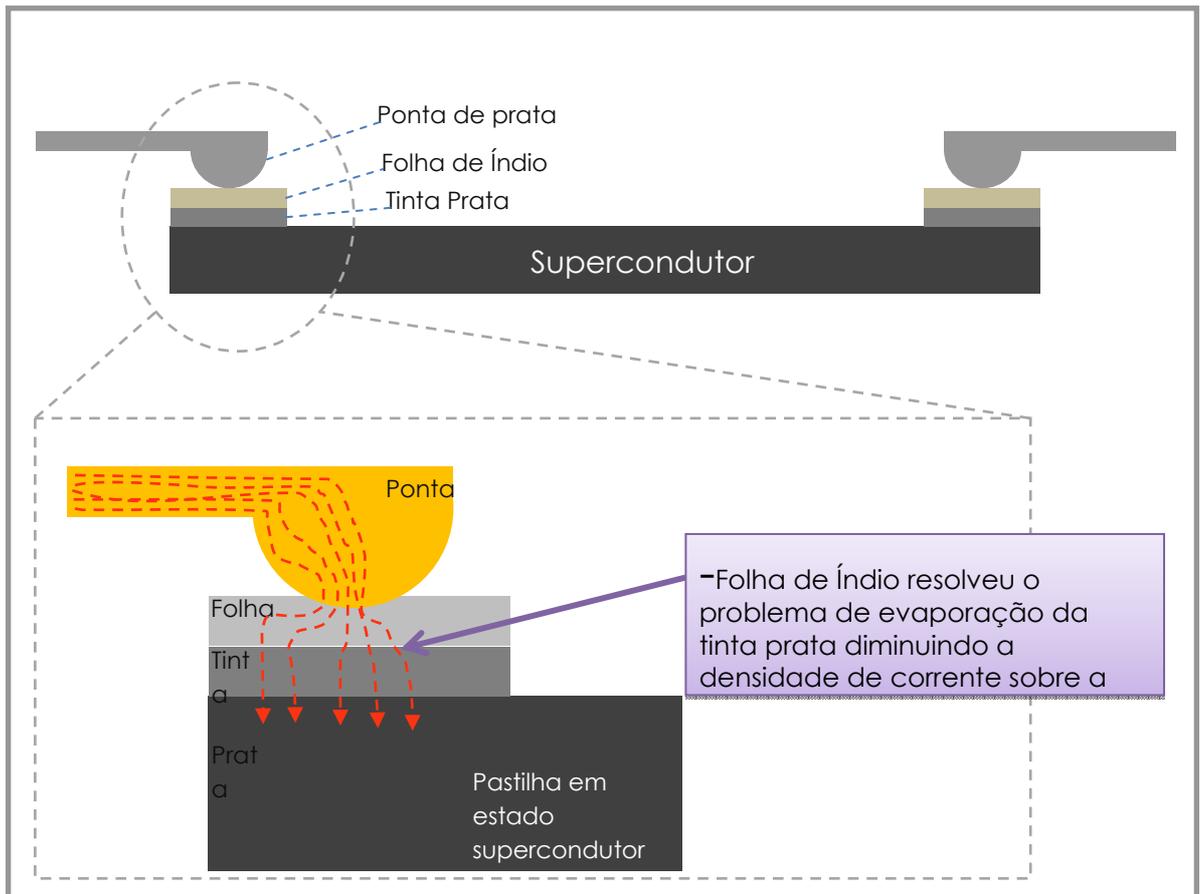


Figura 5.11: Distribuição da passagem de corrente no dispositivo tipo camada depositada com a cerâmica em estado supercondutor.

Enquanto a cerâmica está em estado supercondutor, a corrente flui mais uniformemente pela camada inferior da tinta prata, entrando na cerâmica do supercondutor com baixa densidade de corrente. Este comportamento é semelhante para diversos valores de corrente testados. Entretanto, quando a corrente atinge um determinado nível, a cerâmica do supercondutor passa a trabalhar no estado resistivo e a corrente agora tende a procurar a trajetória de menor resistência entre a ponta e a cerâmica supercondutora. Neste momento, toda a corrente se concentra no ponto mais próximo do fim da tinta prata, aumentando muito a densidade naquela seção, vaporizando a tinta prata e danificando o supercondutor apenas naquele ponto, como mostrado nas Figuras 5.12 e 5.13.

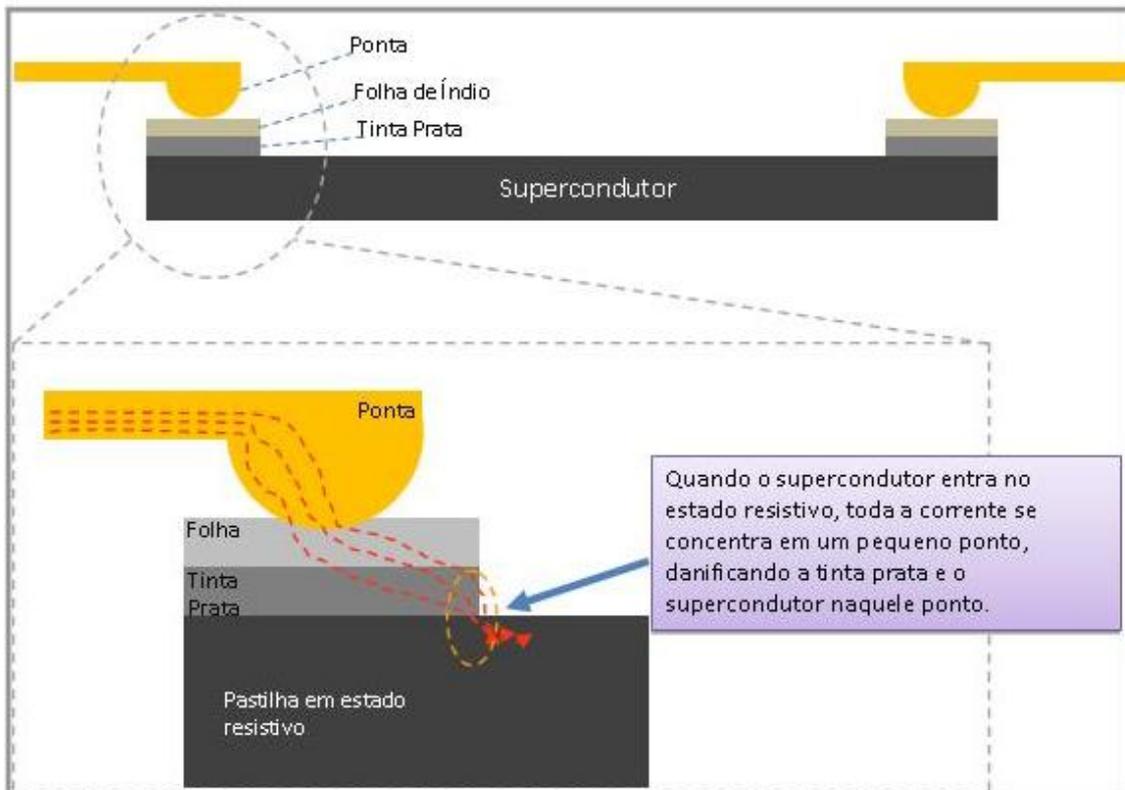


Figura 5.12: Distribuição da corrente no dispositivo tipo camada depositada com cerâmica em estado resistivo.

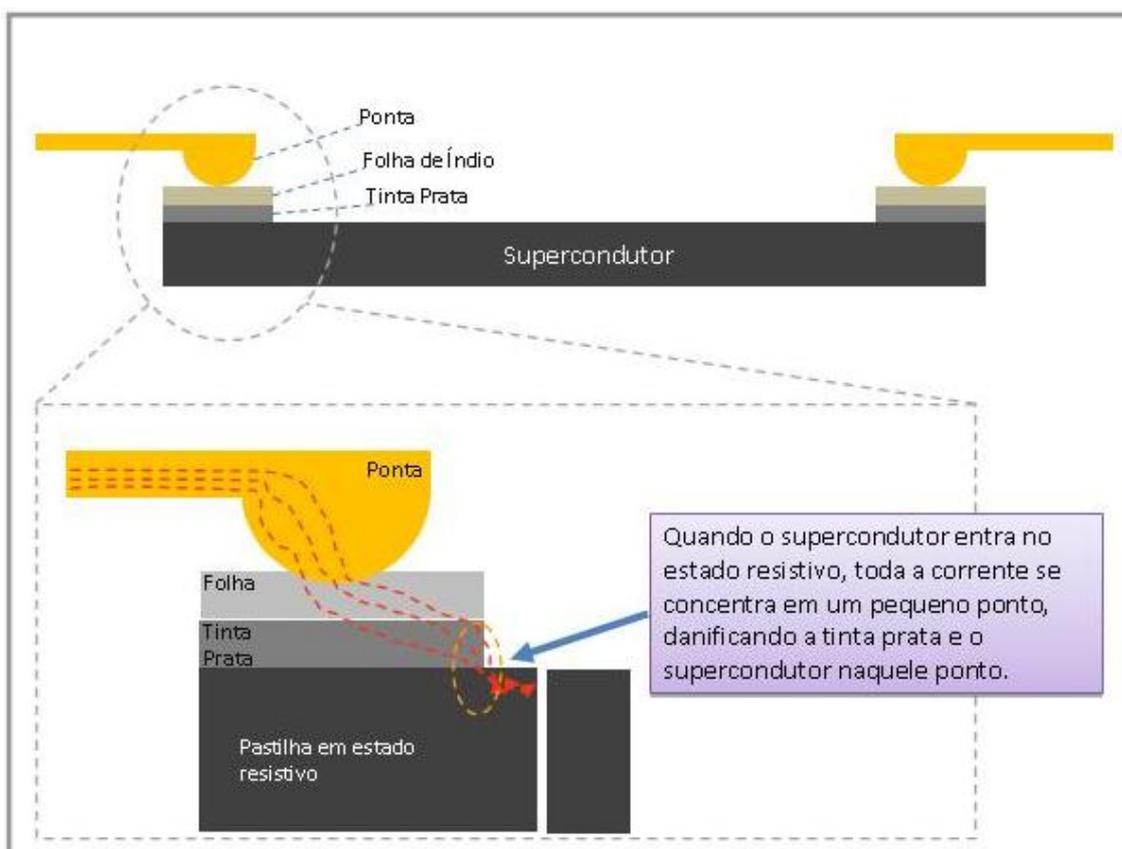


Figura 5.13: Distribuição da corrente no dispositivo tipo camada depositada com a pastilha em estado resistivo e o supercondutor danificado.

Por fim, foi verificado que o dispositivo utilizando supercondutor tipo camada depositada com utilização da camada de Índio apresenta uma evolução com relação à evaporação da tinta prata, entretanto não é operacional devido aos constantes danos à cerâmica do supercondutor devido à alta densidade de corrente na seção do supercondutor durante o momento da transição.

5.4 Dispositivo Limitador por Cerâmica Tipo Pilha

As tentativas anteriores de se conseguir aumentar a resistência de limitação do dispositivo através de uma cerâmica de pequena seção e grande comprimento provaram-se ineficazes principalmente devido ao método de injeção de corrente (pontas de prata) que provocavam um aumento na densidade de corrente nos pontos de contato.

Fez-se necessário criar um dispositivo que englobasse as seguintes características:

- Alta capacidade de transferência de corrente nas suas regiões de contato sem danificar os elementos de acoplamento (tinta condutiva) e sem gerar dissipação de calor elevada por efeito Joule;
- Baixa interferência da temperatura na resistência de contato, ou seja, insensibilidade à contração do dispositivo causada pelo resfriamento;
- Capacidade modular, ou seja, possibilidade de se montar várias cerâmicas associadas de maneira que se consiga uma resistência de transição mais alta possível;

Foi desenvolvido, então, o dispositivo tipo pilha que consiste em um dispositivo no qual são montadas uma ou várias cerâmicas cilíndricas supercondutoras fortemente pressionadas uma contra as outras, conforme mostrado na Figura 5.14.

5.4.1 Projeto

O dispositivo limitador tipo pilha possui, no seu núcleo, uma ou várias cerâmicas supercondutoras cilíndricas associadas em série fortemente pressionadas uma contra a outra.

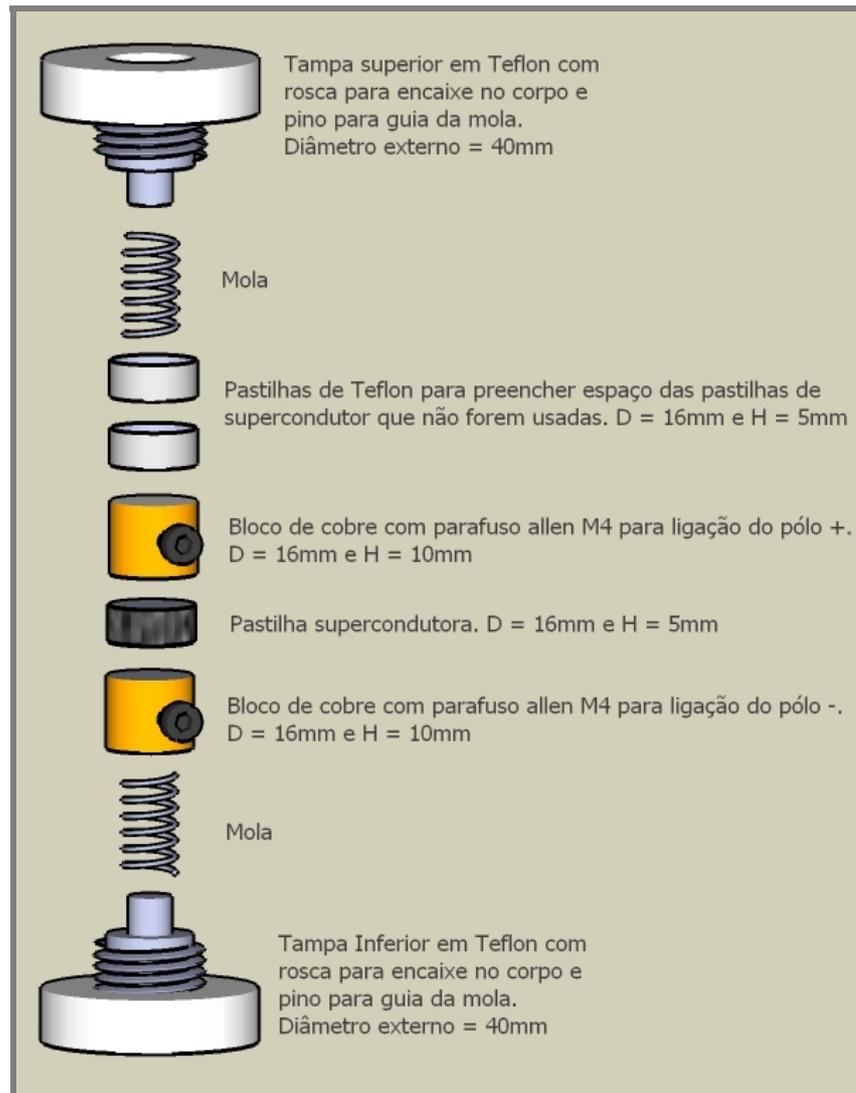


Figura 5.14: Vista explodida do limitador tipo pilha.

Envolvendo as pastilhas supercondutoras, estão os blocos de contato cilíndricos feitos em cobre. Um bloco se posiciona imediatamente acima do conjunto supercondutor, e o outro bloco é posicionado imediatamente abaixo das pastilhas. É através destes blocos que a corrente entra, passa pelas cerâmicas supercondutoras e sai do dispositivo com a ajuda de fios elétricos fixados através de parafusos.

Pastilhas de nylon no mesmo diâmetro das cerâmicas supercondutoras são utilizadas para preencher o espaço vazio entre o início e o fim do dispositivo e, também, para transmitir a força de compressão que mantém as pastilhas pressionadas. Adicionalmente, molas são instaladas para manter a compressão do conjunto e, por fim,

duas tampas com rosca são giradas no corpo do dispositivo até que a compressão necessária seja atingida.

Todo o dispositivo é montado em um corpo cilíndrico oco de nylon, como demonstrado na Figura 5.15. Este corpo possui um canal interno feito no mesmo diâmetro que as pastilhas supercondutoras de maneira que as mesmas são guiadas em seu interior de acordo com a pressão exercida pelas molas e pelas tampas com rosca.

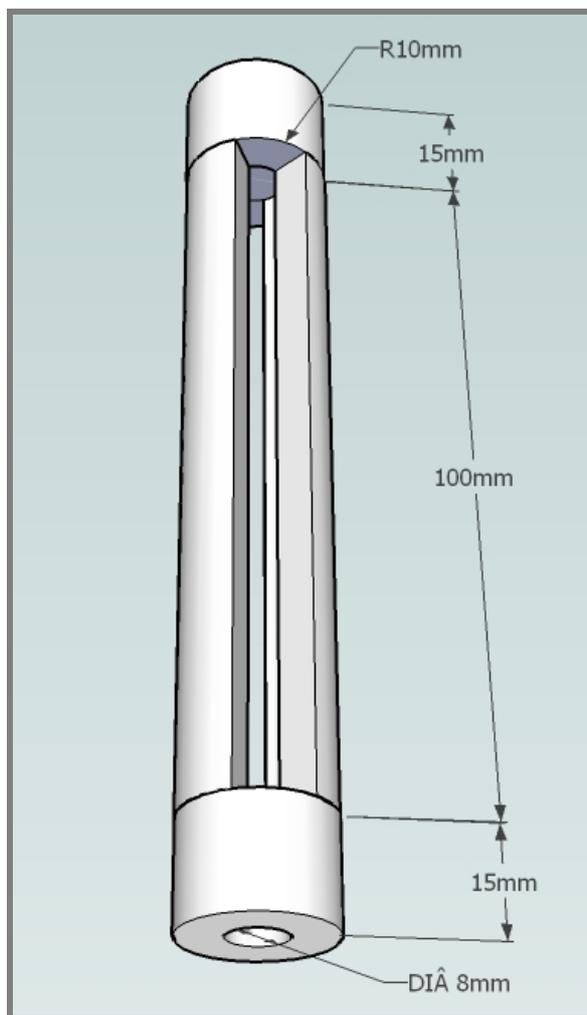


Figura 5.15: Corpo externo do dispositivo.

Todos os elementos são inseridos dentro do corpo de nylon e as tampas são fechadas proporcionando sustentação mecânica rígida para o conjunto e assegurando uma pressão de contato adequada para os elementos que conduzirão a corrente elétrica, conforme visto na Figura 5.16.

O dispositivo foi projetado com uma concepção modular, sendo possível utilizar tantas pastilhas supercondutoras quanto necessárias para atingir a resistência de

limitação de projeto. Na Figura 5.17 é apresentado o dispositivo com quatro cerâmicas supercondutoras.

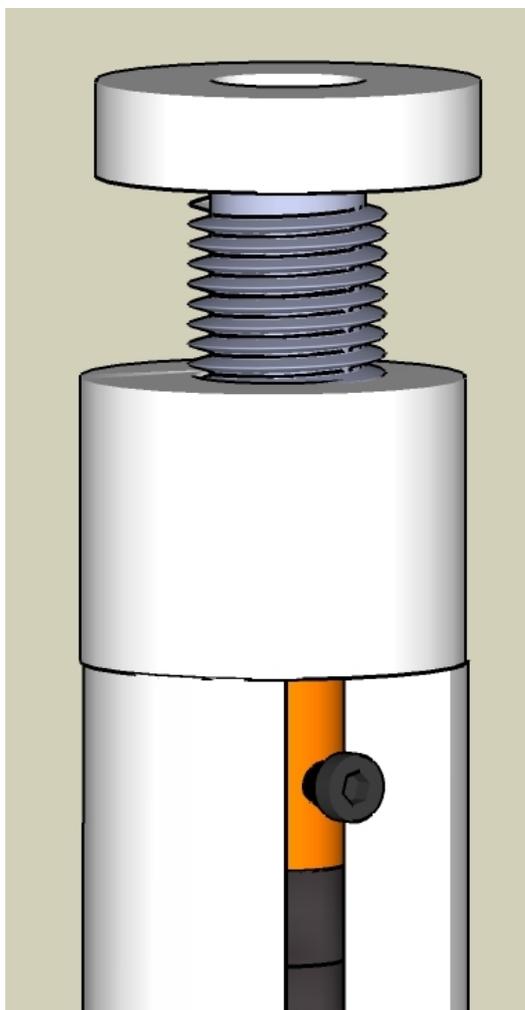


Figura 5.16: Vista da tampa superior do dispositivo com os elementos internos montados.

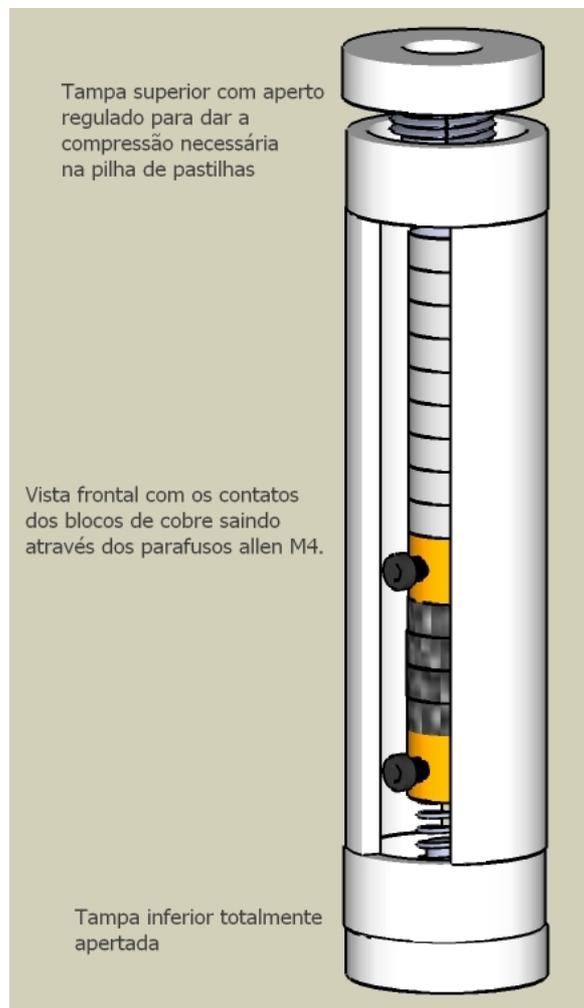


Figura 5.17: Conjunto montado com quatro pastilhas supercondutoras.

Este dispositivo em particular tem capacidade máxima de empilhamento de 16 pastilhas supercondutoras de 5mm de espessura, totalizando um comprimento máximo de 80mm de material supercondutor, como na Figura 5.18. Este grande comprimento do conjunto supercondutor é responsável por causar uma significativa variação de resistência no dispositivo, o que é uma das premissas básicas do projeto proposto por este trabalho.

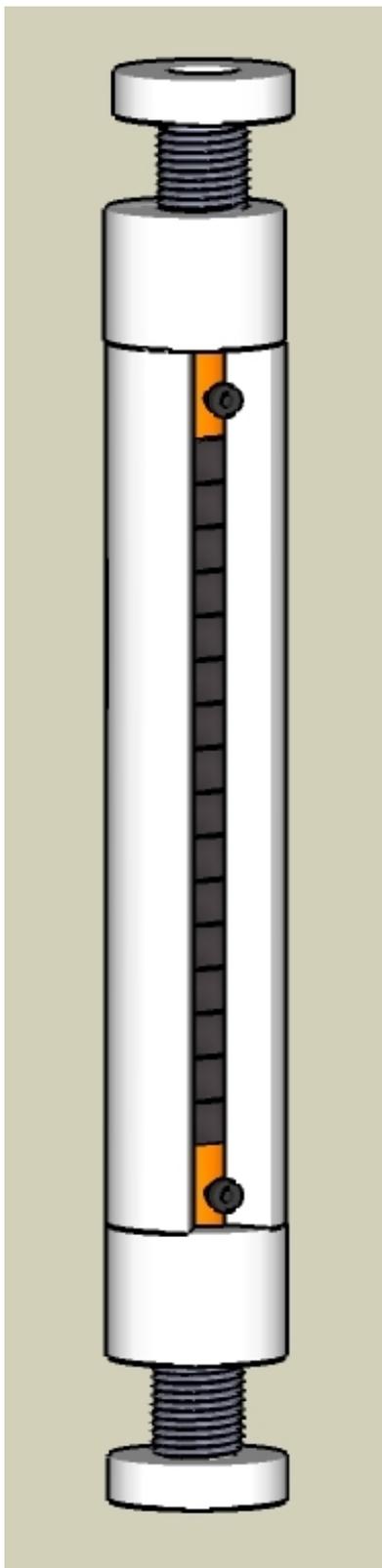


Figura 5.18: Conjunto montado com capacidade máxima de pastilhas supercondutoras.

5.4.2 Execução

De posse do projeto do dispositivo, a nova ponta foi fabricada em uma oficina de usinagem e montado na prática, como visto nas Figuras 5.19 e 5.20.



Figura 5.19: Dispositivo tipo pilha após construção.



Figura 5.20: Dispositivo tipo pilha após construção (vista explodida).

Foi construída também uma haste de nylon parafusada no dispositivo com o objetivo de inserir o mesmo no interior do criostato, como visto nas Figuras 5.21 e 5.22.



Figura 5.21: Dispositivo tipo pilha sendo inserido no criostato.



Figura 5.22: Dispositivo inserido no criostato.

5.4.3 Testes e Resultados

Prosseguindo com a metodologia adotada nas outras pontas, o dispositivo foi resfriado com uma pilha de sete pastilhas de ítrio em seu interior e sua resistência global foi monitorada com a ajuda de um micro-ohmímetro.

Durante todo o processo de resfriamento, o valor da resistência do dispositivo ficou inalterado. Foi, então, realizado o teste de corrente e obteve-se o comportamento apresentado na Figura 5.23:

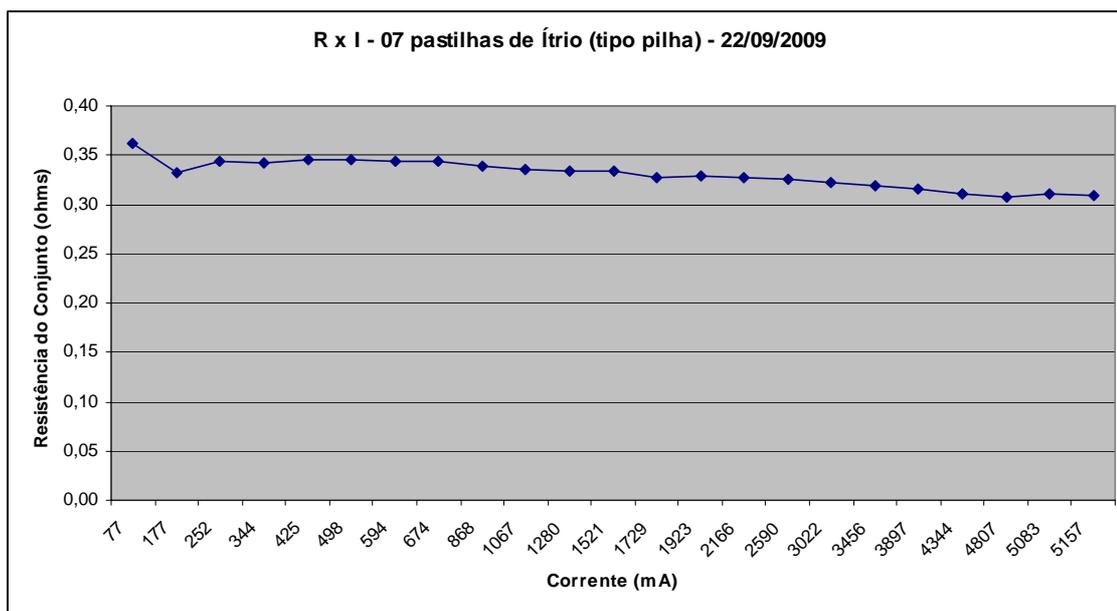


Figura 5.23: Resistência do dispositivo tipo pilha X corrente de teste – Teste realizado em 22/09/2009.

Pode-se verificar que, diferente dos modelos anteriores, uma variação bem mais significativa de corrente contínua injetada na cerâmica, causou uma variação muito pequena de resistência do dispositivo. No caso do dispositivo testado, as correntes de teste foram aumentadas gradativamente, partindo de 77 mA até 5,15 A. Entretanto, a resistência total da cerâmica iniciou-se em 0,36 ohms e, no fim dos testes, estabilizou em 0,31 ohms.

O dispositivo utilizado é mais robusto e insensível à passagem de correntes mais altas, em termos de resistência de contato. A pequena variação de resistência detectada à medida que a corrente de teste subia deve-se a evaporação da tinta condutiva e a acomodação das pastilhas do supercondutor baseado em ítrio.

A diferença deste arranjo com relação aos anteriores é que a cerâmica não foi danificada ao final do teste, ou seja, a resistência do conjunto não subiu a valores que indicassem que a cerâmica foi inutilizada.

Entretanto, vale destacar os seguintes:

- Durante o processo de resfriamento, não foi detectada nenhuma redução de resistência da cerâmica entre o momento em que a mesma se encontra em temperatura ambiente e o momento no qual a temperatura do supercondutor se encontra estabilizada com a temperatura do criostato (77K). De acordo com a teoria apresentada, a resistência do supercondutor deveria ser nula quando refrigerada abaixo da temperatura crítica da cerâmica, no caso, 110K.
- Durante os testes de corrente, a resistência também não apresentou mudanças à medida que o nível da corrente de teste era elevado. Isto também contradiz a teoria, segundo a qual é previsto que a resistência da cerâmica deveria aumentar à medida que a corrente que passa pelo supercondutor se aproxima de sua corrente crítica.

Como foi provado que a nova ponta resolveu os problemas críticos de evaporação da tinta condutiva e das superfícies de contato, restou apenas testar um supercondutor de composição diferente para se observar os comportamentos citados acima. Foi então retirada do dispositivo tipo pilha as sete pastilhas de supercondutores com base em ítrio e instalada apenas uma pastilha com base em mercúrio. Os resultados dos testes com corrente são demonstrados na Figura 5.24.

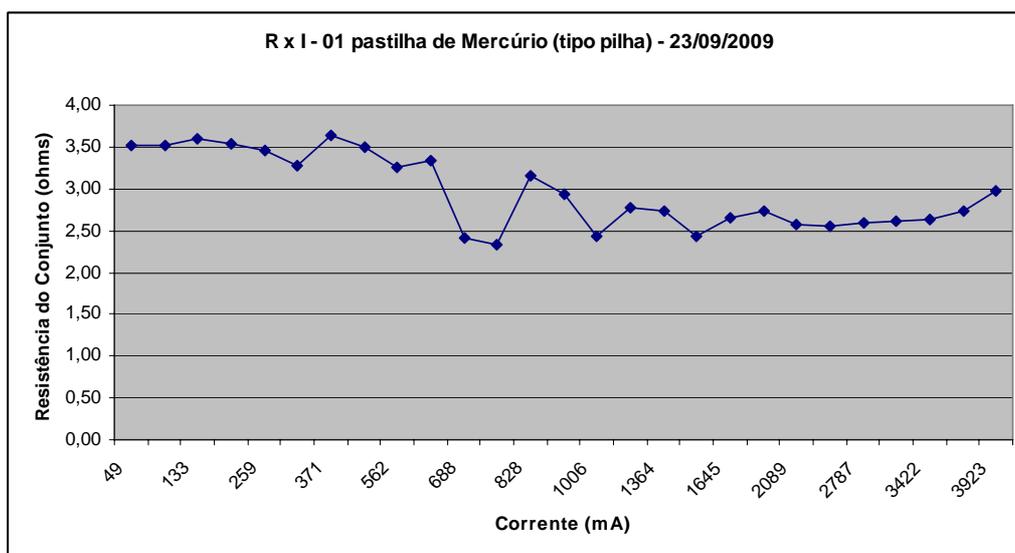


Figura 5.24: Resistência do dispositivo tipo pilha X corrente de teste – Teste realizado em 23/09/2009.

É possível observar que para uma gama de corrente de testes até cerca de 2 A, a resistência do conjunto varia bastante, entretanto, após este valor de corrente, a resistividade da cerâmica se estabiliza até crescer.

Foi observado que todas as cerâmicas testadas possuem esta primeira fase de variação de resistência, na qual a passagem da corrente evapora a tinta condutiva nos seus pontos mais concentrados e provoca uma acomodação da cerâmica. Também foi observado que após este período de acomodação, a resistividade do conjunto passa a não variar tanto à medida que a corrente é elevada, pois a cerâmica já se assentou em sua posição final.

Focando a análise da curva apenas na parte na qual a resistência da ponta encontra-se estabilizada, tem-se o comportamento apresentado na Figura 5.25.

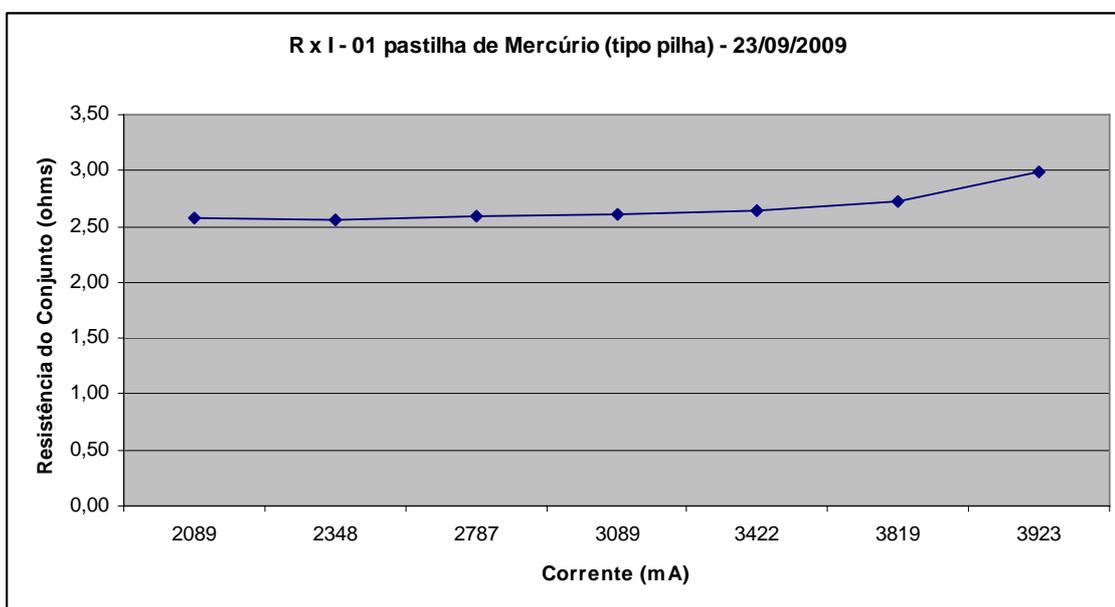


Figura 5.25: Gráfico de resistência do dispositivo tipo pilha X corrente de Teste – Teste realizado em 23/09/2009.

Pela primeira vez foi observada uma resposta coerente da resistência apresentada pelo dispositivo em função da variação de corrente sobre o mesmo. A análise não foi estendida para correntes mais altas devido à limitação da capacidade de corrente da fonte CC utilizada.

5.4.4 Análise dos Resultados

O dispositivo tipo pilha resolveu os problemas de evaporação da tinta condutiva e da concentração da corrente na ponta, provando que é o arranjo mais eficiente. Entretanto, verificou-se também que o supercondutor original proposto para realização dos testes, ou seja, o supercondutor com base em ítrio (YBCO) apresenta uma variação de resistência pequena quando entra no estado supercondutor comparada à resistência de contato conseguida. Este fato é confirmado quando o conjunto é resfriado e a resistência do dispositivo não se altera. Diferentemente do supercondutor com base em ítrio, a cerâmica de mercúrio, desde a primeira experiência, apresentou uma variação de resistência significativa e consistente durante o processo de resfriamento, cerca de 2 ohms de variação.

É válido destacar que mesmo o dispositivo com 7 pastilhas de supercondutor com base em ítrio associadas em série não causou nenhuma variação da resistência do conjunto durante o resfriamento e os teste com corrente enquanto apenas uma pastilha do supercondutor com base em mercúrio causou uma variação bastante significativa.

Portanto, ao final das análises apresentadas neste capítulo, todos os problemas do dispositivo e da cerâmica foram resolvidos, permitindo, assim, o início das análises com o sistema de limitação definitivo, ou seja, o dispositivo tipo pilha munido de supercondutores com base em mercúrio.

Capítulo 6: Limitador Supercondutor Resistivo Tipo Pilha Mono-Camada

6.1 Introdução

Neste capítulo, serão exploradas as características de operação do limitador tipo pilha utilizando um supercondutor de base em mercúrio.

O termo mono-camada advém do fato de ser utilizada apenas uma pastilha de supercondutor neste teste que servirá para levantar as características de operação do limitador utilizando-se apenas uma camada de cerâmica.

Graças à topologia modular do dispositivo desenvolvido, nos próximos tópicos será possível simular as características do limitador funcionando com várias camadas e os seus resultados poderão ser comparados com o limitador mono-camada.

Os testes apresentados nos capítulos anteriores foram todos realizados com corrente contínua devido à facilidade de análise dos resultados. Outro motivo é o fato de que o foco daquelas análises era escolher o melhor tipo de dispositivo e a cerâmica supercondutora mais adequada, e não testar o desempenho do limitador em operação real.

Neste capítulo, o conjunto limitador será testado em condições mais realistas, ou seja, com corrente alternada e níveis de correntes mais próximos dos níveis práticos de operação dos circuitos elétricos residenciais e industriais.

6.2 Testes

No Capítulo 4 foram demonstrados os circuitos e métodos utilizados para a medição das características dos dispositivos limitadores de corrente.

Para se obter a maior fidelidade possível nas análises com corrente e para se isolar o efeito da mudança de resistência da cerâmica em decorrência da vaporização da tinta prata, as medições são realizadas seguindo as seguintes etapas do fluxograma mostrado na Figura 6.1.

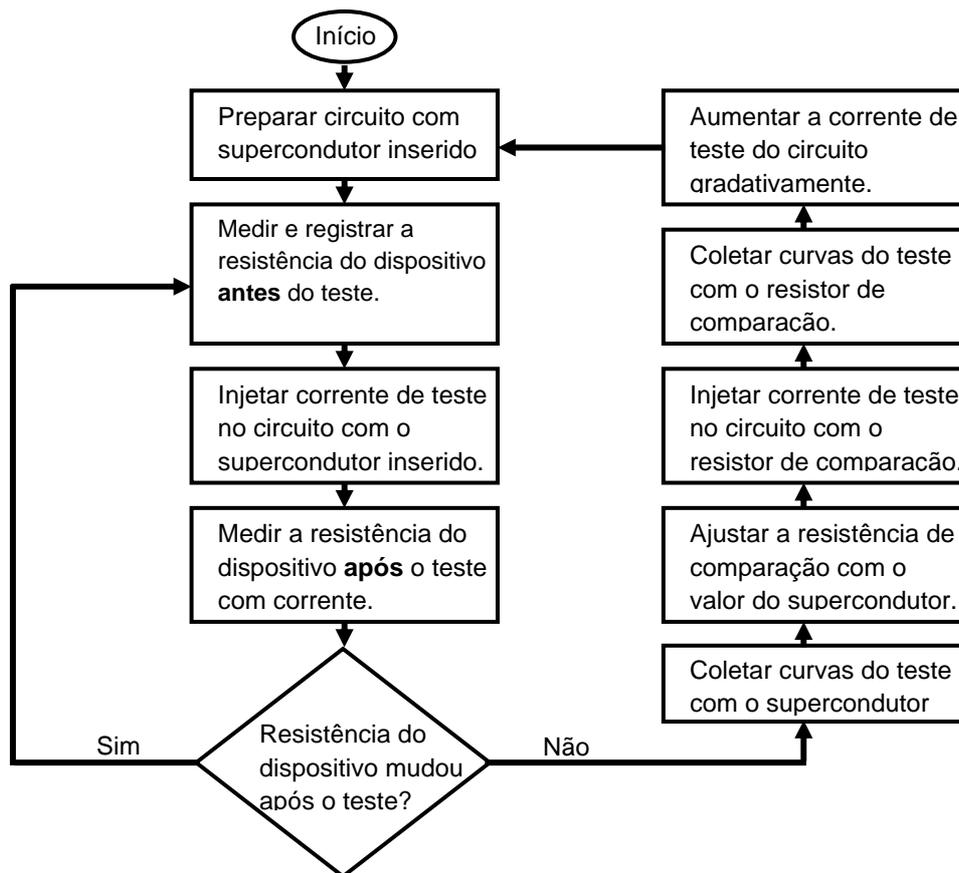


Figura 6.1 – Fluxograma de testes com corrente do limitador tipo pilha.

O teste de injeção de corrente no circuito com o supercondutor é conduzido tantas vezes quanto necessário até que ocorra a situação na qual as resistências do dispositivo limitador sejam idênticas quando medidas antes e após a passagem da corrente pelo conjunto. Isto garante que a tinta prata não vaporizou e a pastilha não se movimentou dentro do dispositivo e, apenas após esta confirmação, ocorre a injeção de corrente no circuito equipado com o resistor de comparação para depois serem avaliadas as curvas de corrente provenientes de ambos os testes.

6.3 Resultados

Foram realizados vários testes de injeção de corrente com o limitador monocamada e o nível de corrente foi elevado gradualmente.

A cerâmica utilizada em todos os teste é de mercúrio com composição $\text{Hg}_{0,8}\text{Re}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,7}$.

A Tabela 6.1 apresenta alguns valores relacionados com o teste 01.

Teste 01: Teste de limitação de corrente real com dispositivo tipo pilha na configuração mono-camada com corrente de pico de 630 mA

Tabela 6.1 – Teste 01 com corrente de pico de 630 mA.

R_{sc} antes e após a medida: 1,332 Ω
I_{pico} circuito sem o limitador: 630mA
I_{pico} circuito com o limitador: 630mA
R_{sc} máximo de transição: 0 Ω
Limitação de corrente: 0 %

A Figura 6.2 mostra o comportamento da corrente no tempo para teste realizado com corrente de pico de 630 mA.

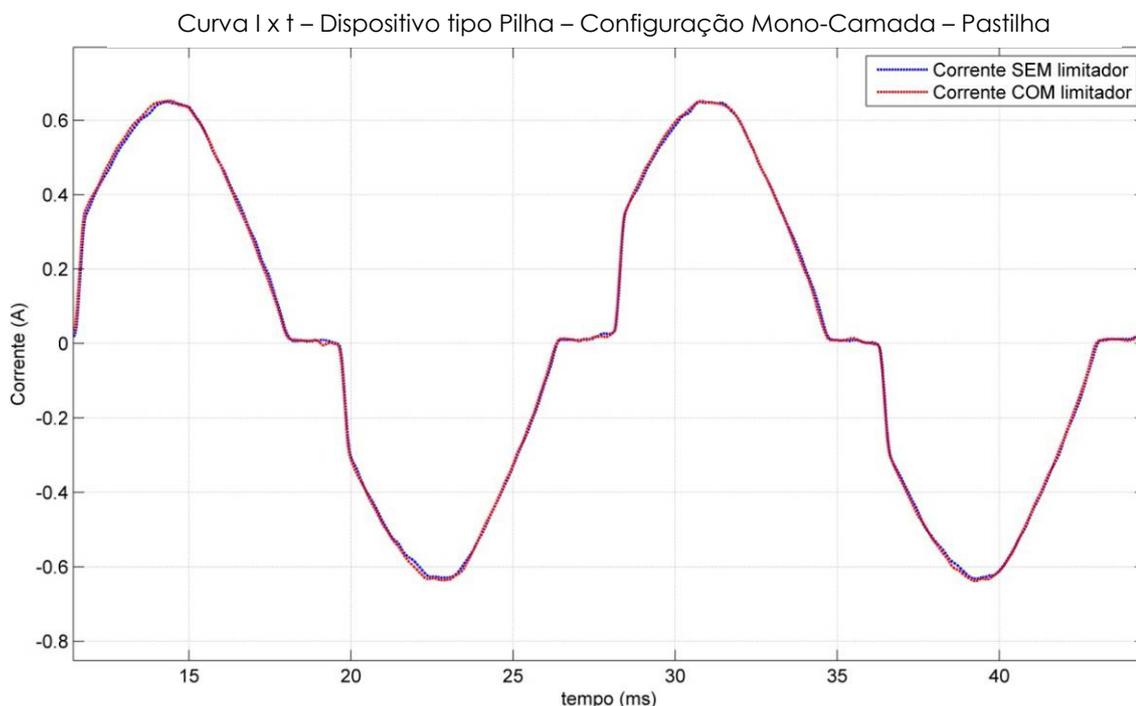


Figura 6.2: Curva I x t para corrente de pico de 630 mA.

O baixo nível de corrente injetado no circuito com o supercondutor não atingiu a densidade de corrente crítica fazendo com que o dispositivo não limitasse a passagem de corrente.

Esse comportamento é verificado na prática através da perfeita superposição entre a curva de corrente com o dispositivo limitador inserido (curva vermelha) e a curva de corrente sem o dispositivo limitador inserido e com o resistor de comparação, no qual a corrente de pico foi cerca de 630mA e a resistência de transição foi nula (0 Ω).

Teste 02: Teste de limitação de corrente real com dispositivo tipo pilha na configuração mono-camada com corrente de pico de 1,16 A

Tabela 6.2 – Teste 02 com corrente de pico de 1,16 A.

R_{sc} antes e após a medida: 1,395 Ω
I_{pico} circuito sem o limitador: 1,16 A
I_{pico} circuito com o limitador: 1,06 A
R_{sc} máximo de transição: 0,46 Ω
Limitação de corrente: 8,6 %

O aumento de corrente injetada no circuito com o limitador neste teste atingiu a densidade de corrente crítica e provocou a transição da cerâmica (*quench*), como mostrado na Figura 6.3.

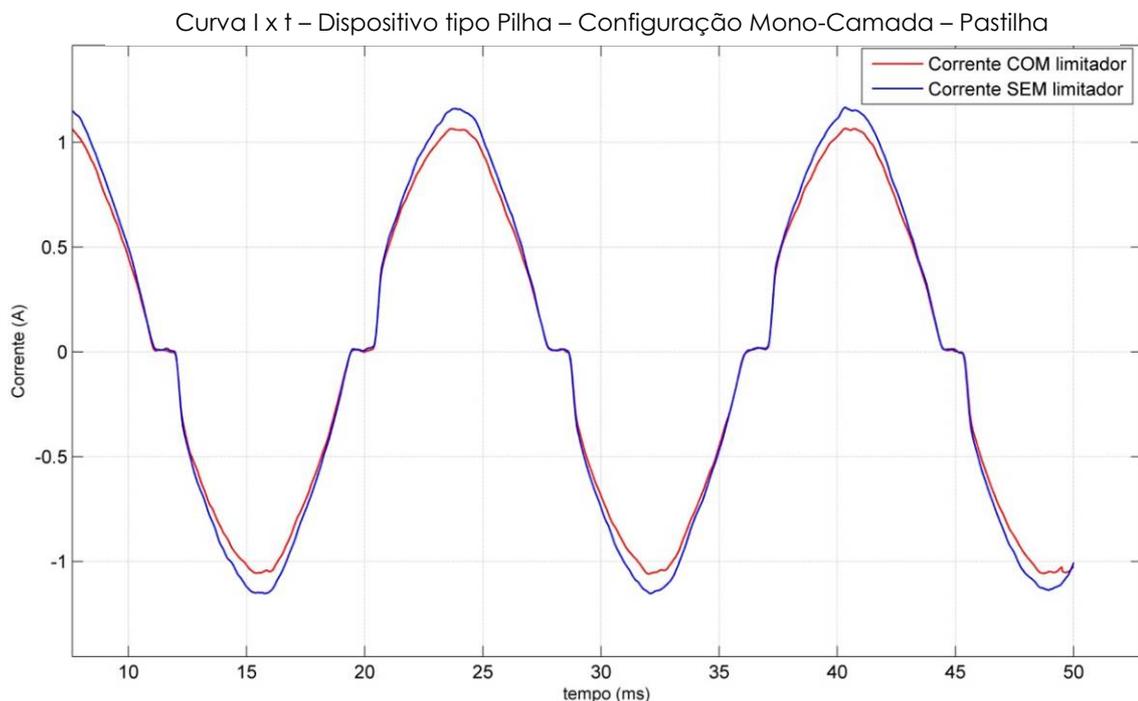


Figura 6.3: Curva I x t para corrente de pico de 1,16 mA.

As curvas demonstram uma redução na corrente do circuito com o limitador da ordem de 8,6%, limitando a corrente de pico de 1,16 A para 1,06 A. Foi observada uma variação máxima de resistência do dispositivo de 0,46 Ω no pico das ondas de corrente.

Teste 03: Teste de limitação de corrente real com dispositivo tipo pilha na configuração mono-camada com corrente de pico de 2,44 A

Tabela 6.3 – Teste 03 com corrente de pico de 2,44 A

R_{sc} antes e após a medida: 1,375 Ω
I_{pico} circuito sem o limitador: 2,44 A
I_{pico} circuito com o limitador: 2,25 A
R_{sc} máximo de transição: 0,42 Ω
Limitação de corrente: 7,8 %

O novo aumento do nível da corrente no circuito limitador confirmou a limitação que teve um nível bem próximo da limitação do teste 02. Desta vez, houve uma diminuição de 7,8% no valor de pico da onda de corrente com o supercondutor apresentando uma variação de resistência máxima de 0,42 Ω no pico, conforme demonstrado pela Figura 6.4.

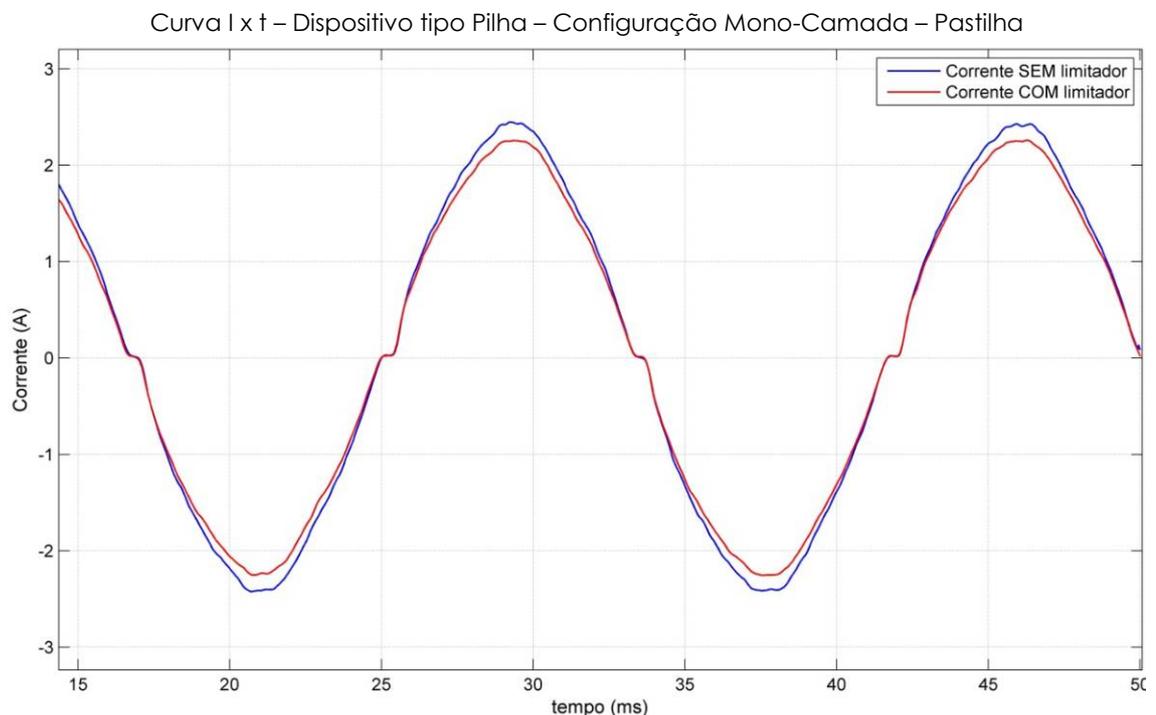


Figura 6.4: Curva I x t para corrente de pico de 2,44 A.

Teste 04: Teste de limitação de corrente real com dispositivo tipo pilha na configuração mono-camada com corrente de pico de 4,94 A

Tabela 6.4 – Teste 04 com corrente de pico de 4,94 A.

R_{sc} antes e após a medida: 1,333 Ω
I_{pico} circuito sem o limitador: 4,94 A
I_{pico} circuito com o limitador: 4,55 A
R_{sc} máximo de transição: 0,42 Ω
Limitação de corrente: 7,9 %

Para este novo aumento de corrente de teste, próxima dos 5 A, a limitação ocorreu novamente. Desta vez, houve uma diminuição de 7,9% no valor de pico da onda de corrente com o supercondutor apresentando uma variação de resistência máxima de 0,42 Ω no pico, como mostrado na Figura 6.5.

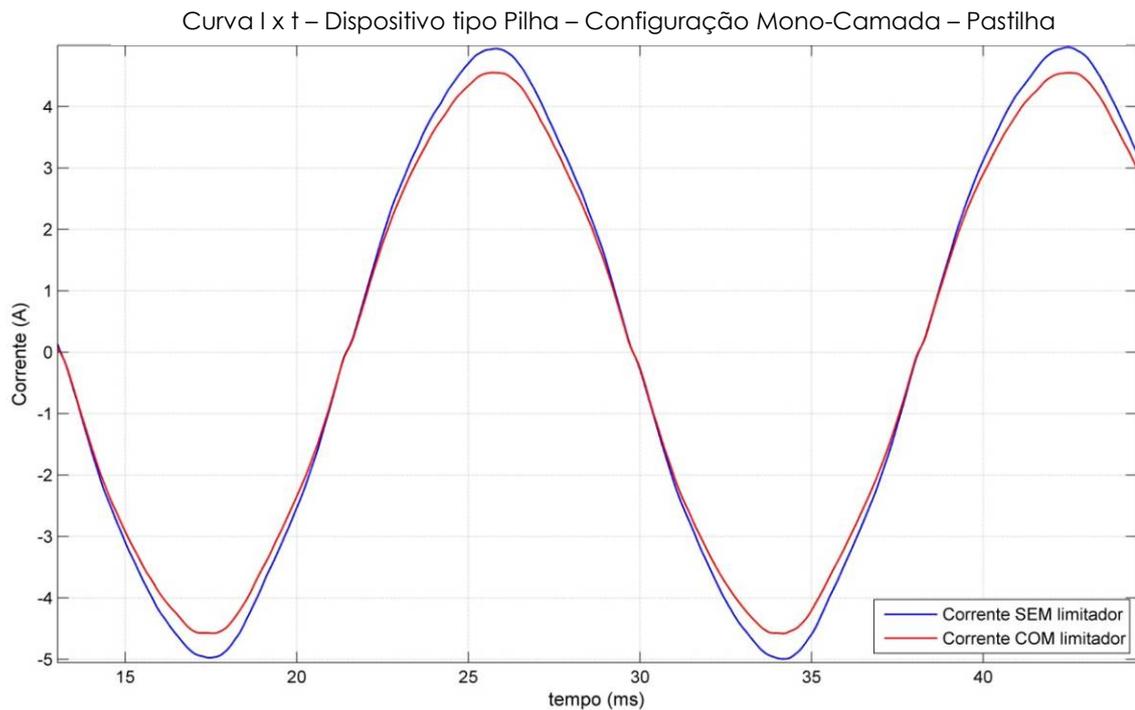


Figura 6.5: Curva I x t para corrente de pico de 4,94 A.

Teste 05: Teste de limitação de corrente real com dispositivo tipo pilha na configuração mono-camada com corrente de pico de 9,48 A

Tabela 6.5 – Teste 05 com corrente de pico de 9,48 A.

R_{sc} antes e após a medida: 1,360 Ω
I_{pico} circuito sem o limitador: 9,48 A
I_{pico} circuito com o limitador: 8,19 A
R_{sc} máximo de transição: 0,50 Ω
Limitação de corrente: 13,6 %

Para uma corrente de teste próxima a 9,5 A, a limitação foi mais significativa, com o dispositivo limitador apresentando uma resistência de transição de 0,50 Ω . O dispositivo provocou uma redução de corrente de pico da ordem de 13,6%, como mostrado na Figura 6.6.

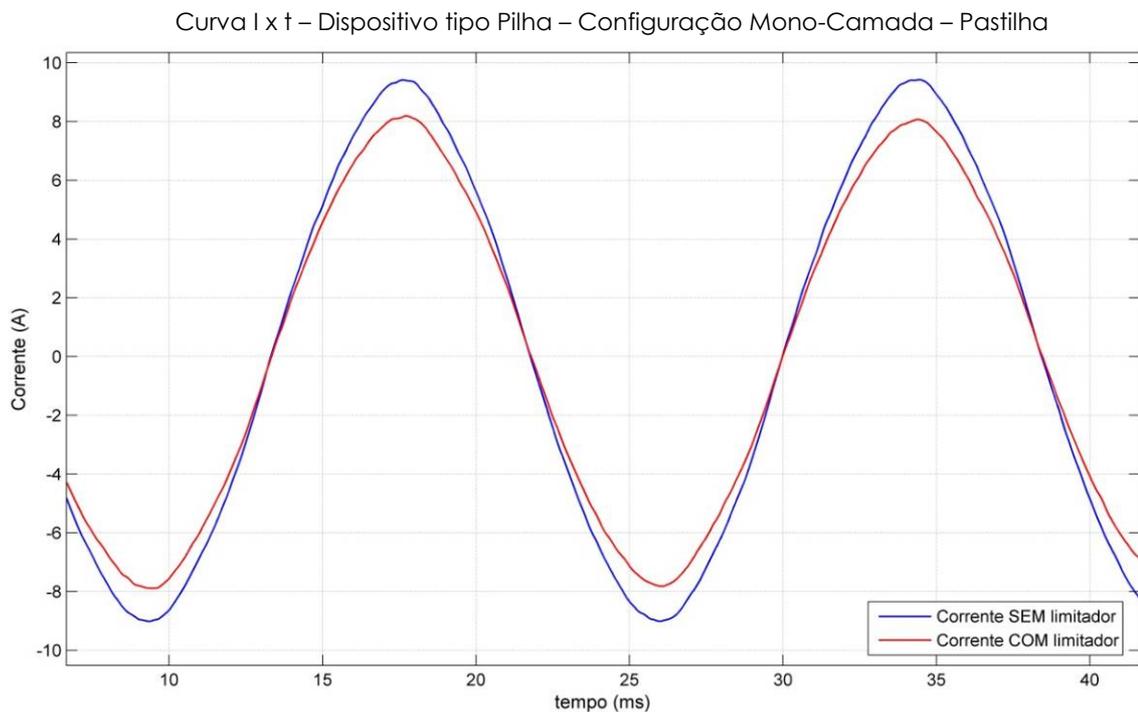


Figura 6.6: Curva I x t para corrente de pico de 9,48 A

Teste 06: Teste de limitação de corrente real com dispositivo tipo pilha na configuração mono-camada com corrente de pico de 13,29 A

Tabela 6.6 – Teste 06 com corrente de pico de 13,29 A

R_{sc} antes e após a medida: 1,650 Ω
I_{pico} circuito sem o limitador: 13,29 A
I_{pico} circuito com o limitador: 10,38 A
R_{sc} máximo de transição: 0,61 Ω
Limitação de corrente: 21,89 %

Neste teste, com uma condição mais severa de corrente, aproximadamente 13,3A, é possível ver que a capacidade de limitação do dispositivo aumentou para 21,89% com o supercondutor variando sua resistência em 0,61 Ω , como demonstrado na Figura 6.7.

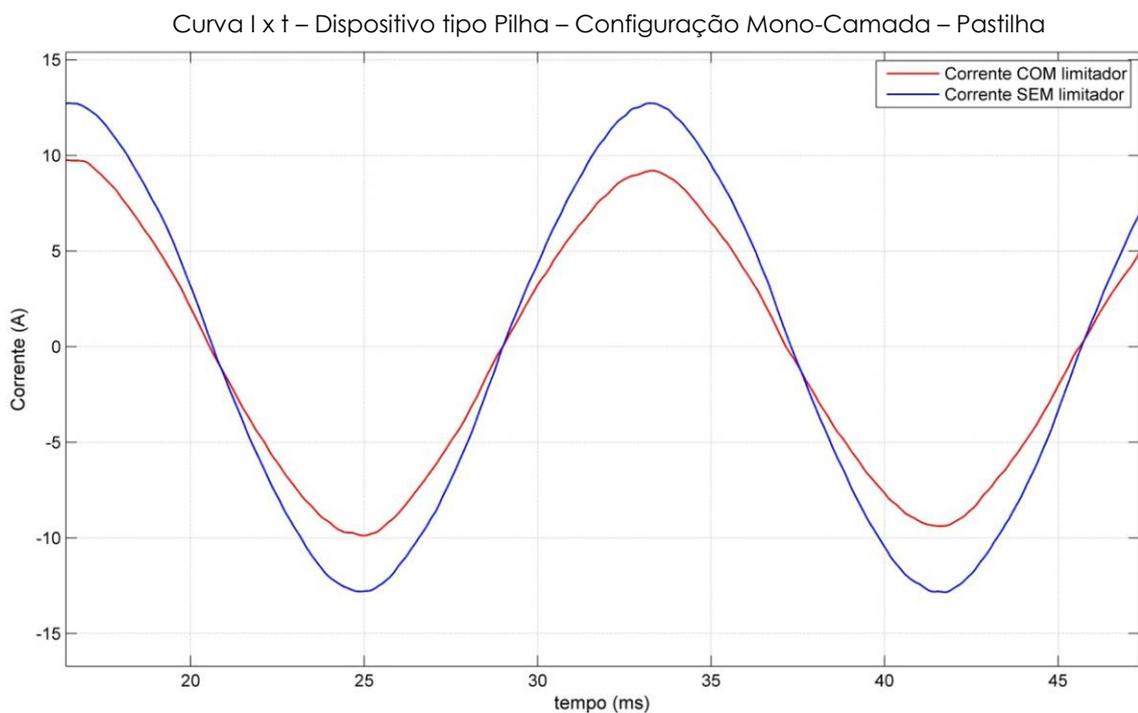


Figura 6.7: Curva I x t para corrente de pico de 13,29 A.

Analisando as ondas mais detalhadamente é possível verificar o momento exato em que o supercondutor atinge sua densidade de corrente crítica e entra em modo resistivo, conforme a Figura 6.8.

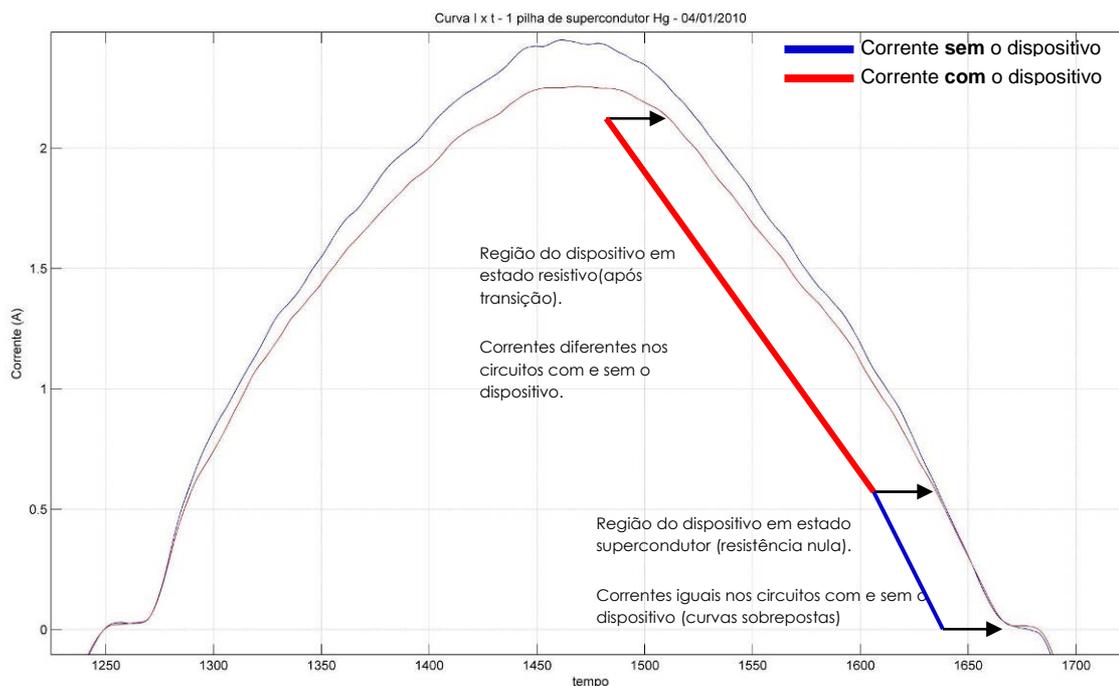


Figura 6.8: Análise do momento da transição da cerâmica (curvas sobrepostas).

O momento da transição é caracterizado a partir do ponto no qual as curvas de corrente do circuito com e sem o limitador deixam de ser idênticas, ou seja, deixam de ser sobrepostas.

Em praticamente todas os experimentos com o dispositivo mono-camada com o supercondutor em questão, a transição ocorreu com a corrente de 650 mA.

Outro fator de ordem prática que deve ser levado em consideração na análise do limitador, é a dissipação de calor do dispositivo no interior do criostato. Dispositivos com resistências altas, mesmo com a cerâmica em estado supercondutor, causam perdas joulicas elevadas dentro do criostato, ocasionando a perda excessiva do material refrigerante.

No caso do dispositivo construído, a resistência total do limitador com a cerâmica no estado supercondutor, gira em torno de 1,4 Ω .

A Figura 6.9 mostra um esquemático dos elementos do limitador representando suas respectivas resistências elétricas.

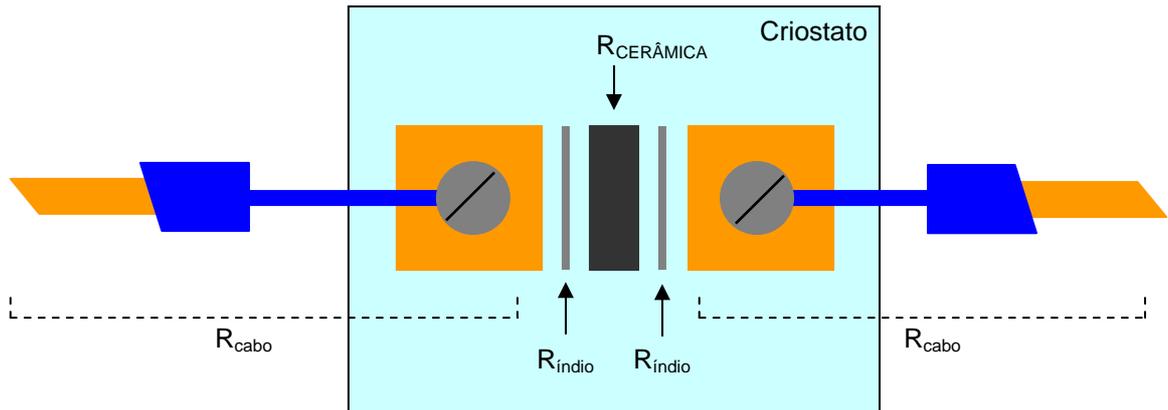


Figura 6.9: Esquemático dos elementos do dispositivo limitador com respectivas resistências elétricas.

É possível observar que o limitador é composto, basicamente, pelos condutores elétricos que injetam a corrente no dispositivo e pelos elementos que se situam no interior do criostato.

Para o dispositivo construído, têm-se os seguintes valores de resistência:

- $R_{\text{cabo}} = 0,2 \Omega$ - Inclui-se neste valor a resistência dos fios elétricos e do bloco de cobre ao qual o fio é conectado dentro do criostato;
- $R_{\text{índio}} = 0,1 \Omega$ - Representa o valor da resistência da folha de Índio e também da superfície de contato entre o índio e o bloco de cobre;
- $R_{\text{CERÂMICA}} = 0,8 \Omega$ - Representa o valor da resistência de contato entre as folhas de índio e a superfície do supercondutor pintada com tinta prata.

De posse destes dados, foi realizado um teste de longa duração com corrente na cerâmica para verificar o desempenho térmico da mesma em funcionamento contínuo. Foi instalado um termopar localizado a 3 mm da cerâmica dentro do criostato e foi injetada uma corrente de 600 mA pico (420 mA rms) por 1 hora. Verificou-se que a temperatura no termopar permaneceu constante durante todo o teste, em torno de 77 K, não apresentando variação significativa.

A potência dissipada durante este teste no interior do criostato é dada pela equação 6.1.

$$P = (2 \cdot R_{\text{índio}} + 2 \cdot R_{\text{cerâmica}}) \cdot I^2 \quad (6.1)$$

Portanto, para o dispositivo testado, a potência da dissipação joulica total no interior da criostato foi de cerca de 0,17 W em funcionamento contínuo. A pastilha de 8mm de diâmetro utilizada apresenta uma considerável área de contato, de maneira que, sob as condições apresentadas acima, a cerâmica supercondutora apresenta sobre si uma densidade de dissipação de cerca de 1,7 mW/mm² em cada face da pastilha. Em situações de corrente de falta acima de 10 A como as testadas no último tópico (acima de 10 A), é possível perceber a ebulição instantânea do nitrogênio em volta do supercondutor. Isto, na prática, é verificado pelo ruído característico da ebulição proveniente do interior do criostato.

Uma vez que a cerâmica atinge a sua densidade de corrente crítica, esta deixa seu estado supercondutor e passa a apresentar um valor de resistência ($\Delta R_{\text{cerâmica}}$) e, conseqüentemente, o dispositivo passa a apresentar uma resistência maior no interior do criostato. A nova potência de dissipação joulica é definida pela equação 6.2.

$$P = (2 \cdot R_{\text{indio}} + 2 \cdot R_{\text{cerâmica}} + \Delta R_{\text{cerâmica}}) \cdot I^2 \quad (6.2)$$

Considerando o caso da corrente de falta da ordem de 10 Apico (7 Arms), tem-se uma potência de dissipação aproximada de 80 Wrms. Considerando novamente a área da pastilha utilizada, temos, durante a falta, uma densidade de dissipação joulica de cerca de 800 mW/mm² em cada face da cerâmica. Isto demonstra que o dispositivo não pode operar continuamente em situação de falta, pois isto causará danos à estrutura do dispositivo, danos aos contatos da cerâmica supercondutora e, na melhor das hipóteses, o esgotamento do líquido refrigerante. Na prática, o dispositivo deverá trabalhar conjugado a um equipamento de desligamento automático caso a corrente de falta perdure por tempos prolongados.

Capítulo 7: Limitador Supercondutor Resistivo Tipo Pilha Multi-Camada

7.1 Introdução

Neste capítulo, serão exploradas as características de operação do limitador tipo pilha utilizando múltiplas camadas de supercondutores.

Devido à indisponibilidade de mais pastilhas supercondutoras de mercúrio, os resultados apresentados serão de ensaios simulados considerando as características e curvas práticas levantadas no ensaio com o limitador mono-camada apresentado no capítulo anterior.

Para efeitos da simulação, será considerado um dispositivo tipo pilha na configuração multi-camada carregado com sua capacidade máxima, ou seja, 16 pastilhas cilíndricas de cerâmicas supercondutoras de base em mercúrio ($\text{Hg}_{0,8}\text{Re}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,7}$) com 5 mm de altura, 8mm de diâmetro, corrente crítica (I_C) de 630 mA, corrente final de transição (I_F) de 2 A e resistência de transição final (R_F) de $0,61 \Omega$ por pastilha.

As simulações serão feitas em ambiente Matlab Simulink utilizando modelos matemáticos de limitadores de corrente resistivos [47, 48].

7.2 Resultados da Simulação

Em situação normal de funcionamento, ou seja, com a corrente que passa pelo dispositivo provocando uma densidade de corrente abaixo da densidade crítica na cerâmica, a curva da corrente sobre a pilha é bastante parecida com a curva de corrente sobre o limitador mono-camada, uma vez que todas as pastilhas supercondutoras apresentam resistência nula, Figura 7.1.

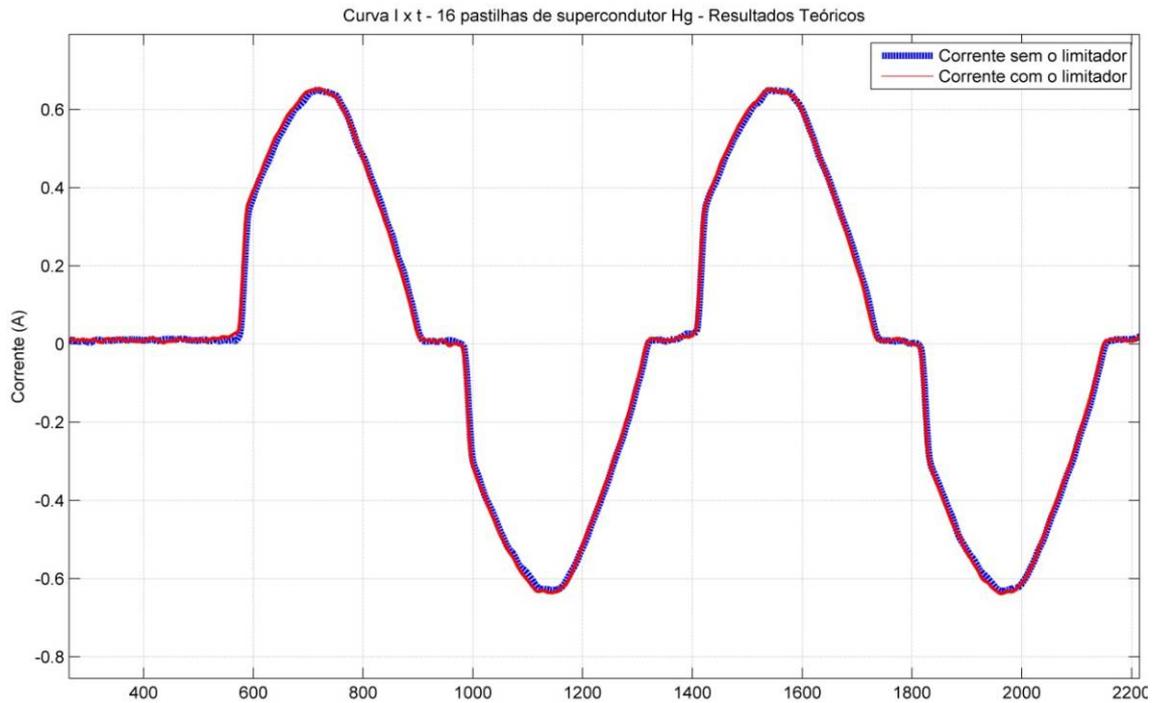


Figura 7.1: Curva simulada das correntes para o limitador multi-camada.

Como pode ser observado na Figura 7.1, como a densidade de corrente entre todas as pastilhas é a mesma em todo instante de tempo, se uma das pastilhas não atingiu sua corrente crítica, conseqüentemente, as outras pastilhas também não atingiram, fazendo com que todas as pastilhas permaneçam em estado supercondutor (resistência nula).

Entretanto, aplicando agora no dispositivo multi-camada uma corrente próxima à corrente do último teste com o dispositivo mono-camada, todas as pastilhas em série realizam a transição simultânea para o estado resistivo limitando a corrente. Os valores relacionados à simulação estão apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Teste utilizando dispositivo multi-camada com 16 cerâmicas de mercúrio.

R_{sc} antes e após a medida: 16 Ω
I_{pico} circuito sem o limitador: 12,72 A
I_{pico} circuito com o limitador: 8,09 A
R_{sc} máximo de transição: 9,76 Ω
Limitação de corrente: 36,4 %

É possível observar pelo gráfico acima que o dispositivo limitador multi-camada utilizando 16 cerâmicas de mercúrio apresenta uma limitação de corrente bem superior do que o limitador mono-camada.

Enquanto o mono-camada apresenta uma limitação de 21,89% para a situação demonstrada, o desempenho teórico de um limitador multi-camada completamente carregado é de 36,4% de limitação para um nível de corrente de teste próximo ao do teste com o limitador mono-camada.

Curva $I \times t$ – Dispositivo tipo Pilha – Configuração Multi-Camada (16 pastilhas) – Pastilhas $Hg_{0,8}Re_{0,2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8,7}$

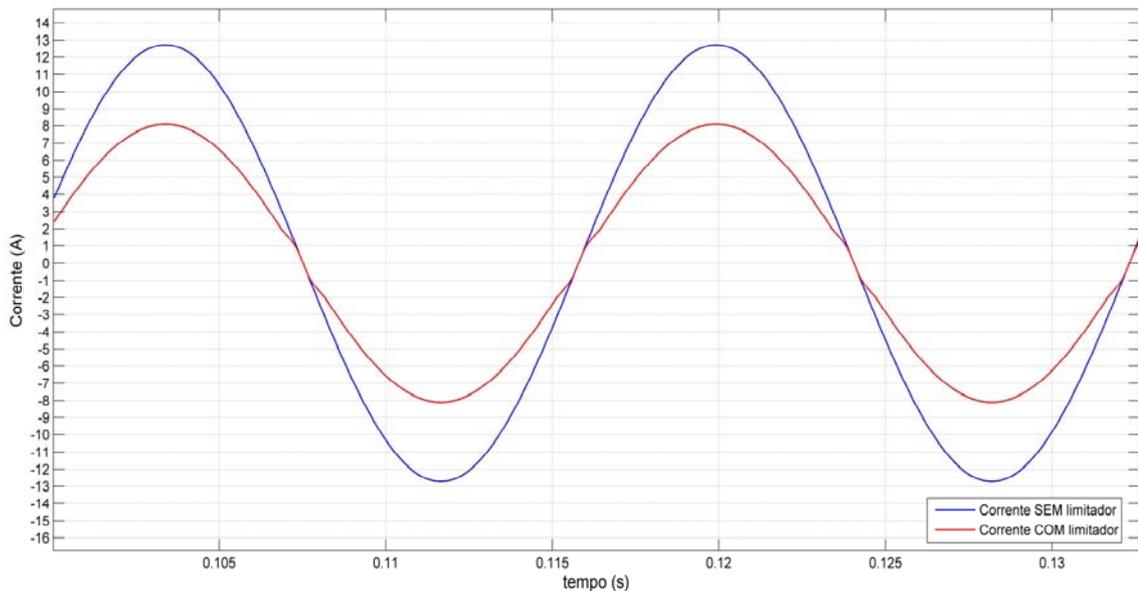


Figura 7.2: Curva simulada das correntes para o limitador multi-camada utilizando 16 pastilhas durante corrente de falta.

É importante notar que uma boa limitação de corrente não se deve apenas a uma alta resistência de transição do supercondutor (ΔR_{sc}). O que garante uma alta capacidade de limitação é a resistência de transição da cerâmica em relação à resistência global do circuito a ser protegido ($\Delta R_{sc}/R_{total}$).

A utilização de várias pastilhas supercondutoras em série eleva excepcionalmente o valor da resistência de transição do dispositivo quando comparado a apenas uma pastilha. Vale lembrar que o limitador configurado como mono-camada apresenta, para uma corrente próxima de 10 A, uma resistência de transição máxima de

0,61 Ω enquanto a configuração multi-camada é capaz de apresentar uma variação estimada de cerca de 9,76 Ω .

Entretanto, a capacidade de limitação do dispositivo multi-camada não segue esta mesma proporção. Isso se deve ao fato de que a associação em série de várias pastilhas apresenta vários pontos de contato entre as cerâmicas, aumentando, assim, a resistência total do conjunto quando em estado supercondutivo. A resistência total do dispositivo mono-camada com sua pastilha no estado supercondutor é de aproximadamente 1,3 Ω . A resistência total do dispositivo multi-camada é calculada em 16 Ω .

Esta alta resistência no estado supercondutor apresenta as seguintes desvantagens:

- Diminui a capacidade de limitação do dispositivo;
- Multiplica as perdas joulicas no interior do criostato;
- Consome mais líquido refrigerante no interior do criostato;
- Interfere diretamente no circuito o qual está protegendo uma vez que o dispositivo de proteção deve ter impedância mínima para não afetar a tensão sobre a carga.

Uma possível solução para este problema é a utilização de cilindros supercondutores de alturas maiores. Se ao invés de 16 pastilhas supercondutoras de mercúrio, de altura 5 mm cada, for considerado um único cilindro supercondutor de 80 mm instalado no dispositivo limitador, o mesmo passaria a apresentar a mesma resistência global em estado supercondutivo que o limitador mono-camada apresentado, ou seja, 1,3 Ω .

Considerando este novo arranjo, a curva teórica da limitação seria como apresentando na Figura 7.3. A Tabela 7.2 apresenta os valores da simulação.

Tabela 7.2: Teste utilizando dispositivo multi-camada com cerâmica única de 80 mm de altura.

R_{sc} antes e após a medida: 1,3 Ω
I_{pico} circuito sem o limitador: 12,72 A
I_{pico} circuito com o limitador: 2,31 A
R_{sc} máximo de transição: 9,76 Ω
Limitação de corrente: 81,8 %

Curva $I \times t$ – Dispositivo tipo Pilha – Configuração Multi-Camada (16 pastilhas) –
Configuração Cilindro Único $Hg_{0,8}Re_{0,2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8,7}$ - Simulação

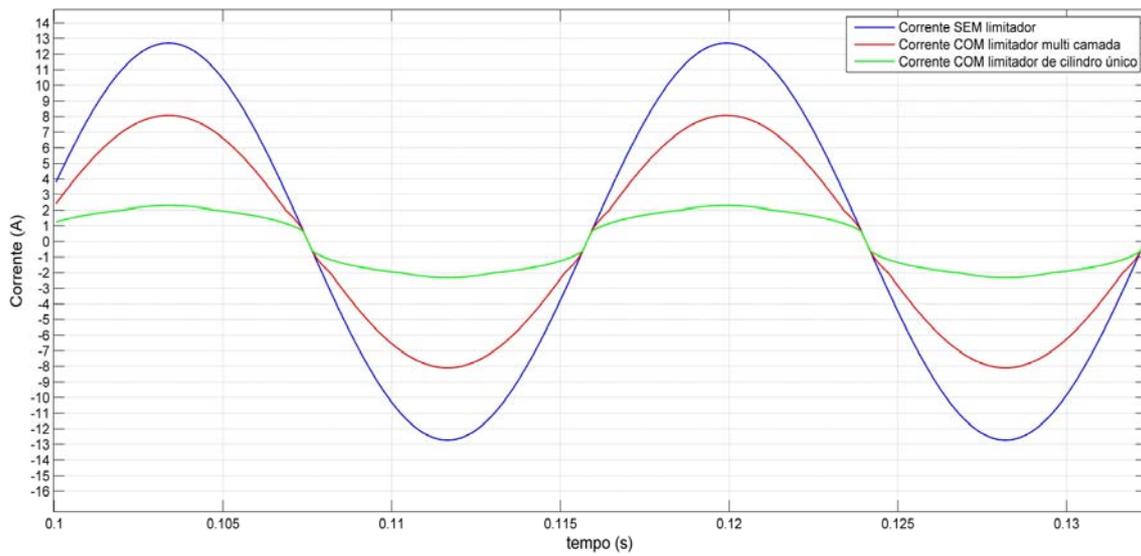


Figura 7.3: Curva simulada das correntes para o limitador multi-camada utilizando uma cerâmica de altura 80 mm.

Como é possível observar na Figura 7.3, o desempenho teórico de um dispositivo multi-camada operando com um cilindro supercondutor de altura 80 mm é muito superior ao dos outros modelos apresentados, causando uma limitação de corrente de cerca de 80% durante a falta. É importante observar que nesta configuração o dispositivo também poderia ser considerado mono-camada uma vez que, mesmo completamente preenchido, apenas uma camada de supercondutor está instalada no interior do mesmo.

Capítulo 8: Conclusões

8.1 Introdução

Conforme exposto na seção 1.2, este trabalho teve como um dos seus objetivos trazer a teoria da limitação de corrente por supercondutores para um nível mais próximo das aplicações comerciais utilizando cerâmicas fabricadas na própria instituição de ensino, mais precisamente no Laboratório de Alta Pressão (PRESLAB).

Os aparatos desenvolvidos não estão prontos para sua aplicação comercial, entretanto, representam uma melhoria de condições significativas para os próximos trabalhos do grupo SUPERA envolvendo limitadores supercondutores.

Também não foi foco deste trabalho esmiuçar toda a teoria das cerâmicas supercondutoras concentrando-se no estudo dos seus efeitos do ponto de vista da engenharia tais como melhoria na resistência de contato e na capacidade de limitação.

8.2 Cerâmicas Supercondutoras

As cerâmicas supercondutoras testadas durante este trabalho foram as seguintes:

- Supercondutor em ítrio - $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$
- Supercondutor em bismuto - $\text{BiSr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.5}$
- Supercondutor por camada depositada - $\text{Re}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{5+x}$ com substrato de $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$.
- Supercondutor em base de mercúrio - $\text{Hg}_{0.8}\text{Re}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.7}$.

Dentre as cerâmicas supercondutoras experimentadas, apenas uma delas, a cerâmica supercondutora de base em mercúrio ($\text{Hg}_{0.8}\text{Re}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.7}$.) apresentou características consistentes de limitação de corrente, em face ao valor da resistência de contato que foi possível obter neste trabalho.

Deve-se registrar que existem ótimos limitadores de corrente com supercondutores em base de ítrio e bismuto, por exemplo, mas com as técnicas usadas neste trabalho para diminuir a resistência de contato, somente a cerâmica supercondutora $\text{Hg}_{0.8}\text{Re}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.7}$ apresentou resultado satisfatório.

8.3 Injeção de Corrente

Outra conclusão importante foi o método de injeção de corrente criado para testar as cerâmicas supercondutoras. Ficou evidente que métodos que trabalham com injeção pontual de corrente como pinças, pontas e outros, são desaconselháveis devido aos problemas provenientes da concentração de corrente.

É imprescindível que os terminais de injeção de corrente tenham a maior área possível de contato, possuam um dispositivo guia para manter os elementos sempre travados e também possuam um elemento que mantenha a pressão dos contatos constante, como molas ou parafusos.

A diferença entre os coeficientes de dilatação das cerâmicas e do corpo dos dispositivos que as contém pode causar variações na resistência global do dispositivo à medida que o mesmo é refrigerado. Este fenômeno pode facilmente induzir a falsas conclusões sobre o comportamento da resistência do supercondutor durante as mudanças de temperatura.

O dispositivo tipo pilha criado representa uma plataforma padronizada para futuros testes de pastilhas supercondutoras de maneira que é possível testar não só várias pastilhas de um mesmo material, como também mesclar diferentes cerâmicas para se conseguir efeitos de limitação de corrente diferenciados, criando-se um gradiente funcional, ou um perfil de limitação específica para cada nível de corrente que submete o dispositivo.

Ao contrário dos primeiros dispositivos experimentados, o dispositivo tipo pilha criado se mostrou confiável no teste de corrente pois não apresenta variação excessiva da resistência de contato não induzindo, assim, falsas conclusões relativas à variação de resistência do supercondutor.

8.4 Bancada de Testes

Este trabalho proporcionou avanço significativo na metodologia de teste dos limitadores. Foram criados *softwares*, metodologias e procedimentos que serão úteis para próximos trabalhos. A padronização da metodologia de testes promove a maior

eficiência nos trabalhos tendo em vista que não será necessário empenhar esforços nos ferramentais de teste mantendo, assim, foco nos efeitos de limitação das cerâmicas.

8.5 Próximos Trabalhos

No decorrer deste trabalho foi possível observar que os limitadores supercondutores resistivos possuem a vantagem da simplicidade de aplicação, entretanto, também possuem algumas desvantagens, que são:

- A passagem integral da corrente sobre a cerâmica submete a mesma a um esforço contínuo podendo até danificar a cerâmica durante a ocorrência de faltas de grande amplitude;
- Os elementos de contato encontram-se mergulhados no líquido refrigerante e, geralmente, são nestes elementos que ocorre a maior dissipação de calor durante a passagem da corrente. Isto contribui para o aquecimento do dispositivo e o consumo excessivo do líquido refrigerante;
- Por trabalharem com métodos de injeção direta de corrente, a qualidade dos contatos elétricos pode variar significativamente à medida que faiscamentos podem ocorrer entre superfícies de contato irregulares.

Considerando os fatores acima, faz-se necessário para os próximos trabalhos o desenvolvimento de limitadores do tipo indutivo com funcionamento por injeção indireta de corrente ou que operem por fluxo magnético. Isto quer dizer que o simples acionamento do dispositivo limitador através do uso de um transformador não traz benefícios significativos, uma vez que ainda há injeção de corrente direta no supercondutor e no criostato e os problemas acima citados podem até ser agravados. Faz-se necessário o desenvolvimento da manufatura de cerâmicas supercondutoras cilíndricas ocas para criação de limitadores de núcleo blindado, os quais descartam completamente a injeção direta de corrente na cerâmica.

Referências Bibliográficas

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica, *Atlas de Energia Elétrica do Brasil* – Brasília – Dezembro 2008
- [2] Kammerlingh Onnes, H.; Commun. Physical Lab., Leiden. 124c, 1911, apud Ginzburg, V.L.; Andryushin, E.A. *Superconductivity Revised Edition*, World Scientific, Singapore, 2004
- [3] Meissner, W.; Oschenfeld, R., *Ein neuer effect bei eintritt der supraleitfähigkeit*, *Naturwiss.*, 21: 787-788, 1933, apud Buckel, W.; Kleiner, R.; *Superconductivity Fundamentals and Applications*, Wiley VCH, Weinheim, 2004.
- [4] London, F.; London, H. *The electromagnetic equations of the superconductor*. Proc. Roy. Soc., v. A 141, p. 71-88, Mar. 1935.
- [5] Ginzburg, S. L.; Landau, L. *On The Theory of Superconductivity* Zh. Eksp. Teor. Fiz., v. 20, p. 1064-1082, Jan. 1950.
- [6] F. London, *Superfluids*, Vol. 1, Dover publications Inc. New York, (1960).
- [7] L. N. Cooper, *Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas*, Phys. Ver. 104, (1956) 1189.
- [8] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, *Theory of Superconductivity*, Phys. Rev. 108 (1957) 1175.
- [9] Bednorz, G., Müller, K.A., *Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu system*, Z. Phys. B, 64: 189-197, 1986.
- [10] S. Uchida, et al., in *High Tc Superconductivity of La-Ba-Co Oxides*, Jpn. J. Appl. Phys 26 (1987) L 1
- [11] C. W. Chu et al., in *Superconductivity at 52,5 K in the Lanthanum-Barium-Copper-Oxide System*, Science 235 (1987) 567.
- [12] Cava, R.J., Santoro A., Johnson, D.W., Rhodes, W.W.; *Crystal-Structure of the High Temperature Superconductor La_{1.85}Sr_{0.15}CuO₄ Above and Below*; Phys. Rev. B 35 (13): 6716-6720, 1987.
- [13] Tarascon, J. M.; Greene, L. H.; Mckinnon, W. R.; Hull, G. W.; Geballe, T. H.; *Superconductivity at 40 K in the Oxygen-Defect Perovskites La_{2-x}Sr_xCuO_{4-y}*, Science, 235, 1373-1376, 1987.

- [14] Chu, C.W.; Hor, P. H.; Meng, R. L.; Gao, L.; Huang, Z. L.; Wang, Y. Q.; *Evidence for superconductivity above 40 K in the La-Cu-O compound system*, Phys. Rev. Lett., 58, 405-407, 1987.
- [15] Chu, C.W.; Hor, P. H.; Meng, R. L.; Gao, L.; Huang, Z. L.; Wang, Y. Q.; *Superconductivity up to 114 K in the Bi-Al-Ca-Sr-Cu-O compound system without rare-earth elements*, Phys. Rev. Lett., 60, 941-943, 1988.
- [16] Z. Zhao et al., in *Cooper Oxide Superconductor* (C. P. Poole Jr., T. Datta, and H. A. Farach Eds.), p.274, Wiley, New York, 1987.
- [17] Putilin, S.N, Antipov, E.V., Chmaissem, O., Marezio, M.; *Superconductivity at 94 K in $HgBa_2CuO_{4+\delta}$* ; Nature 362 (6417): 226-228 1993.
- [18] Schilling, A., Cantoni, M., Guo, J.D., Ott, H.R., *Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O System*; Nature 363 (6424): 56-58, 1993.
- [19] Gao, L, Xue, Y.Y., Chen, F., Xiong Q., Meng, R.L., Rameriz, D., Chu, C.W., Eggert J., Mao, H.K.; *Universal Enhancement of T_c under High-Pressure in $HgBaCaCuO_{2m-1}m_{2m+2+\delta}$* ; Physica C 235: 1493-1494 Part 2, 1994.
- [20] M. T. D. Orlando, *Caracterização Física e Estudo das Propriedades Elétricas, Magnéticas e Térmicas do Supercondutor de Alto T_c YBaCuO*, Dissertação de Mestrado, USP – 1991.
- [21] C. P. Poole et al., *Superconductivity*, Academic Press, Inc., 1995.
- [22] S. N. Putilin, I. Bryntse, E. V. Antipov., in *New complex copper oxides: $HgBa_2RCu_2O_7$ ($R = La, Nd, Eu, Gd, Dy, Y$)*, Mat. Res. Bull. 26 (1991) 1299.
- [23] E. M. Kopnin, E.M., Antipov, E.V., Capponi, J.J., Bordet, P., Chaillout, C., Debrion, S., Marezio, M, Bobylev, A.P., Van Tendeloo, G., *Suppression of superconductivity in Hg-1223 and Hg-1234 by partial replacement of Hg by carbon*, Physica C 243, 222-232, 1995.
- [24] S. Müller, P. Bayer, C. Reischl and K. Heinz et al. *Structural Instability of Ferromagnetic fcc Fe Films on Cu(100)*. Phys. Rev. Lett. 74, 765 - 768, (1995).
- [25] Hahakura, S. et al. *Interlayer distance and magnetic-properties of Hg-based superconductor*. Physica C, v. 235 - 240, p. 2795-2796 , Dec. 1994.
- [26] Shimoyama, J., Hakakura, S., Kobayashi, R., Kitazawa, K., Yamafuji, K., Kishio, K., *Interlayer distance and magnetic properties of Hg-based superconductors*, Physica C 235 – 240, 2795-2796, 1994

- [27] K. Yamaura, J. Shimoyama, S. Hahakura, Z. Hiroi, M. Takano y K. Kishio, *High pressure synthesis and superconductivity of a Ba free mercury –based superconductor (Hg,Re)Sr₂Ca₂Cu₃O_y*, Physica C, 246, 351-356, 1995.
- [28] A. Sin, A., *Síntesis a presión controlada y caracterización de superconductores de Hg*, Tesis (doctorado), ICMAB, Barcelona, 1999
- [29] M. T. D. Orlando, *Comparação entre o efeito da pressão química e a pressão externa hidrostática em supercondutores do tipo (Hg,Re)-1223*, Tese de doutorado, CBPF, Rio de Janeiro, 1999.
- [30] Orlando, M.T.D., Sin, A., Alsina, F., Cunha, A.G., Mestres, N., Calleja, A., Pinol, S., Emmerich, F.G., Martinez, L.G., Segarra, M., Obradors, X., Baggio-Saitovich, E., *Effects of re-doping on superconducting properties and formation of Hg-1223 superconductors*, Physica C 328 (3-4), 257-269, 1999.
- [31] Passos, C. A. C.; Orlando, M. T. D.; Medeiros, E. F.; Sampaio, R. V.; Oliveira, F. D. C.; Fardin, J. F.; Simonetti, D. S. L. *Application of the (Hg,Re)-1223 ceramic on superconducting fault current limiter*. Physica. C, Superconductivity, v. 460, p. 1451-1452, 2007.
- [32] Oliveira, F. D. C.; Passos, C. A. C.; Fardin, J. F.; Simonetti, D. S. L.; Passamai Jr, J. L.; Belich Jr, H.; Ferreira Jr, M.; Orlando, M. T. D.; Medeiros, E. F. *The influence of oxygen partial pressure on growth of the (Hg,Re)-1223 intergrain junction*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Estados Unidos, v. 16, n. 1, p. 15-20, 2006.
- [33] Passos, C. A. C.; Orlando, M. T. D.; Passamai Jr, J L; Medeiros, E. F.; Oliveira, F. D. C.; Fardin, J. F.; Simonetti, D. S. L.; Albino Aguiar, J. *Superconducting fault current limiter device based on (Hg,Re)-1223*. Applied Physics Letters, v. 89, p. 1-3, 2006.
- [34] Passos, C. A. C.; Orlando, M. T. D.; Fernandes, A. A. R.; Oliveira, F. D. C.; Simonetti, D. S. L.; Fardin, J. F.; Belich Jr, H.; Ferreira Jr, M. *Effects of oxygen content on the pinning energy and critical current in the granular (Hg, Re)-1223 superconductors*. Physica. C, Superconductivity, Londres, v. 419, p. 25-31, 2005.
- [35] A. D’Ajuz, A. M. Monteiro, O. Kastrup e F. H. Oliveira. *Dispositivos limitadores de curto-circuito (DLCC) - estado da arte e aplicação nas redes elétricas*. Relatório ONS, 2002

- [36] Andréia Maia Monteiro. *Um estudo de dispositivos limitadores de correntes de curto-circuito com ênfase no IPC (INTERPHASE POWER CONTROLLER)*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, fevereiro 2005
- [37] L. W. Meng. “*The use of triggered current limiters to reduce prospective fault currents in high voltage systems*”. Revista *The Singapore Engineer*, outubro 2008.
- [38] Y. Jiang-Häfner, M. Hyttinen and B. Pääjärvi, *On the Short Circuit Current Contribution of HVDC Light* - Suécia, setembro 2005.
- [39] Flávio Duarte Couto Oliveira. *Limitador de corrente de falta supercondutor*. Dissertação de Mestrado, UFES, dezembro 2005.
- [40] “*SCCL – Short-Circuit Current Limitation with FACTS in High-Voltage Systems – Application and Features*” - SIEMENS, setembro 2008.
- [41] Operador Nacional do Sistema Elétrico, *Dispositivos Limitadores de Curto Circuito – DLCC. Estado da arte e aplicações na rede elétrica* - Relatório - Brasília, 2002
- [42] WTEC Hyper-Librarian, *Fault Current Limiters – Setembro 1997 – Disponível em: <http://www.wtec.org/loyola/scpa/04_03.htm>*. Acesso em 15 de janeiro de 2010.
- [43] A. Neumann, *Application of Fault Current Limiters*, Department for Business Enterprise & Regulatory Reform – UK - 2007.
- [44] J. Kozak, T. Janowski, S. Kozak, G. Wojtasiewicz and B. Glowacki. *Tests results and analysis of inductive superconducting fault current limiter with Bi-2223 tube and HTS tape as secondary winding* – Journal of Physics: Conference Series 46 – p946-949 - Institute of Physics Publishing - 2006
- [45] M. Joo, T. K. Ko. *Novel Design and Operational Characteristics of Inductive High-Tc Superconducting Fault Current Limite*” –IEEE Transactions on applied superconductivity, vol. 7, n° 2 – junho 1997.
- [46] Oliveira, F. D. C.; Passos, C. A. C.; Passamai Junior, J. L.; Orlando, M. T. D.; Simonetti, D. S. L.; Fardin, J. F. *Metodologia de Projeto de limitador de corrente supercondutor empregando HgRe-1223*. In: XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006, Salvador. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006. p. 3080-3085.

[47] T. R. S. de Freitas. *Modelo para Simulação de Supercondutor HgRe-1223 para Aplicações como Limitador de Corrente Resistivo*. Dissertação de Mestrado – UFES - 2009.

[48] Smarssaro, T. R.; Henrique, H. F.; Fardin, J. F.; Orlando, M. T.; Simonetti, D. S. L. *Um Modelo Simples e Eficaz para Simulação de um Limitador de Corrente de Falta Supercondutor*. In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2009, Blumenau. Anais da VIII CBQEE, 2009