

**ENSAIO DE UM MÓDULO LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO
SUPERCONDUTOR**


Carla Vital de Sena

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

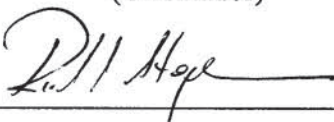
Aprovada por:



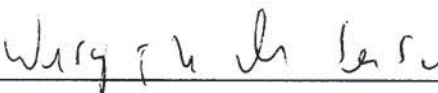
Prof. Rubens de Andrade Jr., D.Sc.
(Orientador)



Eng. Alexander Polasek, D.Sc.
(Orientador)



Prof. Richard M. Stephan, D.Sc.
(Banca Examinadora)



Wesley Tiago B. de Sousa, M. Sc.
(Banca Examinadora)

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2011

Agradecimentos

- A Deus por me ajudar a superar todos os obstáculos.
- Aos meus orientadores Alexander Polasek (supervisor no CEPEL e orientador de projeto final) e Rubens de Andrade Junior (professor do DEE e orientador) por me ajudarem e apoiarem na realização deste trabalho.
- Ao Engenheiro Marcio Antônio Sens do CEPEL por toda ajuda durante meu estágio.
- Ao meu orientador acadêmico Jorge Luiz do Nascimento por toda ajuda e apoio;
- Ao Professor Sebastião Hércules pelas conversas estimulantes;
- A meu pai, por me incentivar e apoiar.
- Aos vários amigos que fiz durante esta jornada e a Michael Faraday, por servir como inspiração e exemplo de cientista e de ser humano;

"Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado, mas nada pode ser modificado até que seja enfrentado."

Albert Einstein

Resumo

O presente projeto de graduação refere-se aos ensaios realizados em um módulo de limitador de corrente de curto-circuito a base de material supercondutor. A atuação como limitador de corrente ocorre quando o material supercondutor é submetido a uma corrente elevada, acima do valor da corrente crítica do supercondutor, fazendo com que este passe do estado supercondutor ao estado normal, acrescentando impedância ao sistema e, assim, limitando a corrente de curto-circuito.

O módulo limitador foi submetido a ensaios de curto-circuito a fim de observar o seu comportamento e avaliar seu desempenho. Foi observado que o ensaio apresentou resultados satisfatórios e pudemos então comprovar a sua viabilidade técnica. O equipamento em questão, embora ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, já foi testado em subestações e está ganhando cada vez mais espaço no setor elétrico. A principal vantagem da sua utilização seria no sentido de que, do ponto de vista do setor elétrico, este seria capaz de reduzir as ocorrências da interrupção do fornecimento de energia elétrica e evitar gastos pela necessidade de redimensionamento dos equipamentos já instalados no sistema elétrico.

Abstract

The present graduation project refers to tests on a fault current limiter that uses superconducting material in its composition. The operation as a current limiter occurs when it is exposed to a high value of current, above its critical current, when it passes from the superconducting state to normal state, adding impedance to the system and thus, limiting the value of the fault current.

The module was submitted to short circuit tests so that we could observe its behavior and evaluate its performance. It was observed that the module was successful and we were able to verify its technical feasibility. The equipment in question, although still under research and development state, has already been tested in substations and it is earning more space in the energy sector. The main advantage of its use would be in the sense that, from the perspective of the power sector, this could reduce the number of interruption of the power supply and avoiding future expensive expenditures on the resizing of the equipments already installed in the electric system.

Lista de Figuras

2.1	Curva de resistividade em função da temperatura para o mercúrio obtida por H. K Onnes.[16]	7
2.2	O fluxo magnético é nulo no interior de um material supercondutor devido às correntes superficiais.	8
2.3	Sistema para levantamento da curva $R \times T$ – Laboratório de Supercondutividade do CEPTEL.	9
2.4	Diagrama de fases para um supercondutor do tipo I	11
2.5	Diagrama de fases para um supercondutor do tipo II	12
2.6	Supercondutor do tipo II na presença de um campo magnético. As regiões onde existe a penetração de campo magnético recebem o nome de vórtices.	13
3.1	Reatores com Núcleo de ar em Mogi das Cruzes (345 kV) [22].	18
3.2	Dispositivo Pirotécnico (a) funcionamento normal; (b) atuação sob curto-circuito [23].	20
3.3	Campo elétrico E do supercondutor em função da densidade de corrente J	21
3.4	Desvio da corrente pelo shunt nos hot spots [15].	23
3.5	Limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo.	24
3.6	Limitador Supercondutor do Tipo Híbrido.	25

4.1	Detalhes do módulo limitador de corrente supercondutor utilizado.	28
4.2	Curva $V \times I$ do Módulo Limitador ($I_c = 270 \text{ A}$)	29
4.3	Curva $V \times I$ do Módulo Limitador descontando as resistências de contato.	30
4.4	Curva $V \times I$ do módulo com e sem o efeito do contato do cobre	30
5.1	Circuito de ensaio no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas.	32
5.2	Circuito de ensaio do Laboratório de Altas Correntes (CEPEL-Adrianópolis)	34
5.3	Ensaio sob altas correntes do módulo imerso em dewar com LN_2	34
6.1	Curva $I \times V$ do módulo estudado obtida no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do CEPEL.	37
6.2	Fator de limitação dos ensaios.	37
6.3	Ensaio 01: $I_{prosp} = 8,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 26,23\%$	38
6.4	Ensaio 02: $I_{prosp} = 5,68 \text{ kA}$ e $FL\% = 29,05\%$	38
6.5	Ensaio 03: $I_{prosp} = 7,49 \text{ kA}$ e $FL\% = 36,72\%$	39
6.6	Ensaio 04: $I_{prosp} = 8,78 \text{ kA}$ e $FL\% = 40,89\%$	39
6.7	Ensaio 05: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 54,66\%$	40
6.8	Ensaio 06: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 53,14\%$	40
6.9	Ensaio 07: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 60,13\%$	41
6.10	Ensaio 08: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 52,42\%$	41
6.11	Ensaio 09: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 65,68\%$	42
6.12	Ensaio 10: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 52,78\%$	42
6.13	Ensaio 11: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 62,72\%$	43
6.14	Ensaio 12: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 63,53\%$	43
6.15	Ensaio 13: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 53,67\%$	44
6.16	Ensaio 14: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 53,14\%$	44
6.17	Fator de limitação dos ensaios sob altas correntes.	45
6.18	Trinca encontrada na parte externa do módulo limitador.	46
6.19	Aquecimento da região central do módulo limitador.	47
6.20	Cortes do módulo limitador.	47

Sumário

1	Introdução	2
1.1	Introdução	2
1.2	Status da pesquisa desenvolvida LASUP – COPPE / UFRJ	4
1.3	Divisão do trabalho	5
2	Supercondutividade	6
2.1	Introdução	6
2.2	Principais Características	7
2.3	Materiais Supercondutores	11
3	Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	14
3.1	Introdução	14
3.2	Necessidade do Uso de Limitadores de Corrente de Curto Circuito	14
3.3	Principais Limitadores de Curto Circuito	17
3.3.1	Reatores a núcleo de ar	17
3.3.2	Dispositivos Pirotécnicos	19
3.4	Limitadores de Corrente Supercondutores	20
3.4.1	Tipos de Limitadores de corrente Supercondutores.	22
3.4.2	Vantagens de um SCFCL	25

4	Módulo Limitador Supercondutor Estudado	26
4.1	Introdução	26
4.2	Descrição do módulo	26
4.2.1	Propriedades elétricas	29
5	Procedimentos Experimentais	32
5.1	Primeiros ensaios	32
5.2	Ensaio de Alta Corrente	33
5.3	Fator de Limitação	35
6	Resultados	36
6.1	Introdução	36
6.2	Resultados dos primeiros ensaios	36
6.3	Aplicações de altas correntes	37
7	Conclusões	48

1.1 Introdução

A demanda pela energia elétrica tem aumentado continuamente, fazendo com que os níveis de corrente de curto-circuito aumentem. Muitos equipamentos de proteção atualmente instalados estão sendo superados. A importância da utilização de um equipamento de proteção contra corrente de curto-circuito justifica-se pelo princípio de que não se podem prever todos os surtos a que o sistema elétrico pode estar exposto, principalmente quando este é de origem de fenômenos da natureza, como por exemplo, as descargas atmosféricas.

É necessário destacar que a substituição dos disjuntores, transformadores, barramentos e outros que já se encontram em operação na rede, pode ser tecnicamente e economicamente inviável, pois não se pode interromper o fornecimento de energia por um longo período no caso de esta substituição precisar ser realizada, e pelo custo referente à compra e instalação de novos disjuntores. Uma solução para este problema seria a utilização de um limitador de corrente de curto-circuito.

O limitador de corrente de curto-circuito atuaria no sentido de atenuar estes surtos para que os disjuntores em operação possam suportar estes picos de corrente, que estão cada vez mais intensos, devido ao aumento da demanda, ao interligamento das redes e outros fatores relevantes [1][2][3]. Atualmente existem diversas tecnologias e dispositivos para limitação de corrente [1]. Além disto, para o setor elétrico, é importante que o fornecimento de energia não seja interrompido. Neste trabalho, é colocado como uma opção promissora, um dispositivo que possui capacidade técnica de reduzir o número destas interrupções.

Um dispositivo designado para ser inserido no sistema de proteção, chamado limitador de corrente de curto-circuito supercondutor, (SCFCL, *Superconducting Fault Current Limiter*) pode ser considerado como uma solução tecnicamente viável, que, embora ainda na fase de pesquisa e desenvolvimento, possui características técnicas satisfatórias para desempenhar seu papel de forma eficaz, sendo que até o presente momento, alguns protótipos de média tensão já foram instalados e testados com sucesso [2][4][5][6][7][8][9]. Atualmente, protótipos de alta tensão para transmissão de energia encontram-se em desenvolvimento [2][10][11][12].

O presente projeto de graduação refere-se aos ensaios realizados nas dependências do ELETROBRÁS CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), nos laboratórios da Ilha do Fundão - Cidade Universitária e Laboratório de Alta Corrente na unidade de Adrianópolis (Nova Iguaçu-RJ). Foi estudado o comportamento de um limitador de corrente de curto-circuito realizado com um componente limitador à base do material supercondutor BSCCO 2212, produzido pela NEXANS SuperConductors/GmbH (Alemanha) e adquirido pelo CEPEL em parceria com o DEMA (Departamento de Engenharia de Materiais) da PUC-RJ. O módulo limitador supercondutor é do tipo resistivo. Há outros tipos de limitadores supercondutores, como por exemplo, o indutivo e o híbrido. Entretanto, por questões técnicas e econômicas, o tipo resistivo é considerado bastante promissor.

Os testes realizados em laboratório com capacidade de aplicar altas correntes foram realizados para que se pudesse observar o desempenho do módulo limitador de corrente de

curto-circuito supercondutor. Os resultados mostram que o módulo ensaiado apresenta características satisfatórias na tarefa de limitar diversos curtos-circuitos. No entanto, o mesmo ficou completamente danificado após os ensaios destrutivos, nos quais se excederam os limites especificados pelo fabricante. Estes limites foram excedidos propositalmente para efeitos de pesquisa.

A avaliação do comportamento do objeto supercondutor foi efetuada em três distintos laboratórios do CEPEL. A caracterização da corrente crítica do material supercondutor foi estudada no Laboratório de Supercondutividade – LAS, do Departamento de Tecnologias Especiais, DTE, na unidade sede, localizada na Avenida Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária da Ilha do Fundão - Rio de Janeiro - RJ. As medições da resistência e da indutância, na temperatura ambiente e a 77 K foram realizadas no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas. Os ensaios de curto-circuito (altas correntes) foram realizados no Laboratório de Alta Corrente do CEPEL, Unidade Adrianópolis, localizada na Avenida Olinda, Adrianópolis, Nova Iguaçu - RJ.

Após vários ensaios realizados, no qual se excederam os limites especificados pelo fabricante, um estudo foi direcionado para a verificação do estado do material supercondutor, assim como do módulo como um todo.

1.2 Status da pesquisa desenvolvida LASUP – COPPE / UFRJ

O Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) tem como objetivo o desenvolvimento experimental, a pesquisa científica e a inovação tecnológica na aplicação de supercondutores em sistema elétricos, levitação magnética e a produção de blocos supercondutores de alta temperatura crítica.

O primeiro trabalho do LASUP envolvendo limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores (2007), dissertação de mestrado [13]) tratou de desenvolver simulações

termo-eletromagnéticas com base no modelo de Bean , utilizando o método de elementos finitos, para um cilindro supercondutor limitador de corrente. No segundo trabalho (2009, projeto final [14]) foram desenvolvidas simulações que buscassem reproduzir o desenvolvimento da resistência elétrica dos limitadores supercondutores no decorrer do tempo. Este trabalho também apresentou resultados experimentais de limitação de corrente de corrente de curto-circuito de ensaios realizados no CEPEL (ELETROBRAS). E finalmente, o trabalho mais recente (2011, dissertação de mestrado [15]) também desenvolveu simulações computacionais com o objetivo principal de poder estimar parâmetros de difícil acesso experimental, como por exemplo o aumento de temperatura sofrido por um limitador de corrente supercondutor durante um curto-circuito. Este trabalho também foi realizado em parceria com o CEPEL (ELETROBRAS).

1.3 Divisão do trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

No capítulo 1 é apresentada uma introdução do tema a ser abordado.

O capítulo 2 expõe uma breve revisão da supercondutividade para que se possa compreender os fenômenos envolvidos em um limitador de corrente supercondutor.

O capítulo 3 descreve os limitadores mais comumente utilizados no setor elétrico e o limitador supercondutor.

No capítulo 4 é apresentado o módulo limitador supercondutor em estudo com suas características elétricas e construtivas.

No capítulo 5 são descritas os procedimentos experimentais.

No capítulo 6 apresentamos os resultados do trabalho e, finalmente, no capítulo 7 é apresentada uma conclusão sobre os resultados obtidos.

2.1 Introdução

Materiais supercondutores foram descobertos através dos estudos da variação da resistência com a temperatura. O físico holandês Heike Kamerlingh Onnes, em 1908 obteve sucesso na liquefação do hélio a 4 K, e em 1911, quando estudava a resistividade de metais em função da temperatura, notou-se que o mercúrio apresentava uma abrupta queda no valor de sua resistividade (figura 2.1).

Desde então, vários materiais foram testados, mas o acontecimento mais notável foi a descoberta da supercondutividade a temperaturas mais altas onde o líquido refrigerante empregado poderia ser o nitrogênio líquido (LN_2 a 77 K), de bem mais fácil manuseio e custo reduzido em relação ao hélio líquido.

A década de 80 foi onde mais se acelerou a pesquisa e desenvolvimento dos materiais supercondutores devido a descoberta de materiais supercondutores de alta temperatura crítica, possibilitando a utilização de nitrogênio líquido refrigerante.

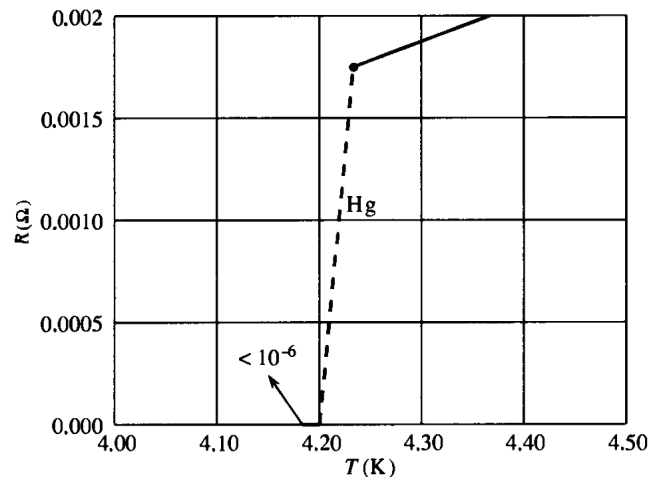


Figura 2.1: Curva de resistividade em função da temperatura para o mercúrio obtida por H. K Onnes.[16]

2.2 Principais Características

A supercondutividade é observada em determinados materiais, denominados supercondutores, e para que este material possa ser designado como tal, obrigatoriamente dois fenômenos devem ocorrer. O primeiro fenômeno é a capacidade de oferecer resistência nula, ou praticamente nula à passagem de corrente elétrica. O segundo, é o chamado efeito Meissner que é um efeito de repulsão magnética e encontra várias aplicações onde uma blindagem eletromagnética é desejada.

No efeito Meissner as correntes macroscópicas induzidas (lei de Faraday) no supercondutor pela aplicação de um campo magnético, chamadas supercorrentes, permanecem no material por tempo indeterminado já que a resistência é desprezível. Estas supercorrentes irão cancelar o valor da indução magnética no interior do material supercondutor [17], ou seja:

$$\vec{B} = 0 \quad (2.1)$$

Desse modo, dizemos que materiais supercondutores se comportam como diamagnetos, uma vez que repelem campo magnético. A maneira mais conhecida de se demonstrar o Efeito Meissner é a levitação magnética [18]. Se colocarmos um pequeno ímã sobre uma

amostra supercondutora que está abaixo de sua temperatura crítica, T_c , veremos que ele irá flutuar sobre esta amostra. A força gravitacional exercida sobre o ímã é compensada pela força magnética proveniente da circulação das correntes elétricas superficiais.

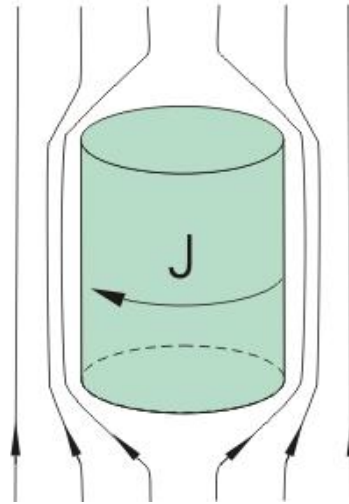


Figura 2.2: O fluxo magnético é nulo no interior de um material supercondutor devido às correntes superficiais.

É importante ressaltar que estes materiais devem estar submetidos a temperaturas muito baixas, onde seu resfriamento é realizado, normalmente, através de imersão em nitrogênio líquido, LN_2 , ou em Hélio líquido, LHe . Como o Hélio líquido encontra-se em uma temperatura de -269 °C e o nitrogênio líquido em -196 °C, os materiais que alcançam a supercondutividade quando resfriados com LN_2 , recebem a designação de “supercondutor de baixa temperatura” e “supercondutor de alta temperatura”, respectivamente [19]. É importante mencionar que existem vários materiais supercondutores com respectivos valores de temperatura aos quais eles devem ser resfriados, porém, vários estudos estão sendo direcionados para a pesquisa de materiais supercondutores em temperatura ambiente [20][21].

Existem três principais parâmetros que devem ser obedecidos para que a supercondutividade exista em um determinado material; temperatura crítica, densidade de corrente crítica e campo magnético crítico.

Através destes fenômenos, várias aplicações são utilizadas no setor elétrico. Uma

das primeiras características que podemos pensar em fazer uma aplicação prática é a resistência ou impedância praticamente nula e a levitação magnética para os trens de levitação. Neste trabalho, o limitador de corrente estudado faz uso da resistividade nula de materiais supercondutores.

Temperatura Crítica

Materiais supercondutores possuem um valor específico de temperatura na sua transição para supercondutividade. O valor de temperatura em que o material passa a ser um supercondutor é designado de temperatura crítica, T_c .

É usual o levantamento da curva da resistência versus temperatura ($R \times T$) para a caracterização dos materiais supercondutores. Uma das formas para isto, é a utilização de um sistema de medição equipado com um *cryocooler*, que é um sistema criogênico em ciclo fechado composto por: compressor, controlador de temperatura, dedo frio (onde se conecta a amostra pela técnica das quatro pontas), bomba de vácuo e nanovoltímetro (figura 2.3). Através deste sistema podemos construir o gráfico $R \times T$.



Figura 2.3: Sistema para levantamento da curva $R \times T$ – Laboratório de Supercondutividade do CEPTEL.

Densidade de Corrente Crítica

O valor máximo de corrente que um material no estado supercondutor pode transportar é denominado de densidade de corrente crítica J_c . Caso o material transporte uma densidade corrente maior que J_c , ocorrerá a quebra dos pares de Cooper [17], destruindo então a supercondutividade. O valor de J_c está relacionado com a temperatura do material e, diminui com o aumento da temperatura. Por ser responsável pela quebra dos pares de Cooper, este parâmetro também pode ser chamado de densidade de corrente de depareamento (*depairing current density*). No entanto, este é um termo mais frequentemente utilizado no estudo de supercondutores do tipo *II* (a ser definido). Em supercondutores do tipo *II*, o termo densidade de corrente crítica J_c geralmente é utilizado para determinar a densidade de corrente responsável pelo movimentos da rede de vórtices dentro do material supercondutor[15]. Esta pode apresentar diferentes valores para o mesmo material, dependendo do método de fabricação do composto supercondutores.

Uma forma usual de determinarmos o valor da corrente crítica (em supercondutores do tipo *II*) é através do levantamento da curva da queda de tensão versus corrente aplicada à amostra, curva $V \times I$ (ou de forma análoga, curva $E \times J$). Esta é obtida experimentalmente e consiste em medir a tensão no objeto ensaiado em função da corrente aplicada.

Campo Magnético Crítico

Se um supercondutor estiver submetido em um campo magnético e a intensidade deste aumentar, o material pode deixar de ser supercondutor. O valor da intensidade de campo magnético em que o material deixa de ser supercondutor é designado por campo magnético crítico, H_c .

O valor do campo magnético crítico também pode ser determinado através de um sistema de medição, o qual deverá variar o campo magnético onde o material deverá estar submerso. Lembrando que, além disto, o sistema também deverá contar com um sistema de resfriamento.

2.3 Materiais Supercondutores

Os materiais supercondutores são aqueles capazes de apresentar ambos fenômenos mencionados anteriormente. Eles podem ser materiais metálicos (elementos e/ou ligas), cerâmicos, C60 (fulereno, que quando dopado com metais alcalinos se tornam supercondutores), redes chevrel (supercondutores a base de Mo), ou até mesmo materiais orgânicos.

Os materiais supercondutores são divididos em duas classes:

- *Materiais Supercondutores do tipo I*: também conhecidos como supercondutores moles (*soft*), são em sua maioria materiais metálicos, ligas e compostos binários com um valor muito baixo de temperatura crítica. Apresentam apenas duas fases; a normal e a supercondutora (ou normal e estado Meissner) (figura 2.4).

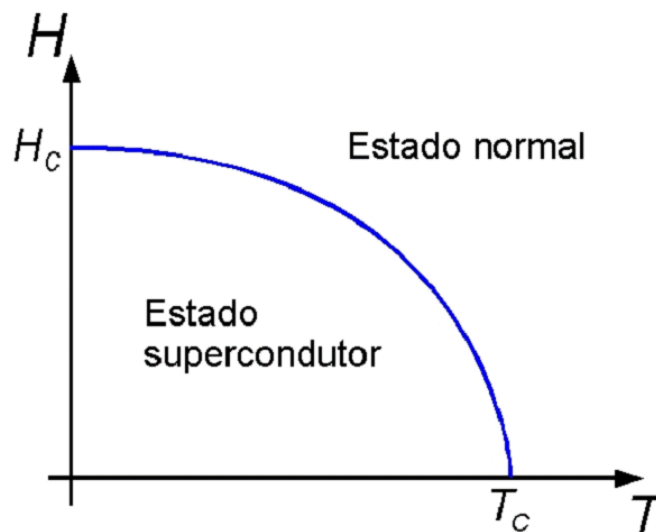


Figura 2.4: Diagrama de fases para um supercondutor do tipo I.

- *Supercondutores do tipo II*: também conhecidos como supercondutores duros (*hard*). São em sua maioria materiais cerâmicos (óxidos cuprosos) ou ligas. São diferentes dos supercondutores do tipo I pois apresentam três fases distintas: a fase supercondutora, caracterizada pelo efeito Meissner, o estado misto e a fase normal (figura 2.5). Sua transição de fase é distinta do tipo I, visto que os do tipo II possuem dois valores de H_c . Na figura 2.5, para $H < H_{c1}$, o material exibe o completo efeito
-

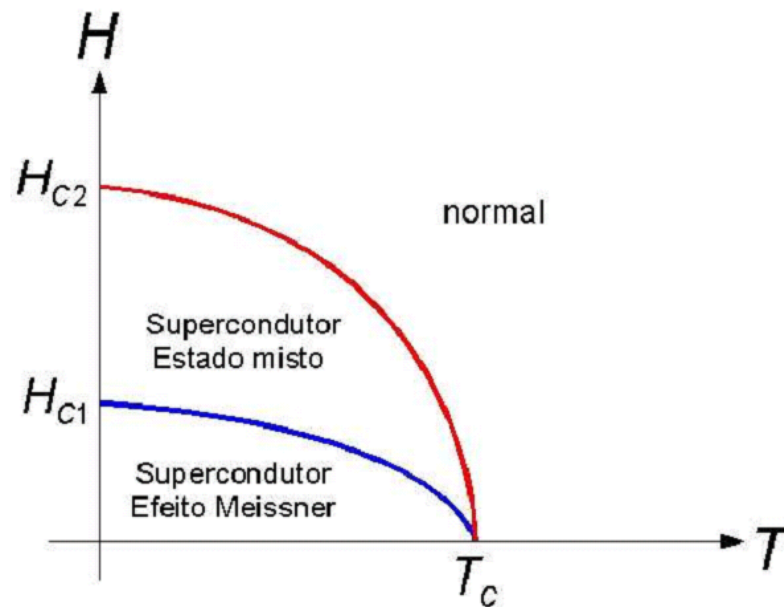


Figura 2.5: Diagrama de fases para um supercondutor do tipo II.

Meissner. Para $H_{c1} < H < H_{c2}$, o supercondutor se encontra no estado designado como “estado misto”, onde H penetra em parte no material e, finalmente, para $H > H_{c2}$, o material deixa de exibir as propriedades supercondutoras. Uma atenção especial deve ser dada ao estado misto. Neste estado, não ocorre a total expulsão do campo magnético, ou seja, o diamagnetismo não é perfeito, como no efeito Meissner. As regiões onde ocorre a penetração do campo magnético recebem o nome de *vórtices* (figura 2.6).

Para aplicações práticas, os supercondutores tipo II são os mais apropriados porque têm altos valores de H_{c2} (da ordem de dezenas de Teslas ou até de valores tão altos que ainda não foram determinados, como no caso de supercondutores de alta temperatura). O interesse, em termos de aplicação, é, então, mais voltado para o supercondutor com $H_{c1} < H < H_{c2}$, ou seja, no estado misto. Os supercondutores do tipo I possuem um H_c de baixo valor em relação aos supercondutores do tipo II, não sendo bons candidatos para as aplicações da supercondutividade no setor elétrico.

Ainda não há uma teoria para explicar a supercondutividade nos materiais

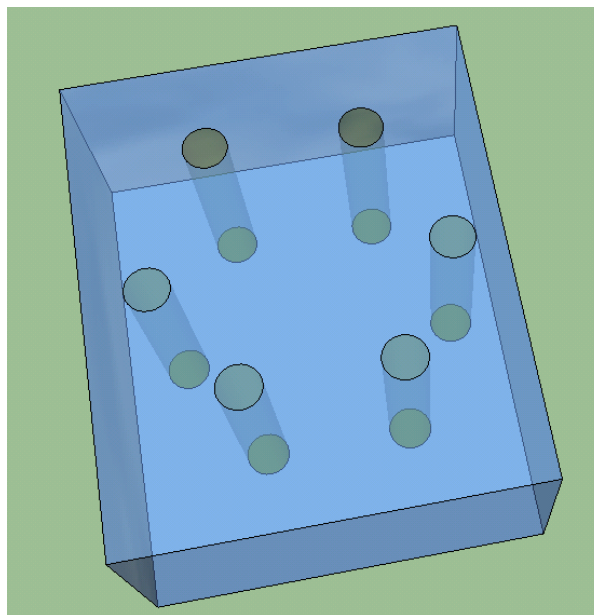


Figura 2.6: Supercondutor do tipo II na presença de um campo magnético. As regiões onde existe a penetração de campo magnético recebem o nome de vórtices.

supercondutores do tipo *II* (supercondutores que não possuem perfeito diamagnetismo) visto que a conhecida teoria *BCS* (dos físicos John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer, vencedores do Prêmio Nobel de 1972) descreve apenas a supercondutividade nos materiais metálicos ou materiais do tipo *I*.

Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

3.1 Introdução

Um limitador de corrente de curto-circuito, FCL, (do inglês, *Fault Current Limiter*), é um dispositivo que deve ser inserido na rede elétrica com a finalidade de atenuar valores de corrente muitas ordens de grandeza acima da nominal originadas como consequência de uma falha que gere altas correntes. Este dispositivo é utilizado para a proteção tanto dos equipamentos da rede quanto da carga e é indicado para problemas de superação dos equipamentos da rede, evitando substituições, danos e prejuízos.

3.2 Necessidade do Uso de Limitadores de Corrente de Curto Circuito

As correntes de curto circuito estão cada vez mais altas devido a vários fatores tais como: aumento da demanda, interligamento de sistemas elétricos, adição de novas usinas geradoras [3]. Os equipamentos de proteção estão atualmente superados, vários estão atuando em seus limites de operação. A compra ou troca de disjuntores, relés ou outros

equipamentos associados ao sistema de proteção é uma providência, na maioria dos casos, proibitiva, não só pelo custo destes equipamentos, mas pela impossibilidade da interrupção no fornecimento de energia.

Algumas soluções para a redução da corrente de curto-circuito, como a subdivisão de subestações, reduzem a confiabilidade do sistema. Reatores limitadores de corrente causam queda de tensão, perda de energia e instabilidade do sistema.

Conforme o aumento dos níveis da corrente de curto-circuito e a necessidade de reduzi-los, existem algumas soluções que podem ser separadas em duas categorias: a solução provisória e a solução definitiva. A solução provisória geralmente é implementada em casos de emergência, mas deve ser evitada, pois algumas conseqüências podem atuar de forma negativa sobre o sistema, tais como, perdas, e até mesmo custos por uma medida meramente provisória.

O objetivo das soluções provisórias é de tomar alguma providência, geralmente uma medida sistêmica, de tal forma que os equipamentos de proteção não superem seus limites operacionais enquanto uma solução definitiva ainda não for implementada. Devemos lembrar que estas soluções provisórias podem reduzir a confiabilidade do sistema. Estas medidas atuam reduzindo o valor da corrente de curto-circuito e podem se tratar de alguma modificação na rede ou de alguma restrição operativa [3].

Algumas restrições operativas são:

- Seccionamento de barras, pois um lado da barra não participa mais com o valor da corrente de curto circuito da outra barra;
- Desligamento de compensadores síncronos que atuam como fontes que contribuem no valor da corrente de curto circuito;
- Radialização de circuitos, também reduz a corrente pelo aumento da impedância.

As modificações na rede podem ser:

- Utilização de equipamentos com valores de reatância maiores;
- Aterramento de transformadores através de impedância ou retirada do aterramento, ação que modifica a rede de seqüência zero e limita as correntes de defeitos monofásicos.

As soluções definitivas são as ideais para todos os problemas, entretanto, podem ser mais custosas e tecnicamente mais complexas, levando mais tempo para serem efetivadas. Porém, como o objetivo principal das empresas geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia é de sempre atender à demanda, é mais seguro solucionar de forma definitiva os problemas que colocam em risco o fornecimento de energia.

A solução mais recomendada seria a substituição dos equipamentos com problemas de superação dos limites de operação, porém esta opção pode se tornar economicamente inviável e necessariamente descartada na maioria dos casos, visto que o fornecimento de energia deveria ser interrompido em longos intervalos de tempo.

Conforme o exposto, uma solução interessante seria a utilização dos limitadores de corrente de curto-circuito. Visando atender da melhor forma possível as necessidades do sistema, os limitadores devem possuir algumas características, tais como:

- Sob regime permanente, impor a menor impedância possível;
 - Sob condição de falta, acrescentar alta impedância para que esta reduza a corrente de defeito;
 - O tempo de transição do estado de operação normal para o estado de operação sob falta deverá ser o menor possível;
 - Após a atuação do limitador, este deverá retornar ao estado de operação normal, o mais rápido possível;
 - Necessidade mínima de manutenção e de preferência que não precise ser trocado após sua atuação;
-

- O espaço que o dispositivo ocupará, deverá ser o menor possível, pois geralmente será adicionado em subestação já montada;
- Seu custo não deverá ser elevado.

3.3 Principais Limitadores de Curto Circuito

Existem vários tipos de limitadores de curto circuito. Os mais empregados atualmente no sistema elétrico são os reatores com núcleo de ar e os dispositivos pirotécnicos. Outros tipos que podemos mencionar são: o IPC (*Interphase Power Controller*), e os dispositivos com tecnologia FACTS (*Flexible AC Transmission System*). E ainda, dispositivos que se encontram na fase de pesquisa e desenvolvimento: limitadores supercondutores para alta tensão e os disjuntores de abertura rápida baseado em chaves eletrônicas.

Para se justificar a substituição ou adição de um dispositivo que consiste em uma nova tecnologia no mercado, é interessante conhecer o que está sendo utilizado atualmente, para assim, fazer uma comparação e posteriormente estabelecer a relação custo x benefício desta substituição ou adição. Sendo assim, uma breve explicação sobre os tipos de limitadores mais usualmente empregados atualmente nos sistemas de proteção, é exposta nas próximas seções.

3.3.1 Reatores a núcleo de ar

Os reatores com núcleo de ar são constituídos por enrolamentos de cobre ou alumínio, formando uma ou várias bobinas que são montadas sobre suportes isolantes. O núcleo é de ar para que não haja o problema da saturação de núcleo de ferro, para que desta forma seja possível que variados valores de corrente possam circular pelos enrolamentos.

Estes reatores inibem o rápido crescimento da corrente de curto-circuito, e, desta forma, mantendo este valor aceitável para os equipamentos instalados a jusante (seccionadores, disjuntores, transformadores). São os limitadores com mais ampla experiência de uso no sistema elétrico. Sua faixa de operação compreende de 13,8 kV a 500 kV. Seu

custo não é elevado e pode-se obtê-los através de fabricantes nacionais.

Sobre seu funcionamento e algumas características pode-se mencionar que atua como uma impedância conectada em série com os circuitos e o barramento. Esta impedância aumenta na ocorrência de um curto-circuito e desta forma, reduz a corrente de curto-circuito. Ele possui elevado fluxo magnético e elevado efeito Joule. Possui dimensões grandes comparativamente à maioria dos outros dispositivos limitadores e pode ser conectado em série com transformadores, em série com linhas, nos alimentadores, e em acoplamentos de barramento



Figura 3.1: Reatores com Núcleo de ar em Mogi das Cruzes (345 kV) [22].

Para exemplificar numericamente um caso da utilização dos reatores com núcleo de ar, tomemos a subestação de Mogi das Cruzes 345 kV (figura 3.1). Com a instalação dos reatores, foi evitada a troca dos seguintes equipamentos de 25 kA, por outros de 40 kA:

- 15 disjuntores;
 - 75 seccionadoras;
 - 15 transformadores de corrente;
 - 8 transformadores de potencial;
 - 15 pára-raios;
 - 6 bobinas de bloqueio.
-

A troca destes 134 equipamentos custaria U\$ 10 milhões [22], sem contar com o custo da mão de obra. Mesmo com a economia mencionada acima, uma grande desvantagem de seu uso é a perda associada à sua inserção na rede. Em longo prazo, a sua utilização pode sair muito onerosa. Outro fato é a queda de tensão que eles impõem à rede, porém em uma rede intensamente malhada, isto pode ser desprezado. Além disso, os reatores ocupam grandes espaços na subestação, pois devido ao seu campo magnético no curto-circuito, é necessário um grande espaçamento entre os equipamentos e entre as fases.

3.3.2 Dispositivos Pirotécnicos

Assim como o reator com núcleo de ar, os dispositivos pirotécnicos são bem conhecidos e amplamente utilizados no sistema elétrico, porém atuam somente até 40 kV para correntes nominais de até 5 kA com capacidade de ruptura de até 120 kA [23].

Em operação normal, a corrente do circuito circula através de uma barra condutora onde são instalados explosivos químicos específicos. Um fusível limitador é conectado em paralelo a esta barra, sendo que o circuito do fusível possui impedância superior ao da barra para que não circule corrente por ele em regime (figura 3.2 – a). A corrente de curto-circuito é detectada em sua rampa de subida (através de sensores eletrônicos associados aos transformadores de corrente), disparando a carga química que então parte a barra condutora, introduzindo um arco elétrico no ponto (ou pontos) de ruptura. Este arco desvia a corrente, já reduzida, para o fusível limitador que, então, a extingue (figura 3.2 – b).

Algumas vantagens do dispositivo pirotécnico [23]:

- A corrente de falta é extinta em menos de 1/4 de ciclo;
 - Pode ser instalado em ambiente aberto ou blindado;
 - Não dissipam energia, pois não acrescentam resistência em regime normal;
 - Não ocupam muito espaço (equivalente a compartimento para disjuntores de média tensão).
-

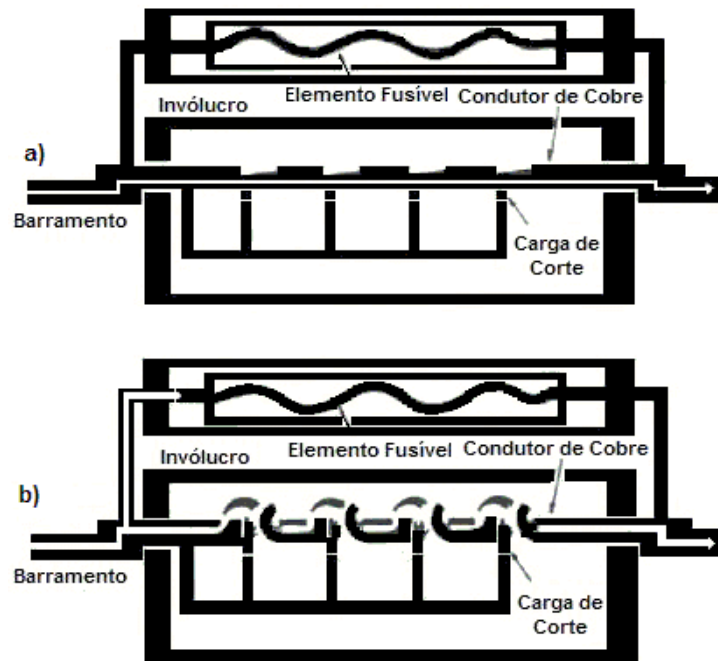


Figura 3.2: Dispositivo Pirotécnico (a) funcionamento normal; (b) atuação sob curto-circuito [23].

Como desvantagem, mencionamos a necessidade de substituição dos elementos rompidos na ocorrência de um curto-circuito além da necessidade de reposição após muito tempo sem uso.

3.4 Limitadores de Corrente Supercondutores

Os limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores, *SCFCL*, atuam reduzindo a corrente de falta a um valor suportável para os disjuntores já conectados à rede. O *SCFCL* é projetado de forma que a corrente de operação normal fica abaixo da sua corrente crítica. Ele apresenta-se como uma opção tecnicamente viável e bastante atrativa ao mercado.

Para uma melhor compreensão do funcionamento de um *SCFCL*, de forma resumida, tomemos a curva do campo elétrico, E , contra a densidade de corrente, J , característica do material *MCP-BSCCO-2212* ilustrada na figura 3.3.

Podemos notar nesta figura que a medida que o valor da densidade de corrente J aumenta, o valor do campo elétrico também aumenta. Este aumento no campo elétrico

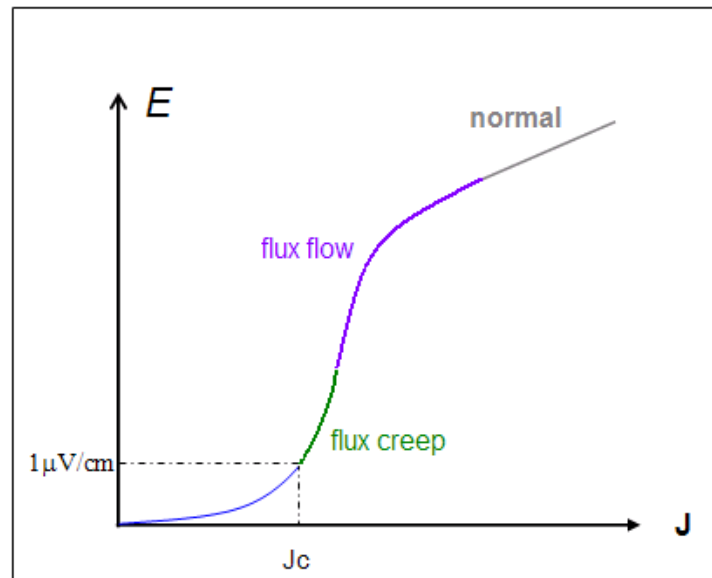


Figura 3.3: Campo elétrico E do supercondutor em função da densidade de corrente J .

está diretamente relacionado com o movimento da rede de vórtices existentes no material supercondutor. O valor da densidade de corrente que faz com que o campo elétrico atinja o valor de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ é denominado densidade de corrente crítica J_c , como explicado no capítulo anterior. O critério de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ não é o único, no entanto, é o mais usual [24].

A curva $E - J$ descreve a transição do *MCP-BSCCO-2212* desde o estado supercondutor até o estado normal. Ainda na figura 3.3 podemos distinguir três diferentes estágios desta transição; o primeiro deles, o *flux-creep* está relacionado ao início da rede de vórtices. O segundo estágio, o *flux-flow* se inicia quando o campo elétrico atinge o valor de $1 \text{mV}/\text{cm}$ [25][26] e está relacionado a um movimento mais intenso da rede de vórtices dentro do material. Este movimento de vórtices dentro do material gera a dissipação de energia na forma de calor, fazendo com que a temperatura do mesmo se eleve. Dessa forma, uma corrente de curto circuito, que normalmente é bem maior que a densidade de corrente crítica do material supercondutor, gera o movimento de vórtices, aquecendo o material de maneira que este atinge a sua temperatura crítica T_c . Como sabemos, a partir de valores maiores que T_c , este se encontra no estado normal, apresentando um caráter linear na curva $E - J$. Maiores detalhes sobre os estágios de transição podem ser

encontrados em [15].

3.4.1 Tipos de Limitadores de corrente Supercondutores.

Os SCFCL's possuem três tipos mais comuns: resistivo, indutivo e híbrido.

Tipo Resistivo

O limitador resistivo é conectado em série com o sistema a ser protegido e possui uma camada metálica, denominada *shunt*. Este fica em contato com o supercondutor em toda a sua extensão e tem como uma das finalidades, proteger o material supercondutor contra o surgimento de *hot spots* (pontos quentes) que podem surgir devido a heterogeneidade do material supercondutor. As regiões chamadas de hot-spots são regiões que podem apresentar diferentes valores de temperatura crítica T_c e densidade de corrente crítica J_c . Estas diferenças podem fazer com que uma determinada região do material transite para o estado normal antes das demais. Dessa maneira, *hot-spots* são indesejáveis pois danificariam o material supercondutor uma vez que toda a potência de um curto-circuito seria dissipada nesta região.

O *shunt* metálico soldado ao material supercondutor desvia a corrente do material supercondutor quando uma região de *hot-spot* surge, protegendo então o limitador de danos mais sérios.

O *shunt* funciona como uma resistência em paralelo com o material supercondutor e deverá possuir um valor menor que a resistência deste após a transição para o estado normal. Na ocorrência de um curto-circuito, a impedância do material supercondutor será maior que o *shunt*, e a corrente irá circular pela camada metálica.

Algumas características importantes do tipo resistivo são: possuem alta capacidade de limitação, baixa impedância, se encaixam no conceito de falha segura (*fail safe*) e possuem tamanho reduzido quando comparado aos outros tipos.

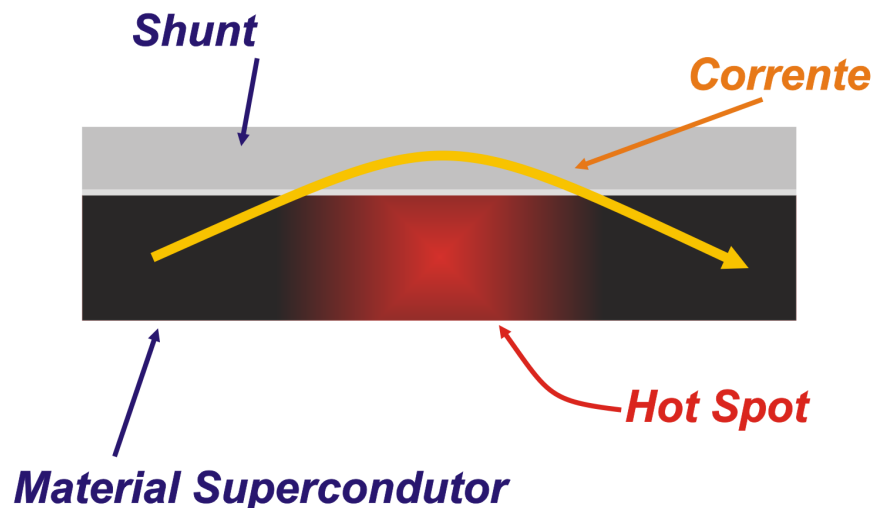


Figura 3.4: Desvio da corrente pelo shunt nos hot spots [15].

Tipo Indutivo

Este limitador é acoplado magneticamente à rede, sendo que a bobina secundária é um supercondutor que envolve um núcleo de ferro (figura 3.5). Em operação normal, o supercondutor funciona como uma blindagem ao núcleo de ferro que então fica isolado da rede, devido ao efeito Meissner, que repele os campos magnéticos. Quando ocorre uma falta, o campo magnético induzido na bobina primária supera o campo magnético crítico do material supercondutor, fazendo com que a blindagem seja perdida, e então, a bobina secundária, agora sentida pelo circuito, será responsável pelo rápido incremento de impedância ao circuito, fazendo com que a corrente seja reduzida.

A vantagem deste tipo é o seu acoplamento magnético ao sistema, desta forma, não é necessária uma conexão entre condutores normais ao supercondutor. Uma desvantagem inerente ao tipo de construção deste dispositivo é que o uso do material supercondutor é grande para que possa se fazer a blindagem da bobina secundária, mesmo que somente em parte. Também é necessário um grande espaço para deixar o supercondutor imerso em nitrogênio líquido. De certa forma, o limitador do tipo indutivo, se torna como um transformador, mesmo sem ter esta função, ocupando um espaço grande e possuindo alta indutância.

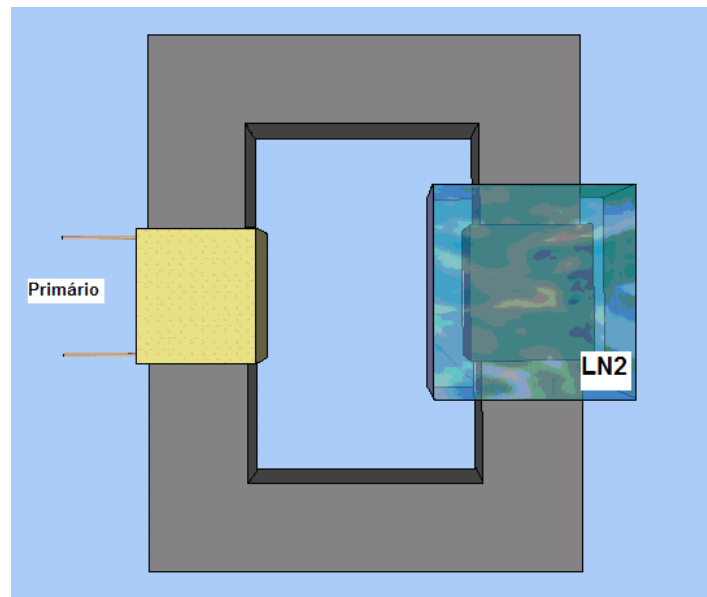


Figura 3.5: Limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo.

Tipo Híbrido

O limitador supercondutor do tipo híbrido é um dispositivo misto que apresenta as duas propriedades citadas nas seções anteriores; resistiva e indutiva. Consiste de um transformador com um limitador supercondutor resistivo conectado em série com o enrolamento secundário do transformador, enquanto que o enrolamento primário do transformador é conectado em série com a rede a ser protegida, conforme podemos observar na figura 3.6[15].

Em condições normais de operação, o material permanece no estado supercondutor, fazendo com que se tenha uma baixa impedância referida ao primário.

Na ocorrência de um curto-circuito, a corrente do secundário ultrapassa a corrente crítica do material supercondutor, levando o material a transicionar para o estado normal e, por consequência, gerando uma impedância que antes não existia no circuito. Essa impedância é referida para o primário e a corrente de curto-circuito é, então, limitada.

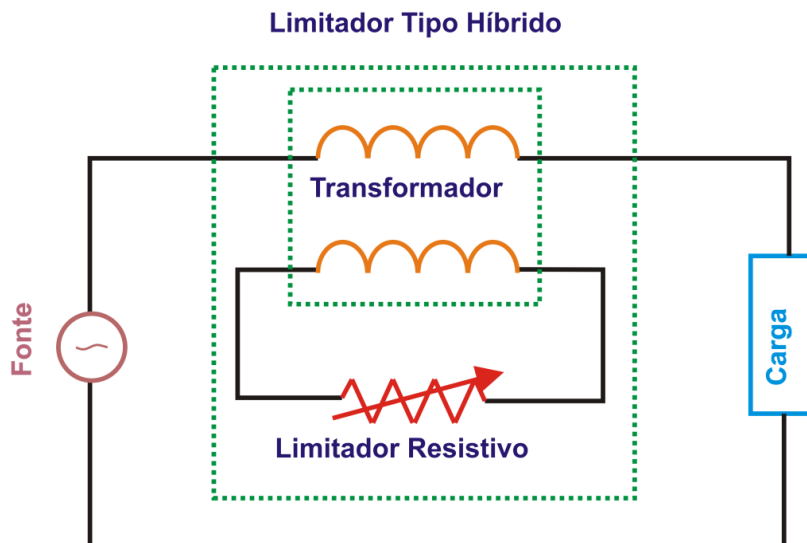


Figura 3.6: Limitador Supercondutor do Tipo Híbrido.

3.4.2 Vantagens de um SCFCL

Observa-se que no caso dos limitadores tradicionais, em sua maioria (principalmente quando possuem elementos fusíveis), quando estes atuam, o equipamento deve ser trocado, implicando no corte do fornecimento de energia elétrica. Outro fator importante a ser considerado é que estes limitadores geralmente acrescentam impedância ao sistema, característica que causa perdas ao sistema.

A utilização de limitadores de curto circuito com base em materiais supercondutores tem se mostrado promissora, visto que vários ensaios e até mesmo utilização em que têm sido empregados, resultaram em uma atuação satisfatória [3]. Algumas vantagens de sua utilização podem ser mencionadas:

- O dispositivo atua em uma ordem de milissegundos (cerca 1 de ciclo) para correntes de falta bem maiores que a corrente crítica do supercondutor que compõe o limitador;
- Acrescenta baixa impedância ao circuito em regime permanente;
- Atuação não depende de mecanismos externos;
- Após falta, pode retornar ao estado normal de operação naturalmente;
- Não é necessária reposição de peças ou elementos após sua atuação;

Módulo Limitador Supercondutor Estudado

4.1 Introdução

Um módulo limitador de corrente de curto circuito supercondutor foi ensaiado nas dependências do CEPEL para que o seu desempenho fosse avaliado. Salienta-se aqui, que a palavra módulo é empregada, pois o mesmo é utilizado como parte de um conjunto de várias unidades iguais conectadas (em série e/ou paralelo [27]) na construção do módulo adquirido do fabricante *Nexans Superconductors GmbH (Alemanha)* [3].

4.2 Descrição do módulo

O módulo sob ensaio é do tipo resistivo e de construção cilíndrica bifilar, ou seja, apresenta um duplo enrolamento de camada supercondutora e de *shunt*. Sua geometria é desenvolvida de modo que a indutância deste componente seja desprezível.

O supercondutor utilizado para a construção do dispositivo ensaiado é constituído por uma cerâmica denominada *MCP-BSCCO-2212 (Melt cast processed BSCCO 2212)* [7].

- *Melt cast processed* - é o tipo de processamento do material supercondutor. Neste

método, o material é submetido a tratamentos térmicos que envolvem a fusão completa do material seguida de resfriamento e recozimento. O método MCP é patenteado e mais detalhes sobre este processo podem ser encontrados em [28].

- *BSCCO 2212* – é um material cerâmico supercondutor de alta temperatura crítica de transição (aproximadamente 92 K) composto pelos elementos *Bi, Sr, Ca, Cu, O* na estequiometria 2212.

Estes módulos são protegidos mecanicamente por um material isolante e resistente a baixas temperaturas (resina epóxi “*Stycast 2850FT*”)[8]. Suas características são:

- Baixo coeficiente de expansão térmica, similar ao do alumínio;
- Rigidez dielétrica de 15 kV/mm.

É interessante mencionar que o nitrogênio líquido também atua como isolante, com propriedades superiores a de líquidos isolantes convencionais como óleos de transformadores [8]. Durante o “quenching”, ou seja, a transição entre estado supercondutor e normal, ocorre a formação de um filme de bolhas sobre a superfície do limitador, o que pode reduzir as trocas de calor do limitador com o meio.

Estes componentes ainda apresentam uma camada interna estabilizante, que consiste de uma proteção mecânica para evitar que haja o rompimento da conexão entre *shunt* e o supercondutor durante o resfriamento. Tem também a função de compensar as elevadas forças axiais que surgem durante o curto-circuito. Esta camada estabilizante é composta por uma resina polimérica reforçada com fibra de vidro, que é capaz de suportar a temperatura do LN_2 .

O *shunt* é constituído de uma liga de *CuNi* [7] e, para o módulo estudado, apresenta resistividade elétrica de $\rho = 40\mu\Omega.\text{cm}$ ou $0,400\mu\Omega.\text{m}$, que corresponde a 4,3% da condutividade elétrica do cobre e próximo da condutividade elétrica do aço silício.

Na figura 4.1 detalhamos todos os componentes descritos nesta seção e na tabela 4.1 apresentamos as medidas dos parâmetros do módulo limitador estudado.

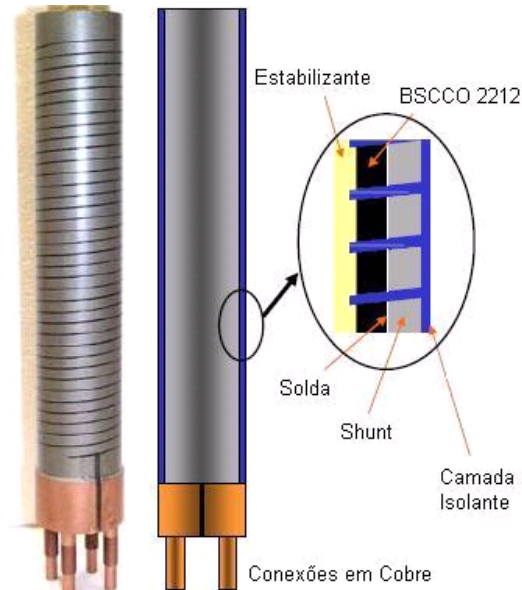


Figura 4.1: Detalhes do módulo limitador de corrente supercondutor utilizado.

Tabela 4.1: Construtivas do Módulo estudado

Parâmetro	Dimensão
<i>Comprimento total</i>	381 mm
<i>Comprimento do módulo</i>	300 mm
<i>Comprimento do elemento supercondutor (bobina bifilar)</i>	5,4 m
<i>Área de seção transversal do supercondutor</i>	24 mm ²
<i>Diâmetro externo do módulo</i>	58 mm
<i>Diâmetro interno</i>	35 mm
<i>Espessura da camada de shunt</i>	2,9 mm
<i>Seção transversal da camada de shunt</i>	17,4 mm ²
<i>Espessura solda entre o shunt e o supercondutor</i>	0,2 mm
<i>Espessura de isolante entre as espiras</i>	1,0 mm
<i>Espessura camada isolante externa</i>	0,9 mm
<i>Largura da espira supercondutora</i>	6,0 mm
<i>Espessura da espira supercondutora</i>	4,0 mm
<i>Distância entre as espiras</i>	1,0 mm
<i>Espessura do estabilizante</i>	2,54 mm
<i>Peso total</i>	3,9 kg

4.2.1 Propriedades elétricas

De acordo com o fabricante (*Nexans SuperConductors GmbH (Alemanha)*) estes módulos limitadores tem corrente nominal de 200 A limitadores devem ser submetidos a máxima tensão de 300 V a 77 K. Em 65 K, apresentam corrente nominal de 600 A e máxima tensão de 300 V.

Corrente Crítica

As informações do fabricante nos dizem que o valor da corrente crítica do módulo estudado é $I_c = 307$ A (corrente contínua e critério de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$), a 77 K, sujeito apenas a autocampo.

A curva obtida em laboratório, conforme a figura 4.2, apresentou comportamento bem próximo à curva que consta no certificado do dispositivo. Contudo, o valor de I_c obtido, após diversas medições, foi de aproximadamente 275 A. Este gráfico foi gerado através de um sistema de medição disponível no Laboratório de Supercondutividade do CEPTEL – Eletrobrás. Este sistema de medição para o levantamento da curva $V \times I$ é feito através de aplicações de corrente pulsada em intervalos iguais de tempo.

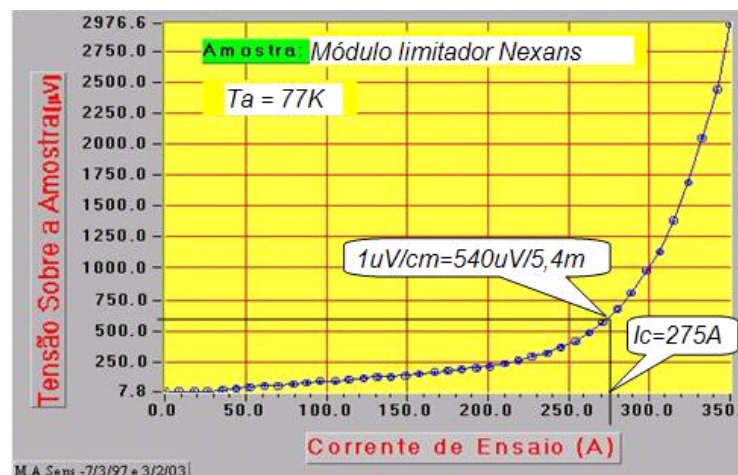


Figura 4.2: Curva $V \times I$ do Módulo Limitador ($I_c = 270$ A)

O ponto inicial da curva não começa em zero, pois existe uma tensão devido à resistência dos contatos de cobre. Para determinar o valor da I_c , foi necessário subtrair esta

tensão. Este resultado pode ser observado na figura 4.3.

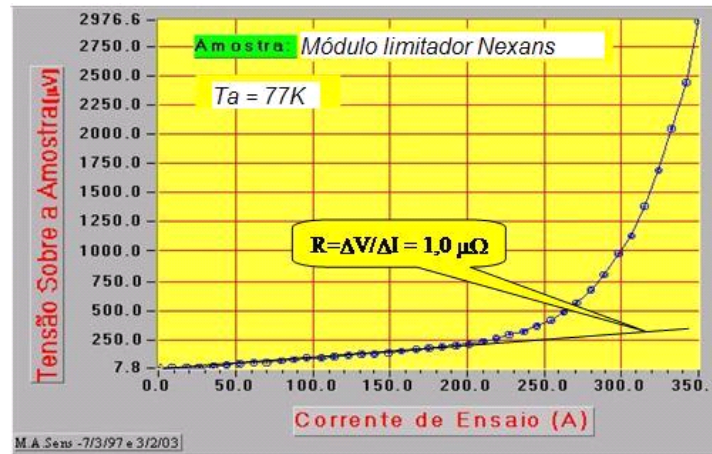


Figura 4.3: Curva $V \times I$ do Módulo Limitador descontando as resistências de contato.

A curva gerada após a subtração desta tensão devido à resistência do contato com o cobre, assim como a curva original é exibida na figura 4.4, de onde obtemos o valor de I_c igual a 299 A, valor mais próximo ao valor fornecido pelo fabricante ($I_c = 307$ A).

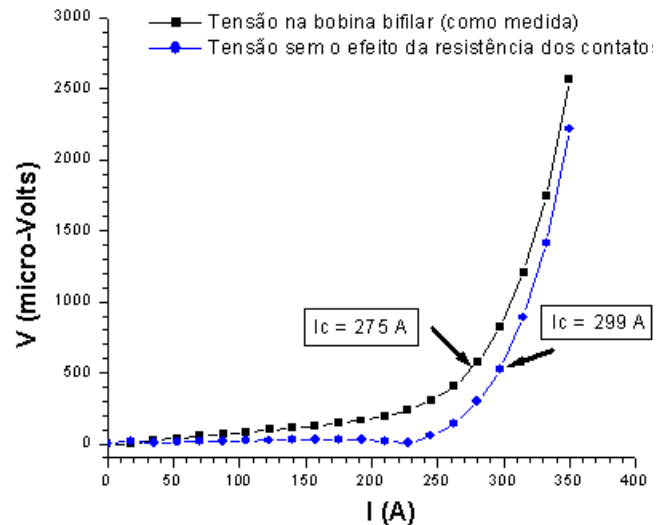


Figura 4.4: Curva $V \times I$ do módulo com e sem o efeito do contato do cobre

Potência Nominal

Conforme as especificações fornecidas pelo fabricante, a potência máxima que pode ser aplicada ao dispositivo supercondutor é de $200 \text{ A} \times 300 \text{ V} = 60 \text{ kV A}$, sob temperatura de 77 K.

Reatância

A reatância destes módulos podem se estimadas a partir do seu valor de indutância, que de acordo com [29] é de $2,6 \mu\text{H}$. Assim temos:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi \times 60 \times 2,6 \times 10^{-6} = 0,98 \text{ m}\Omega$$

Perdas em Corrente Alternada

De acordo com [7], as perdas em corrente alternada deste componente limitador, em corrente nominal de 600 A (LN_2 pressurizado, 65 K) são da ordem de 3 W/m, ou seja, 16 W por componente limitador (5,4 m).

Procedimentos Experimentais

5.1 Primeiros ensaios

Antes dos ensaios do módulo no Laboratório de Altas Correntes, alguns ensaios de curto-circuito foram realizados no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas, que possui um transformador a seco, alimentado a 480 V (figura 5.1), onde pudemos variar a tensão aplicada de 24 V a 600 V. Uma bobina de Rogowski foi utilizada para a medição de corrente.

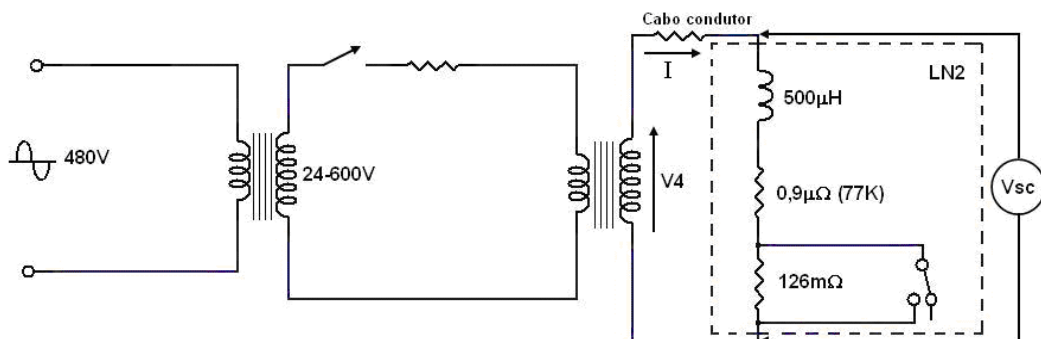


Figura 5.1: Circuito de ensaio no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas.

Este ensaio foi feito para que se pudesse visualizar o efeito da limitação de corrente.

5.2 Ensaaios de Alta Corrente

Após as medições e ensaios com o módulo para levantamento das suas características nominais e comportamento sob corrente contínua e alternada, o mesmo foi submetido à aplicações de altas correntes para observarmos o seu funcionamento perante uma corrente de curto-circuito. As aplicações de corrente tiveram duração de 75 ms a 115 ms.

O sistema de medição do Laboratório de Altas Correntes do CEPEL, em Adrianópolis, possui capacidade de reportar a aquisição de dados em gráficos separados de tensão e corrente contra o tempo. Como recebemos estes dados impressos, as imagens foram tratadas através de aplicativos de imagens e digitalizadas para que fosse possível unir as curvas de tensão e corrente (créditos do tratamento de imagens – Eng.M.A.Sens –CEPEL). Um ensaio em curto-circuito foi realizado para que se pudesse obter o valor da corrente presumida, sendo que a partir da sexta aplicação, o valor desta corrente foi mantido.

O módulo limitador foi conectado em uma fase do circuito de medição do laboratório. Na figura 5.2 podemos ver uma ilustração do circuito de ensaio, onde O.T. é o objeto sob teste (módulo limitador) e TC é o transformador de corrente com relação 50000-5 A para a medição de corrente que é enviada ao sistema de aquisição de dados (Oscilógrafo);. É importante ressaltar que este foi conectado em apenas um dos três ramos com transformadores conectados em paralelo do sistema de medição deste laboratório.

Na figura 5.3 observamos o módulo limitado imerso em recipiente apropriado para uso com líquido criogênico (dewar) e mantido à pressão ambiente.

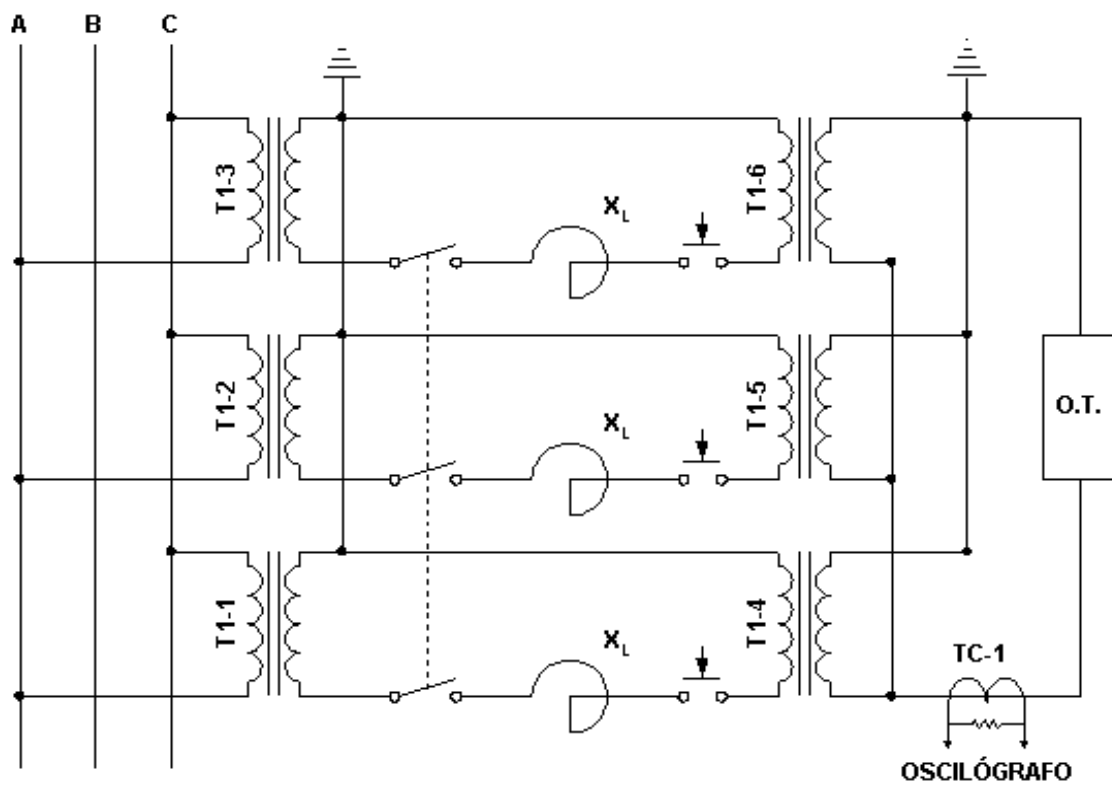


Figura 5.2: Circuito de ensaio do Laboratório de Altas Correntes (CEPEL-Adrianópolis)

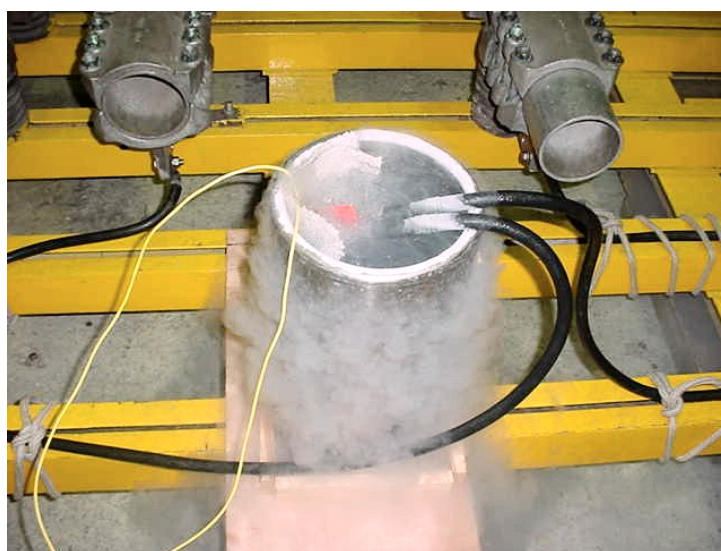


Figura 5.3: Ensaio sob altas correntes do módulo imerso em dewar com LN_2 .

5.3 Fator de Limitação

Para podermos avaliar o desempenho de um limitador, devemos comparar a corrente que surgiria no circuito sem a intervenção deste, com a corrente apresentada sob a atuação do dispositivo. Esta corrente sem a atuação do limitador é chamada de corrente presumida ou corrente prospectiva. O fator de limitação, $FL\%$, é definido como o percentual em que a corrente foi limitada em relação à corrente prospectiva e é diretamente proporcional à razão entre o primeiro pico da corrente limitada (I_{Lpeak}) e o primeiro pico da corrente prospectiva (I_{Ppeak}), que é a corrente do circuito sem o limitador supercondutor. Assim, temos:

$$FL\% = 100 \left(1 - \frac{I_{Lpeak}}{I_{Ppeak}} \right) \quad (5.1)$$

6.1 Introdução

Neste capítulo iremos apresentar os resultados referentes aos ensaios mencionados no capítulo anterior.

6.2 Resultados dos primeiros ensaios

Na figura *6.1* apresentamos o resultado do primeiro ensaio, feito no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas. A curva desta figura apresenta uma tendência linear até que a partir de um determinado valor de corrente no limitador ($I_{sc} = 3,78$ kA) deixa de apresentar esta tendência indicando a transição do supercondutor para o estado normal e acrescentando assim, uma impedância Z_{sc} como indicada no gráfico. Notamos que o valor da impedância do módulo supercondutor aumentou cerca de trinta vezes (de $0,178$ m Ω para $4,89$ m Ω) quando ocorreu a transição do estado supercondutor para o estado normal indicando claramente a atuação do supercondutor como limitador de corrente de curto-circuito.

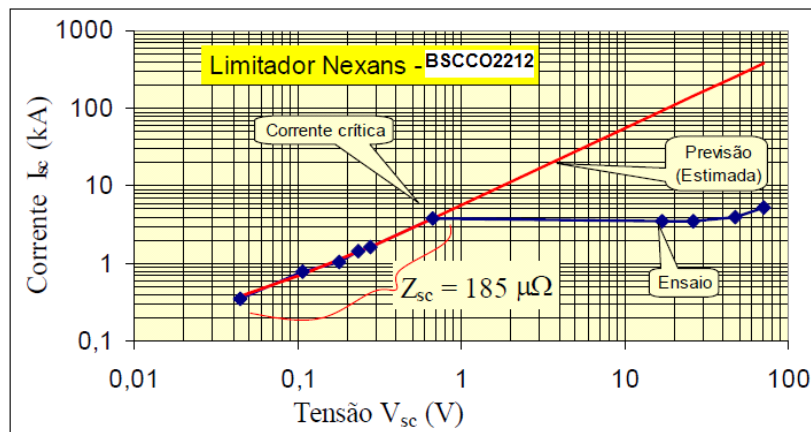


Figura 6.1: Curva $I \times V$ do módulo estudado obtida no Laboratório de Propriedades Elétricas e Magnéticas do CEPTEL.

6.3 Aplicações de altas correntes

Foram realizadas quatorze aplicações de corrente de curto-circuito. Na tabela da figura 6.2 apresentamos os valores da corrente presumida e os valores da corrente com a atuação do limitador, juntamente com seus respectivos valores de fator de limitação. Da figura 6.3 até a figura 6.16 apresentamos todas as curvas de tensão e corrente dos ensaios plotadas em um mesmo gráfico.

Ensaio	$I_{prosp}(kA)_{pico}$	$I(kA)_{pico}$	FL%	$I_{prosp}(kA)_{eficaz}$	$I_{eficaz\ simétrica} (kA)$	FL%	Tensão (V)
1	8,16	6,02	26,23	3,67	2,87	21,80	700
2	5,68	4,03	29,05	2,52	1,79	28,97	183,2
3	7,49	4,74	36,72	3,10	1,95	37,10	205,1
4	8,78	5,19	40,89	3,89	2,08	46,53	230,7
5	11,16	5,06	54,66	4,42	2,15	51,36	238,2
6	11,16	5,23	53,14	4,42	2,19	50,45	245,7
7	11,16	4,45	60,13	4,42	2,21	50,00	244,2
8	11,16	5,31	52,42	4,42	2,24	49,32	248
9	11,16	3,83	65,68	4,42	2,15	51,36	248,2
10	11,16	5,27	52,78	4,42	2,25	49,10	243,6
11	11,16	4,16	62,72	4,42	2,17	50,90	246,7
12	11,16	4,07	63,53	4,42	2,16	51,13	246,8
13	11,16	5,17	53,67	4,42	2,28	48,42	246,9
14	11,16	5,23	53,14	4,42	2,21	50,00	248,3

Figura 6.2: Fator de limitação dos ensaios.

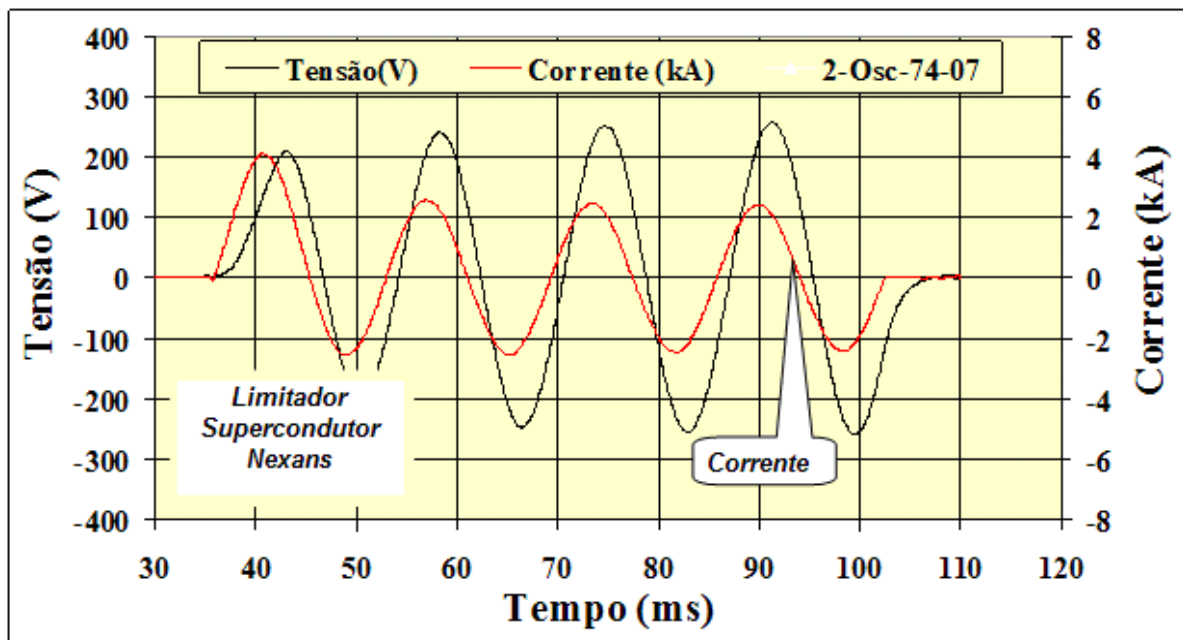


Figura 6.3: Ensaio 01: $I_{prosp} = 8,16$ kA e $FL\% = 26,23\%$

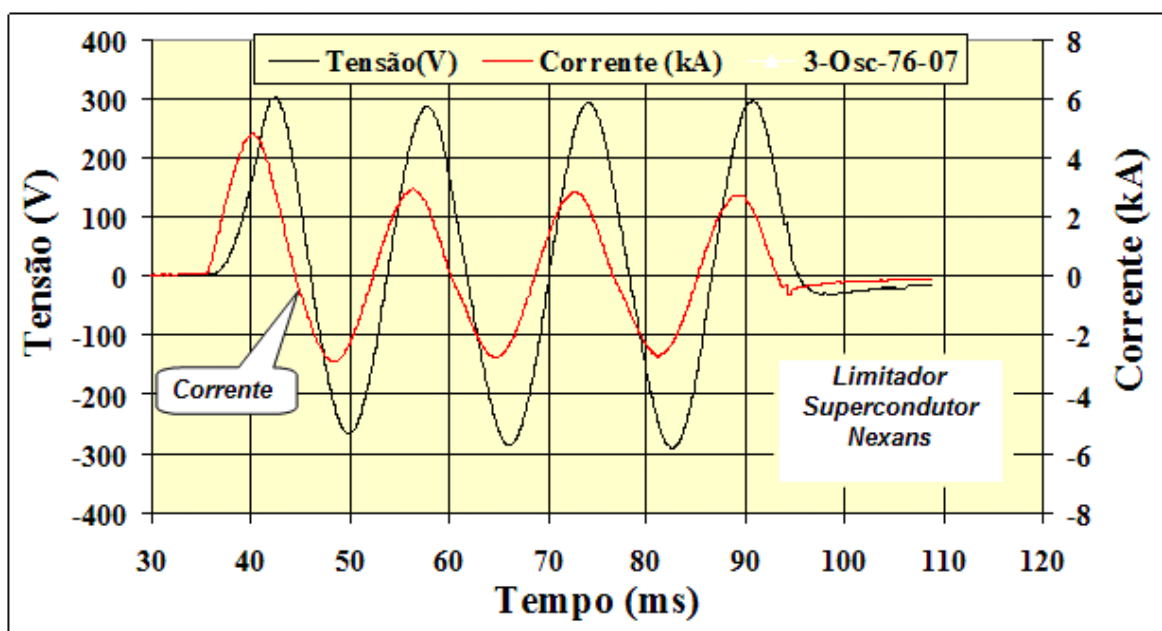


Figura 6.4: Ensaio 02: $I_{prosp} = 5,68$ kA e $FL\% = 29,05\%$

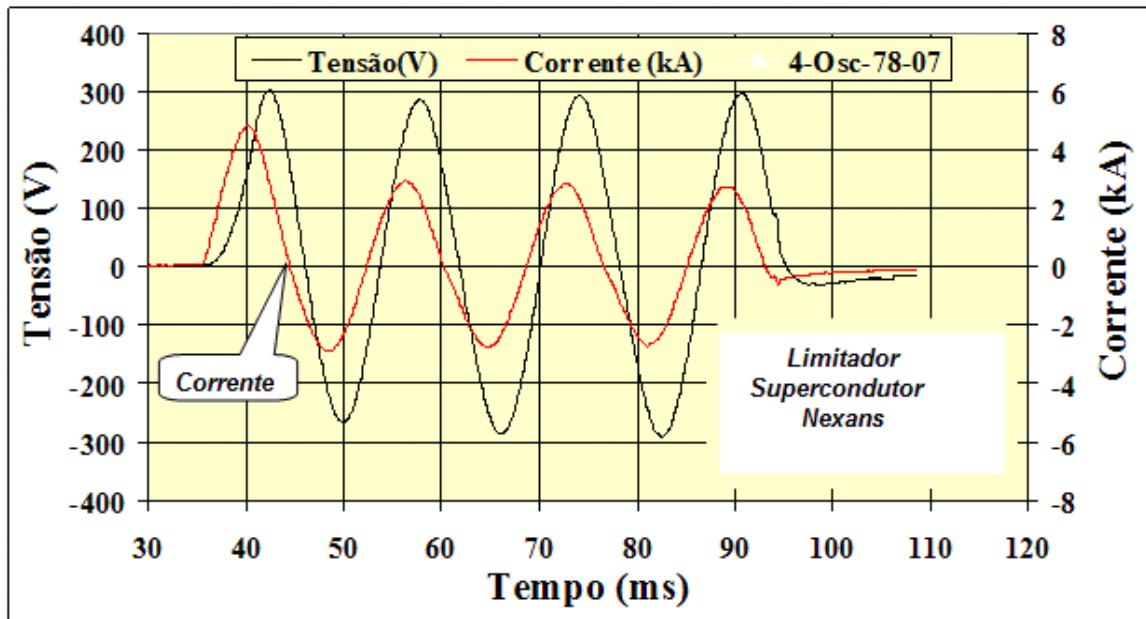


Figura 6.5: Ensaio 03: $I_{prosp} = 7,49 \text{ kA}$ e $FL\% = 36,72\%$

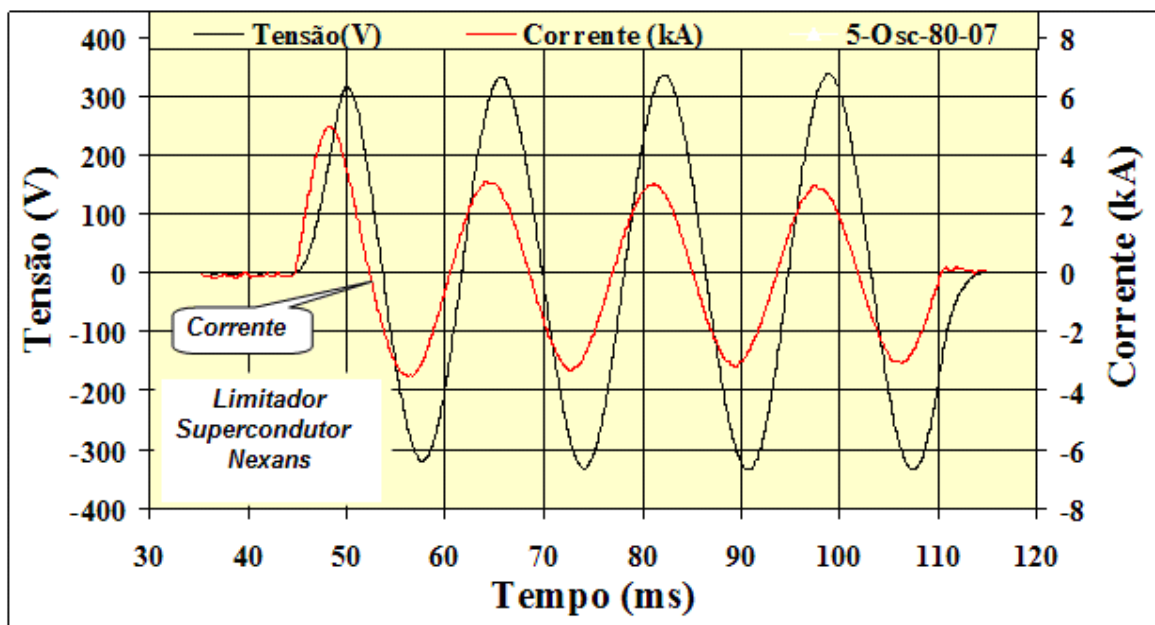


Figura 6.6: Ensaio 04: $I_{prosp} = 8,78 \text{ kA}$ e $FL\% = 40,89\%$

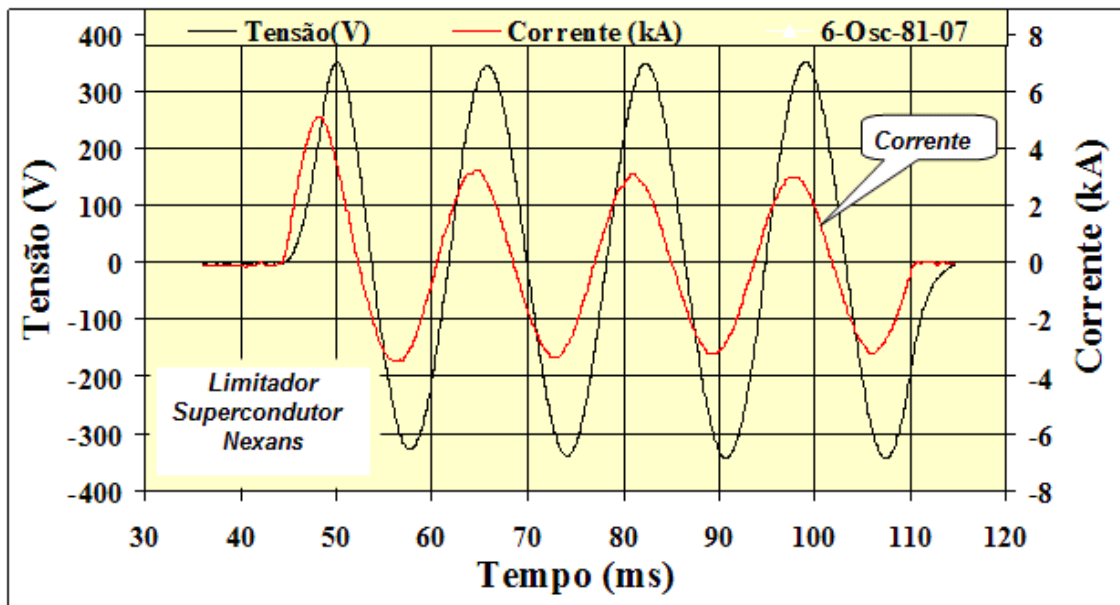


Figura 6.7: Ensaio 05: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 54,66\%$

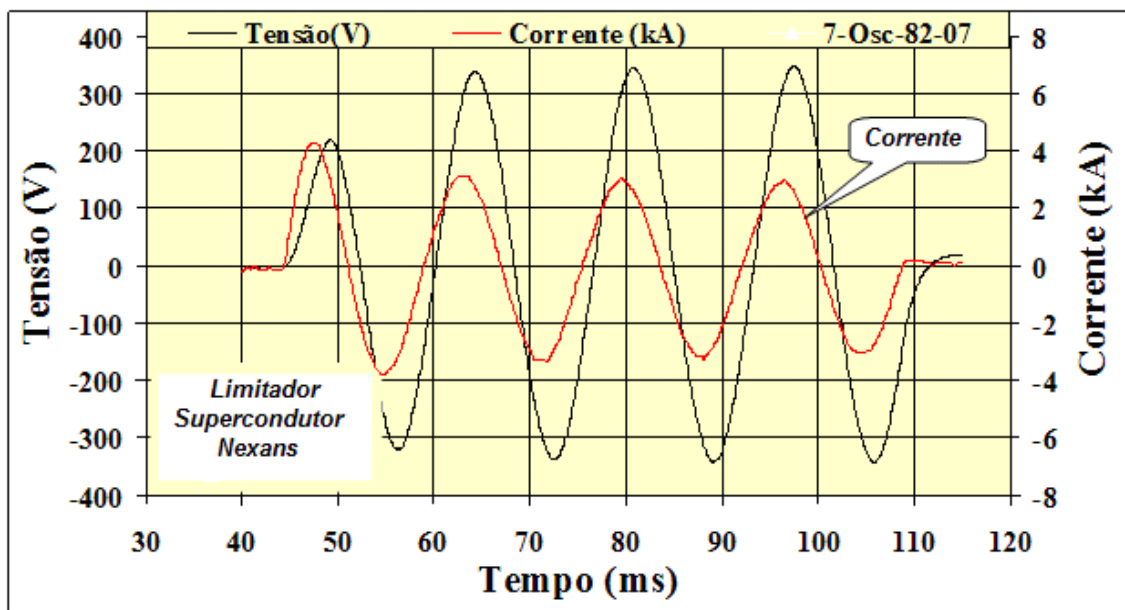


Figura 6.8: Ensaio 06: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 53,14\%$

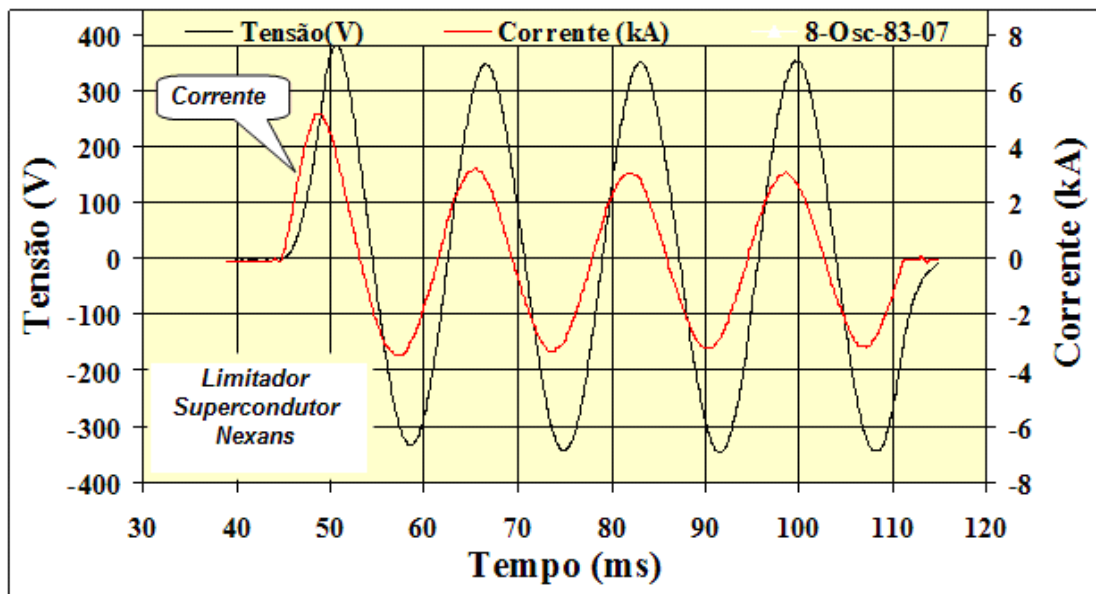


Figura 6.9: Ensaio 07: $I_{prosp} = 11,16\text{ kA}$ e $FL\% = 60,13\%$

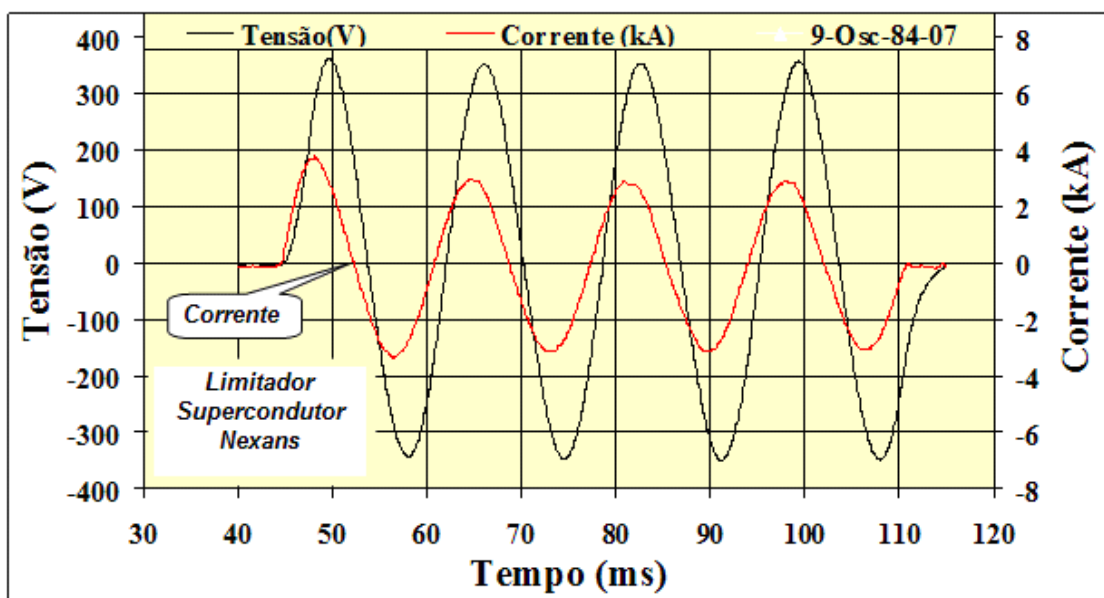


Figura 6.10: Ensaio 08: $I_{prosp} = 11,16\text{ kA}$ e $FL\% = 52,42\%$

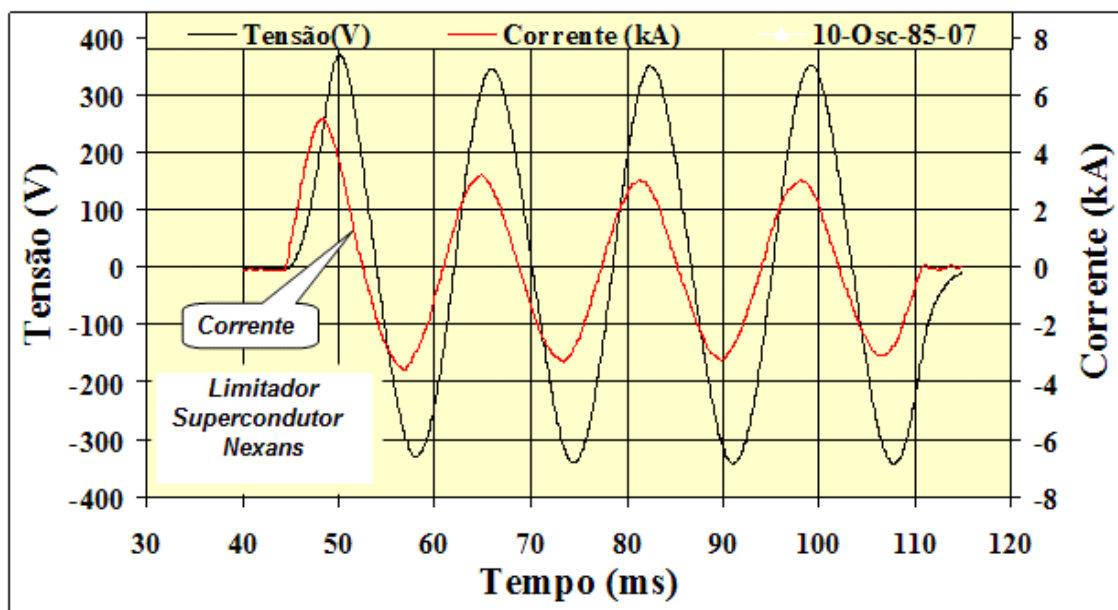


Figura 6.11: Ensaio 09: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 65,68\%$

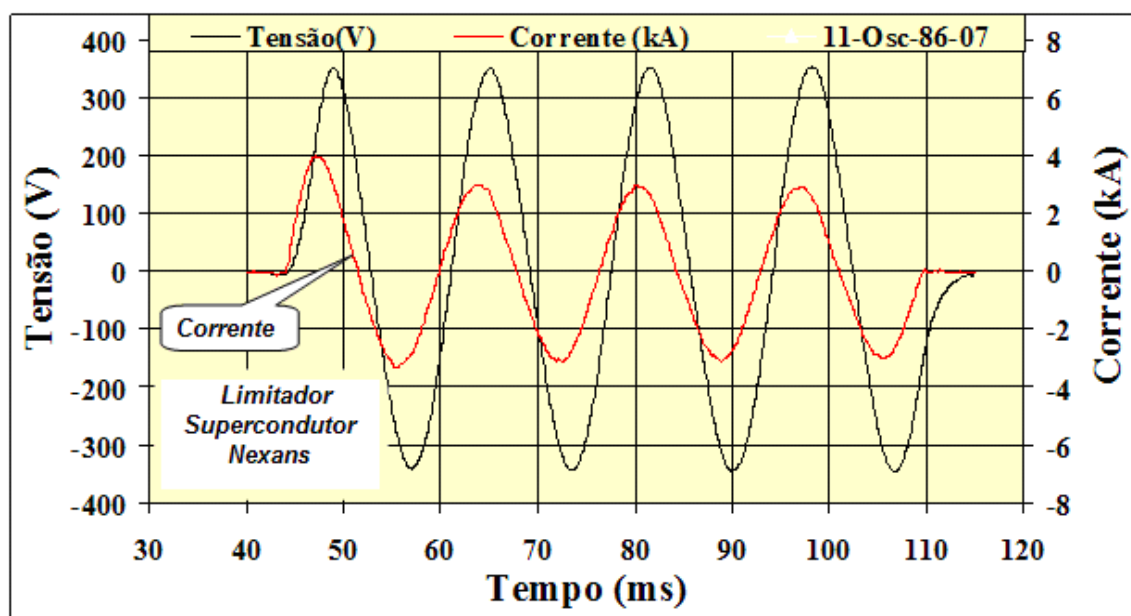


Figura 6.12: Ensaio 10: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 52,78\%$

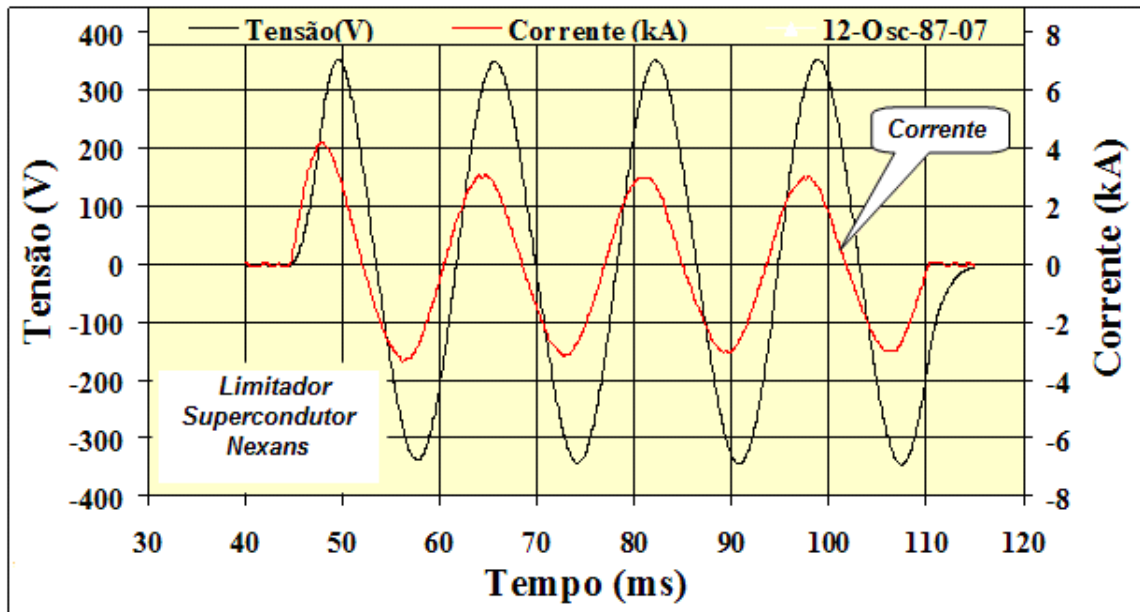


Figura 6.13: Ensaio 11: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 62,72\%$

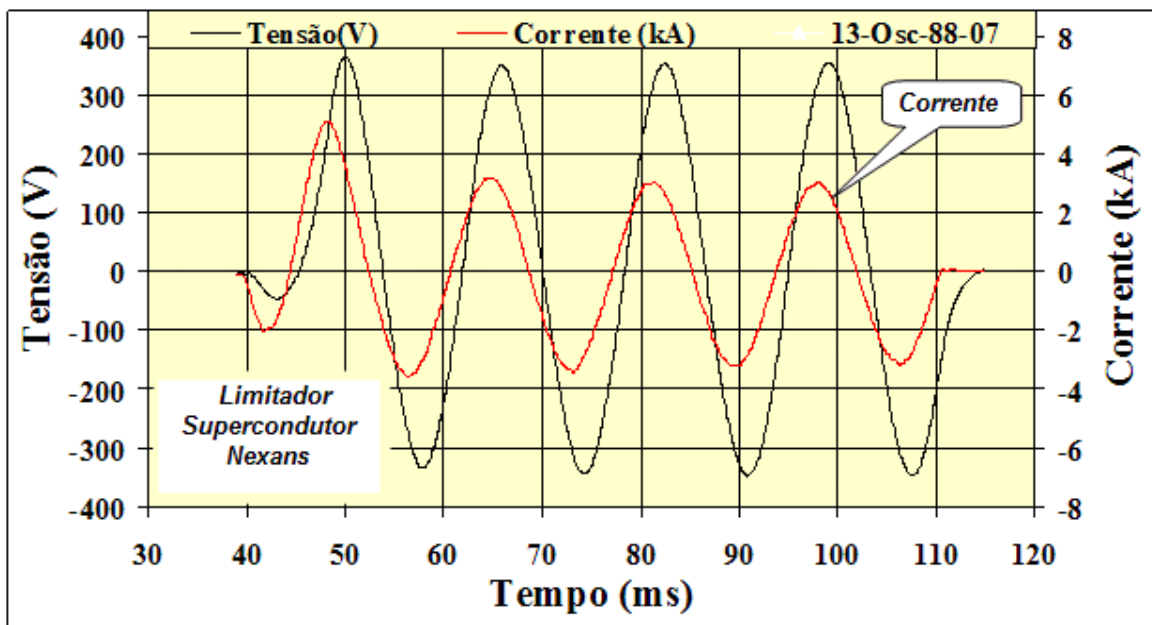


Figura 6.14: Ensaio 12: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 63,53\%$

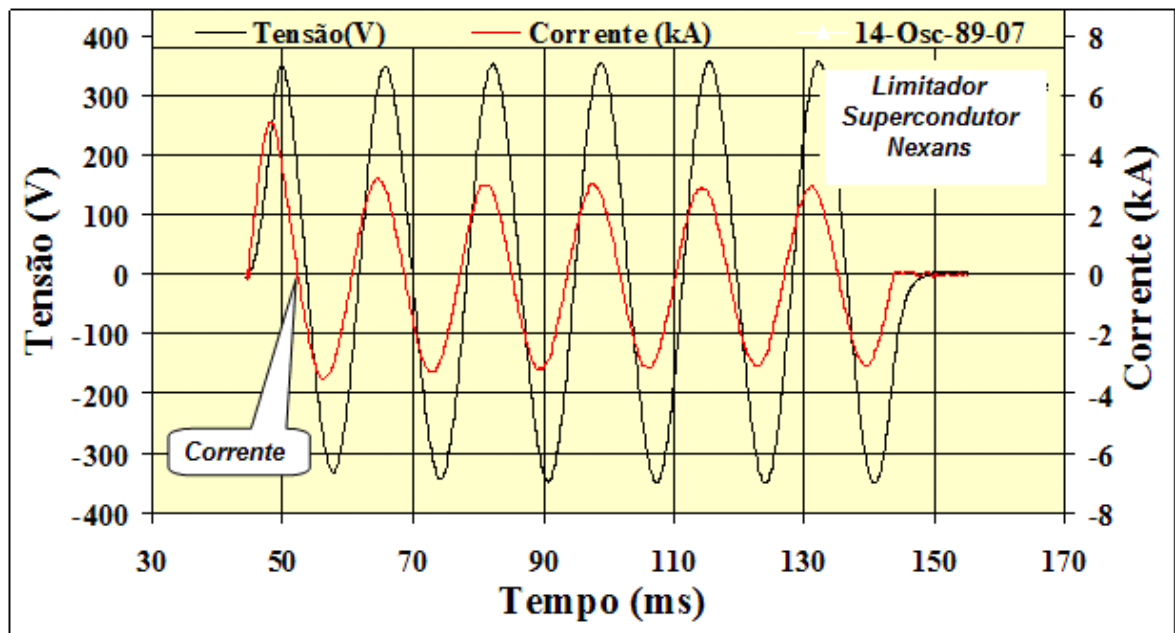


Figura 6.15: Ensaio 13: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 53,67\%$

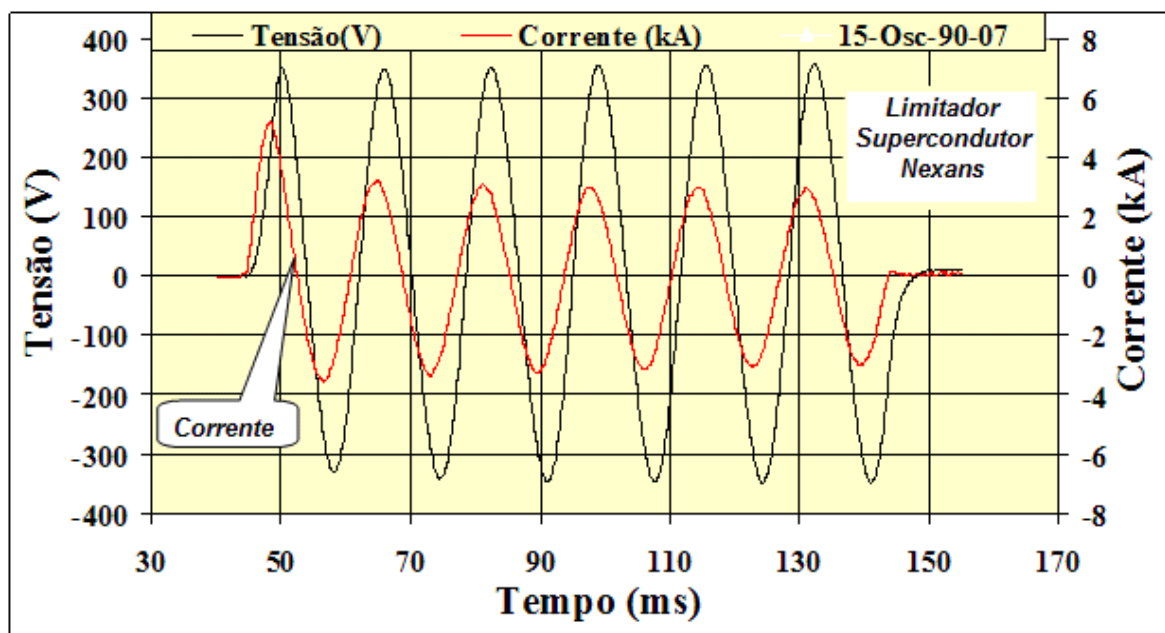


Figura 6.16: Ensaio 14: $I_{prosp} = 11,16 \text{ kA}$ e $FL\% = 53,14\%$

Nestes gráficos de limitação podemos notar que, em geral, o primeiro pico da corrente limitada sempre é maior que os picos de corrente subsequentes. Isto se deve ao fato de que no início do curto-circuito o material supercondutor ainda está desenvolvendo a sua resistência. Em outras palavras, no início do curto-circuito o material supercondutor ainda se encontra no estado supercondutor, sendo necessário aproximadamente 1 ciclo de corrente para que a transição para o estado normal ocorra. Quando a transição para o estado normal se completa, a maior parte da corrente passa a fluir pelo *shunt* metálico e, por esta razão observamos um regime quase permanente após o primeiro pico de corrente limitada.

Na figura 6.17 plotamos o valor do coeficiente de limitação de acordo com a ordem dos ensaios a fim de investigar a reprodutibilidade dos ensaios.

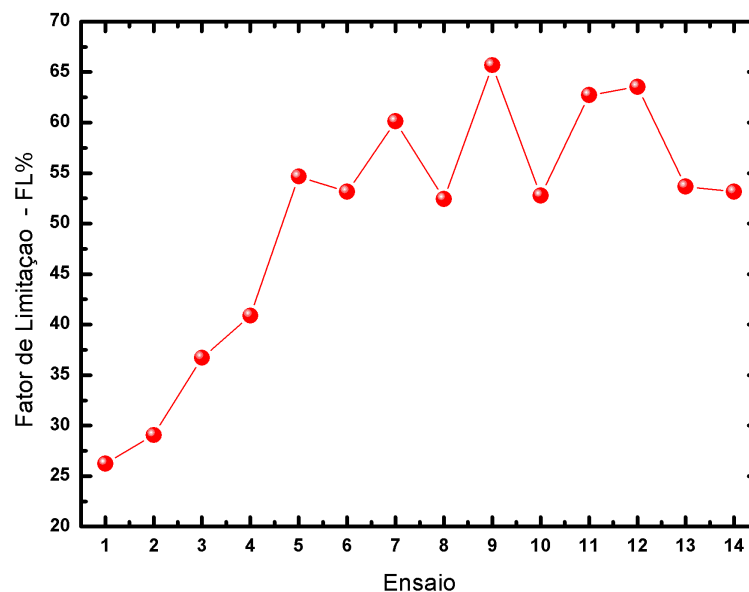


Figura 6.17: Fator de limitação dos ensaios sob altas correntes.

Pelo gráfico da figura 6.17 fica clara a não reprodutibilidade dos ensaios. Este resultado nos sugere que, embora o módulo limitador tenha atuado satisfatoriamente na limitação de corrente, alguma danificação possa ter ocorrido, uma vez que a reprodutibilidade dos ensaios era esperada. Se recorrermos a tabela da figura 6.2 podemos observar que o primeiro ensaio foi realizado com uma tensão de 700 V. Este valor de tensão está aproximadamente 2, 3 vezes acima do limite de tensão recomendado pelo fabricante. Desse

modo podemos afirmar que o primeiro teste pode ter danificado o módulo limitador supercondutor de modo que este pasasse a limitar de maneira "imprevisível", ou seja, sem reprodutibilidade.

A fim de estudar o tempo de recuperação destes dispositivos, ensaios com intervalo menores que 1 minuto foram realizados. Nestes testes, o módulo limitador sofreu danos irreversíveis. Na figura 6.18 podemos ver o surgimento de trincas na camada externa do módulo.

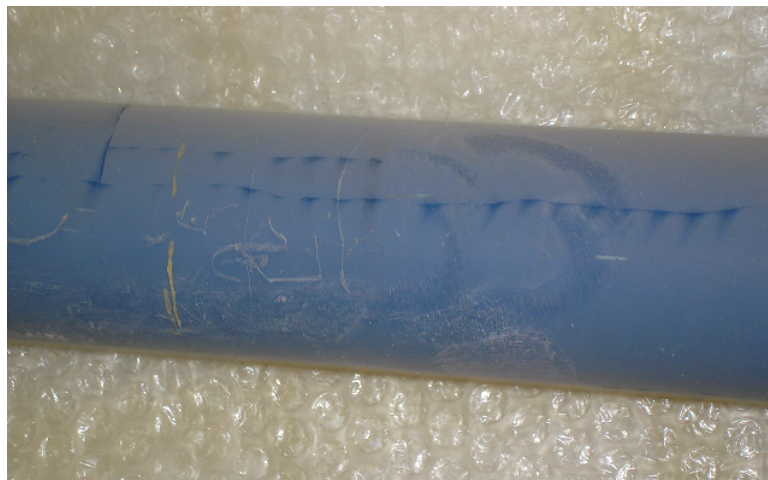


Figura 6.18: Trinca encontrada na parte externa do módulo limitador.

O módulo foi submetido a um novo ensaio de limitação e pudemos verificar que o mesmo foi completamente danificado. Com uma câmera com sensibilidade térmica pudemos observar que após a retirada do módulo da imersão em LN_2 , a região central sofria maior aquecimento, sugerindo que os danos pudessem estar nesta região (figura 6.19).

O módulo ainda foi submetido a novas medições de corrente crítica onde foi possível verificar que o mesmo foi realmente danificado uma vez que apresentou comportamento ôhmico na sua curva $V \times I$. A providência tomada a seguir, foi a observação do estado do material após os ensaios. O módulo foi levado para o laboratório de mecânica para que este pudesse ser cortado para a observação do estado do material supercondutor. Com o corte do módulo, figura 6.20, foram encontradas as trincas na região central, como já havíamos observado na figura 6.18.

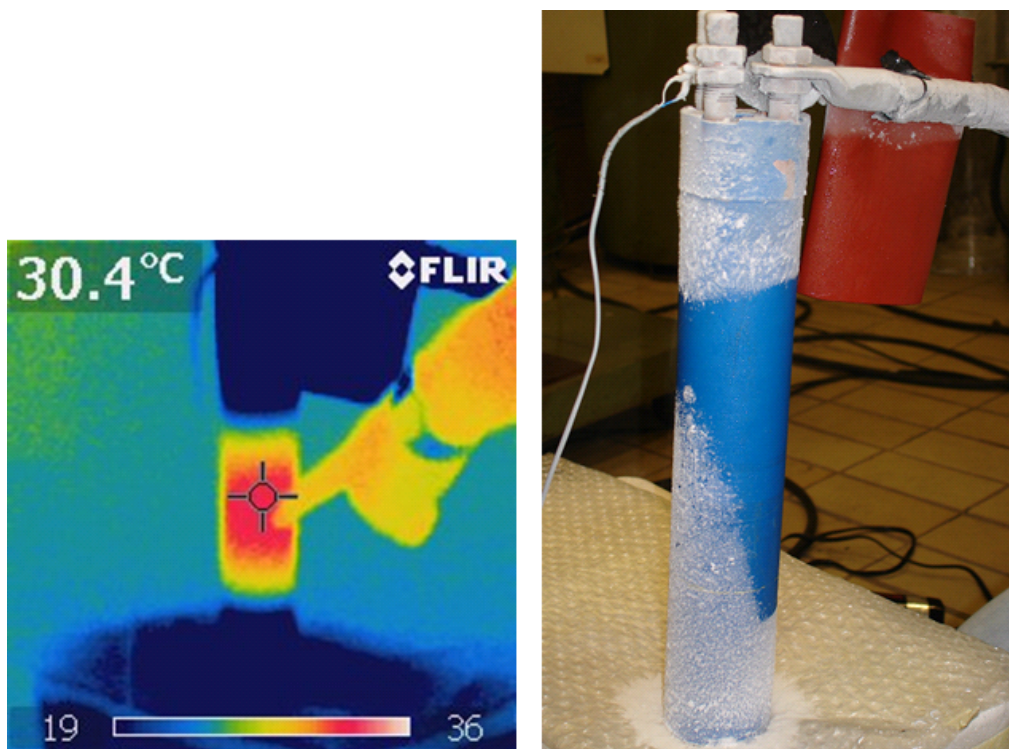


Figura 6.19: Aquecimento da região central do módulo limitador.

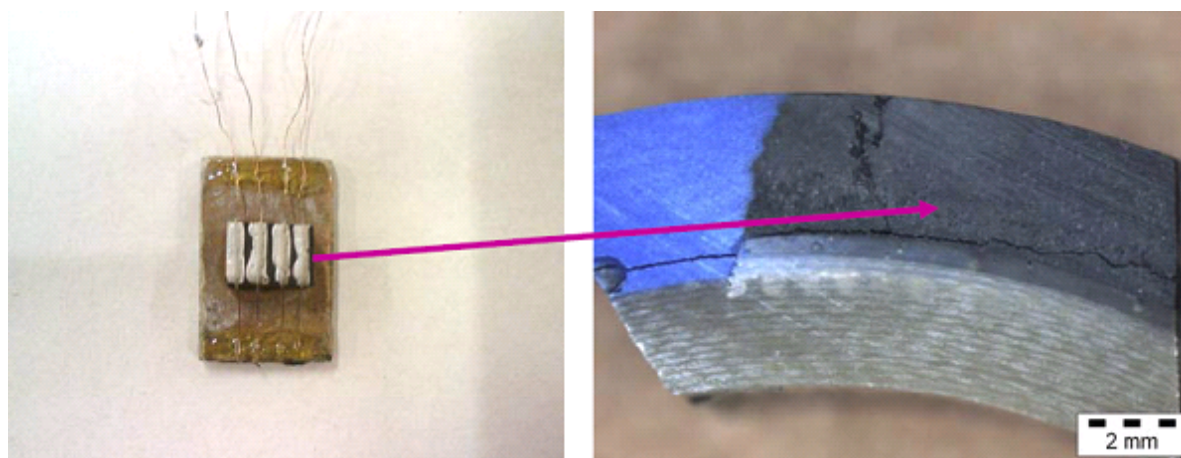


Figura 6.20: Cortes do módulo limitador.

CAPÍTULO 7

Conclusões

Com os ensaios realizados, pudemos comprovar a eficiência do dispositivo limitador de curto-circuito supercondutor. Este provou ser muito confiável e tem grandes chances de alcançar um bom status na utilização nos sistemas elétricos de potência ao que diz respeito à proteção contra surtos. Porém é importante ressaltar que o mesmo, quando submetido à aplicação de altas correntes, necessita de um tempo de recuperação em intervalos de tempo maiores que um minuto, o que indica que pode ser mais adequado para aplicação em acoplamento de barramentos.

No que diz respeito à aplicação de materiais supercondutores em sistemas de potência, fica claro a importância do estudo da física e ciência dos materiais na engenharia elétrica para a aplicação da supercondutividade no setor elétrico.

Como sugestão de trabalhos posteriores relacionados à este projeto, indica-se o estudo do comportamento do limitador não apenas como um equipamento para atuar em conjunto com disjuntores, mas para que, com sua característica de atuação rápida, não haja necessidade de interrupções no fornecimento de energia. Além disto, um estudo de limitadores supercondutores atuando também como transformadores é sugerido.

Referências Bibliográficas

- [1] A3-03 (SC) 13 IWD, **Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems**, Working Group 10 of Study Committee A3 (High Voltage Equipment), CIGRÉ, June 2003.
- [2] W. Hassenzahl, *et al.*, **Electric Power Applications of Superconductivity**, Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 10, October 2004, p. 1655.
- [3] A. M. Monteiro, **Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller)**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Fevereiro de 2005.
- [4] E.M. Leung, **Superconducting Fault Current Limiters**, IEEE Power Engineering Review, August 2000, pp. 15-30.
- [5] E.M. Leung *et al.*, **Design & Development of a 15 kV, 20 kA HTS Fault Current Limiter**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 10, no. 1, march 2000, pp. 832-835.
- [6] M. Chen *et al.*, **6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor**, Physica C 372-376 (2002), pp. 1657-1663.

-
- [7] J. Bock, F. Breuer, H. Walter, S. Elschner, M. Kleimaier, R. Kreutz, and M. Noe, **CURL 10 Development and Field Test of a 10kV-10MVA resistive current limiter based on bulk MCP BSCCO 2212**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, JUNE 2005, pp. 1955-1960.
- [8] M. Noe *et al.*, **High Voltage Design, Requirements and Tests of a 10 MVA Superconducting Fault Current Limiter**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, june 2005, pp. 2082-2085.
- [9] D. Hui *et al.*, **Development and Test of 10.5 kV/1.5 kA HTS Fault Current Limiter**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, june 2006, pp. 687-690.
- [10] B.W. Lee *et al.*, **Design and Experiment of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters**, presented at the European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS), 16th to 20th September, 2007, Brussels, Belgium.
- [11] Xing Yuan, Kasegn Tekletsadik, Leonard Kovalsky, Joachim Bock, Frank Breuer, and Steffen Elschner, **Proof-of-Concept Prototype Test Results of a Superconducting Fault Current Limiter for Transmission-Level Applications**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol 15, no. 2, JUNE 2005, pp. 1982-1985.
- [12] S Elschner, M Stemmler, F Breuer, H Walter, C Frohne, M Noe and J Bock, **Coil in Coil – Components for the High Voltage Superconducting Resistive Current Limiter CULT 110**, Journal of Physics: Conference Series 97 (2008) 012309
- [13] E.S.Motta, **Simulação termo-eletromagnética de tubo supercondutor para um limitador de corrente**, Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ, março de 2007.
- [14] F. S. Lázaro, **Estudo e Simulações do Dispositivo Limitador de Corrente de Curto Circuito Supercondutor**, Projeto Final – COPPE/UFRJ, janeiro de 2009.
-

-
- [15] Sousa, W.T.B. - **Simulações e Ensaios com Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores do Tipo Resistivo**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Março de 2011.
- [16] Orlando T.P., Delin K.A, **Foundations of Applied Superconductivity** , Massachusetts Institute of Technology, Addison Wesley Company 1991.
- [17] A.C. Rose-Innes, E.H. Rhoderick, **Introduction to Superconductivity**, 2^a ed. Oxford, Pergamon Press,1978.
- [18] Ginzburg, V.L., Andryushin, E.A., **Superconductivity**, World Cientific, Londres, 1994.
- [19] T.P. Sheahen, **Introduction to High-Temperature Superconductivity**, 1994, Plenum Press, New York
- [20] Marouchkine, Andrei, **Room-Temperature Superconductivity**, Cambridge International Science Publishing, Cambridge, 2004.
- [21] W. E. Pickett - **Design for a Room Temperature Superconductor** - Department of Physics, University of California, Davis, California, 95616; site internet: <http://www.w2agz.com/Library/Room%20Temperature%20Superconductivity/Pickett,%20BES06%20RoomTemp.pdf> - acessado em 25/maio/2011.
- [22] Ary D'Ajuz , **Limitação de curto-circuito em sistemas de potência** –IEEE/PES – ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico; site internet: [http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/brasilia /downloads/limita-curto-ieee-power-Chapter.pdf](http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/brasilia/downloads/limita-curto-ieee-power-Chapter.pdf) - Acessado em 13/abril/2011.
- [23] Costa, P.F., Santos, I.M., Tourino,G.P., **Paralelismo com a concessionária, protecção, aterramento do neutro e limitação dos curtos-circuitos em centrais de cogeração e autoprodução com múltiplos geradores** – VII STPC – Seminário Técnico de Proteção e Controle, Junho 2003.
-

-
- [24] Donglu Shi, **High Temperature Superconducting Materials Science and Engineering - New Concepts and Technology**, 1^o ed., New York, Pergamon, 1995.
- [25] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, *et al.*, **Fault current limiter based on high temperature superconductors - Different Concepts, Tests Results and Simulations**, Physica C, vol.354, n.1, pp. 27-33, 2001.
- [26] J. Langston, M. Steureur, S. Woodruff, *et. al.*, "**A Generic Real-Time Computer Simulation Model for Superconducting Fault Current Limiters and Its Application in System Protection Studies**", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.35, no.2, pp. 2090-2093, Jun. 2005.
- [27] D.C. Chung, H.S. Choi, N.Y. Lee, G.Y. Nam, Y.S. Cho, T.H. Sung, Y.H. Han, B.S. Kim and S.H. Lim, **Optimum design of matrix fault current limiters using the series resistance connected with shunt coil** - Physica C: Superconductivity Volumes 463-465, 1 October 2007.
- [28] Song,J.B.; Kim,K.L.; Kim, K.J.; Lee, J.H.; Kim,H.M.; Kim,W.S.; Yim,S.W.; Kim,H-R.; Hyun,O.B.; Lee,H.G. - **The design, fabrication and testing of a cooling system using solid nitrogen for resistive high-Tc superconducting fault current limiter** – Superconductor Science and Technology 21 (2008).
- [29] Lee,B.W. *et al.*, **Design and experiments of novel hybrid type superconducting fault current limiters**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 18, no. 2, june 2008, pp. 357-360.
-