

Universidade Federal Fluminense

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE  
SUPERCONDUTOR MODULAR

Luís Micahel Martins Rocha

Niterói, RJ - 2016

UFF - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E  
TELECOMUNICAÇÕES

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE  
SUPERCONDUTOR MODULAR

Luís Micahel Martins Rocha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Daniel Henrique Nogueira Dias,  
Guilherme Gonçalves Sotelo, Helvio Jailson Azevedo

Niterói, RJ - Brasil  
Dezembro de 2016

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

R672 Rocha, Luís Micahel Martins  
Projeto e construção de um limitador de corrente supercondutor modular / Luís Micahel Martins Rocha. – Niterói, RJ : [s.n.], 2016.  
94 f.

Orientadores: Daniel Henrique Nogueira Dias, Guilherme Gonçalves Sotelo, Helvio Jailson Azevedo.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2016.

1. Dispositivo eletrônico. 2. Curto-circuito. 3. Supercondutividade. 4. Eletricidade. I. Título.

CDD 621.3815

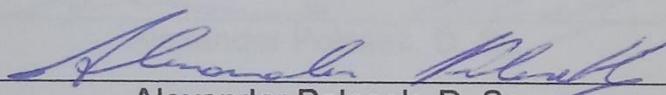


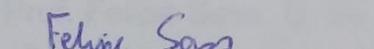
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM LIMITADOR DE CORRENTE  
SUPERCONDUTOR MODULAR

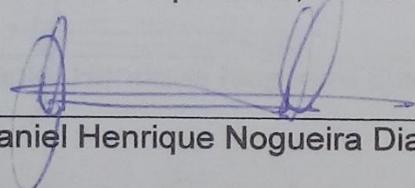
Luís Micahel Martins Rocha

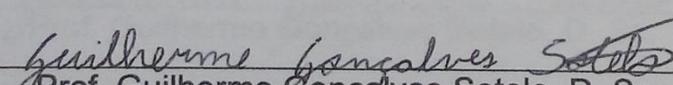
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CENTRO DE  
PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL) E DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL FLUMINENSE (UFF) COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA.

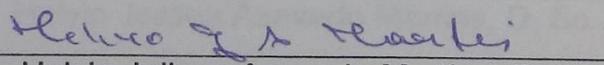
Examinada por:

  
\_\_\_\_\_  
Alexander Polasek, D. Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Felipe Sass, D. Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D. Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D. Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Helvio Jailson Azevedo Martins, D. Sc.

Niterói, RJ - Brasil

Dezembro de 2016

## DEDICATÓRIA

A Deus, a Jesus, ao Espírito Santo, e a Nossa Senhora.

A minha querida mãe Maria Helena, e família.

A minha equipe de trabalho da UFF e Cepel e amigos

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por mais que em muitos momentos, ter ficado à beira de desistir durante esse tempo de mestrado por vários e vários problemas na minha vida, por ELE sempre ter me dado forças para continuar, por nunca ter deixado minha fé de lado, me fazendo continuar sempre acreditando que as coisas iam dar certo. Agradeço ao Espírito Santo por iluminar meu coração. Agradeço a Jesus e a Nossa Senhora por sempre ouvirem minhas orações e levá-las a Deus. Agradeço a São Bento por iluminar minha cabeça e interceder por mim, junto com todos os Santos e Anjos em que acredito.

Agradeço especialmente a minha mãe, que mesmo com todas as dificuldades da vida, que no fim, só a gente sabe o quão difícil as coisas acabam sendo, sempre esteve do meu lado, torcendo por mim, me dando forças e me fazendo acreditar que as coisas iam dar certo. Agradeço por todo esforço, sempre acordando cedo, sempre se importando, e muitas vezes deixando de lado a si mesma para me ajudar no que possível. Obrigado mamãe! Agradeço ao meu irmão, por todo apoio no ano de 2014, que foi um ano bem difícil e ao meu pai, por todo o esforço ao longo destes anos.

Agradeço aos meus orientadores. Ao Daniel Henrique Nogueira Dias, por sempre estar disponível para ouvir minhas dúvidas, por ver os rumos do trabalho, pelos puxões de orelha e por estar presente em muitas etapas do trabalho, me ajudando a fazer medidas, peças. Ao Guilherme Gonçalves Sotelo, por sempre ter me ajudado, por ter me dado a oportunidade de entrar na equipe de supercondutividade da UFF, e por ter me encaminhado para fazer parte da equipe do Cepel. Agradeço por todos os puxões de orelha e dicas, e sei que tenho muita coisa a melhorar, por toda a paciência, inclusive com a minha escrita, desde os tempos de TCC. Ao Helvio Jailson de Azevedo Martins, por ter me recebido de braços abertos como bolsista de mestrado no Cepel, pelo Labdig, e por sempre ter me dado força durante este tempo de mestrado, sempre disponível quando eu precisava trocar ideias sobre o rumo do trabalho, e aqui, uma das suas frases que vou levar para vida é a de que “Só erra quem tenta”,

que me ajudou bastante em momentos que eu ficava meio chateado com as coisas que não deram certo ao longo do projeto.

Agradeço também ao Alexander Polasek, por ter me aberto as portas do Laboratório de Supercondutividade do Cepel, onde pude fazer grande parte dos ensaios deste trabalho, e também por toda a atenção dada, por todas as dicas também.

Agradeço ao Felipe Sass, por ter aceitado participar da minha banca de avaliação, e por ter participado de alguns trabalhos junto com ele, onde pude aprender um pouco mais.

Agradeço em especial, a amigos de verdade, com os quais estreitei bastante os laços, e considero como irmãos, que a vida me deu, que a vida me permitiu escolher, gente bacana mesmo, que desde 2014 acompanharam minha jornada no mestrado, compartilhando histórias e me dando toda a força possível: ao Fernando Jorge Monteiro Dias e ao Rodrigo Ramires Dias, meus irmãozinhos de vida, parceiros de futebol, agradeço por toda a paciência, por me aturarem fazendo ensaio até quase a hora de ir embora, me ouvirem falando muito, por todo apoio, suporte e força dados ao longo deste tempo; A Vanessa das Neves, que considero minha irmã, que sempre me deu conselhos em momentos difíceis junto com o Leandro, amiga do peito, e que batalhou junto comigo neste tempo de mestrado, passando perrengue em alguns trabalhos. Ao João Pedro Nascimento Vitória e ao Walter Vieira Teixeira, que sempre me deram apoio e força, me ajudaram e alguns ensaios e cansaram de ouvir minhas histórias. Ao Paulo Pereira Machado Junior, que além de dividir sala comigo durante um tempo, me ajudou muito em um período que eu quase estava a ponto de desistir. Agradeço em especial aos também amigos da supercondutividade: ao Felipe Dickler, ao Luiz Felipe, e ao Pedro Barusco, que me ajudaram na montagem do meu projeto, a realizar alguns ensaios, e também por todo o apoio dado. Agradeço também aos meus queridos amigos David Penna e Philippe Casé, por todo apoio e ajuda durante o trabalho no laboratório de supercondutividade da

UFF, por ouvirem minhas histórias e por toda amizade. Também agradeço aos amigos de Cepel Eduardo Moutinho e José Renato por todo apoio dado. Agradeço às minhas amigas Evanir, Renata Sousa e Luana Custódio, por todos os conselhos e amizade. Agradeço também a Keren Tenório, por ter aprendido bastante no tempo em que trabalhamos junto, e por palavras de apoio.

Agradeço em especial a toda minha equipe do Labdig. Colegas de trabalho que levarei para vida e que sempre estiveram disponíveis quando precisei, ajudando a desenvolver meu conhecimento pessoal e profissional: ao Wagner, por ter me ajudado, e por me abrir as portas do Laboratório de Propriedade Mecânica do Cepel, onde desenvolvi uma etapa importante do trabalho; ao Luiz Eduardo, que sob sua custódia, conseguiu o empréstimo de equipamentos do Cepel para mim, e me ajudou sempre no que precisei; ao Ítalo, que me ajudou em uma etapa das medições e sempre esteve disponível para me ajudar; ao Dickson, que ajudou bastante no meu desenvolvimento pessoal e profissional, dando bastante força em algumas tarefas; ao Mauro, por ter me dado a oportunidade de me aprimorar em programação, onde vi que precisava melhorar; ao Carlos Magno, por todo o suporte, sendo a primeira pessoa a me apresentar os trabalhos do Labdig, e ao laboratório em si; ao Roberto e ao Fábio, por me permitirem usar equipamentos e peças, sempre me ajudando em tudo possível; a Aline, minha querida amiga, por toda a ajuda quando entrei no Cepel, durante o tempo em que trabalhava como secretária; a Marta Oliviere e ao Leonardo Torres, por todo apoio dado e pelas chances de acompanhar alguns projetos; ao Felipe Estrela, ao Hebert Mariano e ao Pedro Mariano, que também foram meus companheiros de sala, sempre ouvindo minhas histórias e me dando forças; a Pâmela Sousa, a Barbara Siqueira, ao André Nunes e ao Arnaldo, que são meus atuais companheiros, e que me deram força nessa reta final. Enfim, agradeço a todos, por todo apoio, toda a força dada!

Agradeço aos amigos que fiz no Laboratório da Propriedade Mecânica do Cepel, que chamo carinhosamente de PropMec, ao Antônio, ao Belchior, ao William e ao Carlos, por terem me recebido em seu laboratório e por terem me ajudado a

fazer diversos e diversos processos de solda, onde todo um equipamento foi mobilizado para tal fim. Agradeço por todo carinho e apoio.

Agradeço também aos amigos do Laboratório de Metalografia do Cepel, Elias e Moacir, por sempre terem disponibilizado nitrogênio para os ensaios, e por todo apoio dado.

Agradeço ao Mestre Márcio A. Sens, junto a sua equipe, o Beto, o Cesar e os demais, por terem também me ajudado, inclusive com as medidas de temperatura.

Agradeço a Dona Leni, ao Maurício, a Vania Seródio, e a todos do Departamento da pós-graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da UFF, por sempre me ajudarem quando precisei, muitas vezes provendo documentos de forma rápida e eficaz.

Agradeço aos meus queridos professores da UFF, o Márcio Zamboti, o Bruno Borba e o Vitor Hugo, pelo apoio dado durante o mestrado, e por sempre me ajudarem quando possível.

Aos meus amigos Bruno, do departamento de Química da UFF, Ludmilla Cabral, do Recat (Química - UFF) e Rennan (Lara – Instituto de Física da UFF), por toda ajuda envolvendo a aquisição de nitrogênio, que foi fundamental para realização das medidas feitas neste trabalho.

Agradeço aos amigos Álvaro Faria e Jorge Areas, por todo o apoio dado.

Agradeço aos amigos do Cepel, Renata, Luzia Ventura, Adriano, Igor, Ruth, ao Cesar e Dias e todos do transporte, ao Paulo e ao José Juan da Supercondutividade, ao Valter e a todos os amigos do futebol. Agradeço também ao Milon, Tamara, Letícia, Ramon, Thomas, Annelys, Rodrigo Komatsu, José Guilherme, Vinícius, e a todos os demais amigos que fiz no Cepel e na UFF.

Agradeço a todos pelo apoio e por, de algum modo, contribuir para tornar meus dias melhores durante esse tempo de mestrado.

Agradeço a equipe do Lasup, por ter me ajudado com fornecimento de nitrogênio na parte final do trabalho.

Agradeço aos amigos do LTM da UFF, Alex, Pedro, Cristina e Edvaldo, por toda a ajuda na confecção de peças para este trabalho. Ao pessoal do Barco Solar da UFF pelo suporte em alguns trabalhos. Agradeço também ao Robson e a toda equipe de transporte da UFF, juntamente com o João Bento, da Escola de Engenharia da UFF, por disponibilizarem o transporte entre UFF e Cepel.

Agradeço em especial aos meus cachorros, muitos dos quais não estão mais aqui após ter morrido com cinomose ao longo deste tempo, mas que sempre me encheram de carinho e força para continuar minha jornada.

Enfim, agradeço a todos, mesmo que eu tenha esquecido algum nome, que de algum modo me ajudaram e contribuíram, mesmo que com apoio e torcida, para a realização deste projeto de mestrado.

*“Onde houver ódio, que eu leve o amor, ...  
Onde houver trevas que eu leve a luz”  
São Francisco de Assis*

*“Não fique esperando a noite voltar  
Para dormir e fugir de tudo em seus sonhos”*

*Luís Micahel*

# Sumário

	<b>Página</b>
1 <i>Introdução</i> .....	18
1.1 Motivações .....	18
1.2 Objetivos .....	18
1.3 Resumo dos Capítulos .....	19
2 <i>Revisão Bibliográfica</i> .....	20
2.1 Curto-Circuito .....	20
2.2 Redução dos níveis de corrente de curto-circuito .....	22
2.2.1 Dispositivos limitadores de corrente .....	22
2.3 Supercondutividade e limitadores Supercondutores .....	25
2.3.1 Resistividade nula.....	25
2.3.2 Efeito Meissner-Öchsenfeld.....	26
2.3.3 Parâmetros do estado supercondutor.....	27
2.3.4 Tipos de supercondutores .....	27
2.3.5 Tipos de limitadores supercondutores .....	29
2.4 Limitadores Modulares Resistivos.....	32
2.4.1 Enrolamento de fitas 2G em solenoide.....	33
2.4.2 Enrolamento de fitas 2G em panqueca .....	33
2.5 Estado da arte para Exemplos de limitadores resistivos modulares apresentados na literatura .....	33
2.5.1 Limitador de corrente não indutivo 220 V / 300 A.....	34
2.5.2 Limitadores supercondutores modulares bifilar .....	35
2.5.3 Enystrob.....	36
2.5.4 LCSR de 10kV.....	37
3 Dimensionamento e Construção do LCSR Modular .....	39
3.1 Escolha do material supercondutor .....	39
3.2 Considerações construtivas .....	43
3.2.1 Simulação e escolha do arranjo.....	45
3.2.2 Modelo para construção .....	51
3.3 Técnica de confecção dos terminais de corrente .....	52
3.4 Amostra teste .....	57
3.5 Construção do LCSR modular .....	59
4 Procedimento Experimental dos Ensaio Aplicados ao Módulo .....	64
4.1 Medição de parâmetros.....	64
4.2 Caracterização simultânea.....	65
4.3 Ensaio de desempenho.....	66
4.3.1 Ensaio de curto-circuito .....	66

4.3.2	Ensaio de tempo de recuperação .....	68
5	Resultados.....	71
5.1	Caracterização .....	71
5.1.1	Caracterização do componente limitador interno CLi .....	71
5.1.2	Caracterização do componente limitador externo CLe .....	73
5.2	Ensaio de limitação – componentes limitadores .....	74
5.3	Ensaio de limitação – LCSR modular.....	78
5.4	Ensaio de tempo de recuperação – componentes limitadores.....	81
5.5	Ensaio de tempo de recuperação – módulo.....	86
5.6	Medição de parâmetros.....	89
6	Conclusão e Trabalhos Futuros.....	91
6.1	Conclusão .....	91
6.2	Trabalhos Futuros .....	91
7	Bibliografia.....	93

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
Figura 2.1 – Corrente de curto-circuito e suas componentes .....	21
Figura 2.2 – Reator limitador a núcleo de ar. <sup>[10]</sup> .....	24
Figura 2.3 – Dispositivo limitador de corrente pirotécnico. <sup>[5]</sup> .....	25
Figura 2.4 – Resistividade típica de um supercondutor. ....	26
Figura 2.5 – Efeito Meissner-Öchsenfeld em um material supercondutor.....	26
Figura 2.6 – Região de supercondutividade para alguns materiais.....	27
Figura 2.7 – Magnetização em função do campo magnético para supercondutor do tipo I.....	28
Figura 2.8 – Magnetização em função do campo magnético para supercondutor do tipo II.....	28
Figura 2.9 – Esquema geral de um limitador de corrente resistivo.....	30
Figura 2.10 – Esquema geral de um limitador indutivo por blindagem.....	30
Figura 2.11 – Esquema geral de um limitador de núcleo saturado. <sup>[7]</sup> .....	32
Figura 2.12 – Limitador de corrente supercondutor usando fitas 2 G HTS. <sup>[17]</sup> .....	34
Figura 2.13 – Corrente e tensão sobre o limitador em curto-circuito. <sup>[17]</sup> .....	34
Figura 2.14 – Limitador bifilar em solenoide. a) Não impregnado; b) impregnado. <sup>[14]</sup> .....	35
Figura 2.15 – Limitador bifilar em panqueca. a) Não impregnado; b) impregnado. <sup>[14]</sup> .....	35
Figura 3.1 – Características das fitas supercondutoras. <sup>[20]</sup> .....	39
Figura 3.2 – Fita SF12100 da SuperPower.....	40
Figura 3.3 – Foto do módulo com 12 elementos de fita SF12100 imerso em nitrogênio. <sup>[21]</sup> .....	41
Figura 3.4 – Ensaio de curto em módulo com 12 elementos com fita SF12100. <sup>[21]</sup> .....	42
Figura 3.5 – Primeiro ciclo do ensaio de curto em módulo com 12 elementos com fita SF12100. <sup>[21]</sup> .....	42
Figura 3.6 – Esquema do limitador com seus componentes externo (CLe) e interno (CLi) .....	43
Figura 3.7 – Conexão entre fitas supercondutoras e terminais .....	44
Figura 3.8 – Ilustração da indução de campo entre enrolamentos de um conjunto bifilar .....	44
Figura 3.9 – Parâmetros geométricos do enrolamento bifilar .....	46
Figura 3.10 – Modelagem .....	47
Figura 3.11 – Modelagem .....	47
Figura 3.12 – Modelagem .....	48
Figura 3.13 – Análise de indução de campo para Ri=25 mm e Re=35 mm .....	49
Figura 3.14 – Análise de indução de campo para Ri=15 mm e Re=25 mm .....	49
Figura 3.15 – Confecção de uma base em Nylon.....	51
Figura 3.16 – Bases de PLA .....	51
Figura 3.17 – Esquema de conexão para fitas em paralelo .....	53
Figura 3.18 – Preparo das faces da fita e do contato de cobre para contato por solda .....	54
Figura 3.19 – Amostra de ensaio para resistência de contato.....	55
Figura 3.20 – Preparo do procedimento de solda.....	55
Figura 3.21 – Forno elétrico e máquina de compressão.....	56
Figura 3.22 – Esquema da amostra com fitas em paralelo .....	57
Figura 3.23 – Amostra com fitas em paralelo .....	58
Figura 3.24 – Curva Vxl simultânea nas fitas paralelas da amostra supercondutora .....	59
Figura 3.25 – Mesa de enrolamento para bases supercondutoras .....	60
Figura 3.26 – Processo de soldagem .....	61
Figura 3.27 – Preparação para soldagem com pressão manual .....	62
Figura 3.28 – Componente limitador CLi montado com terminais de tensão.....	63
Figura 3.29 – LCSR modular completo visto de cima.....	63
Figura 4.1 – Esquema de medição de parâmetros com ponte de medição calibrada.....	64
Figura 4.2 – Esquema de caracterização simultânea para fitas supercondutoras distintas.....	65
Figura 4.3 – Sistema experimental base.....	66
Figura 4.4 – Visão geral de um esquema de ensaio de curto-circuito.....	67
Figura 4.5 – Esquema experimental para aplicação do curto-circuito .....	67
Figura 4.6 – Circuito experimental para ensaio de tempo de recuperação em limitadores .....	69
Figura 5.1 – Curva Vxl sobre 1,3 m de fita supercondutora do enrolamento interno do CLi .....	72
<b>Figura 5.2 – Curva Vxl simultânea sobre 1,3 m em cada fita do enrolamento do CLi .....</b>	<b>72</b>
Figura 5.3 – Curva Vxl sobre 2,0 m de fita supercondutora do enrolamento interno do CLe ....	73
Figura 5.4 – Curva Vxl simultânea sobre 2,0 m em cada fita do enrolamento do CLe .....	74
Figura 5.5 – Ensaio de limitação de corrente de curto-circuito a nível de 1,3 kA.....	75
Figura 5.6 – Níveis de tensão no CLi no ensaio de limitação de 1,3 kA.....	75

<i>Figura 5.7 – Níveis de tensão no CLe no ensaio de limitação de 1,3 kA .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.8 – Ensaio de limitação de corrente de curto-circuito a nível de 1,7 kA .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.9 – Níveis de tensão no CLi no ensaio de limitação de 1,7 kA.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.10 – Níveis de tensão no CLe no ensaio de limitação de 1,7 kA .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.11 – Ensaio de limitação de corrente de curto-circuito a nível de 1,0 kA.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.12 – Níveis de tensão no LM e seus componentes no ensaio de limitação de 1,0 kA</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.13 – Ensaio de limitação de corrente de curto-circuito a nível de 1,5 kA.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.14 – Níveis de tensão no LM e seus componentes no ensaio de limitação de 1,5 kA</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.15 – Ensaio de recuperação do CLi com espera de 310 ms.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.16 – Defasagem entre tensões e corrente 310 ms após a ocorrência de curto.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.17 – Ensaio de recuperação do CLi com espera de 300 ms.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.18 – Defasagem entre tensões e corrente 300 ms após a ocorrência de curto.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.19 – Ensaio de recuperação do CLe com espera de 220 ms.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.20 – Defasagem entre tensões e corrente 220 ms após a ocorrência de curto.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.21 – Ensaio de recuperação do CLe com espera de 210 ms.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.22 – Defasagem entre tensões e corrente 210 ms após a ocorrência de curto.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.23 – Ensaio de recuperação do LM com espera de 270 ms .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5.24 – Defasagem entre tensões e corrente 270 ms após a ocorrência de curto.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5.25 – Ensaio de recuperação do LM com espera de 260 ms .....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5.26 – Defasagem entre tensões e corrente 260 ms após a ocorrência de curto.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.27 – Ensaio de recuperação do LM com espera de 250 ms .....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.28 – Defasagem entre tensões e corrente 250 ms após a ocorrência de curto.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.29 – Uso de ponte de medição para determinação dos parâmetros do LCSR .....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 2.1 – Especificações chaves do Ensystrob <sup>[18]</sup>.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 3.1 – Análise de indução de campo máxima, tamanho de cada um dos dois enrolamentos e volume para as diversas configurações do limitador modular .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 3.2 – Escolha dos arranjos dos limitadores .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 3.3 – Resistência ôhmica com forno a 200°C para diferentes níveis de pressão antes e após sofrer um ciclo térmico .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 4.1 – Níveis de curto-circuito (pico) obtidos para o arranjo experimental.....</i>	<i>68</i>

## Resumo

O interesse em dispositivos limitadores de corrente supercondutores, principalmente resistivos, tem aumentado significativamente nos últimos anos. Dentre as principais características destes dispositivos, estão a capacidade de limitação devido ao *quenching* do material, e o tempo de recuperação do estado de supercondutividade. Várias configurações e materiais vêm sendo estudados nos últimos anos, buscando melhorias na viabilidade construtiva deste tipo de dispositivo. Este trabalho tem por objetivo o projeto e construção de um limitador de corrente supercondutor resistivo (LCSR) modular, utilizando fitas supercondutoras de alta temperatura de RE-Ba-Cu-O em paralelo, dispostas em um enrolamento bifilar, sobre base de PLA (ácido polilático), ausente de criostato. Foram realizadas medidas de curva V-I e também ensaios de curto-circuito e de tempo de recuperação no material supercondutor, em criostato de banho aberto, no LCSR modular imerso em nitrogênio líquido, a 77 K. Os resultados apresentaram níveis de limitação e de recuperação promissores, e viabilizaram a configuração e os materiais adotados.

## **Abstract**

The interest in superconducting current limiting devices, mainly resistive, has increased significantly in recent years. Among the main characteristics of these devices are the limiting capacity due to material quenching, and the recovery time of the superconducting state. Several configurations and materials have been studied in recent years, seeking improvements in the constructive feasibility of this type of device. This work aims the design and construction of a resistive-superconducting current limiter (RSCL) module, using RE-Ba-Cu-O high temperature superconducting tapes connected in parallel, arranged in a bifilar winding, on base made of PLA (polylactic acid), absent of cryostat. V-I curve measures, short circuit and recovery time tests were performed in the modular RSCL, which was immersed in an open bath cryostat with liquid nitrogen, at 77 K. The results showed promising levels of limitation and recovery, making possible the configuration and materials adopted.

## **1 Introdução**

Com o aumento da demanda de energia, e a consequente expansão do sistema elétrico, algumas medidas são necessárias para assegurar a proteção dos equipamentos, devido ao aumento do nível de corrente de curto-circuito. Disjuntores e outros dispositivos passam a não garantir mais a efetiva proteção do sistema, levando à danificação dos equipamentos e a falhas no fornecimento de energia por longos períodos.

O uso de limitadores de corrente de curto-circuito é uma solução interessante, pois mantém o sistema operando em nível nominal e protege os equipamentos, reduzindo os novos níveis de corrente durante falhas no sistema para valores dentro dos especificados pela proteção.

O trabalho aqui apresentado se insere neste contexto, utilizando materiais supercondutores para confecção de um limitador de corrente supercondutor resistivo (LCSR). Neste capítulo são explicados os objetivos e a organização desta dissertação.

### **1.1 Motivações**

Algumas das principais motivações para a utilização de dispositivos LCSR são: a inserção imediata de uma impedância série no sistema após uma sobrecorrente, a rápida reposição do dispositivo após o curto-circuito e o aumento da relação de peso e volume por potência do equipamento em relação às soluções adotadas atualmente.

A opção de um LCSR é mais atrativa que as demais opções de limitadores de corrente de curto-circuito, por causa de sua facilidade construtiva.

### **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo o projeto e a construção de uma unidade modular de um LCSR. Esta unidade de LCSR foi feita com fitas supercondutoras de alta temperatura

(HTS) de RE-Ba-Cu-O, também denominadas de fitas de segunda geração (2G). As fitas 2G são arranjadas sob a forma de enrolamentos bifilares helicoidais em uma base de PLA (ácido polilático). O uso do PLA em nitrogênio líquido, representa uma etapa importante, e os resultados obtidos serão aproveitados para outros estudos. Um sistema experimental foi desenvolvido para aplicação de correntes de curto-circuito de até 2 kA. Espera-se no presente trabalho ter um LCSR modular funcional, que apresente boa limitação sob condições de curto, e que tenha um bom tempo de recuperação do material supercondutor.

### ***1.3 Resumo dos Capítulos***

Este trabalho foi dividido em 6 capítulos, sendo este primeiro a introdução. No segundo, é apresentada uma revisão teórica sobre curto-circuito, limitadores de corrente, uma breve descrição acerca do fenômeno da supercondutividade e o estado da arte para o LCSR modular. O terceiro capítulo descreve os estudos, critérios e escolhas utilizadas para construção do LCSR modular. A seguir, o quarto capítulo apresenta os procedimentos experimentais para os ensaios de desempenho e medidas aplicados ao LCSR. No quinto capítulo são mostrados os resultados destes ensaios. Por fim, no sexto capítulo, é exposta a conclusão do trabalho e são mencionadas propostas de trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Curto-Circuito

Curto-circuito é um fenômeno produzido pela passagem de uma corrente elétrica de magnitude muito superior à nominal, que passa entre dois pontos de diferentes potenciais elétricos em um circuito, quando uma baixa impedância é repentinamente inserida entre esses pontos. [1]. Neste instante, ela apresenta uma rápida elevação, podendo atingir valores maiores que 10 vezes os nominais do circuito [2]. A literatura apresenta cinco tipos de curto-circuito:

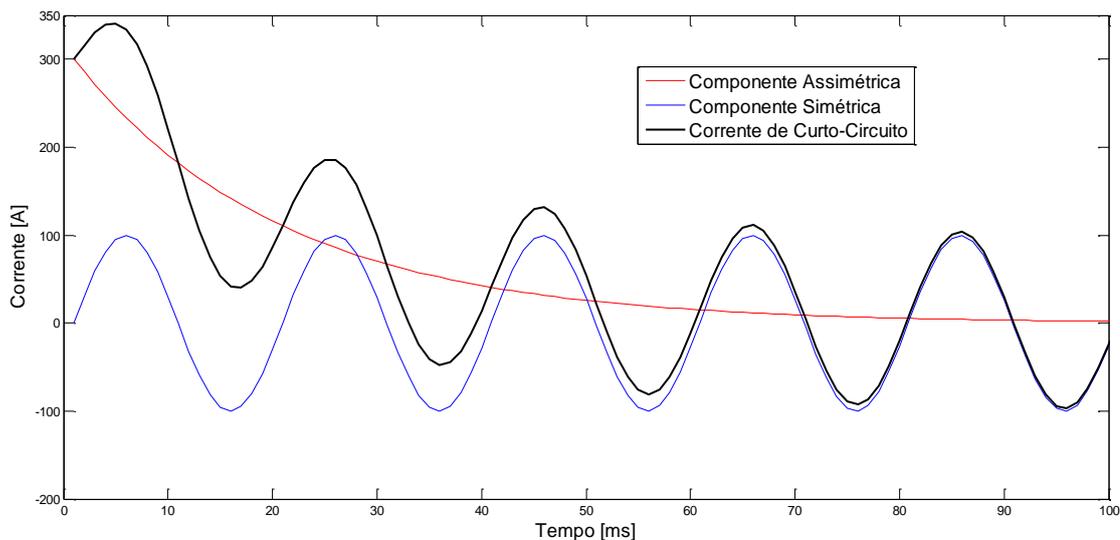
- x Curto trifásico;
- x Curto bifásico;
- x Curto fase – terra;
- x Curto 2Φ – terra;
- x Curto 3Φ – terra.

Ainda, quando não existe uma impedância de falta, o curto-circuito é chamado de franco ou sólido.

Esta corrente pode ser modelada por um transitório equivalente ao fechamento de um circuito RL, em que R é a resistência, e L a indutância. Essa é assimétrica em relação ao eixo dos tempos, nos primeiros instantes pode ser representada pela equação 2.1:

$$i(t) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (2.1)$$

Aqui,  $\tau=L/R$  é a constante de tempo do circuito [3]. A **Figura 2.1** ilustra este comportamento das componentes de correntes de curto-circuito.



**Figura 2.1 ± Corrente de curto-circuito e suas componentes**

A parcela  $I_{CC,M} \cdot \cos(\omega t)$  é conhecida como componente simétrica (ou regime permanente). Já a parcela  $I_0 \cdot e^{-t/\tau}$  é chamada de componente contínua (ou unidirecional).

Conhecendo as correntes de curto-circuito de um sistema, é possível usar medidas para minimizar seus efeitos. Isso inclui a colocação e regulação de dispositivos que promovem a interrupção dos circuitos defeituosos, garantindo que todos os componentes da rede possam suportar os efeitos do curto enquanto eles persistem [4].

Os valores assimétricos são empregados para determinar a capacidade dos equipamentos em suportar os efeitos dinâmicos, enquanto que os valores simétricos são usados para definir as capacidades de interrupção dos dispositivos de seccionamento, a suportabilidade térmica, e também os ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente.

A análise de curto-circuito é necessária para o planejamento e a operação de um sistema elétrico, e, de modo geral, visa atender aos seguintes objetivos:

- x Determinar a capacidade dos equipamentos em suportar elevadas correntes;
- x Calcular os ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente (relés e disjuntores de baixa tensão);

- x Calcular os esforços mecânicos de elementos estruturais de equipamentos;
- x Dimensionar o sistema de aterramento;
- x Selecionar e analisar a superação de disjuntores e de outros dispositivos de seccionamento; e
- x Selecionar limitadores de corrente, fusíveis, transformadores de corrente.

Em sistemas elétricos que sofrem alterações, é necessário atualizar o estudo de curto-circuito. Podem ser mudanças topológicas, expansão, interligação com outros sistemas elétricos e instalação de novos equipamentos, sobretudo geradores e motores de corrente alternada.

## **2.2 Redução dos níveis de corrente de curto-circuito**

Para reduzir a corrente de curto, algumas soluções de caráter provisório podem ser adotadas, envolvendo medidas sistêmicas. Um exemplo disto pode ser o seccionamento de barras em uma subestação, com o intuito de evitar a superação de algum equipamento. Todavia, seu uso visa apenas ganhar tempo para adotar uma solução definitiva, visto que existe perda de flexibilidade operativa nos sistemas. [5].

Quanto às soluções definitivas, são necessários estudos mais complexos, sendo a execução de tal medida mais dispendiosa em tempo e trabalho. Neste ponto, duas coisas podem ser feitas [5]:

- x Recapacitar ou substituir os equipamentos superados;
- x Utilizar dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito.

### **2.2.1 Dispositivos limitadores de corrente**

O dispositivo limitador atua reduzindo os níveis das correntes de curto a valores compatíveis com os equipamentos de proteção.

Algumas características são desejáveis para o bom funcionamento de um dispositivo limitador de corrente [5]:

- x Baixa impedância para condições normais de operação;
- x Alta impedância para correntes de curto-circuito;
- x Rápida transição entres os estados da impedância;
- x Rápido tempo de recuperação para regime normal de operação, após a interrupção da corrente de curto.

Outros aspectos também são importantes para limitadores [6]:

- x Tamanho reduzido;
- x Baixo custo;
- x Necessidade mínima de manutenção;
- x Não há necessidade de troca do equipamento ou de suas partes.

O princípio de funcionamento de um limitador é comum a quase todos os tipos, sendo a interposição de uma impedância no caminho da corrente [7]. A interrupção pode ser feita diretamente pelos dispositivos limitadores, ou por meio de disjuntores, após a atuação dos limitadores [5].

Na atualidade, os reatores de núcleo de ar e os dispositivos pirotécnicos representam tecnologias dominadas. Outros estão em fase de consolidação e estudo, como os dispositivos limitadores supercondutores [8]. Na sequência, são abordados mais detalhes sobre estes dispositivos.

### **2.2.1.1 Reatores a núcleo de ar**

Podem ser usados em série com o sistema, ou para seccionar barramentos [9], podendo desempenhar várias funções no sistema elétrico. Como limitador de corrente, ele irá reduzir e retardar o crescimento da corrente de falta em caso de uma falha, devido à inserção de uma impedância série, com alta parcela reativa.

De modo geral, um reator é uma grande bobina, que em um circuito alternado pode criar uma alta impedância. Seu núcleo pode ser feito também de material magnético,

entretanto para limitação, usa-se o núcleo de ar devido aos altos valores de corrente envolvidos, que poderiam saturar facilmente o núcleo magnético, reduzindo a reatância indutiva do enrolamento do reator [10], conforme mostrado na **Figura 2.2**.



**Figura 2.2 ± Reator limitador a núcleo de ar. [10]**

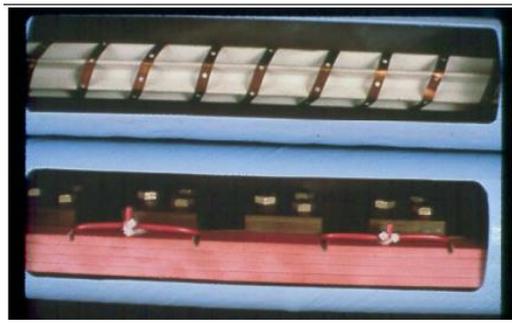
A refrigeração pode ser feita a ar ou a óleo, sendo a primeira mais fácil, por permitir o arrefecimento mais rápido do sistema no caso de faltas sucessivas, facilitando a troca de calor [10].

Como desvantagem, por mais que a corrente de falta diminua, a impedância do reator também está presente em operação normal, gerando perda de potência ativa transferida, pois esta depende diretamente do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão.

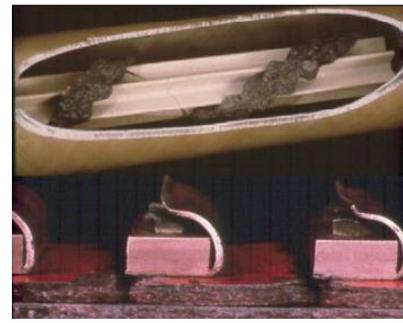
### **2.2.1.2 Dispositivos pirotécnicos**

São construídos por dois dispositivos paralelos. Um caminho contém um condutor principal, feito de cobre, que conduz a corrente nominal. O outro caminho é constituído por um elemento fusível que é responsável pela abertura total do circuito. O caminho

principal possui dois estrangulamentos, aos quais estão associados explosivos, que são detonados a partir do comando enviado por sensores de corrente, que detectam o curto. Então, o elemento fusível extingue o curto, separando o circuito de alimentação da origem da falta, como mostrado na **Figura 2.3**. O tempo de atuação de tais dispositivos é cerca de  $\frac{1}{4}$  de ciclo [10].



a) a) fusível e câmara de cobre em estado normal



b) elementos após o acionamento

**Figura 2.3 ± Dispositivo limitador de corrente pirotécnico [5]**

### 2.3 Supercondutividade e limitadores Supercondutores

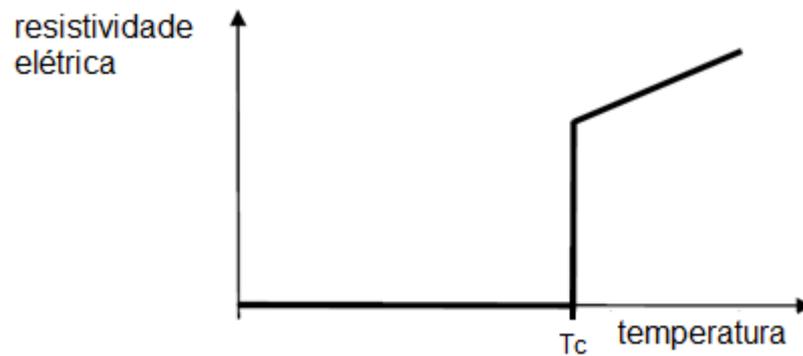
O fenômeno da supercondutividade, de imediato, se refere ao transporte de altos valores de corrente sem perdas por calor, entretanto, os efeitos magnéticos no estado supercondutor apresentam também importantes consequências [11]. A supercondutividade está associada a dois efeitos macroscópicos fundamentais, que são a resistividade nula e o efeito Meissner-Öchsenfeld.

#### 2.3.1 Resistividade nula

Diferente da maioria dos metais, que apresentam diminuição gradual da resistividade com a redução da temperatura, nos supercondutores a resistividade cai de forma abrupta quando resfriados abaixo de um determinado valor, denominado de temperatura crítica ( $T_c$ ).

Este fenômeno foi observado pela primeira vez pelo físico Heike Kamerlingh Onnes, quando ele analisava a resistividade elétrica de uma amostra de mercúrio. Onnes observou que abaixo de 4,2 K, a resistividade da amostra caía para um valor

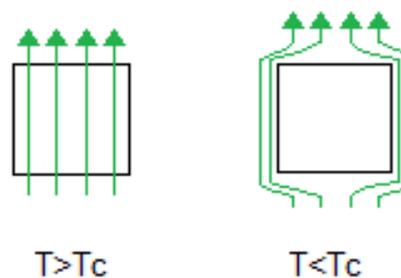
imensurável, como ilustrado na **Figura 2.4**<sup>[7],[12]</sup>. Hoje em dia sabe-se que essa resistividade é nula para corrente contínua e muito menor que a dos condutores convencionais para corrente alternada.



**Figura 2.4** ± Resistividade típica de um supercondutor.

### 2.3.2 Efeito Meissner-Öchsenfeld

Em alguns metais, quando acontece uma variação no campo magnético, correntes parasitas surgem, se opondo a variação e gerando uma força magnética repulsiva. Isso reduz o campo dentro do material. Nos supercondutores, porém, esta força repulsiva é mantida mesmo sob um campo magnético estático. Este efeito é conhecido como efeito Meissner e acontece em materiais no estado supercondutor, sendo a expulsão do fluxo magnético em seu interior. Também é chamado de diamagnetismo perfeito, como ilustra a **Figura 2.5**.



**Figura 2.5** ± Efeito Meissner-Öchsenfeld em um material supercondutor.

### 2.3.3 Parâmetros do estado supercondutor

Um material está no estado supercondutor, se estiver com os parâmetros temperatura, campo magnético e densidade de corrente abaixo de valores críticos,  $T_c$ ,  $H_c$  e  $J_c$ , respectivamente, onde:

- x  $T_c$  é a temperatura crítica;
- x  $H_c$  é o campo crítico (é comum se referir à densidade de fluxo magnético crítica  $B_c$ );
- x  $J_c$  é a densidade de corrente crítica.

Esses três parâmetros são relacionados entre si, conforme a **Figura 2.6**. Sempre que o material apresentar estes três parâmetros dentro desta região, ele está no estado de supercondutividade.

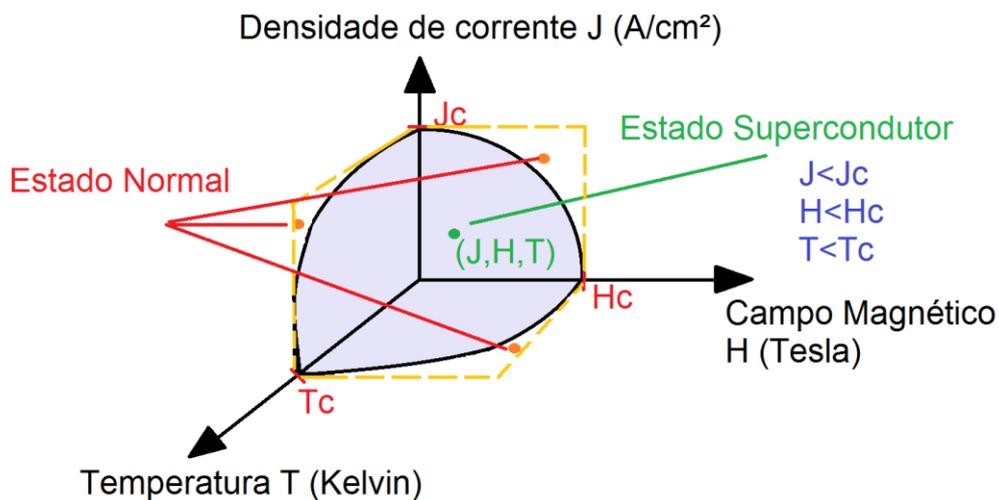


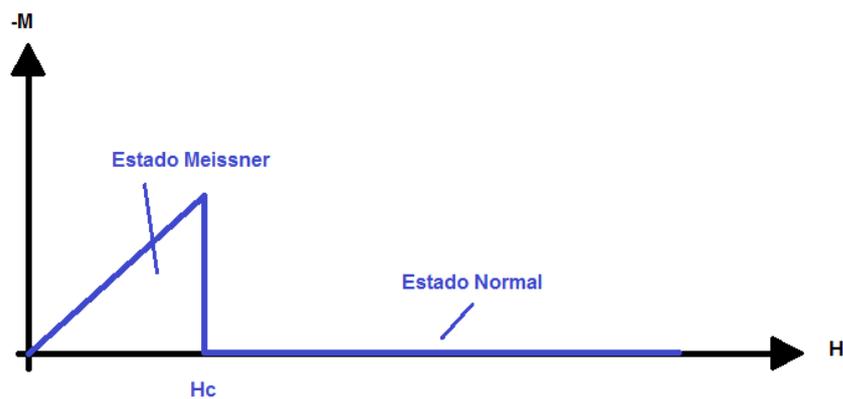
Figura 2.6 ± Região de supercondutividade para alguns materiais.

### 2.3.4 Tipos de supercondutores

Os supercondutores são classificados quanto ao comportamento perante ao campo magnético, agrupados em tipo I e tipo II. Os materiais supercondutores também podem ser classificados quanto à temperatura crítica que os mesmos apresentem, sendo agrupados em supercondutores de baixa temperatura (LTS), e os de alta temperatura (HTS).

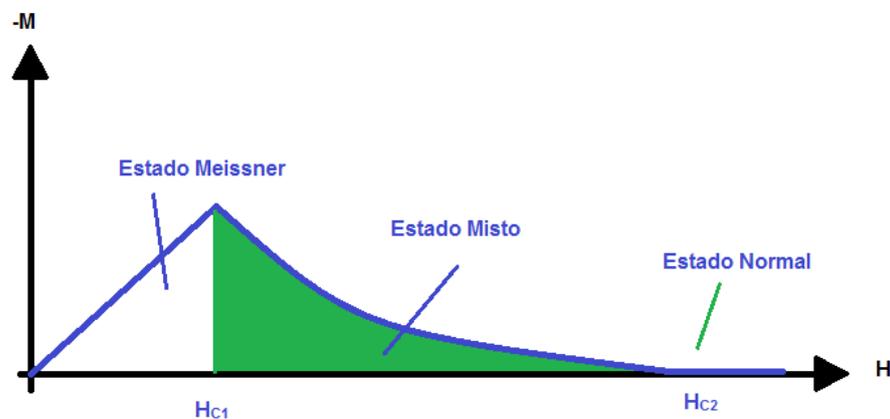
### 2.3.4.1 Supercondutores dos tipos I e II

Supercondutores do tipo I possuem um valor de campo crítico,  $H_c$ . Quando este campo é superado, acontece uma transição do estado supercondutor para o normal [10]. Neste tipo, existem dois estados distintos: no estado supercondutor, não acontece penetração de campo no material, devido ao efeito Meissner; no estado normal, acontece a penetração total de campo, conforme ilustrado na **Figura 2.7**.



**Figura 2.7** ± Magnetização em função do campo magnético para supercondutor do tipo I.

Supercondutores do tipo II apresentam dois valores de campo crítico,  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$  [13]. O material apresenta diamagnetismo perfeito enquanto tem campo menor que  $H_{c1}$ . Entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ , as linhas de campo começam a penetrar no material, que passa a transitar para o estado normal, de forma gradual, como ilustrado na **Figura 2.8**. Se o campo for maior que  $H_{c2}$ , há total penetração de campo e o material passa ao estado normal.



**Figura 2.8** ± Magnetização em função do campo magnético para supercondutor do tipo II

### **2.3.4.2 Supercondutores de alta temperatura (HTS)**

A descoberta dos supercondutores de alta temperatura se deu em 1986 por, Bednorz e Muller, nos laboratórios de pesquisas da IBM em Zurique. Entretanto, só em 1987, com a descoberta do composto  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  as barreiras da refrigeração foram superadas, mediante a possibilidade de refrigerar o material supercondutor com nitrogênio líquido (77 K) [10]. Esse composto cerâmico é usualmente chamado na literatura por YBCO. Por apresentar boas propriedades elétricas acima de 77 K, é um dos supercondutores mais utilizados atualmente.

### **2.3.5 Tipos de limitadores supercondutores**

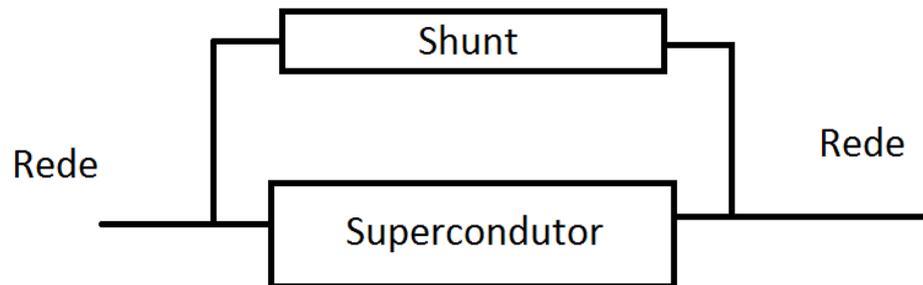
Limitadores de corrente supercondutores (LCS) aparecem como uma alternativa interessante para serem introduzidos em sistemas de energia elétrica, pois apresentam diversas características próximas a de um limitador de corrente de curto-circuito ideal, como: rápida atuação, impedância quase nula em regime permanente, alta impedância durante um curto-circuito, é um dispositivo passivo (dispensa um sistema de controle) e ainda apresenta falha segura (não interrompe o sistema caso falhe). [7].

Os materiais empregados na construção desses dispositivos podem ser fitas supercondutoras ou bulks [14]. Os três principais arranjos para utilização de supercondutores em limitadores de corrente estão sumarizados a seguir [10].

#### **2.3.5.1 Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo**

O limitador resistivo usa o supercondutor em série com o sistema [15]. Durante o curto, a corrente elétrica que atravessa o material supera o valor de  $I_c$ , e, devido à transição abrupta do material (*quench*) para o estado normal, uma impedância série é inserida no sistema quase que instantaneamente, por causa do aumento da resistividade do supercondutor [7].

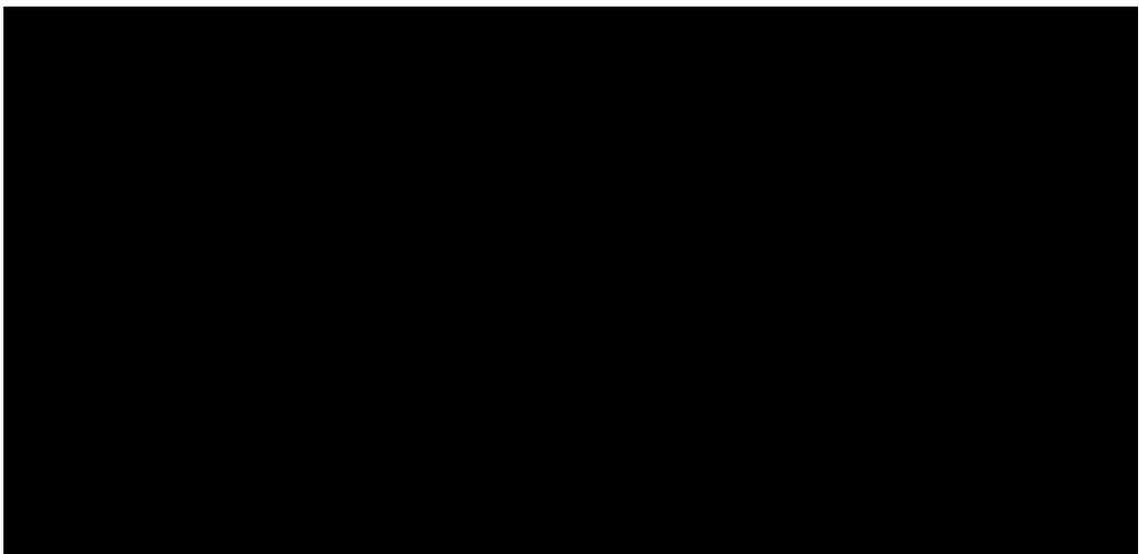
A **Figura 2.9** mostra o esquema simplificado da inserção do limitador resistivo em um sistema. Geralmente, uma resistência *shunt* é ligada ao supercondutor, para derivar parte da corrente de curto após a transição, evitando a queima do supercondutor.



**Figura 2.9** ± Esquema geral de um limitador de corrente resistivo.

### **2.3.5.2 Limitador Indutivo por Blindagem**

Esse limitador usa uma configuração idêntica à de um transformador. Sob um núcleo de ferro, estão dois enrolamentos: o primário, que é feito de condutor convencional, está conectado em série com a rede; o secundário, é um tubo feito de material supercondutor, que geralmente é chamado de blindagem, pois está envolto pelo enrolamento primário, e impede que o fluxo deste passe para o núcleo, conforme mostrado na **Figura 2.10**<sup>[7]</sup>.



**Figura 2.10** ± Esquema geral de um limitador indutivo por blindagem.

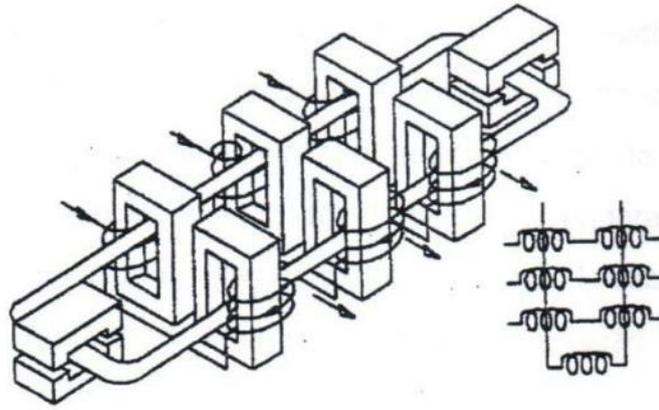
Durante o curto, a transição do material supercondutor faz com que a blindagem desapareça, e assim, o fluxo gerado pelo enrolamento primário entra no núcleo de ferro. Dessa forma a impedância do circuito aumenta, limitando assim a corrente de curto [10]. Em limitadores deste tipo, a tensão de operação sobre o limitador é menor que 1% da tensão de operação da linha protegida [7].

### **2.3.5.3 Limitador de Núcleo Saturado**

Nesse tipo de limitador, é importante dizer que o supercondutor não passa para o estado normal. Seu princípio de funcionamento remete ao fato de que, quando um dispositivo entra ou sai de saturação magnética, sua impedância varia de forma significativa [7].

Seu esquema básico consiste em três enrolamentos e dois núcleos de ferro por fase, como mostrado na **Figura 2.11**. Em cada núcleo de ferro existe um enrolamento de material convencional em série com a rede, por onde circula corrente alternada. O outro enrolamento é de material supercondutor que é alimentado por corrente contínua e envolve os dois enrolamentos de corrente alternada.

Quando circula corrente nominal, o enrolamento supercondutor provê um campo magnético de modo que os núcleos estejam saturados com permeabilidade próxima da unidade. Em um curto, devido ao aumento da corrente que circula nos enrolamentos de corrente alternada, os picos de corrente, tanto no semi-ciclo positivo quanto no negativo, tiram os núcleos da saturação, o que resulta na inserção de uma impedância em cada núcleo.



**Figura 2.11 ± Esquema geral de um limitador de núcleo saturado [7]**

Esse limitador tem grande volume em relação aos demais, por ser constituído de núcleos de ferro e por ter enrolamentos de cobre. Ainda, deve-se prover uma proteção eletromagnética para o enrolamento supercondutor. Em termos técnicos, na operação nominal, a corrente é pouco afetada pelo limitador. A tensão em seus terminais, porém, pode chegar a cerca de 4% da tensão de linha. Durante o curto, existe a geração de harmônicos.

#### **2.4 Limitadores Modulares Resistivos**

Um LCSR é de fácil implementação, e se torna interessante desenvolver módulos que possam ser conectados em série e ou paralelo. É possível criar um LCSR modular tanto com *bulks*<sup>[16]</sup> ou fitas supercondutoras. Será abordada aqui, somente o uso de fitas, pois estas apresentam robustez, estabilidade, flexibilidade da estrutura e bom preço<sup>[14]</sup>.

Para a construção de módulos, os enrolamentos de fitas supercondutoras podem ser feitos numa configuração bifilar, onde se tem caminho de ida e de retorno de corrente concêntricos. Assim, a indutância do conjunto pode ser reduzida significativamente, ou até mesmo anulada.

São possíveis duas configurações para enrolamentos bifilares, que são: os enrolamentos em solenoide ou os enrolamentos em panquecas, conforme detalhado a seguir.

#### **2.4.1 Enrolamento de fitas 2G em solenoide**

Esse enrolamento consiste em dois solenoides concêntricos, conectados em série, formando assim um enrolamento bifilar. A corrente flui em sentidos opostos em cada solenoide. Isso permite que a auto indutância do módulo seja minimizada ou até anulada [14].

Em aspectos funcionais, o LCSR em solenoide apresenta as fitas 2G arranjadas de forma que maximiza a troca de calor entre o nitrogênio líquido e o limitador, permitindo uma fácil dissipação durante o *quenching*. Isto garante uma maior estabilidade térmica, o que é uma característica importante para o LCSR, reduzindo o tempo de recuperação após sua atuação na limitação de corrente.

#### **2.4.2 Enrolamento de fitas 2G em panqueca**

Essa topologia consiste em dois enrolamentos adjacentes que possuem direção contrária de corrente. É possível fazer um dispositivo mais compacto que o enrolamento solenoide, usando o raio de curvatura mínimo da fita supercondutora [14].

A indutância gerada por este modelo é mínima, visto que as espiras dos dois enrolamentos têm um espaçamento bem pequeno.

Em aspectos funcionais, o LCSR em panqueca é mais compacto que o tipo solenoide, todavia o preço a ser pago pelo menor volume é uma menor área para troca de calor, que acaba por reduzir sua estabilidade térmica. Por outro lado, o LCSR com bobina panqueca apresenta uma maior resistência elétrica do supercondutor na transição que o tipo solenoide, que pode melhorar a limitação de corrente de curto-circuito nos instantes iniciais da falha sistêmica, mas o tornam menos robustos a falhas prolongadas e mais lentos para recuperar seu estado supercondutor.

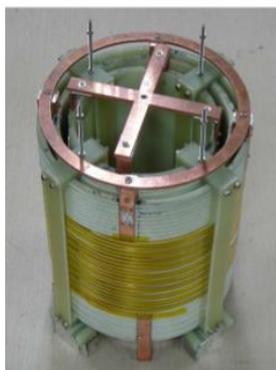
### **2.5 Estado da arte para Exemplos de limitadores resistivos modulares apresentados na literatura**

Nesta seção, serão apresentados alguns dos projetos encontrados na literatura, nos quais foram estudados os LCSR's modulares.

### 2.5.1 Limitador de corrente não indutivo 220 V / 300 A

Como parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Coréia, foi iniciado, no início de 2004, o desenvolvimento de um limitador supercondutor de corrente de curto com enrolamento não indutivo de 12,2 kV / 630 kA. [17]

Como parte deste trabalho, um protótipo de 220 V / 330 A utilizando fitas supercondutoras 2G HTS, também com enrolamento não indutivo, foi confeccionado e testado em ensaio de curto-circuito. A **Figura 2.12** mostra os limitadores e a Figura 2.13 mostra o comportamento da tensão e corrente durante o curto-circuito.

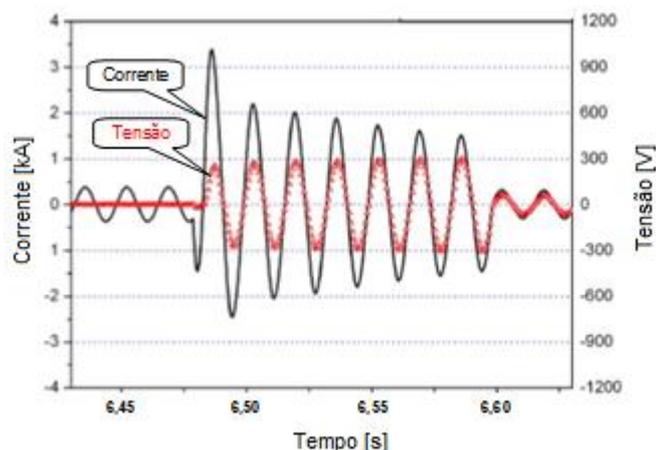


a) Bobinado supercondutor



b) Bobinado e sistema de refrigeração

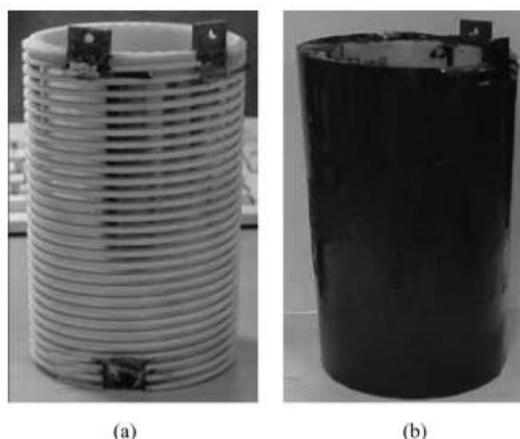
**Figura 2.12 ± Limitador de corrente supercondutor usando fitas 2 G HTS [17]**



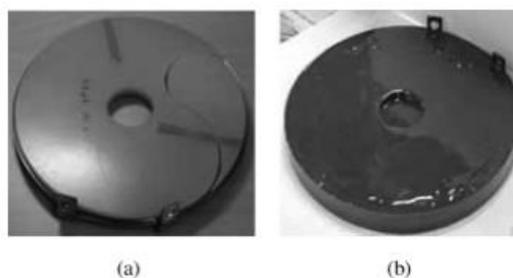
**Figura 2.13 ± Corrente e tensão sobre o limitador em curto-circuito. [17]**

### 2.5.2 Limitadores supercondutores modulares bifilar

Em 2006, Park *et al* [14] testaram o desempenho de limitadores modulares com configuração bifilar em solenoide, conforme **Figura 2.14**, e em panqueca, conforme **Figura 2.15**, com e sem impregnação de resina.

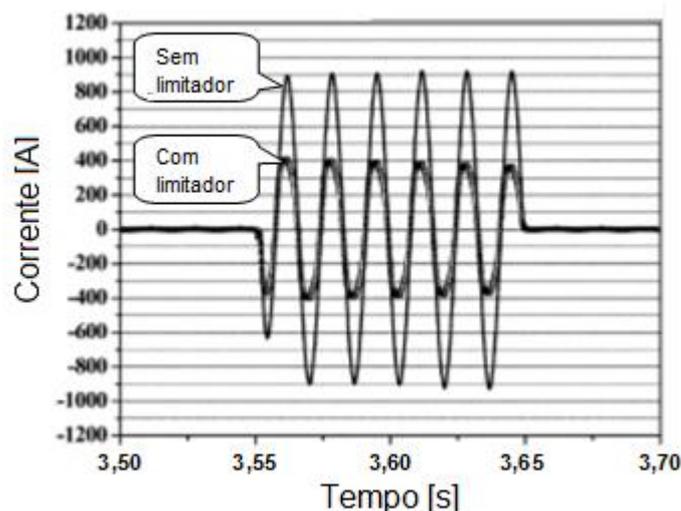


**Figura 2.14 ± Limitador bifilar em solenoide. a) Não impregnado; b) impregnado.**  
[ 14 ]



**Figura 2.15 ± Limitador bifilar em panqueca. a) Não impregnado; b) impregnado.**  
[ 14 ]

A Figura 2.16 apresenta o desempenho deste limitador modular quando empregado no sistema onde foi aplicado o curto. O máximo de pico de corrente ficou em 408 A comparado a 950 A da corrente prospectiva, apresentando uma limitação de 43 %.



**Figura 2.16 ± Ensaio de curto-circuito sobre limitador modular. [14]**

### 2.5.3 *Ensyströb*

O projeto Ensyströb foi iniciado na Alemanha, no ano de 2009, envolvendo parceiros de Universidades e da Indústria (Karlsruhe Institute of Technology, University of Dortmund, Neexas SuperConductors e Vattenfall) com a proposta de construir um limitador de proteção trifásico, com especificações de 12 kV e 800 A. Uma característica especial foi a tolerância a altos níveis de correntes de inrush (4100 A durante 50 ms, e 1800 A em 15 s). [18]

Enrolamentos bifilares em panqueca foram feitos de fitas de YBCO, usando fitas dos tipos SF12100 da SuperPower e 344S (0,3 mm de espessura) da AMSC. A tabela 2.1 apresenta as especificações do projeto, e a Figura 2.7 apresenta o esquema de um componente:

**Tabela 2.1 ± Especificações chaves do Ensyströb [18]**

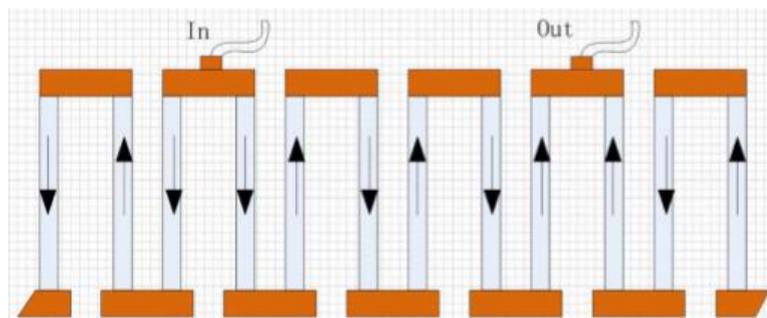
	<b>ENSYSTROB</b>
Tensão	12 kV
Corrente Nominal	800 A
Corrente de Inrush (15 s)	1800 A
Corrente de Inrush (50 ms)	4100 A (pico)
Corrente presumida	60 kA
Primeiro pico limitado	< 21 kA (pico)
Tempo de limitação	120 ms
Limitação após 100 ms	6,6 - 7 kA



**Figura 2.17 ± Protótipo do componente supercondutor do Ensystrub. [18]**

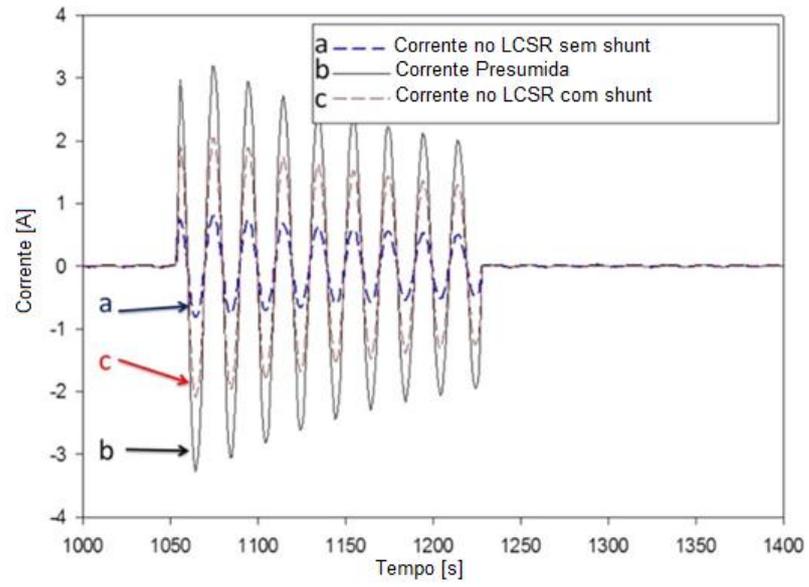
#### 2.5.4 LCSR de 10kV

Em 2013, Hong *et al* [19] desenvolveram um LCSR monofásico de 10 kV e 200 A, com criostato, que foi submetido a testes de curto-circuito e tempo de recuperação. Este foi feito de 15 módulos. Em sua construção, foram confeccionadas fitas de YBCO revestidas, feitas pela Universidade Shanghai Jiaotong. Cada módulo teve duas fitas conectadas em paralelo para transportar 200 A de corrente nominal (com a  $I_c$  de cada fita igual a 150 A), e 6 fitas conectadas em série, para suportar entre 700 e 800 V de tensão de ruptura. A Figura 2.18 apresenta o esquema utilizado em cada módulo.



**Figura 2.18 ± Esquema e conexões das fitas de YBCO em cada módulo. [19]**

Os testes foram aplicados em laboratório com um sistema que podia alcançar 5 kA, sendo alimentados com uma tensão de 100V e corrente presumida de 3 kA de pico. A Figura 2.19 apresenta as formas de onda da corrente de curto-circuito no módulo com em sem shunt (60 mΩ).



**Figura 2.19 ± Formas de onda das correntes presumida e limitadas (com e sem shunt) [19]**

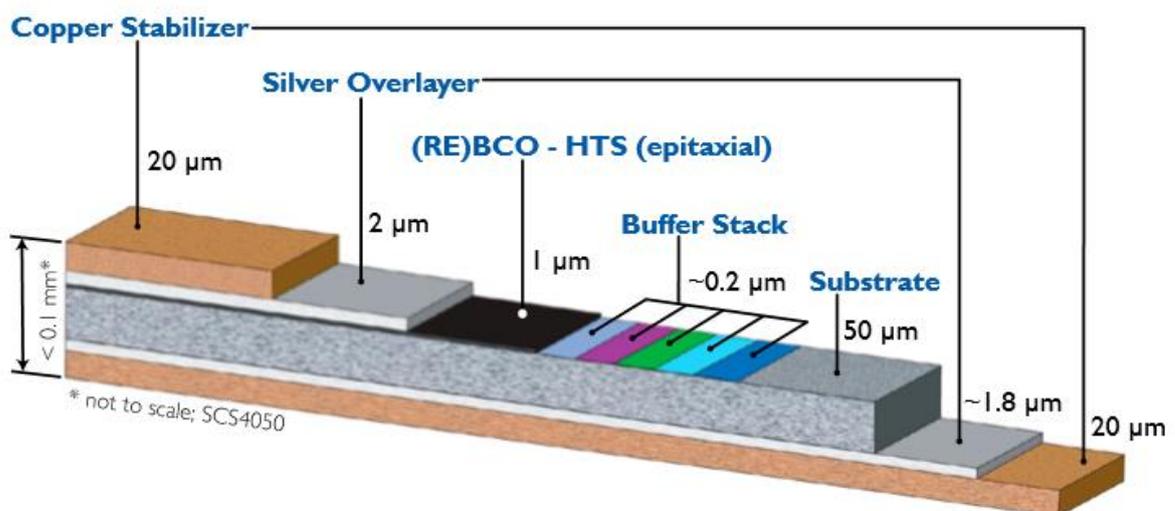
### 3 Dimensionamento e Construção do LCSR Modular

Neste capítulo será apresentado o dimensionamento e o processo de construção de um LCSR modular. Para o protótipo, foi escolhido um enrolamento bifilar em solenoide, por este apresentar uma boa relação entre estabilidade térmica e facilidade construtiva. Cada enrolamento é constituído de duas fitas supercondutoras em paralelo, sobre base de PLA (polímero de ácido láctico), material até então não utilizado para este fim. Partiu-se da proposta de alcançar um módulo com especificações nominais iniciais de 0,5kV e 0,5kA, alcançando especificações finais de 0,5kV e 0,3kA.

#### 3.1 Escolha do material supercondutor

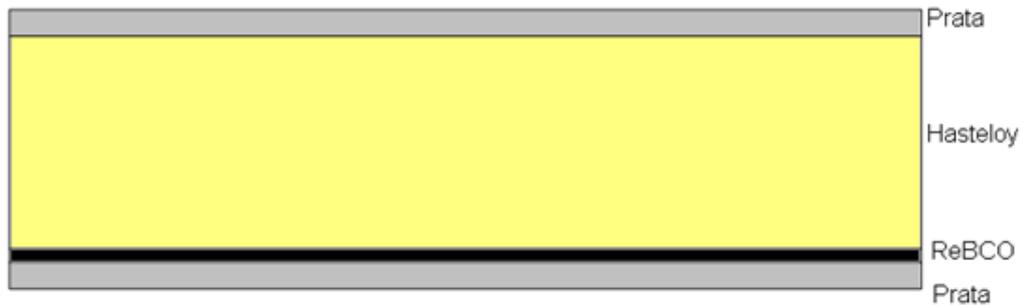
Dentre as diversas formas disponíveis para comercialização do material supercondutor, pode-se destacar aqueles em formato de fita. Esta configuração apresenta algumas vantagens, como robustez, estabilidade, flexibilidade da estrutura e menos custo [14].

As fitas HTS podem ser encontradas sob vários tipos e configurações, que geralmente variam em função do fabricante, e da aplicação. Uma configuração típica é mostrada na **Figura 3.1**.



**Figura 3.1 ± Características das fitas supercondutoras.** [20]

Dentre as fitas disponíveis no mercado, a utilizada foi a SF12100 da Super Power, cuja configuração representada na Figura 3.2 apresenta boas características para limitação de corrente.



**Figura 3.2 ± Fita SF12100 da SuperPower**

Este material apresenta quatro camadas: duas camadas de revestimento de prata, cada uma com  $2\mu\text{m}$ ; uma camada de  $100\mu\text{m}$  de Hastelloy, o qual é um substrato altamente resistivo com  $125\text{m}\Omega/\text{cm}$ , e uma camada de  $1\mu\text{m}$  de ReBCO que é uma cerâmica supercondutora. Ela não apresenta revestimento de cobre, por isso é considerada fita de estabilizante livre. Isso faz com que a camada de Hastelloy seja maior que em outras fitas da Super Power, além de possuir flexibilidade nas opções de estabilização e uma alta uniformidade de corrente [20].

A eficiência na limitação ficou comprovada em um teste típico de curto-circuito que foi aplicado a um módulo constituído de 12 elementos de 12 cm conectados em série. Cada elemento possui quatro fitas supercondutoras SF12100 em paralelo e shunts de proteção. O módulo imerso em nitrogênio líquido é mostrado na **Figura 3.3**.



**Figura 3.3 ± Foto do módulo com 12 elementos de fita SF12100 imerso em nitrogênio. [21]**

O módulo foi submetido a uma tensão de 1080 V com corrente presumida de 33.75 kA rms (90 kA de pico) por 5 ciclos. A corrente limitada foi de 31,81 kA no primeiro ciclo, o que corresponde a aproximadamente 35% da corrente presumida, como pode ser visto na **Figura 3.4**. Aqui,  $I_{presumida}$  é a corrente presumida de curto, e,  $I_{total}$ ,  $I_{sh}$  e  $I_{sc}$  são respectivamente as correntes que fluem através do módulo, dos shunts e dos elementos supercondutores [11]. A **Figura 3.5** mostra o comportamento da corrente nos elementos supercondutores no primeiro ciclo do teste.

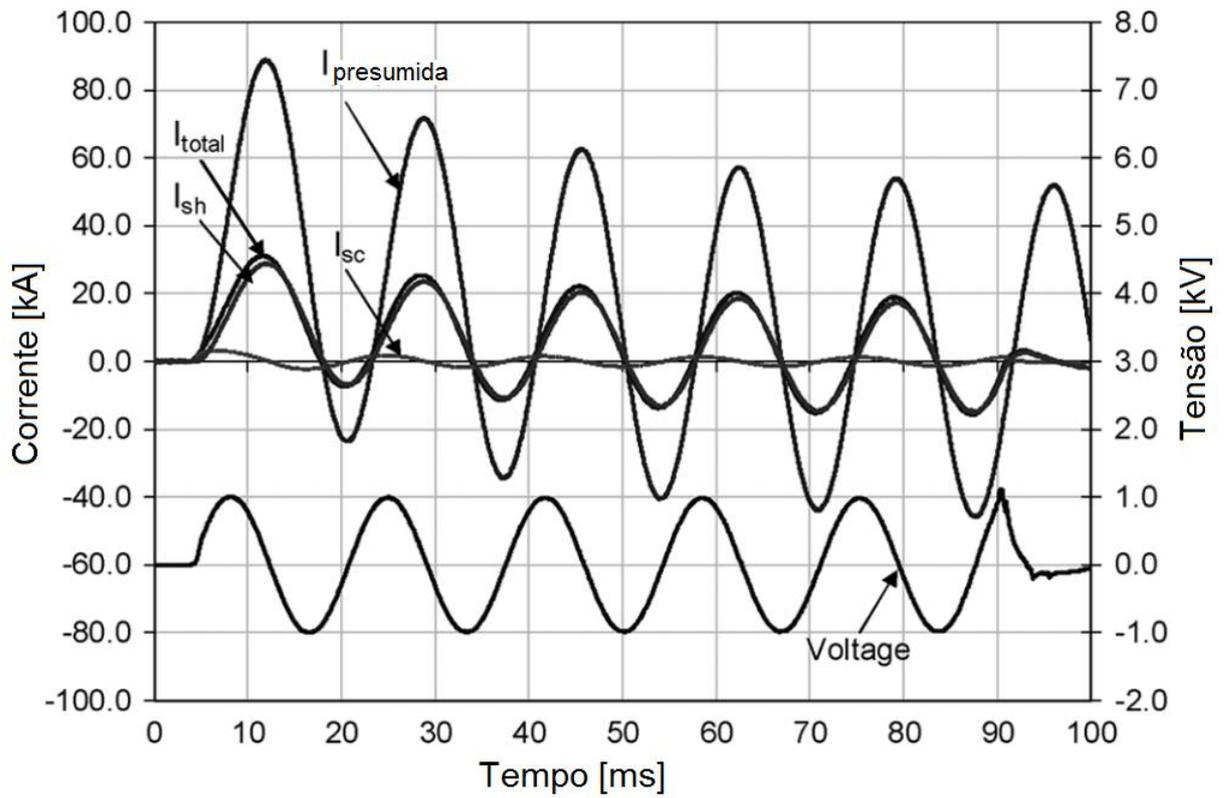


Figura 3.4 ± Ensaio de curto em módulo com 12 elementos com fita SF12100. [21]

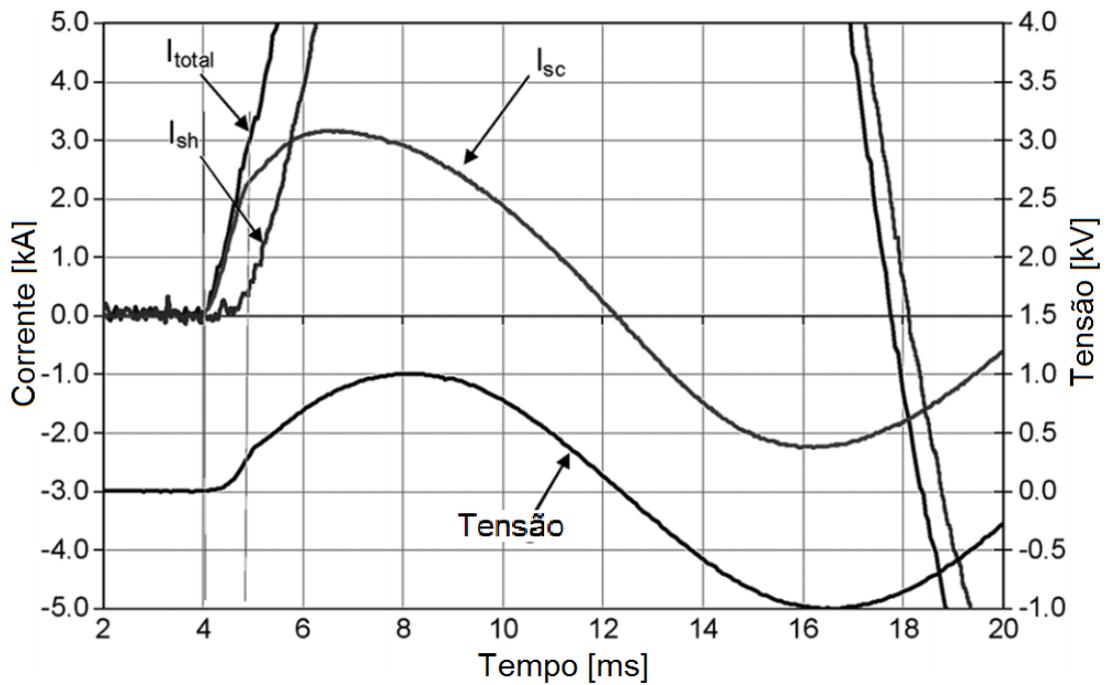


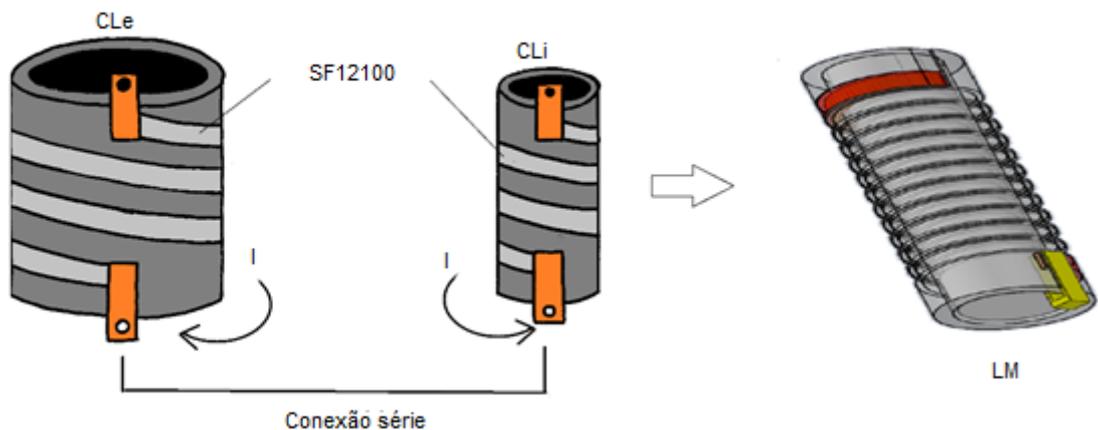
Figura 3.5 ± Primeiro ciclo do ensaio de curto em módulo com 12 elementos com fita SF12100. [21]

Com o bom desempenho da fita SF12100, foi adquirido junto com a SuperPower um rolo de 25 m desta fita para a construção do LCSR proposto. A corrente crítica mínima garantida pelo fabricante é de 297 A.

### 3.2 Considerações construtivas

Em relação as características construtivas do limitador de corrente proposto, alguns aspectos foram considerados:

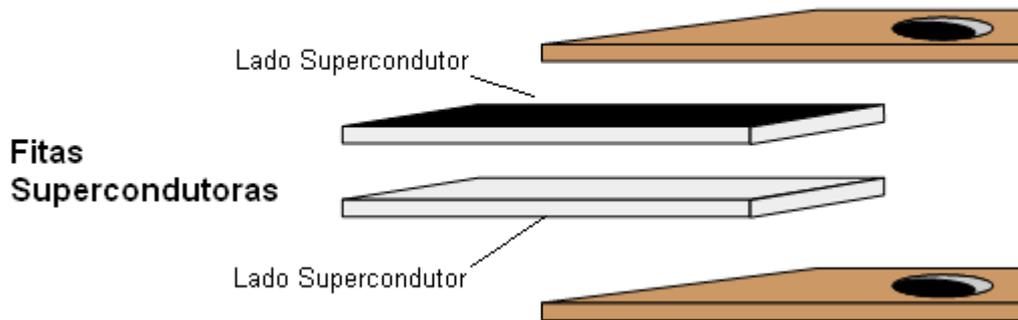
a) Foi definido um módulo, dividido em dois componentes, cada um deles com enrolamento de fitas supercondutoras disposto em solenóide. Estes enrolamentos são concêntricos e conectados em série, como pode ser visto na Figura 3.6 :



**Figura 3.6 ± Esquema do limitador com seus componentes externo (CLe) e interno (CLi)**

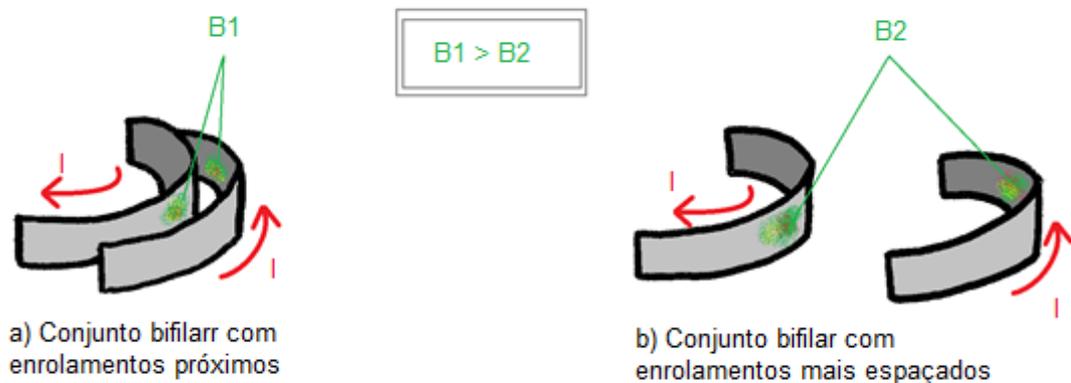
b) Para cada enrolamento foi admitido o uso de duas fitas em paralelo, de modo que o dispositivo tenha um maior valor de corrente nominal. Como cada fita tem  $I_c$  de 300 A em média, esperava-se de início que a  $I_c$  atingisse 600 A.

c) A conexão entre fitas supercondutoras e seus terminais de corrente deve ser feita sempre pelo lado mais próximo da camada supercondutora. Na Figura 3.1, por exemplo, o lado supercondutor situa-se no topo. Assim, os terminais de corrente foram feitos de modo a garantir a conexão, como apresentado na Figura 3.7.



**Figura 3.7 ± Conexão entre fitas supercondutoras e terminais**

Em um conjunto bifilar, quanto mais próximo estiverem seus enrolamentos, menor será a indutância. Entretanto, pelo transporte de corrente em sentidos opostos, como ilustrado na **Figura 3.8**, a concentração de indução de campo magnético  $B$  na superfície do material pode aumentar significativamente, provocando uma redução na corrente crítica do material, uma vez que esta é altamente dependente do campo magnético externo.



**Figura 3.8 ± Ilustração da indução de campo entre enrolamentos de um conjunto bifilar**

Assim, foi feita uma análise em Elementos Finitos para verificar a magnitude da densidade de campo em algumas configurações para o limitador, adotando algumas premissas:

- x Foi adotado um condutor convencional transportando uma densidade de corrente próxima ao limite do supercondutor, antes da transição, para o enrolamento, apenas para simplificar a análise magnetostática [22];
- x Um modelo simétrico em relação ao eixo z será utilizado também como mecanismo de simplificação.

### 3.2.1 Simulação e escolha do arranjo

A fita SF12100 apresenta campo elétrico com suportabilidade de 1,6 V/cm, no entanto, foi utilizado aqui 1,5 V/cm que é o valor máximo de algumas fontes. Para que um trecho de material supercondutor possa suportar 0,5 kV, é necessário um comprimento de 3,34 m de fita aproximadamente. Como ficou definido o uso de duas fitas em paralelo para cada componente do limitador, foi estimado o uso de 6,68 m de fita supercondutora.

Teve-se a necessidade de satisfazer a seguinte equação:

$$0 \neq P \frac{u_{áv}}{t \neq 4 \neq E 4 \neq}$$

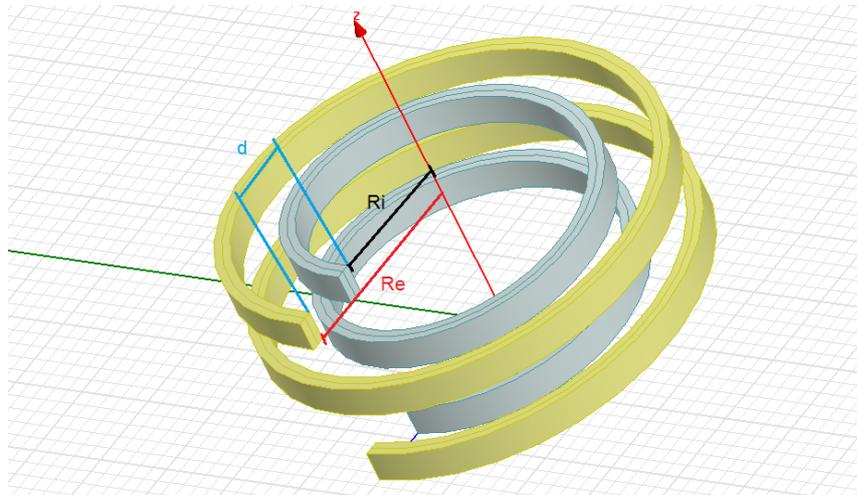
onde:

- x Ne – número de espiras;
- x Ri – raio do componente interno (CLi), em metros;
- x Re – raio do componente externo (CLe), em metros.

De acordo com análises anteriores, uma mudança no arranjo pode mudar significativamente a distribuição da indução de campo ao longo do material supercondutor, ao passo que, também pode afetar diretamente a indutância do conjunto.

Assim, para análise magnetostática, foram testadas algumas configurações, variando os parâmetros mostrados na Figura 3.9, que são:

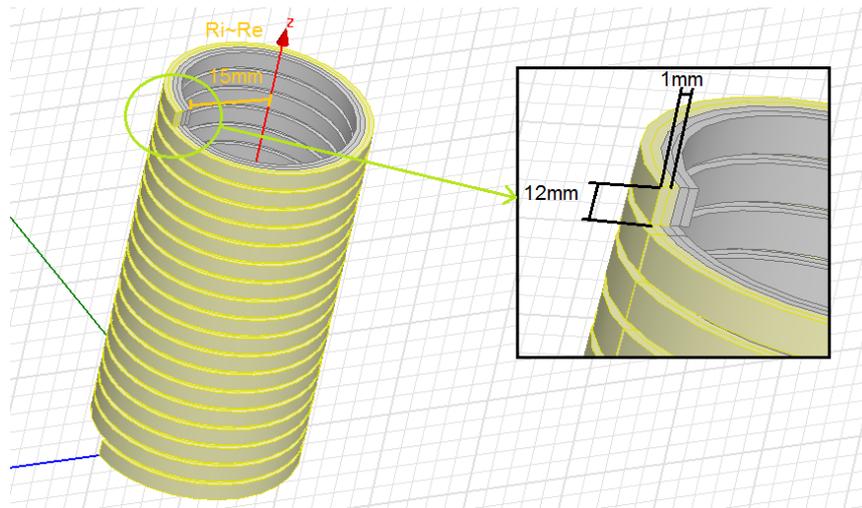
- x Raio do enrolamento interno ( $R_i$ ): 15 – 50 mm, com passo de 5 mm;
- x Distância radial entre os enrolamentos ( $d$ ): 10 – 30 mm, com passo de 5 mm.



**Figura 3.9 ± Parâmetros geométricos do enrolamento bifilar**

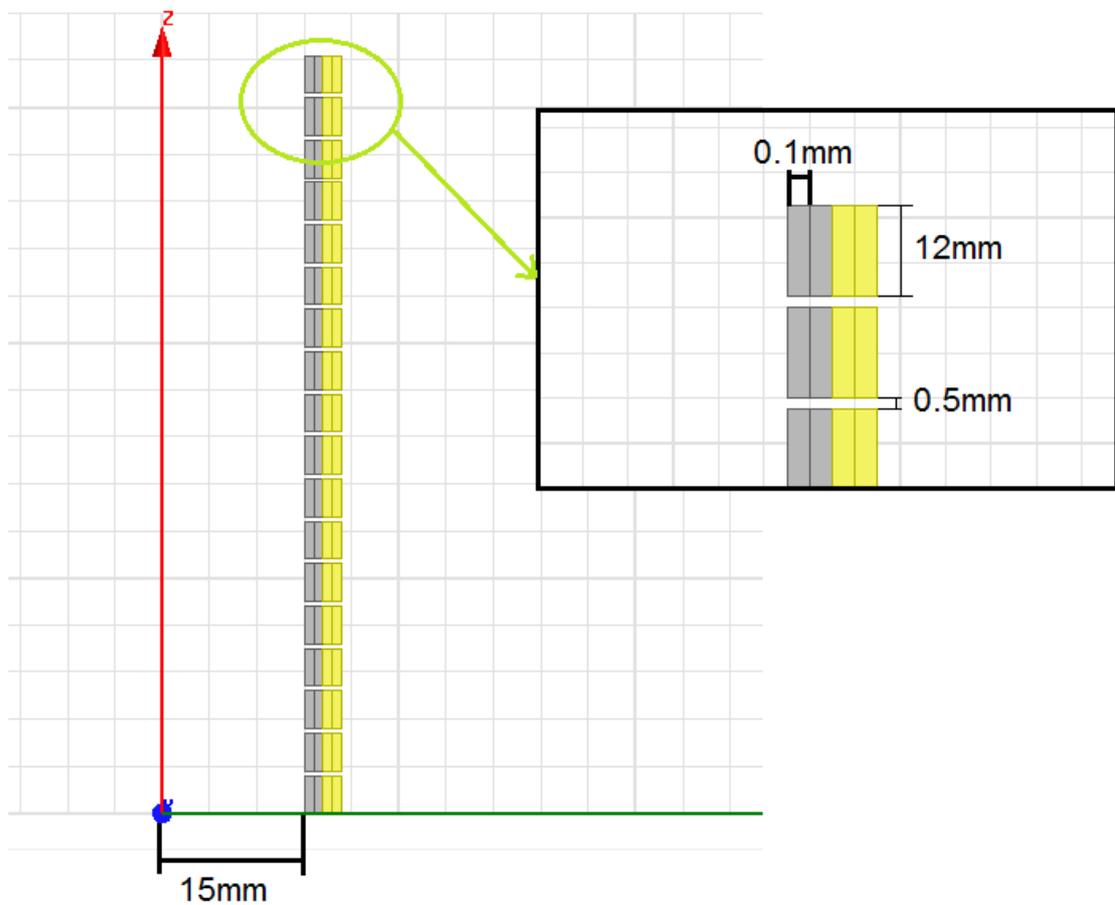
O objetivo aqui foi o de analisar o comportamento da indução de campo  $B$  nas fitas supercondutoras. Para análise prévia, foi considerado o caso em que a configuração proposta é mínima, ou seja, os enrolamentos possuem afastamento nulo ( $d \sim 0$ ). Como a espessura das fitas é muito fina, admitiu-se  $R_i = R_e$ , chegando a um número de espiras igual a 18.

A figura 3.10 apresenta o esquema do modelo simplificado para esta configuração, onde as fitas supercondutoras foram consideradas como uma única camada. Esta foi modelada como um condutor convencional transportando a mesma quantidade de corrente sobre a camada supercondutora, apenas para análise magnetostática.



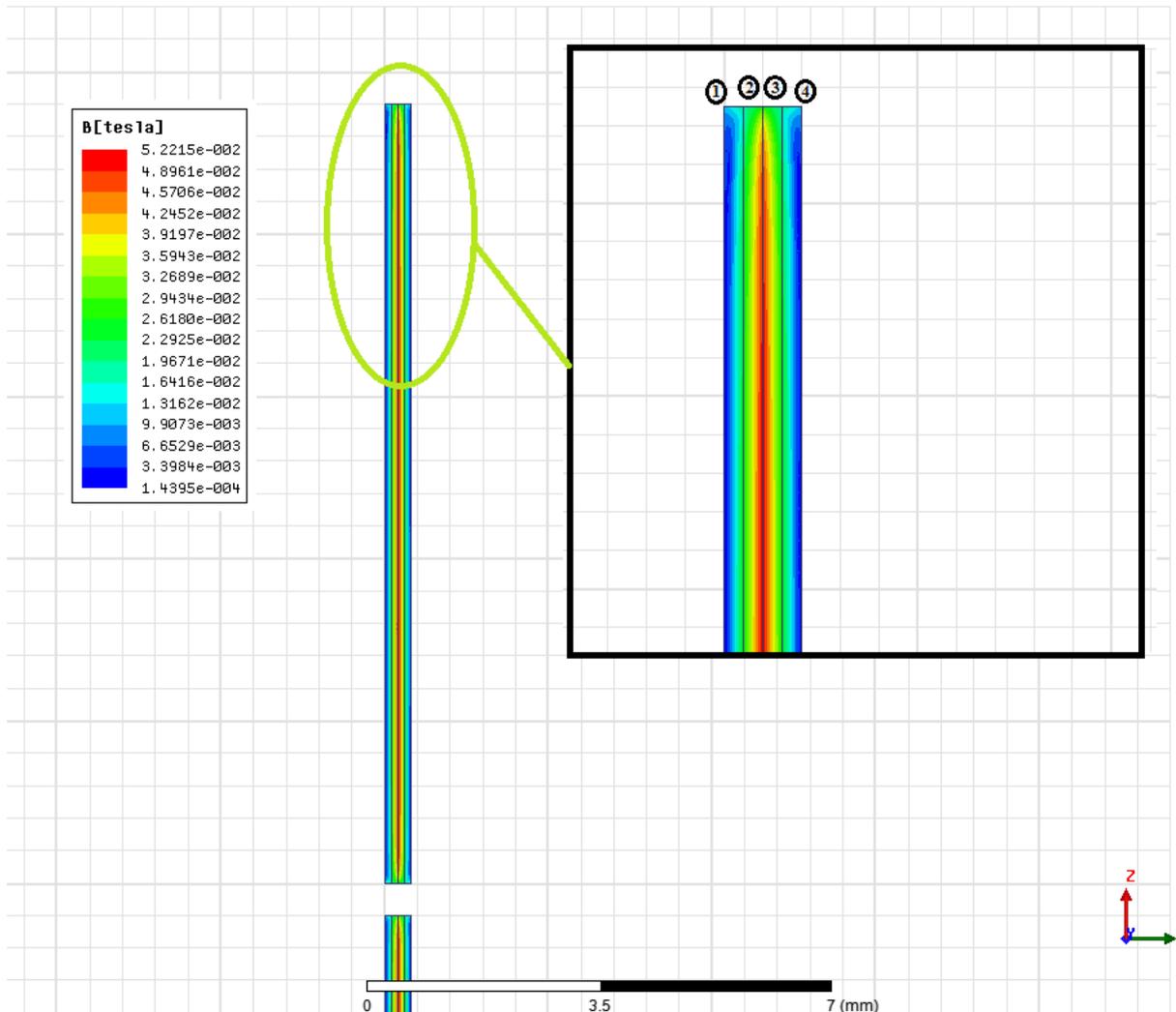
**Figura 3.10 ± Modelagem**

O modelo 2D aproximado para simulação em elementos finitos pode ser exemplificado pelo desenho, sem escala apresentado na figura 3.11:



**Figura 3.11 ± Modelagem**

Para este caso, como pode ser visto na Figura 3.12, o valor de B foi maior nas superfícies das fitas que transportam corrente imediatamente opostas (superfícies opostas das fitas 2 e 3), do que nas demais regiões:

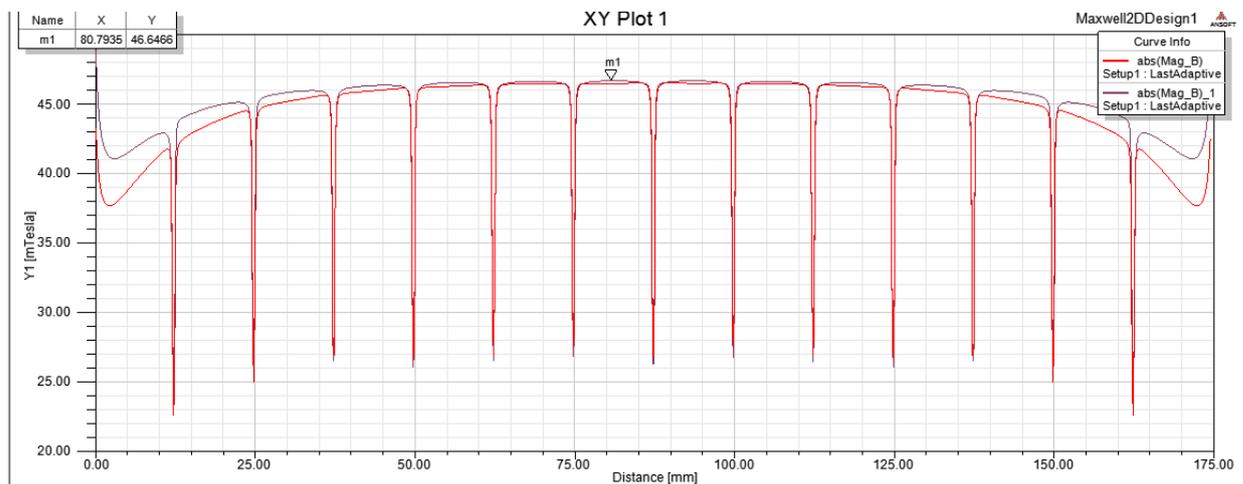


**Figura 3.12 ± Modelagem**

Assim, foi feita a análise das configurações anteriormente consideradas, de modo a calcular o valor da indução de campo B nestas superfícies.

A **Figura 3.13** e a **Figura 3.14** apresentam resultados do cálculo da indução de campo para duas configurações distintas. Aqui, o cálculo da indução de campo é tomado nas superfícies opostas das fitas 2 e 3. Dependendo das dimensões dos enrolamentos, o conjunto terá mais ou menos espiras, como apresentado na equação anterior. É possível notar que uma mudança no valor máximo da indução de campo ocorre.

**Figura 3.13 ± Análise de indução de campo para Ri=25 mm e Re=35 mm**



**Figura 3.14 ± Análise de indução de campo para Ri=15 mm e Re=25 mm**

Além do valor da indução de campo, em cada configuração, o comprimento do material C e o volume dos enrolamentos V (aqui admitido como o volume de um cilindro onde a altura foi definida pelo número de espiras e o raio como metade do diâmetro do enrolamento externo), também variavam. Assim, estes valores também foram agrupados, como apresenta a **Tabela 3.1**:

**Tabela 3.1 ± Análise de indução de campo máxima, tamanho de cada um dos dois enrolamentos e volume para as diversas configurações do limitador modular**

Ri[cm]	Re[cm]	B [mT]	C [m]	V	Ri[cm]	Re[cm]	B [mT]	C [m]	V
1.5000	2.5000	46.6400	3.5200	0.3300	3.5000	4.5000	45.2800	3.5200	0.5400
1.5000	3.0000	46.2300	3.4000	0.4100	3.5000	5.0000	44.3600	3.7400	0.6600
1.5000	3.5000	46.1800	3.4600	0.5100	3.5000	5.5000	42.5200	3.4000	0.6900
1.5000	4.0000	45.1900	3.4600	0.6100	3.5000	6.0000	41.3400	3.5900	0.8200
1.5000	4.5000	43.9500	3.4000	0.6900	3.5000	6.5000	40.2500	3.7700	0.9600
1.5000	5.0000	43.1700	3.6800	0.8500	3.5000	7.0000	39.2300	3.9600	1.1100
2.0000	3.0000	46.1400	3.4600	0.3800	4.0000	5.0000	44.9400	3.4000	0.5700
2.0000	3.5000	45.8600	3.4600	0.4700	4.0000	5.5000	43.6900	3.5900	0.6900
2.0000	4.0000	45.0300	3.4000	0.5500	4.0000	6.0000	42.4600	3.7700	0.8200
2.0000	4.5000	44.3200	3.6800	0.6900	4.0000	6.5000	41.2500	3.9600	0.9600
2.0000	5.0000	42.7900	3.5200	0.7600	4.0000	7.0000	38.8600	3.4600	0.9300
2.0000	5.5000	41.9500	3.7700	0.9200	4.0000	7.5000	37.7700	3.6200	1.0700
2.5000	3.5000	45.7400	3.4000	0.4200	4.5000	5.5000	44.9700	3.7700	0.6900
2.5000	4.0000	45.3500	3.6800	0.5500	4.5000	6.0000	43.6800	3.9600	0.8200
2.5000	4.5000	44.1800	3.5200	0.6200	4.5000	6.5000	41.4300	3.4600	0.8000
2.5000	5.0000	43.3300	3.7700	0.7600	4.5000	7.0000	40.0300	3.6200	0.9300
2.5000	5.5000	41.7200	3.5200	0.8000	4.5000	7.5000	38.9500	3.7700	1.0700
2.5000	6.0000	40.7900	3.7400	0.9600	4.5000	8.0000	37.6900	3.9300	1.2100
3.0000	4.0000	45.3900	3.5200	0.4900	5.0000	6.0000	44.6100	3.4600	0.6800
3.0000	4.5000	44.7800	3.7700	0.6200	5.0000	6.5000	42.9500	3.6200	0.8000
3.0000	5.0000	43.4800	3.5200	0.6600	5.0000	7.0000	41.4000	3.7700	0.9300
3.0000	5.5000	42.4900	3.7400	0.8000	5.0000	7.5000	39.9800	3.9300	1.0700
3.0000	6.0000	40.3800	3.4000	0.8200	5.0000	8.0000	38.7300	4.0900	1.2100
3.0000	6.5000	39.3800	3.5900	0.9600	5.0000	8.5000	36.4700	3.4000	1.0900

Como limite de corte, todas as configurações com mais de 3,5 metros de comprimento foram excluídas. Então, foram pré-escolhidos dois arranjos, neste caso, os de maior e menor volume, que pode ser visto na Tabela 3.2.

:

**Tabela 3.2 ± Escolha dos arranjos dos limitadores**

Ri[cm]	Re[cm]	B [mT]	C [m]	V
2.0000	3.0000	46.1400	3.4600	0.3800
1.5000	3.0000	46.2300	3.4000	0.4100
2.5000	3.5000	45.7400	3.4000	0.4200
2.0000	3.5000	45.8600	3.4600	0.4700
1.5000	3.5000	46.1800	3.4600	0.5100
2.0000	4.0000	45.0300	3.4000	0.5500
4.0000	5.0000	44.9400	3.4000	0.5700
1.5000	4.0000	45.1900	3.4600	0.6100
5.0000	6.0000	44.6100	3.4600	0.6800
1.5000	4.5000	43.9500	3.4000	0.6900
3.5000	5.5000	42.5200	3.4000	0.6900
4.5000	6.5000	41.4300	3.4600	0.8000
3.0000	6.0000	40.3800	3.4000	0.8200
4.0000	7.0000	38.8600	3.4600	0.9300
5.0000	8.5000	36.4700	3.4000	1.0900

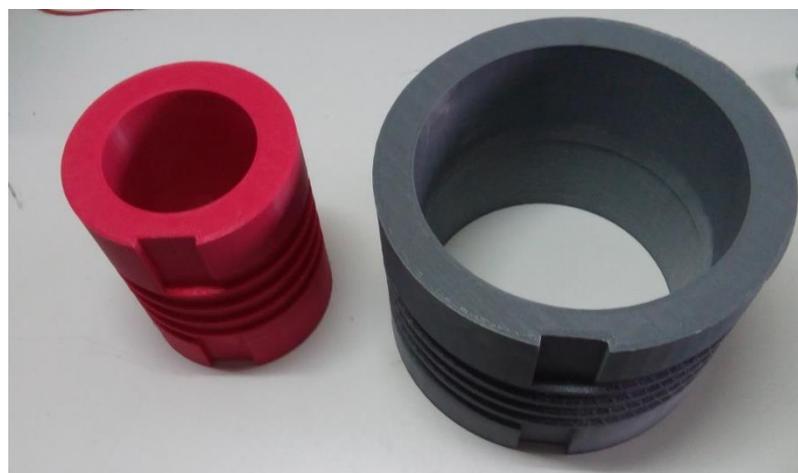
### 3.2.2 Modelo para construção

Das duas configurações escolhidas, em virtude de limitações construtivas e de tempo, apenas uma foi totalmente finalizada. Como pode ser visto na **Figura 3.15**, foi iniciada a confecção das bases, em Nylon, para a configuração de menor volume.



**Figura 3.15 ± Confecção de uma base em Nylon**

Entretanto, não foi possível fazer a ranhura para entrada das fitas supercondutoras, devido ao passo máximo do torno utilizado. A parede entre uma ranhura e outra se mostrou muito fina e frágil, comprometendo a confecção deste arranjo. Assim, somente o outro arranjo levou a construção de um módulo limitador que teve suas bases feitas por impressão 3D, com uso de PLA (polímero de ácido láctico). A **Figura 3.16** apresenta as bases para enrolamento das fitas supercondutoras:



**Figura 3.16 ± Bases de PLA**

### 3.3 *Técnica de confecção dos terminais de corrente*

Uma consideração importante no que diz respeito a equipamentos supercondutores são os terminais de corrente, que devem ser construídos de forma a garantir a integridade do material supercondutor. Sendo assim, devem atender aos seguintes aspectos:

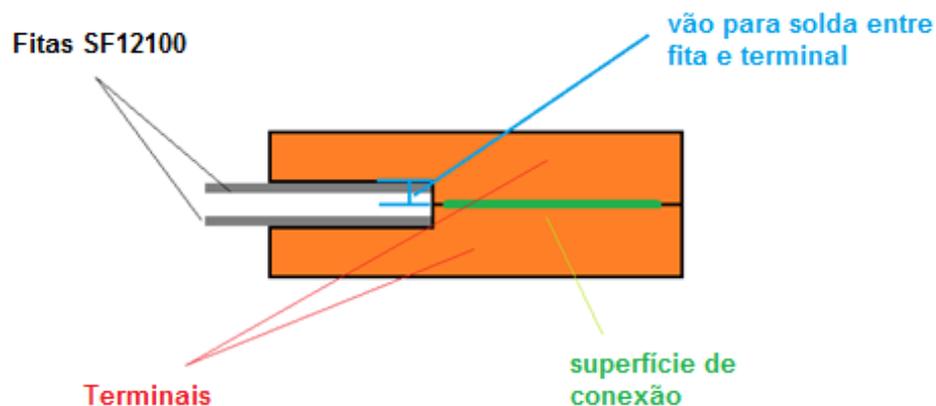
- x A conexão com o material supercondutor deve apresentar baixa resistividade. De acordo com recentes investigações com fitas supercondutoras de YBCO [23], valores menores que  $100 \text{ n}\Omega \text{ cm}^2$  devem ser alcançados nestas conexões;
- x O contato deve prover integridade mecânica ao material e a própria conexão.

Em cabos supercondutores, várias fitas são conectadas à um único terminal de cobre. Entretanto, limitadores podem apresentar um arranjo complexo com várias fitas supercondutoras, tornando difícil a confecção com os terminais, sendo necessário soldar cada fita a um terminal individual para conectá-los depois.

Assim sendo, é importante ter um processo bem definido para realizar estas conexões, com alta reprodutibilidade, que possibilite uma baixa resistência, tanto na conexão entre fitas, como entre fita e cobre.

Esta seção define os procedimentos de confecção para a conexão usada. Primeiramente, é importante que as fitas supercondutoras sejam conectadas uma a outra, ou a um terminal de corrente, pela sua face supercondutora.

O esquema da **Figura 3.17** apresenta a conexão para duas fitas em paralelo, onde cada uma possui um terminal individual com desbaste. A solda entre fita e terminal é feita neste vão. As conexões entre elas são feitas pelas faces dos terminais, que podem ser pressionadas sem causar danos mecânicos a fita e a solda.



**Figura 3.17 ± Esquema de conexão para fitas em paralelo**

De acordo com o apresentado em<sup>[24]</sup>, o contato entre as fitas e os terminais pode ser feito mecanicamente ou por solda. Entretanto, para ambos os casos, se faz uso de pressão controlada.

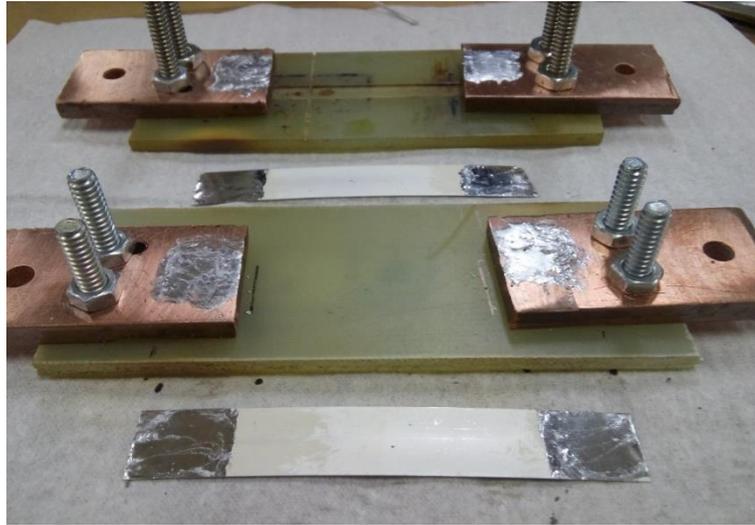
No presente trabalho, não foi adotada a conexão mecânica, pois existe uma possibilidade de estresse mecânico na fita que pode causar danos irreversíveis. Deste modo, se torna muito complexo este tipo de conexão nos terminais para o arranjo escolhido.

No processo de conexão por solda, a conexão deve possuir boa estabilidade mecânica e baixa resistividade<sup>[23]</sup>. Ainda assim esta resistividade depende diretamente da temperatura do processo e da pressão aplicada as partes envolvidas<sup>[24]</sup>. O procedimento adotado para garantir tais condições é descrito a seguir.

Primeiro, os contatos de cobre são limpos, em seguida é aplicado fluxo de solda nas superfícies de contato, e por fim elas recebem uma camada de solda que geralmente é composta de índio-estanho devido ao seu baixo ponto de fusão. Neste processo foi utilizado um soprador térmico, na temperatura de 150° a 200°C, para fazer a camada mais uniforme possível.

Em cada fita, foi aplicado fluxo de solda, numa região de 15 mm x 12 mm de área, processo similar ao usado por Nadezda et.al<sup>[24]</sup>, onde foi feita uma camada de solda de índio-estanho, com um ferro de solda de ponta quadrada, para distribuição mais

uniforme, a temperatura de 180 °C. Os terminais de cobre são mostrados na **Figura 3.18**.

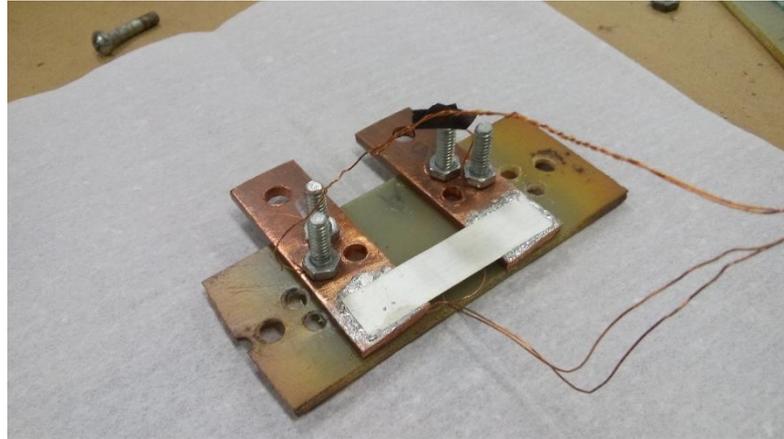


**Figura 3.18 ± Preparo das faces da fita e do contato de cobre para contato por solda**

Por mais que o ponto de fusão da solda seja de 130 °C, o uso desta temperatura não ajuda na distribuição uniforme da solda ao longo da área de contato, por causa da rápida transferência de calor.

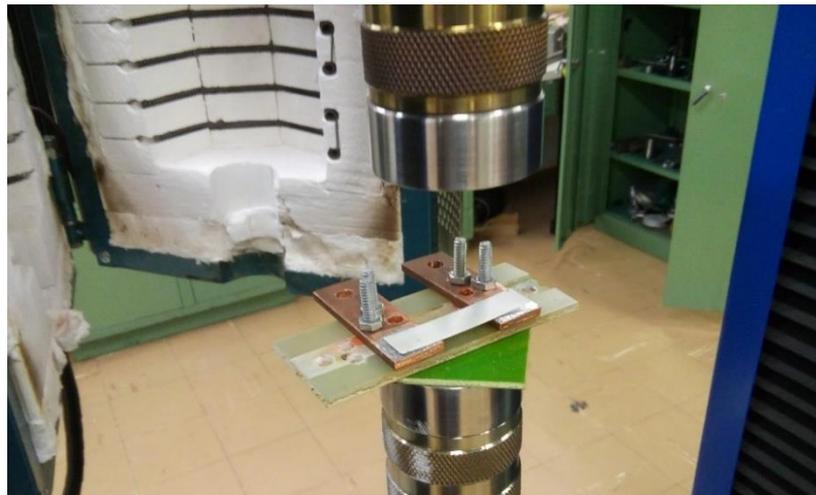
A união das partes é feita fundindo as camadas de solda a uma temperatura acima do ponto de fusão e aplicando uma pressão sobre as partes. A resistência de contato é diretamente influenciada por estes parâmetros, e a garantia da reprodutibilidade de tal processo é importante para o dimensionamento do limitador.

Para os ensaios, foram construídas pequenas amostras, com trechos de fitas de 50 mm, como mostra a **Figura 3.19**.



**Figura 3.19 ± Amostra de ensaio para resistência de contato**

Este conjunto foi submetido a uma máquina de compressão, provida de um forno, para aplicação de pressão controlada sobre as áreas de contato, após o aquecimento a uma temperatura de 200°C (de acordo com referências). Os equipamentos são mostrados nas figuras 3.20 e 3.21:



**Figura 3.20 ± Preparo do procedimento de solda**



**Figura 3.21 ± Forno elétrico e máquina de compressão**

O processo foi realizado de modo que o prato de compressão do equipamento atingisse somente as regiões de solda distribuindo a pressão aplicada por igual em cada contato, conforme **Figura 3.21**. As pressões aplicadas foram de 2 MPa e 3 MPa por contato.

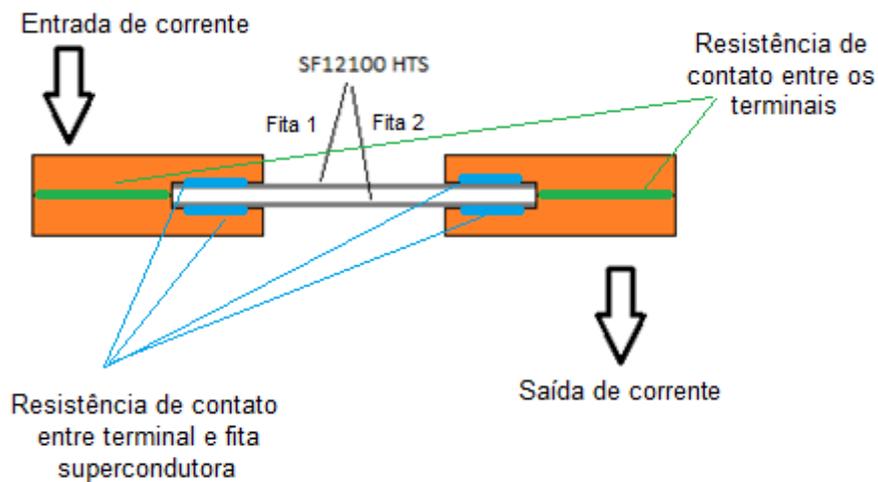
As resistências de contato foram obtidas com as amostras imersas em nitrogênio líquido utilizando o método das quatro pontas, com os terminais de tensão colocados um pouco distante das regiões de solda. A medição foi feita também com as amostras após sofrerem um ciclo térmico, que aqui fica definido como a imersão da amostra no nitrogênio líquido após ter sido retirada deste e ter voltado à temperatura ambiente. Os valores são apresentados na **Tabela 3.3**, sendo da ordem de  $10^{-6}$  e  $10^{-7} \Omega$ .

**Tabela 3.3 ± Resistência ôhmica com forno a 200°C para diferentes níveis de pressão antes e após sofrer um ciclo térmico**

Pressão Aplicada (MPa)	Contato	Resistência ( $\mu\Omega$ )	R choque térmico ( $\mu\Omega$ )
3	C1	2,0	2,0
	C2	2,0	2,0
	C3	0,9	0,9
	C4	0,8	0,8
2	C1	0,9	0,9
	C2	2,0	2,0
	C3	0,9	0,9
	C4	1,0	1,0

### 3.4 Amostra teste

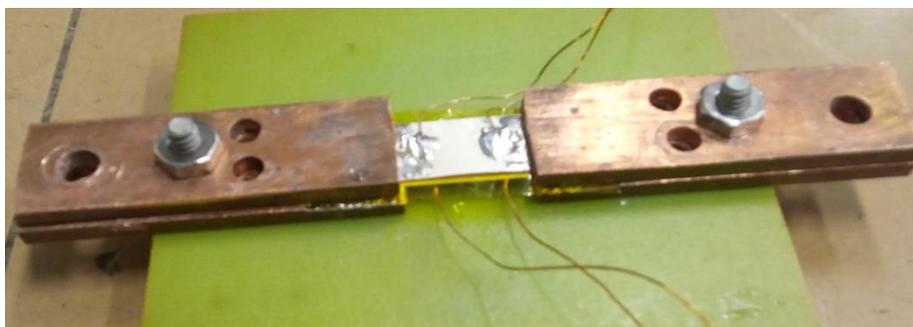
Após realizado o procedimento de solda descrito no item anterior, uma amostra teste foi construída com base na configuração do limitador modular. Um esquemático da amostra é apresentado na **Figura 3.22**.



**Figura 3.22 ± Esquema da amostra com fitas em paralelo**

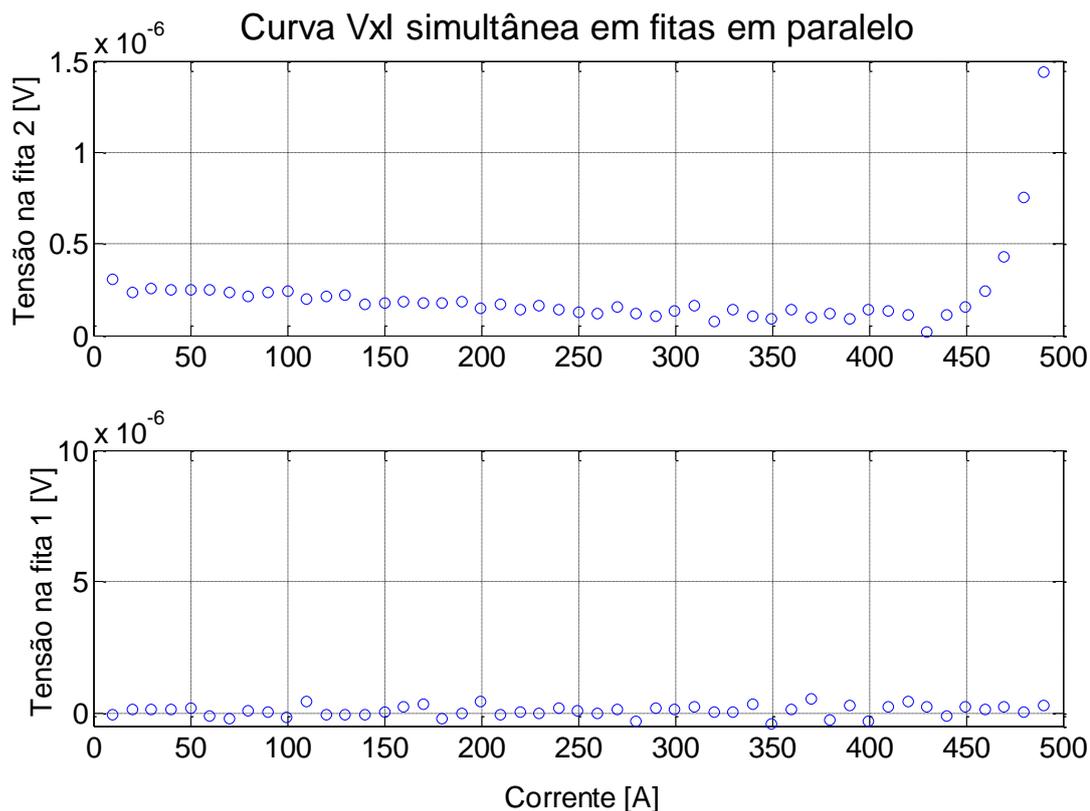
Um grande desafio para fitas em paralelo, é que, em estado supercondutor, estas têm resistência quase nula em corrente alternada e, dependendo da frequência, a distribuição de corrente é prejudicada. Pelo processo adotado, as soldas feitas entre fita e terminal possuem uma resistência muito mais baixa do que a resistência dos contatos por pressão entre os terminais que seriam parafusados.

Admitiu-se aqui que, por mais que estas resistências não sejam iguais, seriam próximas o suficiente para distribuir a corrente nas fitas para alcançar um valor próximo aos 600 A que seriam alcançados em uma distribuição de corrente perfeita. Amostras como a mostrada na **Figura 3.23** foram caracterizadas.



**Figura 3.23 ± Amostra com fitas em paralelo**

Em nenhum caso conseguiu-se uma distribuição de corrente perfeita a ponto de se ter uma  $I_c$  de 600 A. Entretanto, a corrente crítica alcançada foi suficiente para o projeto do limitador. A **Figura 3.24** apresenta o resultado da caracterização para uma das amostras, onde a tensão em cada uma das fitas foi medida em função da corrente injetada nessa amostra, de modo que a  $I_c$  do conjunto foi definida após uma das fitas apresentar a transição.



**Figura 3.24 ± Curva VxI simultânea nas fitas paralelas da amostra supercondutora**

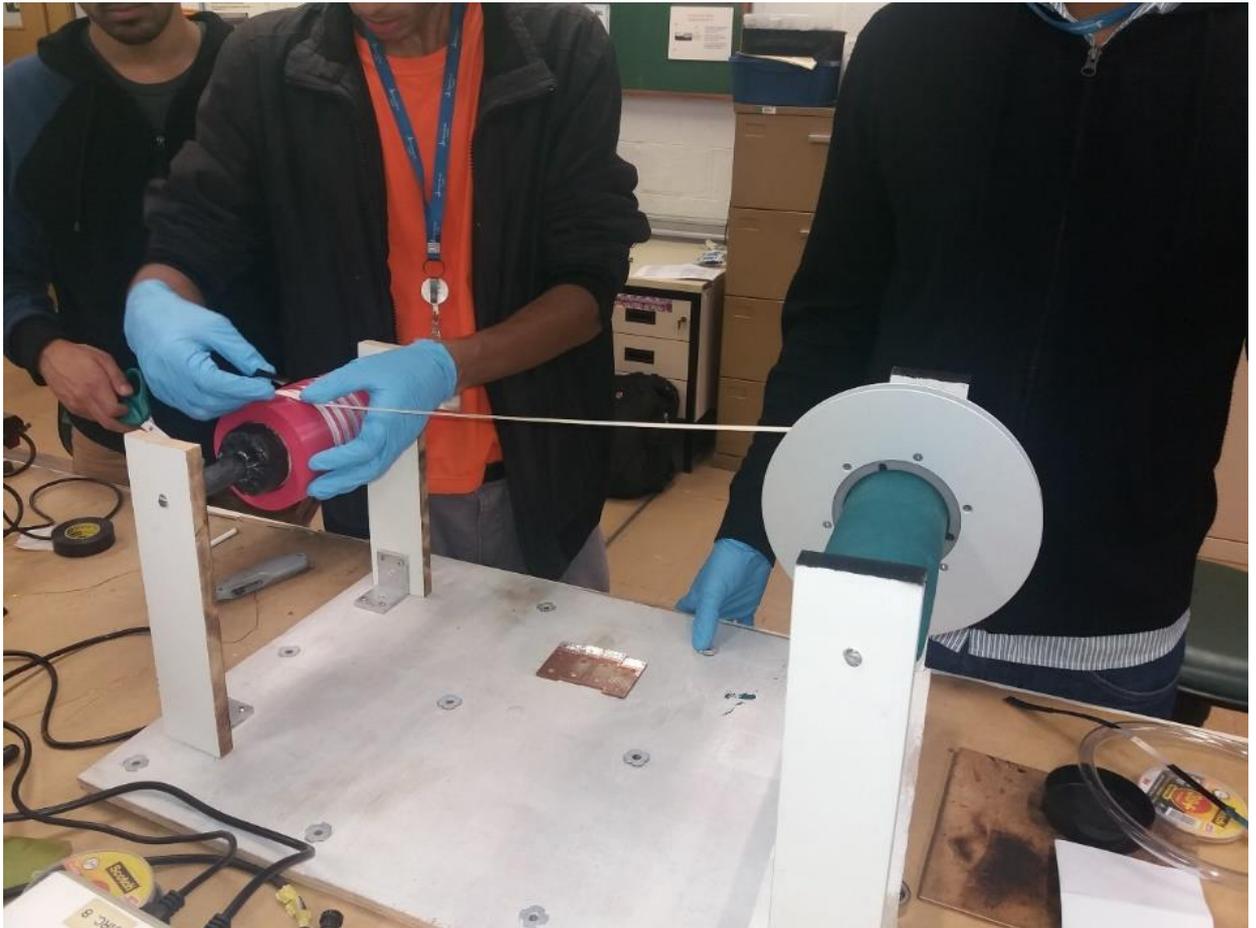
Assim, o esquema de montagem e dos contatos se mostraram satisfatórios para a construção do limitador modular.

### 3.5 Construção do LCSR modular

Após a confecção das bases do limitador, em PLA, estas foram submetidos a ciclos térmicos, para saber se o material não teria danos permanentes que inviabilizaria os ensaios.

O material mostrou rápida troca de calor, atingindo equilíbrio térmico com o nitrogênio líquido rapidamente. O retorno para a temperatura normal também foi curto, em poucos minutos, e quase não apresentou danos.

Uma mesa foi montada para o enrolamento, como mostra a **Figura 3.25**. O processo foi feito sempre com duas pessoas e com o uso de luvas, para não danificar o material supercondutor durante o processo.



**Figura 3.25 ± Mesa de enrolamento para bases supercondutoras**

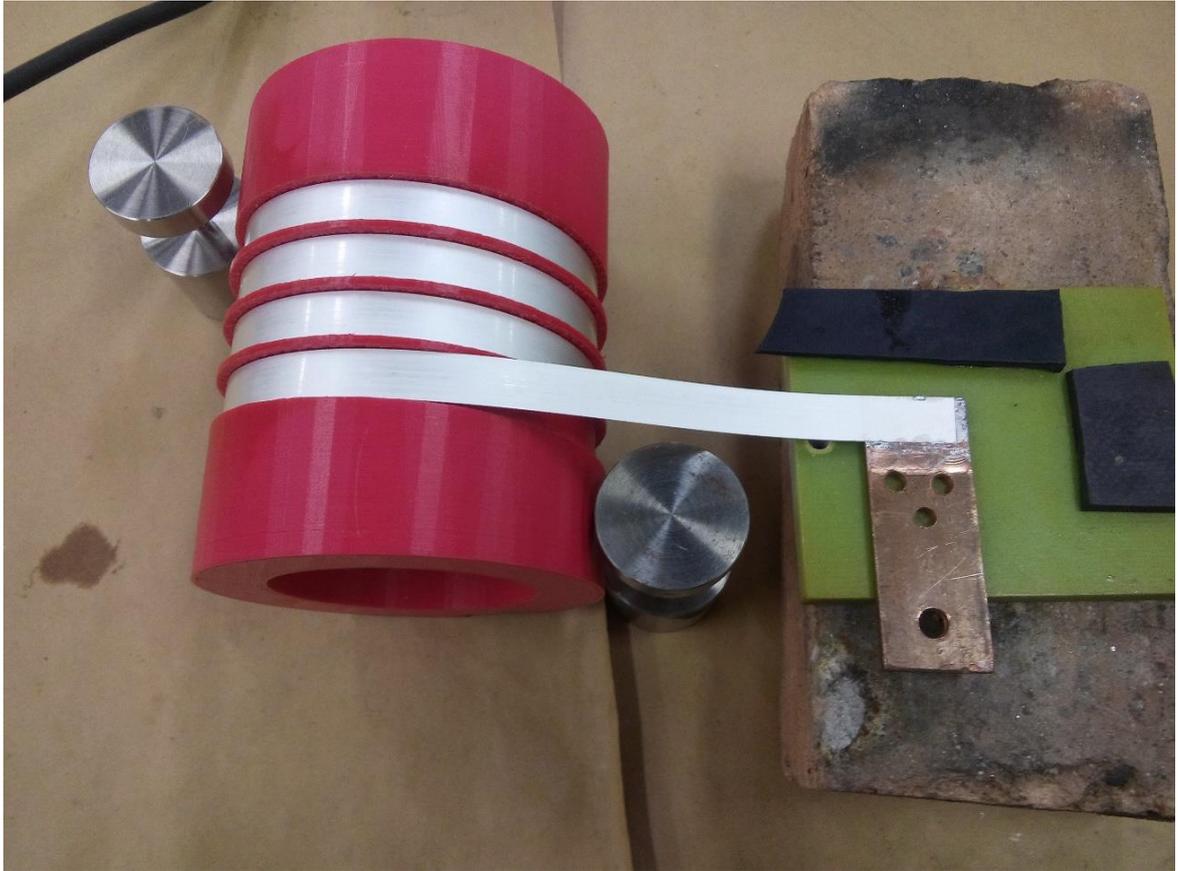
Em cada base, foi feito o primeiro enrolamento, com o lado supercondutor voltado para a superfície da base. Então, o enrolamento foi travado para soldar o primeiro par de contatos. Como apresentado na **Figura 3.26**, esta solda seria feita com o equipamento usado nas amostras.

Não foi possível utilizar o forno para manter a temperatura a 200 °C. Por isso, foi utilizado o soprador térmico. Após o tempo necessário para a solda atingir a temperatura de fusão, a máquina de tração foi acionada para aplicar a pressão desejada.



**Figura 3.26 ± Processo de soldagem**

O processo de soldagem foi realizado com sucesso, no que se refere a qualidade mecânica da solda. Entretanto, o posicionamento dos terminais em relação a fita não ficou perfeito, levando a modificações nesta etapa de construção. Por isso, todas as tentativas fracassaram, e por consequência o primeiro enrolamento foi perdido. Por essa razão, houve uma mudança no processo de solda, a pressão foi aplicada manualmente pelo soprador térmico até a fusão da solda, como mostra a **Figura 3.27**.



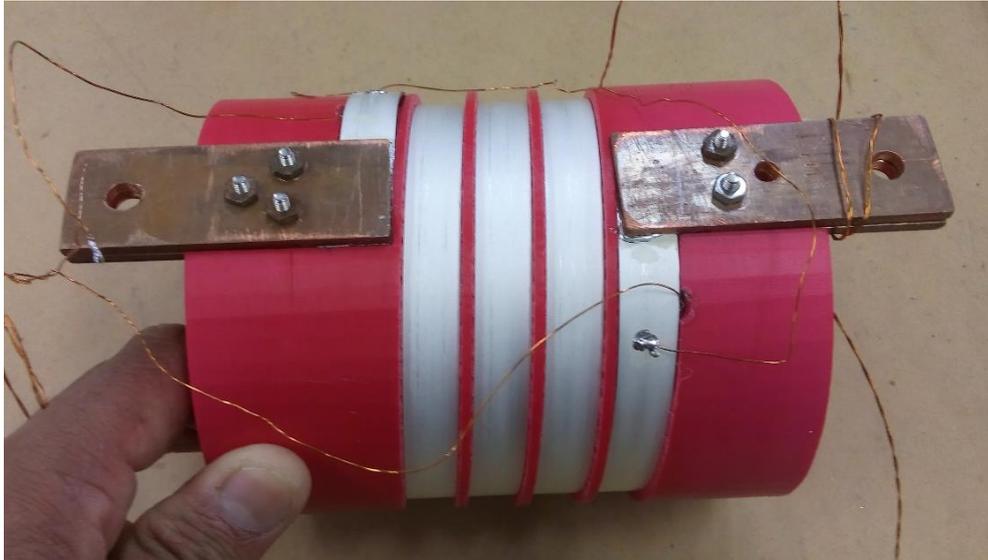
**Figura 3.27 ± Preparação para soldagem com pressão manual**

O principal problema após se adotar este procedimento é gerar uma solda com baixa resistência mecânica. Isto pode levar a sua danificação após alguns ciclos térmicos com o nitrogênio. Entretanto, a pressão manual aplicada foi suficiente para garantir um contato resistente.

Com as mudanças no processo, foi realizado novamente o primeiro enrolamento, sendo este travado para soldagem do primeiro par de terminais. Com o lado supercondutor da fita agora oposto à superfície da base, o segundo enrolamento foi feito, e, depois de travado, o outro par de terminais foi soldado.

Na extremidade de cada base, os terminais foram aparafusados, de modo a garantir a conexão elétrica e a divisão de corrente entre as fitas supercondutoras em paralelo.

Por fim, cada componente estava devidamente montado para os ensaios individuais. As figuras 3.29 e 3.30 mostram a vista lateral do componente interno e de topo do LCSR modular, respectivamente.



**Figura 3.28 ± Componente limitador CLi montado com terminais de tensão**



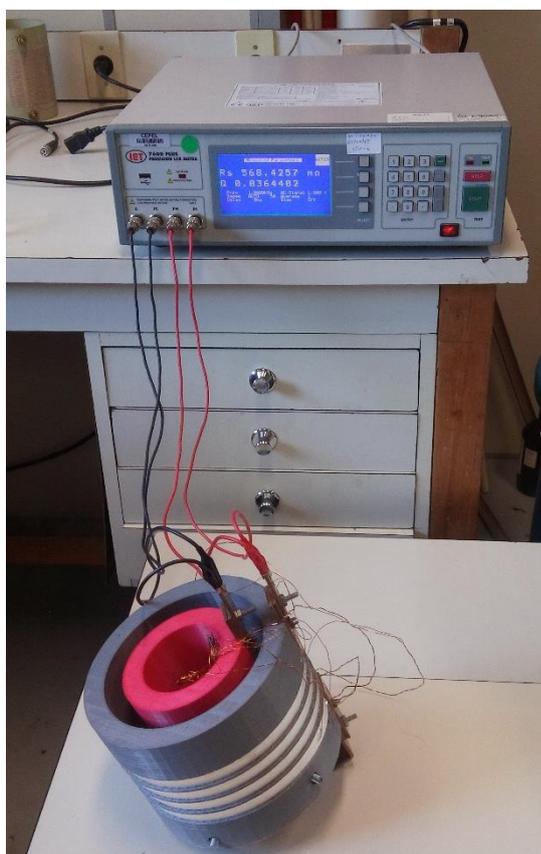
**Figura 3.29 ± LCSR modular completo visto de cima**

## 4 Procedimento Experimental dos Ensaio Aplicados ao Módulo

Nesta seção está descrito o procedimento experimental para realização dos ensaios aplicados junto ao LCSR modular e seus componentes.

### 4.1 Medição de parâmetros

Para medição da indutância e da resistência do módulo (onde a parcela dominante é a resistência dos contatos) no estado supercondutor, foi utilizada uma ponte de medição calibrada, na frequência de 1000 Hz, modelo IET 7600, como mostra a **Figura 4.1**.



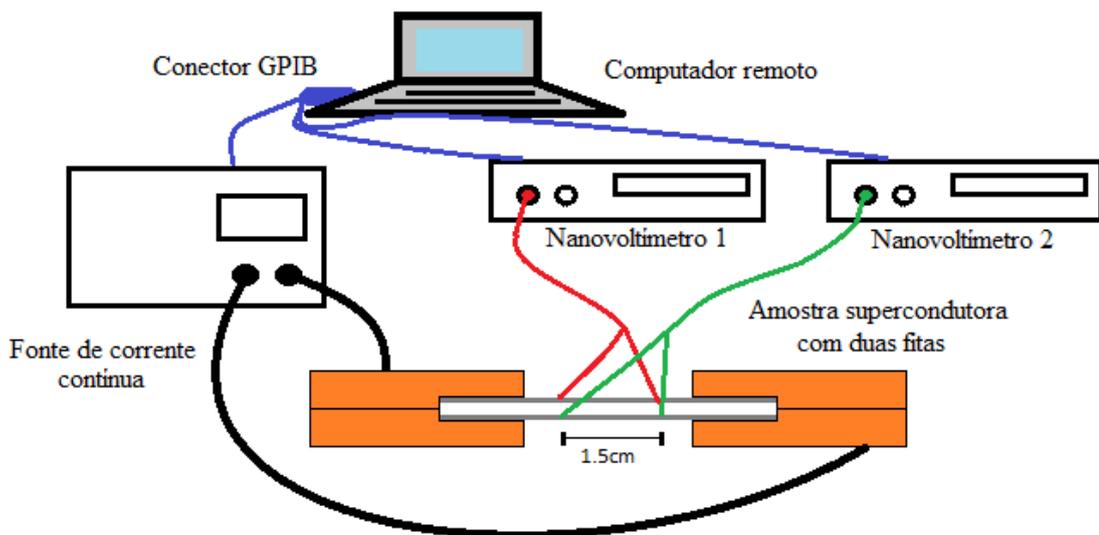
**Figura 4.1 ± Esquema de medição de parâmetros com ponte de medição calibrada**

Este equipamento pode ser utilizado para medir diversos parâmetros a partir da tensão e da corrente lidos no objeto de ensaio, tais como indutância, resistência, entre outros.

As medições desses parâmetros no limitador foram feitas pelo método das quatro pontas. Com o LCSR imerso em nitrogênio líquido foram aplicadas correntes na frequência de 1 kHz e medidas a indutância e a resistência (relativa a todos os contatos das conexões).

#### 4.2 Caracterização simultânea

Este processo foi realizado para caracterização de cada componente limitador (CL) do LCSR. Para cada unidade, as leituras de tensão da fita interna e externa do enrolamento foram feitas por nanovoltímetros distintos, modelo Keithley 2182A, como mostra o esquema da **Figura 4.2**.

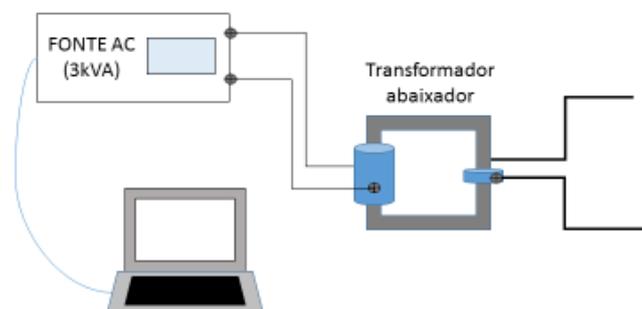


**Figura 4.2 ± Esquema de caracterização simultânea para fitas supercondutoras distintas**

Com a medição a quatro pontas foram injetados pulsos de corrente, com duração de 400 ms, através de uma fonte CC controlada modelo Argantix KDC 30500. Durante cada pulso, medidas de tensão foram adquiridas dos nanovoltímetros. Na superação do critério de tensão crítica,  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  ( $100 \mu\text{V}/\text{m}$ ), em uma das medidas na amostra supercondutora, o ensaio foi interrompido e a corrente crítica ( $I_c$ ) foi estabelecida.

### 4.3 Ensaios de desempenho

Nos ensaios de desempenho, em corrente alternada, o circuito base foi composto por uma fonte de tensão programável, modelo Chorma 6530, com máxima tensão de 300 V e potência de 3 kVA, alimentando um transformador abaixador, com relação variável, como mostra a **Figura 4.3**. Nesta configuração, foi possível alcançar até 2 kA de corrente para realizar os ensaios de curto-circuito, bem como trabalhar com níveis desejáveis de tensão sem submeter a fonte à altas correntes.



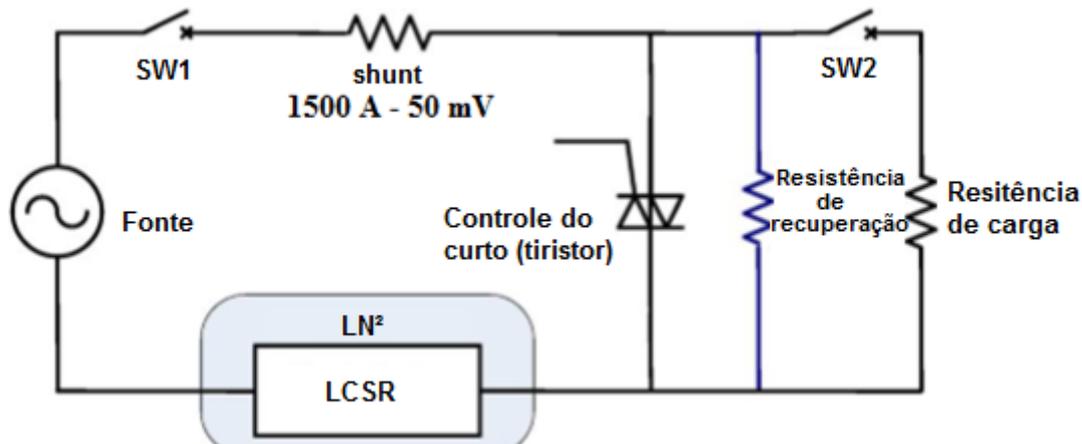
**Figura 4.3 ± Sistema experimental base**

Foram realizados os ensaios de curto-circuito, para verificar o nível de limitação do LCSR modular e de cada componente, e o ensaio de tempo de recuperação, destinado a verificar se o limitador é capaz de voltar ao estado supercondutor após um curto em tempo significativo.

#### 4.3.1 Ensaio de curto-circuito

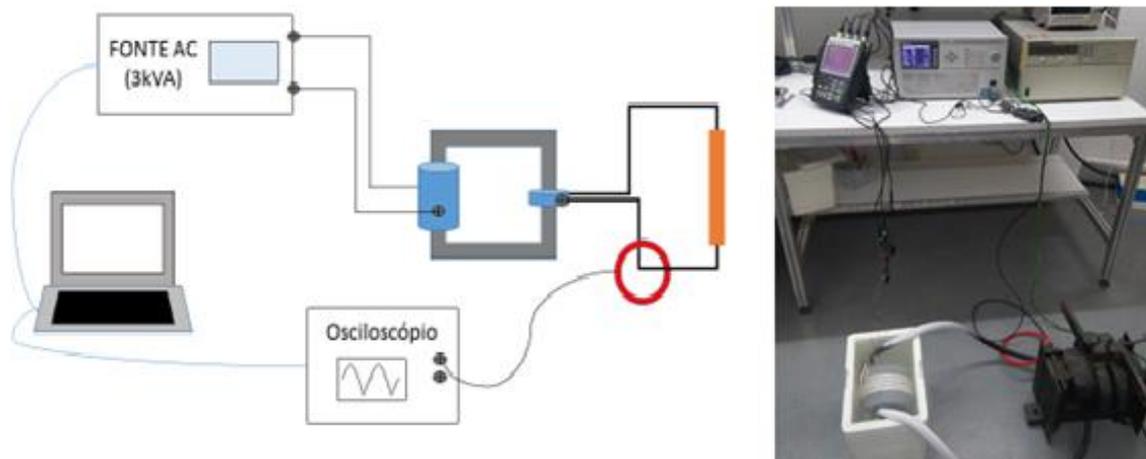
O curto-circuito realizado neste ensaio teve ângulo de fase  $0^{\circ}$ , por não se ter este tipo de controle disponível na fonte. Ainda assim, foi possível avaliar o nível de limitação do limitador em regime permanente de curto.

Em procedimentos experimentais para ensaios de curto, é comum o uso de tiristores, chaves de abertura rápida e shunts para medição de corrente [25]. O esquema da Figura 4.4 apresenta um exemplo de configuração utilizada [17].



**Figura 4.4 ± Visão geral de um esquema de ensaio de curto-circuito**

A aplicação dos diversos níveis de corrente foi feita pelo controle da fonte AC que possui chaveamento interno, e possibilita no mínimo um ciclo de tensão fornecida ao sistema. No ensaio, a corrente de curto foi programada para durar 3 ciclos, em 60 Hz (50 ms). Com o auxílio de um amperímetro alicate, próprio para correntes entre 300 A e 3.000 A, foi coletada a corrente no secundário correspondente a cada valor de tensão injetada pela fonte no primário do transformador, de acordo como o esquema apresentado na **Figura 4.5**.



**Figura 4.5 ± Esquema experimental para aplicação do curto-circuito**

A **Tabela 4.1** apresenta os níveis de corrente presumida alcançados em função da tensão no primário do transformador.

**Tabela 4.1 ± Níveis de curto-circuito (pico) obtidos para o arranjo experimental**

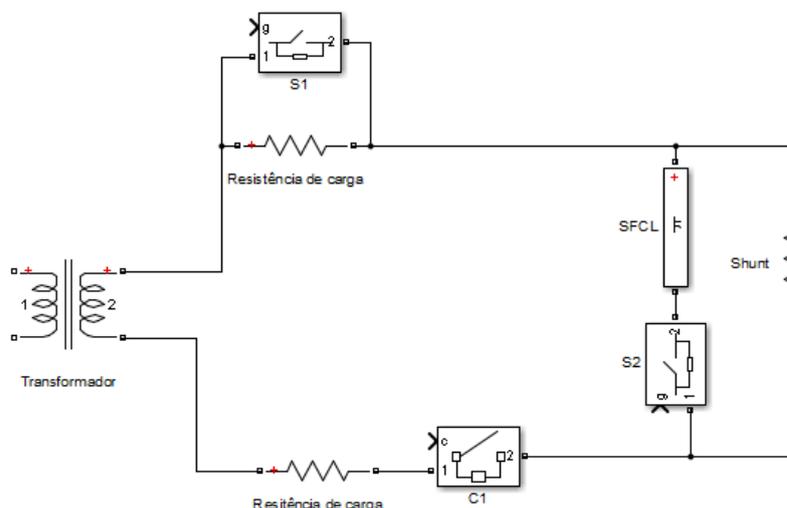
<b>TENSÃO NO PRIMÁRIO [V]</b>	<b>CORRENTE DE PICO MÁXIMO DE CURTO NO SECUNDÁRIO [A]</b>
10	120,4
20	251,5
50	754,5
100	1353,3
120	1616,8
140	1796,4
160	2095,8
180	2275,5
200	2694,6
220	2814,4
240	2874,3
260	3053,9
280	3293,4
300	3473,1

Este ensaio foi aplicado via software, implementado em Matlab. Os formatos de onda da corrente foram capturados através do trigger do osciloscópio e enviados para o computador remoto via software próprio. Os dados foram importados em formato padrão em arquivos de planilha e então lidos pelo software desenvolvido em Matlab.

#### **4.3.2 Ensaio de tempo de recuperação**

O limitador resistivo requer um certo período de tempo para recuperar o estado supercondutor após o *quench*. Este tempo de recuperação é um dos mais importantes aspectos do limitador resistivo e é crucial para o sucesso de sua aplicação na rede.

Vários métodos para ensaio de recuperação estão sendo desenvolvidos. Em um deles [19], é proposto o circuito mostrado na **Figura 4.6**.



**Figura 4.6 ± Circuito experimental para ensaio de tempo de recuperação em limitadores**

Neste circuito, a tensão é provida por um transformador abaixador, S1 e S2 são chaves rápidas e C1 é um interruptor. De modo geral, começa-se aplicando corrente nominal no dispositivo. Em seguida, aplica-se o curto pelo tempo desejado. Então, interrompe-se o curto, e espera-se um tempo até aplicação da corrente nominal para verificar se o dispositivo ainda opera normalmente. A sequência de ensaios para tempo de recuperação, em ensaios de carga, é feita do seguinte modo:

- x C1 fechado, S1 aberto e S2 fechado – corrente nominal operando;
- x C1 fechado, S1 fechado e S2 fechado – início do curto;
- x C1 aberto, S1 fechado e S2 fechado – interrupção do curto;
- x Tempo de espera  $T_e$ ;
- x C1 fechado, S1 aberto e S2 fechado – corrente nominal operando novamente.

Após este processo, foi verificado o comportamento do limitador para ver se este voltou ao estado supercondutor ou não (verificação da tensão). Em caso de a tensão exceder  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  após o processo, o tempo de recuperação não foi o suficiente e o

limitador foi reprovado no ensaio. Então o processo é feito aumentando o tempo de espera  $t_e$ .

Devido as características da fonte de rápida resposta, o mesmo circuito utilizado para aplicação do curto foi utilizado aqui. Através de controle por software, foram aplicados os seguintes níveis de tensão:

- x  $V1$  – tensão correspondente a um valor de corrente de operação nominal;
- x  $V2$  – tensão correspondente ao valor de curto, por 5 ciclos;
- x  $V0 = 0\text{ V}$ , durante o tempo  $T_e$ ;
- x  $V1$  – aplicada novamente para verificar se o limitador voltou ao estado supercondutor ou não.

## 5 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios aplicados ao CLi e ao CLe, e ao LCSR modular, que será referido nas figuras como LM.

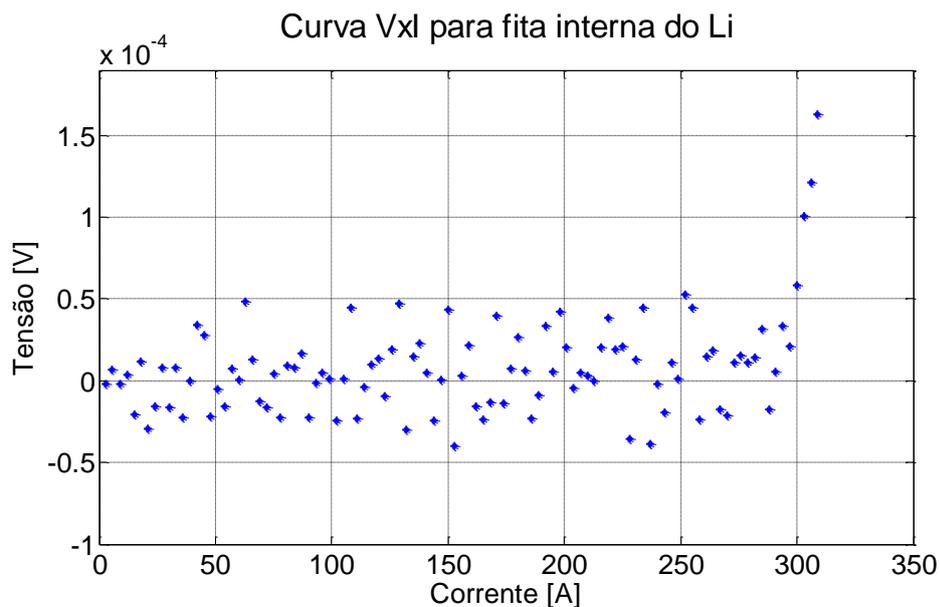
### 5.1 Caracterização

A caracterização de cada componente limitador é importante para determinar a  $I_c$  do conjunto, uma vez que estes serão conectados em série no arranjo final.

#### 5.1.1 Caracterização do componente limitador interno CLi

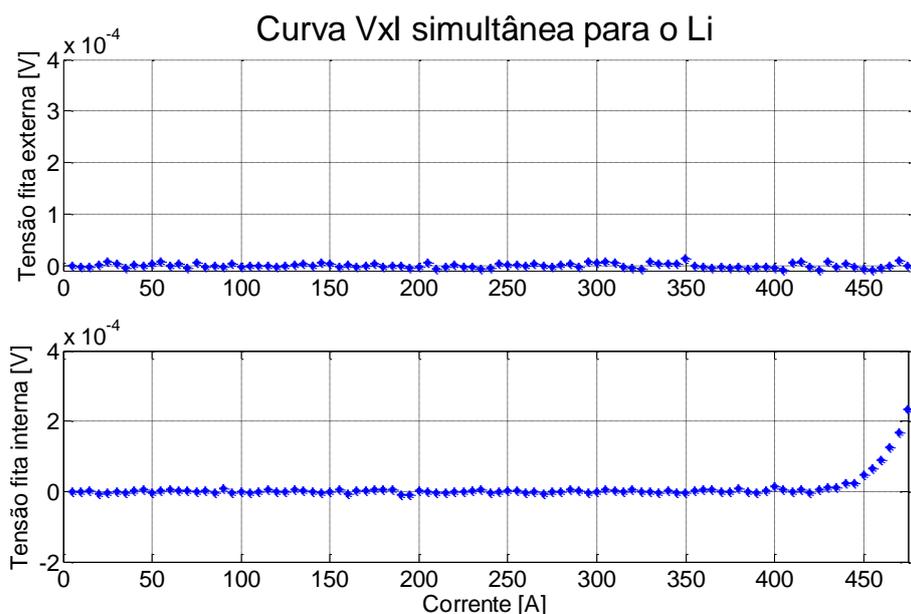
Primeiro, foi feita a caracterização do enrolamento interno do CLi. Este ensaio foi feito ainda no processo de montagem, como medida de segurança. Após o primeiro enrolamento, a peça foi totalmente mergulhada em nitrogênio, sendo este o terceiro ciclo térmico da base em PLA do CLi (o segundo ciclo térmico foi na mesma medida com o enrolamento danificado após a tentativa de uso da máquina de compressão).

A tensão foi medida ao longo da fita, com um tamanho de aproximadamente 1,3 m, ficando a tensão crítica igual a 130  $\mu\text{V}$ . O resultado da caracterização do primeiro enrolamento não mostrou nenhuma queda de  $I_c$  em relação a especificação da fita, como mostrado na **Figura 5.1**.



**Figura 5.1 ± Curva Vxl sobre 1,3 m de fita supercondutora do enrolamento interno do CLi**

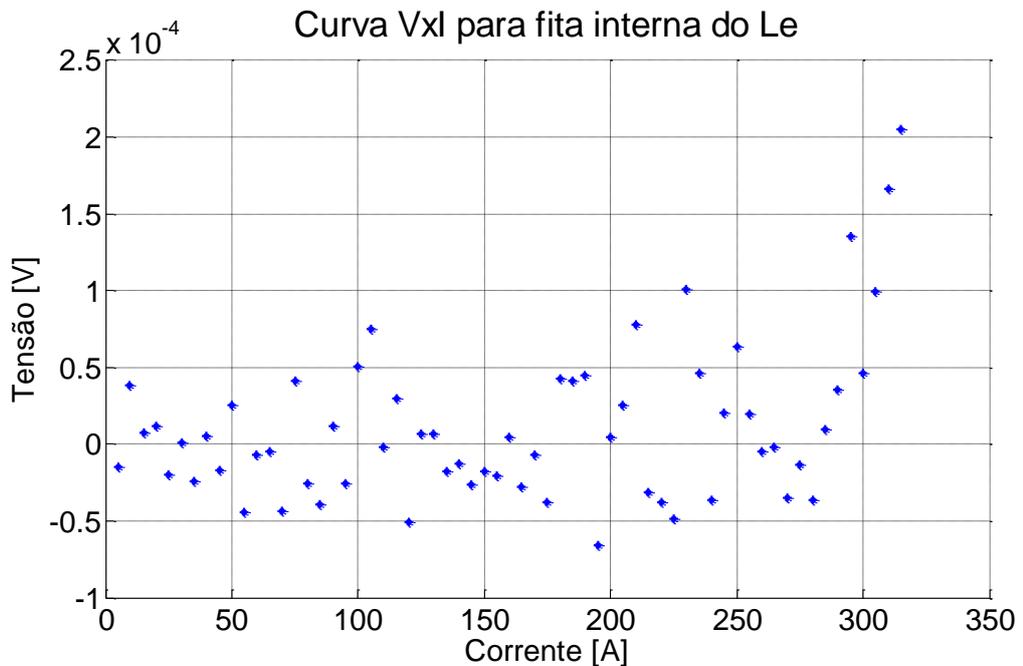
Após o enrolamento da segunda fita, a curva Vxl das duas fitas em paralelo foi medida segundo o processo de caracterização simultânea apresentado na seção 4.2, página 65. Como a divisão de corrente no arranjo não foi ideal então a transição ocorreu primeiro na fita interna, como mostra a figura 5.2. Assim, a corrente crítica do CLi foi definida pelo valor de transição dessa fita em 480 A, que é um valor razoável para a construção do módulo.



**Figura 5.2 ± Curva Vxl simultânea sobre 1,3 m em cada fita do enrolamento do CLi**

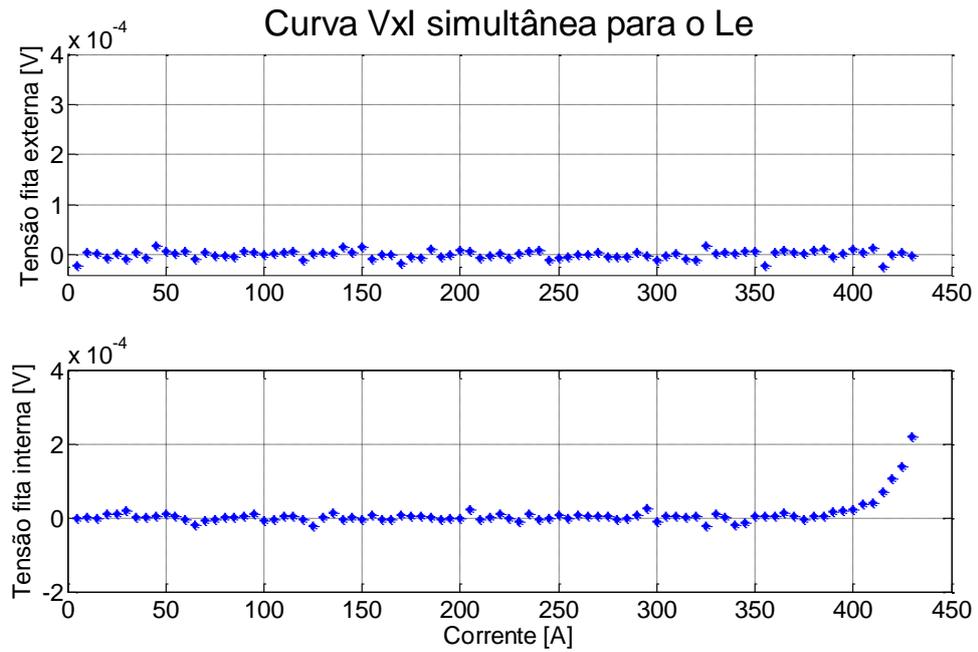
### 5.1.2 Caracterização do componente limitador externo CLe

A curva  $V_{xl}$  da primeira fita enrolada no CLe foi feita com o componente ainda em construção. Entretanto, nesse ensaio a base em PLA sofreu seu segundo ciclo térmico, como mostra a figura 5.3.



**Figura 5.3 ± Curva  $V_{xl}$  sobre 2,0 m de fita supercondutora do enrolamento interno do CLe**

Após o segundo enrolamento, foi tomada a medida simultânea das curvas  $V_{xl}$  das fitas do CLe. Como mostra o resultado da **Figura 5.4**, a fita interna transitou primeiro, definindo a  $I_c$  em torno de 430 A. A distribuição de corrente nas fitas não foi tão boa quanto no CLi, mas ainda assim foi razoável para a construção do módulo.



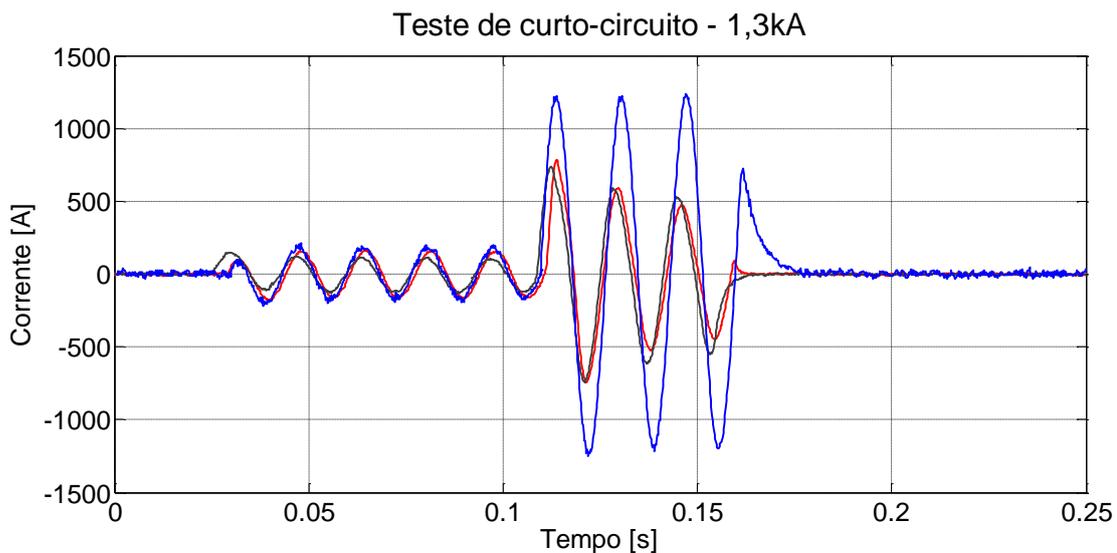
**Figura 5.4 ± Curva Vxl simultânea sobre 2,0 m em cada fita do enrolamento do CLe**

Concluídos os ensaios de caracterização, a  $I_c$  do LCSR modular ficou definida como 430 A, que foi a menor  $I_c$  dos dois componentes. Para atender a uma margem segura de operação (entre 1/2 e 2/3 da  $I_c$  para dispositivos supercondutores), a corrente nominal deste módulo ficou definida em 287 A (RMS).

## 5.2 Ensaio de limitação – componentes limitadores

Os ensaios de limitação foram aplicados para níveis de corrente ao menos duas vezes maiores que o valor da  $I_c$ .

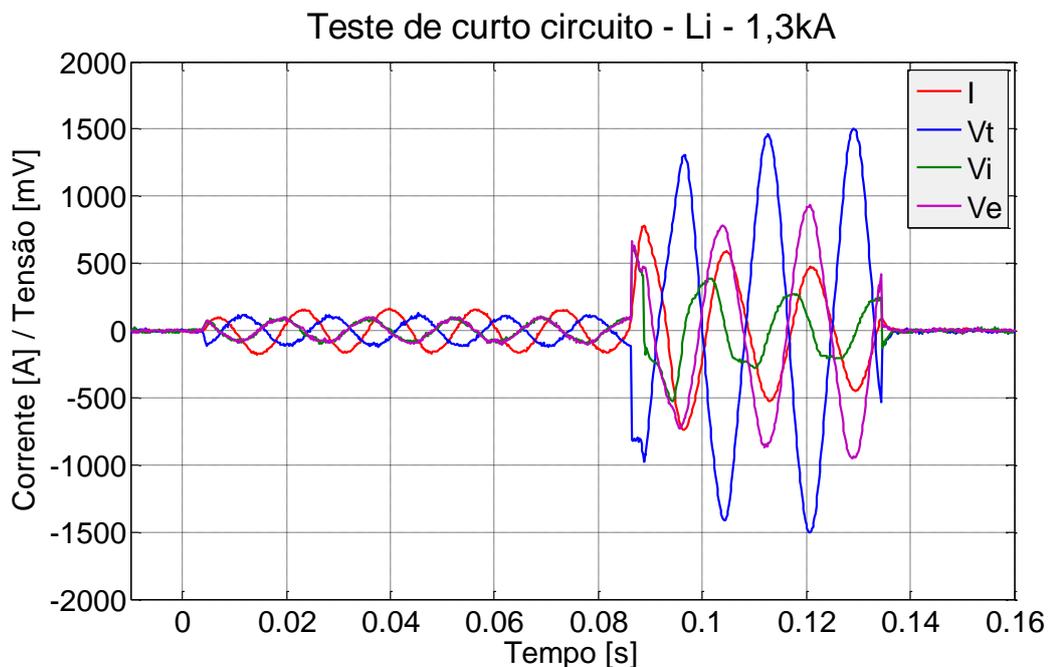
Para ambos os limitadores, com corrente presumida de 1,3 kA, a corrente de pico foi limitada em aproximadamente 40% no primeiro semi-ciclo, chegando a um nível de limitação de 2,2 vezes no quinto semi-ciclo, como mostra a figura 5.5.



**Figura 5.5 ± Ensaio de limitação de corrente de curto-circuito a nível de 1,3 kA**

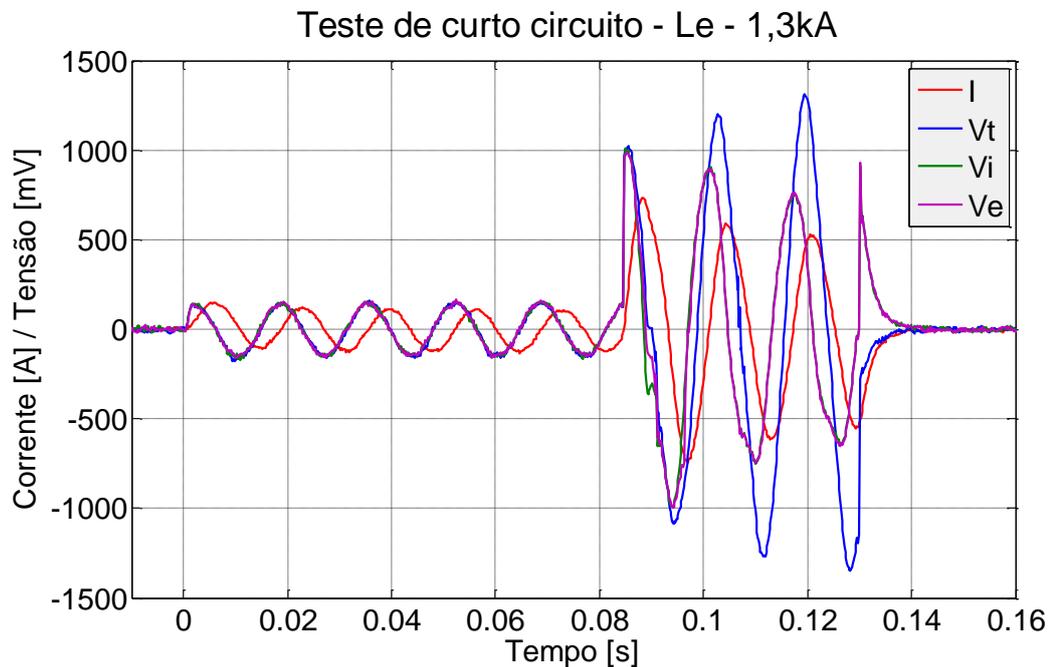
A seguir, são apresentados os resultados para cada CL, incluindo os valores de tensão para as fitas interna ( $V_i$ ) e externa ( $V_e$ ), bem como a tensão total sobre os terminais ( $V_t$ ).

O CLi apresentou as tensões para as fitas interna e externa diferentes. A tensão da fita externa foi maior, indicando que esta pode ter transitado primeiro, conforme mostrado na **Figura 5.6**.



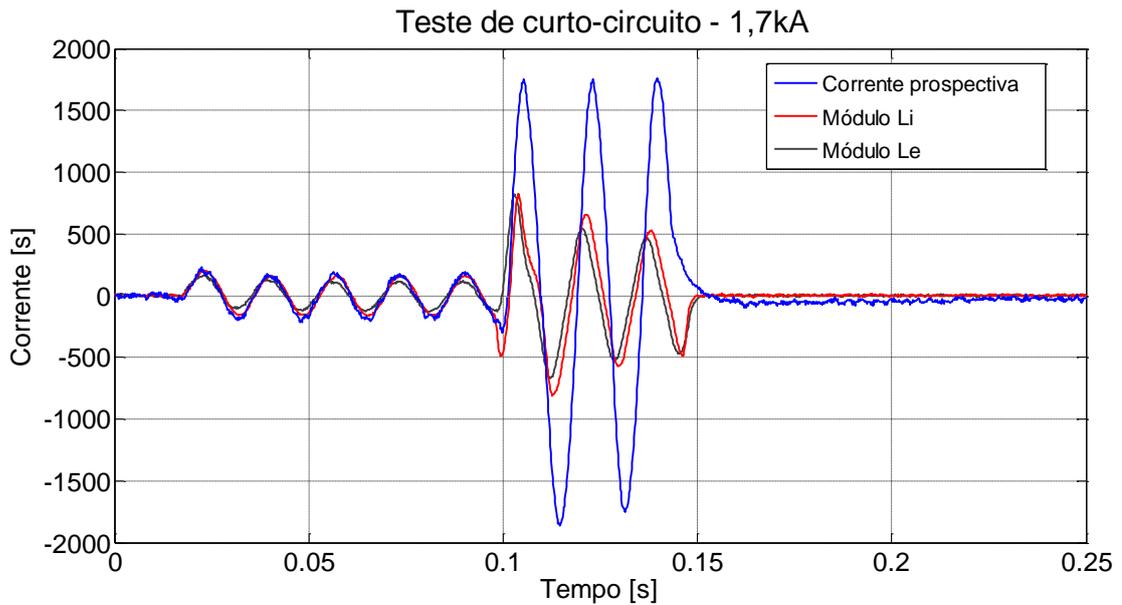
**Figura 5.6 ± Níveis de tensão no CLi no ensaio de limitação de 1,3 kA**

O CLe apresentou as tensões nas fitas interna e externa em fase, e com mesma amplitude, como pode ser visto na Figura 5.7.



**Figura 5.7 ± Níveis de tensão no CLe no ensaio de limitação de 1,3 kA**

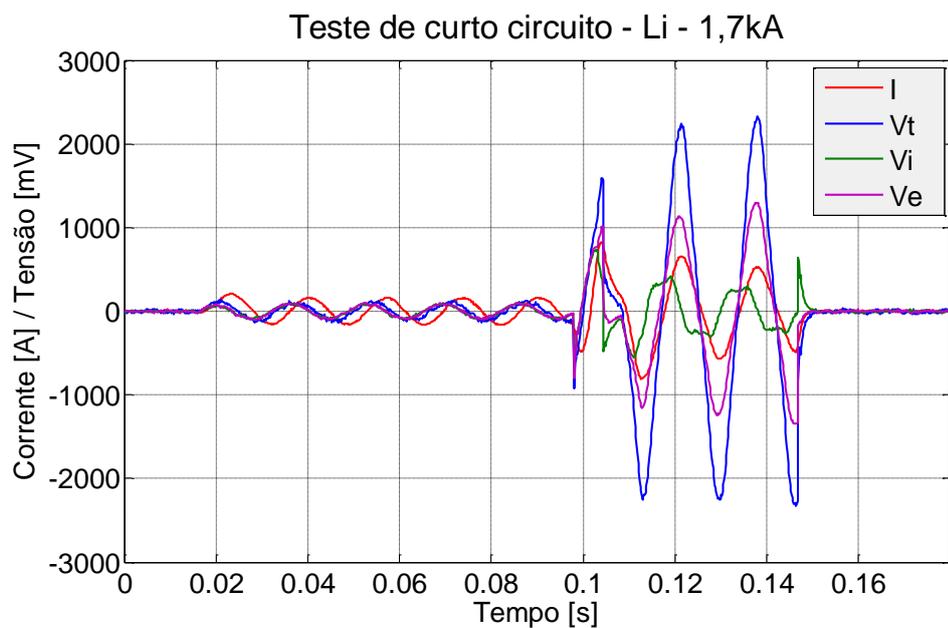
Para corrente presumida de 1,7 kA, ambos componentes apresentaram aproximadamente 53% de limitação na corrente de pico no primeiro semi-ciclo, chegando a um nível de limitação de 3,3 vezes no quinto semi-ciclo, como mostra a figura 5.8.



**Figura 5.8 ± Ensaio de limitação de corrente de curto-circuito a nível de 1,7 kA**

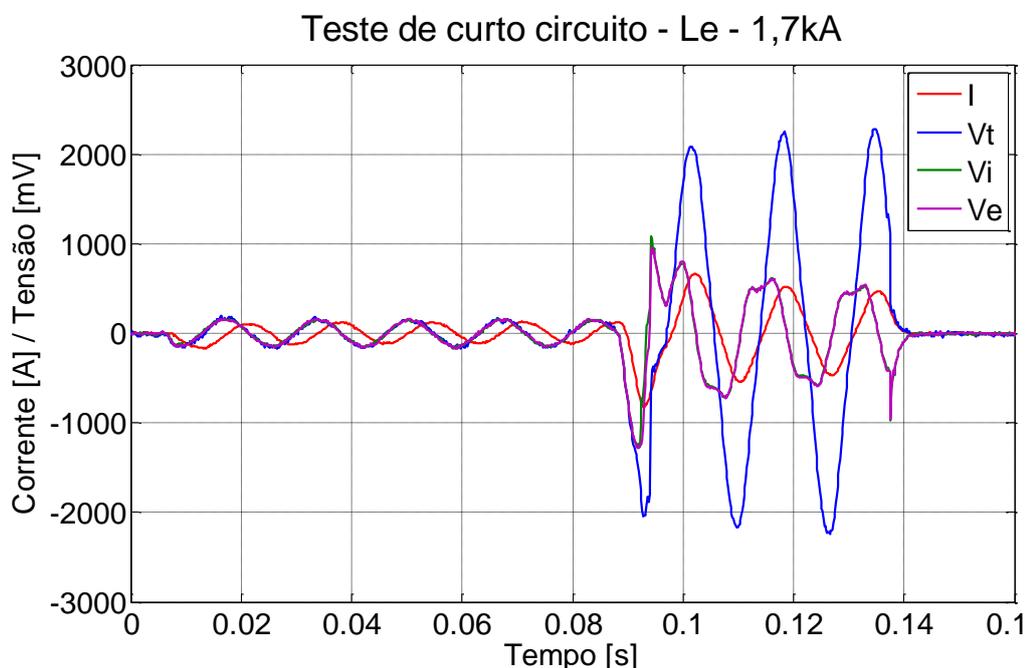
Para esse caso, também foram realizadas as medidas das tensões durante a limitação de cada CL, como será apresentado a seguir.

Como mostra a **Figura 5.9**, a tensão na fita interna continua menor que a tensão na fita externa, o que corrobora a idéia da transição da fita externa primeiro, estando esta tensão em fase com a tensão total.



**Figura 5.9 ± Níveis de tensão no CLi no ensaio de limitação de 1,7 kA**

A **Figura 5.10** apresenta o ensaio para o CLe, onde os níveis de tensão das fitas interna e externa foram iguais, mas aparentemente não transitaram totalmente para o estado normal.



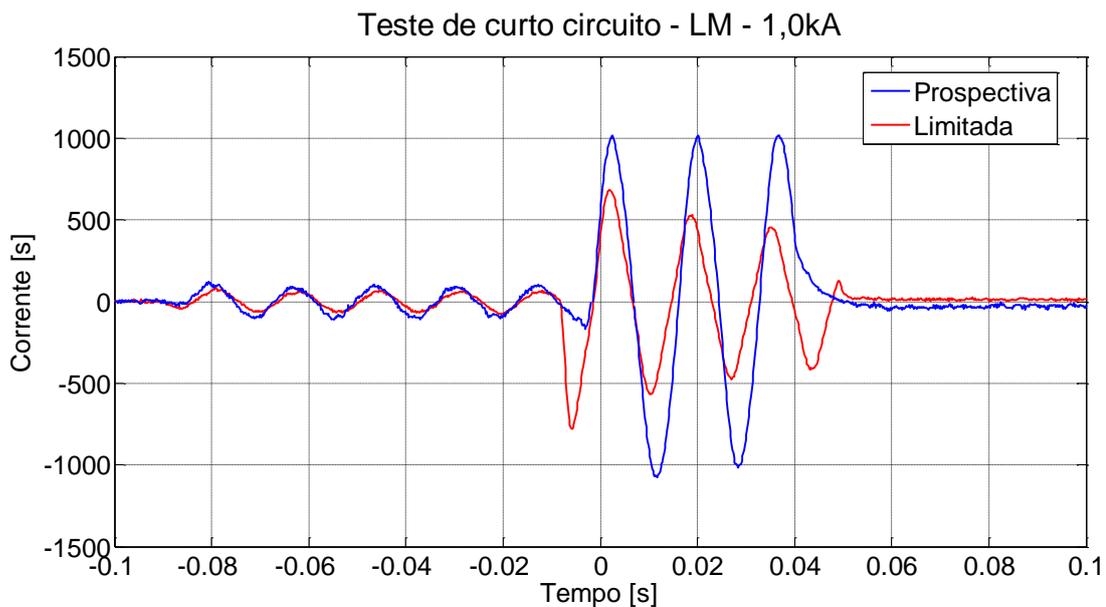
**Figura 5.10 ± Níveis de tensão no CLe no ensaio de limitação de 1,7 kA**

### 5.3 Ensaio de limitação – LCSR modular

Para o ensaio de limitação no LCSR modular, os níveis de corrente de curto foram um pouco mais baixos que os níveis dos ensaios anteriores, isso em função do aumento da impedância dos contatos e da potência disponível para ensaio.

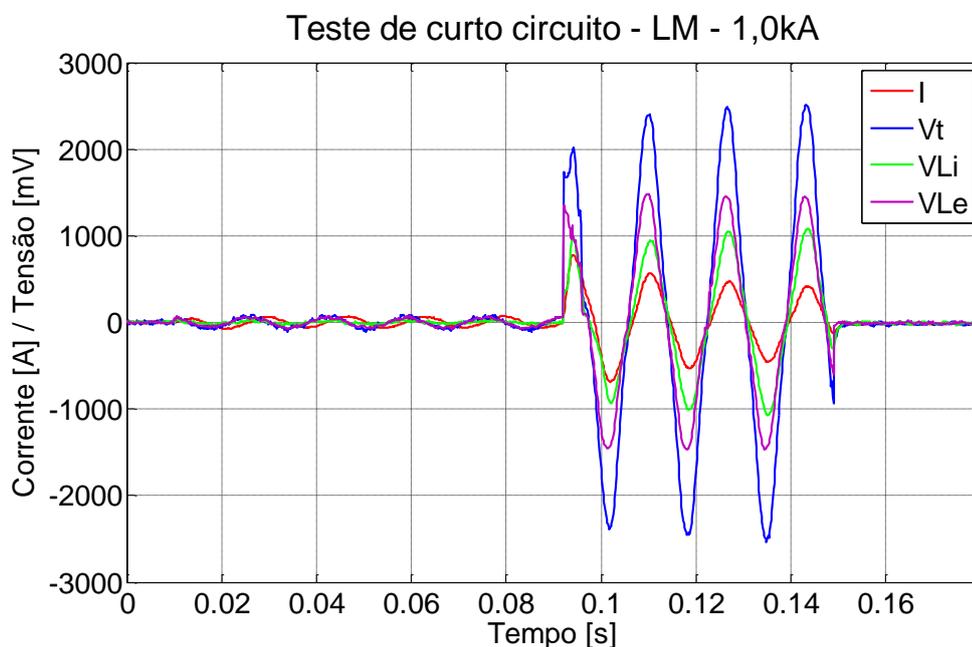
Os ensaios realizados ficaram com valores corrigidos de 1,0 kA e 1,5 kA de corrente prospectiva. Além da corrente limitada, foram tomadas a tensão total no LCSR modular ( $V_t$ ), e as tensões no CLi ( $V_{Li}$ ) e no CLe ( $V_{Le}$ ).

No ensaio de corrente prospectiva de 1,0 kA a corrente de pico foi limitada em aproximadamente 30% ao primeiro semi-ciclo, apresentando um nível de limitação de 2,2 vezes no quinto semi-ciclo, como apresentado na **Figura 5.11**.



**Figura 5.11 ± Ensaio de limitação de corrente de curto-circuito a nível de 1,0 kA no LM**

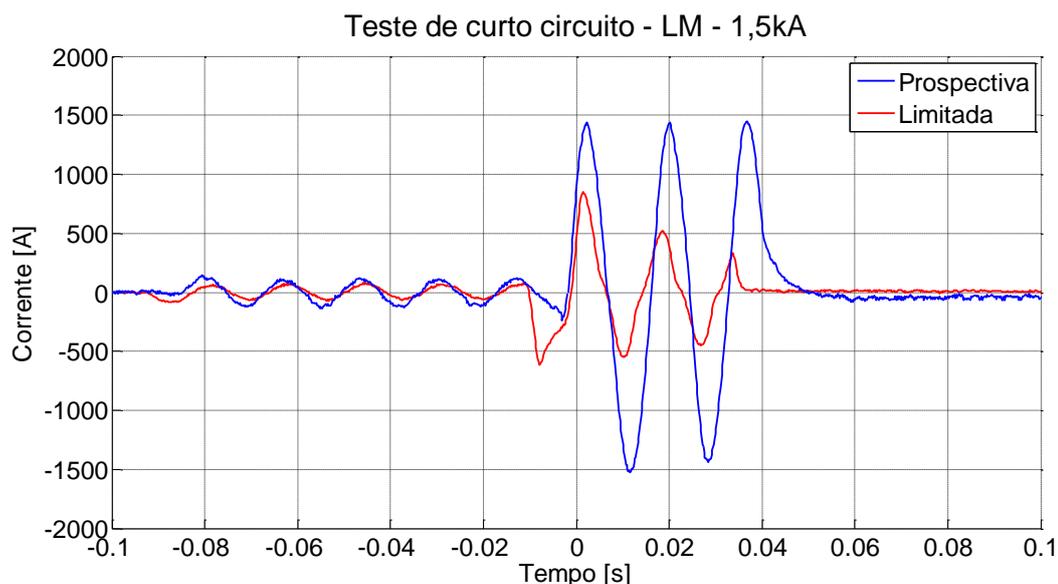
Os valores de tensão sobre o LCSR modular e seus componentes são apresentados na **Figura 5.12**, onde é possível ver a transição dos dois componentes, que ficaram completamente em fase com a corrente limitada.



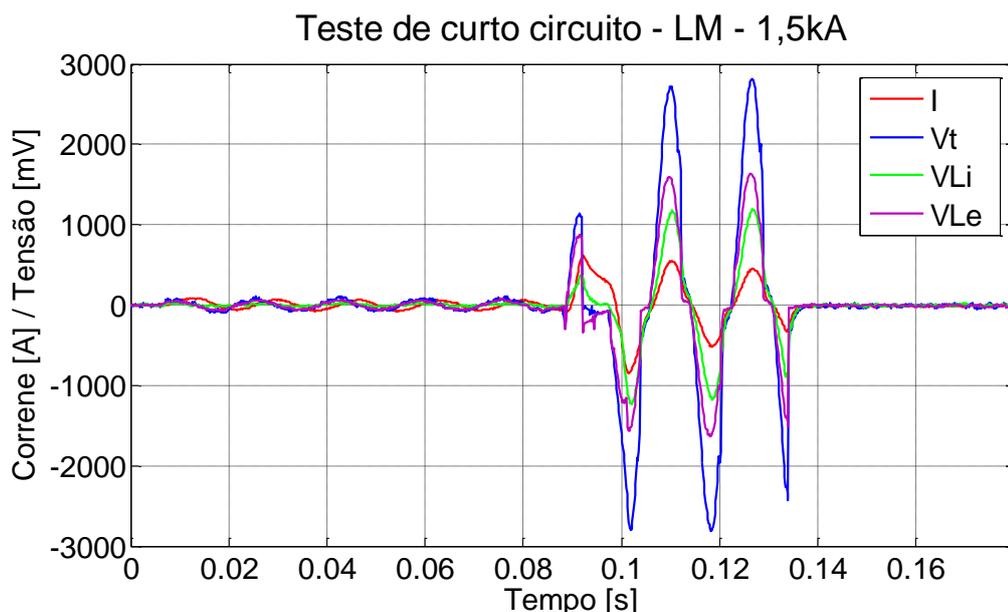
**Figura 5.12 ± Níveis de tensão no LM e seus componentes no ensaio de limitação de 1,0 kA**

No ensaio com 1,5 kA de corrente presumida, a corrente de pico foi limitada em 41% aproximadamente no primeiro semi-ciclo, chegando a um nível de limitação de 4,8 vezes no quinto semi-ciclo, como apresentado na **Figura 5.13**.

Os valores de tensão sobre o LM aumentaram significativamente neste ensaio, juntamente com as tensões sobre cada CL. Estes valores permaneceram em fase com a corrente limitada, como pode ser visto na **Figura 5.14**.



**Figura 5.13 ± Ensaio de limitação de corrente de curto-circuito a nível de 1,5 kA no LM**



**Figura 5.14 ± Níveis de tensão no LM e seus componentes no ensaio de limitação de 1,5 kA**

#### 5.4 Ensaio de tempo de recuperação – componentes limitadores

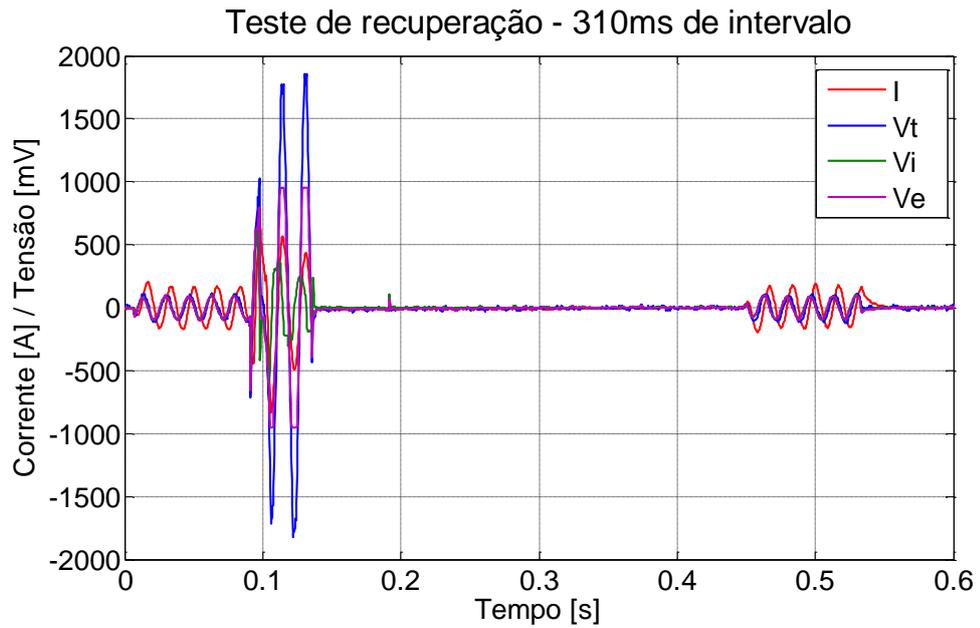
Assim como o ensaio de curto-circuito, o ensaio de tempo de recuperação foi aplicado em cada componente. Foram medidas a corrente e as mesmas tensões para o caso de curto.

O valor de referência para a corrente prospectiva foi de 1,5 kA nos componentes CLi e CLe. Então, o tempo de recuperação foi observado da seguinte forma:

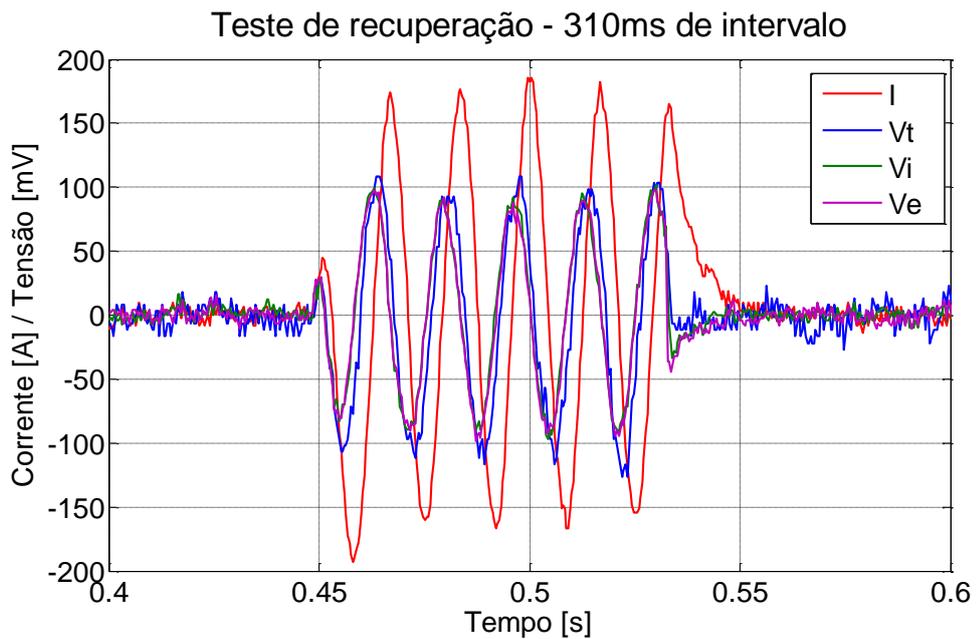
- x Em estado supercondutor, os enrolamentos possuem somente indutância (a parcela resistiva é muito pequena em comparação), então a corrente  $I$  está defasada da tensão total  $V_t$  por  $90^\circ$ ;
- x Em estado normal, como a parcela resistiva da impedância será muito mais alta, corrente e tensão estarão em fase;
- x Se, após o curto, no momento da aplicação de potência, para corrente nominal, a defasagem entre corrente e tensão não for  $90^\circ$ , o material não terá atingido o tempo de recuperação.

Os primeiros ensaios foram realizados com o CLi. Inicialmente, o ensaio de tempo de recuperação foi aplicado para um tempo de 1 segundo, decrescendo este valor até que a corrente nominal apresentasse defasagem diferente de  $90^\circ$ .

Como pode ser visto na **Figura 5.15** e na **Figura 5.16**, até o tempo de 310 ms, o material supercondutor do CLi apresentou recuperação completa, com tensão total,  $V_t$ , e corrente defasados de  $90^\circ$ , como no estado anterior a aplicação do curto.

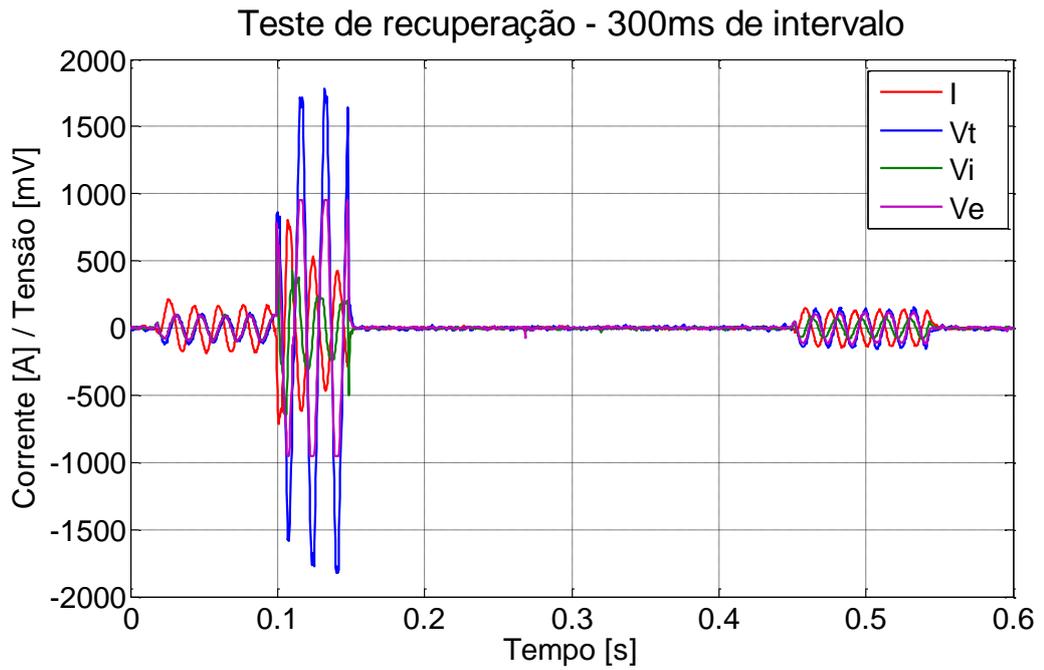


**Figura 5.15 ± Ensaio de recuperação do CLI com espera de 310 ms**

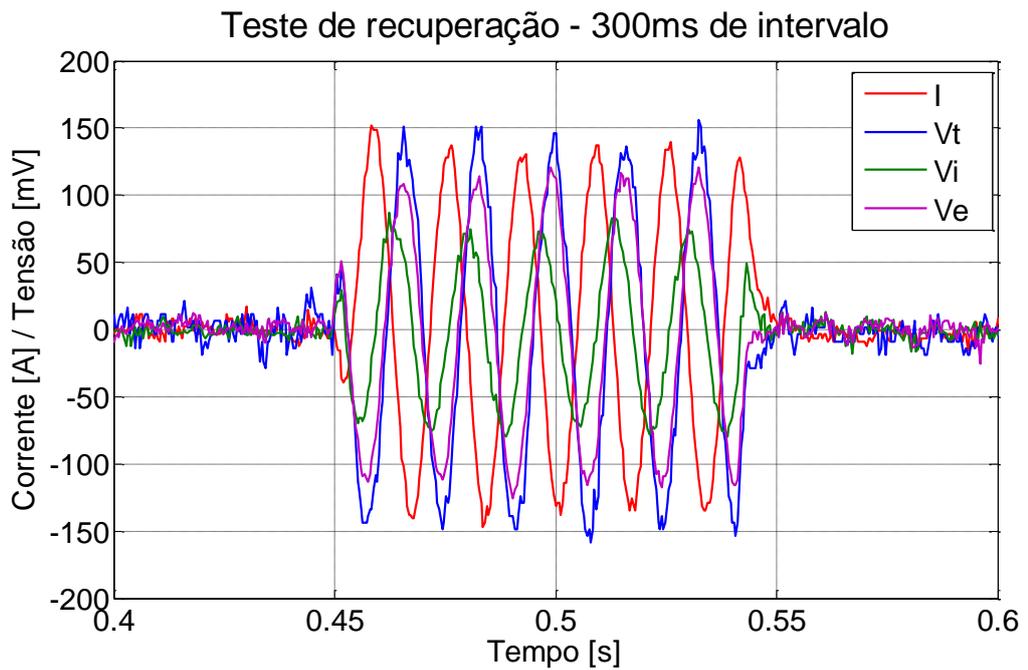


**Figura 5.16 ± Defasagem entre tensões e corrente 310 ms após a ocorrência de curto**

Porém, diminuindo este tempo para 300 ms, foi visto que o material não voltou para o estado supercondutor, como mostrado na **Figura 5.17** e na **Figura 5.18**.

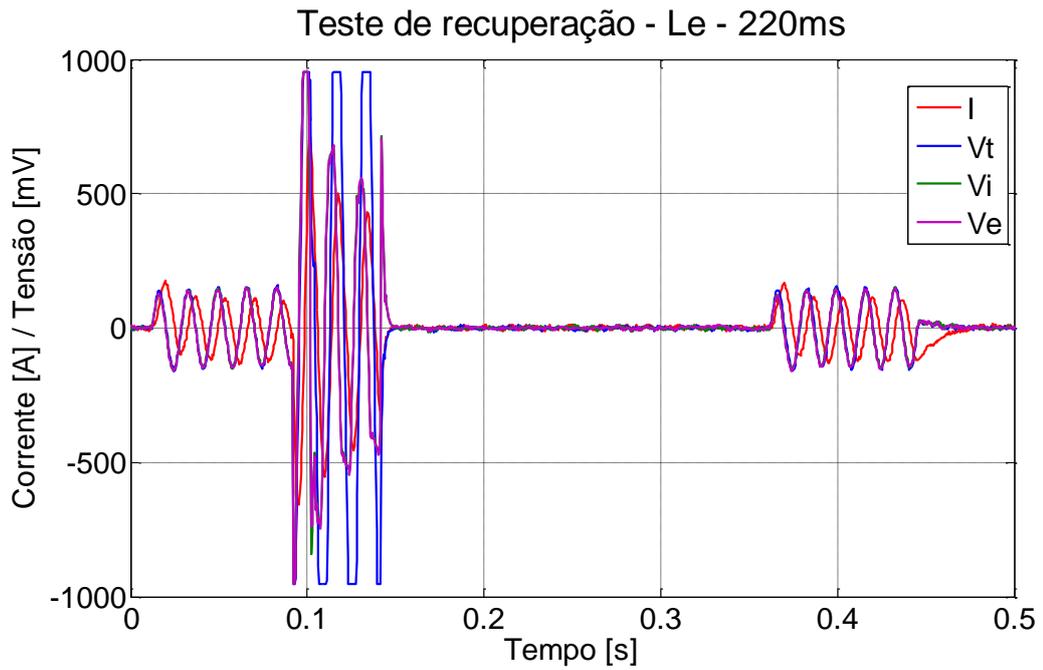


**Figura 5.17 ± Ensaio de recuperação do CLi com espera de 300 ms**

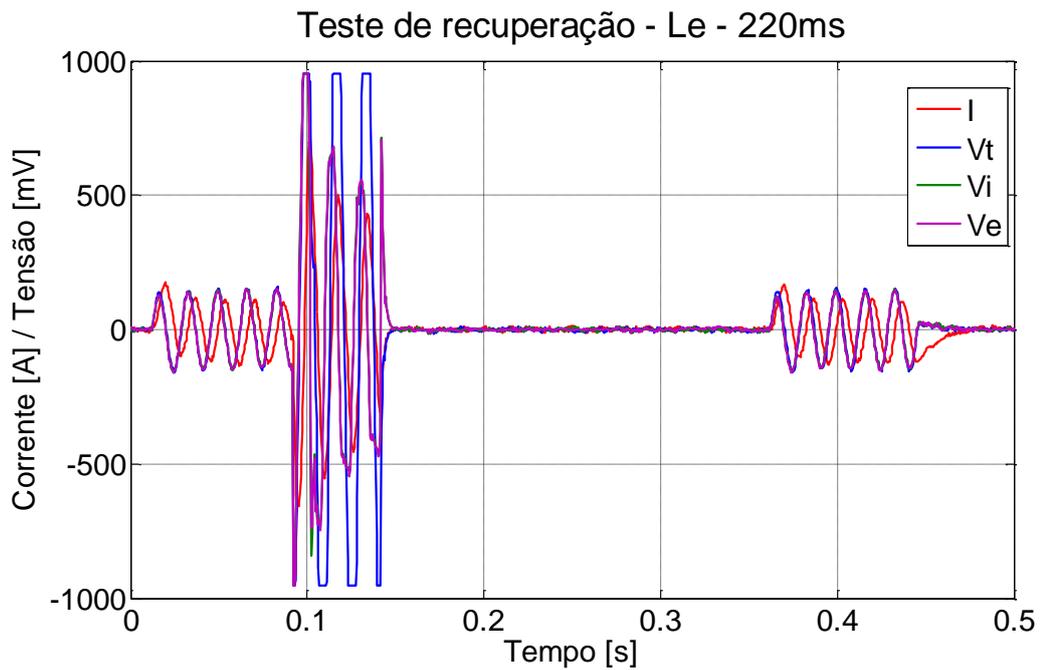


**Figura 5.18 ± Defasagem entre tensões e corrente 300 ms após a ocorrência de curto**

Os ensaios com o CLe foram feitos do mesmo modo. No tempo de 220 ms, o componente ainda apresentou recuperação satisfatória, como pode ser visto na **Figura 5.19** e na **Figura 5.20**.

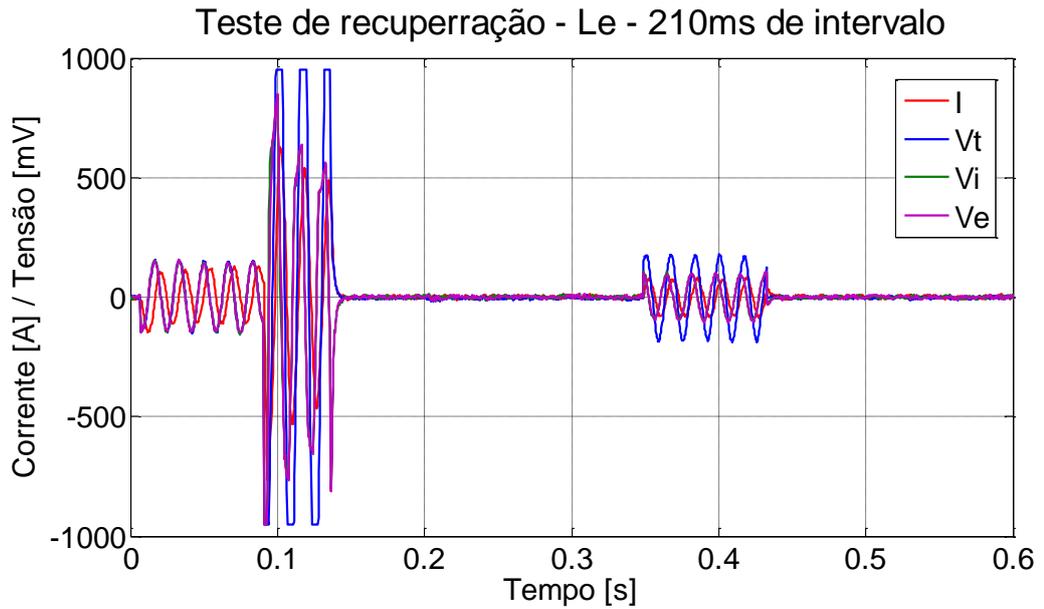


**Figura 5.19 ± Ensaio de recuperação do CLe com espera de 220 ms**

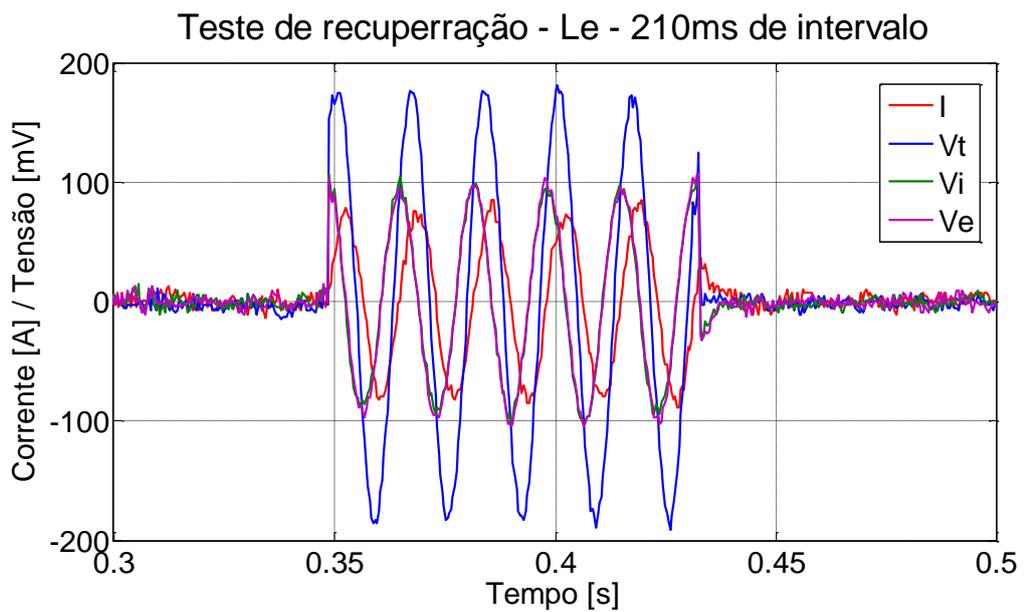


**Figura 5.20 ± Defasagem entre tensões e corrente 220 ms após a ocorrência de curto**

No tempo de 210 ms, observe que o material não voltou para o estado supercondutor. Este resultado é apresentado nas **Figura 5.21** e na **Figura 5.22**.



**Figura 5.21 ± Ensaio de recuperação do CLe com espera de 210 ms**



**Figura 5.22 ± Defasagem entre tensões e corrente 210 ms após a ocorrência de curto**

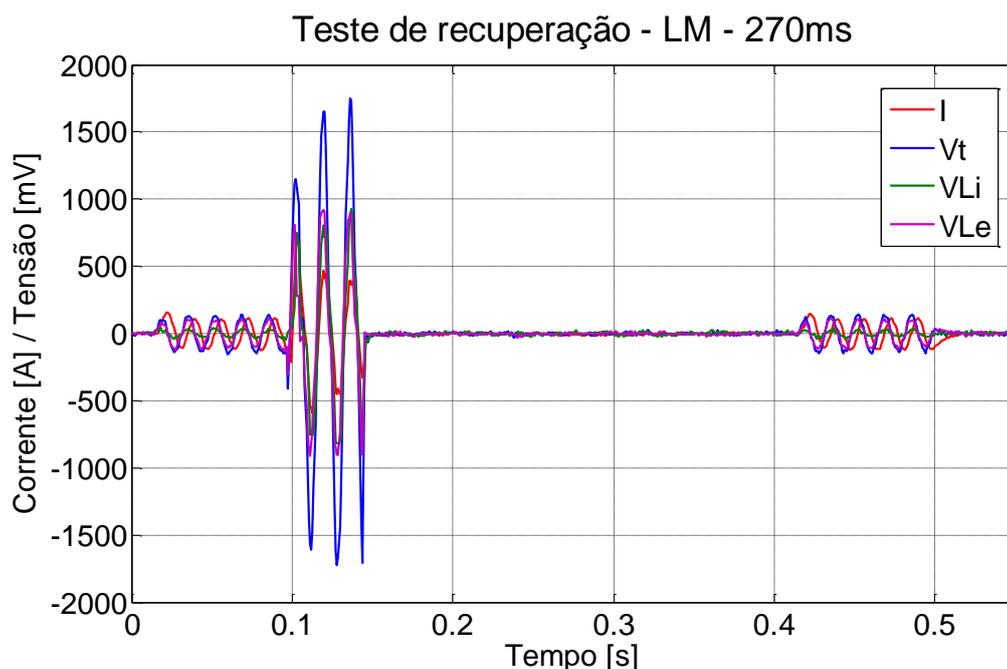
A diferença entre os tempos de recuperação se devem a vários fatores, como por exemplo a quantidade de fita utilizada em cada componente (quanto mais comprimento de fita para uma dada tensão e corrente, menor a elevação de temperatura e mais fácil a troca de calor), a qualidade da solda dos contatos, que pode ter apresentado variações,

entre outros. Entretanto, o tempo de recuperação se mostrou rápido nos ensaios realizados

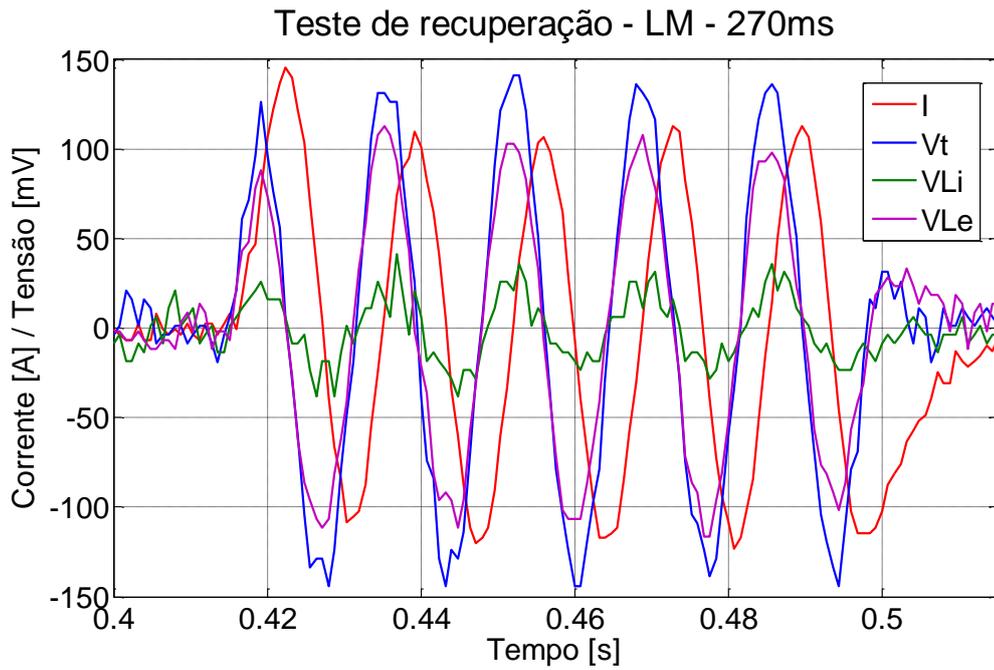
### 5.5 Ensaio de tempo de recuperação – módulo

O ensaio de recuperação também foi aplicado ao LCSR. Porém, o nível de corrente de curto foi baixo em relação aos ensaios com os componentes. Ainda assim, o material transitou neste ensaio com o mesmo comportamento apresentado durante a aplicação do curto com nível de 1,0 kA.

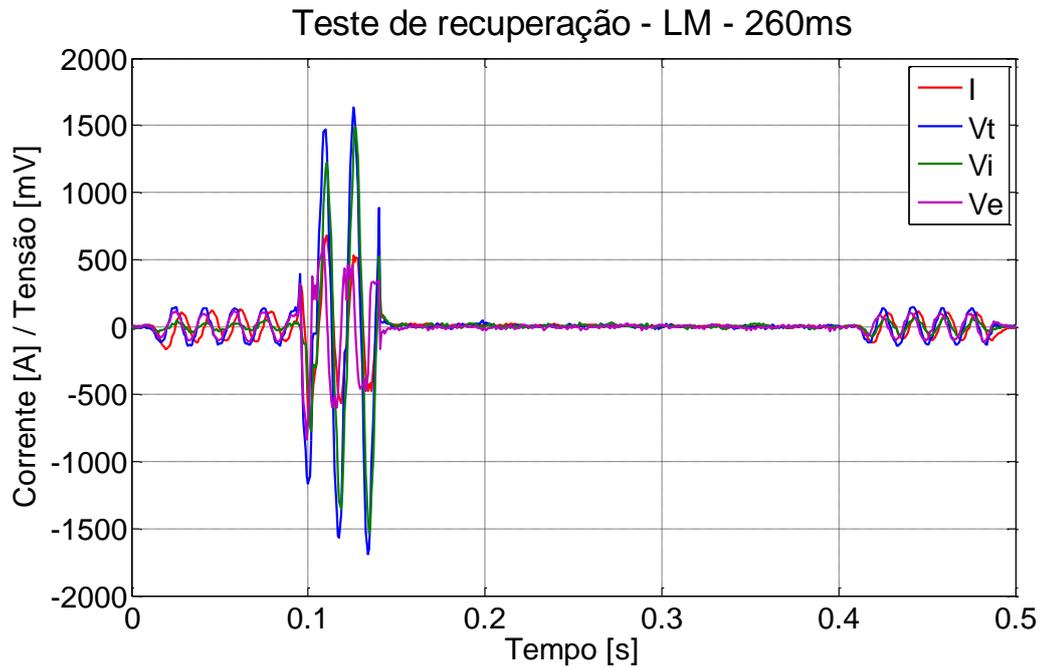
As **Figura 5.23** e subsequentes, até a **Figura 5.28**, mostram o comportamento da recuperação completa do modulo LCSR em até 270 ms.



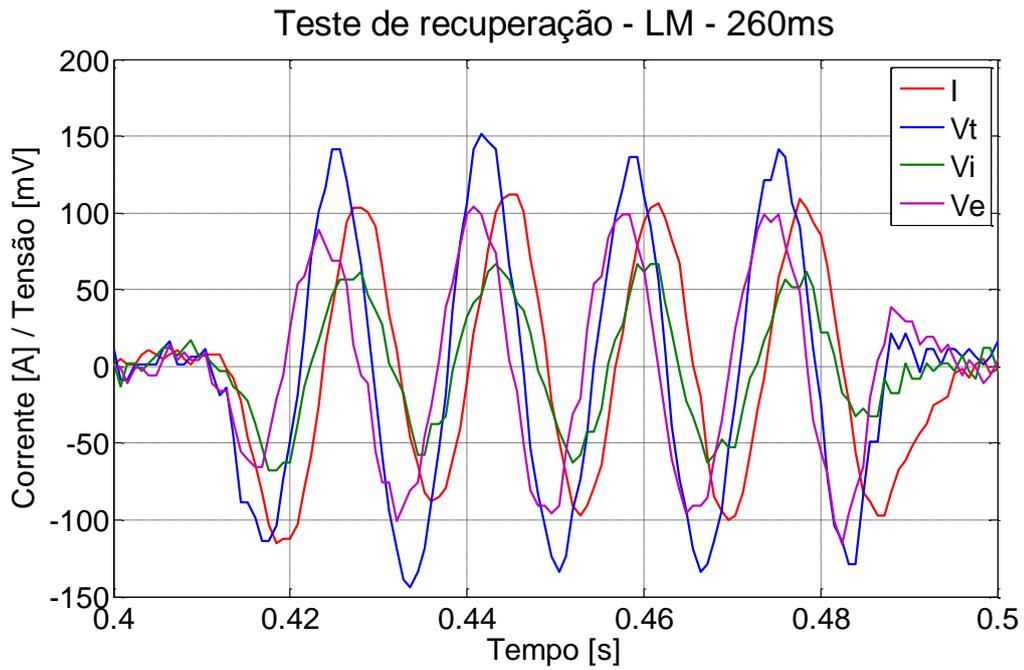
**Figura 5.23 ± Ensaio de recuperação do LM com espera de 270 ms**



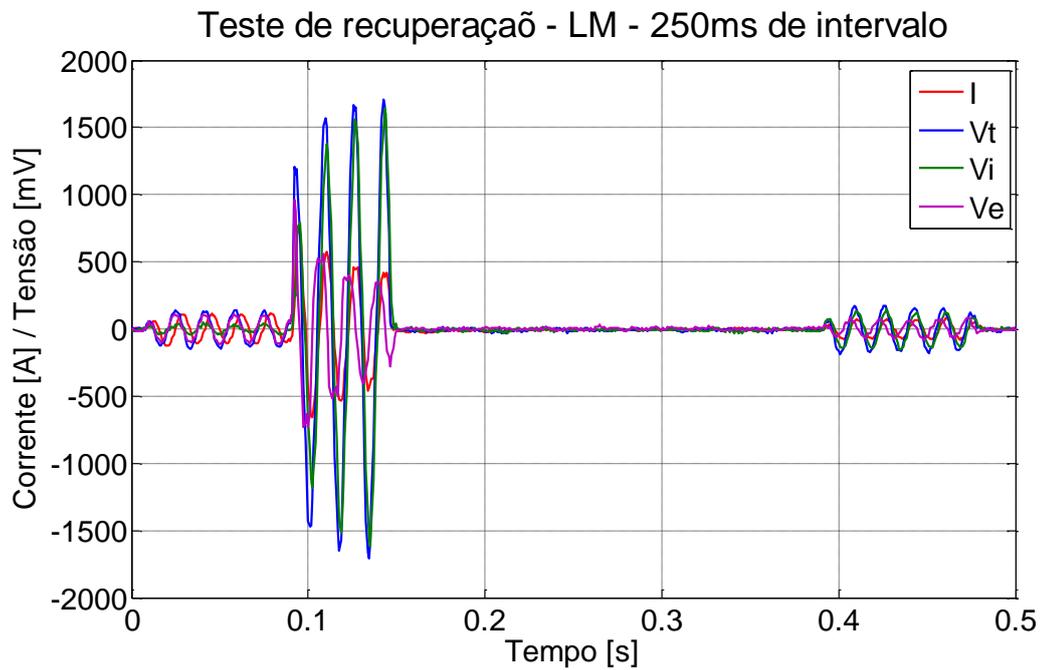
**Figura 5.24 ± Defasagem entre tensões e corrente 270 ms após a ocorrência de curto**



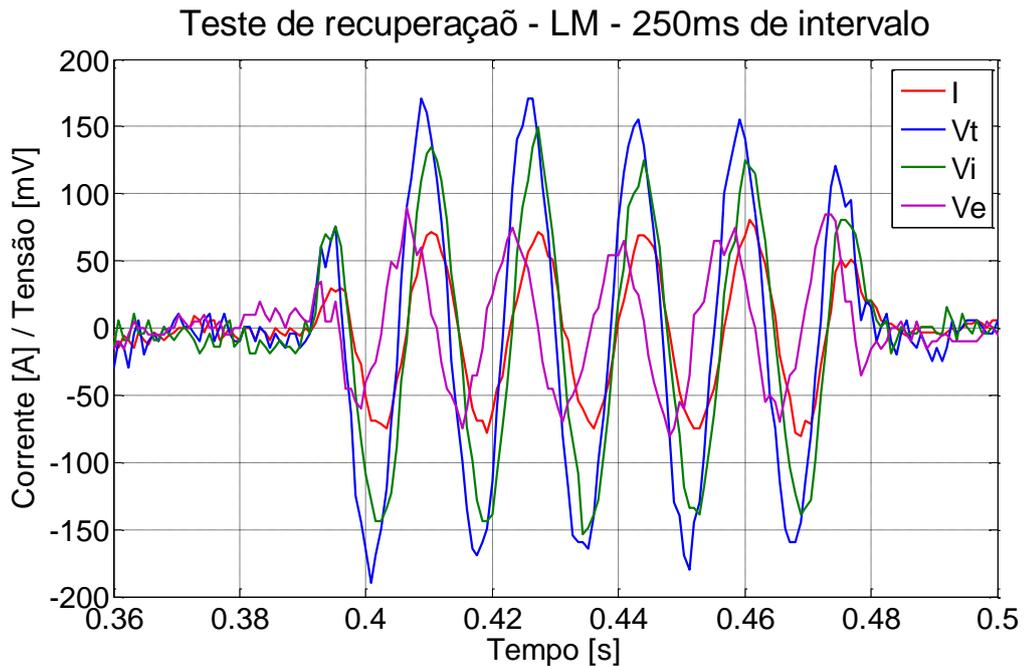
**Figura 5.25 ± Ensaio de recuperação do LM com espera de 260 ms**



**Figura 5.26 ± Defasagem entre tensões e corrente 260 ms após a ocorrência de curto**



**Figura 5.27 ± Ensaio de recuperação do LM com espera de 250 ms**



**Figura 5.28 ± Defasagem entre tensões e corrente 250 ms após a ocorrência de curto**

Este resultado mostra que o LCSR teve recuperação satisfatória no tempo de 270 ms após a aplicação do curto. Este tempo está entre os valores encontrados em cada componente, o que é plausível já que estes estão ligados em série.

### 5.6 Medição de parâmetros

A medição da indutância foi realizada somente para o módulo completo, e esta etapa foi realizada somente após os ensaios anteriores. Aqui, a base em PLA do CLi tinha sofrido 5 ciclos térmicos de imersão e retirada do nitrogênio líquido, e a base de mesmo material do CLe havia sofrido 4 ciclos.

Após a calibração da ponte de medição, e da total estabilização térmica do LCSR em nitrogênio líquido, as medidas de indutância e resistência foram feitas. A figura **Figura 5.29** mostra o momento do ensaio.

Como pode ser visto, a indutância medida no momento do ensaio foi de 3,3  $\mu\text{H}$ . Este ensaio foi feito para uma frequência de 1kHz. O valor da resistência medido pelo mesmo processo foi de aproximadamente 1,3 m $\Omega$ .



**Figura 5.29 ± Uso de ponte de medição para determinação dos parâmetros do LCSR**

## **6 Conclusão e Trabalhos Futuros**

### **6.1 Conclusão**

A partir do estudo das conexões aliados com as medições e ensaios realizados no LCSR, foi possível chegar às seguintes conclusões:

O uso da fita SF12100 para limitação de corrente de curto se mostrou viável, tanto em aspectos de soldagem, visto que a fita resiste bem a temperatura de 200 °C, quando submetida a pressão a níveis de 3 MPA, quanto nos aspectos de limitação, pois, não foi utilizado um shunt paralelo para atuar como elemento limitador, apenas a fita foi responsável pela inserção da impedância durante os três ciclos de curto-circuito aplicados. No entanto, o LCSR poderia não suportar curtos mais longos, de modo que um shunt seria necessário para aplicações práticas.

O processo de conexão apresentou boa reprodutibilidade, garantindo baixa resistência de contato e alta resistência mecânica para suportar os ciclos térmicos.

Mesmo sem ser perfeita a distribuição de corrente entre as fitas em paralelo, a configuração utilizada nesse trabalho mostrou bom valor de corrente crítica para o LCSR modular, permitindo alcançar a especificação de 0,5 V e 0,3 kA RMS.

Pelos resultados de curto-circuito obtidos, o dispositivo LCSR modular mostrou um desempenho semelhante à de trabalhos encontrados na literatura, o que valida o seu uso como limitador.

O estudo do tempo de recuperação do LCSR e seus componentes apresentou diferenças significativas entre eles, mas em todos os casos, o tempo foi significativamente baixo e consistente com os resultados.

### **6.2 Trabalhos Futuros**

A partir dos resultados obtidos, testar os modelos de simulação existentes e desenvolver novos modelos.

Projetar e construir um limitador com shunt, sistema criogênico próprio, com controle de pressão do nitrogênio líquido, visando a futura inserção no sistema elétrico.

## 7 Bibliografia

- [1] Santos, Vanessa Malaco dos. *Estudo de Caso de Curto-Circuito em um Sistema Elétrico Industrial*. São Carlos : Universidade de São Paulo, 2009.
- [2] Schneider. *Programa de formação técnica continuada - Os efeitos dos curtos-circuitos*. s.l. : Electric Schneider.
- [3] Almeida, Marcos A. Dias de. *Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos*. Natal : s.n., 2000.
- [4] Matos, Manuel Antônio. *Introdução ao cálculo de curto-circuitos trifásicos pela norma CEI-909*. s.l. : FEUP, 1996.
- [5] Monteiro, Andréia Maia. Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com Ênfase no Ipc (Interphase Power Controller). Rio de Janeiro : Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe, 2005.
- [6] Sena, Carla Vital de. *Ensaio de um módulo limitador de corrente de curto-circuito supercondutor*. Rio de Janeiro : s.n., 2001.
- [7] Rodrigues, Leandro Soares. *Metodologia para ensaio de um limitador de corrente supercondutor resistivo*. Portp Alegre : s.n., 2010.
- [8] Oliveira, Flávio Duarte Couto. *Limitador de corrente de falta supercondutor*. Vitória : s.n., 2005.
- [9] L. C. Zanetta Jr, C. E. M. Pereira, PEA-USP, V . A. F. Campos, PEA-USP e R.L.Santos, ISA-CTEEP. *Aplicação de Dispositivos para Limitação de Correntes de Curto-Circuito*.
- [10] Andrade, Valcimar Silva de. *Limitação da Corrente de Curto-Circuito Através de Dispositivos Supercondutores*. Rio de Janeiro : Coppe UFRJ, 2011.
- [11] Bourdillon, A.Bourdillon and N.K. Tan. *High Temperature Superconductors: Processing and Science*. San Diego : Academic Press Limited, 1994.
- [12] Melhem, Ziad. *High Temperature Supercondctors (HTS) for Energy Applications*. New Delhi : Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [13] Ribeiro, Ricardo Jorge Simões. *Limitador de Corrente com Supercondutor*. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [14] Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Seiwoong Park, Hyoungku Kang, Duck Kweon Bae, Seong Eun Yang, Bok-Yeol Seok, and Tae Kuk Ko, Member, IEEE. An Analysis and Short Circuit Test of Various Types of Bi-2223 Bifilar Winding Fault Current Limiting Module. *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, VOL. 16, NO. 2. June de 2006, pp. 703-706.
- [15] Pina, João Miguel Murta. *Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatur*. Lisboa : s.n., 2010.
- [16] Lamas, Jérika Suely. *Projeto e Construção de limitador de corrente supercondutor utiliznado fitas de YBCO*. Lorena : s.n., 2009.
- [17] Dong Keun Park, Min heol Ahn, Seon Eun Yang, Yong Soo Yoon, Bok-Yeol Seok, Chanjoo Lee, Ho-Myung Chang, and Tae Kuk Ko. Development of 220 V/300 A Class Non-Inductive Winding Type Fault Current Limiter Using 2 G HTS Wire. *IEEE Transactions on Applied Superrconductivity*. 2, 2007, Vol. 17.
- [18] Steffen Elschner, Andrej Kudymow, Stefan Fink, Wilfried Goldacker, Francesco Grilli, Christian Schacherer, Achim Hobl, Joachim Bock, and Mathias Noe. ENSYSTROB - Resistive Fault Current Limiter Based on Coated Conductors for

- Medium Voltage Application. *IEE Transactions on Applied superconducting*. 3, 2011, Vol. 21.
- [19] Z. Hong, J. Sheng, L. Yao, J. Gu, and Z. Jin. he Structure, Perfirmane and Recover Time of a 10 kV Resitive Type Superconducting Fault Current Limiter. *IEE Transactions on Applied Superconducting*. 3, 2013, Vol. 23.
- [20] SuperPower. *SuperPower®2 G HTS Wire Specifications*. Furukawa : SuperPower.
- [21] Y. Y. Xie, K. tekletsadik, D. Hazelton, and V. Selvamanickam. Second Generation High-Temperature Superconducting Wires for Fault Current Limiter Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2, 2007, Vol. 17.
- [22] Rocha, Luís Micahel Martins. *Análise do auto-campo do enrolamento primário em um transformador supercondutor*. Niterói : s.n., 2013.
- [23] GroBmann, Katrin Bäuml and Steffen. Investigation on Different Jointg Techniques Regarding Electrical Joints With Normal Conductign Material and YBCO Coated Conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 3, 2016, Vol. 26.
- [24] Nadezda Bagrets, Andrea Augieri, Giuseppe Celentano, Giordano Tomassetti, Klaus-Peter Weiss, and Antonio della Corte, Senior Member, IEEE. Investigation of ReBCO Conductor Tape Joints for Superconducting Applications. *Ieee Transactions on Applied Superconductivity*. Junho de 2015.
- [25] Hyoungku Kang, Chanjoo Lee, Kwanwoo Nam, Yong Soo Yoon, Ho-Myung Chang, Tae Kuk Ko, and Bok-Yeol Seok. Developmente of a 13.2 kV/630 A (8.3 MVA) High Temperature Superconucting Fault Current Limiter. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*. 2, 2008, Vol. 18.