



SIMULAÇÕES E ENSAIOS COM LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES DO TIPO RESISTIVO

Wesley Tiago Batista de Sousa

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

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior
Alexander Polasek

Rio de Janeiro
Março de 2011

SIMULAÇÕES E ENSAIOS COM LIMITADORES DE CORRENTE DE
CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES DO TIPO RESISTIVO

Wesley Tiago Batista de Sousa

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

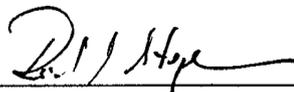
Examinada por:



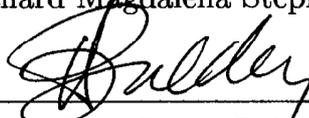
Prof. Rubens de Andrade Júnior, D.Sc.



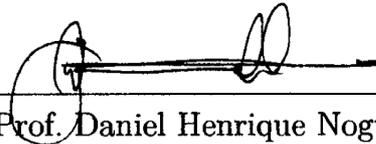
Prof. Alexander Polasek, D.Sc.



Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.



Prof. Carlos Alberto Baldan, D.Sc.



Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2011

Sousa, Wesley Tiago Batista de
Simulações e Ensaios com Limitadores de
Corrente de Curto-Circuito Supercondutores do Tipo
Resistivo/Wesley Tiago Batista de Sousa. – Rio de
Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XVII, 135 p.:il.; 29, 7cm.

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior

Alexander Polasek

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

Referências Bibliográficas: p. 121 – 130.

1. Limitadores de Corrente. 2. Supercondutores.
3. Curto-Circuito. I. Andrade Júnior, Rubens de
et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*"A sabedoria de um ser humano
não está no quanto ele sabe, mas
no quanto ele tem consciência de
que não sabe"
Augusto Cury*

Agradecimentos

- Aos professores Dr. Alexander Polasek e Dr. Rubens de Andrade Júnior pela orientação, dedicação, coragem e paciência em me orientar neste trabalho;
- Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobras (CEPEL) pela infraestrutura e bolsa de estudos;
- Aos Amigos de laboratório do CEPEL: George, Everton, Juliana e Cristiane pela ótima amizade;
- Ao colega Rodrigo Dias do Laboratório de Supercondutividade do CEPEL pelo apoio técnico em ensaios e também pela paciência em me enviar inúmeras vezes os dados de ensaios;
- Aos Engenheiros Fábio Silva e Daniel Niedu e equipe do Laboratório de Alta Corrente do CEPEL pelos ensaios e informações técnicas;
- Aos amigos; Felipe Sass e Karolina Schwenk pelas lições de Engenharia Elétrica;
- A meus pais, Lourivaldo e Maria, pelo imenso e constante incentivo;
- A minha namorada Rose, pela força, companheirismo e confiança durante todo o tempo;
- Ao professor e amigo Dr. Alcione Roberto Jurelo pelas medidas de resistividade, além dos valiosos conselhos;
- A Patrícia Zambelli Rodrigues, pela inesquecível força no início desta caminhada;
- A minha eterna "tia", Evany Rios, que agora descansa em paz "lá em cima".
- A Deus, por nunca ter me abandonado.

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

SIMULAÇÕES E ENSAIOS COM LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES DO TIPO RESISTIVO

Wesley Tiago Batista de Sousa

Março/2011

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior
Alexander Polasek

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho faz estudo de limitadores de corrente de curto-circuito com base em materiais supercondutores para a proteção de redes elétricas frente ao crescente aumento no nível de corrente de curtos-circuitos. Tais limitadores foram submetidos a ensaios de curto-circuito (correntes da ordem de kA) com o objetivo de se analisar a eficácia destes dispositivos na limitação de corrente. Com o propósito de se obter parâmetros de difícil acesso experimental, prever resultados experimentais e compreender os fenômenos físicos envolvidos na atuação destes limitadores na limitação de corrente, um modelo matemático para a simulação destes limitadores foi desenvolvido. Tais simulações fazem considerações a respeito da transição do material supercondutor para o estado normal e das trocas de calor existentes nos limitadores durante um curto-circuito. Para a validação do modelo matemático, os resultados de limitação de corrente das simulações são comparados com os resultados obtidos nos ensaios. Os resultados dos ensaios podem ser considerados satisfatórios por apresentarem eficiência na limitação de corrente. Por se tratar de uma primeira aproximação, podemos considerar os resultados das simulações também como satisfatórios já que apresentaram características semelhantes aos resultados dos ensaios.

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

SIMULATIONS AND TESTS WITH RESISTIVE SUPERCONDUCTING
FAULT CURRENT LIMITERS

Wesley Tiago Batista de Sousa

March/2011

Advisors: Rubens de Andrade Júnior
Alexander Polasek

Department: Electrical Engineering

This work consists on an investigation of resistive superconducting fault current limiters for the protection of electrical networks considering the growing increase in the current level of short circuits. Such limiters have been tested for short circuit (currents in order of kA) with the aim of analyzing the effectiveness of these devices in current limitation. For the purpose of obtaining parameters of difficult experimental access, predict experimental results and a better understanding of the physical phenomena underlying the fault limitation, a mathematical model to simulate these devices was developed. Such simulations takes into account the transition from the superconducting material to the normal state as well as the heat exchanges in these limiters during a short circuit. To validate the mathematical model, the results was compared with results obtained in the tests. The test results can be considered satisfactory because it were efficient in current limitation. Because it is a first approximation, we consider the simulation results as satisfactory once it have similar characteristics to tests results.

Sumário

Sumário	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do Texto	2
2 Supercondutividade e Materiais Supercondutores	4
2.1 Introdução	4
2.2 Resistência Zero	5
2.3 Efeito Meissner	6
2.4 Parâmetros dos Supercondutores	8
2.5 Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência	10
2.6 Classificação dos Supercondutores	11
2.7 Materiais Supercondutores	14
2.7.1 Ligas e Compostos	16
2.7.2 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica	16
3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	23
3.1 Introdução	23
3.2 Correntes de Curto Circuito	24
3.3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	26

SUMÁRIO

3.3.1	Reator a Núcleo de Ar	27
3.3.2	Dispositivo Pirotécnico	28
3.3.3	Controlador de Potência Interfases	30
3.3.4	Dispositivo com Tecnologia <i>FACTS</i>	31
3.3.5	Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida	32
4	Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores	34
4.1	Introdução	34
4.2	Tipos de Limitadores Supercondutores	37
4.2.1	Tipo Resistivo	38
4.2.2	Tipo Indutivo	39
4.2.3	Tipo Híbrido	40
4.3	Princípios de um Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor	41
4.3.1	Dinâmica de Vórtices	41
4.3.2	A Curva $E - J$	45
4.4	Limitador MCP-BSCCO-2212	46
5	Metodologia	51
5.1	Introdução	51
5.2	Ensaio	51
5.3	Simulação	56
5.3.1	Programa de Simulação	57
5.3.2	A Resistência do Limitador	59
5.3.3	Temperatura	67
5.3.4	Método Numérico para Solução das Equações Diferenciais	73
5.3.5	O Algoritmo da linguagem MODELS	75
5.4	Considerações Finais sobre as Simulações	84
6	Resultados e Discussões	86
6.1	Introdução	86
6.2	Resultados dos Ensaios	86

SUMÁRIO

6.3	Resultados de Simulação	91
6.3.1	Limitação de Corrente, Tensão e tempo de Transição	91
6.3.2	Temperatura	100
6.3.3	Resistências	104
6.3.4	Divisão de Correntes	108
6.3.5	Tempo de Recuperação	111
7	Conclusões	118
7.1	Trabalhos Futuros	120
	Referências Bibliográficas	121
A	Algoritmo Escrito na Linguagem MODELS do ATP	131

Lista de Figuras

2.1	Curva de resistividade em função da temperatura do mercúrio obtida por Heike. K Onnes em 1911.[2]	6
2.2	O fluxo magnético é expulso do interior de um material supercondutor devido às correntes superficiais.	7
2.3	Efeito do campo magnético aplicado sobre um supercondutor a) acima de T_c e b) abaixo de T_c	8
2.4	Diagrama de fases de um supercondutor relacionando os parâmetros J_c , T_c e H_c , para supercondutores do tipo I	10
2.5	Variação espacial do campo magnético $H(x)$. Na figura, H_o é o campo magnético no vácuo, e λ é a profundidade de penetração.	11
2.6	Diagrama de fases para um supercondutor do tipo I	13
2.7	Diagrama de fases para um supercondutor do tipo II	13
2.8	Ilustração de vórtices blindados por supercorrentes dentro de um material supercondutor do tipo II no estado misto.	14
2.9	Estrutura molecular do fulereno que quando dopado com metais alcalinos apresenta supercondutividade.	15
2.10	Cronologia da evolução de T_c dos materiais supercondutores.	17
2.11	Estrutura cristalina do $La_{2-x}Ba_xCuO_4$	20
2.12	Célula unitária do $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	21
2.13	Estrutura Cristalina a) $Bi2201$, b) $Bi2212$ e c) $Bi2223$	22
3.1	Fotografia dos Reatores limitadores na subestação de Tucuruí - PA. . .	28
3.2	Esquema de um limitador de corrente pirotécnico.	29

LISTA DE FIGURAS

3.3	Diagrama esquemático de um <i>IPC</i> com n ramos.	31
4.1	Possíveis conexões para dispositivos limitadores de corrente supercondutores.	37
4.2	Ilustração de um Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo.	38
4.3	Limitador de corrente supercondutor indutivo.	39
4.4	Limitador Supercondutor do Tipo Híbrido	40
4.5	Interação repulsiva entre dois vórtices adjacentes.	42
4.6	Vórtice em um supercondutor sujeito as forças de pinning e de Lorentz	42
4.7	Movimento da rede de vórtices devido a uma corrente de transporte.	43
4.8	Esboço da curva $E - J$ para a determinação do valor de J_c e as respectivas fases da transição supercondutora-normal.	45
4.9	Atuação do shunt para evitar a danificação do dispositivo devido a hot-spots	48
4.10	Componentes de um limitador de corrente do tipo <i>MCP-BSCCO-2212</i> . <i>A figura está fora de escala.</i>	50
4.11	Fotografia de um componente limitador supercondutor fabricado pela <i>Nexans Superconductors</i> ; a) vista superior de uma das extremidades e b) vista lateral.	50
5.1	Circuito de ensaio do Laboratório de Alta Corrente no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL - Eletrobras)	52
5.2	Conexão em série com os limitadores da família A.	54
5.3	Conexão em série com os limitadores da família B.	55
5.4	Imersão em nitrogênio líquido para os a) limitadores da Família A e para b) os limitadores da Família B.	55
5.5	Circuito equivalente para a simulação	56
5.6	Circuito de simulação simplificado desenhado no <i>ATPDraw</i> ; a linguagem MODELS controla a resistência variável do limitador (R_{sh} e R_{sp})	58
5.7	Configuração usada para modelar o dispositivo limitador supercondutor; resistências shunt (R_{sh}) e supercondutor (R_{sp}) ligadas em paralelo.	59

LISTA DE FIGURAS

5.8	Técnica das quatro pontas para a determinação do comportamento $R \times T$ de uma amostra do limitador.	61
5.9	Curva $R \times T$ para a amostra de <i>Bi2212</i> extraída de um componente limitador.	61
5.10	Alterações na curva $R \times T$ medida com diferentes valores de densidade de corrente [46][8].	62
5.11	Técnica das quatro pontas para a determinação do comportamento $R \times T$ de uma amostra do <i>shunt</i>	66
5.12	Resistividade em função da temperatura para o <i>shunt</i> obtida experimentalmente.	67
5.13	Modelagem do Limitador para trocas de calor.	68
5.14	Esboço da curva do calor específico para o <i>Bi2212</i> no intervalo de 60 K a 100 K.	71
5.15	Derivação do método de Euler pela Integral.	74
5.16	Esquema com a lógica das principais tarefas do algoritmo de simulação.	78
6.1	Resultado do ensaio <i>E01</i> em $137,5 V_{rms}$; corrente prospectiva ($15,4 kA_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.	87
6.2	Resultado do ensaio <i>E02</i> em $137,5 V_{rms}$; corrente prospectiva ($25,0 kA_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.	87
6.3	Resultado do ensaio <i>E03</i> em $1 kV_{rms}$; corrente prospectiva ($5,0 kA_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.	89
6.4	Resultado do ensaio <i>E04</i> em $1 kV_{rms}$; corrente prospectiva ($25,0 kA_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.	90
6.5	Resultado do ensaio <i>E05</i> em $1 kV_{rms}$; corrente prospectiva ($67,0 kA_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.	90
6.6	Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E01</i>	92
6.7	Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E01</i>	92

LISTA DE FIGURAS

6.8	Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E02</i>	93
6.9	Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E02</i>	93
6.10	Resultado da simulação para o instante da transição do material supercondutor para os ensaios <i>E01</i> e <i>E02</i>	94
6.11	Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E03</i>	95
6.12	Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E03</i>	96
6.13	Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E04</i>	96
6.14	Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E04</i>	97
6.15	Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E05</i>	97
6.16	Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio <i>E05</i>	98
6.17	Resultado da simulação para o instante da transição do material supercondutor para os ensaios <i>E03</i> , <i>E04</i> e <i>E05</i>	99
6.18	Simulação do aumento de temperatura do <i>shunt</i> e supercondutor durante o ensaio <i>E01</i>	101
6.19	Simulação do aumento de temperatura do <i>shunt</i> e supercondutor durante o ensaio <i>E02</i>	101
6.20	Simulação do aumento de temperatura do <i>shunt</i> e supercondutor durante o ensaio <i>E03</i>	102
6.21	Simulação do aumento de temperatura do <i>shunt</i> e supercondutor durante o ensaio <i>E04</i>	102

LISTA DE FIGURAS

6.22	Simulação do aumento de temperatura do <i>shunt</i> e supercondutor durante o ensaio <i>E05</i>	103
6.23	Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio <i>E01</i> . No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição	105
6.24	Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio <i>E02</i> . No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição	105
6.25	Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio <i>E03</i> . No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição	106
6.26	Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio <i>E04</i> . No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição	106
6.27	Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio <i>E05</i> . No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição	107
6.28	Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio <i>E01</i>	109
6.29	Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio <i>E02</i>	109
6.30	Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio <i>E03</i>	110
6.31	Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio <i>E04</i>	110
6.32	Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio <i>E05</i>	111
6.33	Simulação <i>R01</i> - recuperação sem corrente no circuito.	112
6.34	Simulação <i>R02</i> - recuperação com corrente de $70,7 A_{rms}$	113

LISTA DE FIGURAS

6.35 Comparação entre $R01$ e $R02$; a corrente de $70,7 A_{rms}$ no circuito após o curto-circuito aumenta o tempo de recuperação do estado supercondutor. 113

6.36 Simulação $R03$ - A corrente de $106 A_{rms}$ impede a recuperação do estado supercondutor. 115

6.37 Simulação $R04$ - A corrente de $141,4 A_{rms}$ impede a recuperação do estado supercondutor. 116

6.38 Comportamento do índice de transição n após o término do curto-circuito. 116

Lista de Tabelas

2.1	Campo magnético crítico para diferentes materiais supercondutores . . .	17
2.2	Parâmetros de Rede do sistema BSCCO	22
3.1	Níveis de curto-circuito trifásico e monofásico[16]	25
4.1	Lista dos Principais protótipos de SCFL em desenvolvimento[26]	36
5.1	Dados de ensaio	54
5.2	Simulações de recuperação	59
5.3	Parâmetros usados nas simulações	76
5.4	Parâmetros usados para os limitadores das famílias A e B	76

Capítulo 1

Introdução

O crescente aumento pela demanda de energia elétrica, ao redor de todo o mundo, tem feito com que novas usinas geradoras de energia sejam implantadas para atender a demanda em sistemas de distribuição. A inserção destas novas usinas geradoras de eletricidade têm contribuído para que os níveis de corrente de curto-circuitos em subestações se elevem acima dos limites dos equipamentos instalados. Usinas próximas aos centros de consumo e a interconexão do sistema elétrico também contribuem para o aumento das correntes de curto-circuito.

Devido a estes fatores, temos a superação da capacidade dos equipamentos, ou seja, equipamentos (transformadores, barramentos, disjuntores) que não foram projetados para suportar grandes correntes de falta. Os principais meios para resolver ou contornar este problema consistem na troca de todos os equipamentos superados, na reconfiguração do sistema ou no emprego de dispositivos limitadores de corrente. A troca dos equipamentos superados pode ser inviável, tanto economicamente quanto operacionalmente, devido à necessidade de longas paradas nas subestações. Modificações na rede, tais como o seccionamento de barramentos, a radialização de circuitos e a divisão em circuitos de menor capacidade, representam soluções provisórias, por reduzirem a flexibilidade e a confiabilidade do sistema. Já os limitadores de corrente são dispositivos capazes de atenuar ou mesmo de bloquear picos de sobrecorrente com rapidez suficiente para que os disjuntores possam então atuar com segurança. Deste modo, a aplicação destes dispositivos apresenta-se como solução de longo prazo mais viável do

que a recapacitação de uma subestação, mantendo ou aumentando a estabilidade, a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica, além de prolongar a vida útil dos equipamentos superados.

Limitadores de corrente a base de materiais supercondutores de alta temperatura crítica tem sido estudados por vários grupos de pesquisas e alguns já foram instalados em subestações da Europa e Ásia para testes. Estes limitadores são considerados uma das tecnologias mais promissoras dentre os limitadores em desenvolvimento.[1].

Neste trabalho, desenvolvemos um modelo matemático, para simulações, baseado na transição do material do estado supercondutor para o estado normal, e nas trocas de calor que ocorrem dentro destes limitadores durante um curto-circuito. A fim de validar o modelo matemático desenvolvido, os resultados das simulações foram comparados com os resultados dos ensaios realizados com tais dispositivos adquiridos da empresa alemã Nexas Superconductors GmbH. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Corrente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL - Eletrobrás) na unidade de Adrianópolis.

1.1 Objetivos

O primeiro objetivo deste trabalho foi compreender os fenômenos físicos envolvidos na limitação de corrente, visando o desenvolvimento de simulações para obter resultados com características semelhantes aos resultados dos ensaios, além de obter estimativas a respeito de parâmetros de difícil acesso experimental (evolução temporal de resistência e temperatura, divisão de correntes, tempo de recuperação, entre outros). O segundo objetivo foi investigar, através dos ensaios, a eficiência de limitadores de corrente supercondutores na proteção de um sistema elétrico submetido a um curto-circuito

1.2 Estrutura do Texto

A estrutura deste trabalho foi dividida da seguinte maneira: 7 capítulos e 1 apêndice.

Capítulo 1. Introdução

Neste capítulo, apresentamos a introdução do tema, bem como os principais objetivos.

No capítulo 2, serão apresentados os principais conceitos físicos a respeito da supercondutividade e os principais materiais supercondutores.

No capítulo 3, serão apresentados os problemas relativos ao aumento dos níveis de correntes de curto-circuito e os principais tipos de limitadores de corrente.

No capítulo 4, serão apresentados os principais tipos e conceitos de limitadores de corrente supercondutores.

No capítulo 5, serão apresentados o desenvolvimento do modelo matemático usado na simulação.

No capítulo 6, serão apresentados os resultados dos ensaios e das simulações.

No capítulo 7, encontram-se as conclusões do trabalho e observações relevantes quanto à implementação do algoritmo.

Por fim, no apêndice A, apresentamos o algoritmo desenvolvido para a simulação.

Capítulo 2

Supercondutividade e Materiais

Supercondutores

2.1 Introdução

Desde a sua descoberta em 1911 pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes quando estudava a resistividade de metais em baixas temperaturas, a supercondutividade, é até hoje (depois de um século), um dos fenômenos mais curiosos da física. Muitas das teorias utilizadas para descrever este fenômeno ainda estão incompletas e são insuficientes para explicar toda a fenomenologia escondida por trás da supercondutividade, especialmente no caso dos supercondutores de alta temperatura crítica.

A supercondutividade é um fenômeno pelo qual alguns materiais, quando resfriados a temperaturas muito baixas, apresentam resistividade nula (em corrente contínua). Diferentemente da gradual diminuição da resistência elétrica apresentada pela grande maioria dos metais quando a temperatura é reduzida, o estado supercondutor se estabelece de forma abrupta a uma dada temperatura crítica, T_c , característica do material em questão [2]. A temperatura crítica em alguns materiais supercondutores é muito baixa, da ordem de alguns Kelvin, tornando necessária a utilização de fluidos criogênicos como refrigerantes, tais como hélio líquido (4,2 K). Porém, também existem materiais que possuem temperatura crítica elevada (quando comparada aos citados

anteriormente) e necessitam apenas de nitrogênio líquido como refrigerante (77 K) que é mais barato e mais acessível que o hélio líquido.

Onnes, ao investigar metais como mercúrio, chumbo e estanho, observou também que a supercondutividade pode ser destruída a partir da exposição do metal a um campo magnético superior a um certo valor crítico H_c . Nos metais puros e, em temperaturas próximas de 0 K, H_c é da ordem de mT . O estado supercondutor também pode ser destruído pela aplicação de densidades de corrente elétrica acima de um valor crítico J_c .

Muitas outras propriedades da supercondutividade foram descobertas nas primeiras décadas do século vinte. Tais descobertas levaram a muitos avanços no entendimento deste fascinante fenômeno, presentes em uma quantidade expressiva de metais e ligas.

Nos anos que sucederam 1911, o estado supercondutor foi observado em diversos materiais. Alguns possuem temperaturas de transição na ordem de 100 K, mas até hoje não foi descoberto nenhum material com um T_c próximo da temperatura ambiente.

2.2 Resistência Zero

Os supercondutores exibem resistividade zero abaixo de T_c em corrente contínua. Resistividade zero, entretanto, é impossível de ser medida de forma absoluta. Talvez a técnica mais sensível seja a que envolve a indução de corrente em um anel supercondutor. Esta técnica tem sido utilizada para demonstrar que, mesmo após longos intervalos de tempo (em torno de 10^5 anos [3]), não há indicação do decréscimo na intensidade desta corrente persistente induzida.

A temperatura na qual um supercondutor perde a sua resistividade elétrica é chamada de temperatura de transição ou temperatura crítica T_c . Esta temperatura é uma característica de cada material e a resistividade elétrica de um determinado material cai abruptamente a zero nesta temperatura, como podemos ver na figura 2.1. Diz-se, então, que o material passou ao estado supercondutor. A perda da resistividade elétrica é uma propriedade característica do estado supercondutor, mas não é a única, como veremos posteriormente. Uma outra propriedade fundamental do estado supercondutor

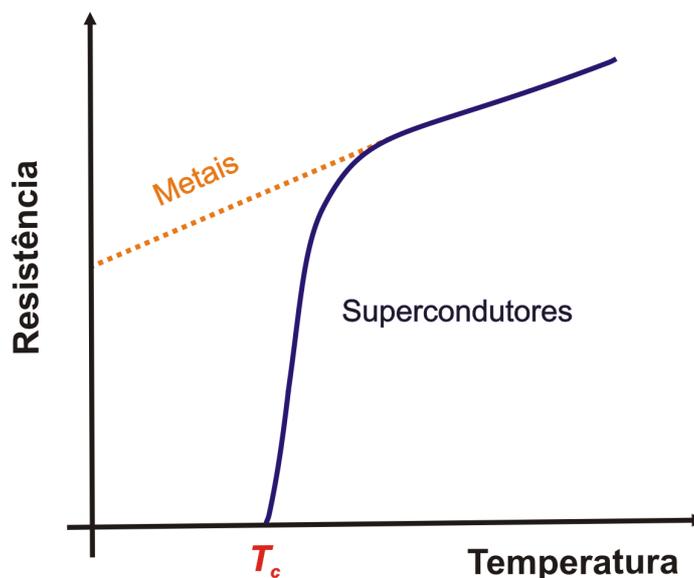


Figura 2.1: Curva de resistividade em função da temperatura do mercúrio obtida por Heike. K Onnes em 1911.[2]

é o diamagnetismo perfeito. É importante ressaltar que a supercondutividade não é um fenômeno raro, pois aproximadamente metade dos elementos metálicos, e uma grande quantidade de ligas e compostos, também apresentam o fenômeno da supercondutividade. Porém, o fato da temperatura crítica ser, em muitos casos, próximos de zero Kelvin, este fenômeno não pode ser percebido à temperatura ambiente.

2.3 Efeito Meissner

Os físicos alemães W. Meissner e R. Ochsenfeld (1933) constataram que os supercondutores são diamagnetos perfeitos. Aplicando um campo magnético fraco em um supercondutor no seu estado normal ($T > T_c$) e resfriando o sistema sob um campo magnético aplicado, observa-se a expulsão abrupta do fluxo magnético do interior do material quando este transita do estado normal para o estado supercondutor, como mostrado na figura 2.2. Este fenômeno foi denominado de efeito Meissner.

Quando a transição para o estado supercondutor ocorre com um campo magnético presente, ela é acompanhada pelo aparecimento de correntes elétricas superficiais no material (figura 2.2) que cancelam exatamente a indução magnética no seu interior,

como mostrado na figura 2.3.

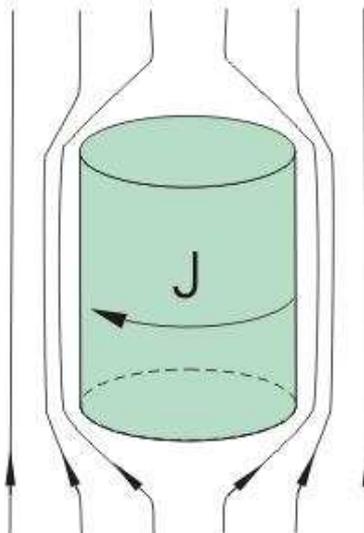


Figura 2.2: O fluxo magnético é expulso do interior de um material supercondutor devido às correntes superficiais.

Neste sentido dizemos que um supercondutor se comporta como um diamagneto perfeito, com

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

no interior do material. Com base neste conhecimento podemos obter a curva de magnetização de um material supercondutor da seguinte forma:

$$\vec{B} = \mu_o (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.2)$$

Onde M é magnetização e H é o campo magnético aplicado. Como $\vec{B} = 0$, então de acordo com expressão 2.2 temos:

$$\vec{H} = -\vec{M} \quad (2.3)$$

A maneira mais conhecida de se demonstrar o Efeito Meissner é a levitação magnética [4]. Se colocarmos um pequeno ímã sobre uma amostra supercondutora que está abaixo de sua temperatura crítica, T_c , veremos que ele irá flutuar sobre esta amostra. A força

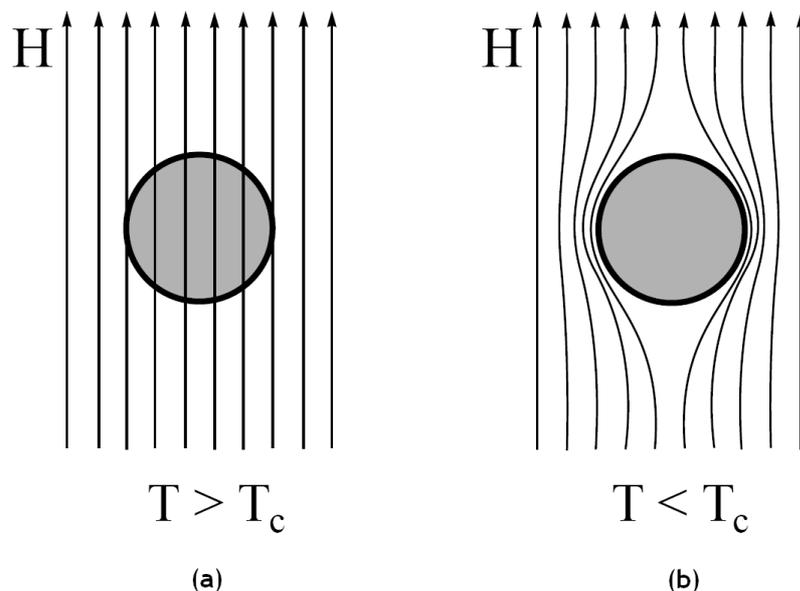


Figura 2.3: Efeito do campo magnético aplicado sobre um supercondutor a) acima de T_c e b) abaixo de T_c .

gravitacional exercida sobre o ímã é compensada pela força magnética proveniente da circulação das correntes elétricas superficiais.

Vale observar que é o Efeito Meissner que diferencia os materiais supercondutores de um condutor ideal ($R = 0$).

2.4 Parâmetros dos Supercondutores

Como dito anteriormente, a supercondutividade só existe abaixo de um determinado valor de temperatura, ao qual denominamos temperatura crítica T_c . No entanto, este não é o único parâmetro físico que influencia diretamente a supercondutividade. Existem ainda dois parâmetros importantes que podem destruir o estado supercondutor de um material:

- Campo Magnético Crítico: A supercondutividade existe somente até um certo valor de campo magnético, ao qual chamamos de campo magnético crítico H_c . Se um campo com intensidade maior que H_c é aplicado a um material supercondutor, todos os fenômenos relacionados à supercondutividade, como o efeito Meissner e resistividade nula, por exemplo, desaparecem. O valor de H_c depende da tempe-

ratura da qual se encontra o material e pode ser escrito (para supercondutores do tipo I , a ser definido posteriormente), de uma maneira aproximada, como [3]:

$$H_c = H_o \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

onde H_o é o valor de H_c quanto $T = 0$.

- Densidade de Corrente Crítica: O valor máximo de corrente que um material no estado supercondutor pode transportar é denominado de densidade de corrente crítica J_c . Caso o material transporte uma densidade corrente maior que J_c , ocorrerá a quebra dos pares de Cooper (a ser definido na seção 2.5), destruindo então a supercondutividade. O valor de J_c está relacionado com a temperatura do material e, assim como H_c , também diminui com o aumento da temperatura. Por ser responsável pela quebra dos pares de Cooper, este parâmetro também pode ser chamado de densidade de corrente de depareamento (*depairing current density*). No entanto, este é um termo mais frequentemente utilizado no estudo de supercondutores do tipo II (seção 2.6). Em supercondutores do tipo II , o termo densidade de corrente crítica J_c geralmente é utilizado para determinar a densidade de corrente responsável pelo movimentos da rede de vórtices dentro do material supercondutor. Esta pode apresentar diferentes valores para o mesmo material, dependendo do método de fabricação do composto supercondutores. Estudaremos este assunto com mais detalhes na seção 4.3.1 do capítulo 4.

Desse modo, temos então, três importantes parâmetros que definem a superfície crítica do estado supercondutor em um material: T_c , J_c e H_c . A figura 2.4 mostra o diagrama de fases relacionando estes três parâmetros para um supercondutor do tipo I .

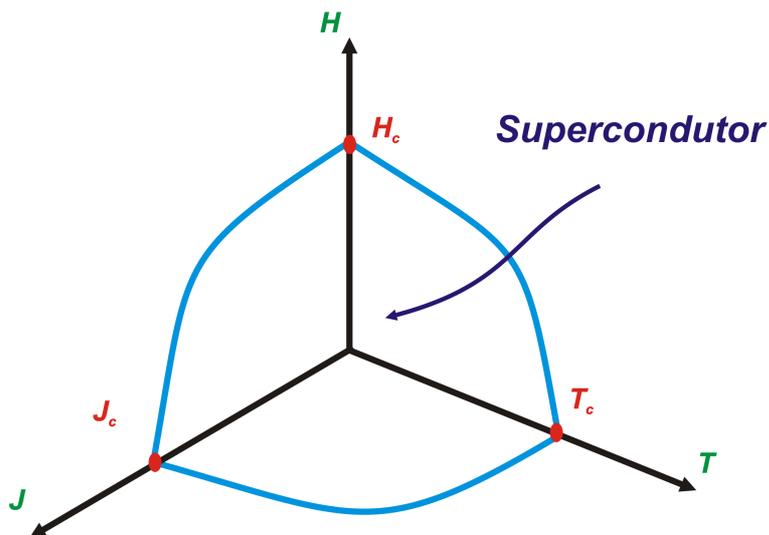


Figura 2.4: Diagrama de fases de um supercondutor relacionando os parâmetros J_c , T_c e H_c , para supercondutores do tipo I.

2.5 Profundidade de Penetração e Comprimento de Coerência

Como já vimos, quando uma amostra supercondutora é colocada em um campo magnético, surgem correntes superficiais que blindam o interior da amostra contra a penetração do campo magnético. Como não existe nenhum campo no interior da amostra, essas correntes devem apenas circular próximas da superfície. Na verdade, essas correntes circulam dentro de uma camada muito fina com uma espessura denominada *profundidade de penetração*, indicada por λ . Logo, na presença de um campo aplicado não existe uma mudança abrupta entre o campo magnético externo e o campo magnético interno, que é nulo.

A profundidade de penetração é definida como [2]:

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} H(x) dx}{H_o} \quad (2.5)$$

Na figura 2.5 é apresentada a variação espacial do campo magnético à medida que o mesmo penetra na superfície do material.

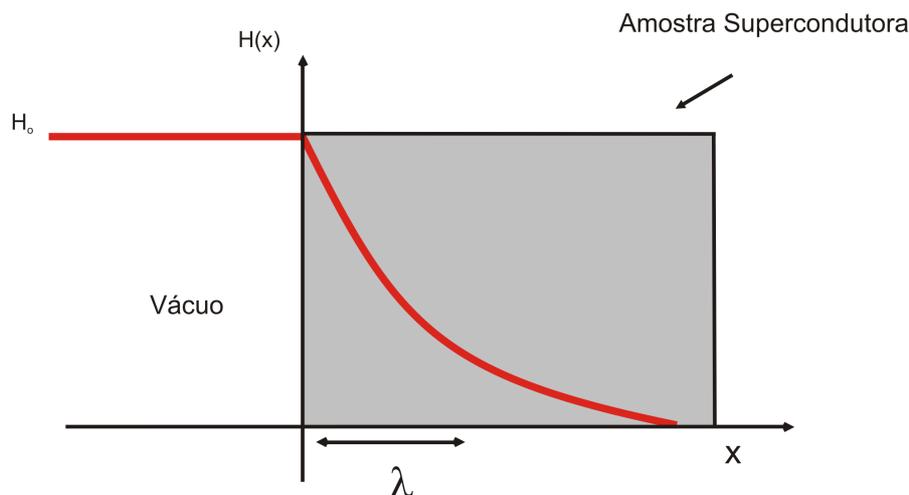


Figura 2.5: Variação espacial do campo magnético $H(x)$. Na figura, H_0 é o campo magnético no vácuo, e λ é a profundidade de penetração.

Em 1957, J. Bardeen, L. N. Cooper e J. R. Schrieffer desenvolveram uma teoria microscópica para a supercondutividade, a Teoria *BCS*. Essa teoria está baseada na descoberta extraordinária de que dois elétrons podem interagir atrativamente, formando um estado ligado, mesmo que esta interação seja extremamente fraca. A princípio, dois elétrons deveriam se repelir eletricamente. No entanto, se esse par de elétrons interagir com a rede de íons positivos, a interação final pode ser atrativa, de tal forma que os dois elétrons se tornam ligados, formando um par de elétrons. A estes pares de elétrons ligados, elétron-rede-elétron, damos o nome de *Pares de Cooper*, e a distância entre eles é chamada de *Comprimento de Coerência* (ζ) [5].

2.6 Classificação dos Supercondutores

A razão entre profundidade de penetração (λ) e comprimento de coerência (ζ) é chamada de parâmetro de Ginzburg-Landau, k :

$$k = \frac{\lambda}{\zeta} \quad (2.6)$$

O parâmetro de Ginzburg-Landau é um importante parâmetro que caracteriza os

materiais supercondutores. Próximo à temperatura crítica, esta razão é aproximadamente independente da temperatura e permite distinguir os materiais em supercondutores do tipo I e tipo II .

Como definido por Abrikosov, se um supercondutor é do tipo I , então $k < 1/\sqrt{2}$. Se $k > 1/\sqrt{2}$, então trata-se de um supercondutor do tipo II [5]. Supercondutores do tipo I apresentam pequena profundidade de penetração e grande comprimento de coerência, enquanto que supercondutores do tipo II apresentam grandes profundidades de penetração e pequenos comprimentos de coerência.

A principal diferença entre esses dois tipos de supercondutores é que eles apresentam respostas diferentes à aplicação de um campo magnético externo. Enquanto o supercondutor do tipo I repele completamente o fluxo de campo magnético de seu interior o supercondutor do tipo II só faz isso abaixo de um campo magnético pequeno, denominado H_{C1} . Aumentando-se ainda mais o valor do campo, acima de H_{C1} , ocorrerá a penetração gradual das linhas de campo, ao longo de certas regiões no interior do material até que, quando o valor de campo superar um determinado valor H_{c2} , haverá a completa penetração de fluxo magnético dentro do material. A figura 2.6 mostra o diagrama de fases para supercondutores do tipo I , enquanto que a figura 2.7 mostra o diagrama de fases para supercondutores do tipo II . Ambas as figuras estão fora de escala.

Assim, dizemos que um supercondutor do tipo I apresenta duas fases: a supercondutora (ou estado Meissner) e a fase normal (estado normal), enquanto que um supercondutor do tipo II apresenta três fases: supercondutora, mista e fase normal.

As regiões dentro do material supercondutor do tipo II onde existe indução magnética são conhecidas como vórtices[6]. Dentro dessas regiões, que têm formato tubular, a supercondutividade é destruída e fora dessas regiões, o material mantém o seu estado supercondutor. Ao redor de cada vórtice existe uma supercorrente que blinda a região supercondutora da região normal dentro dos vórtices [2](figura 2.8). Além disso, cada vórtice carrega uma quantidade de fluxo quantizada, conhecida como *fluxon*, com o

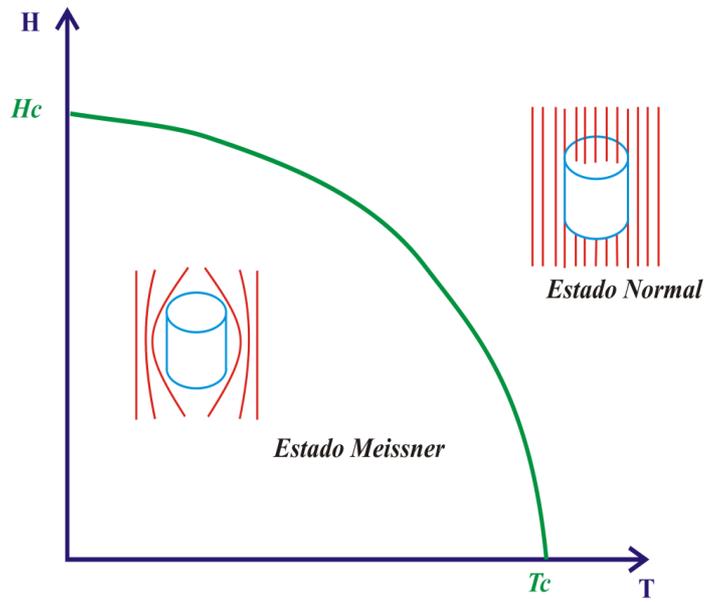


Figura 2.6: Diagrama de fases para um supercondutor do tipo I.

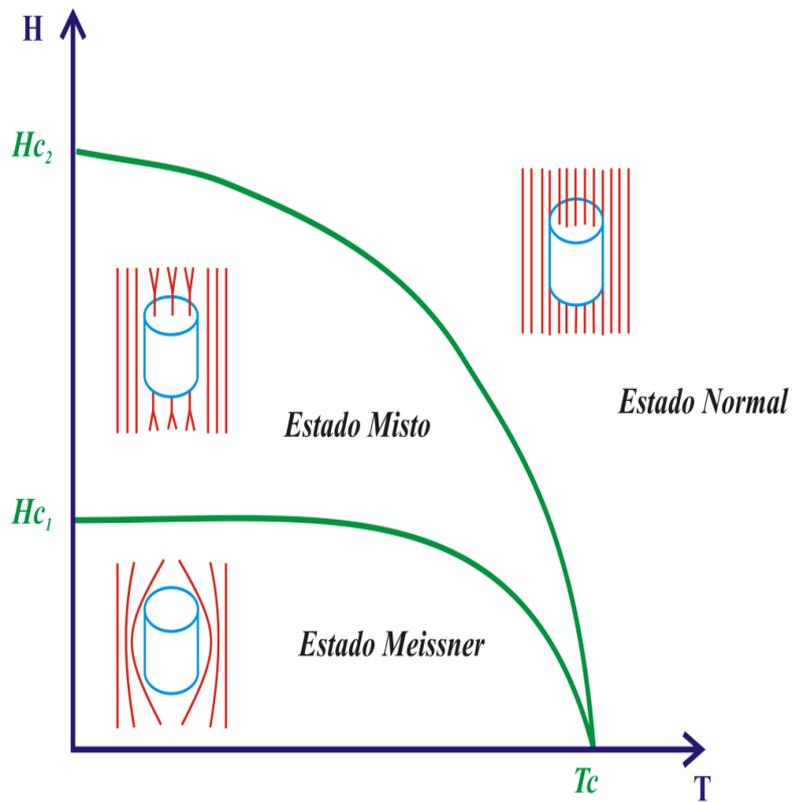


Figura 2.7: Diagrama de fases para um supercondutor do tipo II.

valor de [6]:

$$\Phi = \frac{h}{2e} = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (2.7)$$

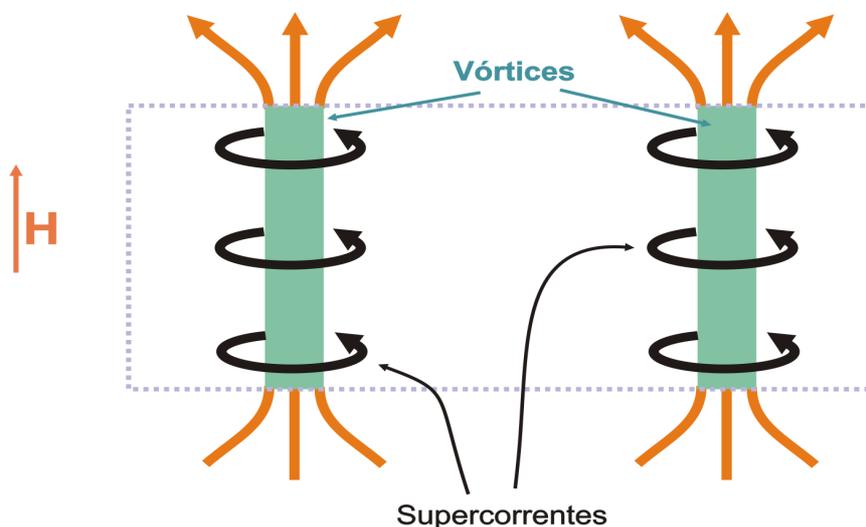


Figura 2.8: Ilustração de vórtices blindados por supercondutores dentro de um material supercondutor do tipo II no estado misto.

Cada vórtice interage com os outros, de maneira que a sua distribuição na superfície do material seja uniforme. A geometria da distribuição dos vórtices é conhecida como rede de Abrikosov, e tem uma geometria triangular ou hexagonal [6].

A compreensão da dinâmica de vórtices é fundamental para este trabalho. Como veremos adiante, é devido ao movimento desta rede que um dispositivo limitador de corrente supercondutor pode proteger um sistema elétrico contra eventuais curtos-circuitos.

2.7 Materiais Supercondutores

O estado supercondutor é observado tanto em elementos puros como em materiais compostos, orgânicos e outros. Muitos desses possuem temperaturas de transição mais elevadas que o mercúrio, mas até hoje não foi descoberto nenhum material com uma T_c próxima da temperatura ambiente. Em elementos puros o estado supercondutor se manifesta apenas em temperaturas muito baixas. Em 1986, Georg Bednorz e Alex Müller descobriram o sistema $LaBaCuO$ com uma temperatura crítica entre 30 K e

40 K. A partir desta data foi descoberta uma grande variedade de novos materiais, os quais vieram a ser chamados de supercondutores de alta temperatura crítica.

Um fato interessante observado é que, em geral, bons condutores não são supercondutores. Como exemplo, podemos citar o cobre, prata, ouro, os metais alcalinos, sódio e potássio que são excelentes condutores de eletricidade à temperatura ambiente mas não são supercondutores em baixas temperaturas. Hidrogênio, o mais simples de todos os elementos, é um gás no estado normal de pressão. Contudo, há suposições de que sob altas pressões ($2 \simeq 3 \text{ Mbar}$), ele se torne um sólido metálico e denso. Cálculos teóricos, baseados na teoria *BCS*, indicam a supercondutividade neste denso sólido metálico com T_c próximo a 240 K [6]. Já o hélio, o segundo elemento mais simples, não se torna supercondutor, mas sim, um superfluido abaixo de 2.2 K. Os semicondutores, *Si* e *Ge*, se tornam supercondutores sob pressão de aproximadamente 2 kbar.[6]

Em 1991 foi descoberto que dopando o *fulereno* (C_{60}), uma forma de carbono sólido que apresenta uma estrutura semelhante a uma bola de futebol (figura 2.9), com um elemento pertencente à família dos metais alcalinos, por exemplo *K* ou *Rb*, este se mostra supercondutor com $T_c = 18 \text{ K}$ para o K_3C_{60} e $T_c = 30 \text{ K}$ para o Rb_3C_{60} [6].

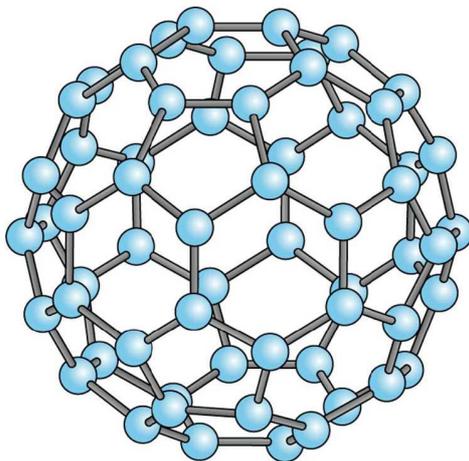


Figura 2.9: Estrutura molecular do fulereno que quando dopado com metais alcalinos apresenta supercondutividade.

2.7.1 Ligas e Compostos

A maioria das ligas e compostos supercondutores apresentam uma temperatura crítica mais elevada do que os elementos metálicos. Esses materiais podem ser ligas metálicas obtidas de uma solução sólida ou compostos intermetálicos. Apesar das ligas supercondutoras apresentarem valores de T_c menores que os supercondutores de alta temperatura crítica, elas são importantes em engenharia. As ligas de Nb , por exemplo, podem ser usadas para levitação eletrodinâmica, equipamentos de imagem por ressonância magnética, aceleradores de partículas e armazenadores de energia devido à sua capacidade de suportar altos campos magnéticos. Os compostos intermetálicos são obtidos combinando-se metais de transição com outros elementos. Estes materiais tendem a apresentar uma estequiometria bem definida e a temperatura crítica depende da mesma. Para esta classe de supercondutores, os melhores resultados são obtidos com os compostos chamados $A-15$. Os compostos $A-15$ têm a fórmula geral A_3B . Os átomos B formam uma subrede cúbica de face centrada, enquanto que os átomos A ocupam as faces do cubo. A estrutura $A-15$ existe em cerca de 70 compostos binários, sendo que o melhor supercondutor obtido foi o Nb_3Ge , cuja temperatura crítica é de 23 K [6].

2.7.2 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica

A história dos materiais supercondutores de alta temperatura crítica tem início em 1986 quando Georg Bednorz e Alex Müller descobriram a supercondutividade no composto cerâmico $LaBaCuO$. Em 1987, M.K. Wu e P.W. Chu, anunciaram a descoberta do sistema $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ com uma temperatura crítica da ordem de 92 K. Um ano depois, em 1988, foram descobertos materiais supercondutores baseados em Bi e Tl que apresentavam T_c de 110 K e 125 K, respectivamente. Já em 1993, compostos cerâmicos com base em Hg apresentaram supercondutividade para 133 K. Através da figura 2.10 e da tabela 2.1 podemos observar a cronologia da evolução da temperatura crítica e os valores de campo magnético crítico de diferentes sistemas supercondutores, respectivamente. Com a descoberta de materiais com T_c acima da temperatura do nitrogênio líquido, ampliou-se o potencial das aplicações tecnológicas supercondutoras.

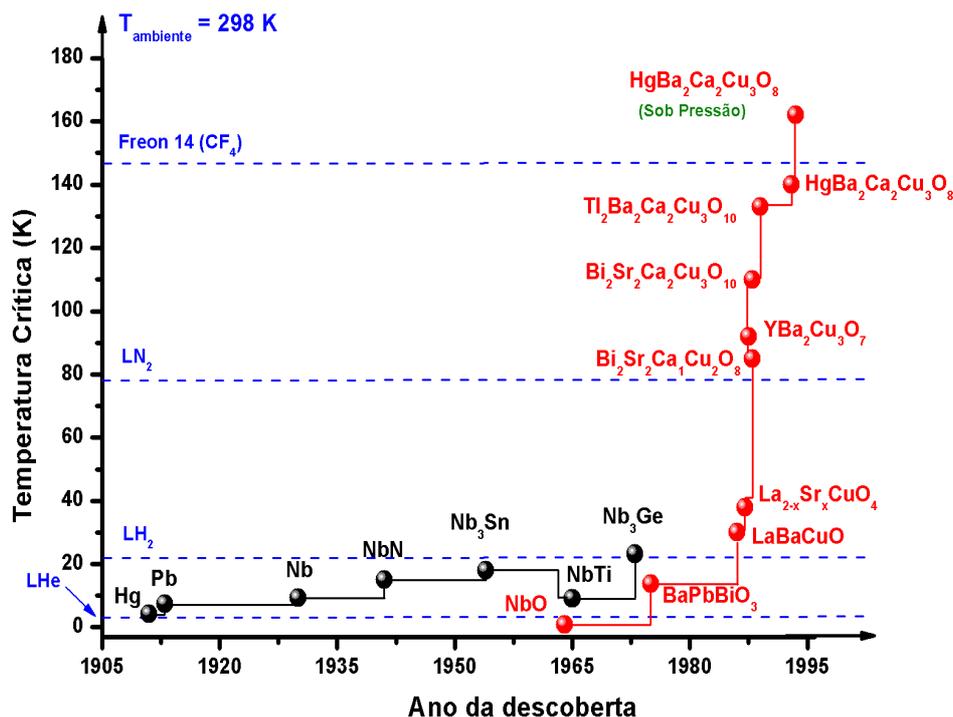


Figura 2.10: Cronologia da evolução de T_c dos materiais supercondutores.

Tabela 2.1: Campo magnético crítico para diferentes materiais supercondutores

Material	B_c (T)	Material	B_c (T)
Hg	0,04	LaBaCuO	30
Nb	0,2	La _{2-x} Sr _x CuO ₄	40
NbN	16	Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O ₇	180
Nb ₃ Sn	24	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₁ Cu ₂ O ₈	225
Nb ₃ Ge	38	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	250
NbAl	33	Tl ₂ Ca ₂ Ba ₂ Cu ₃ O ₁₀	> 130
NbTi	14	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₂ O ₈	162

As principais características dos supercondutores de alta temperatura crítica, são [8]:

1. Alta anisotropia: A anisotropia é notada facilmente nos materiais supercondutores de alta temperatura crítica, ou seja, certas propriedades físicas variam quando medidas em direções diferentes.

2. Existência de camadas estruturais: A grande maioria dos supercondutores de alta temperatura crítica apresenta camadas de $Cu-O$ que são de fundamental importância para a compreensão das propriedades físicas dos sistemas supercondutores uma vez que a supercondutividade nestes materiais é atribuída aos planos de $Cu-O$.
3. Óxidos metálicos: Uma outra característica importante dos supercondutores de alta temperatura crítica são as suas propriedades metálicas. Enquanto os óxidos costumam ser materiais isolantes, os óxidos supercondutores exibem comportamento metálico acima de T_c .
4. Supercondzem com $T_c > 38$ K: A temperatura crítica destes materiais é alta quando comparada com supercondutores metálicos, como por exemplo o Nb_3Ge , que possui T_c igual a 23 K. Podemos citar como exemplo o sistema $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ que possui T_c da ordem de grandeza de 90 K.
5. Pequeno comprimento de coerência: Se recorrermos à teoria BCS , veremos que estes materiais apresentam um pequeno comprimento de coerência. Este valor é de aproximadamente 10 Å, que é comparável ao tamanho da célula unitária, e isto acarreta em profundas conseqüências para a física deste tipo de material.

Atualmente ainda não existem teorias que expliquem todo o fenômeno da supercondutividade em supercondutores de alta temperatura crítica. A teoria BCS descreve corretamente várias propriedades dos supercondutores de baixa temperatura crítica. No entanto, falha em alguns pontos. Por exemplo, ela não prevê a existência de materiais supercondutores com temperaturas críticas acima de 30 K pois, acima dessa faixa, segundo a teoria, a energia térmica seria alta demais e levaria à destruição dos pares de Cooper e, conseqüentemente, do estado supercondutor. Porém, a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica, com valores de T_c que já atingem o patamar de 138 K, demonstrou a limitação da teoria BCS . Desse modo, para os supercondutores de alta temperatura crítica, uma nova teoria terá que ser desenvolvida.

O emprego destes materiais em aplicações tecnológicas tem sido alvo de muitos estudos de grupos de pesquisa. Podemos citar aqui as seguintes aplicações:

- Trens de Levitação;
- Bobinas para ressonância magnética;
- Limitadores de corrente de curto-circuito;
- Motores elétricos;
- Transformadores e geradores elétricos;
- Armazenadores de energia elétrica (*SMES*, *FLYWHEEL*);
- Cabos para transmissão de energia elétrica ;

O Sistema $La_{2-x}M_xCuO_4$

Formado por átomos de lantânio (*La*), cobre (*Cu*) e oxigênio (*O*), este material possui uma temperatura crítica que depende do grau de substituição do átomo de *La* por outros átomos, e torna-se supercondutor a temperaturas críticas que podem atingir até 40 K. Por exemplo: para dois átomos de *La*, ele não é supercondutor; no entanto, quando átomos de bário (*Ba*), estrôncio (*Sr*) ou cálcio (*Ca*) são colocados no lugar do *La*, o material se torna supercondutor. Especificamente para o caso do *Ba* ($La_{2-x}Ba_xCuO_4$), quando *x* atinge o valor de 0,15, a temperatura crítica do material atinge o valor de 30 K.

Este material apresenta uma estrutura cristalina do tipo *perovskita* (figura 2.11) e os parâmetros de rede usais são: $a = 3,77 \text{ \AA}$, $b = 3,76 \text{ \AA}$ e $c = 13,25 \text{ \AA}$ [10].

Com a descoberta desse material (o primeiro material supercondutor de alta temperatura crítica), a comunidade científica da época ligada à supercondutividade passou a ser dominada por grande dinamismo a procura de óxidos supercondutores com um maior valor de T_c . Em 1987, Georg Bednorz e Alex Muller foram agraciados com o prêmio Nobel de Física pela descoberta deste revolucionário material supercondutor.

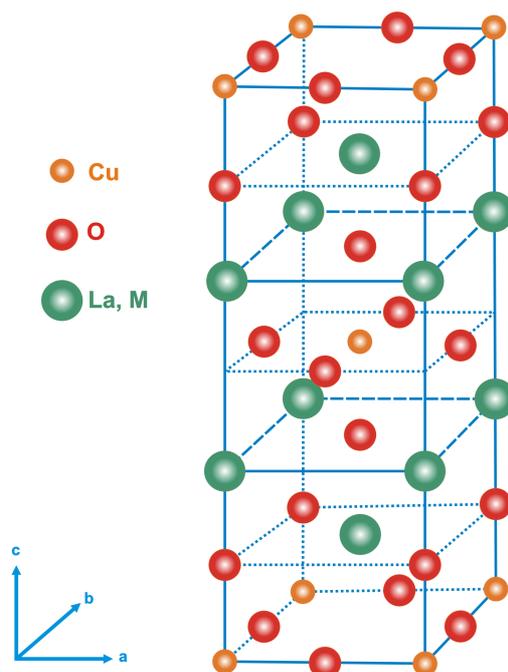


Figura 2.11: Estrutura cristalina do $La_{2-x}Ba_xCuO_4$.

O Sistema $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

Pertencente ao sistema $REBaCuO$, onde RE são os elementos terras-raras, o sistema $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (ou $YBCO$) é um dos compostos supercondutores de alta temperatura crítica mais estudados. Cada célula unitária deste composto apresenta 1 átomo de ítrio, 2 átomos de bário e 3 átomos de cobre. As características deste supercondutor dependem da concentração exata de oxigênio em sua composição. O termo $7 - \delta$ da fórmula química implica em uma certa deficiência de oxigênio. Se $\delta \approx 0$, a fase será de estrutura ortorrômbica, entretanto no caso de $\delta \approx 0,5$ o material terá uma estrutura tetragonal (somente a fase ortorrômbica é supercondutora).

O $YBCO$ também possui uma estrutura cristalina do tipo *perovskita* (figura 2.12) e contém dois planos de CuO_2 separados por átomos de Ítrio. Cada eixo da célula unitária é denominado por uma letra; a , b e c . Os parâmetros de rede típicos são: $a = 3,82 \text{ \AA}$, $b = 3,89 \text{ \AA}$ e $c = 11,7 \text{ \AA}$ [9].

As propriedades supercondutores deste sistema dependem em muito do número de átomos de oxigênio presentes em sua estrutura cristalina. Com aproximadamente 6,5 átomos ele é um isolante, enquanto que com 7 átomos ele se torna supercondutor com

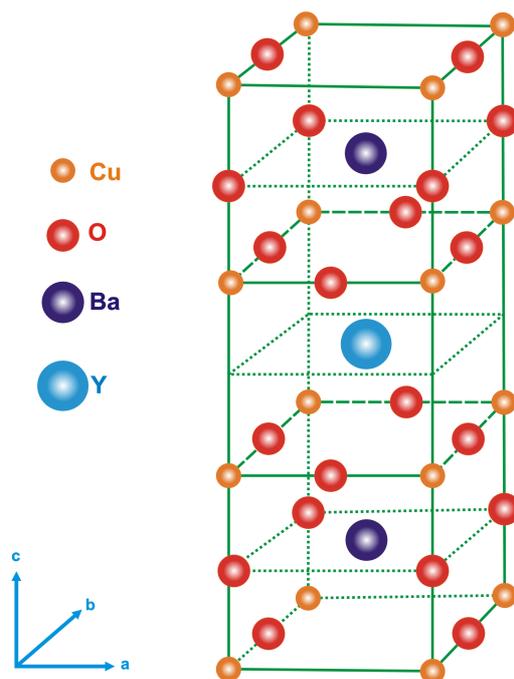


Figura 2.12: Célula unitária do $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

a mais alta temperatura crítica possível para este sistema (aproximadamente 92 K). As propriedades supercondutoras deste sistema praticamente não se alteram quando o ítrio (Y) é substituído pela maioria dos átomos da família das terras-raras (*La, Nd, Gd, Lu, Ho, Sm, Eu, Dy, Er, Tm, Yb, Lu*).

Os Sistemas $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$

Diferentemente do sistema *YBCO* o sistema $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ não apresenta elementos terras-raras. Porém, do ponto de vista estrutural a presença dos planos de CuO_2 em sua estrutura cristalina é a principal característica em comum entre estes compostos. Para este sistema existem três principais compostos, nos quais o valor de n pode apresentar os valores: $n = 1, 2$ ou 3 . Desse modo podemos ter $Bi_2Sr_2Cu_1O_6$ (*Bi2201*) com $T_c \approx 30$ K, $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_8$ (*Bi2212*) com $T_c \approx 80$ K e $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (*Bi2223*) com $T_c \approx 110$ K. A célula unitária do sistema $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ também é ortorrômbica e é ilustrada na figura 2.13.

A tabela 2.2 mostra os parâmetros característicos da rede de cada sistema [11].

Tabela 2.2: Parâmetros de Rede do sistema BSCCO

Fase	a (nm)	b (nm)	c (nm)
Bi2201	0,54	0,54	24,4
Bi2212	0,54	0,54	30,8
Bi2223	0,54	0,54	37,0

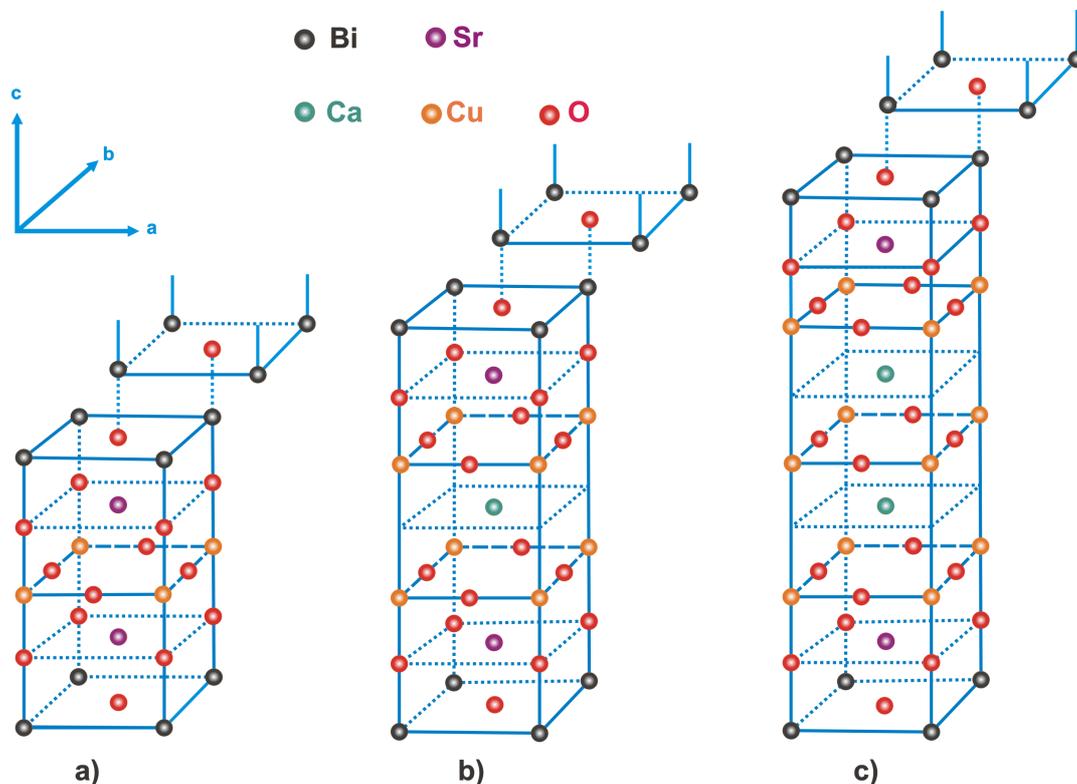


Figura 2.13: Estrutura Cristalina a) Bi2201, b) Bi2212 e c) Bi2223.

O sistema $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ (ou BSCCO, como também é conhecido) apresenta grande importância para a aplicação tecnológica de materiais supercondutores de alta temperatura crítica. O composto Bi2223 é muito utilizado para a produção de fitas e cabos supercondutores [12][13] enquanto que o composto Bi2212 é muito utilizado para produção de compostos massivos (*bulks*), tais como: discos, cilindros, barras, etc.

É importante ressaltar que a grande maioria dos limitadores de corrente supercondutores do tipo resistivo em desenvolvimento usam fitas de YBCO ou Bi2223 revestidas com prata ou blocos massivos de Bi2212.

Capítulo 3

Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

3.1 Introdução

Um curto-circuito é quando ocorre uma conexão de baixa impedância entre dois pontos com diferentes potenciais elétricos. Devido a esta baixa impedância uma corrente muito alta é gerada podendo causar danos a equipamentos que não estejam protegidos. A esta alta corrente damos o nome de corrente de curto-circuito ou, também, corrente de falta (do inglês *fault current*).

Qualquer circuito elétrico está sujeito a um curto-circuito. Estes podem ocorrer em pequena escala (em uma casa por exemplo) ou em grandes dimensões (redes de transmissão). Os principais efeitos negativos de um curto-circuito em um circuito elétrico, são:

- Grandes forças eletrodinâmicas;
- Incêndio de equipamentos e materiais;
- Superaquecimento de condutores;
- Deformação de condutores;
- Áreas sem fornecimento de energia elétrica.

Obviamente estes problemas devem ser evitados. Apresentaremos então neste capítulo a importância dos dispositivos limitadores de corrente para prevenir tais problemas bem como os principais tipos destes utilizados.

3.2 Correntes de Curto Circuito

Em sistemas de potência, curto-circuitos podem ser causados por falhas ou envelhecimento de isolamento, raios que atingem a rede ou até mesmo objetos (galhos, animais, etc) que conectam os cabos condutores (ao solo ou entre os mesmos) e causam o curto [14]. A corrente gerada devido ao curto-circuito pode ser até 100 vezes maior que a corrente nominal (corrente do sistema sob condições normais) do sistema [15]. Contudo o sistema de distribuição é projetado com sistemas de segurança (disjuntores) para suportar tais curto-circuitos e proteger seus equipamentos.

No decorrer dos anos, com o aumento da demanda e da geração de energia elétrica, curtos-circuitos em circuitos elétricos vêm ocorrendo com mais frequência. Tais curtos podem ser atribuídos à novas usinas geradoras de energia que não estavam previstas na época de construção do sistema atual e que agora contribuem para o aumento do nível de corrente de curto-circuito. Usinas próximas aos centros de consumo e o aumento das interconexões do sistema elétrico também contribuem para o aumento das correntes de curto-circuito. Devido a estes fatores, temos a superação das capacidades dos equipamentos, tais como, transformadores, barramentos, disjuntores, ou seja, equipamentos que não foram projetados para suportar os novos níveis de corrente de curto.

Como exemplo, podemos citar o trabalho da referência [16] onde são feitas simulações para algumas áreas do estado do Rio de Janeiro para identificar barramentos em subestações com problemas de superação dos níveis nominais de corrente de curto-circuito. As simulações foram feitas usando o programa *ANAFAS* desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Sistema Eletrobras) onde foram considerados eventos trifásicos e monofásicos que comparam os níveis de curto-circuito nas subestações quando estão ligadas às usinas térmicas não previstas anteriormente. Os resultados deste trabalho podem ser vistos na tabela 3.1[16].

Tabela 3.1: Níveis de curto-circuito trifásico e monofásico[16]

Subestação	Tensão (kV)	Capacidade do Disjuntor (kA)	Nível do Curto (kA)			
			Sem Usina Térmica		Com Usina Térmica	
			Trifásico	Monofásico	Trifásico	Monofásico
Sta. Cruz	138	20	22,1	21,9	28,3	29,8
Área de Fontes	138	40	29,1	19,1	37,7	24,8
Rocha Leão	138	20	7,6	7,5	14,8	13,7
Terminal Sul	138	40	33,9	21,8	36,6	22,4
Cascadura 1	138	40	23,5	15,2	28,9	18,9
Cascadura 2	138	40	34,7	22,7	37,8	23,7
Jacarepaguá	138	37	38,2	36,4	43,2	38,4
Grajaú	500	31,5	12,6	11,7	13,0	12,0
Grajaú	138	50	44,9	38,7	47,8	38,8
São José	500	40	12,7	10,6	20,6	16,7
São José 1	138	50	36,5	33,6	43,0	38,9
São José 2	138	50	33,9	31,1	39,1	35,5
Adrianópolis	138	37	19,9	22,5	29,5	33,0
Adrianópolis	345	25	15,3	15,2	26,0	25,1
Adrianópolis	500	31,5	14,5	12,9	24,0	21,5
Campos	345	25	6,2	5,9	13,5	10,0
Campos	138	20	12,8	14,4	21,7	21,9
C. Paulista	500	31,5	17,7	13,4	27,8	19,4
Angra	500	31,5	15,0	16,5	19,8	20,5

Pela tabela 3.1 fica claro o efeito da inserção de novas usinas (no caso, usinas térmicas) na rede elétrica; os níveis de curto circuito aumentam consideravelmente e, em alguns casos, ultrapassam a capacidade de interrupção dos disjuntores. Os valores em vermelho indicam os disjuntores que apresentam níveis de curto-circuito acima da capacidade de interrupção enquanto que os valores em azul indicam os disjuntores com 90% a 100% da capacidade de interrupção de correntes de curto-circuito, podendo assim, serem chamados de "disjuntores em alerta".

O exemplo do trabalho da referência [16] é muito claro no que se refere ao aumento dos níveis de corrente de curto-circuito em subestações brasileiras. Este tipo de estudo é de fundamental importância para que possamos compreender o efeito de novas usinas geradoras de energia quando inseridas em uma rede elétrica que não está devidamente

preparada para suportar aumentos nos níveis de corrente. E é devido a estes aumentos nos níveis de corrente que o uso de limitadores de corrente de curto-circuito se torna fundamental para a eficaz segurança dos equipamentos superados. Nas próximas seções mostraremos os principais tipos de limitadores de corrente de curto-circuito atualmente em operação.

3.3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

Com o objetivo de reduzir os níveis de corrente de falta para níveis aceitáveis para os equipamentos existentes, dispositivos limitadores de corrente têm sido desenvolvidos para prover adequada proteção ao sistema até a completa abertura dos disjuntores. Dentre os principais tipos de limitadores de corrente, podemos citar os seguintes:

- Reator limitador a núcleo de ar;
- Dispositivo pirotécnico;
- Dispositivos com Tecnologia *FACTS*;
- Disjuntores eletrônicos de abertura rápida;
- Limitadores de Corrente Supercondutores (*SCFCL*);

As características desejáveis para os limitadores de corrente são [17]:

- Impedância baixa ou nula durante a operação normal do sistema;
- Impedância alta sob condições de falta;
- Transição rápida do modo normal para o modo limitador;
- Recuperação rápida do modo normal depois da interrupção de uma falta;
- Baixas perdas durante operação normal;
- Compatibilidade com os esquemas de proteção existentes ou planejados;

- Alta confiabilidade durante longos períodos;
- Baixa necessidade de manutenção;
- Baixo impacto no meio ambiente;
- Não sofrer deterioração no comportamento durante a vida útil;
- Volume e peso limitados;
- Baixo custo.

Nas seções seguintes, daremos detalhes sobre os principais tipos de limitadores de corrente de curto-circuito.

3.3.1 Reator a Núcleo de Ar

O reator a núcleo de ar é o dispositivo limitador de corrente com maior experiência de utilização para a redução das correntes de curto-circuitos e é o único dispositivo disponível comercialmente para todos os níveis de tensão [18].

Este dispositivo de proteção é basicamente uma grande bobina que é ligada em série com o sistema a ser protegido. Em condições normais de operação este dispositivo apresenta uma impedância Z_1 fixa. Porém, em caso de curto-circuito, a impedância deste reator se altera para um valor Z_2 , sendo $Z_2 > Z_1$. Dessa forma, este reator insere uma impedância antes inexistente no sistema, reduzindo o nível da corrente de curto circuito.

Existem algumas características importantes que sempre devem ser levadas em consideração a respeito dos reatores a núcleo de ar. Uma delas é o fato de que estes dispositivos apresentam perdas consideráveis durante a operação normal do sistema, causadas por quedas de tensão no sistema e perdas por efeito Joule. No entanto, os problemas de queda de tensão podem ser amenizados com a utilização de banco de capacitores.

Outra característica importante que sempre deve ser levada em consideração na instalação destes dispositivos é o fato das elevadas magnitudes de campo magnético

produzidas por estes dispositivos que geram grandes forças de repulsão magnética na ocorrência de um curto-circuito. Sendo assim, é necessário considerar o espaçamento entre cada reator, o que pode ser um empecilho para a subestação a ser protegida caso esta não apresente espaço suficiente para a instalação dos reatores. Estes reatores também tem a desvantagem de apresentarem um longo tempo de recuperação após a atuação.

No Brasil, algumas subestações utilizam este tipo de limitador [16]:

- Subestação de Jaguará - 138 kV - MG
- Subestação de Angra - 138 kV - RJ
- Subestação de Mogi das Cruzes - 345 kV - SP
- Subestação de Tucuruí - 500 kV - PA

A figura 3.1 nos mostra reatores limitadores a núcleo de ar instalados na subestação de Tucuruí.



Figura 3.1: Fotografia dos Reatores limitadores na subestação de Tucuruí - PA.

3.3.2 Dispositivo Pirotécnico

Dispositivos pirotécnicos, assim como os reatores a núcleo de ar, também possuem uma vasta experiência de utilização já que foram desenvolvidos na década de 50. No

entanto passaram a ser utilizados no Brasil somente a partir da década de 90 pelas empresas *CSN*, *CENIBRA*, *ARACRUZ*, *ACESITA*, *MANENESMANN* e *CST Steel* [19].

Dispositivos pirotécnicos têm capacidade para interromper elevados níveis de corrente de curto-circuito em tempos inferiores a $1/4$ de ciclo [20] devido ao fato do dispositivo possuir uma carga explosiva e elementos fusíveis para a interrupção do circuito. Basicamente, um dispositivo pirotécnico consiste em um condutor principal projetado para conduzir uma corrente nominal, onde existe uma pequena carga explosiva com energia suficiente para interromper a passagem de corrente. Em paralelo com este condutor existe um fusível limitador de corrente. Então, na ocorrência de um curto circuito, a carga explosiva no condutor é acionada e a corrente passa a fluir pelo fusível em paralelo, sendo limitada dentro de até 0,5 ms [17]. Na figura 3.2 observamos o esquema descrito.

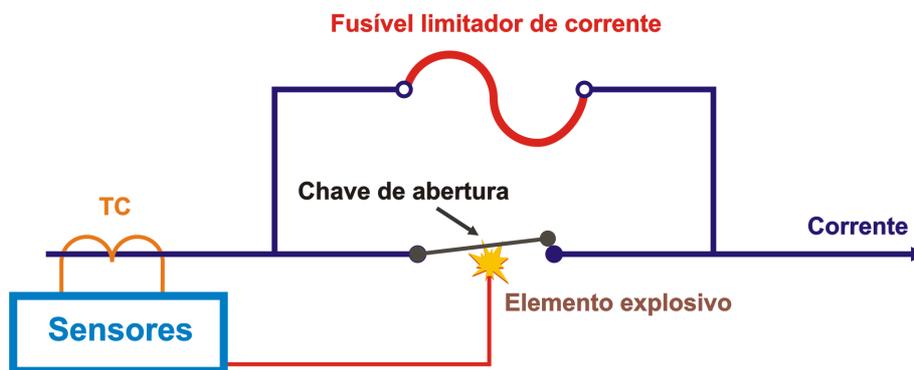


Figura 3.2: Esquema de um limitador de corrente pirotécnico.

Existem algumas desvantagens na utilização de dispositivos pirotécnicos. Uma delas é o fato de que este tipo de limitador precisar ser monitorado por equipamentos eletrônicos que controlam o acionamento do dispositivo no instante do curto-circuito. Se ocorrer destes sensores falharem, o limitador pirotécnico não irá atuar, deixando o sistema vulnerável à corrente de curto-circuito.

A outra principal desvantagem é que após o curto-circuito o dispositivo é desconectado da rede, sendo necessária a substituição das partes internas e durante este período não há fornecimento de energia elétrica às cargas conectadas à rede afetada.

Devido ao emprego de um fusível em paralelo, estes dispositivos tem seu uso restrito a tensões de até 40 kV[21].

3.3.3 Controlador de Potência Interfases

Desenvolvidos pela empresas Asea Brown Boveri (*ABB*) e Hydro Quebeq (*CITEQ*) os controladores de potência interfases são equipamentos com o propósito de controlar o fluxo de potência ativa e reativa em interligações em corrente alternada que podem ser aplicados na solução de alguns problemas de operação em regime permanente da rede, tais como [19]:

- Interligações de redes assíncronas;
- Interligações de subsistemas síncronos;
- Aumento da capacidade de transformação sem elevar os níveis de correntes de curto-circuito;
- Controle do fluxo de potência em linhas de transmissão.

Estes dispositivos também são, comumente, chamados de *IPC*, devido a seu nome na língua inglesa *Intherphase Power Controllers*. São constituídos de equipamentos como capacitores, indutores, transformadores defasadores e módulos de eletrônica de potência. É uma versátil tecnologia caracterizada por, pelo menos, dois ramos paralelos conectados entre duas barras. Em um dos ramos temos uma reatância indutiva e no outro ramo, uma reatância capacitiva. Normalmente, cada ramo possui um elemento defasador [22]. Este elemento de defasagem pode ser [16]:

- Transformador defasador;
- Conexões de transformadores convencionais;
- Conexões entre fases diferentes de dois sistemas síncronos.

De uma maneira geral, os *IPC*'s podem ser representados através de um circuito equivalente genérico, que pode ser visto na figura 3.3.

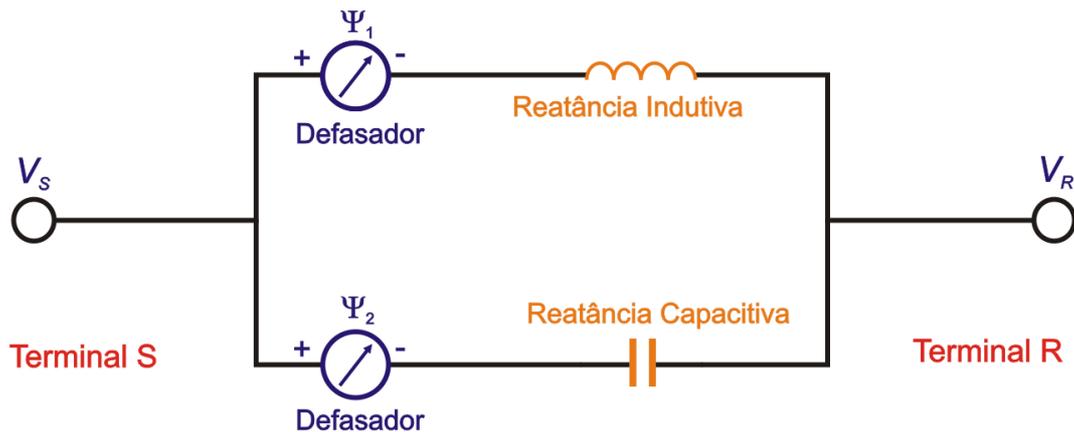


Figura 3.3: Diagrama esquemático de um IPC com n ramos.

3.3.4 Dispositivo com Tecnologia *FACTS*

A sigla *FACTS* provem da língua inglesa *Flexible AC Transmission Systems* e trata da aplicação de eletrônica de potência, e outros controladores estáticos, no controle rápido e eficiente do fluxo de potência ativa e reativa. Esses dispositivos também podem ser usados para amortecimento de oscilações eletromecânicas, aumento da capacidade de transmissão e limitação de corrente de curto-circuito [19].

A tecnologia *FACTS* surgiu nos Estados Unidos, na final da década de 80 e vem sendo aplicada em sistemas de potência em todo mundo como solução técnica para diferentes problemas relacionados à rede de distribuição e é dividida em três categorias [19]:

- Dispositivos *FACTS shunt* (derivação);
- Dispositivos *FACTS série*;
- Dispositivos *FACTS série e shunt* simultaneamente.

Dentre estas três categorias, podemos citar alguns dispositivos com tecnologia *FACTS* [16]:

- Compensadores estáticos – *SVC* (*Static Var Compensator*);
- Reator controlado por tiristor – *TCR* (*Thyristor Controlled Reactor*);

- Capacitor chaveado por tiristor – *TSC (Thyristor Switched Capacitor)* ;
- Capacitor série chaveado por tiristor – *TSSC (Thyristor Series Switched Capacitor)*;
- Capacitor série controlado por tiristor – *TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)* ;
- Transformador defasador – *PST (Phase Shift Transformer)*;
- Compensador síncrono estático – *STATCOM (Static Synchronous Compensator)*;
- Compensador síncrono estático série – *SSSC (Static Synchronous Series Compensator)*;
- Controlador universal de fluxo de potência – *UPFC (Unified Power Flow Controller)*;
- Controlador de fluxo de potência da rede – *GPFC (Grid Power Flow Controller)*

O custo desta tecnologia ainda é alto, de modo que sua instalação apenas para a função de limitação de corrente pode ser inviável. Por esta razão, é necessário que tal dispositivo ofereça benefícios além da limitação de corrente para que o custo seja compensado[17]. No Brasil, são utilizados quatro dispositivos com tecnologia FACTS nas subestações de Imperatriz e Serra da Mesa (500 kV) com a principal função de amortecimento de oscilações de potência, podendo, no entanto, atuar como limitadores de corrente quando necessário [16]. Além disso, estes dispositivos dependem de sensores para atuar como limitadores de corrente e isto pode ser visto como uma desvantagem já que uma possível falha nos sensores faria com que não houvesse uma proteção adequada ao sistema.

3.3.5 Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida

Os disjuntores convencionais podem possuir tempo de abertura acima de um ciclo sendo considerados lentos quando comparados com as chaves semicondutoras de eletrônica de potência.

Capítulo 3. Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

Disjuntores de abertura rápida são disjuntores constituídos de chaves eletrônicas que são capazes de atuar em até 0,5 ciclo. No entanto, as chaves de estado sólido que constituem estes disjuntores provocam perdas em regime permanente maiores que os disjuntores convencionais[23].

Capítulo 4

Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores

4.1 Introdução

Limitadores de corrente de curto-circuito à base de materiais supercondutores de alta temperatura crítica (*SCFCL* ou *SFCL*, do inglês *Superconducting Fault Current Limiter*) são dispositivos promissores para sistemas onde existem problemas com o aumento dos níveis de corrente de curto-circuito [24]. As principais características destes limitadores não são encontradas em dispositivos limitadores convencionais, e são:

- Rápido tempo de atuação \implies atuam com eficiência em meio ciclo de corrente;
- Grande capacidade de limitação \implies limitadores supercondutores do tipo resistivo pode limitar a corrente de falta em em até 10 vezes dependendo da configuração do circuito;
- Não precisa ser substituído \implies quando submetido a uma corrente de falta o limitador supercondutor apenas transiciona ao seu estado normal. Após a falta é necessário apenas um determinado tempo para que o material supercondutor do limitador retorne ao seu estado de resistividade nula, podendo assim, operar novamente;

- Atuam sem auxílio de sensores \implies alguns limitadores convencionais necessitam de sensores ou chaves para que a falta possa ser detectada e então ser acionada a limitação. Nos limitadores supercondutores a limitação ocorre devido à propriedade intrínseca do material em alterar o valor de sua resistividade quando submetido à altas correntes;
- São leves e menores (especialmente no caso do tipo resistivo) quando comparados com os demais limitadores;
- São "invisíveis" em condições normais \implies sob condições normais de operação, estes dispositivos apresentam resistência desprezível e podem ser projetados para apresentarem indutância reduzida, evitando assim, quedas de tensão e dissipação de energia;
- Falha segura \implies mesmo se o limitador falhar, ele irá limitar a corrente. Um defeito no sistema criogênico ou qualquer outro problema durante um curto circuito, fará com que o material transite para o estado normal e apresente resistividade diferente de zero, limitando a corrente de curto-circuito.

O emprego de materiais supercondutores em aplicações tecnológicas tem se desenvolvido amplamente após a descoberta de materiais supercondutores de alta temperatura crítica. O primeiro grande teste realizado com um limitador supercondutor foi em 1996 quando a Asea Brown Boveri (*ABB*) testou um limitador do tipo indutivo em uma rede suíça de 10 kV, com potência de 1,2 MV A [25].

A empresa alemã Nexans Superconductors conseguiu desenvolver em 2003 um bom limitador resistivo, denominado *CURL10*, fazendo uso do material *MCP-Bi-2212*. São limitadores em formato de bobina com duplo enrolamento de material supercondutor e foram testados em uma rede de distribuição alemã de 10 kV, com potência de 10 MV A [25]. Porém, estes limitadores apresentam um custo elevado.

Limitadores de corrente feitos com fios e fitas supercondutoras também foram desenvolvidos e podem atingir densidades de corrente crítica da ordem de 10^4 A/cm². O projeto de limitadores baseados em fios supercondutores de segunda geração (*YBCO*)

desperta grande interesse, já que estes podem ocasionar numa redução de custo [26] e numa larga escala de produção. A maioria dos protótipos ainda estão em nível de testes e fase de homologação. Os primeiros limitadores supercondutores comerciais foram instalados pela Nexans Superconductors GmbH para uma rede de distribuição (12 kV). A tabela 4.1 resume os principais projetos em desenvolvimento, todos trifásicos (com exceção do protótipo da ABB de 6,4 MV A, que é monofásico).

Tabela 4.1: Lista dos Principais protótipos de SCFL em desenvolvimento[26]

Empresa	Tipo	Tensão Nominal	Corrente Nominal	Potência	Ano
ABB	Indutivo	10,5 kV	70 A	1,2 MV A	1997
ABB	Indutivo	8,3 kV	200 A	1,6 MV A	1999
GA	Ponte	12,5 kV	1200 A	25 MV A	1999
EA Technol.	Resistivo/Indutivo	11 kV	400 A	7,5 MV A	1999
Siemens	Resistivo	7,2 kV	100 A	1 MV A	2000
Siemens	Resistivo (CC)	0,9 kV	1000 A	0,9 MV A	2004
ABB	Resistivo	8 kV	800 A	6,4 MV A	2000
ACCEL/Nexans	Resistivo	10 kV	600 A	10 MV A	2004
IGC Superpower	Matriz/Resistivo	138 kV	2500 A	x	2006
KEPRI	Resistivo	22,9 kV	600 A	x	2007
Toshiba	Ponte	67 kV	3000 A	x	2009
KEPRI	Resistivo	154 kV	2000 A	x	2012
NEXANS	Resistivo	110 kV	x	x	x
Siemens	Resistivo	115 kV	1500 A	x	x

Os maiores desafios para a comercialização destes dispositivos encontram-se no alto custo dos materiais supercondutores e dos sistemas de refrigeração. No entanto avanços consideráveis no processamento de materiais supercondutores e nas tecnologias de refrigeração a baixas temperaturas indicam que, brevemente, estes dispositivos deverão entrar no mercado.

Os possíveis pontos de uma rede de distribuição onde é possível a instalação para estes dispositivos limitadores são [27] (figura 4.1):

- Conexão entre barramentos;

- Alimentadores;
- Transformadores;
- Geradores Independentes (*Independent Power Producer - IPP*);

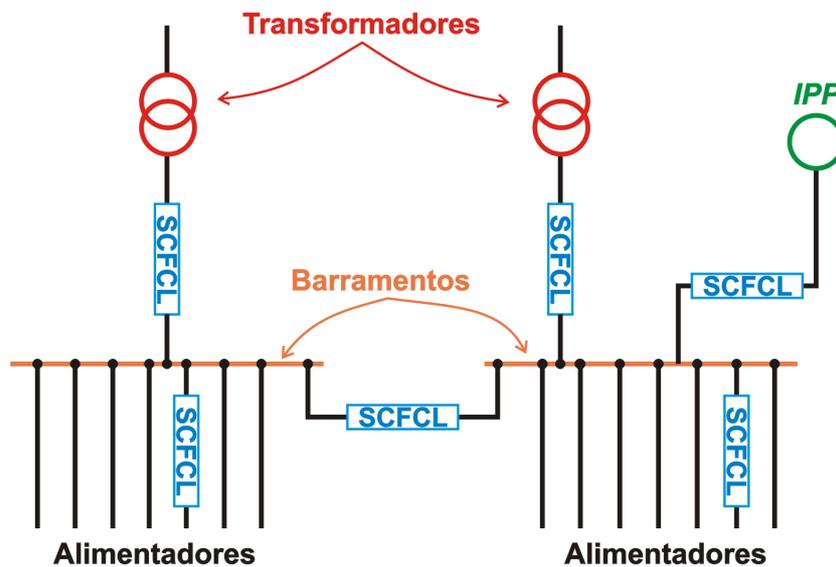


Figura 4.1: Possíveis conexões para dispositivos limitadores de corrente supercondutores.

4.2 Tipos de Limitadores Supercondutores

Existem três principais tipos de limitadores de corrente supercondutores que se baseiam nas duas principais propriedades dos materiais supercondutores: a resistência nula e o efeito Meissner:

- Resistivo;
- Indutivo;
- Híbrido.

4.2.1 Tipo Resistivo

Este tipo de limitador é composto de um elemento supercondutor inserido em série no sistema a ser protegido (figura 4.2). Em condições normais de operação, o material supercondutor se encontra no estado de resistência nula e não dissipa energia. Na ocasião de um curto-circuito, o material supercondutor transiciona para o estado normal, se tornando assim, um resistor ôhmico que passa a dissipar energia, reduzindo então a corrente de curto-circuito. O processo físico de transição entre os estados supercondutor e normal será abordado posteriormente, ainda neste mesmo capítulo.

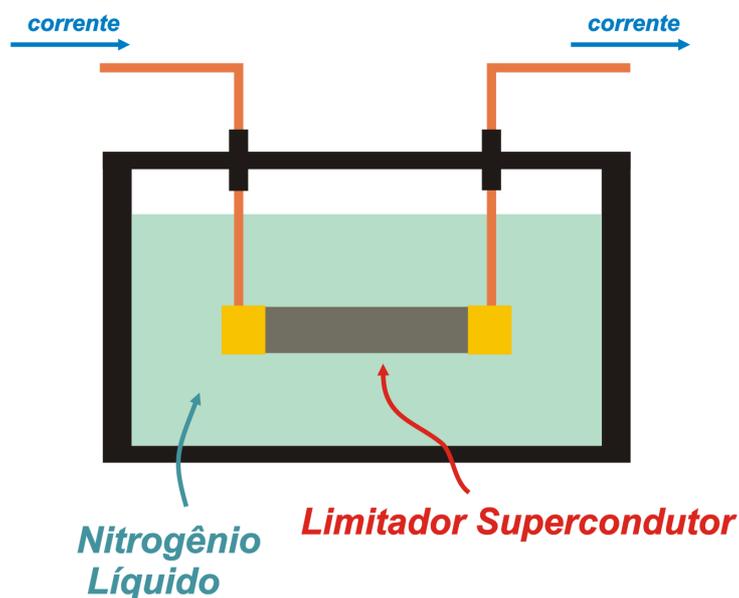


Figura 4.2: Ilustração de um Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo.

Atualmente os limitadores resistivos podem ser encontrados como blocos massivos (*bulks*) ou fitas. Normalmente os limitadores massivos são compostos da cerâmica supercondutora *Bi2212* enquanto que os limitadores com fitas supercondutoras podem ser compostos de *Bi2223* ou *YBCO*.

Estes limitadores tem as vantagens de serem compactos, capacidade de redução do curto-circuito maior e mais rápida quando comparado ao tipo indutivo (próxima seção) e são ideais para a aplicação nas redes de distribuição de energia pois não exigem bancos de capacitores para a correção do fator de potência como ocorre nos indutivos[28].

4.2.2 Tipo Indutivo

O limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo (também conhecido como núcleo blindado) é, basicamente, um "transformador". O enrolamento primário é conectado em série com o sistema a ser protegido. O enrolamento secundário é supercondutor e na maioria das vezes possui somente uma espira, que é um invólucro cilíndrico, chamado de blindagem, conforme podemos observar na figura 4.3. Assim, diferentemente do limitador do tipo resistivo, o limitador indutivo só está acoplado magneticamente com o circuito a ser protegido.

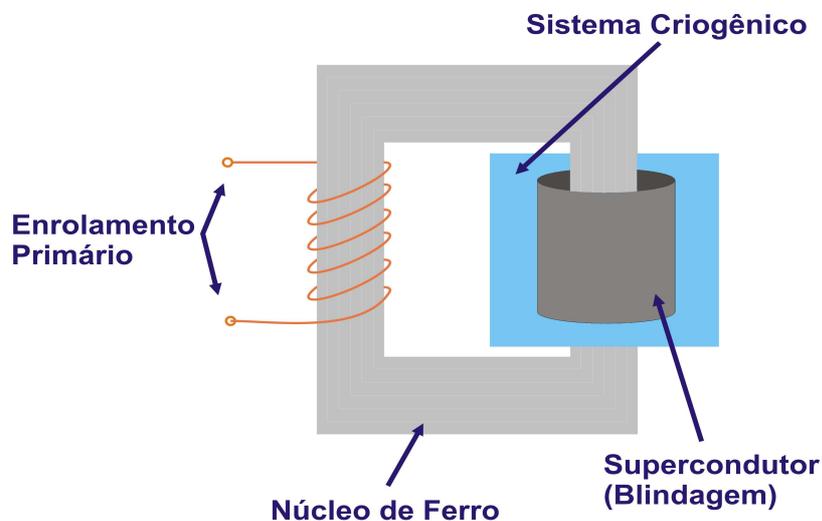


Figura 4.3: Limitador de corrente supercondutor indutivo.

O principal conceito deste limitador se baseia nas propriedades magnéticas dos materiais supercondutores. Sob condições normais de operação, o campo magnético, gerado pela bobina de cobre, é blindado pelo invólucro supercondutor (efeito Meissner) e não atinge o núcleo de ferro. Devido a essa blindagem, a impedância do sistema é baixa.

No caso de um curto-circuito, a corrente no enrolamento primário aumenta de maneira considerável, resultando, conseqüentemente, em um aumento de fluxo magnético no enrolamento secundário. Conforme o fluxo de campo magnético aumenta, as linhas de fluxo começam a penetrar mais no material supercondutor (vórtices) e irão, também, penetrar no núcleo de ferro do transformador fazendo com que a impedância do sistema também aumente, diminuindo assim a amplitude da onda de corrente de

curto-circuito.

Em relação ao tipo resistivo, este apresenta maiores pesos e tamanhos devido ao grande volume de ferro necessário para a construção do núcleo magnético do limitador[28].

4.2.3 Tipo Híbrido

O limitador supercondutor do tipo híbrido é um dispositivo misto que apresenta as duas propriedades citadas nas seções anteriores; resistiva e indutiva. Consiste de um transformador com um limitador supercondutor resistivo conectado em série com o enrolamento secundário do transformador, enquanto que o enrolamento primário do transformador é conectado em série com a rede a ser protegida, conforme podemos observar na figura 4.4.

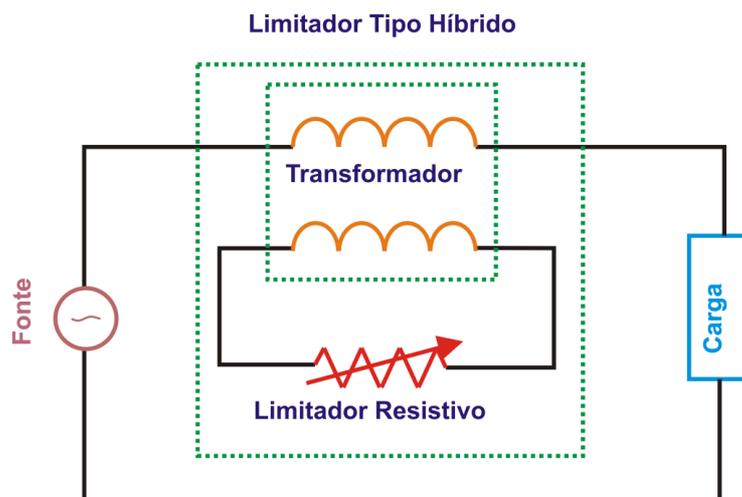


Figura 4.4: Limitador Supercondutor do Tipo Híbrido

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

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

4.3 Princípios de um Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor

4.3.1 Dinâmica de Vórtices

Os três principais tipos de limitadores de corrente a base de materiais supercondutores apresentados nas seções precedentes deste capítulo são constituídos de materiais supercondutores do tipo *II*. Vimos no capítulo 2 que este tipo de material supercondutor apresenta o estado misto, ou seja, um estado onde é possível existir regiões onde a indução magnética dentro do material seja diferente de zero. A estas regiões damos o nome de vórtices. A interação entre estes vórtices determinam a distribuição destes no volume supercondutor, formando então a rede de Abrikosov, como dito anteriormente. Como veremos a seguir, a compreensão do comportamento destes vórtices dentro do material supercondutor é de fundamental importância para compreendermos como ocorre a limitação de corrente por um material supercondutor do tipo resistivo.

Pode ser provado que a interação entre dois vórtices (vórtices 1 e 2 na figura 4.5) da rede de Abrikosov é uma força de repulsão dada por:

$$\vec{f}_2 = \vec{J}_1 \times \vec{\Phi}_o \quad (4.1)$$

Onde \vec{f}_2 é a força no vórtice 2 causada pela supercorrente \vec{J}_1 no vórtice 1 e $\vec{\Phi}_o$ é o valor do *fluxon* definido na equação 2.7. A figura 4.5 ilustra esta força de repulsão entre dois vórtices.

Se em adição às supercorrentes geradas pelos vórtices houverem correntes de transporte atravessando o material, resultando numa densidade total de corrente \vec{J}_s , então podemos generalizar a força \vec{f}_2 para todo o material, obtendo assim uma força por unidade de volume, que pode ser escrita como [29]:

$$\vec{F}_L = \vec{J}_s \times \vec{B} \quad (4.2)$$

Esta força nada mais é que a Força de Lorentz e irá, então, agir sobre toda a rede

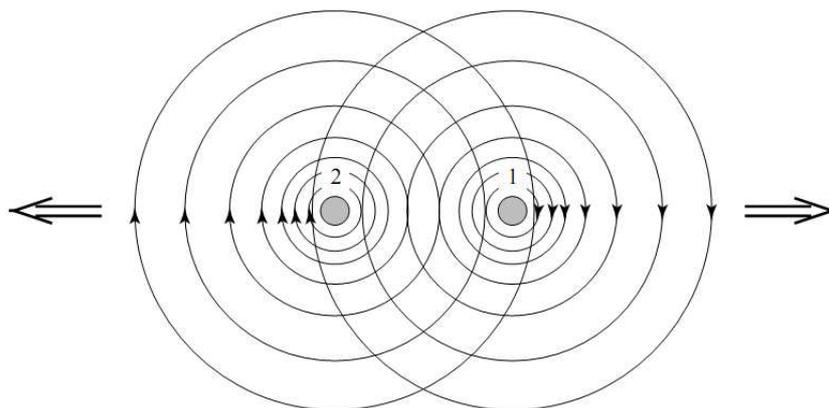


Figura 4.5: Interação repulsiva entre dois vórtices adjacentes.

de Abrikosov, fazendo com que esta se mova no sentido perpendicular à passagem de corrente. Este é um problema básico encontrado quando tratamos da aplicações de materiais supercondutores uma vez que o movimento da rede de vórtices irá causar a dissipação de energia. Para prevenir este deslocamento da rede uma força de aprisionamento F_R de igual magnitude a F_L deverá existir (figura 4.6). Quando $F_R > F_L$ a rede de vórtices não irá se deslocar; contudo se $F_R < F_L$ a rede irá se mover.

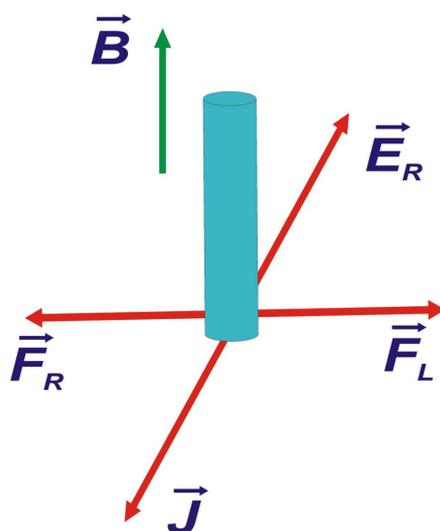


Figura 4.6: Vórtice em um supercondutor sujeito as forças de pinning e de Lorentz

O aprisionamento de vórtices (*pinning*) resulta de variações locais de ξ , λ ou H_c devido às impurezas, fronteiras de grão, precipitados, poros e outros defeitos que causem variações locais da energia livre por unidade de comprimento de linha de fluxo, fazendo

com que algumas locações para os vórtices sejam favorecidas. As heterogeneidades mais efetivas para o aprisionamento de vórtices devem ter escala de tamanho da ordem de ξ (comprimento de coerência).

No caso de um sistema ideal, no qual a força lateral F_L não seja contrabalanceada por algum defeito de aprisionamento da linha de fluxo, ocorrerá um movimento lateral da rede de vórtices, como mostra a figura 4.7.

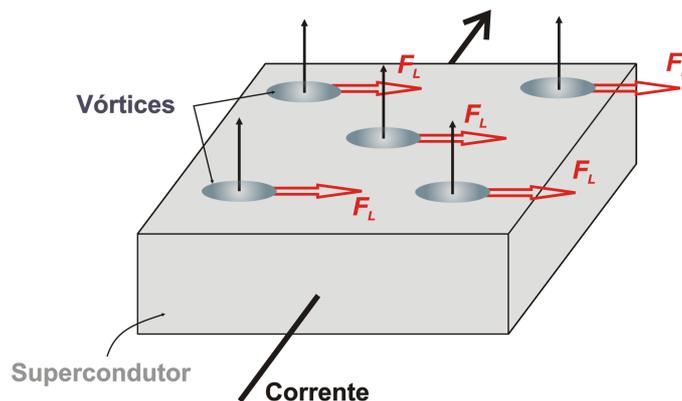


Figura 4.7: Movimento da rede de vórtices devido a uma corrente de transporte.

Se estes vórtices se moverem com uma velocidade v_d , haverá uma força eletromotriz induzida

$$\varepsilon = \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (4.3)$$

ou, equivalentemente, um campo elétrico induzido

$$\vec{E}_R = \vec{B} \times \vec{v}_d \quad (4.4)$$

que é paralelo à direção da densidade de corrente de transporte \vec{J} . Como resultado, teremos uma tensão elétrica associada ao movimento do vórtice gerando a dissipação de energia, uma vez que é necessário gastar energia para forçar uma região, antes supercondutora, a tornar-se normal. Nota-se que não se trata de um processo resistivo resultante de um espalhamento microscópico, como num condutor normal. Porém, o efeito é o mesmo pois a potência transportada pela densidade de corrente \vec{J} é dissipada para movimentar lateralmente o sistema de vórtices e aparece no supercondutor na

forma de calor, ocasionando um aumento de temperatura no material podendo levar este a transitar do estado supercondutor para o estado resistivo [24].

Neste contexto é importante saber que a densidade de corrente crítica J_c pode ser definida, somente para os supercondutores do tipo *II*, como a máxima densidade de corrente que um supercondutor pode transportar sem que exista o movimento de vórtices, diferentemente da definição de densidade de corrente crítica utilizada para supercondutores do tipo *I* onde J_c é a densidade de corrente crítica responsável pela quebra dos pares de Cooper. A densidade de corrente responsável pela quebra dos pares de Cooper em supercondutores do tipo *II* é conhecida como corrente de deparamento (*depairing current density*) e seu valor pode ser bem superior ao valor da densidade de corrente J_c que movimenta os vórtices. O valor da densidade de corrente de deparamento é uma propriedade intrínseca dos materiais supercondutores enquanto o valor de J_c é uma propriedade extrínseca e depende do modo de fabricação do material. Dessa maneira os limitadores de corrente supercondutores são produzidos de maneira a suportar as correntes nominais das redes de distribuição sem que transitem para o estado normal, passando a apresentar resistência elétrica apenas quando a corrente do sistema aumentar de maneira significativa, que é o caso de corrente de curto-circuito. Em outras palavras, a corrente nominal de uma rede elétrica deve ter um valor de modo a não superar a J_c do limitador supercondutor ligado a ela, para que não ocorra a dissipação de energia quando a rede opera normalmente. Na ocorrência de um curto-circuito, a densidade de corrente que atravessa o supercondutor será maior que J_c ocasionando, então, o movimento da rede de vórtices e, conseqüentemente, resultando numa dissipação de energia na forma de calor que fará com que o material se aqueça e atinja uma temperatura maior que T_c . Como consequência deste aumento de temperatura acima de T_c , o material transita para o estado normal passando a apresentar resistência elétrica e, desse modo, limitando a corrente de curto-circuito.

4.3.2 A Curva $E - J$

O valor da densidade de corrente crítica é fundamental quando estudamos limitadores de corrente supercondutores. O valor de J_c pode ser determinado quando adotamos certos critérios de medição. Esses critérios podem ser o campo elétrico ou a resistividade do material, sendo mais comum o uso do critério de campo elétrico crítico no valor de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ [31]. Isto significa que, à medida que aplicamos uma densidade de corrente J no material supercondutor, notamos que o valor do campo elétrico passa a aumentar e o valor de densidade de corrente crítica é determinada quando este campo elétrico atinge valor de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$. Na figura 4.8 apresentamos um esboço da curva $E - J$ onde são apresentados os principais estágios da transição de um material supercondutor para o estado normal.

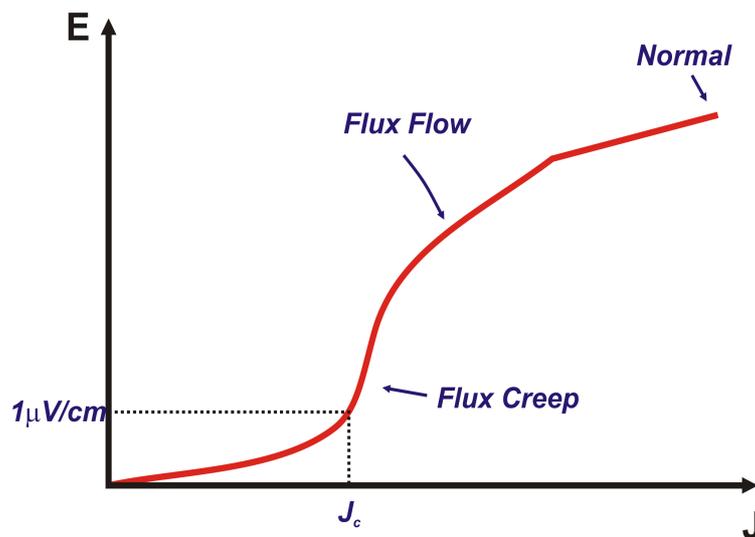


Figura 4.8: Esboço da curva $E - J$ para a determinação do valor de J_c e as respectivas fases da transição supercondutora-normal.

Pela figura podemos identificar três principais estágios na transição:

- *Flux Creep* \Rightarrow Neste estágio, o movimento de vórtices ocorre devido à corrente de transporte que percorre o material. O campo elétrico é gerado devido a densidades de corrente que geram as forças Lorentz F_L , na ordem de grandeza das forças de aprisionamento F_R , acarretando em um lento movimento dos vórtices.
- *Flux Flow* \Rightarrow Neste estágio o movimento dos vórtices também é devido à corrente

de transporte que percorre o material, no entanto a força F_L gerada devido a esta corrente é bem maior que a força de aprisionamento F_R , fazendo com os vórtices se movimentem livremente pelo material.

- Normal \Rightarrow Neste estágio não existe mais a rede de vórtices e o material já não apresenta mais as características supercondutoras. Assim, este passa a se comportar como um condutor normal de corrente elétrica e a curva $E - J$ passa a ter um caráter linear.

Foge ao escopo deste trabalho dar profundos detalhes sobre a dinâmica de vórtices em materiais supercondutores. Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências [29][32][33][34][35] e [36]. Como veremos no capítulo 5, a curva $E - J$ é fundamental para a modelagem e simulação de um limitador de corrente supercondutor.

4.4 Limitador MCP-BSCCO-2212

Limitadores de corrente de curto circuito são uma das aplicações mais promissoras para materiais supercondutores de alta temperatura crítica [37]. Materiais das famílias *YBCO* e *BSCCO* tem sido amplamente estudados e testados para a confecção destes dispositivos. Para o uso em limitadores de corrente massivos, o material mais frequentemente usado é o *Bi2212*, enquanto que para limitadores que fazem uso de filmes finos e fitas supercondutoras, os materiais mais usados são o *YBCO* e o *Bi2223*. Nesta seção daremos detalhes sobre o limitador massivo *Bi2212*, uma vez que este é o modelo em estudo neste trabalho.

A sigla *MCP* vem do inglês *Melt Casting Process* (Processo de Moldagem por Fundição) e se refere exclusivamente ao processo de fabricação destes limitadores. Este processo foi inicialmente desenvolvido no final da década de 80 e tem os seguintes itens como principais características [38][39]:

- Síntese relativamente rápida;
- Maior facilidade de obter diversas geometrias com diferentes tamanhos;

- Boas qualidades de material supercondutor (densidade de corrente crítica, dependência com campo magnético e temperatura crítica relativamente alta);
- Possibilidade de aplicação de contatos elétricos na forma de fitas;
- Relativa homogeneidade do material (comparado a outros métodos)

O procedimento de fabricação tem início com a mistura dos óxidos e carbonatos, Bi_2O_3 , $SrCO_3$, CaO e CuO , na proporção $Bi : Sr : Ca : Cu = 2 : 2 : 1 : 2$, respectivamente. A mistura então passa pelo processo de calcinação que é precedido pela adição de $SrSO_4$. Esta nova mistura é então fundida em temperaturas que podem variar entre 1000 °C e 1200 °C e colocada em moldes rotativos onde a solidificação e o resfriamento ocorrem. Como resultado, temos o material supercondutor na forma de um tubo. Depois destes procedimentos, estes tubos são então removidos do módulo rotativo e submetidos a um recozimento entre 750 °C e 850 °C com o objetivo de melhorar a concentração de oxigênio no material, já que este é um elemento importante na manutenção das propriedades supercondutoras deste sistema [39]. Uma vez que estes sólidos serão conectados a um sistema elétrico, existe a necessidade de contatos elétricos em suas extremidades. Estas bobinas supercondutoras possuem um anel de prata em cada extremidade e estes anéis são fixados nestes componentes durante o processo de moldagem e apresentam resistência elétrica de contato na ordem de $1 \mu\Omega$ [40].

Embora seja um processo muito eficaz na fabricação destes dispositivos, no que se refere às características de materiais supercondutores, o resultado é um material massivo e não homogêneo, ou seja, é possível que existam regiões do material supercondutor com propriedades distintas. Isto significa dizer que podem existir no mesmo material diferentes áreas com valores diferentes de J_c e T_c . Como consequência destas heterogeneidades temos diferentes taxas de aquecimento no mesmo material na ocorrência de um curto-circuito. Estas diferentes taxas de aquecimento fazem com que uma determinada região transicione para o estado normal antes das demais regiões, gerando o que chamamos de "*hot spot*" [37], ou seja, o sobreaquecimento de uma certa região em relação as outras.

O surgimento de *hot-spots* é totalmente indesejável, já que a região que transitar precocemente será responsável por dissipar sozinha toda a energia do curto-circuito. Obviamente que este excesso de potência em uma pequena região irá causar sérios danos ao limitador, como por exemplo, a degradação de suas propriedades ou até a completa combustão do dispositivo.

Para evitar o surgimento de *hot-spots*, é comum o uso de uma resistência metálica, comumente chamada de resistor *shunt*, soldado ao material supercondutor. Dessa forma, a corrente é desviada da região sobreaquecida evitando assim a danificação do dispositivo (figura 4.9). Este *shunt* deve estar em contato com o supercondutor por todo o comprimento do mesmo já que a previsão das regiões onde ocorrem os *hot-spots* não é possível.

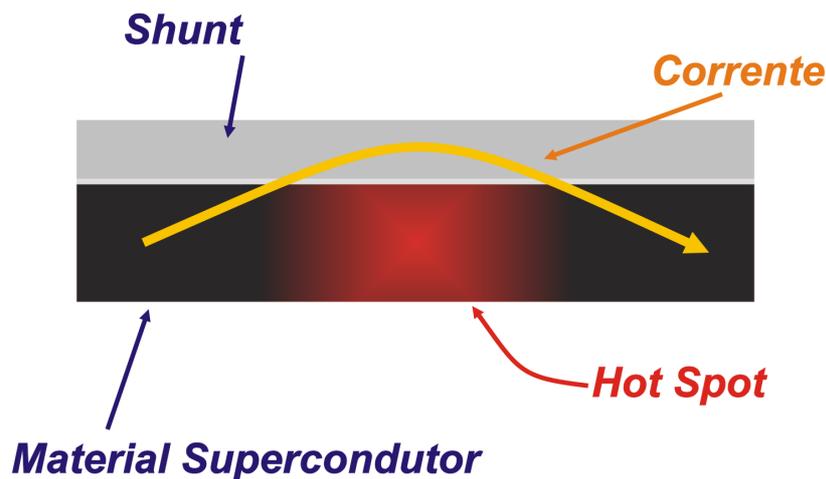


Figura 4.9: Atuação do shunt para evitar a danificação do dispositivo devido a hot-spots

É importante ressaltar que a resistência do *shunt* deve ser pequena o suficiente, quando comparada com a resistência desenvolvida no material supercondutor após a transição para o estado normal, para uma proteção efetiva. Caso o *shunt* apresente uma resistência extremamente pequena, é possível que, de acordo com a equação 4.5, ocorra também um superaquecimento do mesmo [40]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{E^2}{C_V \rho} \quad (4.5)$$

Sendo: E é o campo elétrico, C_V é a capacidade térmica volumétrica e ρ é resistivi-

dade do material.

Geralmente o *shunt* é composto por ligas metálicas a base de $CuNi$ ou $CuNiMn$, tem como limite do campo elétrico o valor de $0,5 \text{ V/cm}$. Quando neste limite de campo elétrico, recomenda-se que o tempo de limitação não deve ser superior a 100 ms e a temperatura não deve exceder 300 K [40]. Porém, em casos onde o limitador opere em situações onde o campo elétrico seja inferior a $0,5 \text{ V/cm}$, o tempo de limitação poderá exceder o tempo de 100 ms . Estes seriam casos onde as corrente de curto-circuitos não seriam extremamente altas.

Uma importante questão é como este *shunt* é soldado ao material supercondutor. A fim de evitar uma degradação do material supercondutor, uma solda de baixo ponto de fusão é usada. Esta solda apresenta resistividade na ordem de $1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ e deve constar de uma camada fina (aproximadamente $0,2 \text{ mm}$) entre *shunt* e supercondutor uma vez que temperaturas acima do ponto de fusão (equação 4.5) podem ser alcançadas durante um curto-circuito [40] podendo resultar na danificação permanente da solda.

A bobina supercondutora necessita de uma estabilização mecânica uma vez que a mesma estará sujeita a forças de compressão térmica, que é justificada pelo alto coeficiente de expansão térmica do *shunt* metálico, quando comparado ao material cerâmico, e também devido às forças eletromecânicas durante o curto-circuito. Para compensar estas forças mecânicas um tubo polimérico reforçado com fibras (*Fiber Reinforced Plastics - FRP*) é colado coaxialmente internamente ao material supercondutor [40].

A figura 4.10 mostra com detalhes a composição de um dispositivo limitador de corrente supercondutor do tipo *MCP-BSCCO-2212* fabricado pela empresa alemã *Nexans Superconductors* e a figura 4.11 mostra fotografias tiradas de um componente limitador utilizado neste trabalho.

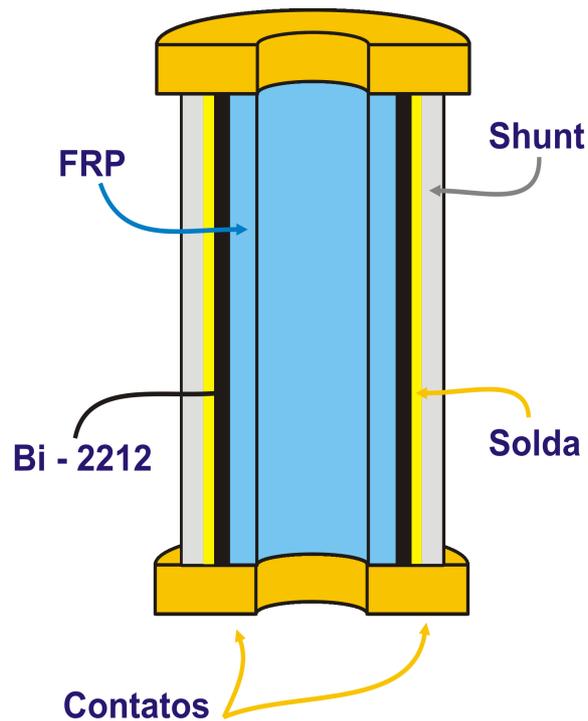


Figura 4.10: Componentes de um limitador de corrente do tipo MCP-BSCCO-2212. A figura está fora de escala.



a)



b)

Figura 4.11: Fotografia de um componente limitador supercondutor fabricado pela Nexans Superconductors; a) vista superior de uma das extremidades e b) vista lateral.

Capítulo 5

Metodologia

5.1 Introdução

Neste capítulo iremos detalhar como foram feitos os ensaios de limitação bem como cada passo das simulações feitas para dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores baseados no *MCP-Bi-2212*.

5.2 Ensaio

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Alta Corrente no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL - Eletrobras) na unidade situada em Adrianópolis. Este laboratório é alimentado por uma linha de alta tensão proveniente da subestação de Furnas no valor de 138 kV. Esta tensão é então abaixada por um primeiro transformador (*T1*) para o valor de 4,16 kV que irá alimentar um circuito secundário. A figura 5.1 mostra uma ilustração do circuito de ensaio utilizado.

É nesta parte secundária do circuito onde é feito o controle da corrente de curto-circuito desejada no ensaio através do ajustes da resistência R e da indutância L . A resistência R consiste num banco de resistores contendo 108 unidades no valor de $1,8 \Omega$ cada, enquanto que a indutância L consiste em 12 reatores ligados em série. Com este circuito é possível realizar ensaios puramente indutivos, para isso, basta que o banco de resistores seja desconectado do sistema. Não é possível realizar um ensaio puramente

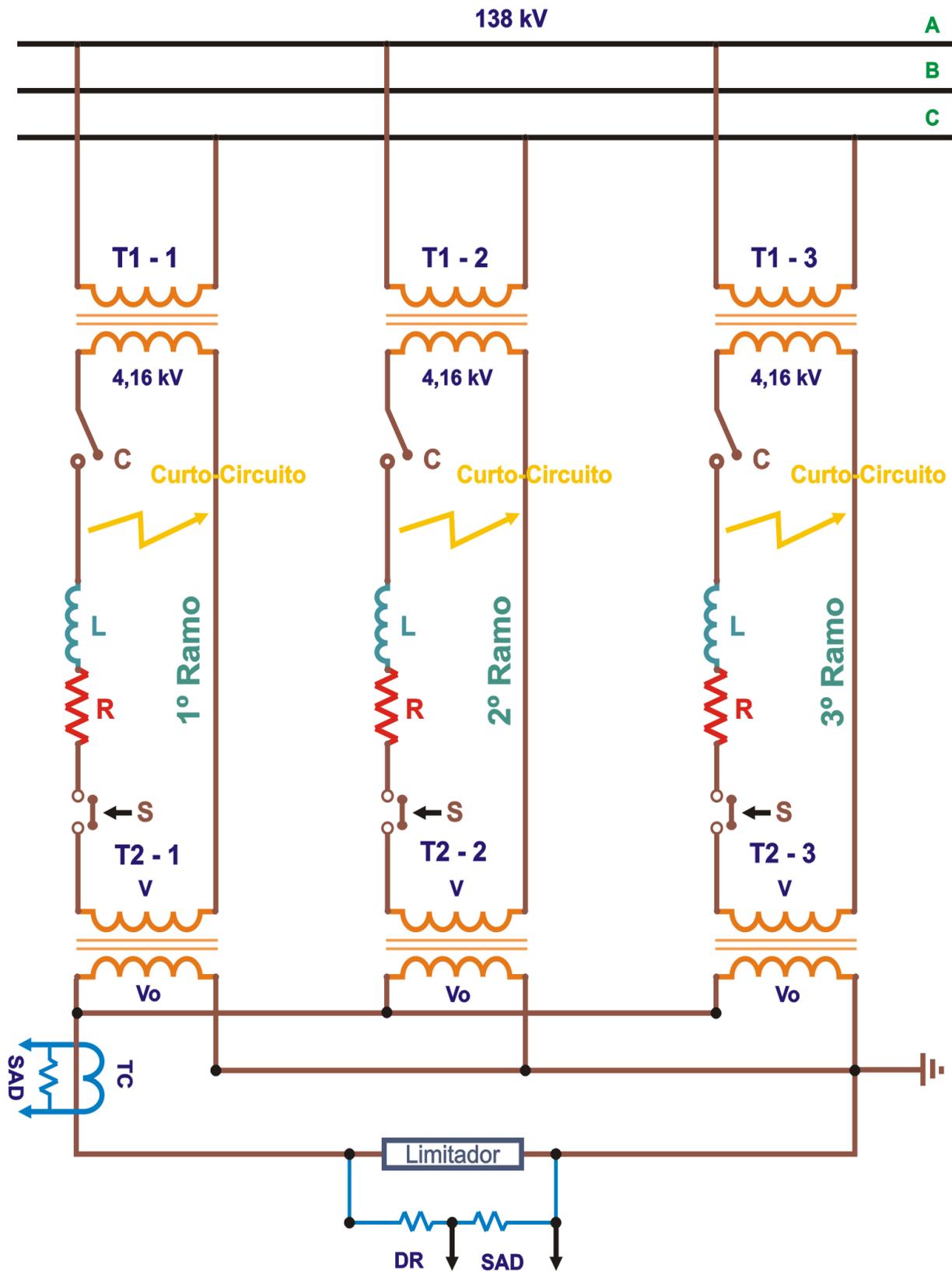


Figura 5.1: Circuito de ensaio do Laboratório de Alta Corrente no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL - Eletrobras)

resistivo já que, devido à dificuldades de manobra no circuito, é impossível desconectar todos os reatores - haverá sempre um reator no valor de 0,13 mH conectado ao sistema (além das indutâncias inerentes aos transformadores).

O ajuste de R e L também será responsável pelo valor de tensão V_o ao qual estará submetido o objeto de ensaio, que no caso, são os elementos limitadores de corrente supercondutores. O valor V_o aparece em uma terceira parte do circuito após a tensão da segunda parte do circuito (V) sofrer uma nova queda por um segundo transformador ($T2$). Também é nesta terceira parte do circuito que estão conectados, em série, os limitadores supercondutores. O ensaio de curto-circuito ocorre quando fechamos a chave S e termina com a abertura da chave C .

Pela figura 5.1 podemos ver que, também na terceira parte do circuito, temos um transformador de corrente (TC) na relação 5000 – 5 A com um derivador de 2 Ω que envia informações sobre a corrente do circuito para o sistema de aquisição de dados (SAD), que está conectado a um osciloscópio da marca *Tektronix*. Notamos também um derivador (DR) resistivo de 2 kV com 7,66 M Ω e novamente, um sistema de aquisição de dados (SAD) para o envio das informações de tensão elétrica nos limitadores, sendo a leitura realizada com o mesmo osciloscópio da marca *Tektronix*.

O circuito de ensaio é composto por três ramos iguais e em paralelo; tal característica é necessária para evitar altas correntes em um único transformador quando a corrente de falta desejada para o ensaio é muito alta.

Para este trabalho, classificamos os limitadores *MCP-Bi-2212* em duas famílias, de acordo com seu comprimento total; a primeira família (*Família A*) é composta por limitadores com comprimento total do material supercondutor e *shunt* enrolados ao redor da bobina é igual a 420 cm, enquanto a segunda família (*Família B*) é composta por limitadores com comprimentos totais (supercondutor e *shunt*) iguais a 270 cm. Na tabela 5.1 estão relacionadas as características dos ensaios realizados com limitadores de ambas famílias, bem como a quantidade de limitadores ligados em série e o número de ramos utilizados;

Tabela 5.1: Dados de ensaio

Ensaio	Família	Tensão V_o	Corrente de Falta	n° de ramos	n° de limitadores
E01	A	137,5 V_{rms}	15,4 kA_{rms}	01	02
E02	A	137,5 V_{rms}	25,0 kA_{rms}	01	02
E03	B	1,0 kV_{rms}	5,0 kA_{rms}	02	12
E04	B	1,0 kV_{rms}	25,0 kA_{rms}	02	12
E05	B	1,0 kV_{rms}	67,0 kA_{rms}	02	12

Para os componentes da *Família A* o valor máximo de tensão suportado é de 210 V_{rms} enquanto que para os componentes da *Família B* o valor máximo de tensão suportado é de 135 V_{rms} . Estes valores máximos de tensão elétrica são determinados a partir do limite de campo elétrico máximo que o *shunt* pode suportar, que é de 0,5 V/cm, como vimos na seção 4.4. O valor médio da densidade de corrente crítica em 77 K é de aproximadamente 1003 A/cm² para os componentes da *Família A* e 985 A/cm² para os componentes da *Família B*.

Na figura 5.2 podemos ver a ligação em série com os dois limitadores da família A para os ensaios E01 e E02. Na figura 5.3 vemos a ligação em série com os 12 componentes da família B para os ensaios E03, E04 e E05. Nas fotografias da figura 5.4 podemos ver a imersão em nitrogênio líquido para os limitadores de ambas as famílias.



Figura 5.2: Conexão em série com os limitadores da família A.

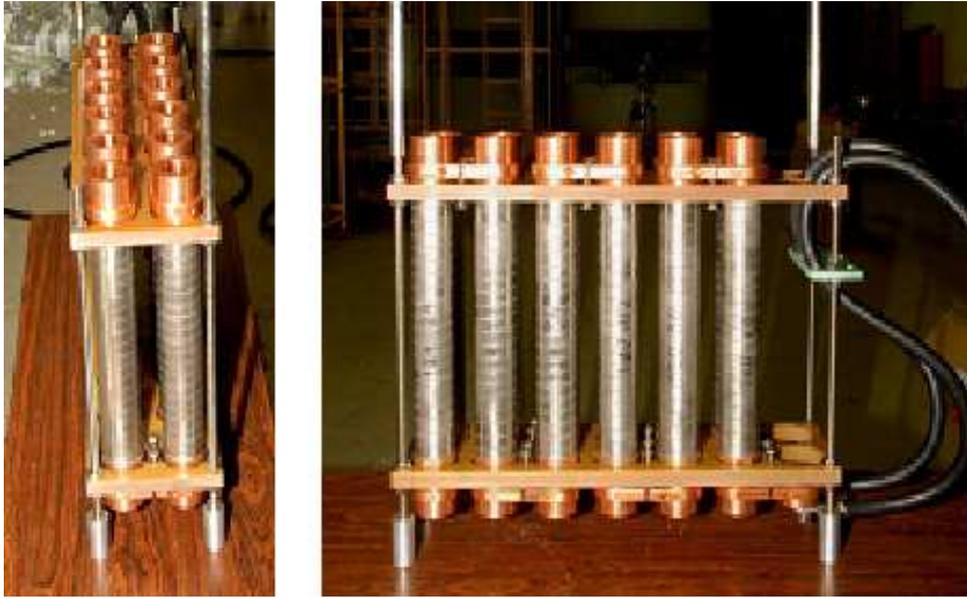
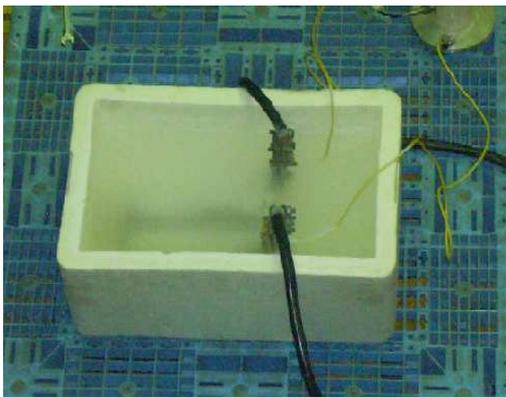


Figura 5.3: Conexão em série com os limitadores da família B.



a)



b)

Figura 5.4: Imersão em nitrogênio líquido para os a) limitadores da Família A e para b) os limitadores da Família B.

5.3 Simulação

Antes de darmos início às principais idéias empregadas nas simulações é importante estudarmos o circuito que é usado para simular o limitador supercondutor. O circuito de ensaio do Laboratório de Alta Corrente de Adrianópolis, descrito na seção anterior, pode ser traduzido para um circuito equivalente mais simples como é mostrado na figura 5.5. O circuito de simulação é formado por uma resistência R_c , uma indutância L_c e um limitador supercondutor de resistência R_L , todos ligados em série e submetidos a uma tensão senoidal $V_o = A \sin (wt + \varphi)$, onde A é o valor da amplitude da onda de tensão.

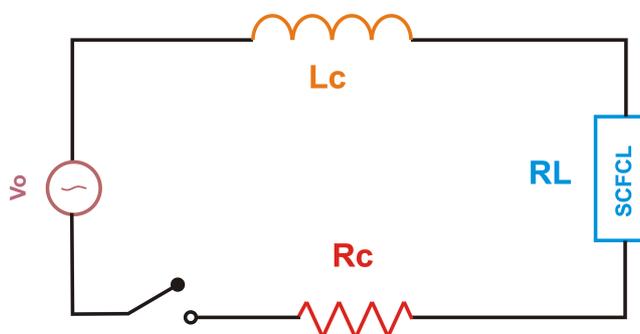


Figura 5.5: Circuito equivalente para a simulação

O valor da resistência R_L é praticamente zero quando o circuito opera em condições normais. No entanto quando o mesmo sofre um curto-circuito o valor da resistência do supercondutor deixa de ser nulo e seu valor se altera de acordo com a corrente que o percorre e com a sua temperatura. Mas, neste momento ainda estamos interessados em compreender o circuito equivalente da simulação e deixaremos esta discussão para as seções seguintes.

De acordo com [41] a simplificação do circuito de ensaio (figura 5.1) pode ser feita da seguinte forma; o cálculo da resistência R_c é calculado através da seguinte equação

$$R_c = x \left(\frac{V_o}{V} \right)^2 R \quad (5.1)$$

enquanto que o calculo da indutância L_c é calculado da seguinte maneira;

$$L_c = x \left(\frac{V_o}{V} \right)^2 L \quad (5.2)$$

Nas equações 5.1 e 5.2 o valor de x depende do número de ramos que foi utilizado no circuito de ensaio, ou seja, os possíveis valores de x são: $x = 1$, $x = 2$ ou $x = 3$.

5.3.1 Programa de Simulação

Para as simulações deste trabalho a ferramenta computacional utilizada foi o *Alternative Transient Program* (ATP-EMTP). O ATP é um poderoso programa de simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica e tem como base matemática a regra de integração trapezoidal[18][42].

Juntamente com o ATP é possível fazer uso do *ATPDraw*, que é um programa que auxilia na elaboração do desenho de circuitos elétricos para a simulação, ou seja, não é necessária a programação em linhas de comando para a montagem de um circuito com componentes conhecidos (resistores, capacitores, indutores, transformadores, fontes de corrente e tensão, etc).

Além destes componentes usuais o usuário pode modelar o seu próprio componente na rede elétrica. No entanto, para isso é necessário o conhecimento de linguagem de programação MODELS. Nesta programação, o usuário define as características de seu elemento e como ele deve reagir aos eventos do circuito.

Neste trabalho, a modelagem dos limitadores supercondutores é feita através da linguagem MODELS. A programação irá controlar uma resistência variável em função de sua temperatura e da corrente que o atravessa. A figura 5.6 nos mostra a imagem do nosso modelo desenhado no *ATPDraw*. Nesta, podemos observar a resistência R_c , a indutância L_c e a tensão V_o que foram definidas na seção anterior de acordo com a simplificação do circuito de ensaio.

A resistência $R_{contato}$ que observamos no desenho de simulação é a resistência de contato existente na conexão do material supercondutor e os contatos do limitador (normalmente é fornecida pelo fabricante). Podemos notar ainda que o "bloco"MODELS controla duas resistências variáveis; o resistor *shunt* R_{sh} e a resistência do material su-

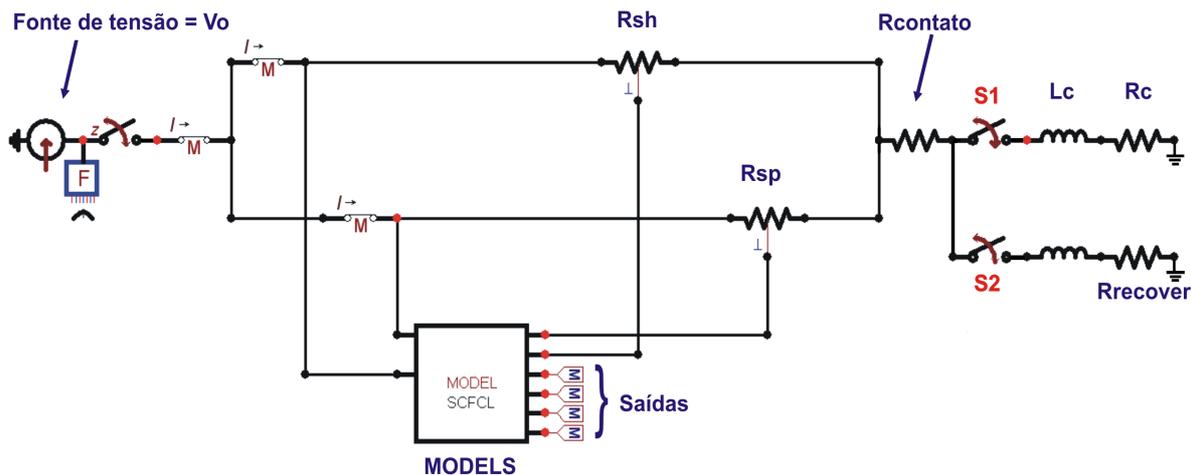


Figura 5.6: Circuito de simulação simplificado desenhado no ATPDraw; a linguagem MODELS controla a resistência variável do limitador (R_{sh} e R_{sp})

percondutor R_{sp} do limitador. Nas próximas seções, mostraremos como são calculadas R_{sh} e R_{sp} .

As saídas do bloco MODELS são resultados referentes aos seguintes cálculos: temperatura do material supercondutor (T_{sp}), Temperatura do *shunt* (T_{sh}), resistência equivalente do limitador (R_L) e valor do índice n (a ser definido nas próximas seções).

Uma importante análise a ser feita é a respeito do tempo que o material supercondutor leva para recuperar seu estado de resistividade nula após a ocorrência de um curto-circuito e do tempo que o limitador precisa para retornar ao estado de temperatura inicial (77 K). Desse modo, simulações para o tempo de recuperação foram feitas utilizando as características do ensaio E04. Durante a simulação de curto-circuito a chave $S1$ permanece fechada, enquanto a chave $S2$ permanece aberta. Após o término do curto-circuito, a chave $S1$ se abre e a chave $S2$ permanece aberta ou fechada, dependendo da característica da simulação desejada; para recuperação sem corrente $S2$ permanece aberta e para simulações com corrente, $S2$ se fecha. Na tabela 5.2 podemos observar as características das simulações de recuperação feitas. Em outras palavras, simularemos o tempo que um limitador de corrente supercondutor leva para se recuperar após um curto-circuito considerando que durante a recuperação pode ou não haver corrente no circuito. A resistência $R_{recover}$ é ajustada de acordo com a corrente do circuito desejada após o término do curto-circuito.

Tabela 5.2: Simulações de recuperação

Simulação	S2	Corrente do Circuito	Rrecover
R01	aberta	0 A	-x-
R02	fechada	70,7 A rms	14,14 Ω
R03	fechada	106 A rms	9,43 Ω
R04	fechada	141,4 A rms	7,07 Ω

5.3.2 A Resistência do Limitador

Decomposição do Limitador

Como vimos no capítulo 4 os componentes limitadores são compostos por uma resistência metálica, o resistor *shunt*, soldada ao material supercondutor por todo o seu comprimento. Do ponto de vista prático, este *shunt* pode ser visto como uma resistência ligada em paralelo com o material supercondutor (figura 5.7).

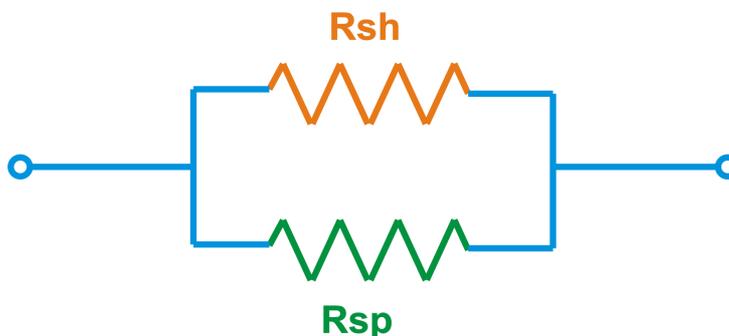


Figura 5.7: Configuração usada para modelar o dispositivo limitador supercondutor; resistências shunt (R_{sh}) e supercondutor (R_{sp}) ligadas em paralelo.

De acordo com a figura 5.7, a resistência R_L do limitador, definida anteriormente, nada mais é do que a resistência equivalente entre R_{sh} e R_{sp} (sendo R_{sh} a resistência do shunt e R_{sp} a resistência do supercondutor). Assim:

$$R_L = \frac{R_{sh} \times R_{sp}}{R_{sh} + R_{sp}} \quad (5.3)$$

O valor do resistor *shunt* também não é constante, variando em função do aumento

de temperatura. Este aumento de temperatura é causado por efeito Joule quando uma corrente elétrica o atravessa. Nas próximas seções veremos como são calculados os valores das resistências do *shunt* e do material supercondutor.

Cálculo da Resistência do Material Supercondutor

A resistividade de um material supercondutor é um parâmetro altamente dependente da temperatura, do campo magnético e da densidade de corrente. Porém, nesta modelagem iremos desconsiderar a influência do campo magnético na transição supercondutora-normal com o intuito de simplificar o modelo. Existem trabalhos que mostram que essa simplificação é viável uma vez que os resultados experimentais concordam com os resultados das simulações [18]. Dessa forma, em nosso modelo, a resistividade é um parâmetro que depende apenas da temperatura e da densidade de corrente.

A princípio, poderíamos modelar a dependência da resistividade com a temperatura extraindo os dados de uma medida de resistividade versus temperatura (comumente chamada de curva $R \times T$), como é sugerido em [43]. Assim, a fim de descobrir o comportamento resistivo do material supercondutor dos limitadores, uma amostra de *Bi2212* que compunha um dos limitadores empregados no presente trabalho foi submetida a uma medição $R \times T$ no Laboratório de Supercondutividade da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Para tal medição, quatro contatos elétricos de tinta prata são fixados na superfície das amostras. As duas tiras externas são para as medições de corrente elétrica enquanto que as duas tiras internas são para as medições de tensão. Este método é conhecido como técnica de quatro pontas [44] e pode ser observado na fotografia da figura 5.8. O valor de corrente usado na medição foi de 10 mA.

O resultado desta medição pode ser observado na figura 5.9 . O valor apontado T_c *onset* corresponde ao ponto onde se dá o encontro das retas extrapoladas e será considerado, neste trabalho, como a temperatura crítica do material supercondutor que será usado para as simulações. Observando o comportamento desta amostra do limitador, podemos considerar que até o valor T_c *onset* ainda existem fenômenos relativo

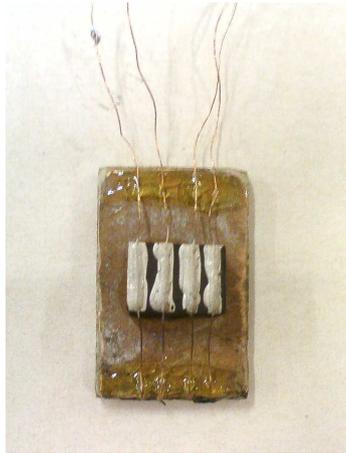


Figura 5.8: Técnica das quatro pontas para a determinação do comportamento $R \times T$ de uma amostra do limitador.

à supercondutividade no material. Usualmente, o valor da temperatura crítica usado em simulações computacionais para limitadores de corrente supercondutores a base de *Bi2212* é da ordem de 90 K, no entanto o comportamento resistivo mostrado na figura 5.9 nos mostra que se considerarmos o valor de 90 K estaríamos desprezando todos os efeitos de supercondutividade que ocorrem acima desta temperatura. Por esta razão, decidimos escolher T_c onset como a temperatura crítica de transição T_c destes materiais. O valor de T_c encontrado é, então, igual a 104 K.

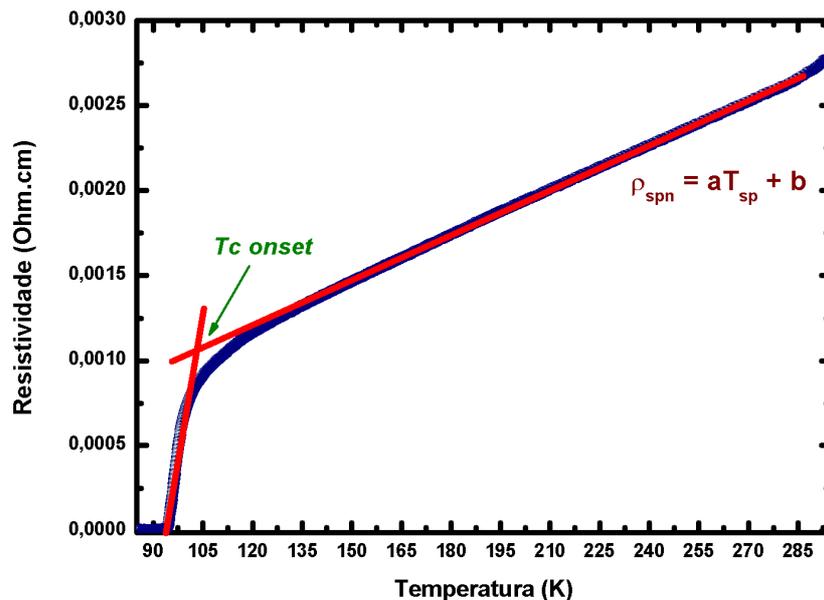


Figura 5.9:
Curva $R \times T$ para a amostra de *Bi2212* extraída de um componente limitador.

É importante saber que o resultado do comportamento resistivo da amostra do limitador não é sempre o mesmo abaixo de T_c e apresenta diferenças que dependem da densidade de corrente que o material transporta. Devido a fenômenos físicos relacionados à flutuações termodinâmicas na condutividade elétrica de materiais supercondutores de alta temperatura crítica, a curva $R \times T$ apresenta diferenças que dependem do valor da densidade de corrente que transporta o material supercondutor[45].

Na figura 5.10 podemos observar um exemplo das diferenças na curva $R \times T$ devido a diferentes valores de densidade de corrente transportada para o sistema supercondutor de alta temperatura crítica $HoPrBaCuO$.

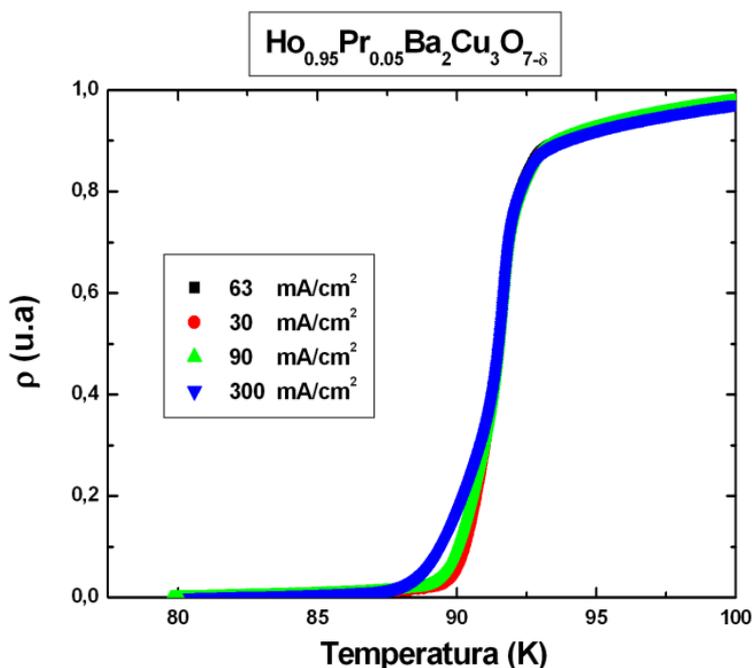


Figura 5.10: Alterações na curva $R \times T$ medida com diferentes valores de densidade de corrente [46][8].

Assim, somente acima de T_c a resistividade da figura 5.9 não varia com corrente aplicada. Isto significa que o comportamento linear desta curva é o mesmo, independente da densidade de corrente que transporta o supercondutor. Dessa maneira, para o estado normal do material, podemos escrever sua resistividade ρ_{spn} como:

$$\rho_{spn} = aT_{sp} + b \quad (5.4)$$

Sendo a e b constantes extraídas do gráfico da figura 5.9 e T_{sp} é a temperatura do material supercondutor. Dessa maneira, podemos calcular a resistência do material supercondutor acima de T_c como $R_{spn} = y\rho_{spn}\frac{\lambda}{a_{sp}}$, onde λ (cm) é o comprimento total do limitador, a_{sp} (cm²) a área de secção transversal do supercondutor e y é o número de limitadores ligados em série no ensaio.

O fato da curva variar com a corrente abaixo de T_c nos impede de modelar a resistência do supercondutor usando os dados da medida resistividade versus temperatura, como é feito na referência [43]. Dessa forma, para calcular a resistividade do material supercondutor ρ_{sp} , quando abaixo de T_c , vamos usar a Lei de Ohm na forma pontual, ou seja, como uma relação entre o campo elétrico E (V/cm) e a densidade de corrente que atravessa o material supercondutor J_{sp} (A/cm²) [47]:

$$\rho_{sp} = \left| \frac{E}{J_{sp}} \right| \quad (5.5)$$

A densidade de corrente J_{sp} (A/cm²) é calculada dividindo a corrente elétrica $i_{sp}(t)$ que passa pelo supercondutor pela área de secção transversal a_{sp} do mesmo, ou seja

$$J_{sp} = \frac{i_{sp}(t)}{a_{sp}} \quad (5.6)$$

Então, para nossa modelagem, é necessário conhecer os valores do campo elétrico E e da densidade de corrente J_{sp} a cada instante da transição para obtermos o valor da resistividade do supercondutor abaixo de T_c . Em outras palavras, precisamos ter conhecimento da curva $E - J$ para que possamos extrair informações a respeito da resistividade ρ_{sp} .

No capítulo 4 foi mostrado o comportamento da curva $E - J$ para materiais supercondutores de alta temperatura crítica. Em nosso modelo de simulação usaremos o comportamento desta curva para modelar a transição do material desde o estado supercondutor até o estado normal. Para modelagem de limitadores de corrente podemos descrever a curva $E - J$ como uma lei de potência da seguinte maneira [48]:

$$E = E_c \left[\frac{|J_{sp}|}{J_c(T_{sp})} \right]^n \quad (5.7)$$

Onde E_c é o campo elétrico crítico ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$), $J_c(T_{sp})$ é a densidade de corrente crítica dependente da temperatura, dada em A/cm^2 e n é índice de transição que nos informa quão rápida é a transição. Assim, de acordo com a equação 5.7, poderíamos descrever toda a curva $E - J$ atribuindo um valor ao índice n para cada estágio da transição. Segundo as referências [49] e [50] a curva pode ser dividida em três estágios :

- No primeiro estágio, correspondente ao *flux creep*, o campo elétrico é gerado devido a densidades de corrente que geram as forças Lorentz, na ordem de grandeza das forças de aprisionamento, e acarretam no movimento de vórtices. Nesta fase o valor de n é altamente dependente da geometria do material e do material supercondutor empregado. Para materiais massivos (*bulk*) temos $5 < n < 15$ [51] enquanto que para fitas temos $20 < n < 30$ [52], ambos a 77 K. Nesta fase o valor de n é dado por[53]:

$$n = \frac{U_o}{k_b T_{sp}} \quad (5.8)$$

sendo U_o o potencial de aprisionamento (eV), k_b é a constante de Boltzmann (eV/K) e T_{sp} é temperatura (K) do supercondutor. Estudos mostram que, para o limitador *MCP-BSCCO-2212* a 77 K, o valor de n é aproximadamente igual a 9 [49]. Com isso podemos obter o valor de U_o na região do *flux creep* da seguinte maneira:

$$9 = \frac{U_o}{0,0008617 \times 77} \implies U_o \approx 0,06 \text{ eV}$$

O estágio *flux creep* termina quando o campo elétrico no material atinge valor igual ou superior a $1 \text{ mV}/\text{cm}$ [51][54].

- No segundo estágio, acima de $1 \text{ mV}/\text{cm}$ e correspondente ao *flux flow*, temos um campo elétrico gerado também pelo movimento de vórtices, mas estes agora já não estão mais presos aos centros de aprisionamento e se movem livremente pelo material. Nesta fase da transição o valor de n pode variar entre 2 e 4 e pouco

depende da temperatura [51].

- No terceiro e último estágio o material já não é mais supercondutor, se comportando como um condutor ôhmico normal. Nesta fase temos $n = 1$.

Para finalizar, nos resta considerar a dependência da densidade de corrente crítica $J_c(T_{sp})$ com a temperatura T_{sp} . Em um intervalo de 77 K a T_c podemos escrever esta relação apenas como uma dependência linear entre $J_c(T_{sp})$ e T_{sp} da seguinte forma [54][55][56]:

$$J_c(T_{sp}) = J_c(77) \left(\frac{T_c - T_{sp}}{T_c - T_N} \right) \quad (5.9)$$

Sendo T_N a temperatura do nitrogênio líquido (77 K) e $J_c(77)$ é a densidade de corrente crítica em 77 K. Cada módulo limitador possui um valor diferente de $J_c(77)$, assim o valor $J_c(77)$ utilizado nas simulações é igual à média dos valores de densidade de corrente crítica de todos os limitadores que são utilizados no ensaio a ser simulado.

Substituindo as equações 5.9 e 5.7 em 5.5, temos finalmente a resistividade do material supercondutor (*Bi-2212*) que compõe o limitador na fase supercondutora (abaixo de T_c):

$$\rho_{sps} = \frac{E_c}{(T_c - T_{sp}) p} \left[\frac{|J_{sp}|}{(T_c - T_{sp}) p} \right]^{n-1} \quad (5.10)$$

sendo $p = \frac{J_c(77)}{(T_c - T_N)}$. A resistência do material supercondutor abaixo de T_c é calculada então como $R_{sps} = y \rho_{sps} \frac{\lambda}{a_{sp}}$. Finalmente, a resistência R_{sp} do supercondutor, para o cálculo de R_L (vide equação 5.3) será:

$$R_{sp} = \begin{cases} R_{sps} & \text{se } T_{sp} < T_c \\ R_{spn} & \text{se } T_{sp} > T_c \end{cases} \quad (5.11)$$

Pudemos notar que precisamos conhecer o valor da temperatura T_{sp} do material supercondutor para encontrar o valor de sua resistividade, tanto acima, como abaixo de T_c . O valor de T_{sp} será calculado a partir de equações diferenciais provenientes das trocas de calor existentes na bobina limitadora. O estudo de trocas de calor será

abordado posteriormente.

Cálculo da Resistência do Shunt

Dissemos anteriormente que o valor da resistência do *shunt* é dependente de sua temperatura. A fim de investigar o comportamento $R \times T$ desta resistência, uma amostra do mesmo também foi submetida ao método das quatro pontas (no Laboratório de Supercondutividade do CEPEL - sede Ilha da Cidade Universitária) para a medição do seu comportamento resistivo em função da temperatura, como podemos observar na fotografia da figura 5.11. Os fios para a medição foram soldados com estanho.

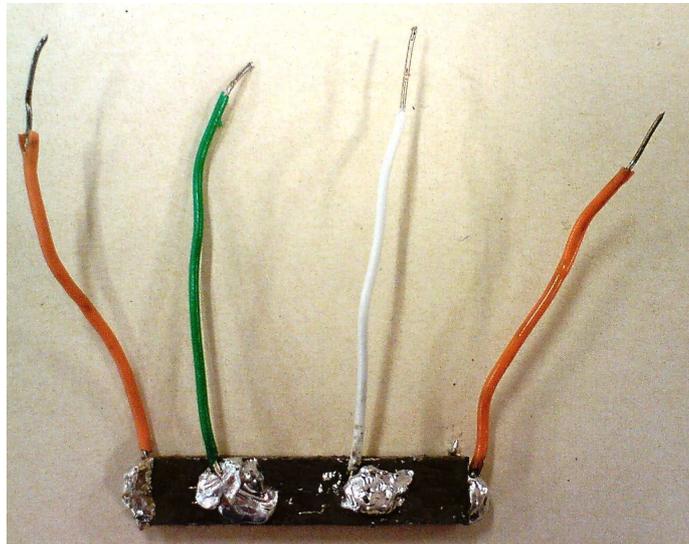


Figura 5.11: Técnica das quatro pontas para a determinação do comportamento $R \times T$ de uma amostra do shunt.

No resultado da figura 5.12 podemos observar o comportamento linear que é exibido pela amostra. Tal comportamento é esperado uma vez que esta resistência apresenta composição metálica (liga de $CuNi$).

Devido ao comportamento linear apresentado, a resistividade ρ_{sh} da amostra pode ser escrita como:

$$\rho_{sh} = mT_{sh} + z \quad (5.12)$$

Onde m e z são constantes extraídas do gráfico e T_{sh} é a temperatura do *shunt*.

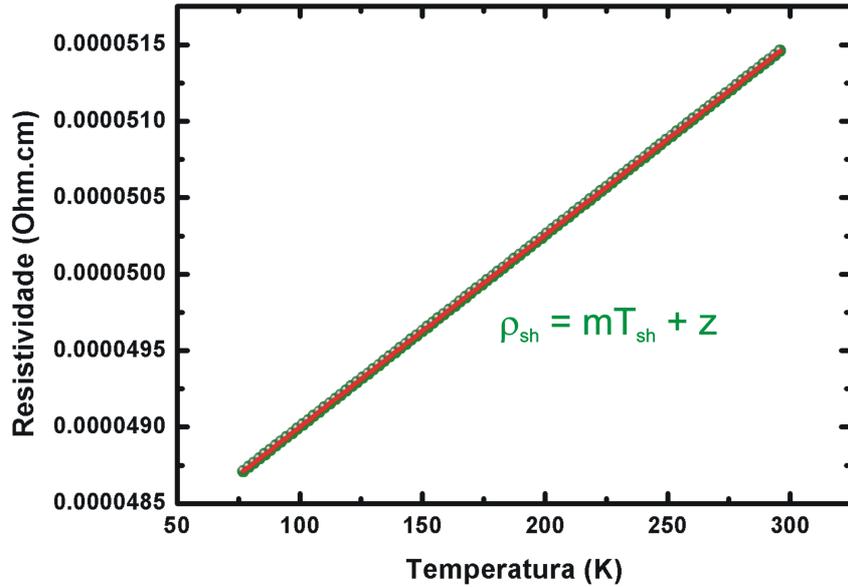


Figura 5.12: Resistividade em função da temperatura para o shunt obtida experimentalmente.

Assim, o valor da resistência do *shunt* R_{sh} para o cálculo de R_L (vide equação 5.3) será:

$$R_{sh} = y\rho_{sh}\frac{\lambda}{a_{sh}} \quad (5.13)$$

Sendo λ (cm) o comprimento total do limitador, a_{sh} (cm²) a área de secção transversal do *shunt* e y é o número de limitadores ligados em série no ensaio.

Como podemos notar, a resistência do *shunt* depende da temperatura T_{sh} . O cálculo da temperatura T_{sh} também será abordado posteriormente.

5.3.3 Temperatura

Trocas de Calor

Antes de darmos início aos cálculos da temperatura T_{sp} do material supercondutor e da temperatura T_{sh} do *shunt* é necessário saber quais considerações são feitas sobre trocas de calor que ocorrem no sistema. Poderíamos desprezar estas trocas de calor com o meio se fôssemos modelar apenas curtos-circuitos onde $J_{sp} \gg J_c$, ou seja, casos onde a transição para o estado resistivo fosse tão rápida que pudéssemos considerar o sistema como adiabático. Porém, é preciso desenvolver uma simulação que seja capaz de prever

o comportamento do limitador até mesmo quando este é submetido a correntes onde J_{sp} é pouco maior que J_c . Neste caso a transição é lenta e não podemos considerar o sistema como adiabático, já que o supercondutor perde calor para o meio.

Na figura 5.13 são ilustradas as considerações feitas para a modelagem das trocas de calor. Embora um limitador supercondutor do tipo resistivo seja mais complexo do que o ilustrado, assumiremos aqui que o mesmo é composto por um paralelepípedo de *Bi-2212* com comprimento λ (que é o comprimento da bobina supercondutora), espessura ε_{sp} e largura σ , todos em cm. Este paralelepípedo supercondutor está soldado a dois outros paralelepípedos por todo o seu comprimento; o *shunt* e o *FRP* (*Fiber Reinforced Plastic*). Logo, ambos, possuem o mesmo comprimento λ , a mesma largura σ e só diferem na espessura ε_{sh} e ε_{frp} respectivamente.

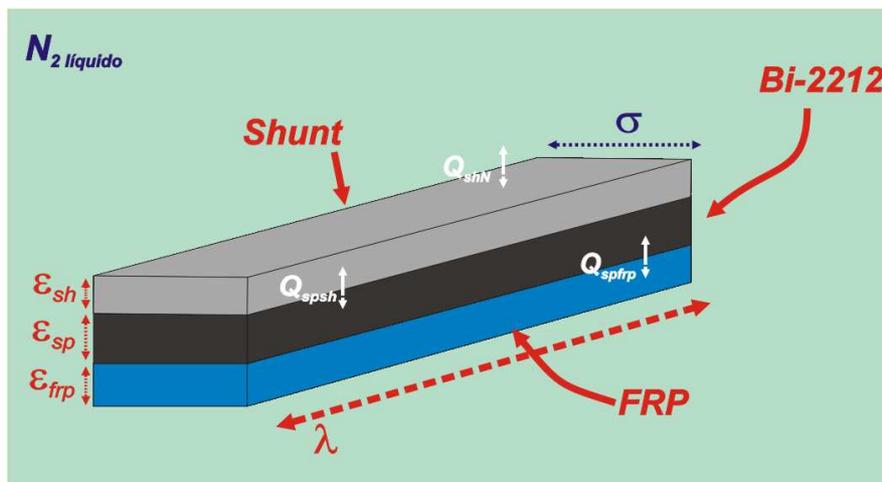


Figura 5.13: Modelagem do Limitador para trocas de calor.

As trocas de calor a serem consideradas são: Q_{spfrp} (troca de calor por condução entre material supercondutor e o *FRP*), Q_{spsh} (troca de calor por condução entre material supercondutor e o *shunt*) e Q_{shN} (trocas de calor por convecção entre *shunt* e nitrogênio líquido). É importante saber que, em nosso modelo, o *FRP* irá permanecer sempre constante a 77 K. Assumimos que estas trocas de calor (em W/cm^3) ocorrem apenas no sentido perpendicular ao sentido de transporte de corrente e estão ilustradas na figura 5.13. Estas trocas são escritas como[57]:

$$Q_{spfrp} = -\frac{k_{spfrp}}{(\varepsilon_{spfrp})^2} (T_{sp} - T_{frp}) \quad (5.14)$$

$$Q_{spsh} = -\frac{k_{spsh}}{(\varepsilon_{spsh})^2} (T_{sp} - T_{sh}) \quad (5.15)$$

$$Q_{shN} = -\frac{k_{shN}}{\varepsilon_{sh}} (T_{sh} - T_N) \quad (5.16)$$

Sendo:

- $k_{spfrp} \implies$ condutividade térmica da interface de troca de calor entre supercondutor e *FRP* em $W/(cm K)$;
- $\varepsilon_{spfrp} \implies$ espessura da interface de troca de calor entre supercondutor e *FRP* em cm;
- $T_{frp} \implies$ temperatura do *FRP* = 77 K;
- $k_{spsh} \implies$ condutividade térmica da interface de troca de calor entre supercondutor e *shunt* em $W/(cm K)$;
- $\varepsilon_{spsh} \implies$ espessura da interface de troca de calor entre supercondutor e *shunt* em cm;
- $k_{sh} \implies$ coeficiente de transmissão de calor por convecção do *shunt* para o nitrogênio líquido em $W/(cm^2 K)$;
- $\varepsilon_{sh} \implies$ espessura do *shunt* em cm;
- $T_N \implies$ temperatura do nitrogênio líquido = 77 K;

Sabendo agora como ocorrem as trocas de calor no sistema, podemos partir para o cálculo da temperatura T_{sp} do supercondutor e T_{sh} do *shunt*.

Temperatura do Supercondutor

Já sabemos que a temperatura do material supercondutor T_{sp} do limitador é um parâmetro extremamente importante no estudo de materiais supercondutores. Para encontrar o comportamento térmico do limitador, iremos partir do cálculo de potência gerada no mesmo;

$$P = E |J_{sp}| \text{ em W/cm}^3 \quad (5.17)$$

$$\gamma c(T_{sp}) \frac{dT_{sp}}{dt} = E |J_{sp}| \quad (5.18)$$

Substituindo a equação 5.7 em 5.18 obtemos:

$$\begin{aligned} \gamma c(T_{sp}) \frac{dT_{sp}}{dt} &= E_c \left[\frac{|J_{sp}|}{J_c(T_{sp})} \right]^n |J_{sp}| \\ \gamma c(T_{sp}) \frac{dT_{sp}}{dt} &= E_c \left[\frac{|J_{sp}|}{(T_c - T_{sp}) p} \right]^n |J_{sp}| \end{aligned} \quad (5.19)$$

Onde;

- γ = densidade volumétrica do *Bi2212* em g/cm³
- $c(T_{sp})$ = calor específico dependente da temperatura do *Bi2212* em J/g K;
- t = tempo em segundos;

De acordo com [58] podemos escrever o calor específico como:

$$c(T_{sp}) = 0,00158T_{sp} \quad (5.20)$$

No entanto, de acordo com a referência [59] o calor específico do *Bi2212* tem o comportamento esboçado na figura 5.14. De acordo com a figura 5.14 vemos que podemos aproximar o comportamento deste parâmetro com uma reta no intervalo de 77 K a T_c . Acima de T_c o valor do calor específico pode ser considerado constante e aqui assumiremos que vale $0,00158T_c$.

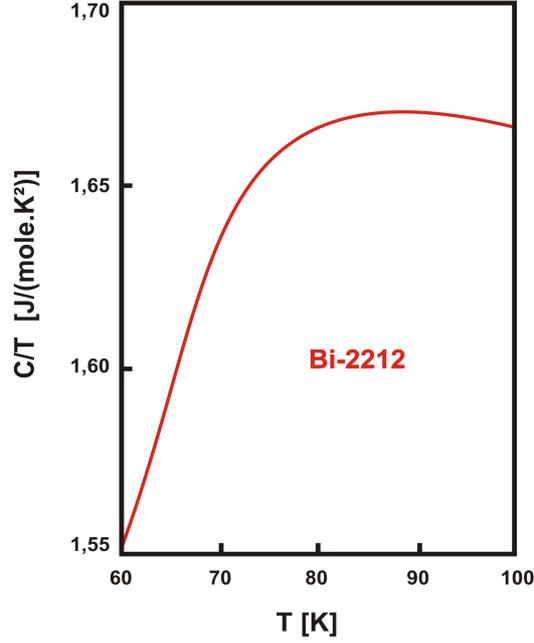


Figura 5.14: Esboço da curva do calor específico para o Bi2212 no intervalo de 60 K a 100 K.

Dessa maneira, considerando $c(T_{sp})$ e as trocas de calor com o meio, reescrevemos a equação 5.19 da seguinte maneira:

$$\gamma c(T_{sp}) \frac{dT_{sp}}{dt} = E_c \left[\frac{|J_{sp}|}{(T_c - T_{sp}) p} \right]^n |J_{sp}| - Q_{spfrp} - Q_{spsh}$$

$$\gamma c(T_{sp}) \frac{dT_{sp}}{dt} = E_c \left[\frac{|J_{sp}|}{(T_c - T_{sp}) p} \right]^n |J_{sp}| - \frac{k_{spfrp}}{(\varepsilon_{spfrp})^2} (T_{sp} - T_{frp}) - \frac{k_{spsh}}{(\varepsilon_{spsh})^2} (T_{sp} - T_{sh})$$

$$\frac{dT_{sp}}{dt} = \frac{1}{0,00158 T_{sp} \gamma} \left\{ E_c \left[\frac{|J_{sp}|}{(T_c - T_{sp}) p} \right]^n |J_{sp}| - \frac{k_{spfrp}}{(\varepsilon_{spfrp})^2} (T_{sp} - T_{frp}) - \frac{k_{spsh}}{(\varepsilon_{spsh})^2} (T_{sp} - T_{sh}) \right\} \quad (5.21)$$

É esta equação diferencial de primeira ordem que descreve o comportamento temporal da temperatura do material supercondutor em um limitador de corrente. Ela deve ser resolvida pra cada estágio da transição supercondutora-normal, ou seja, sua solução depende se o supercondutor se encontra no *flux-creep*, *flux flow* ou normal.

A equação 5.21 é dependente da temperatura T_{sh} do *shunt*. Este é um parâmetro que ainda não temos e iremos determiná-lo na próxima seção.

Temperatura do Shunt

Um modelo similar ao usado para encontrar a temperatura do supercondutor será usado aqui. Então:

$$P = E_{sh} J_{sh} = \rho_{sh} |J_{sh}|^2 \text{ em W/cm}^3 \quad (5.22)$$

Substituindo 5.12 em 5.22:

$$C_V \frac{dT_{sh}}{dt} = (mT_{sh} + z) |J_{sh}|^2 \quad (5.23)$$

Onde C_V é a capacidade térmica volumétrica em $\text{J/cm}^3 \text{K}$. Considerando as trocas de calor na equação 5.23 temos:

$$C_V \frac{dT_{sh}}{dt} = (mT_{sh} + z) |J_{sh}|^2 - Q_{spsh} - Q_{shN}$$

$$\frac{dT_{sh}}{dt} = \frac{1}{C_V} \left\{ (mT_{sh} + z) |J_{sh}|^2 - \frac{k_{spsh}}{(\varepsilon_{spsh})^2} (T_{sh} - T_{sp}) - \frac{k_{shN}}{\varepsilon_{sh}} (T_{sh} - T_N) \right\} \quad (5.24)$$

O termo J_{sh} é a densidade de corrente que atravessa o *shunt* e é calculado dividindo a corrente $i_{sh}(t)$ que flui no *shunt* pelo valor de sua área de secção transversal a_{sh} , então:

$$J_{sh} = \frac{i_{sh}(t)}{a_{sh}}$$

Através da equação diferencial de primeira ordem expressa em 5.24 encontramos a temperatura do *shunt*. Ao contrário da equação diferencial da temperatura do supercondutor, a equação diferencial para a temperatura da *shunt* não depende do estágio da transição supercondutora-normal.

5.3.4 Método Numérico para Solução das Equações Diferenciais

As equações diferenciais 5.21 e 5.24 obtidas previamente são de difícil solução e não possuem solução analítica, sendo então necessário procurar métodos de solução numérica. Mostraremos aqui os princípios do método de integração numérica utilizado para a resolução de tais equações.

O tipo de problema que vamos tratar é chamado de problema de condição inicial, onde temos uma equação diferencial de primeira ordem do tipo:

$$\frac{dy(t)}{dt} = f(t, y) \quad (5.25)$$

onde t é a variável independente, y é a dependente, e $dy(t)/dt$ é a sua primeira derivada, e sabemos a condição inicial:

$$y(t_o) = y_o \quad (5.26)$$

Resolver esta equação significa encontrar a função $y(t)$ que a satisfaz, o que na maioria dos casos não é possível de se fazer analiticamente. Não existe o melhor método para resolver todas as equações diferenciais. Um método que funciona bem para uma equação pode ser fraco para outra.

Se integramos a equação 5.25 em um intervalo t_n a t_{n+1} teremos:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \frac{dy(t)}{dt} dt = \int_{t_n}^{t_{n+1}} y'(t) dt = \int_{t_n}^{t_{n+1}} f[t, y(t)] dt \quad (5.27)$$

$$y(t_{n+1}) - y(t_n) = \int_{t_n}^{t_{n+1}} f[t, y(t)] dt \quad (5.28)$$

A integral na equação 5.28 representa, geometricamente, a área sob a curva na figura 5.15 entre t_n e t_{n+1} . Se aproximarmos esta integral substituindo $f[t, y(t)]$ pelo seu valor em t_n , ou seja, por $f[t_n, y(t_n)]$, então estaríamos dizendo que esta integral tem um valor aproximado para o retângulo pintado na figura 5.15.

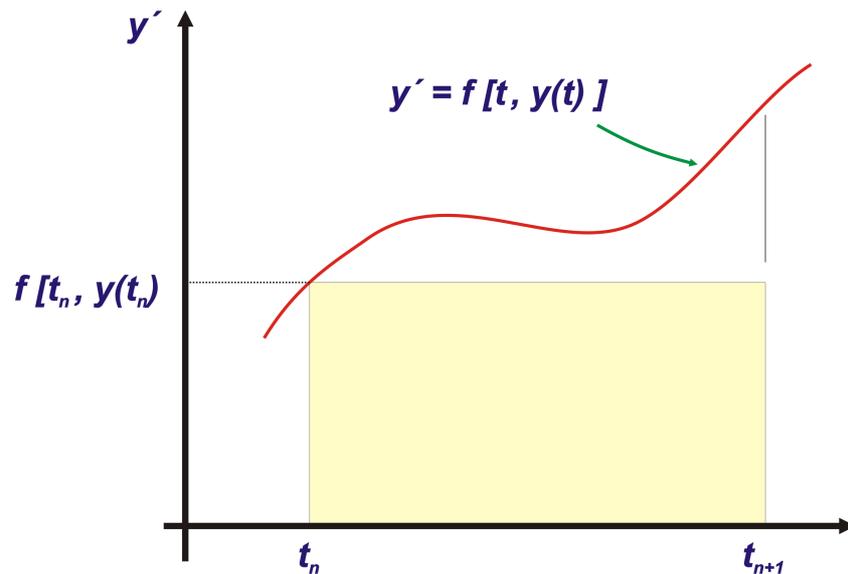


Figura 5.15: Derivação do método de Euler pela Integral.

Com isso, a equação 5.28 se torna:

$$y(t_{n+1}) \approx y(t_n) + f[t_n, y(t_n)](t_{n+1} - t_n)$$

O termo $(t_{n+1} - t_n) = h$ é conhecido como *passo*, e pode ter seu valor escolhido arbitrariamente com o intuito de aproximar a área sob a curva do seu valor correto. Analisando a figura 5.15 podemos notar que quanto menor for o valor de h , melhor será a aproximação do valor correto. Substituindo então $(t_{n+1} - t_n)$ por h , temos:

$$y_{n+1} = y_n + hf[t_n, y(t_n)] \quad (5.29)$$

Esta expressão é conhecida como *Método de Euler* e consiste no cálculo repetitivo da equação usando o resultado de cada iteração para se calcular a próxima. Desse modo obtemos uma sequência de valores $y_0, y_1, y_2, y_3, \dots, y_n \dots$ que se aproximam dos valores da solução $y(t)$. Maiores detalhes sobre este método podem ser obtidos em [60].

O método de Euler também pode ser aplicado a sistemas de equações acopladas, com mais de uma variável dependente e todas como função da mesma variável independente.

$$\begin{cases} y_1' = f_1(t, y_1, y_2) \\ y_2' = f_2(t, y_1, y_2) \end{cases} \quad (5.30)$$

Aplicando o Método de Euler a cada uma das equações deste sistema, temos:

$$\begin{aligned} y_{1(n+1)} &= y_{1n} + hf_1(t, y_{1n}, y_{2n}) \\ y_{2(n+1)} &= y_{2n} + hf_2(t, y_{1n}, y_{2n}) \end{aligned} \quad (5.31)$$

Este é o caso deste trabalho, pois as equações diferenciais que regem o comportamento temporal de T_{sp} e T_{sh} estão acopladas entre si, ou seja:

$$\begin{cases} T_{sp}' = f_1(t, T_{sp}, T_{sh}) \\ T_{sh}' = f_2(t, T_{sp}, T_{sh}) \end{cases} \quad (5.32)$$

com as condições iniciais:

$$\begin{cases} T_{spo} = 77 \text{ K} \\ T_{sho} = 77 \text{ K} \end{cases}$$

Na próxima seção veremos como o Método de Euler é implementado na programação MODELS no ATP para controlar as resistências variáveis R_{sh} e R_{sp} .

5.3.5 O Algoritmo da linguagem MODELS

Agora que já conhecemos as principais teorias e idéias do trabalho, vamos mostrar como estas idéias estão organizadas a fim de esclarecer como funciona o algoritmo. Primeiramente, vamos saber quais os parâmetros utilizados nas simulações. Na tabela 5.3 temos os parâmetros de entrada para as simulações que são comuns aos limitadores das famílias A e B .

Tabela 5.3: Parâmetros usados nas simulações

Parâmetro		Valor
a	Coeficiente da reta $\rho_{spn} = aT_{sp} + b$	0,00000659
b	Coeficiente da reta $\rho_{spn} = aT_{sp} + b$	0,0000687
m	Coeficiente da reta $\rho_{sh} = mT_{sh} + z$	0,0000001255
z	Coeficiente da reta $\rho_{sh} = mT_{sh} + z$	0,000067967
k_{spfrp}	Condutividade térmica entre supercondutor e FRP	1×10^{-7} W/(cm K)
ε_{spfrp}	Espessura entre supercondutor e FRP	1×10^{-2} cm
k_{spsh}	Condutividade térmica entre supercondutor e shunt	5×10^{-4} W/(cm K)
ε_{spsh}	Espessura entre supercondutor e shunt	0,02 cm
k_{sh}	Coeficiente de troca de calor entre shunt e N_{2L}	0,02 W/(cm ² K)
γ	Densidade volumétrica do Bi-2212	6,0 g/cm ³
C_V	Capacidade térmica volumétrica do shunt	2,4 J/cm ³ K

Já os parâmetros da tabela 5.4 são referentes aos limitadores da família A e família B.

Tabela 5.4: Parâmetros usados para os limitadores das famílias A e B

Família A		
Parâmetro		Valor
a_{sp}	Área de secção transversal supercondutor	0,28 cm ²
a_{sh}	Área de secção transversal do shunt	0,15 cm ²
ε_{sh}	Espessura do shunt	0,2 cm
λ	Comprimento total limitador	420 cm
J_c (77 K) médio	Densidade de corrente crítica em 77 K	1003,6 A/cm ²
Família B		
a_{sp}	Área de secção transversal supercondutor	0,534 cm ²
a_{sh}	Área de secção transversal do shunt	0,53 cm ²
ε_{sh}	Espessura do shunt	0,35 cm
λ	Comprimento total limitador	270 cm
J_c (77 K) médio	Densidade de corrente crítica em 77 K	985 A/cm ²

Antes de darmos maiores detalhes do algoritmo escrito no MODELS, é importante saber quais as aproximações que são feitas no modelo. Estas aproximações são adotadas de modo a simplificar a busca pela solução do problema.

1. Bi2212: Toda a fundamentação teórica mostrada é válida apenas para o material supercondutor *Bi2212*. Para a modelagem computacional de outros compostos é necessário o conhecimento da curva $E - J$ do material em estudo.
2. Material heterogêneo: A fabricação de materiais supercondutores é um processo altamente complexo (vide capítulo 4). Por esta razão o material supercondutor que compõe o limitador de corrente pode apresentar heterogeneidades ao longo de seu comprimento, ou seja, pode haver regiões do material que apresentam diferentes valores de J_c e de T_c . Para contornar este problema, assumimos que o material supercondutor que compõe o limitador é homogêneo. Em outras palavras, assumimos que todas as partes do material apresentam o mesmos valores de J_c e de T_c . Além disso, assumiremos que a curva de resistividade (figura 5.9) também é a mesma para todos os componentes limitadores aqui estudados.
3. Indutância Nula: A indutância do limitador é desprezada, sendo considerada nula.

O algoritmo MODELS funciona a base de rotinas (*loops*) que obedecem uma ordem determinada de acordo com as necessidades do problema. A figura 5.16 mostra os principais passos destas rotinas que definem o algoritmo da simulação e no apêndice A encontramos as linhas de programação que as definem. Nas próximas seções daremos maiores detalhes a respeito de cada tarefa do algoritmo. Para todas as simulações, o passo de integração h vale 1×10^{-6} .

Primeiro *Loop* (Flux Creep)

A primeira tarefa a ser feita no algoritmo é determinar as condições iniciais do sistema. Felizmente, estas podem ser estimadas da seguinte maneira:

- Temperatura inicial T_{spo} do supercondutor $\implies 77$ K;
- Temperatura inicial T_{sho} do *shunt* $\implies 77$ K;
- Resistência inicial do supercondutor $R_{spo} = 0 \ \Omega$;
- Campo elétrico inicial $E_o = 0$ V/cm;

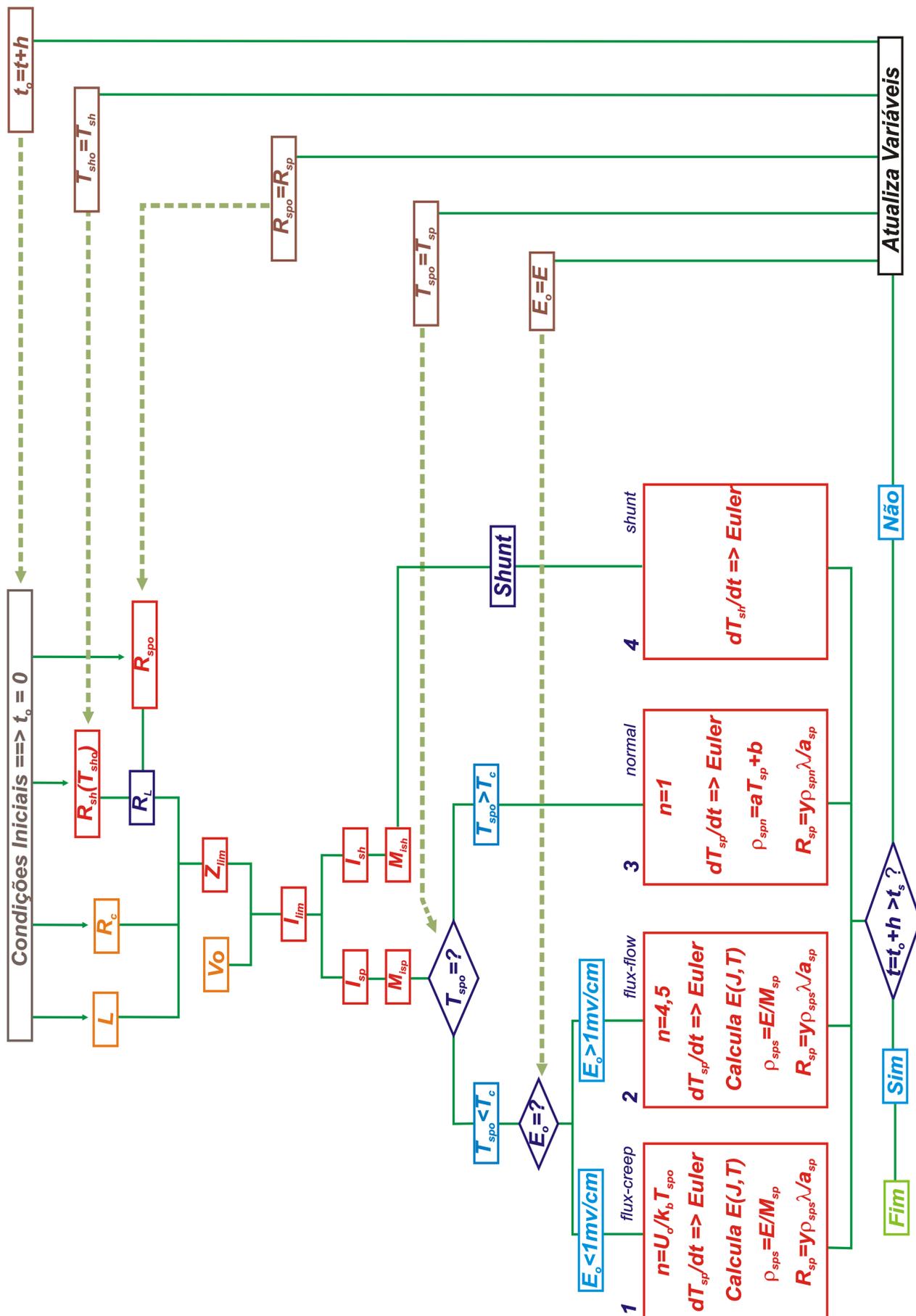


Figura 5.16: Esquema com a lógica das principais tarefas do algoritmo de simulação.

- Tempo inicial $t = 0$ s.

Uma vez determinadas as condições iniciais e conhecidos os valores da indutância L_c , da resistência R_c e da amplitude A da tensão V_o (vide figura 5.5), a programação MODELS dá início aos procedimentos para o cálculo da corrente $i(t)$ que percorre o circuito. Para isso é necessário saber o valor da impedância total do circuito, que depende do valor da resistência R_L do limitador. Lembrando então da equação 5.3 vemos que precisamos conhecer a resistência R_{sh} da *shunt*. O algoritmo MODELS então calcula esta com base no valor da temperatura inicial do mesmo.

$$\rho_{sh} = mT_{sho} + z$$

$$R_{sh} = y\rho_{sh} \frac{\lambda}{a_{sh}} = y(mT_{sho} + z) \frac{\lambda}{a_{sh}} \quad (5.33)$$

Agora então, podemos calcular o valor de R_L . De acordo com a expressão 5.3 temos:

$$R_L = \frac{R_{sh} \times R_{spo}}{R_{sh} + R_{spo}} \quad (5.34)$$

A resistência do circuito é então $R_{eq} = R_L + R_c + R_{contato} + \varpi L_c$ onde $\varpi = 2\pi f = 120\pi$. Porém, definimos como condição inicial que $R_{spo} = 0$ o que nos leva à conclusão que no primeiro loop $R_L = 0$.

Com o valor de R_{eq} encontrado, o ATP determina a impedância total e a corrente $i(0)$ no sistema. É importante saber que é neste ponto que determinamos a corrente do circuito, ou seja, é neste ponto que o valor da corrente é gravado em um arquivo como "output" para que possamos construir o gráfico de $i(t)$ posteriormente.

Uma vez definida a corrente total $i(t)$ que passa pelo circuito, a segunda tarefa do ATP é então descobrir qual parcela desta corrente $i(t)$ passa pelo *shunt* ($i_{sh}(t)$) e qual parcela passa pelo supercondutor ($i_{sp}(t)$). Estas parcelas de corrente são determinadas pelo próprio programa de acordo com os valores das resistências R_{sh} e R_{sp} . Sabendo os valores de $i_{sh}(t)$ e $i_{sp}(t)$ o algoritmo MODELS então passa à próxima tarefa que é encontrar o módulo das densidades de corrente em cada parte (supercondutor e *shunt*),

ou seja:

$$M_{ish}(t) = |J_{sh}(t)| = \frac{|i_{sh}(t)|}{a_{sh}} \quad (5.35)$$

$$M_{isp}(t) = |J_{sp}(t)| = \frac{|i_{sp}(t)|}{a_{sp}} \quad (5.36)$$

A passagem da corrente $i(t)$ pelo limitador altera tanto a sua temperatura como a sua resistência, como foi mostrado em toda a teoria apresentada nas seções anteriores. Assim, no segundo *loop* o valor da resistência R_L do limitador não será mais igual a zero. Para descobrir o novo valor R_L que será usado no segundo *loop*, vamos então recorrer a esta fundamentação teórica demonstrada. Começaremos com a resistência do supercondutor (lembrando que R_L nada mais é que a resistência equivalente entre o material supercondutor e *shunt*).

Seguindo os procedimentos da figura 5.16, saímos agora no quadro M_{isp} e caímos no quadro de decisão $T_{spo} = ?$. Agora, precisamos descobrir a maneira como iremos calcular as alterações ocorridas no material supercondutor, ou seja, se $T_{spo} < T_c$ o mesmo se encontra no estado supercondutor e se $T_{spo} > T_c$ se encontra no estado normal. Como ainda estamos no primeiro *loop*, o supercondutor ainda se encontra a 77 K e o algoritmo segue pelo "caminho" de $T_{spo} < T_c$. Tomada esta decisão, chegamos então a um novo quadro de decisão, $E_o = ?$. É neste quadro que é decidido se o supercondutor está no regime *flux creep* ($E_o < 1 \text{ mV/cm}$) ou *flux flow* ($E_o \geq 1 \text{ mV/cm}$) e, novamente, como ainda estamos no primeiro *loop* temos a condição inicial de campo elétrico, ou seja $E_o = 0 \text{ V/cm}$. Deste modo então caímos agora no quadro 1, correspondente ao *flux creep*.

Dentro do quadro do *flux creep* ocorrem os seguintes cálculos: cálculo do índice n , cálculo do aumento de temperatura causado pela passagem da corrente $i_{sp}(t)$ utilizando o método de Euler, cálculo do valor do campo elétrico E gerado pela corrente $i_{sp}(t)$ e cálculo da resistividade (e resistência) do material supercondutor. Estes itens são

calculados da seguinte maneira:

- Cálculo do índice n no *flux creep*;

$$n = \frac{U_o}{k_b T_{spo}} \quad (5.37)$$

- Cálculo da temperatura do supercondutor pelo método de Euler;

$$T_{sp} = T_{spo} + \frac{h}{0,00158 T_{sp} \gamma} \left\{ E_c \left[\frac{M_{isp}(t)}{p(T_c - T_{spo})} \right]^n M_{isp}(t) - C_1 (T_{spo} - T_{frp}) - C_2 (T_{spo} - T_{sho}) \right\} \quad (5.38)$$

Sendo;

$$C_1 = \frac{k_{spfrp}}{(\varepsilon_{spfrp})^2}$$

$$C_2 = \frac{k_{spsh}}{(\varepsilon_{spsh})^2}$$

- Cálculo do campo elétrico gerado por $i_{sp}(t)$;

$$E_{fc} = E_c \left(\frac{M_{isp}(t)}{p(T_c - T_{sp})} \right)^n \quad (5.39)$$

- Cálculo de resistividade e resistência;

De acordo com a equação 5.10, o algoritmo calcula a resistividade como:

$$\rho_{sps} = \frac{E_c}{p(T_c - T_{spo})} \left[\frac{M_{isp}(t)}{p(T_c - T_{spo})} \right]^{n-1}$$

A resistência será então;

$$R_{sp} = y \rho_{sps} \frac{\lambda}{a_{sp}} = \frac{y \lambda E_c}{a_{sp} p (T_c - T_{spo})} \left[\frac{M_{isp}(t)}{p(T_c - T_{spo})} \right]^{n-1} \quad (5.40)$$

Agora que já calculamos todos os parâmetros do supercondutor para o próximo *loop*, nos resta saber como é feito o cálculo dos parâmetros do *shunt*. Para o *shunt* o modelo é mais simples uma vez que só precisamos saber o aumento da temperatura causado

pela passagem da corrente $i_{sh}(t)$ (quadro 4 da figura 5.16) para que possamos calcular o novo valor da resistência deste no próximo *loop*. A nova temperatura do *shunt* é calculada também pelo método de Euler da seguinte maneira:

$$T_{sh} = T_{sho} + \frac{h}{C_V} \left\{ (mT_{sho} + z) M_{ish}(t)^2 - \frac{k_{spsh}}{(\varepsilon_{spsh})^2} (T_{sho} - T_{spo}) - \frac{k_{shN}}{\varepsilon_{sh}} (T_{sho} - T_N) \right\} \quad (5.41)$$

Feitos todos estes cálculos, o algoritmo termina as suas tarefas do primeiro *loop* e cai então no último quadro de decisão, $t = t + h > t_s$? Este é o quadro que decide se a simulação chegou ao fim ou se é necessário fazer um novo *loop*. A simulação só irá terminar quando o tempo de simulação programado t_s for maior ou igual a t .

Como ainda estamos tratando do primeiro *loop*, então obviamente a simulação não chegou ao fim. Dessa forma é necessário atualizar todos os dados para que o processo possa se repetir novamente no próximo *loop*. A atualização dos dados é feita então como se segue:

1. Atualização da temperatura do *shunt* $\implies T_{sho} = T_{sh}$;

Quando esta atualização é feita a resistência do *shunt* para o próximo *loop* é calculada usando o valor de T_{sh} obtido na equação 5.41

2. Atualização da resistência do material supercondutor $\implies R_{spo} = R_{sp}$;

Quando esta atualização é feita a resistência do supercondutor R_{spo} se altera, não sendo mais nula como definida na condição inicial. Em caso de correntes muito altas (como é o caso de um curto circuito) esta resistência irá aumentar consideravelmente, fazendo com que o valor R_L também aumente e assim, limitando o valor de $i(t)$. O novo valor de R_{spo} para o próximo *loop* é o valor encontrado na equação 5.40.

3. Atualização da temperatura do supercondutor $\implies T_{spo} = T_{sp}$;

Quando esta atualização é feita, a temperatura do supercondutor é aumentada para um valor maior que aquela definida como condição inicial (77 K) passando

agora a ter o valor encontrado em T_{sp} na equação 5.38.

4. Atualização do valor do campo elétrico $E_o = E$;

Nesta atualização o valor de E_o também deixa de ser nulo para o próximo *loop* e passa a ter o valor encontrado na equação 5.39.

5. Atualização do tempo: $t = t + h$.

A seqüência de Loops

A rotina descrita (*loop*) se repete por várias vezes até o fim da simulação. A cada novo *loop* o valores de t , T_{sho} , T_{spo} , R_{spo} , R_{sho} e E_o são alterados e usados no *loop* subsequente. A alteração destes valores faz com que o valor da resistência total do circuito também se altere e, conseqüentemente, altere também o valor da amplitude da corrente $i(t)$.

No entanto, as decisões tomadas pelo algoritmo no primeiro *loop* nem sempre serão as mesmas. Por exemplo, se analisarmos o caso do valor de E_o , veremos que este valor é importante para que o algoritmo decida em qual estágio da transição está o supercondutor; no *flux creep* ou no *flux flow*. Já no caso da decisão de temperatura $T_{spo} = ?$, o algoritmo faz diferença entre o estado supercondutor ($T_{spo} < T_c$) e o estado normal ($T_{spo} > T_c$) do material supercondutor *Bi2212*.

É importante notarmos também que o modo de calcular a temperatura do *shunt* nunca se altera, ou seja, permanece o mesmo independente das decisões tomadas para os cálculos do supercondutor (figura 5.16). Por esta razão não mostraremos novamente como é calculado este parâmetro em cada *loop*.

Quanto à maneira de calcular a temperatura, campo elétrico e resistividade do material supercondutor, uma única mudança é feita quando o algoritmo toma a decisão $E_o \geq 1 \text{ mV/cm}$ e cai no quadro do *flux flow* (que corresponde ao quadro 2 da figura 5.16). Neste quadro, o valor do índice n deixa de ser calculado pela expressão $U_o/k_b T_{spo}$ e passa a valer 4, 5.

Estado Normal

A medida que o valor de $i(t)$ aumenta, o valor na temperatura do supercondutor também irá aumentar. Assim, quando o algoritmo chegar no quadro de decisão $T_{spo} = ?$ e a temperatura do material for maior que T_c ($T_{spo} > T_c$), o algoritmo tomará uma nova decisão e irá cair no quadro 3 da figura 5.16. Este quadro corresponde ao estado normal do material supercondutor e os cálculos para este estágio são feitos da seguinte maneira:

- Cálculo de n no estado normal;

$$n = 1 \quad (5.42)$$

- Cálculo da temperatura do supercondutor pelo método *de Euler*;

$$T_{sp} = T_{spo} + \frac{h}{0,00158T_c\gamma} \left\{ (aT_{sp} + b) M_{isp}(t)^2 - C_1 (T_{spo} - T_{frp}) - C_2 (T_{spo} - T_{sho}) \right\} \quad (5.43)$$

- Cálculo do campo elétrico gerado por $i_{sp}(t)$.

$$E_n = (aT_{sp} + b) M_{isp}(t) \quad (5.44)$$

- Cálculo de resistividade e resistência;

$$\rho_{spn} = (aT_{sp} + b)$$

$$R_{sp} = y\rho_{spn} \frac{\lambda}{a_{sp}} = y(aT_{sp} + b) \frac{\lambda}{a_{sp}} \quad (5.45)$$

5.4 Considerações Finais sobre as Simulações

A simulação de limitadores de corrente de curto circuito supercondutores é um problema de alta complexidade e tem sido amplamente estudado por diversos autores. A grande parte dos autores faz uso do modelo $E - J$ como base para a modelagem da transição supercondutora-normal. No entanto, o modo como cada um resolve o problema varia muito e nem sempre é bem detalhada. Existem trabalhos que consideram

as trocas de calor que ocorrem no limitador [61][62][63][64][65] enquanto outros apenas consideram o sistema como adiabático [66][67][68][69]. Também existem autores que consideram a densidade de corrente crítica como um parâmetro constante [37][48][70] enquanto outros assumem a densidade de corrente crítica como um parâmetro dependente da temperatura [54][55][56][71]. O mesmo caso ocorre com o calor específico; para alguns é constante [67][68][71][72] e para outros, uma função da temperatura [70][73][74].

O modo como cada autor resolve o problema também pode variar; existem aqueles que fazem suas simulações através do método de elementos finitos [48][61] e outros que fazem uso de softwares como *MATLAB*[75][76], *ATP/EMTP*[67][68][69], *PSCAD*[77][78], *MATHEMATICA*[79] e na maioria das vezes os trabalhos não contém informações suficientes para que possamos conhecer o método como cada um resolve as equações do problema.

O presente trabalho tem como principal característica o emprego de várias considerações importantes a respeito de limitadores de corrente supercondutores; tais como trocas de calor entre as partes de um módulo limitador (*shunt* e material supercondutor) e comparação entre resultado de simulações e resultados experimental para validar o modelo (capítulo 6). Atualmente, poucos são os trabalhos na literatura que mostram comparações entre resultados de simulações e resultados de ensaio.

Durante a elaboração deste trabalho diversos modelos foram buscados para simular um limitador de corrente supercondutor. Programas como *MATLAB* e programação em linguagem C++ também foram utilizados, no entanto, sem muito sucesso. Diferentes métodos numéricos para se empregar na solução das equações diferenciais existentes no modelo também foram testados como; método de Runge-Kutta, Adams-Moulton, Adams-Bashforth e método de Gear. Novamente, todos sem sucesso.

Os resultados das simulações que serão mostrados no capítulo 6, são resultados referentes ao modelo descrito neste capítulo e foram os melhores resultados obtidos após inúmeras tentativas com métodos numéricos entre os programas testados (*ATP*, *MATLAB* e linguagem C++).

Capítulo 6

Resultados e Discussões

6.1 Introdução

Neste capítulo iremos mostrar os resultados referentes aos ensaios e às simulações. Primeiramente mostraremos os resultados dos ensaios e posteriormente os resultados das simulações onde serão comparados com os resultados dos ensaios.

6.2 Resultados dos Ensaios

Nas figuras 6.1 e 6.2 podemos observar os resultados dos ensaios $E01$ e $E02$ com os limitadores da família A . Nos gráficos, a corrente prospectiva é a corrente de falta, ou seja, a corrente do circuito sem os limitadores. A corrente limitada é a corrente do circuito com os limitadores conectados em série. Podemos observar também a tensão total que surge nos limitadores durante o ensaio.

Notamos, nas figuras 6.1 e 6.2, a efetiva limitação da corrente prospectiva por parte dos limitadores. Em ambos os ensaios observamos que o primeiro pico de corrente limitada é maior que os demais. Isto se deve ao fato da transição do material do estado supercondutor para o estado normal; durante o primeiro ciclo a transição ao estado normal ainda está ocorrendo, ou seja, o limitador ainda está desenvolvendo a sua resistência elétrica devido ao movimento de vórtices. Após a transição, a resistência do material supercondutor se torna maior que a resistência do *shunt* e como este tem

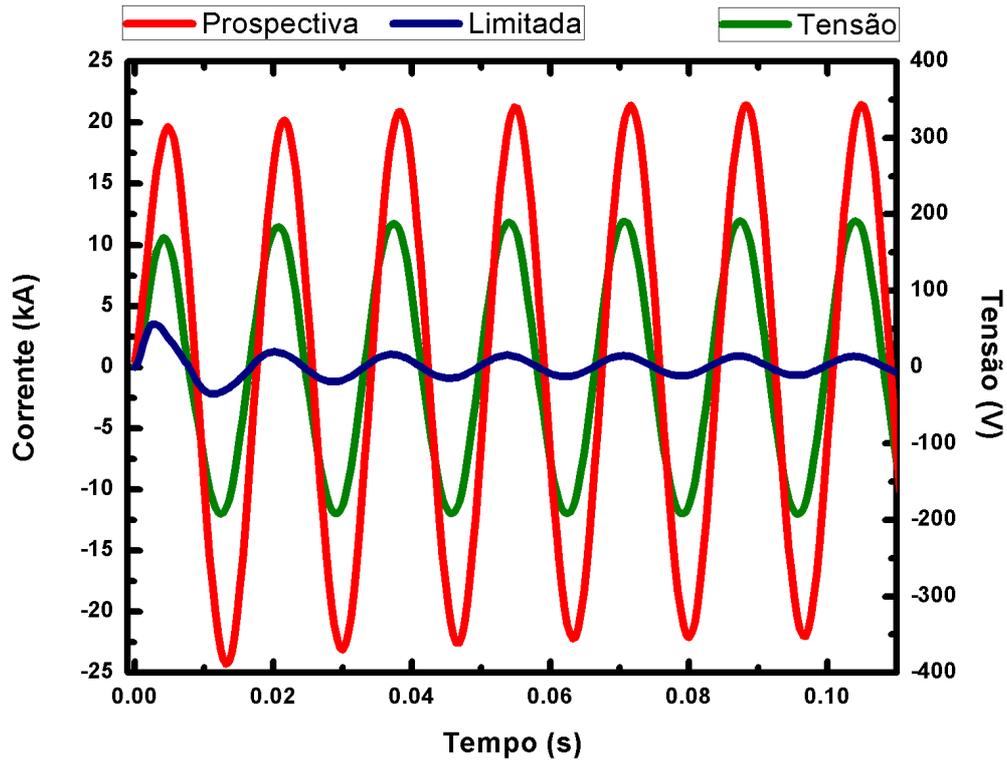


Figura 6.1: Resultado do ensaio E01 em $137,5 V_{rms}$; corrente prospectiva ($15,4 kA_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.

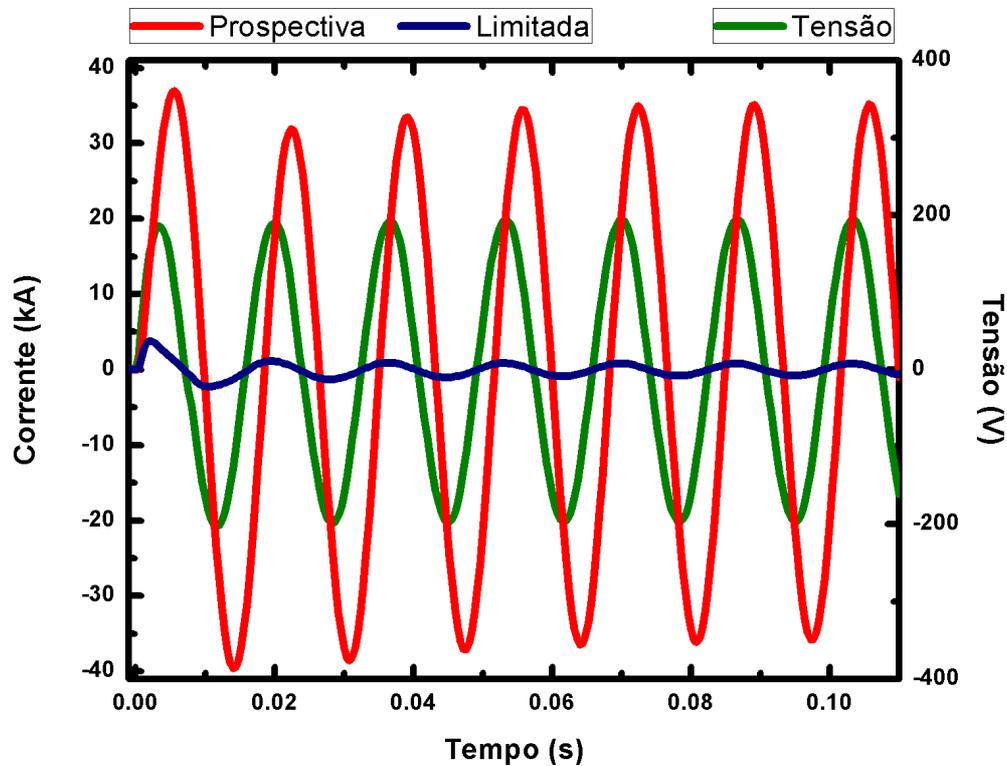


Figura 6.2: Resultado do ensaio E02 em $137,5 V_{rms}$; corrente prospectiva ($25,0 kA_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.

pouca influência de sua temperatura (que aumenta por efeito Joule) no valor de sua resistência, podemos observar um regime estacionário na corrente limitada, pois agora a maior parte da corrente flui pelo resistor *shunt*. Os resultados das simulações serão mostrados posteriormente.

Não é possível saber com precisão o exato momento em que a transição para o estado normal se completa. No entanto, através dos resultados das simulações que foram descritas no capítulo 5, poderemos fazer uma estimativa deste instante onde a transição termina. Também será possível obter através dos resultados das simulações, o comportamento temporal das resistências do *shunt* e do supercondutor.

Se definirmos um índice de limitação de corrente de crista β como sendo a razão do valor do primeiro pico de corrente limitada pelo valor da primeira crista da corrente prospectiva, ou seja,

$$\beta = \frac{1^{\circ} \text{ Pico Limitada}}{1^{\circ} \text{ Pico Prospectiva}} \quad (6.1)$$

Poderemos saber quão eficaz é a limitação de corrente; quanto mais próximo de zero for o valor de β , melhor será a limitação, e quanto mais próximo de 1, pior será a limitação. Desse modo, para os ensaios *E01* e *E02* temos:

$$\beta(E01) = \frac{3,57 \text{ kA}}{19,67 \text{ kA}} = 0,2154$$

$$\beta(E02) = \frac{3,79 \text{ kA}}{37,01 \text{ kA}} = 0,1024$$

Os resultados de $\beta(E01)$ e $\beta(E02)$ nos mostram que a limitação é mais eficiente para o caso onde a corrente prospectiva é maior. Esta é uma característica peculiar observada em nossos ensaios nos limitadores supercondutores; são mais eficientes na limitação quando a corrente de falta é maior. Tal característica pode ser explicada da seguinte maneira: se recorrermos à equação 5.10 da resistividade, definida no capítulo 5, veremos que quanto maior for o valor da corrente de falta, maior será o valor da densidade de corrente J_{sp} que flui no material supercondutor e quanto maior for o

valor desta densidade de corrente, mais rápido será o desenvolvimento da resistência do limitador. Quanto mais rápido este aumento da resistência do limitador, mais rápida será a atuação deste, acarretando numa limitação da corrente de curto-circuito mais efetiva.

Nas figuras 6.3, 6.4 e 6.5 podemos observar os resultados dos ensaios $E03$, $E04$ e $E05$ com os limitadores da família B .

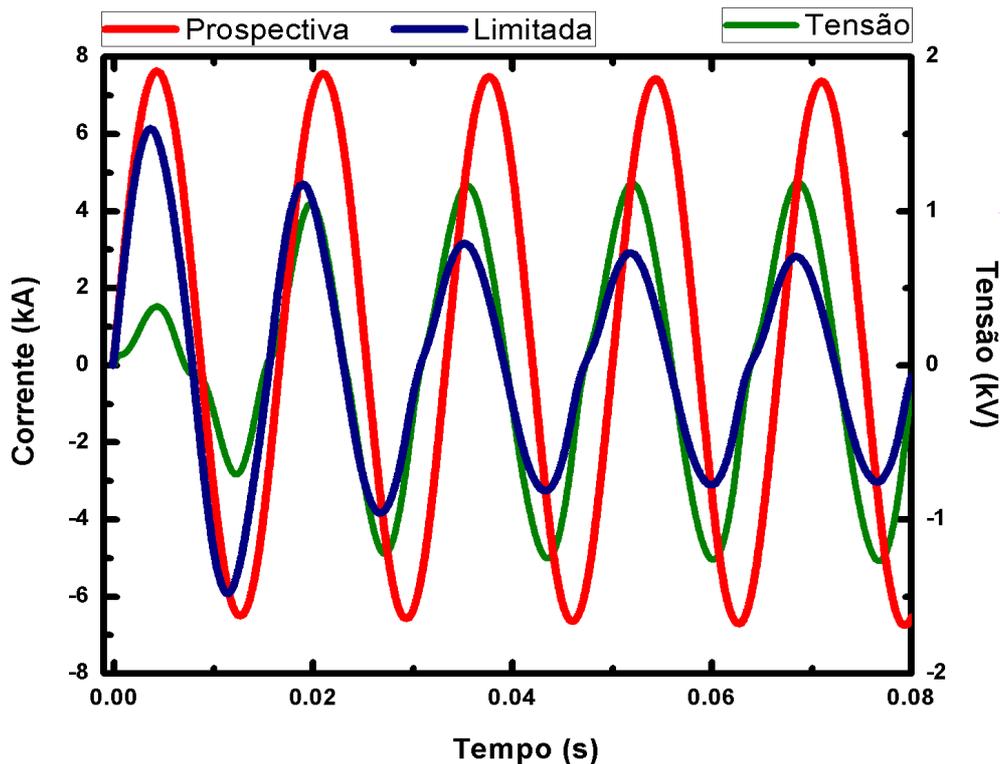


Figura 6.3: Resultado do ensaio $E03$ em 1 kV_{rms} ; corrente prospectiva ($5,0\text{ kA}_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.

Os resultados referentes aos ensaios $E03$, $E04$ e $E05$ nos mostram as mesmas características dos ensaios $E01$ e $E02$, ou seja, podemos observar que o primeiro pico é maior que os demais e também um regime permanente após a transição do material supercondutor para o estado normal. Os valores do índice de limitação de corrente de crista para estes ensaios são:

$$\beta(E03) = \frac{6,13\text{ kA}}{7,62\text{ kA}} = 0,8044$$

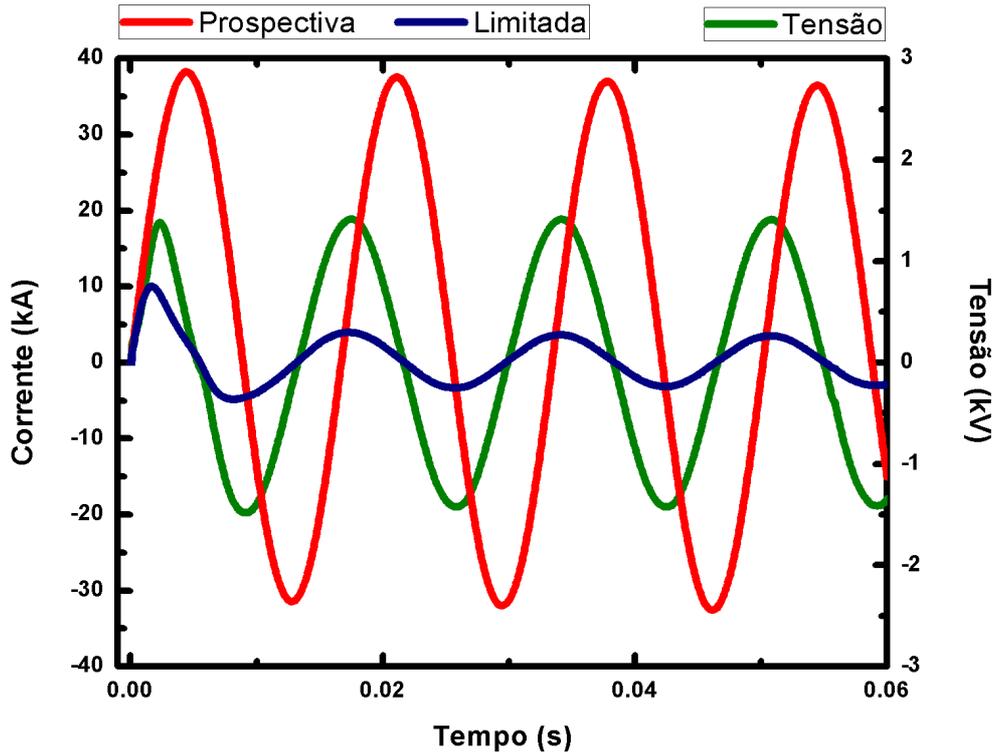


Figura 6.4: Resultado do ensaio E04 em 1 kV_{rms} ; corrente prospectiva ($25,0\text{ kA}_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.

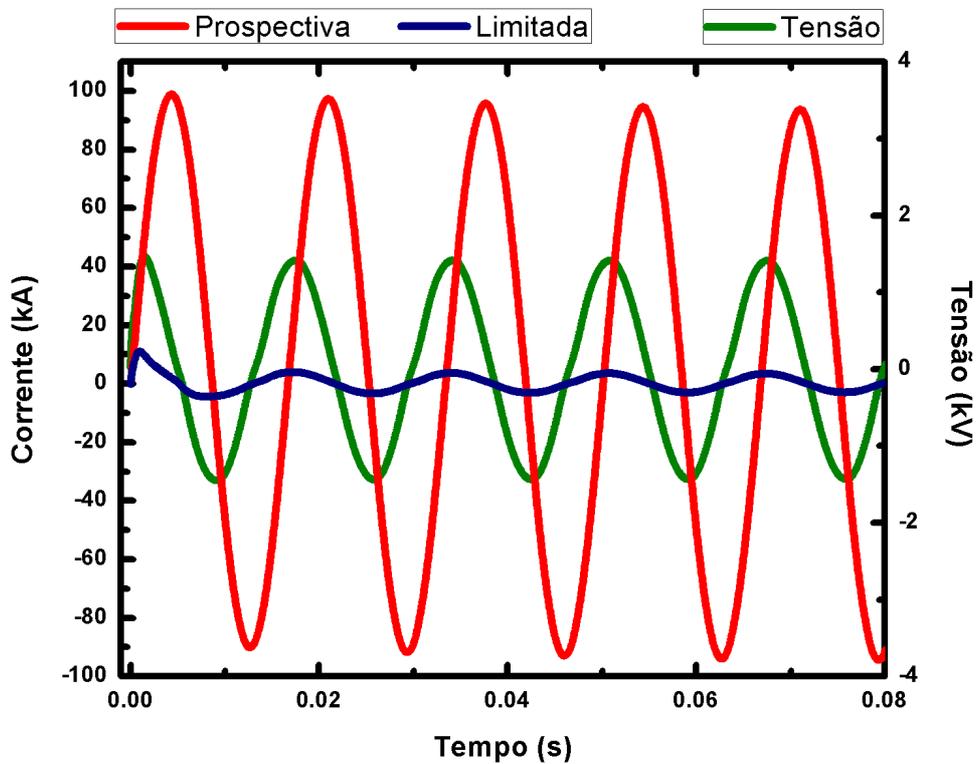


Figura 6.5: Resultado do ensaio E05 em 1 kV_{rms} ; corrente prospectiva ($67,0\text{ kA}_{rms}$), corrente limitada e tensão total nos limitadores.

$$\beta(E04) = \frac{10,04 \text{ kA}}{38,30 \text{ kA}} = 0,2621$$

$$\beta(E05) = \frac{11,04 \text{ kA}}{98,96 \text{ kA}} = 0,11151$$

Novamente, podemos observar uma limitação mais efetiva no caso de uma corrente de falta maior. No ensaio *E03* notamos que a amplitude da onda de corrente limitada vai diminuindo mais lentamente em comparação com todos os demais resultados mostrados. Este resultado é característico de uma transição mais lenta devido à corrente prospectiva relativamente baixa utilizada. Se recorrermos à equação 5.21 no capítulo 5 veremos que o aumento de temperatura do material supercondutor também depende da densidade de corrente J_{sp} que o atravessa. Desse modo, quando a corrente de falta do sistema for relativamente baixa, o valor de J_{sp} também será baixo, fazendo com que o aumento de temperatura seja lento, ocasionando num tempo maior para atingir a temperatura crítica T_c , ou seja, fazendo com que a transição do material supercondutor para o estado normal seja mais longa.

Nas próximas seções iremos analisar os resultados referentes às simulações. Poderemos comparar os resultados de nossos ensaios com os resultados da simulação a fim de validar o modelo desenvolvido. Além disso, estes resultados irão nos mostrar importantes estimativas a respeito do tempo de transição do material supercondutor, da temperatura e resistência do *shunt* e supercondutor, das correntes que fluem por cada parte do limitador e tempo de recuperação após o término de um curto-circuito.

6.3 Resultados de Simulação

6.3.1 Limitação de Corrente, Tensão e tempo de Transição

As figuras 6.6 e 6.7, mostram os resultados das simulações de corrente limitada e tensão para ensaio *E01* enquanto as figuras 6.8 e 6.9 mostram os resultados da simulação para o ensaio *E02*.

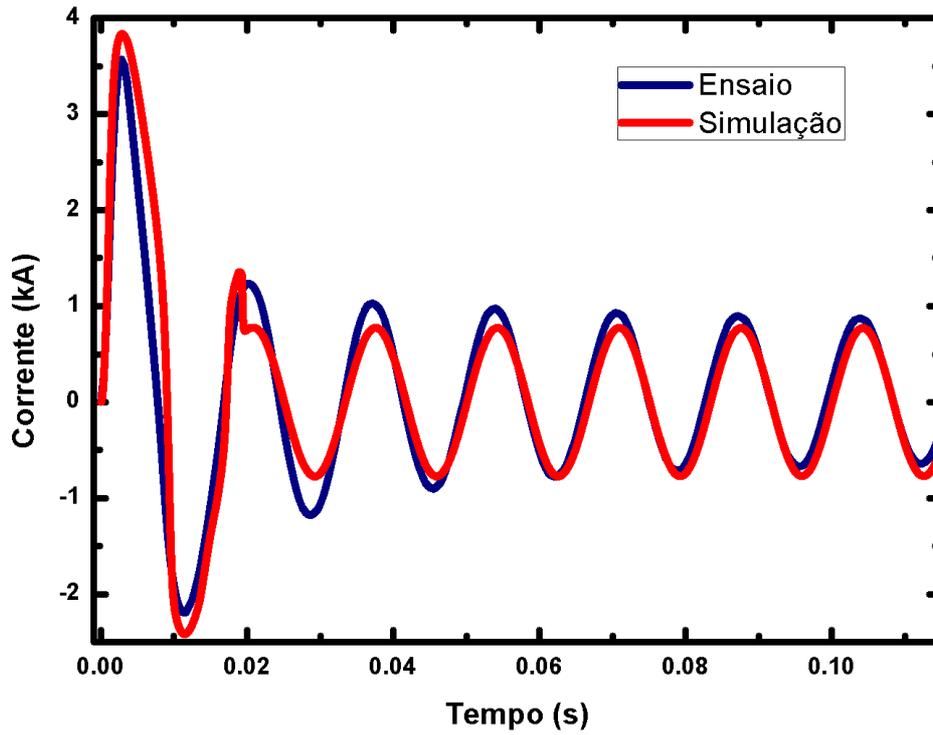


Figura 6.6: Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio E01.

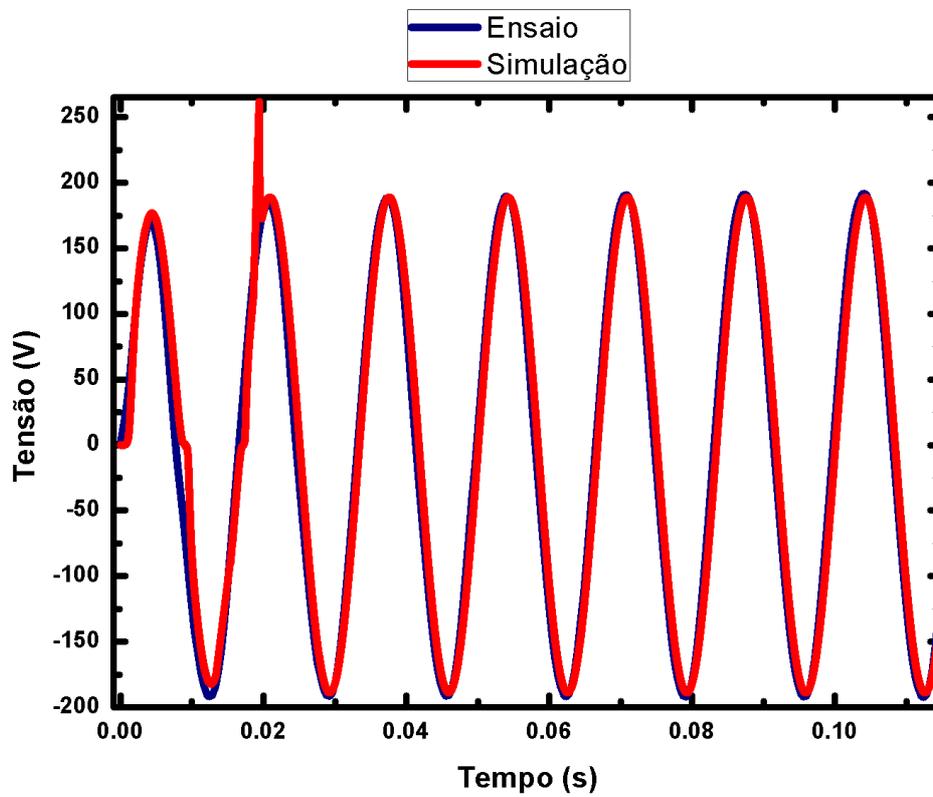


Figura 6.7: Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio E01.

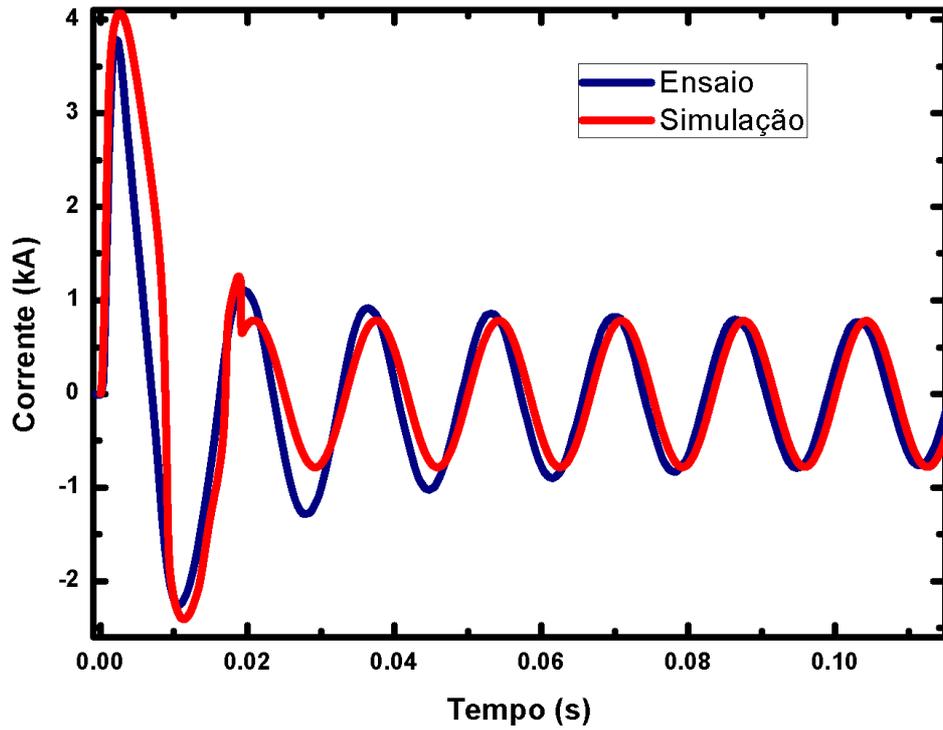


Figura 6.8: Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio E02.

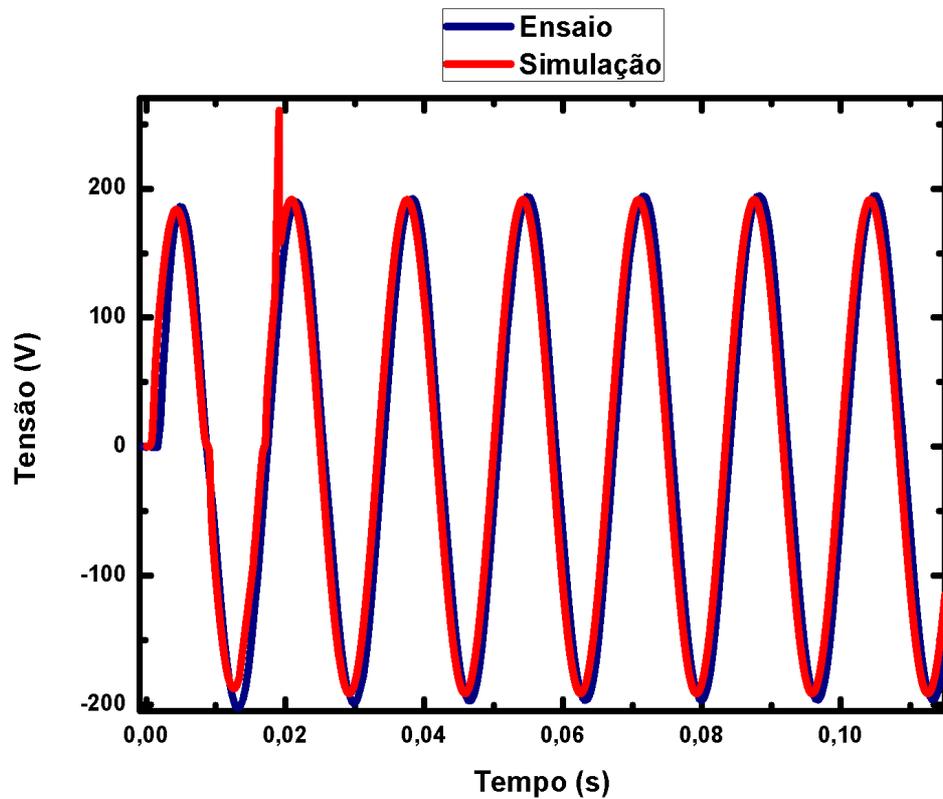


Figura 6.9: Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio E02.

Em ambos os resultados de simulação para a limitação de corrente, notamos uma abrupta mudança no valor da corrente. Isto ocorre pois, de acordo com a simulação, é neste instante onde a transição para o estado normal do material supercondutor se completa.

No entanto, como observamos algumas diferenças entre a curva de simulação e curva de ensaio, é possível que este instante da transição no ensaio seja maior que o encontrado na simulação, pois o decaimento na amplitude de corrente da curva de ensaio é mais suave que o decaimento da amplitude da onda de corrente da simulação.

Os resultados da simulação para a tensão total nos limitadores concordam melhor com os resultados de ensaio. Observamos apenas um pico de tensão próximo ao terceiro pico que corresponde a uma possível singularidade nos cálculos da simulação.

Aparentemente, a transição do material para o estado normal em ambas as simulações (para os ensaios $E01$ e $E02$) ocorrem no mesmo instante de tempo. Para determinar o exato instante da transição de cada simulação vamos analisar os valores do índice de transição n ao decorrer do tempo na figura 6.10; no instante que este índice se torna igual a 1, a transição para o estado normal está completa.

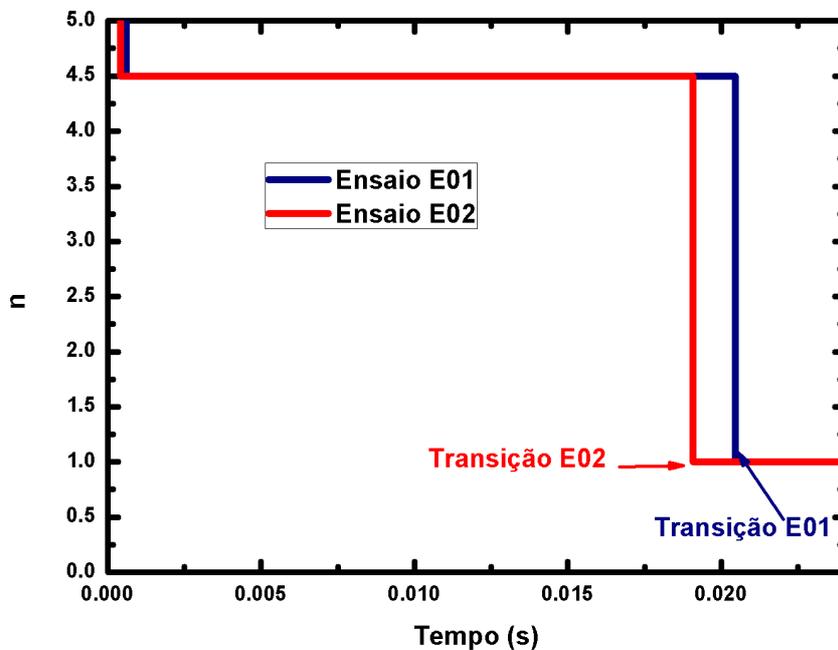


Figura 6.10: Resultado da simulação para o instante da transição do material supercondutor para os ensaios $E01$ e $E02$.

Como podemos observar, a simulação nos mostra que o tempo de transição da simulação do ensaio *E01* é maior que o tempo de transição da simulação do ensaio *E02*. Na simulação do ensaio *E01* a transição se completa em 20,47 ms enquanto que na simulação do ensaio *E02* a transição se completa em 19,1 ms. Como a corrente de curto-circuito (ou prospectiva) é menor no ensaio *E01* (19 kA_{rms}), já podíamos esperar um tempo maior para a transição, já que o tempo para o material atingir T_c é maior devido à menor densidade de corrente.

Nas figuras 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16 observamos os resultados das simulações de limitação de corrente e tensão em comparação com resultados dos ensaios *E03*, *E04* e *E05*.

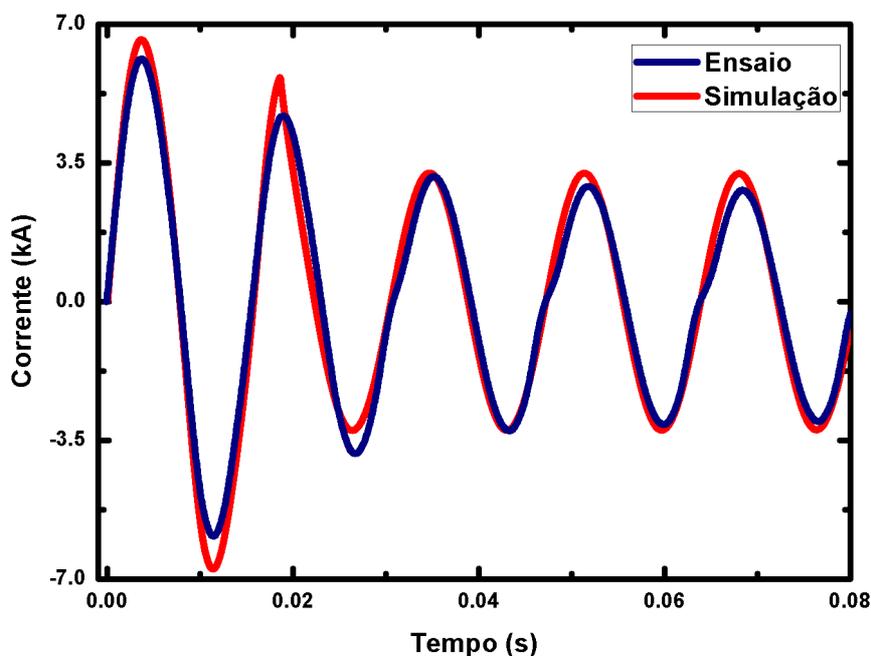


Figura 6.11: Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio *E03*

Como nas simulações para os ensaios *E01* e *E02*, nas simulações para *E04* e *E05* também notamos uma mudança abrupta no valor da corrente limitada devido à transição do material para o estado normal. Já os picos de tensão que observamos, novamente são atribuídos à singularidades nas simulações. De um modo geral, podemos ver que os resultados das simulações concordam razoavelmente bem com os resultados experimentais destes ensaios.

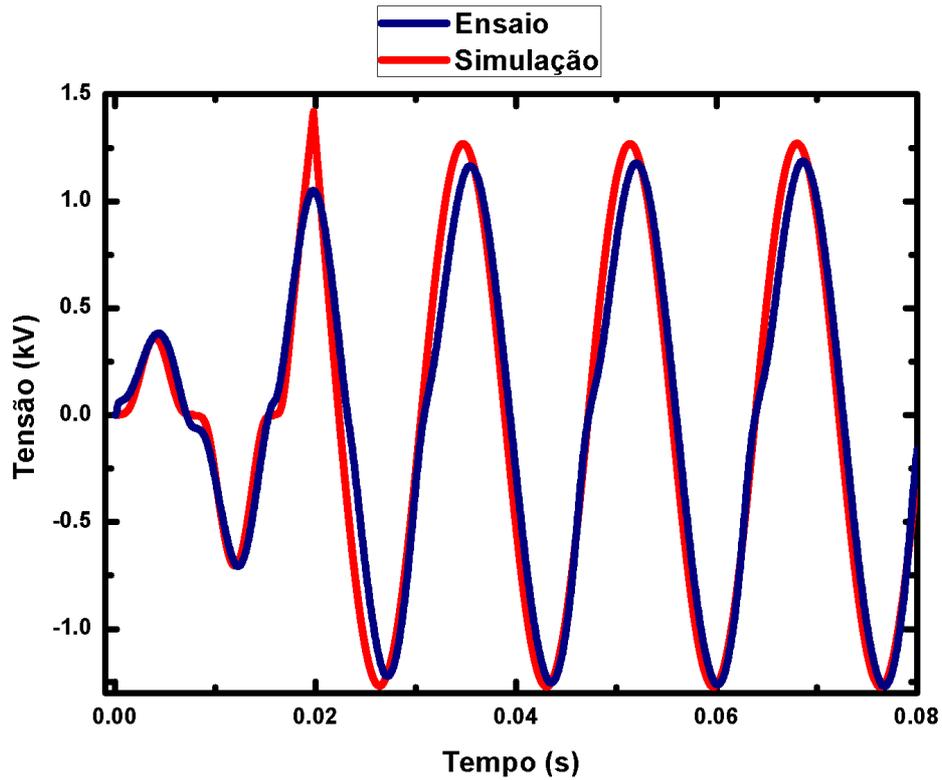


Figura 6.12: Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio E03.

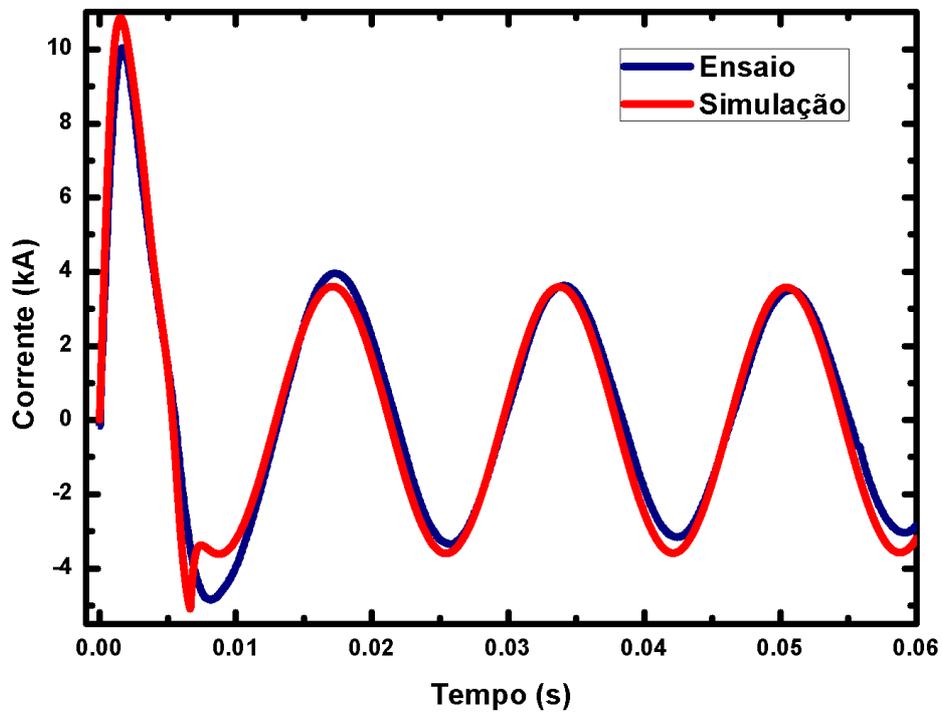


Figura 6.13: Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio E04.

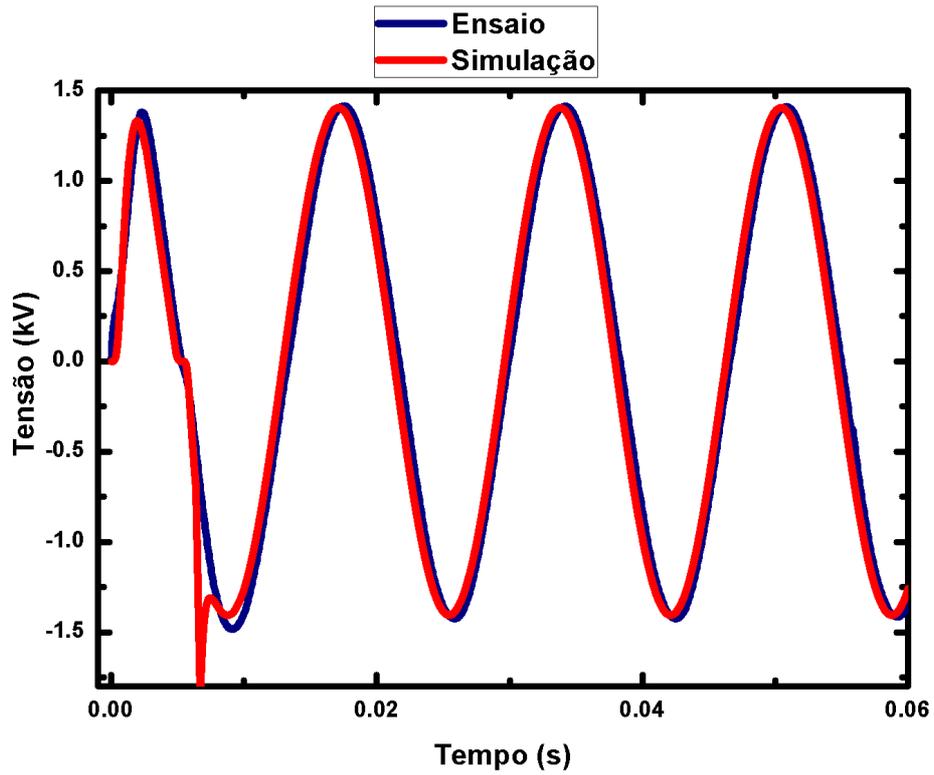


Figura 6.14: Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio E04.

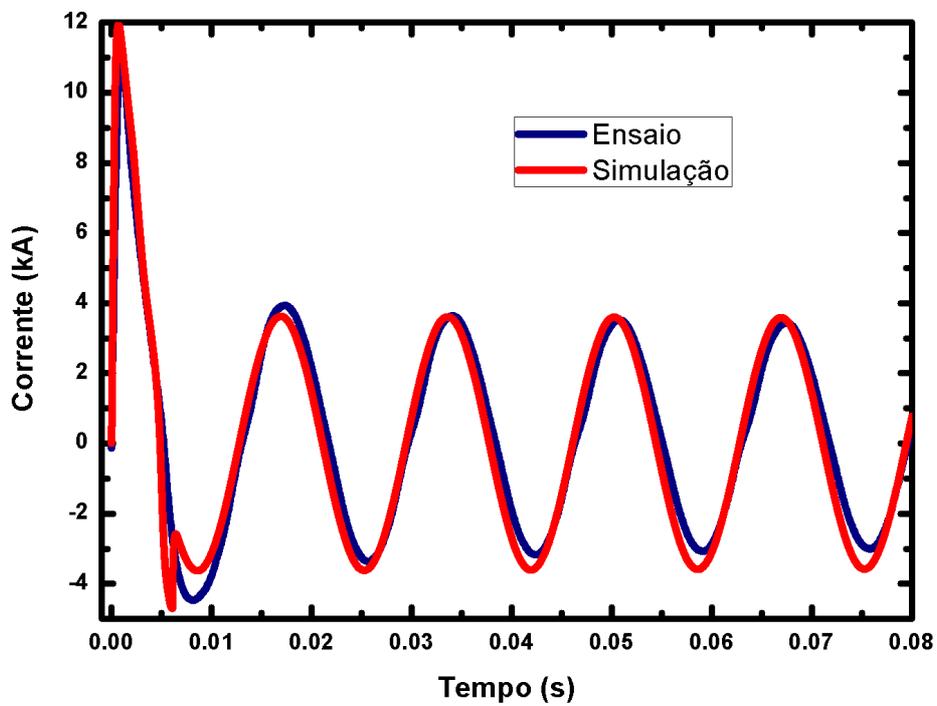


Figura 6.15: Resultado de limitação; comparação de corrente limitada entre simulação e ensaio para o ensaio E05.

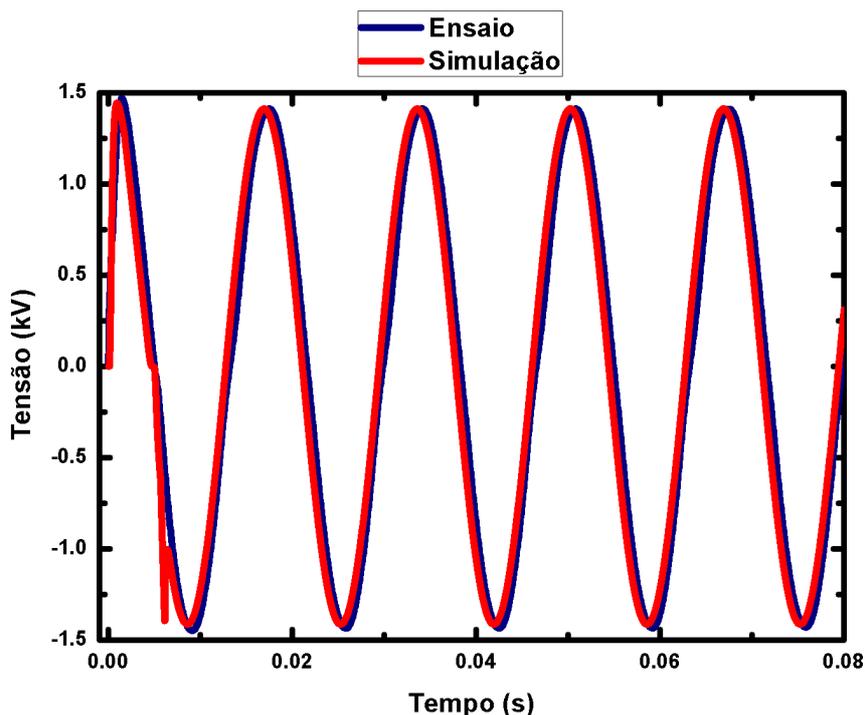


Figura 6.16: Resultado de tensão; comparação de tensão entre simulação e ensaio para o ensaio E05.

Quanto ao tempo de transição, faremos a mesma análise feita para os ensaios E01 e E02 a respeito do índice de transição n . Na figura 6.17 podemos ver a evolução do índice n para E03, E4 e E5.

Vemos novamente que o ensaio com menor corrente prospectiva apresenta maior tempo de transição; para E03 o tempo de transição é de 18,7 ms, para E04, 6,6 ms e para E05, 6 ms

As diferenças entre resultados de ensaio e resultados de simulação apresentados podem ter as seguintes razões;

- Falhas na lógica de programação: É possível que existam erros na lógica do algoritmo que foi mostrada na figura 5.16 que gerem as diferenças nos resultados;
- Aproximações indevidas; Sabe-se que o modelo que descreve as características da curva $E - J$ é na verdade um modelo de ajuste, ou seja, é um modelo simples usado para descrever toda a complexidade da dinâmica de vórtices de materiais supercondutores de alta temperatura crítica. Dessa maneira, é possível que as

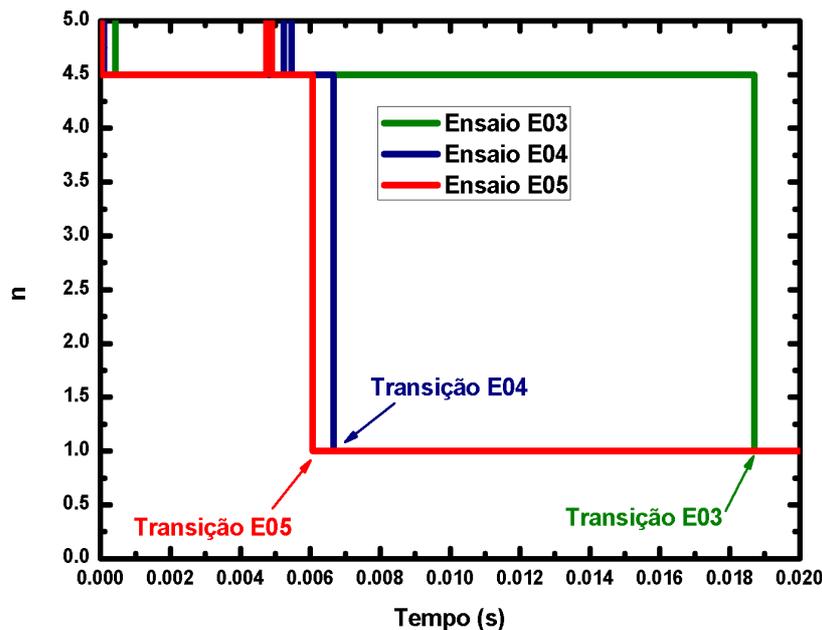


Figura 6.17: Resultado da simulação para o instante da transição do material supercondutor para os ensaios E03, E04 e E05.

fontes de erro comecem já no emprego de um modelo simples como este.

- Simplificação das trocas de calor: Durante a ocorrência de um curto-circuito a temperatura do limitador (como um todo) aumenta fazendo com que o nitrogênio líquido se torne vapor ao redor do limitador, o que resulta no surgimento de bolhas de N_2 que são bons isolantes térmicos, dificultando a perda de calor do dispositivo para o meio. Este é um fenômeno que não foi levado em consideração em nosso modelo.
- Simplificações do material: Como já sabemos, limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores são constituídos de um material cerâmico altamente heterogêneo que apresenta diferentes valores de J_c e T_c ao longo de todo seu comprimento e aqui assumimos que estes valores são os mesmos em todos os pontos do material.
- Campo magnético: Materiais supercondutores são altamente dependentes da influência de campos magnéticos, no entanto, em nosso modelo desprezamos qualquer influência de campo magnético que possa estar atuando sobre os limitadores..

Devido a esta complexidade na solução do problema, podemos afirmar que tais simulações podem ser consideradas satisfatórias uma vez que os resultados obtidos reproduziram as principais características dos dispositivos limitadores e que também foram capazes de reproduzir resultados para diferentes componentes em diferentes ensaios. Este é um ponto importante pois mostra que o modelo desenvolvido não serviu para prever apenas um caso para um único tipo de limitador.

A seguir, veremos resultados que são de difícil aquisição experimental mas que podem ser estimados a partir dos resultados das simulações.

6.3.2 Temperatura

Devido à rapidez com que ocorre um curto-circuito as temperaturas, de cada parte de um limitador (supercondutor e *shunt*) são de difícil aquisição experimental. Neste contexto, simulações se tornam importantes para que possamos fazer estimativas a respeito do aumento de temperatura do material supercondutor e do *shunt* durante um curto-circuito.

Nas figuras 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22 mostramos os resultados de temperatura obtidos com nossas simulações para os ensaios *E01*, *E02*, *E03*, *E04* e *E05* respectivamente.

Os resultados das simulações de temperatura para os ensaios *E01* e *E02* nos mostram que a temperatura do *shunt* foi inferior à temperatura do material supercondutor ao final do ensaio. Tal resultado é justificável; a tensão V_o usada nestes ensaios foi baixa ($137,5 V_{rms}$) de maneira a não haver potência suficiente para elevar a temperatura do *shunt* para valores maiores do que a temperatura do material supercondutor. No entanto, é importante ressaltar que se o tempo de ensaio (e simulação) fossem maiores, a temperatura do *shunt* certamente se elevaria a valores maiores que a temperatura do supercondutor.

Para a simulação de temperatura do ensaio *E03* observamos que a temperatura do *shunt* também não é maior que a do supercondutor, mesmo o ensaio sendo realizado em uma tensão elevada ($1,0 kV_{rms}$). Neste caso, podemos dizer que a corrente de

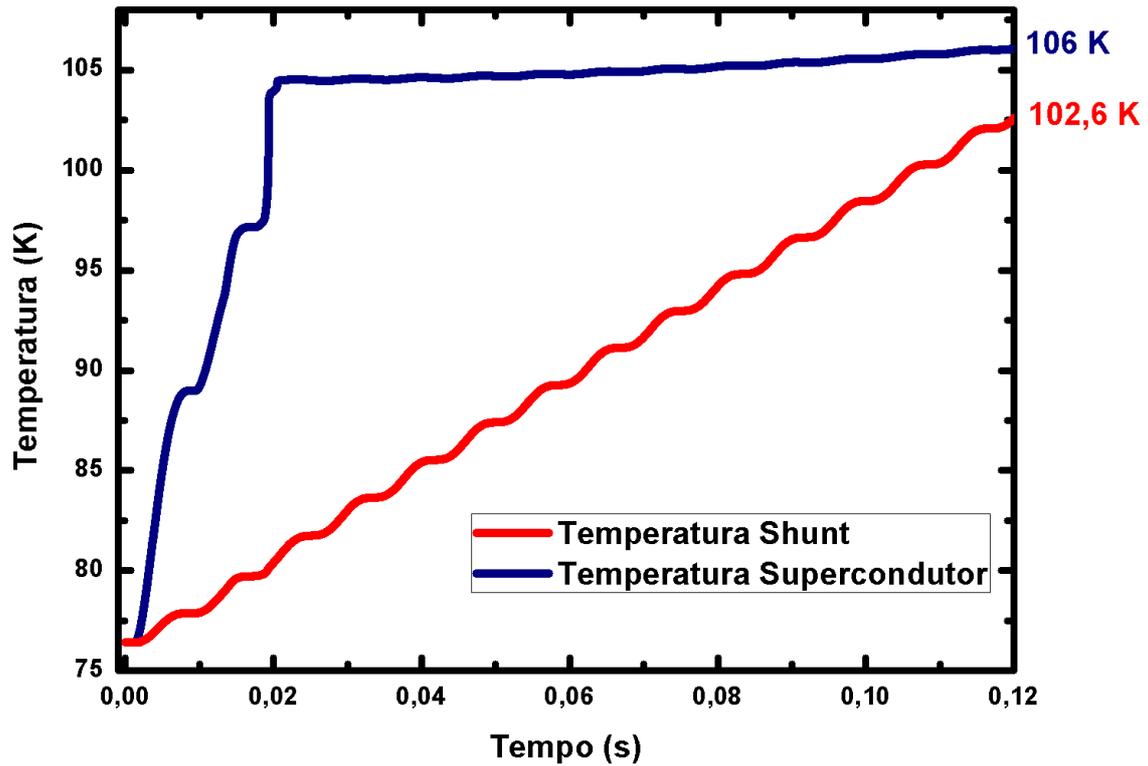


Figura 6.18: Simulação do aumento de temperatura do shunt e supercondutor durante o ensaio E01.

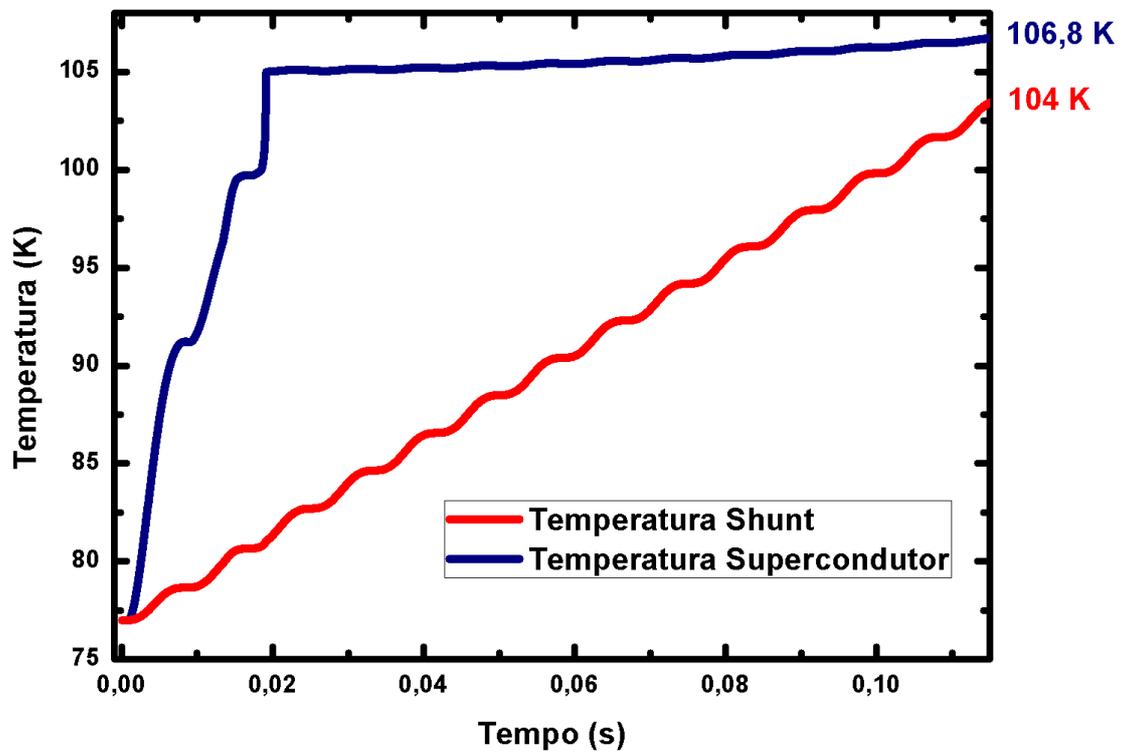


Figura 6.19: Simulação do aumento de temperatura do shunt e supercondutor durante o ensaio E02.

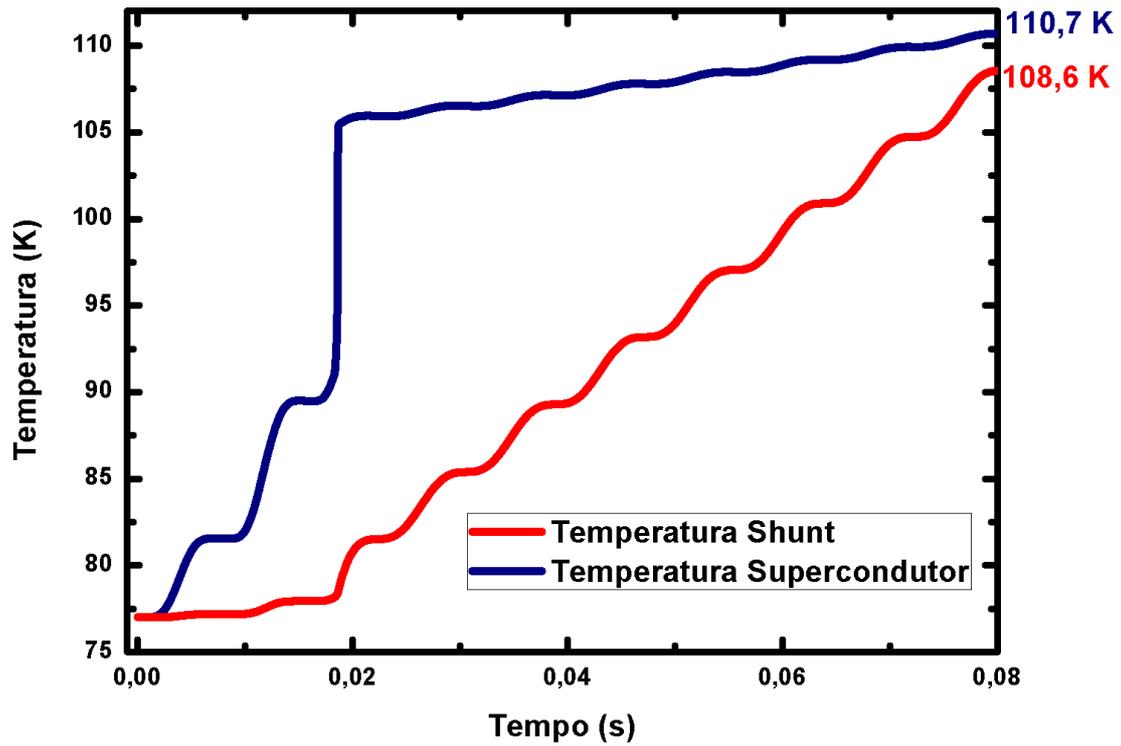


Figura 6.20: Simulação do aumento de temperatura do shunt e supercondutor durante o ensaio E03.

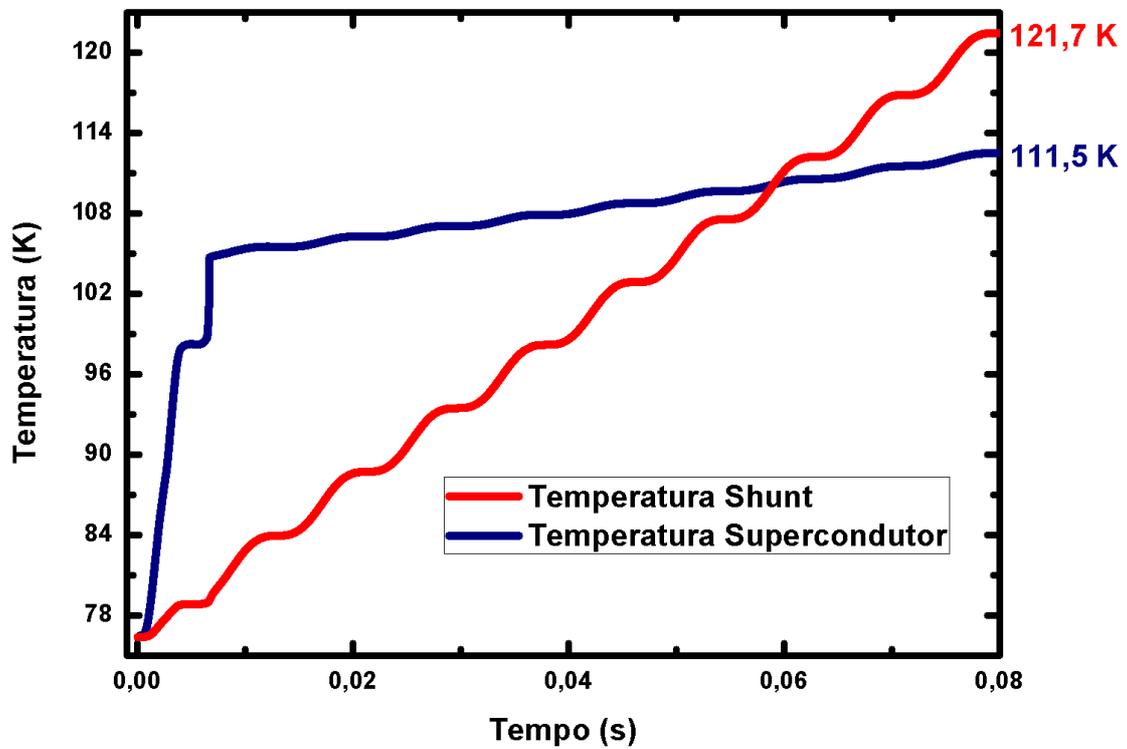


Figura 6.21: Simulação do aumento de temperatura do shunt e supercondutor durante o ensaio E04.

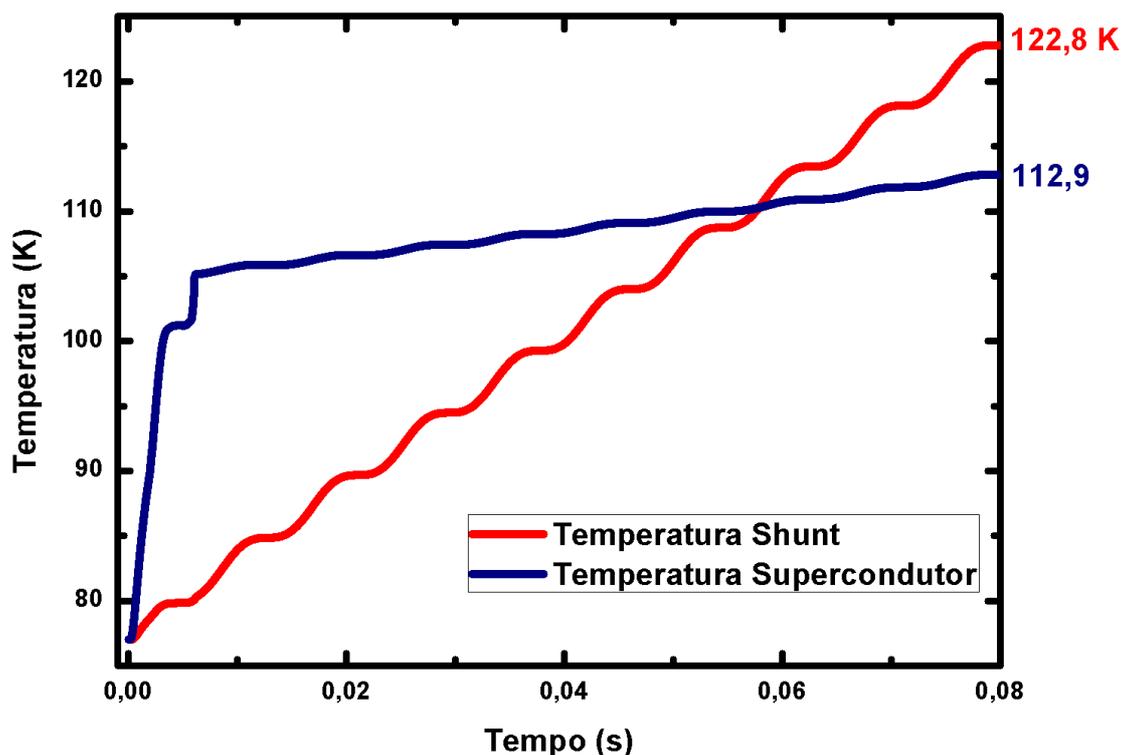


Figura 6.22: Simulação do aumento de temperatura do shunt e supercondutor durante o ensaio E05.

falta (5 kA_{rms}) aplicada ainda não foi o suficiente para gerar potência e aquecer o *shunt*. Novamente, se o tempo de ensaio (e simulação) fosse maior, a temperatura do *shunt* também seria maior que a temperatura do supercondutor. Neste resultado é importante notar também que a temperatura do material supercondutor não se eleva tão rapidamente quanto nos demais ensaios e que a temperatura do *shunt* passa a ter um aumento efetivo somente após a transição do material supercondutor para o estado normal.

Já os resultados para a simulação de temperatura dos ensaios E04 e E05 a temperatura do *shunt* atinge valores finais maiores que a temperatura do material supercondutor devido às altas correntes e altas tensões aplicadas.

De um modo geral, após a transição, a temperatura do material supercondutor aumenta de maneira mais lenta que a temperatura do *shunt*. Isto se deve ao fato de que após a transição, a maior parte da corrente passa pelo *shunt* devido à alta resistência do material supercondutor. Na próxima seção iremos analisar os resultados das simulações

para as resistências destes limitadores onde poderemos observar esta característica.

Embora seja difícil fazer comparações entre estas estimativas de temperatura obtidas com as simulações com as medidas experimentais, podemos dizer que estes resultados são satisfatórios uma vez que concordam com as previsões informadas pelo fabricante (*Nexans Superconductors*).

6.3.3 Resistências

Na seção anterior, dissemos que após a transição, a resistência do material supercondutor se torna alta em relação ao valor da resistência do *shunt*. Como poderemos ver nos próximos resultados das simulações, a resistência do material supercondutor realmente se torna bem maior que a resistência *shunt* após a transição. Por esta razão, o valor da resistência do limitador (ou seja, a resistência R_L definida no capítulo 6) tende para um valor bem próximo ao valor da resistência *shunt*.

Nas figuras 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 e 6.27 mostramos os resultados das simulações para a evolução das resistências dos limitadores durante o curto-circuito, bem como a resistência das partes que os compõem (*shunt* e material supercondutor) para os ensaios $E01$, $E02$, $E03$, $E04$ e $E05$ respectivamente.

Em todos os resultados apresentados notamos que a resistência do material supercondutor se torna maior que a resistência do *shunt*. Nos resultados das simulações de resistência para os ensaios $E01$ e $E02$ vemos que a resistência do supercondutor atinge valores na ordem de $2,2 \Omega$ após a transição enquanto a resistência do *shunt* quase não se altera (devido à pouca dependência de sua resistência com a temperatura) e permanece na ordem de $0,27 \Omega$. Nestas simulações, a resistência do supercondutor (no estado normal) é até 7 vezes maior que a resistência do *shunt* fazendo com que a resistência do limitador R_L tenda para um valor próximo a resistência do *shunt*; aproximadamente $0,24 \Omega$. É importante observar que R_L possui quase o mesmo valor para ambas as simulações após a transição do material supercondutor para o estado normal. No entanto, antes da transição o valor R_L é diferente em cada simulação, como pode ser observado nos detalhes das figuras 6.23 e 6.24.

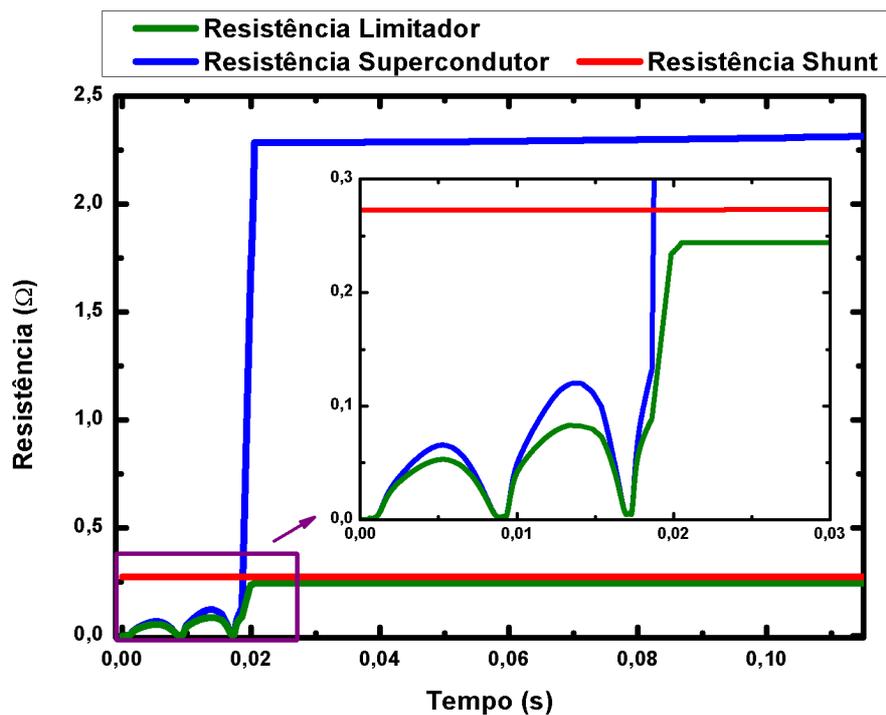


Figura 6.23: Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio E01. No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição

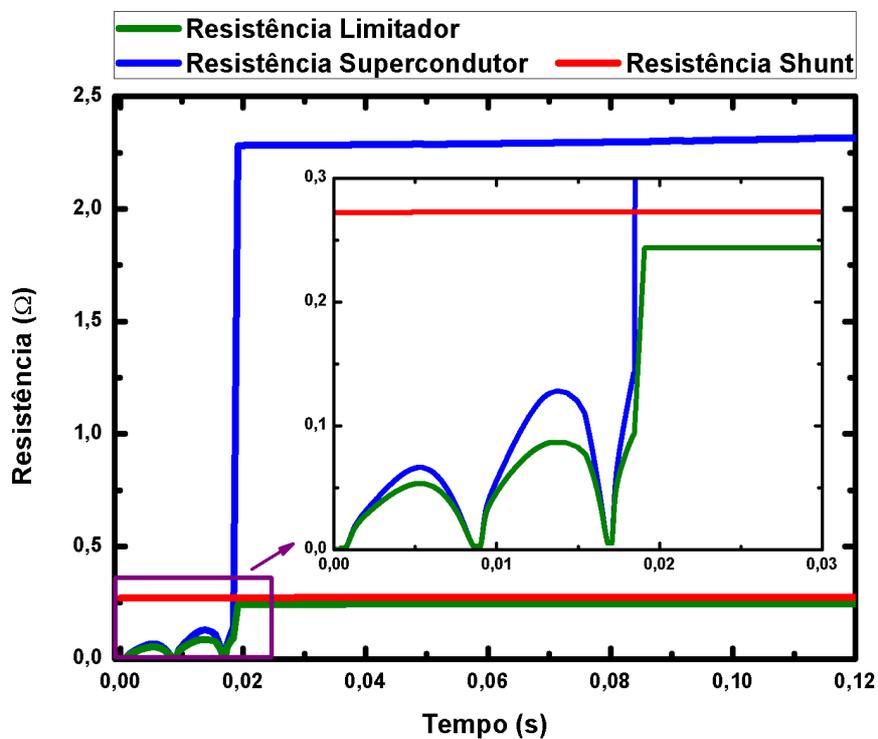


Figura 6.24: Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio E02. No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição

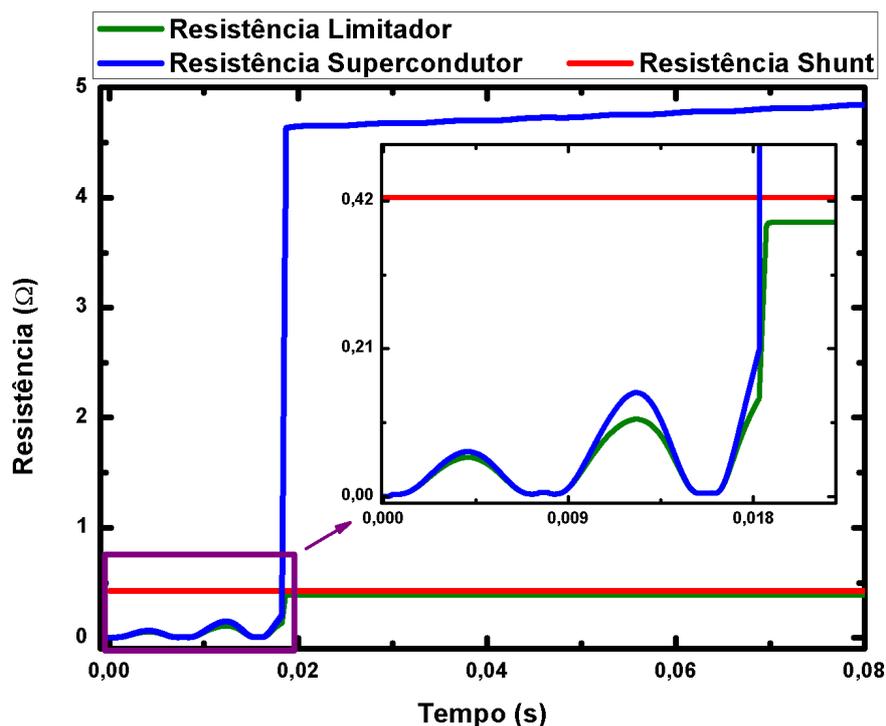


Figura 6.25: Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio E03. No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição

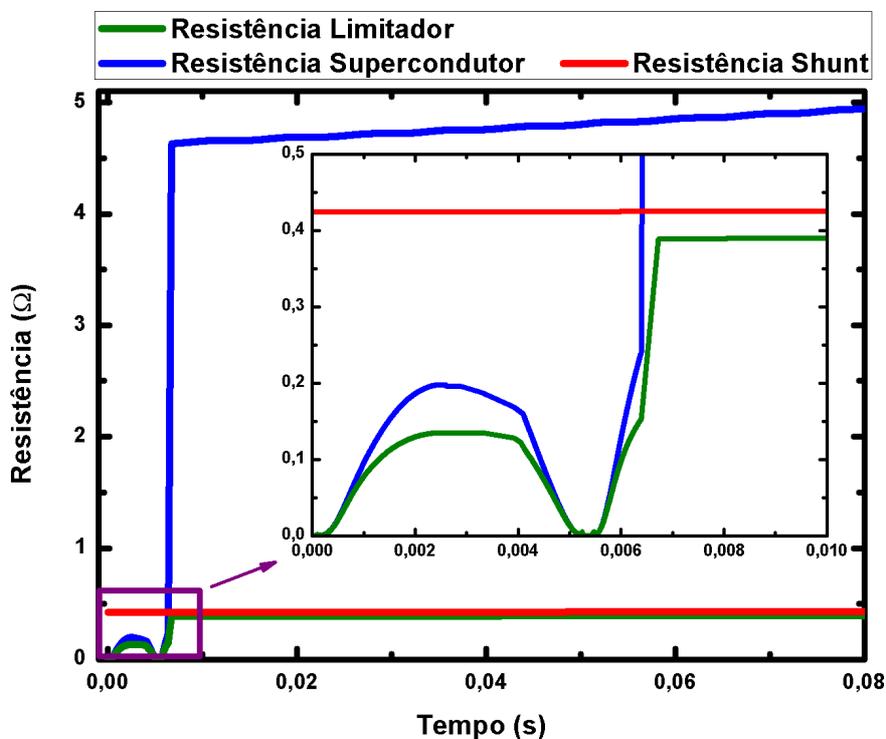


Figura 6.26: Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio E04. No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição

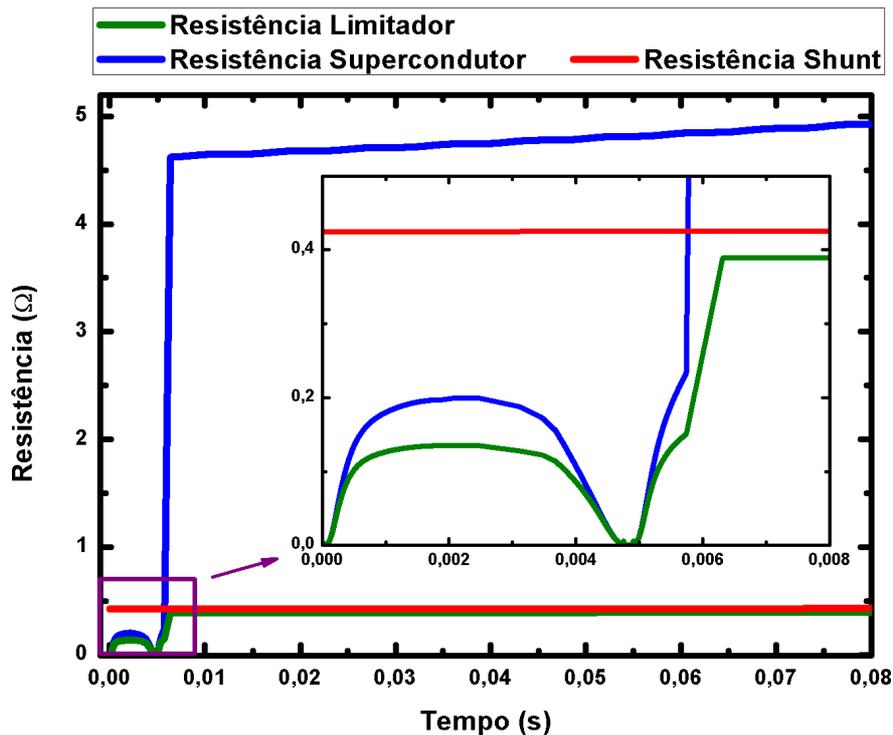


Figura 6.27: Comportamento das resistências do shunt, supercondutor que geram a resistência equivalente R_L do limitador para o ensaio E05. No detalhe é possível observar os valores das resistências durante a transição

Para os resultados simulados dos ensaios E03, E04 e E05 o comportamento é o mesmo; a resistência do supercondutor atinge valores na ordem de $5,0 \Omega$ após a transição enquanto o shunt tem sua resistência pouco alterada e permanece na ordem de $0,4 \Omega$. Nestas simulações a resistência do supercondutor é aproximadamente 12,5 vezes maior do que a resistência do shunt, fazendo com que a resistência R_L dos limitadores sejam próximas às do shunt; $0,38 \Omega$. Novamente podemos ver diferenças nos valores de R_L somente antes da transição (detalhes das figuras 6.25, 6.26 e 6.26), enquanto que após a transição o valor R_L é quase o mesmo para estas simulações.

Em todos os detalhes dos gráficos, podemos observar que a resistência do limitador começa a apresentar um valor de resistência considerável ainda no primeiro ciclo de onda de corrente, fazendo com que uma rápida e efetiva limitação da corrente de curto-circuito ocorra. Devemos notar também que em todos os casos, é o material supercondutor o responsável pela limitação da corrente nos instantes iniciais do curto-circuito, ou seja, nestes instantes iniciais o material supercondutor ainda está desenvolvendo a sua

resistência transicionando para o estado normal, fazendo com que os primeiros picos de corrente sejam maiores que os demais, como dissemos anteriormente.

De um modo geral, observamos nestes resultados que a resistência do material supercondutor se torna bem maior que a resistência do *shunt* e podemos, novamente, afirmar que a maior parte da corrente do circuito flui pelo *shunt* após a transição do supercondutor. No entanto, afim de investigar tal afirmação, analisaremos os resultados da divisão de corrente no limitador na próxima seção.

6.3.4 Divisão de Correntes

Nos resultados das simulações do aumento de temperatura pudemos observar que a taxa de aumento da temperatura do *shunt* é maior após a transição do material supercondutor para o estado normal enquanto a taxa de aumento deste fica menor após a transição. Atribuímos a esta característica o fato da corrente que atravessa o *shunt* ser maior do que a corrente que atravessa o supercondutor após a transição.

Já na seção dos resultados de resistência mostramos que, de fato, a resistência R_L do limitador tende a ficar próxima da resistência do *shunt* devido ao alto valor da resistência do material supercondutor. Devido a este alto valor da resistência do supercondutor, novamente fomos levados a idéia de que após a transição, a maior parte da corrente flui pelo *shunt*.

Nesta seção mostraremos os resultados simulados das divisões de corrente que ocorrerem no limitador durante um curto-circuito. Nas figuras 6.28, 6.29, 6.30, 6.31 e 6.32 mostramos tais resultados referentes aos ensaios $E01$, $E02$, $E03$, $E04$ e $E05$ respectivamente.

A corrente total que aparece nos gráficos nada mais é do que a corrente limitada que foi mostrada no início deste capítulo na seção 6.3.1 e comparada com o resultado experimental.

Em todos os gráficos é bem visível que antes da transição, a maior parte da corrente flui pelo material supercondutor devido à pequena resistência deste antes da completa transição para o estado normal. No entanto, após a transição, a maior parte da cor-

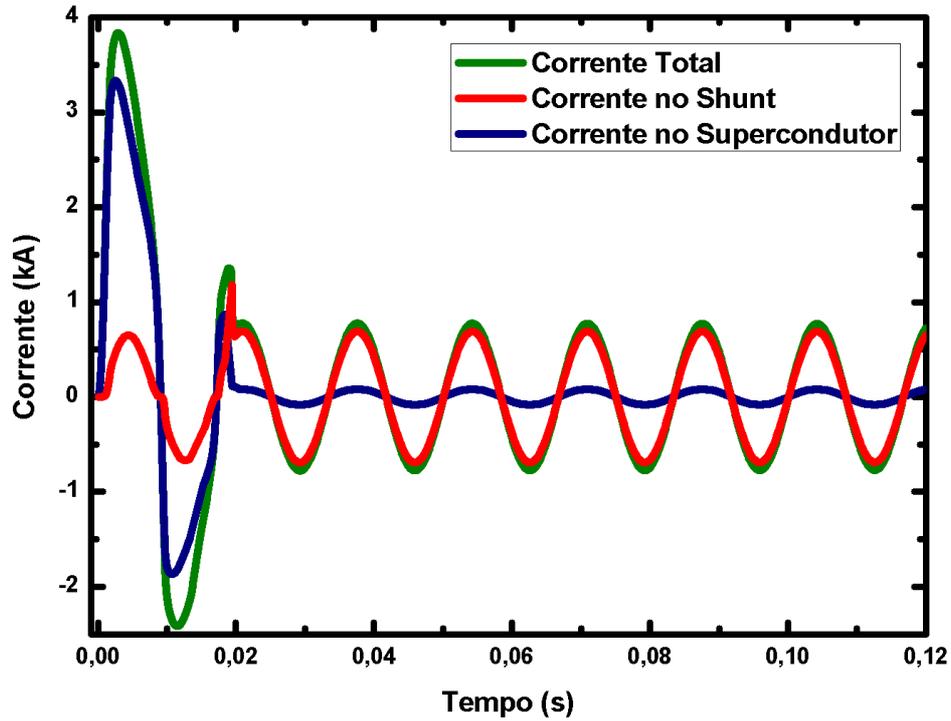


Figura 6.28: Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio E01.

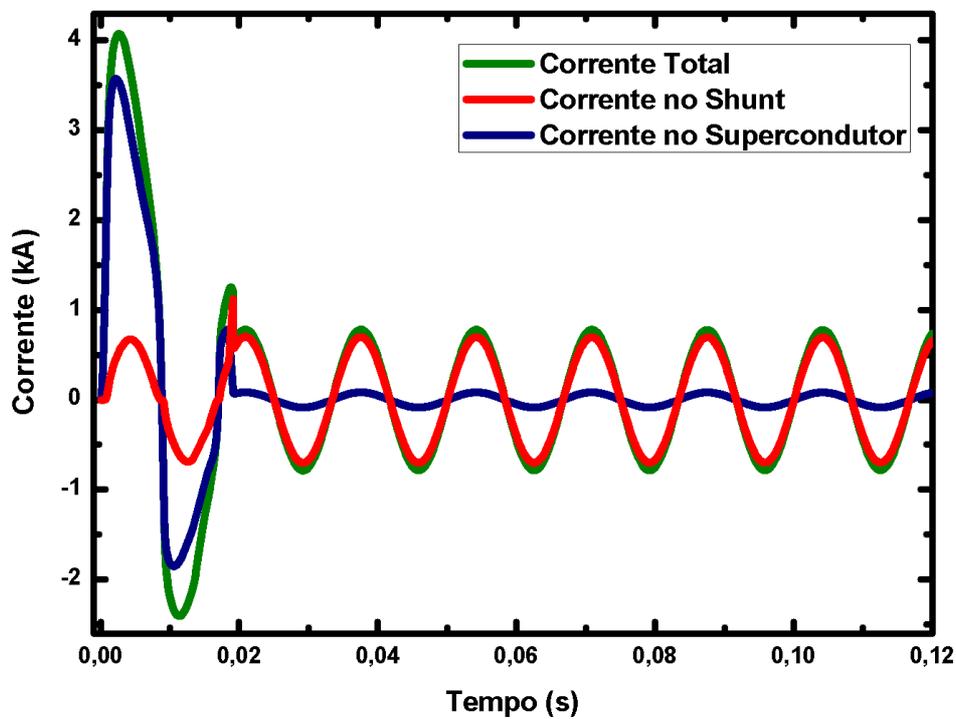


Figura 6.29: Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio E02.

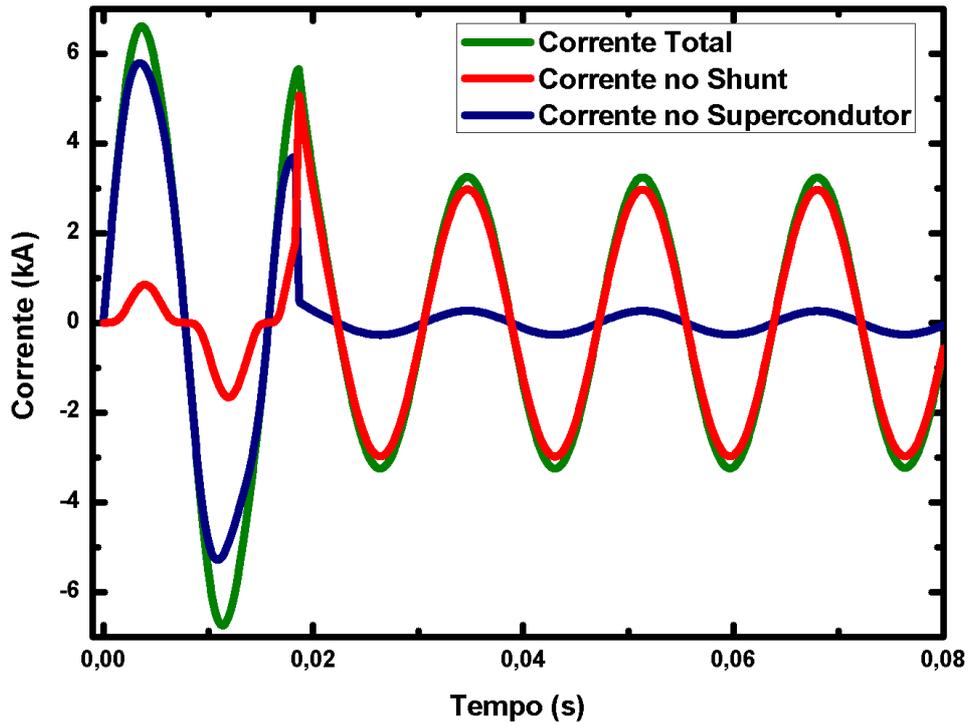


Figura 6.30: Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio E03.

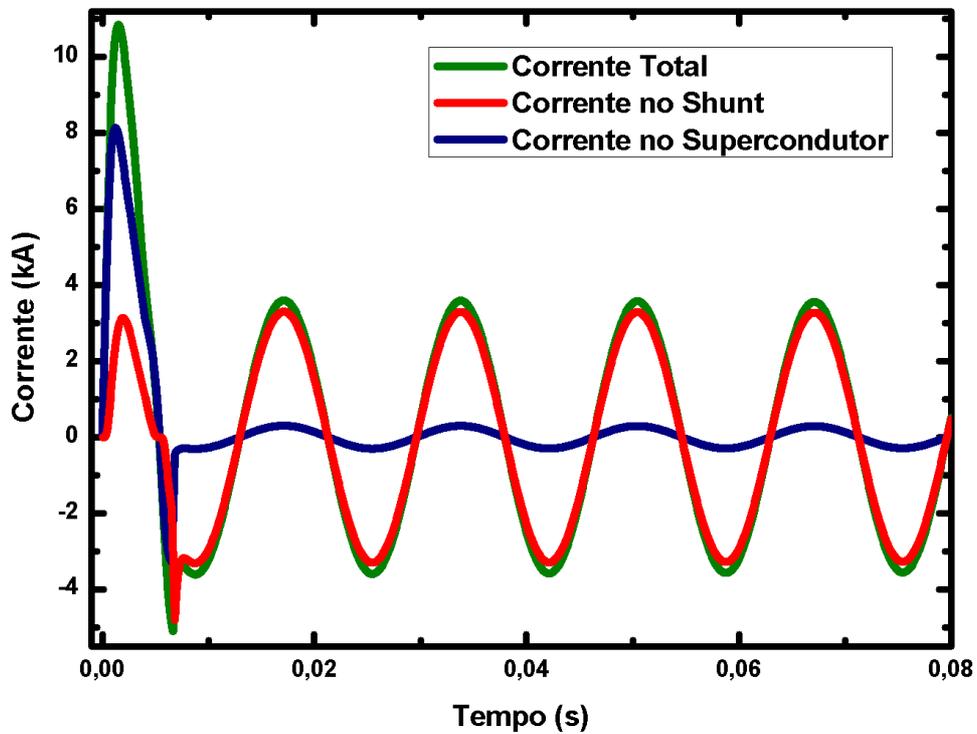


Figura 6.31: Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio E04.

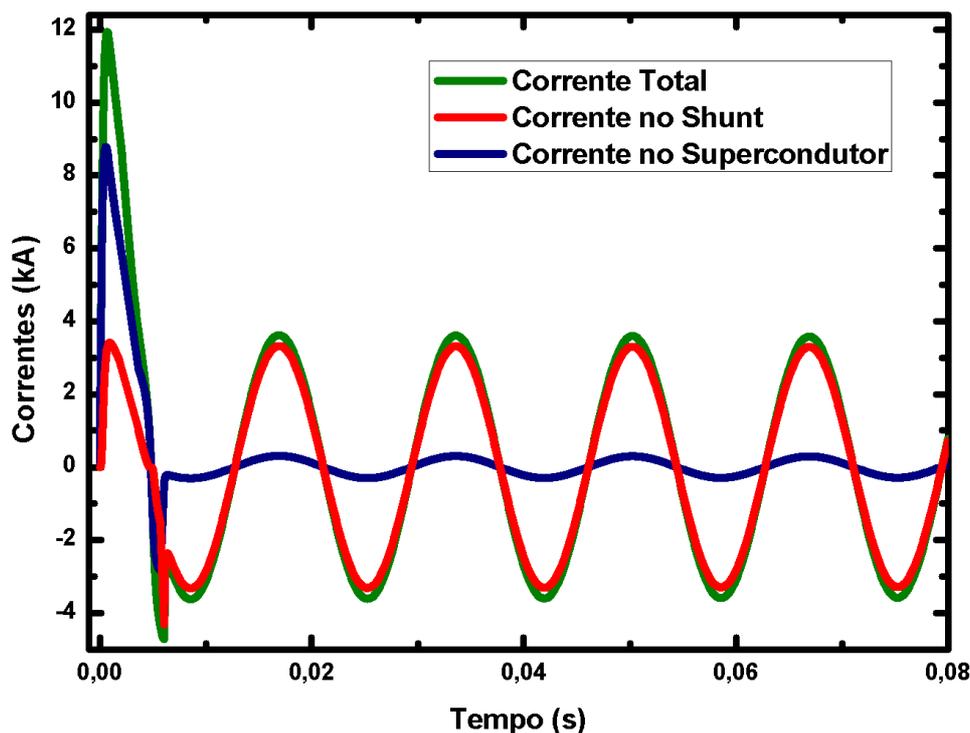


Figura 6.32: Resultados simulados para a divisão de corrente no limitador para o ensaio E05.

rente que atravessa o limitador, flui pelo resistor *shunt*, corroborando as afirmações que fizemos a respeito deste resultado nas seções anteriores.

6.3.5 Tempo de Recuperação

Nesta seção veremos os resultados das simulações de recuperação *R01*, *R02*, *R03* e *R04* que foram definidas na seção 5.3.1 no capítulo 5.

Para o ensaio *E04* vimos que as temperaturas ao final da corrente de falta para o material supercondutor e *shunt* foram 121,7 K e 111,5 K respectivamente (figura 6.21). Na figura 6.33 podemos observar o resultado da simulação *R01*, que mostra o decaimento das temperaturas citadas após a extinção da corrente de curto-circuito através da abertura da chave *S1*.

Observamos neste resultado que o estado supercondutor do material é recuperado em 27 segundos. No detalhe é possível ver os instantes logo após a abertura da chave *S1*; a temperatura do supercondutor continua aumentando devido ao fato de estar em

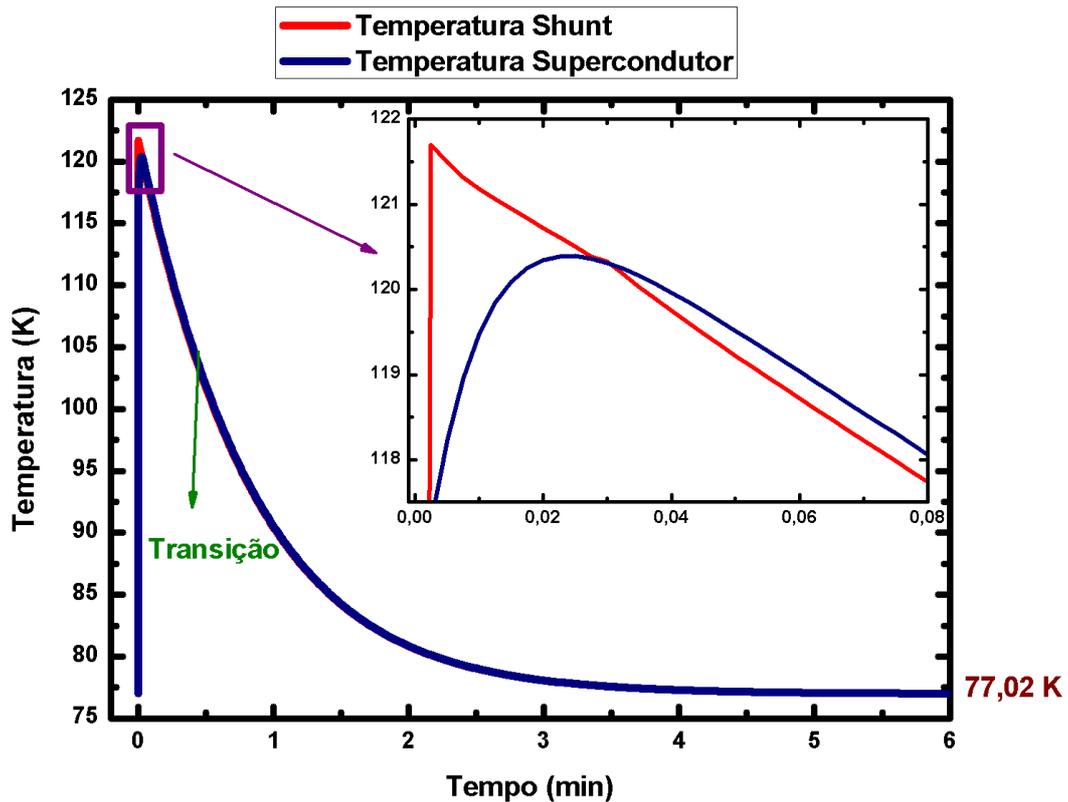


Figura 6.33: Simulação R01 - recuperação sem corrente no circuito.

contato com o *shunt*, que está a uma temperatura maior. Após alguns segundos ambos atingem quase o mesmo valor de temperatura, que diminui devido à perda de calor para o nitrogênio líquido. O limitador retorna a seu estado inicial (77 K) novamente em aproximadamente 6 minutos.

Neste ponto é importante ressaltar que o fabricante destes limitadores recomenda o tempo de espera entre dois ensaios de aproximadamente 10 minutos, ou seja, o tempo necessário para que o limitador possa retomar seu estado inicial e operar novamente com segurança. Com base nisto, podemos dizer que o resultado obtido para esta simulação está de acordo com as previsões do fabricante para o tempo de recuperação.

Para a segunda simulação de recuperação R02, existe corrente fluindo pelo limitador após o término do curto circuito devido a chave *S2* se fechar após a abertura de *S1*. Nesta simulação consideramos um circuito hipotético onde a corrente, após o término do curto, seja igual a $70,7 \text{ A}_{rms}$ (ou, equivalentemente, uma onda de corrente senoidal com 100 A de pico). O resultado pode ser visto na figura 6.34.

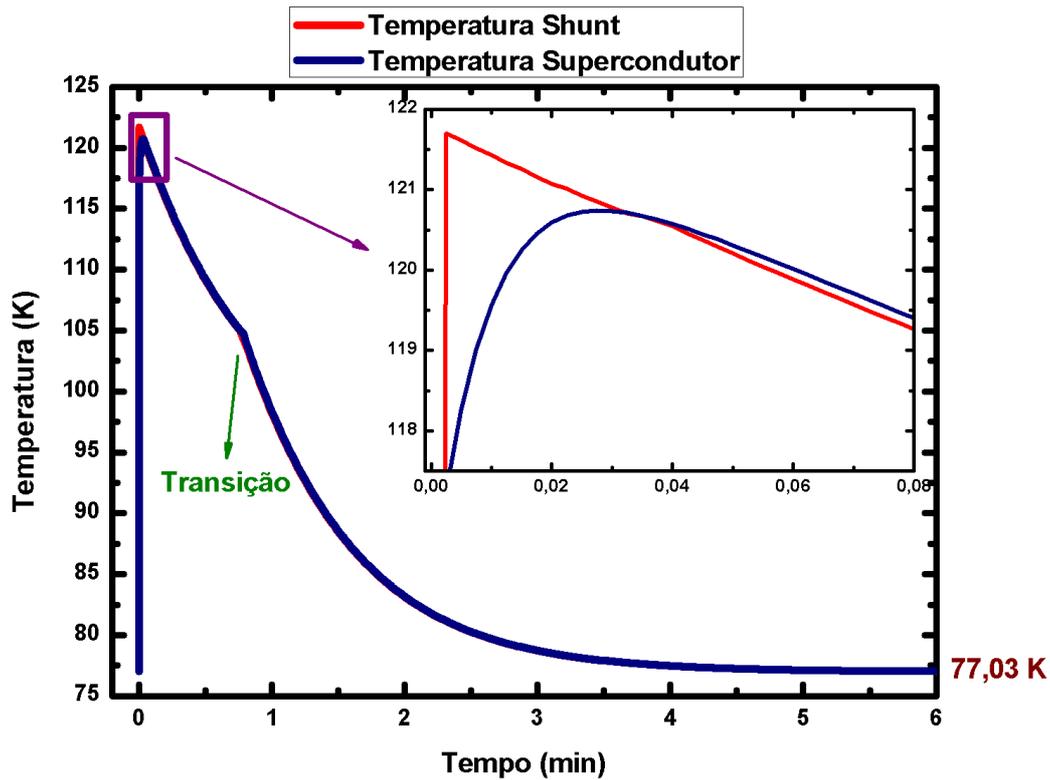


Figura 6.34: Simulação R02 - recuperação com corrente de $70,7 A_{rms}$.

Observamos que o tempo de transição para o estado supercondutor é de 50 segundos, sendo maior em relação ao primeiro resultado. Na figura 6.35 é possível comparar os tempos de transição da simulação R01 com a simulação R02.

É importante notar que, embora o tempo de recuperação do estado supercondutor seja maior em R02, o tempo para o limitador retornar a 77 K é praticamente o mesmo para ambos. Isto acontece devido ao fato de que a taxa de variação de temperatura, tanto do material supercondutor como a do *shunt*, dependem da diferença de temperatura com o ambiente ao redor (*FRP* e nitrogênio líquido respectivamente). Assim, quanto maior for a diferença de temperatura, maior será o decréscimo nos valores de temperatura.

Na simulação R03 consideramos que após a abertura de S1 e o fechamento de S2 uma corrente igual $106 A_{rms}$ (ou, equivalentemente, uma onda de corrente senoidal com 150 A de pico) passa pelo circuito. No resultado desta simulação (figura 6.36) é importante notar que o *shunt* e o supercondutor atingem o equilíbrio térmico numa temperatura

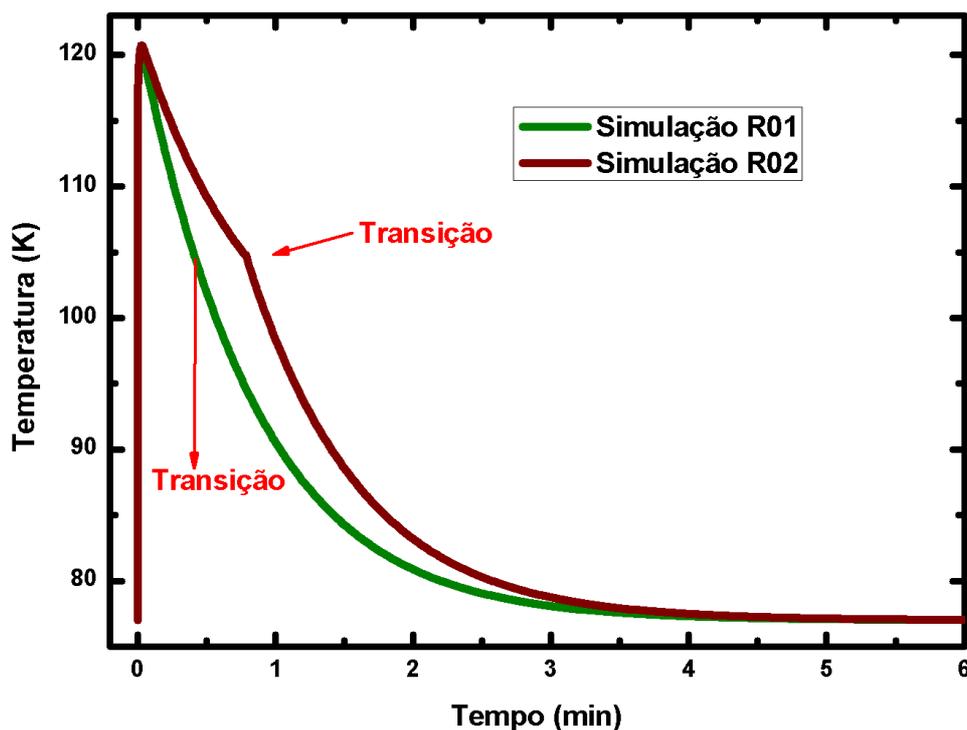


Figura 6.35: Comparação entre R01 e R02; a corrente de $70,7 A_{rms}$ no circuito após o curto-circuito aumenta o tempo de recuperação do estado supercondutor

acima de T_c (104 K) ou seja, não ocorre a transição do material do estado normal para o estado supercondutor. Este comportamento é justificável pois, uma vez que o *shunt* transporta corrente, este se aquece. Como o *shunt* está diretamente em contato com o supercondutor, o calor gerado no *shunt* é transferido por condução para a cerâmica supercondutora, aquecendo-a também. Embora exista a perda de calor do *shunt* para o nitrogênio líquido, neste caso a geração de calor por efeito Joule no *shunt* é o suficiente para manter o sistema em equilíbrio numa temperatura acima da temperatura crítica do supercondutor (112,5 K), impedindo que o estado de resistividade nula seja restaurado.

No resultado da simulação R02, feita com uma corrente de $70,7 A_{rms}$ vimos que a geração de calor por efeito Joule no *shunt* apenas aumentava o tempo de transição do supercondutor para o estado e resistividade nula. Na simulação R03, feita com uma corrente de $106 A_{rms}$, nos mostrou que esta corrente já era o suficiente para evitar a recuperação do estado supercondutor. Já na última simulação, R04, onde consideramos que uma corrente de igual a $141,4 A_{rms}$ (ou, equivalentemente, uma onda de corrente senoidal com 200 A de pico) passa pelo circuito após a extinção do

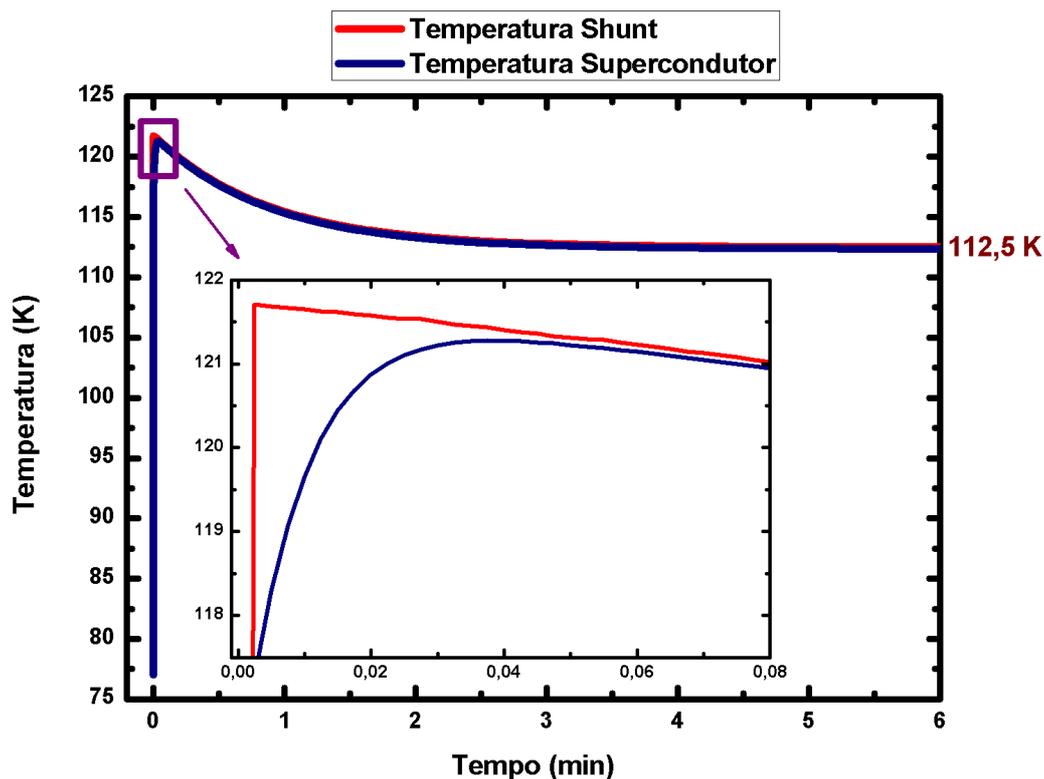


Figura 6.36: Simulação R03 - A corrente de $106 A_{rms}$ impede a recuperação do estado supercondutor.

curto, vemos que novamente não ocorre a transição do material supercondutor para o estado de resistividade nula (figura 6.37). Porém, agora a corrente de $141,4 A_{rms}$ ainda foi suficiente para fazer com que o *shunt* se aquecesse além da temperatura atingida durante o curto-circuito, atingindo o equilíbrio térmico em $138,5 K$. Novamente, com o aquecimento do *shunt* por efeito Joule, o material supercondutor também irá se aquecer, impedindo assim, a restauração do estado de resistividade nula.

Na figura 6.38 podemos ver o comportamento do índice de transição n que corrobora os resultados das simulações de recuperação mostrados.

O comportamento de n nos mostra que realmente não houve transição para o estado supercondutor nas simulações R03 e R04, enquanto que a recuperação da supercondutividade ocorreu nas simulações R01 e R02. Além disso, neste gráfico fica evidente o aumento do tempo de recuperação do estado supercondutor na simulação R02 devido à passagem de corrente no circuito.

Ainda na figura 6.38 é importante notar que em R01 a transição é feita direto para

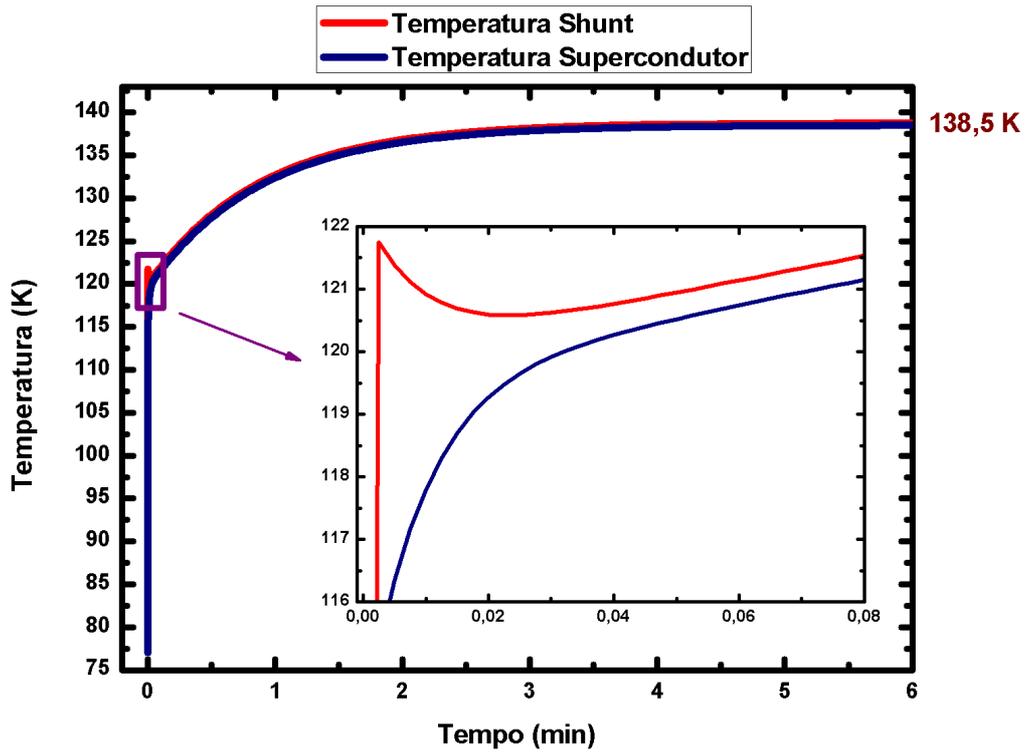


Figura 6.37: Simulação R04 - A corrente de $141,4 A_{rms}$ impede a recuperação do estado supercondutor.

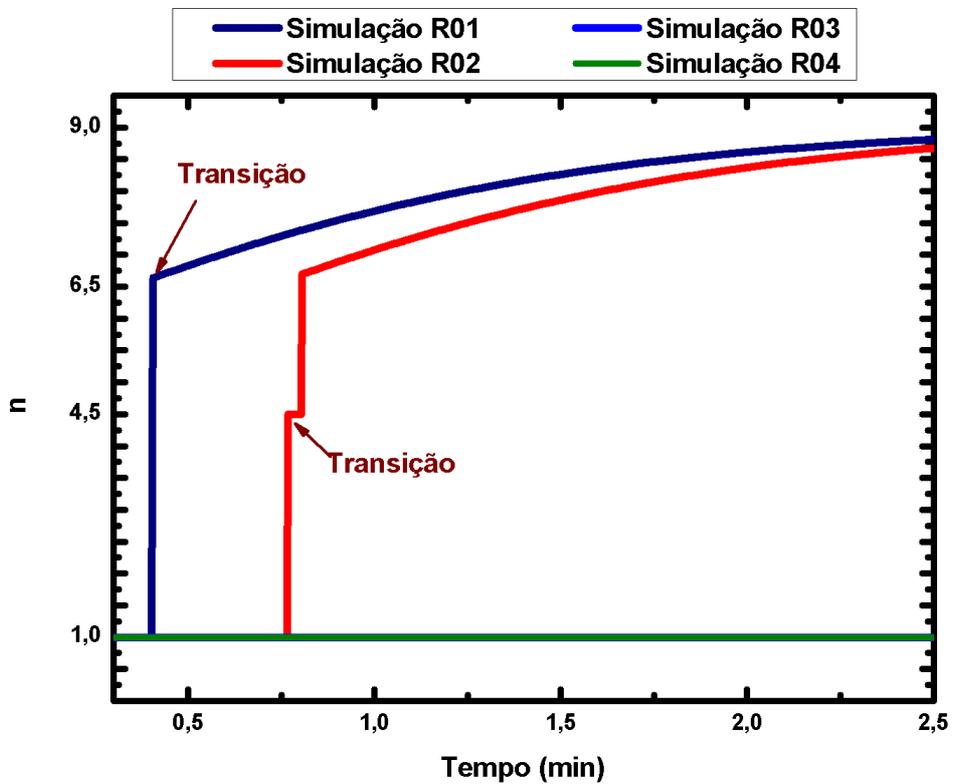


Figura 6.38: Comportamento do índice de transição n após o término do curto-circuito.

o estágio *flux creep*, já que não existe corrente no circuito para aumentar o valor do campo elétrico. Já na recuperação *R02*, a corrente que flui pelo material supercondutor é o suficiente para fazer com que o valor de campo elétrico seja maior que 1 mV/cm, fazendo com que a transição ocorra primeiro para o estágio *flux flow* e só retornando ao *flux creep* posteriormente devido à diminuição da temperatura.

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho, procuramos detalhar todos os principais conceitos de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor e como estes conceitos podem ser empregados para o desenvolvimento de um algoritmo que seja eficiente para a simulação destes dispositivos. O principal modelo para a construção do algoritmo que seja capaz de simular a transição do estado supercondutor para o estado resistivo durante um curto-circuito é o modelo que descreve as características da curva $E - J$. Juntamente com este modelo $E - J$ empregamos o método de Euler para a solução das equações diferenciais de primeira ordem obtidas a partir das considerações das trocas de calor que ocorrem no sistema.

Os resultados dos ensaios nos levam a concluir que estes limitadores podem proteger um sistema com problemas de aumento do nível de corrente de curto-circuito com eficiência, desde que sejam respeitados os limites de segurança.

Quanto aos resultados das simulações de limitação de corrente, podemos afirmar que apresentaram comportamento semelhante (e não exato) aos resultados dos ensaios. Porém, como dito antes, a simulação de limitadores de corrente supercondutores não apresenta uma modelagem matemática simples. Durante a elaboração deste trabalho um algoritmo em programação *C++* foi desenvolvido, utilizando-se o método de Runge Kutta 4º ordem (*RK4*) para a solução das equações diferenciais apresentadas. No entanto, tal algoritmo apresentava sérios problemas de oscilação numérica e só fornecia bons resultados quando ajustes matemáticos no método *RK4* eram feitos. Sendo assim,

decidimos optar pelo software ATP e o método de Euler que apresentaram os melhores resultados e estes podem ser considerados satisfatórios uma vez que reproduziram as principais características dos limitadores de corrente supercondutores quando submetidos a corrente de curto-circuito.

Devemos observar que as simulações foram coerentes com os resultados dos ensaios em todos os casos, nos permitindo concluir que o algoritmo é satisfatório para que possamos fazer estimativas a respeito do comportamento de limitadores de corrente supercondutores.

Além disso, as simulações nos permitiram obter resultados que são de difícil acesso durante os ensaios, como por exemplo, a evolução das temperaturas do material supercondutor e do *shunt*, as parcelas de corrente $i_{sh}(t)$ e $i_{sp}(t)$ que fluem por cada uma destas partes, a evolução da resistência equivalente dos limitadores, o exato instante onde a transição para o estado normal se inicia e se completa e o tempo de recuperação após a extinção do curto-circuito (com e sem carga). Embora existam poucos resultados experimentais que nos ajudem a verificar a autenticidade destes resultados, existem trabalhos na literatura que obtiveram resultados semelhantes aos nossos. Por exemplo, resultados semelhantes para limitação de corrente, aumento de temperatura e para as distribuições das parcelas de corrente $i_{sh}(t)$ e $i_{sp}(t)$ que fluem pelo *shunt* e pelo supercondutor (respectivamente) podem ser observados em [80].

Para finalizar, é importante salientar que os resultados obtidos aqui para o aumento de temperatura do material supercondutor e do *shunt*, bem como os resultados obtidos para a recuperação dos limitadores, estão de acordo com os previstos pelo fabricante destes dispositivos (*Nexans Superconductors*). Desse modo, podemos tirar a conclusão final de que, fazendo uso de um modelo relativamente simples (modelo $E - J$) com simplificações a respeito das trocas de calor e das heterogeneidades do material em conjunto com o programa ATP, conseguimos criar um algoritmo de simulação que, até a presente situação de desenvolvimento deste trabalho, é capaz de nos fornecer razoáveis e importantes informações a respeito do comportamento de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores.

7.1 Trabalhos Futuros

Uma das grandes dificuldades deste trabalho foi desenvolver o modelo matemático descrito para a simulação destes limitadores de corrente. Pudemos ver que os resultados das simulações para a limitação de corrente apresentam uma brusca mudança no valor de corrente no momento da transição e os resultados da simulação para a tensão apresentam picos que são resultados de singularidades nos cálculos.

Para trabalhos futuros, visamos a otimização do algoritmo, fazendo uso de diferentes métodos numéricos e softwares, a fim de melhorar estes resultados (no que se refere às abruptas mudanças e singularidades) e fazer considerações a respeito da influência de campos magnéticos nestes dispositivos. Adaptar o algoritmo para simulações com conexão em paralelo entre os limitadores também é uma opção para trabalhos futuros, uma vez que aqui lidamos apenas com ligações em série entre os componentes limitadores.

Também visamos simulações de limitadores de corrente supercondutores a base de fitas de segunda geração (*YBCO*) utilizando programas de simulação que fazem uso do método de elementos finitos.

Referências Bibliográficas

- [1] X. YUAN, K. TEKLETSADIK, L. KOVALSKY, "Proof-of-concept prototype test results of a superconducting fault current limiter for transmission-level applications", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v.15, n.2, pp.1982-1985-3739, Junho, 2005.
- [2] A.C. ROSE-INNES, E.H. RHODERICK, **Introduction to Superconductivity**, 2^a ed. Oxford, Pergamon Press,1978.
- [3] TINKHAM, MICHAEL, **Introduction to Superconductivity** ,2^a ed. New York, McGrall-Hill, 1996.
- [4] GINZBURG, V. L. ANDRYUSHIN, **Superconductivity**, London,World Cientific, 1994.
- [5] A. MAROUCHKINE, **Room-Temperature Superconductivity**, Cambridge, Cambridge International Science Publishing, 2004.
- [6] M. CYROT, D. PAVUNA, **Introduction to Superconductivity and High-TC Materials**. 1^a ed. Singapura, World Scientific Publishing, 1992.
- [7] H. F. HESS, "Scanning-Tunneling-Microscope Observation of the Abrikosov Flux Lattice and the Density of States near and inside a Fluxoid", **Physical Review Letters**, v. 62, n. 2, p. 214-216, 1989.
- [8] WESCLEY T. B. DE SOUSA, 2008, **Processamento, Caracterização e Estudos de Fenômenos Críticos no Sistema Supercondutor**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- $Ho_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil.
- [9] A. MAROUCHKINE, **Hight-Temperature Superconductivity in Cuprates**, New York, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [10] A. K. SAXENA, **High Temperature Superconductors**, London and New York, Springer, 2010.
- [11] DAVID A. CARDWELL, DAVID S. GINLEY, **Handbook of Superconducting Materials - Volume I: Superconductivity, Materials and Processes**, 1^o ed., Bristol and Philadelphia, Institute of Physics Publishing, 2003.
- [12] A. P. MALOZEMOFF, Q. LI, S. FLESHLER, "Progress in BSCCO-2223 Tape Technology", **Physica C**, v.424, pp. 282–287, 1997.
- [13] A. POLYANSKII, V.M. BEILIN, D. LABALESTIER, *et. al.*, "Fast healing of deformation-induced damage in Ag/Bi-2223 tapes", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v.11, n.1, pp.3736-3739, Mar. 2001.
- [14] Y.G. PAINTHANKAR, **Transmission Network Protection - Theory and Prattice**, New York, Marcel Dekker Inc, 1998.
- [15] W. PAUL, M. CHEN, M. LAKNER, *et al.*, "Fault Current Limiter Based on High Temperature Superconductors - Different Conceptes, test results, simulations, apli-cations", **Physica C**, v. 354, pp. 27-30,2001.
- [16] ANDRÉIA MAIA MONTEIRO, 2005, **Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com Ênfase no IPC (Intherphase Power Controller)**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [17] CLARISSA SANTOS FERREIRA, 2006, **Alocação Ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente De Curto Circuito em Redes de Energia Elétrica**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Utilizando Algoritmos Genéticos**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [18] NELL REIMANN, 1998, **Modeling And Simulation of High Temperature Superconducting Fault Current Limiters Inserted in a Distribution Level Power System**, Tese de Doutorado, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suíça.
- [19] FLÁVIO DUARTE COUTO OLIVEIRA, 2005, **Limitador de Corrente de Falta Supercondutor, Dissertação de Mestrado**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.
- [20] P.F. COSTA, I. M. SANTOS, "Vantagens do Protetor por Limitação de Corrente - Clip", **Revista Eletricidade Moderna**, pp. 52-57,1990.
- [21] F.S. LÁZARO, A. POLASEK, 2008, **Estudo Sobre Supercondutores e Suas aplicações em Engenharia Elétrica com Ênfase em Limitadores de Corrente de Curto-Circuito**, CEPEL-ELETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [22] J. BROCHU, F. BEAUREGARD, J. LEMAY, *et.al.*, "Application of Interphase Power Controller Technology for TRansmission Line Power Flow Control", **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.12, n.2,pp. 888-894, Abr. 1997.
- [23] ANTONIO RUBENS BARAN JR., ISABEL SCHVABE DUARTE, 2010, **Alocação de Limitadores de Corrente de Curto-Circuito via Algoritmos Genéticos**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- [24] H. SHIMIZU, Y. YOKOMIZU, T.MATSUMURA, *et.al.*, "Proposal of Flux Flow Resistance Type Fault Current Limiter Using Bi2223 HTC Superconducting Bulk", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v.12, n.1,pp. 876-879, Mar. 2002.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [25] M. NOE, MICHAEL STEUREUR, "*High-temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status*", **Superconductor Science and Technology**, vol. 20,n.1,pp. 15-29, 2007.
- [26] A. POLASEK, M.A.SENS, E.T.SERRA, "Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores". In: **Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ**, pp.1-8, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, Maio 2007.
- [27] S.S.KALSI, ALEX MALOZEMOFF, "HTS Fault Current Limiter Concept". In: **IEEE Power Engineering Society Meeting**, pp.1-4, Denver, June 2004.
- [28] JÉRIKA SUELI LAMAS, 2009, **Projeto e Construção de Limitador de Corrente Supercondutor Utilizando Fitas de YBCO**, Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Lorena, SP, Brasil.
- [29] KRISTIAN FOSSHEIN, ASLE SUDBO, **Superconductivity - Physics and Applications**, 1^o ed. John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [30] TERUO MATSUSHITA, **Flux Pinning In Superconductors**, 1^o ed., Springer, New York, 2007.
- [31] DONGLU SHI, **High Temperature Superconducting Materials Science and Engineering - New Concepts and Technology**, 1^o ed., New York, Pergamon, 1995.
- [32] THOMAS P. SHEAHEN, **Introduction To High-Temperature Superconductivity - Selected Topics**, 1^o ed., New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [33] P.W.ANDERSON, Y.B. KIM, "Hard Superconductivity: Theory of the Motion of Abrikosov Flux Lines", **Reviews of Modern Physics**, v.36, n.1,pp. 39-43, Jan. 1964.
- [34] Y.B. KIM, C.F. HEMPSTEAD, A.R.STRNAD, "Flux Creep in Hard Superconductors", **Applied Superconductivity**, v.4, n.7, pp. 277-290, September, 1963.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [35] R.G. MINTS, "Flux Creep and Flux Jumping", **Physical Review B**, v.53, n.18, pp.12311-12317, May, 1996.
- [36] L.CESNAK, F.GÖMÖRY, P. KOVAC, *et.al.*, "Treating the I-V characteristics of low as well as high T_c superconductors in context with the pinning potential", **Physical Review B**, v.53, n.18, pp.12311-12317, 1997.
- [37] J. BOCK, S. ELSCHNER, M. NOE, *et.al.*, "CURL10 - Development and Field-Test of a 10 kV-10 MVA Resistive Current Limiter Based on Bulk MCP-BSCCO 2212", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v.15, n.2, pp. 1955-1960, Jun. 2005.
- [38] J. BOCK, S. ELSCHNER, H. BESTGEN, *et.al.*, "Large Shaped Parts of MCP-BSCCO for Applications in Eletrical Enginnering", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v.3, n.1, pp. 1659-1662, Mar.1993.
- [39] J. BOCK, S. ELSCHNER, P; HERRMANN, *et.al.*, "Melt Cast Processed (MCP)-BSCCO 2212 Tubes for Power Applications up to 10 kA", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v.5, n.2, pp. 1409-1412, Jun.1995.
- [40] S. ELSCHNER, F. BREUER, M. NOE, *et.al.*, "Manufacturing and Testing of MCP-2212 Bifilar Coils for a 10MVA Fault Current Limiter", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v.13, n.2, pp. 1980-1983, Jun.2003.
- [41] A. E. FITZGERALD, C. K. JR., S. D. UMANS, **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**, 6^o ed., Bookman, 2006.
- [42] HUGO DA FONSECA, MÁRCIO LEAL, **Análise de Transitórios Eletromagnéticos Utilizando o ATPDraw**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- [43] H. M. KIM, K.B. PARK, B.W. LEE, *et. al.*, "Theoretical Prediction of the Quench Behavior of a SFCL Module Having a BSCCO-2212 Bulk Coil and a Shunt Coil", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.17, n.2, pp. 1871-1874, Mar. 2007

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [44] SIMONE APARECIDA DE SILVA, 2007, **Processamento e Caracterização de Amostras Supercondutoras Utilizando o Concentrado de Xenotima**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil.
- [45] ALCIONE ROBERTO JURELO, 1998, **Efeitos de Flutuações Térmicas em Supercondutores de Alta Temperatura Crítica**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- [46] W. T.B. SOUSA, L. B. PINHEIRO, A.R. JURELO, *et. al.*, "Critical and Gaussian Conductivity Fluctuations in Granular HoPrBaCuO Superconductor", **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, v.23, n.7, pp. 1307-1312, Abril, 2009.
- [47] R. MILFORD, **Foundations of Electromagnetic Theory**, 1^o ed., Londres, Addison-Wesley Publishing Company, 1960.
- [48] H. B. JIN, Z. Y. LI, Y. H. MA, *et. al.*, "Characteristics of a Bi-2212 Monofilar Superconducting Fault Current Limiting Element", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.19, n.3, pp. 1847-1850, Jun. 2009.
- [49] S. ELSCHNER, F. BREUER, A. WOLF, *et.al.* "Characterization of BSCCO 2212 Bulk Material for Resistive Fault Current Limiters", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.11, n.1, pp. 2507-2510, Mar. 2001.
- [50] P. E. SUTHERLAND, "Analytical Model of Superconducting to Normal Transition of Bulk High T_c Superconductor", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.16, n.1, pp. 43-48, Mar. 2006.
- [51] W. PAUL, M. CHEN, M. LAKNER, *et.al.*, "Fault current limiter based on high temperature superconductors - Different Concepts, Tests Results and Simulations", **Physica C**, vol.354, n.1, pp. 27-33, 2001.
- [52] J. DURON, B. DUTOIT, F. GRILLI, *et. al.*, "Computer Modeling of YBCO Fault Current Limiter Strips Lines in Over-Critical Regime With Temperature De-

- pendent Parameters", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.17, n.2, pp. 1839-1842, Jun. 2007.
- [53] Y. S. CHA, "An Empirical Correlation for $E(J,T)$ of a Melt-Cast-Processed BSCCO-2212 Superconductor Under Self Field", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.13, n.2, pp. 2028-2031, Jun. 2003.
- [54] J. LANGSTON, M. STEUREUR, S. WOODRUFF, *et. al.*, "A Generic Real-Time Computer Simulation Model for Superconducting Fault Current Limiters and Its Application in System Protection Studies", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.35, n.2, pp. 2090-2093, Jun. 2005.
- [55] P. TIXADOR, N.T. NGUYEN, "Design of ReBaCuO-Coated Conductors for FCL", In: **IEEE/CSC & European Superconductivity News Forum**, Germany, Jul. 2010.
- [56] F. ROY, M. THERASSE, B. DUTOIT, *et. al.*, "Numerical Studies of the Quench Propagation in Coated Conductors for Fault Current Limiters", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.19, n.3, pp. 2496-2499, Jun. 2009.
- [57] INCROPERA, DEWITT, BERGMAN, *et. al.*, **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 5^o ed., Rio de Janeiro, LTC, 2008.
- [58] S.Y. SEOL, Y. S. CHA, R.C. NIEMANN, *et. al.*, "Prediction of burnout of a conduction-cooled BSCCO current lead", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.7, n.2, pp. 696-697, Junho 1997.
- [59] E. BRAUN, W. SCHNELLE, H. BROICHER, *et. al.*, "Specific Heat and Thermal Expansion of the Bi and Tl High Temperature Superconductors Near T_c ", **Z. Phys. B - Condensed Matter**, vol. 84, pp. 333-341, 1991.
- [60] W. E. BOYCE, R. C. DIPRIMA, **Elementary Differential Equation**, 7^o ed., New York, John Wiley & Sons, Inc, 2001.

- [61] T. RETTELBACH, G. J. SCHMITZ, "3D simulation of temperature, electric field and current density evolution in superconducting components", **Superconductor Science and Technology**, vol. 16, pp. 645–653, 2003.
- [62] C. KURUPAKORN, H. KOJIMA, M. NOE, *et. al.*, "Simulation of electrical and thermal behavior of high temperature superconducting fault current limiting transformer (HTc-SFCLT)", In: **7th European Conference on Applied Superconductivity**, pp. 950–953, Viena, Austria, 2006.
- [63] H. R. KIM, J. SIM, I. CHOI, *et. al.*, "Quench Development in Bi-2212 Bulk Coils During Quenches", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.17, pp. 1875-1878, n.2, Junho 2007.
- [64] M. DIONE, F. SIROIS, F. GRILLI, *et. al.*, "New EMTP-RV Equivalent Circuit Model of Core-Shielding Superconducting Fault Current Limiter Taking Into Account the Flux Diffusion Phenomenon", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.19, pp. 1913-1917, n.3, Junho 2009.
- [65] V. MEEROVICH, V. SOKOLOVSKY, I. VAJDA, "Calculation principles for a superconducting current-limiting transformer", **Superconductor Science and Technology**, v. 20, pp. 1046–1053, 2007.
- [66] S. ELSCHNER, F. BREUER, M. STEMMLE, *et.al.*, "Coil in Coil – Components for the High Voltage Superconducting Resistive Current Limiter CULT 110", In: **IEEE/CSC & European Superconductivity News Forum**, n.3, Janeiro 2008.
- [67] L. YE, A.M. CAMPBELL, "Case Study of HTS resistive Superconducting Fault Current Limiter in Electrical distribution Systems", **Electric Power Systems Research**, vol. 77, pp. 534–539, 2007.
- [68] L. YE, K. JUENGST Juengst, "Modeling and Simulation of High Temperature Resistive Superconducting Fault Current Limiters", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.14, pp 839-842, n.2, Junho 2004.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [69] L. YE, A.M. CAMPBELL, "Behavior Investigations of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.16, pp.662-664 n.2, Junho 2006.
- [70] M. FABRRI, A. MORANDI, F. NEGRINI, *et. al.*, "Temperature dependent equivalent circuit of a magnetic shield type SFCL", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.15, pp. 2078-2081, n.2, Junho 2005.
- [71] V. MEEROVICH, V. SOKOLOVSKY, "Thermal Regimes of HTS cylinders operating in devices for FCL limitation", **Superconductor Science and Technology**, v.20, n.5, 2007.
- [72] H. R. KIM, H. S. CHOI, H. R. LIM, *et. al.*, "Quench Distribution in Superconducting Fault Current Limiters at Various Voltages", **Cryogenics**, v.41, pp. 275-280, n.4, 2001.
- [73] H. M. KIM, J. JANKOWSKI, H. LEE, *et. al.*, "Stability of bare and copper-laminated YBCO samples: Experimental Simulation and Results", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.14, pp. 1290-1293, n.2, Junho 2004.
- [74] V.R. ROMANOVSKII, K. WATANABE, "Nonlinear approximation for limiting current-carrying capacity of Ag-sheathed $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ conductors", **Superconductor Science and Technology**, v.18, pp. 407-416, 2005.
- [75] T. R.S. FREITAS, H. F. HENRIQUE, J. F. FARDIN, "Um Modelo Simples e Eficaz para Simulação de um Limitador de Corrente de Falta Supercondutor", In: **VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica**, Blumenau, SC, Brasil, 2009.
- [76] L. CHEN, Y. TANG, J. SHI, *et. al.*, "Simulations and Experimental Analyses of the Active Superconducting Fault Current Limiter", **Physica C**, v.45, pp. 27-32, 2007.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [77] P. J. YEW, N. S. SELAMAT, S. K. WAI, *et. al.*, "Modeling of Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter in Power System", **J. Solid St. Sci. and Technol. Letters**, v.12, n1 & 2, pp.171-179, 2005.
- [78] R. SHARIFI, H. HEYDARI, "Multiobjective Optimization for HTS Fault-Current Limiters Based on Normalized Simulated Annealing", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.19, pp. 3675-3682, n.4, Agosto 2009.
- [79] J. CAVE, D. WILLÉN, R. NADI, *et. al.*, "Development of inductive fault current limiters up to 100 kVA class using bulk HTS materials", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.19, pp. 1335-1338, n.2, Junho 1999.
- [80] L. MARTINI, M. BOCCHI, M. LEVATI, "Simulations and Electrical Testing of Superconducting Fault Current Limiter Prototypes", **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol.15, pp. 2067-2070, n.2, Junho 2005.

Apêndice A

Algoritmo Escrito na Linguagem MODELS do ATP

MODEL Limitador

–

DATA

CorrenteIC {DFLT:281}

Area {DFLT:0.28}

Comprimento {DFLT:420}

TempCr {DFLT:104}

AreaShunt {DFLT:0.15}

–

INPUT Cs, Csh

OUTPUT Res, Rsh, Ts, Tsh, Rql, E, N

–

VAR Ts, Tsh, Bsh, Bs, rsn, rsl, Res, Rql, Rsh

E, n, Jc, Tc, h, p, h, as, ash, L

–

CONST Ec{VAL:0.000001}, Eps{VAL:0.02}, Epe{VAL:0.001}, Epsh{VAL:0.35}

ksh{VAL:0.02}, ks{VAL:0.0005}, kepe{VAL:0.00000001}

$a\{VAL:0.00000659\}, b\{VAL:0.0000687\}$

$m\{VAL:0.00000001255\}, z\{VAL:0.000067967\}$

$d\{VAL:6\}, Cvsh\{VAL:2.4\}, Uo\{VAL:0.06\}, kb\{VAL:0.00008617\}$

–

- Ts = temperatura do supercondutor (K)
- Tsh = temperatura do shunt (K)
- Bs = módulo da corrente no supercondutor (A)
- Bsh = módulo da corrente no shunt (A)
- Rsn = resistencia supercondutor não linear (ohm)
- Rsl = resistencia supercondutor linear (ohm)
- Res = resistencia equivalente do supercondutor (ohm)
- Rql = resistencia equivalente do limitador (ohm)
- Rsh = resistência do shunt (ohm)
- E = campo elétrico (V/cm)
- n = valor dos expoentes (adimensional)
- Jc = corrente crítica (A)
- Tc = temperatura critica (K)
- h = passo de integração (adimensional)
- p = constante definida (adimensional)
- as = área secção transversal do spcdt (cm²)
- ash = área secção transversal do shunt (cm²)
- L = comprimento do limitador (cm)
- Ec = critério para determinar Jc (uV/cm)
- Eps = espessura da solda entre supercondutor e shunt (cm)
- Epe = espessura da solda entre supercondutor e epoxi (cm)
- $Epsh$ = espessura do shunt (cm)
- ksh = condutividade térmica do shunt por convecção (W/cmK)
- ks = condutividade térmica da solda entre shunt e supercondutor (W/cmK)
- $kepe$ = condutividade térmica entre supercondutor e epoxi (W/cmK)

Capítulo A. Algoritmo Escrito na Linguagem MODELS do ATP

- $a =$ coeficiente da reta de resistividade do supercondutor $\Rightarrow r=aT+b$
- $b =$ coeficiente da reta de resistividade do supercondutor $\Rightarrow r=aT+b$
- $m =$ coeficiente da reta de resistividade do shunt $\Rightarrow r=mT+z$
- $z =$ coeficiente da reta de resistividade do shunt $\Rightarrow r=mT+z$
- $d =$ densidade do supercondutor (g/cm^3)
- $Cvsh =$ capacidade térmica do shunt (W/cm^3K)

HISTORY $Ts\{DFLT:77\}, Tsh\{DFLT:77\}, E\{DFLT:0\}, Res\{DFLT:0\}$

INIT

$Jc:=$ CorrenteIC

$as:=$ Area

$ash:=$ AreaShunt

$Tc:=$ TempCr

$L:=$ Comprimento

$h:=$ timestep

$p:=Jc/(Tc-77)$

ENDINIT

EXEC

$Rsh:=12*(m*Tsh+z)*L/ash$

$Rql:=(Rsh*Res)/(Rsh+Res)$

$Bs:=abs(Cs)$

$Bsh:=abs(Csh)$

$Tsh:=Tsh+h/Cvsh*((m*Tsh+z)*((Bsh/ash)**2)-ks/(Eps**2))*(Tsh-Ts)-ksh/Epsh*(Tsh-77))$

```

-
IF Ts<104 THEN
IF E<0.001 THEN
-
    n:=Uo/(kb*Ts)
    Ts:=Ts+h/(d*0.00158*Ts)*((Bs/as)*Ec*(Bs/p/abs(Tc-Ts))**(Uo/(kb*Ts))-...
...-ks/(Eps**2)*(Ts-Tsh)-kepe/(Epe**2)*(Ts-77))
-
    E:=Ec*((Bs/p/abs(Tc-Ts))**(Uo/(kb*Ts)))
-
    Rsn:=12*E/Bs*L
    Rsl:=12*(a*Ts+b)*L/as
    Res:=(Rsn*Rsl)/(Rsn+Rsl)
-
ENDIF
-
IF E>=0.001 THEN
-
    n:=4.5
    Ts:=Ts+h/(d*0.00158*Ts)*((Bs/as)*Ec*(Bs/p/abs(Tc-Ts))**(n)-...
...-ks/(Eps**2)*(Ts-Tsh)-kepe/(Epe**2)*(Ts-77))
-
    E:=0.0001+(Ec*(Bs/p/abs(Tc-Ts))**(n))
-
    Rsn:=1*12*E/Bs*L
    Rsl:=12*(a*Ts+b)*L/as
    Res:=(Rsn*Rsl)/(Rsn+Rsl)
ENDIF
ENDIF

```

```
-  
-  
IF Ts >= 104 THEN  
-  
    n := 1.0  
    Ts := Ts + h / (d * 0.00158 * Tc) * ((a * Ts + b) * (Bs / as)**2) - ks / (Eps**2) * (Ts - Tsh) - ...  
    ... - kepe / (Epe**2) * (Ts - 77)  
-  
    E := (a * Ts + b) * (Bs / as)  
-  
    Rsl := 12 * (a * Ts + b) * L / as  
    Res := Rsl  
-  
ENDIF  
-  
ENDEXEC  
ENDMODEL
```