UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

JÉRIKA SUELY LAMAS

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE LIMITADOR DE CORRENTE
SUPERCONDUTOR UTILIZANDO FITAS DE YBCO

Lorena - SP

2009

JÉRIKA SUELY LAMAS

Projeto e construção de limitador de corrente supercondutor utilizando fitas de YBCO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Área de concentração: Supercondutividade
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Baldan

Lorena - SP

2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha Catalográfica

Elaborada pela Biblioteca Especializada em Engenharia de Materiais
USP/EEL

Lamas, Jérika Suely

Projeto e construção de limitador de corrente supercondutor
utilizando fitas de YBCO. / Jérika Suely Lamas ; orientador Carlos
Alberto Baldan. --Lorena, 2009.

134 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola
de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo.

1. Limitadores de corrente supercondutores (FCL) 2. Fitas
HTS 3. Fitas BSCCO 4. Fitas YBCO 5. Caracterização de fitas
I. Título.

CDU 538.945

Dedico esse trabalho aos meus pais, Carlos Javier Lamas Rosado e Maria Rossana Samanamud de Lamas, que muito me incentivaram durante este período.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Carlos Javier Lamas e Maria Rossana Samanamud Lamas por todo o investimento que fizeram em mim de tal forma a possibilitar melhores condições de estudo e oportunidades. Pelo suporte prestado durante este tempo e pelas palavras de sabedoria nos momentos oportunos.

Aos meus irmãos Gisella Rossana Lamas Samanamud e Mario Javier Lamas pelo apoio, conselhos e companhia.

Aos meus cachorros Karpel e Dolly que me acompanharam no início dos meus trabalhos e não puderam ver a finalização do mesmo e Panda e Shanti cuja companhia me alegrou e cujos passeios diários me fazem achar soluções para problemas.

Ao meu namorado Henk Huisseune pela paciência e apoio nos dias mais difíceis e pelos conselhos e dicas quando tive dúvidas.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Baldan por acreditar que eu poderia realizar este trabalho e por me orientar pessoalmente, por telefone e por e-mail.

Ao Prof. Dr. Carlos Yujiro Shigue pela contribuição profissional e científica, pessoal e orientação durante este trabalho.

A Profa. Dra. Cristina Bormio pelas instruções e informações fornecidas.

Ao Prof. Dr. Victo Moshalkov por permitir a realização das medidas magnéticas em seu laboratório INPAC – KULeuven.

Ao PhD Alejandro Silhanek da KULeuven pelo auxílio nas medidas magnéticas.

Aos amigos de pós-graduação e graduação Alex Coelho, Antonio Aires, Cláudio Teodoro, Cynthia Ferreira, Denise Hirayama, Gislaine Fernandes, Gustavo Ebinuma, Leandro Marcos, Mariane Abreu, Matheus Martini, Rafaela Sansevero, Renata Pires, Renato Baldan, Ulisses Roma, Vinicius Prado pela amizade, colaborações e compartilhamento de idéias.

Aos amigos que participaram de minha formação pessoal, André Huisseune, Benicio Reis, Daniel Soares, David Jeršezek, Lucas Woldini, Marcos Bonci e Marianne Staelens.

Aos funcionários e técnicos, Bento, Sávio, Dainesi, Geraldo Prado, Brás e todos os demais, que sempre foram prestativos em todas as necessidades ao longo do trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena por colocar a disposição a área experimental para realização deste trabalho.

A CAPES e CPFL pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho de mestrado.

*“A sabedoria da natureza é tal que não
produz nada de supérfluo ou inútil.”*

Nicolau Copérnico

RESUMO

LAMAS, J.S. **Projeto e construção de limitador de corrente supercondutor utilizando fitas de YBCO**. 2009. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena/SP, Brasil, 2009.

Limitadores de corrente supercondutores resistivos (LCSR) são dispositivos com características elétricas próximas ao ideal quando ocorre a transição do estado supercondutor para o estado normal, limitando a corrente de falta através da inserção rápida de uma resistência na rede. A viabilidade técnica e econômica destes limitadores aumentou após o desenvolvimento dos supercondutores de alta temperatura crítica HTS. A primeira geração de fitas HTS (BSCCO) consiste em multifilamentos de material supercondutor embutidos em uma matriz de prata. A densidade de corrente crítica típica é de aproximadamente 140 A/mm^2 . Contudo, a resistência alcançada pelo LCSR quando atinge o estado normal não é suficiente para limitar a corrente de falta, sendo necessários longos comprimentos de fitas ($\sim 5 \text{ km}$) para que a corrente seja limitada. O recente desenvolvimento de fitas supercondutoras de YBCO com filmes finos texturizados e com substrato de alta resistividade superou o desempenho das fitas de BSCCO para esta aplicação. Com uma densidade de corrente crítica de 136 A/mm^2 , as fitas de YBCO são bem conhecidas pelo seu alto valor de índice n (aproximadamente 30), rápida resposta de transição após falta e alta resistência elétrica no estado normal. Neste trabalho foram analisados o comportamento elétrico e magnético das fitas de BSCCO e YBCO (em amostras curtas de 0,2 m) utilizando diferentes técnicas de caracterização das propriedades das fitas HTS. A partir destes resultados, medidas com pulsos de corrente DC e AC com intensidades de 3 a 7 vezes a corrente crítica do sistema ($I=720 \text{ A}$ a 1700 A) com duração de 1 a 5 ciclos da rede em 60 Hz (16 a 80 ms) foram realizados de forma a obter as características do tempo de recuperação em um elemento contendo 4 fitas em paralelo (0,4 m). Os resultados permitiram o projeto, construção e medidas em corrente AC de um protótipo LCSR ($I_{\text{pico}} = 2 \text{ kA}$) contendo 16 elementos sob condições normais de operação da rede (220 V – 60 Hz).

Palavras-chave: Limitadores de corrente supercondutores resistivos (FCL). Fitas HTS. Fitas BSCCO. Fitas YBCO. Caracterização de fitas.

ABSTRACT

LAMAS, J.S. **Project and construction of a fault current limiter using YBCO tapes.** 2009. 134 f. Dissertation (Master of Science in Materials Engineering) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena/SP, Brasil, 2009.

Resistive Superconducting fault current limiter (SFCL) are devices with electrical behavior near the ideal when it changes its state from the superconducting to the normal state, limiting the fault current by the insertion of a fast transition resistance in the grid. The technical and economical feasibility of these limiters arose after the development of the high critical temperature superconductors HTS. First generation HTS tapes (BSCCO) consist of multifilamentary composite tapes embedded in a silver matrix. The typical critical current density is approximately 14 kA/cm^2 . However, the resistance reached by the SFCL when normal state occurs is not high enough to limit the fault current, making necessary long lengths of tapes ($\sim 5 \text{ km}$) for limiting purposes. The recently development of coated conductors composites with high resistivity metal substrate have succeeded the BSCCO tapes which are based on YBCO textured film. Upon carrying a critical current density of 13.6 kA/cm^2 , YBCO tapes are well known for their high n-index value (approximately 30), fast transition response after fault, and high electrical resistance in the normal state. In this work, we will present the electrical and magnetic performance of BSCCO and YBCO tapes (short samples of 0.2 m) using several techniques to characterize the properties of the HTS tapes. It was also performed analysis with DC and AC currents peaks with strength of 3 to 7 times the critical current ($I=720 \text{ A}$ to 1700 A) lasting 1 to 5 cycles (16 to 80 ms) in order to verify the recovery characteristics in an element with 4 tapes in a parallel connection. And with those characteristics we designed and constructed and measured in AC current a SFCL prototype ($I_{\text{peak}} = 2 \text{ kA}$) consisting in 16 elements to use in the grid ($220 \text{ V} - 60 \text{ Hz}$) under operational conditions.

Keywords: Superconducting Fault Current Limiter (SFCL). HTS tapes. BSCCO tapes. YBCO tapes. Tapes characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre campo magnético, densidade de corrente e temperatura delimitando a região supercondutora.....	23
Figura 2. a) Linhas de campo magnético dentro de um material supercondutor com $T > T_c$, b) expulsão das linhas de fluxo do interior do material supercondutor para $T < T_c$	23
Figura 3. Diagramas de intensidade de campo magnético a) do tipo I e b) do tipo II.....	24
Figura 4. Desenhos esquemáticos: a) produção de fita HTS pelo método PIT. b) vista transversal dos filamentos no tubo de Ag/Mg.....	28
Figura 5. Método de preparação do substrato pelo método RABiTS e deposição das camadas buffer por laser pulsado.....	29
Figura 6. Método de deposição organometálica MOD.....	30
Figura 7. Estrutura de camadas de fita YBCO da empresa American Superconductors.....	31
Figura 8. Processo MOD/RABiTS para produção de fitas de YBCO AMS.....	32
Figura 9. Método de preparação do substrato por IBAD.....	33
Figura 10. Método de deposição química de vapores organometálicos MOCVD.....	34
Figura 11. Estrutura de camadas de fita YBCO da empresa SuperPower.....	35
Figura 12. Exemplos de limitadores: a) Relés de sobrecorrente; b) fusíveis limitadores e; c) reator núcleo de ar.....	37
Figura 13. Reatores limitadores de corrente conectados a um sistema de energia elétrica.....	37
Figura 14. Reator tipo “shunt”.....	38
Figura 15. FACTS – Sistema de transmissão flexível em corrente alternada.....	38
Figura 16. Resposta da curva de I-t com pico de corrente e circuito equivalente de um limitador de corrente.....	39
Figura 17. Limitador de corrente indutivo.....	40
Figura 18. Limitador de corrente resistivo.....	41
Figura 19. Performance de um limitador de corrente (pico com duração de 100 ms). a) sem “shunt”; b) com “shunt” em paralelo.....	41
Figura 20. a) Bobinas concêntricas e b) resposta de corrente com e sem limitador de corrente.....	42
Figura 21. a) Desenhos esquemático do Bulk; b) Montagem do bulk em LN_2 ; resposta do supercondutor c) BLOCK et al., 2004; d) BALDAN et al., 2008.....	44
Figura 22. Bobinas utilizando fitas de Bi-2223.....	45

Figura 23. Resposta de corrente no FCL (I_s) e no reator em paralelo (I_n) para tempos de: a) 0,09 e b) 0,17 s.	45
Figura 24. a) Bobinas contendo fitas HTS; b) Resposta de tensão do supercondutor e do “shunt”.	46
Figura 25. a) Bobinas contendo fitas HTS; b) Resposta de tensão do supercondutor.	47
Figura 26. a) Bobina com fita de YBCO; b) Resposta de tensão e corrente sob curto.	47
Figura 27. a) Conjunto de fitas YBCO em paralelo; b) Resposta de tensão e corrente sob corrente de falta.	48
Figura 28. Microestrutura mostrando os filamentos de BSCCO em matriz de prata com revestimento (AMS).	49
Figura 29. Microestrutura mostrando os filamentos de BSCCO em matriz de prata sem revestimento (EAS).	49
Figura 30. Estrutura esquemática da fita de BSCCO.	49
Figura 31. a) Micrografia MEV mostrando as camadas da fita AMS; b) Estrutura da fita YBCO AMS.	51
Figura 32. a) Micrografia MEV mostrando as camadas da fita SuperPower YBCO SCS12050; b) Estrutura da fita SCS12050 com estabilizador de cobre.	51
Figura 33. a) Micrografia MEV mostrando as camadas da fita SuperPower YBCO SF12100; b) Estrutura da fita SF12100 sem estabilizador externo.	51
Figura 34. Foto do suporte de fibra de vidro contendo amostra curta soldada entre barras de cobre com “shunt” em paralelo.	55
Figura 35. Programa de aquisição de dados “Progaq Final Version” – rampa de corrente.	57
Figura 36. Programa de aquisição de dados “Picos I Histerese” – pulsos de corrente.	58
Figura 37. Diagrama esquemático do sistema para aquisição das curvas V-I.	59
Figura 38. Diagrama esquemático do sistema para aquisição das curvas R-T.	60
Figura 39. Diagrama esquemático do sistema para aquisição das curvas E-I/ I_c	62
Figura 40. Diagrama esquemático da forma de onda utilizada nos ensaios.	66
Figura 41. Circuito esquemático do ensaio de pico de corrente.	68
Figura 42. Figura esquemática da corrente circulante nas fitas do SFCL.	70
Figura 43. Foto de um elemento do SFCL contendo 4 fitas de 0,4 m com “shunt” em paralelo.	71
Figura 44. Foto de dois elementos do SFCL contendo 4 fitas de 0,4 m com “shunt” em paralelo cada.	72
Figura 45. Foto do protótipo do SFCL contendo 16 elementos.	73

Figura 46. Circuito esquemático do ensaio de pico em corrente AC.	74
Figura 47. Curva $E-I_c$ para amostras HTS de BSCCO e YBCO.	77
Figura 48. Curvas $R/1 - T$ para amostras HTS.	79
Figura 49. Curvas $E-I_c$ para amostra de BSCCO EAS com variação de campo magnético DC.	81
Figura 50. Curvas $E-I_c$ para amostra de BSCCO AMS com variação de campo magnético DC.	81
Figura 51. Curvas $E-I_c$ para amostra de YBCO AMS com variação de campo magnético DC.	82
Figura 52. Curvas $E-I_c$ para amostra de YBCO SCS12050 com variação de campo magnético DC.	83
Figura 53. Curvas $E-I_c$ para amostra de YBCO SF12100 com variação de campo magnético DC.	83
Figura 54. Curvas $E-I_c$ para amostra de BSCCO EAS com variação de campo magnético AC.	84
Figura 55. Curvas $E-I_c$ para amostra de BSCCO AMS com variação de campo magnético AC.	84
Figura 56. Curvas $E-I_c$ para amostra de YBCO AMS com variação de campo magnético AC.	85
Figura 57. Curvas $E-I_c$ para amostra de YBCO AMS com variação de campo magnético AC.	85
Figura 58. Curvas $E-I_c$ para amostra de YBCO AMS com variação de campo magnético AC.	86
Figura 59. Curva $\chi-T$ para amostras HTS de BSCCO e YBCO.	87
Figura 60. Curva χ' e χ'' versus temperatura da fita de BSCCO.	88
Figura 61. Curva χ' e χ'' versus temperatura da fita de YBCO AMS.	89
Figura 62. Curva χ' e χ'' versus temperatura da fita de YBCO SP SCS12050.	89
Figura 63. Curva χ' e χ'' versus temperatura da fita de YBCO SP SF12100.	90
Figura 64. Curva χ' e χ'' versus temperatura com diferentes frequências da fita de YBCO AMS.	90
Figura 65. Curva χ' e χ'' versus temperatura para frequências de 30, 50, 60 e 120 Hz para amostra de YBCO AMS.	91
Figura 66. Curva χ' e χ'' versus temperatura com diferentes frequências da fita de YBCO SCS12050.	92

Figura 67. Curva χ' e χ'' versus temperatura com diferentes frequências da fita de YBCO SF12100.	92
Figura 68. Tensão nas fitas HTS para pico de corrente $I = I_c$ para $t = 100$ ms.	94
Figura 69. Gráfico V-I em amostra YBCO AMS (tensão devido a transição e tensões induzidas).	95
Figura 70. Tensão nas fitas HTS para pico de corrente igual a $1,4I_c$ para $t = 100$ ms.	96
Figura 71. Curva $E-I/I_c$ com dados obtidos a partir dos valores experimentais para 50, 75, 90 e 100 ms em fitas de BSCCO e YBCO.	97
Figura 72. Curva V-t para fitas HTS. ($I = 1,4I_c$ e $t_{pico} = 90$ ms).	98
Figura 73. Curva Energia/Volume- I/I_c com tempos de pico de corrente de 50, 75, 90 e 100 ms em fitas de BSCCO e YBCO.	99
Figura 74. Distribuição de campo magnético em fitas HTS para $I = 228$ A.	102
Figura 75. Ampliação da distribuição de campo magnético nas fitas centrais para $I = 228$ A.	102
Figura 76. Ampliação de 1 fita HTS para $I = 228$ A.	103
Figura 77. Perfil da distribuição de campo entre quatro fitas HTS.	103
Figura 78. Distribuição de campo magnético em fitas HTS para $I = 1000$ A.	104
Figura 79. Distribuição de campo magnético em fitas HTS para $I = 2000$ A.	104
Figura 80. Curva V-I de 4 fitas em paralelo soldadas nas extremidades laterais e com conexões intermediárias a cada 100 mm.	106
Figura 81. Corrente de pico de 319 A com duração de 100 ms em conjunto de fitas paralelas.	107
Figura 82. Corrente de pico de 590 A com duração de 100 ms em conjunto de fitas paralelas.	107
Figura 83. Corrente de pico de 590 A com duração de 100 ms em conjunto de fitas paralelas.	108
Figura 84. Curva V-I da configuração dupla (dois elementos em série).	109
Figura 85. Curva (V,I)-t para $I_{pico} = 315$ A com duração de 100 ms.	110
Figura 86. Curva (V,I)-t para $I_{pico} = 420$ A com duração de 100 ms.	110
Figura 87. Curva (V,I)-t para $I_{pico} = 583$ A com duração de 100 ms.	111
Figura 88. Curva (V,I)-t em 1 ciclo de falta utilizando “shunt” de $175\text{ m}\Omega$	112
Figura 89. Curva (V,I)-t para 3 ciclos de falta utilizando “shunt” de $175\text{ m}\Omega$	113
Figura 90. Curva (V,I)-t para 5 ciclos de falta utilizando “shunt” de $175\text{ m}\Omega$	113
Figura 91. Curva (V,I)-t para 5 ciclos de falta utilizando “shunt” de $430\text{ m}\Omega$	114

Figura 92. Curva V-I do elemento supercondutor após os ensaios de pulsos de corrente. ...	115
Figura 93. Curva (V,I)-t para 1 ciclo de falta 1 em dois elementos do SFCL.	116
Figura 94. Curva (V,I)-t para 3 ciclos de falta em dois elementos do SFCL.	117
Figura 95. Curva (V,I)-t para 5 ciclos de falta em dois elementos do SFCL.	118
Figura 96. Curva (V,I)-t do SFCL sob corrente de 1,9 kA durante 1 ciclo.	119
Figura 97. Curva (V,I)-t do SFCL sob corrente de 1,65 kA durante 3 ciclos.	120
Figura 98. Curva (V,I)-t do SFCL sob corrente de 1,8 kA durante 5 ciclos.	120
Figura 99. Curva (V,I)-t do SFCL e de um elemento sob corrente de 1,8 kA durante 5 ciclos.	121
Figura 100. Fotos quadro a quadro do SFCL em operação quando da aplicação de uma corrente de pulso durante 5 ciclos.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais Supercondutores e suas temperaturas críticas.....	26
Tabela 2 - Principais propriedades dos filmes finos: Y-123, Bi-2212, Bi-2223 a 77 K.....	27
Tabela 3 - Características das fitas HTS de BSCCO.	50
Tabela 4 - Características das fitas HTS de YBCO.	52
Tabela 5 - Valores de tempo e corrente de pico utilizados no pulso de corrente do ensaio DC.	67
Tabela 6 - Dimensões e volumes das amostras HTS.	68
Tabela 7 - Correntes críticas e índices n de fitas HTS.	77
Tabela 8 - Valores de $R/1$ para temperaturas próximas a T_c e a 300 K (medido e da literatura).	79
Tabela 9 - Valores de temperatura crítica para fitas HTS (medido e da literatura).	87
Tabela 10 - Valores de energia/volume, tempo de recuperação, taxa de decaimento de tensão para fitas HTS com tempo de pico de 90 ms e $I_{pico} = 1,4I_c$	100
Tabela 11 - Respostas de recuperação nos ensaios com pulso AC.	115

LISTA DE SIGLAS

SFCL	<i>Superconducting fault current limiter</i>
FCL	<i>Fault current limiter</i>
LCSR	Limitadores de corrente supercondutores resistivos
HTS	<i>High critical temperature superconductor</i> (supercondutor de alta temperatura crítica)
LTS	<i>Low critical temperature superconductor</i> (supercondutor de baixa temperatura crítica)
BSCCO	Fitas a base de bismuto; i.e. Bi-2223 = $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$
YBCO	Fitas a base de ítrio; i.e. Y-123 = $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$
EAS	<i>European Advanced Superconductors</i>
VAC	<i>Vacuumschmelze</i>
AMS	<i>American Superconductor Corporation</i>
SP	<i>SuperPower Inc.</i>
PIT	<i>Powder-in-tube</i>
RABiTS	<i>Rolling assisted Bi-axially textured substrate</i>
IBAD	<i>Ion beam assisted deposition</i> (Deposição assistida por feixe de íons)
MOD	<i>Metalorganic deposition</i> (Deposição organometálica)
MOCVD	<i>Metalorganic chemical vapor deposition</i> (Deposição química de vapores organometálicos)
DC	<i>Direct current</i> (corrente contínua)
AC	<i>Alternating current</i> (corrente alternada)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PPMS	<i>Physical property measurements system</i> (sistema de medidas de propriedades físicas)
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> (Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação)
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
LAN	<i>Local area network</i> (Rede de área local)
MatLab	<i>Matrix Laboratory</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	O FENÔMENO DA SUPERCONDUTIVIDADE	22
2.1	EFEITO MEISSNER E SUPERCONDUTORES DO TIPO I E II	23
2.2	DENSIDADE DE CORRENTE	25
2.3	HTS – SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA	25
2.4	FITAS SUPERCONDUTORAS HTS	27
2.4.1	Primeira geração (1G) - BSCCO	27
2.4.2	Segunda geração (2G) - YBCO	28
3	LIMITADOR DE CORRENTE	36
3.1	PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA	36
3.2	LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR	38
3.3	DESCRIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES QUE UTILIZAM MATERIAL SUPERCONDUTOR	40
3.4	LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR UTILIZANDO LTS	42
3.5	LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR UTILIZANDO HTS	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1	SUPERCONDUTORES DE Bi-2223 (BSCCO)	49
4.2	SUPERCONDUTORES DE Y123 (YBCO)	50
4.3	COMUNICAÇÃO ENTRE INSTRUMENTOS E LINGUAGENS UTILIZADAS	53
4.4	CRITÉRIO UTILIZADO NA CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE CRÍTICA DE SUPERCONDUTORES	54
4.5	CARACTERIZAÇÕES DE FITAS SUPERCONDUTORAS	55
4.5.1	Caracterização Elétrica	55
4.5.1.1	Obtenção da curva tensão vs. corrente (V-I)	55
4.5.1.1.1	Montagem do suporte	55
4.5.1.1.2	Procedimento experimental	56
4.5.1.2	Obtenção da curva de resistência vs. temperatura (R-T)	59
4.5.1.3	Medidas de E vs. I/I _c em função do campo magnético DC e AC	60
4.5.2	Caracterização magnética	62
4.5.2.1	Medidas de susceptibilidade vs. temperatura (χ -T)	62
4.5.2.1.1	Funcionamento do equipamento	63
4.5.2.1.2	Procedimento experimental	63

4.5.2.1.3	Tratamento de dados.....	65
4.5.3	Medida do tempo de recuperação da propriedade supercondutora das fitas de BSCCO e YBCO	66
4.6	CARACTERIZAÇÃO DO LIMITADOR DE CORRENTE CONTENDO 4 FITAS SUPERCONDUTORAS EM PARALELO.....	69
4.6.1	Simulação do campo magnético em fitas paralelas – 2D.....	70
4.6.2	Caracterização de um e dois elementos do SFCL.....	71
4.6.3	Teste do protótipo do SFCL contendo 16 elementos	72
4.6.4	Procedimento experimental da medida de pulsos DC e AC	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
5.1	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA.....	76
5.1.1	Medidas de tensão vs. corrente (V-I)	76
5.1.2	Medidas de resistência vs. temperatura (R-T).....	78
5.1.3	Medidas de E vs. I/I_c em função do campo magnético DC e AC	80
5.1.3.1	Curvas E- I/I_c em função de campo magnético DC	80
5.1.3.2	Curvas E- I/I_c em função de campo magnético AC	83
5.2	CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA.....	86
5.2.1	Medidas de susceptibilidade vs temperatura (χ-T).....	86
5.3	MEDIÇÃO DO TEMPO DE RECUPERAÇÃO.....	93
5.4	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO ELEMENTO DO SFCL COM FITAS SUPERCONDUTORAS EM PARALELO.....	101
5.4.1	Simulação da distribuição do campo magnético.....	101
5.4.2	Ensaio de pulsos de corrente contínua DC	105
5.4.2.1	Para um elemento do SFCL contendo 4 fitas em paralelo.....	105
5.4.2.2	Para dois elementos do SFCL contendo 4 fitas em paralelo cada	108
5.4.3	Ensaio de pulsos de corrente alternada AC	111
5.4.3.1	Para um elemento do SFCL contendo 4 fitas em paralelo.....	111
5.4.3.2	Para dois elementos do protótipo do SFCL conectados em série.....	116
5.4.3.3	Protótipo do SFCL contendo 16 elementos	118
6	CONCLUSÕES.....	124
7	TRABALHOS FUTUROS	128
	REFERÊNCIAS.....	129
	ANEXO A.....	134

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de energia elétrica, sobrecargas em circuitos elétricos vêm ocorrendo com mais frequência. Atualmente são utilizados para monitoração, medição e proteção destes circuitos transformadores de corrente e tensão, os fusíveis, as chaves seccionadoras e os limitadores de corrente (reator núcleo de ar).

A função destes equipamentos de segurança é de detectar o aumento da corrente (devido a um curto circuito ou uma falta de corrente) e comandar o desligamento ou a interrupção dos circuitos a fim de isolar a área com problema e religar o restante da rede.

No entanto, os limitadores convencionais além de dissiparem energia, pois estão permanentemente conectados à rede durante a operação normal, alteram o fator de potência dos circuitos exigindo a instalação de bancos de capacitores para sua correção e ainda apresentam tempo muito longo de recuperação ($t > 8$ h) não estando aptos para operação se ocorrer uma segunda falta na rede.

Os materiais supercondutores apresentam uma transição de seu estado supercondutor (resistência nula) para estado normal de condução (com resistência elétrica muito superior a do cobre) quando uma de suas propriedades críticas (temperatura, campo magnético ou corrente) é ultrapassada. Utilizando este fenômeno um dispositivo supercondutor pode ser inserido em um circuito para que em operação normal (abaixo da corrente crítica) o estado supercondutor seja mantido com reduzidas perdas e durante as faltas (ou curto-circuito) ocorra transição, inserindo desta forma uma resistência adicional à impedância do circuito e conseqüentemente limitando a corrente de falta.

Inicialmente os SFCL (Superconducting Fault Current Limiter) ou LCS (Limitadores de corrente supercondutores) foram desenvolvidos utilizando fios supercondutores de baixa temperatura crítica (LTS), principalmente os com multifilamentos de NbTi em matriz de CuNi, que apresentam alta densidade de corrente ($J_c = 20 \text{ kA/mm}^2$) a 4,2 K. Porém, devido ao custo de operação com He líquido como líquido refrigerante, mesmo com os excelentes resultados obtidos, sua aplicação não foi viabilizada economicamente (BALDAN et al., 2004).

Limitadores de corrente supercondutores resistivos (LCSR) são os mais indicados, pois operam próximos do ideal limitando a corrente sem alterar o fator de potência. Basicamente um LCSR pode ser construído com enrolamentos bifilares (condutores em paralelo conduzindo correntes opostas), arranjos de bobinas concêntricas (com diferentes

polaridades magnéticas) ou na forma de condutores em paralelo arranjados em setores com conexão em série, para utilizar longos comprimentos de supercondutores de modo a atingir a resistência desejada após a transição para o estado normal.

Os materiais supercondutores de alta temperatura crítica – HTS, operando em nitrogênio líquido a 77 K e atingindo $J_c = 151 \text{ A/mm}^2$, foram produzidos em escala comercial inicialmente na forma de barras (“bulk”) para os compostos de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi-2212; $T_c = 90 \text{ K}$), e posteriormente na forma de fitas de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$ (Bi-2223; $T_c = 110 \text{ K}$) com matriz de Ag/AgMg chamadas de fita de 1ª geração (1G - BSCCO). A aplicação desta fita em limitadores de corrente fica inviabilizada, pois para inserir resistência de alguns ohms seriam necessários longos comprimentos (quilômetros) de fita devido à baixa resistividade da matriz de Ag, sendo também a prata responsável pelo alto custo do material (70%).

As fitas de 2ª geração (2G) (PRUSSEIT et al., 2006) de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Y-123 - YBCO); ($T_c = 90 \text{ K}$), obtidas pelo processo “reel-to-reel” através de deposição por MOD (deposição organometálica) ou MOCVD (deposição química de vapores organometálicos) em substrato metálico de alta resistividade apresentam excelente potencial para aplicação em limitadores de corrente devido a inserção de uma resistência que limita a corrente de falta.

Os protótipos de limitadores de corrente utilizando “bulks” de Bi-2212 foram testados com sucesso para aplicações em 15 kV (BOCK et al., 2004; 2005) e em 220 V (BALDAN et al., 2006; 2008). Porém, a utilização deste dispositivo ainda é limitada pela dificuldade de fabricação de tubos com características homogêneas e pelo alto custo de usinagem, cuja redução depende da produção em grande escala.

No presente trabalho foram projetados e construídos dispositivos para avaliar as propriedades críticas das fitas de YBCO e sua recuperação após a transição, que são propriedades importantes para sua utilização em limitadores de corrente.

Foram realizadas caracterizações elétricas e magnéticas em amostras curtas, seguidas de estudo do tempo de recuperação das fitas HTS de BSCCO e YBCO. Com as características bem definidas para utilização no limitador de corrente, foi selecionada a fita supercondutora mais apropriada para a montagem do protótipo do limitador.

Para conclusão do trabalho foi montado um protótipo do limitador de corrente que constitui de 16 elementos contidos em oito placas G10 com condutores paralelos em setores de 400 mm de comprimento, associados em série, visando limitar o campo elétrico máximo em $E = 0,05 \text{ V/mm}$ para a tensão de rede $V_{ef} = 220 \text{ V}$, ou seja, $V_{(pico)} = 311 \text{ V}$.

No teste inicial do SFCL foi medido um elemento contendo quatro fitas supercondutoras (YBCO) em paralelo e também foram feitos testes com dois elementos para

o levantamento das características de corrente e tempo de recuperação. Os resultados obtidos foram utilizados no dimensionamento elétrico do limitador de corrente de 16 elementos.

Os ensaios foram realizados para diversos valores de corrente de pulso com diferentes tempos de duração, com o objetivo de determinar a velocidade de aquecimento e extração de calor da fita imersa em LN_2 e o crescimento da resistência no estado normal. Nesta etapa, os ensaios foram realizados utilizando a fonte de corrente contínua DC (10 V/1000 A). Para o ensaio dos elementos e do protótipo do SFCL em corrente AC foi utilizado um gerador de 96 kVA/380 V com corrente de curto-circuito de 2 kA. Neste ensaio foi analisado o tempo de atuação e recuperação do SFCL sob condições normais de operação. Simulações da distribuição magnética foram realizadas de forma a observar o comportamento do conjunto do SFCL sob corrente de falta e nominal.

2 O FENÔMENO DA SUPERCONDUTIVIDADE

A resistividade elétrica na maioria dos metais diminui gradualmente à medida que a temperatura diminui, no entanto, existem alguns materiais que a uma temperatura muito baixa tem sua resistividade diminuída abruptamente, desde um valor finito até um valor próximo a zero, permanecendo neste ponto após resfriamento adicional. Esta temperatura onde ocorre mudança brusca de resistividade é chamada de temperatura crítica, T_c , e os materiais que apresentam essas características são chamados de supercondutores.

A supercondutividade é o fenômeno que certos materiais (metálicos ou cerâmicos) possuem de ter resistência nula quando submetidos a baixas temperaturas. A temperatura crítica nos supercondutores metálicos é muito baixa, o que exige a utilização de hélio líquido a 4,2 K como meio refrigerante, enquanto que as cerâmicas supercondutoras apresentam temperaturas mais elevadas, o que permite a utilização como meio refrigerante o nitrogênio líquido a 77 K.

A supercondutividade foi descoberta em 1911 (três anos após a obtenção de hélio líquido) por H. Kamerlingh Onnes em Leiden (TINKHAM, 1980) viabilizando às condições de refrigeração necessárias para atingir temperaturas de alguns Kelvin. A partir de sua descoberta muitos materiais foram estudados, sendo que 33 elementos da tabela periódica apresentam transição supercondutora a pressão ambiente e 22 elementos apresentam supercondutividade sob altas pressões (SUPERCONDUCTORS, 2007).

Ao investigar metais como mercúrio, chumbo e estanho, Onnes observou que a supercondutividade pode ser suprimida quando exposto a um valor de densidade de fluxo magnético superior a um valor crítico B_c , que depende do tipo de material em uma dada temperatura.

Outras propriedades foram descobertas nos anos subseqüentes e verificou-se que a supercondutividade não dependia apenas da temperatura nem somente do campo magnético, mas também da densidade de corrente que o material transporta. Essas grandezas relacionam-se entre si através de uma superfície no espaço B, J, T mostrada na Figura 1 sendo uma característica do material. Abaixo da superfície formada pelos planos o material é supercondutor e acima da superfície o material comporta-se como um material normal, isto é, com resistividade não nula.

Figura 1. Relação entre campo magnético, densidade de corrente e temperatura delimitando a região supercondutora. (Adaptado de: AMERICAN SUPERCONDUCTORS CORPORATION, 2009)

2.1 EFEITO MEISSNER E SUPERCONDUTORES DO TIPO I E II

A resistividade nula não é a única característica peculiar do material supercondutor. Em 1933, Meissner e Ochsenfeld (MEISSNER; OCHSENFELD, 1933) descobriram que se um supercondutor é resfriado abaixo de sua temperatura de transição e submetido a um campo magnético, este é capaz de expulsar o fluxo magnético de seu interior. Este fenômeno é conhecido como Efeito Meissner e está mostrado esquematicamente na Figura 2.

Figura 2. a) Linhas de campo magnético dentro de um material supercondutor com $T > T_c$, b) expulsão das linhas de fluxo do interior do material supercondutor para $T < T_c$.

Mesmo para $T < T_c$, se o campo magnético é aumentado continuamente, haverá um determinado campo $B \geq B_c$, para o qual o fluxo magnético penetra no material.

Esta penetração de fluxo magnético no interior do material define um campo magnético crítico que leva à transição do seu estado supercondutor para o estado normal. Esta característica levou a classificação em materiais supercondutores do tipo I e tipo II.

Os supercondutores do tipo I apresentam efeito Meissner completo e por isso, excluem totalmente o campo magnético do seu interior. O fluxo de corrente elétrica nestes supercondutores é limitado a valores muito baixos em razão dos valores reduzidos de B_c .

Os supercondutores do tipo II são caracterizados por reter suas características supercondutoras sob densidades de campo magnético intenso e apresentam dois campos magnéticos críticos: H_{c1} e H_{c2} . Na faixa de $0 < H < H_{c1}$ o supercondutor tipo II apresenta efeito Meissner completo e sua permeabilidade magnética é nula. Entre $H_{c1} < H < H_{c2}$ o material encontra-se no estado misto, havendo penetração de fluxo magnético na forma de vórtices ou linhas de fluxo, porém sua resistividade permanece próxima de zero. Para $H > H_{c2}$ a supercondutividade é suprimida e a resistividade cresce bruscamente levando o material a seu estado normal.

A Figura 3 mostra os diagramas de campo magnético para supercondutores tipo I e II.

Figura 3. Diagramas de intensidade de campo magnético a) do tipo I e b) do tipo II.

2.2 DENSIDADE DE CORRENTE

A supercondutividade existe para densidades de corrente abaixo da densidade de corrente crítica, J_c . Esta densidade de corrente depende da temperatura e do campo magnético, como já mencionado no item 2.1.

Os fios supercondutores de NbTi e Nb₃Sn na temperatura de 4,2 K apresentam respectivamente uma J_c de 10 kA/mm² e 20 kA/mm² sob campo magnético nulo. Para intensidade de campo magnético externo de 5 T sua densidade de corrente crítica será de 2 kA/mm² para os fios de NbTi e 8 kA/mm² para os fios de Nb₃Sn, para um campo magnético de 12 T os fios de Nb₃Sn apresentam J_c de 2 kA/mm², densidades de corrente extremamente elevada quando comparado a um condutor de cobre cuja densidade de corrente utilizada é de 2 a 3 A/mm² na temperatura ambiente (OOMEN, 2000).

A alta densidade de corrente crítica dos supercondutores permite uma grande redução de volume, peso e custo dos dispositivos que utilizam campo magnético intenso. Para geração de campos magnéticos intensos em grandes volumes, como no caso de equipamentos de tomografia, a sua construção foi somente viabilizada com a utilização de supercondutores LTS.

2.3 HTS – SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA

A evolução da tecnologia de novos materiais supercondutores até 1986 estava limitada a máxima temperatura crítica encontrada para supercondutores de 23,2 K para o Nb₃Ge. Baixas temperaturas de trabalho exigiam equipamentos sofisticados de refrigeração e de elevado custo, o que dificultava a utilização destes materiais em alta escala usando o hélio líquido como refrigerante. O hélio líquido é comercializado no exterior na faixa de US\$ 9,42/L a US\$ 13,45/L (KÜHLWEIN, 2007), sendo que no país atinge US\$ 20,00/L enquanto que o nitrogênio é comercializado a US\$ 0,06/L no exterior (McCHESNEY, 2005) e US\$ 0,92/L no Brasil (AIR LIQUIDE, 2009).

A partir de 1986, com a descoberta e o rápido desenvolvimento de materiais supercondutores de alta temperatura crítica com valores de T_c acima de 30 K como no caso do La₂CuO₄, abriu novas perspectivas da aplicação de supercondutores. Este material foi o primeiro da nova classe de cerâmicas de alta T_c , porém após 6 meses de publicação desta

descoberta, oito novos materiais foram descobertos com temperaturas críticas próximas a temperatura do N₂ líquido (77 K).

A Tabela 1 mostra o tipo de material, sua temperatura crítica e o ano de descoberta de alguns supercondutores.

Tabela 1 - Materiais Supercondutores e suas temperaturas críticas (POOLE, 1995)

Material	T _c (K)	Ano
Hg	4,1	1911
Pb	7,2	1913
Nb	9,2	1930
NbN _{0,96}	15,2	1950
Nb ₃ Sn	18,1	1954
Nb ₃ (Al _{0,75} Ge _{0,25})	20-21	1966
Nb ₃ Ga	20,3	1971
Nb ₃ Ge	23,2	1973
Ba _x La _{5-x} Cu ₅ O _y	30-35	1986
(La _{0,9} Ba _{0,11}) ₂ Cu _{4-δ} (1 GPa)	52	1986
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	95	1987
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	1988
Ti ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	1988
Ti ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (7 GPa)	131	1993
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ}	133	1993
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ} (25 GPa)	155	1993
Hg _{0,8} Pb _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	133	1994
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ} (30 GPa)	164	1994
Hg _{0,8} Ti _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8,33} (30 GPa)	138	1995
MgB ₂	39	2001

O supercondutor de (Hg,Pb)Ba₂Cu₂Cu₃O_x apresenta a maior temperatura crítica em condições normais de pressão (133 K). Porém, os supercondutores mais utilizados e disponíveis em escala industrial são: YBa₂Cu₃O_{7-δ} (Y-123), Bi₂Sr₂CaCu₂O_x (Bi-2212) e Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x (Bi-2223), com suas propriedades básicas descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais propriedades dos filmes finos: Y-123, Bi-2212, Bi-2223 a 77 K(OOMEN, 2000).

Propriedade [unidade]	Y-123	Bi-2212	Bi-2223
Temperatura crítica T_c [K]	92	85	110
Campo magnético crítico $\mu_0 H_{c2}$ [T]	~56	~35	>20
Campo magnético irreversível $\mu_0 H_{irrev}$ [T]	>10	~0,005	~0,2
Densidade de corrente crítica J_{c0} [A/mm ²] em campo próprio	4×10^4	1×10^3	1×10^4
Densidade de corrente crítica J_c [A/mm ²] a 0,1 T	2×10^4	0	1×10^3

2.4 FITAS SUPERCONDUTORAS HTS

2.4.1 Primeira geração (1G) - BSCCO

A primeira geração dos fios supercondutores comerciais HTS possui uma estrutura multifilamentar inserida em uma matriz de Ag/AgMg produzida pelo processo PIT (“powder-in-tube”, Figura 4).

Este processo é bastante empregado para a fabricação de fios e fitas de Bi-2223 e consiste na aplicação de um precursor comercial de composição $\text{Bi}_{1,8}\text{Pb}_{0,33}\text{Sr}_{1,87}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ em pó em um tubo de Ag de 20 mm de diâmetro. Um vibrador magnético tem a função de deixar a mistura, dos pós, uniforme e mais denso possível. Tubos de Ag preenchidos com pó do precursor são trefilados e depois arranjados e embutidos nos tubos de Ag/Mg, sendo então os conjuntos deformados novamente e recozidos a 650 °C em vácuo (0,013 Pa). Esses conjuntos de diâmetro de 1,4 mm são embutidos novamente em tubo de Ag/Mg, o conjunto é então deformado e termicamente tratado ao ar a 840 °C (OH, 2002), para formação da fase supercondutora.

Figura 4. Desenhos esquemáticos: a) produção de fita HTS pelo método PIT. b) vista transversal dos filamentos no tubo de Ag/Mg (Adaptado de METAL OXIDE TECHNOLOGIES, 2005).

As fitas HTS de Bi-2223 tiveram sua produção desenvolvida em escala industrial no período de 2000 a 2005. Entretanto, devido ao alto custo da matriz de Ag, que representa 70% do volume da fita, seu custo de produção pelo processo atual de US\$ 70 kA.m, tem limitado sua aplicação devido a fatores econômicos. Outro fator limitante das fitas de BSCCO para aplicação em limitadores de corrente é a baixa resistividade elétrica da matriz, ou seja, a resistência inserida quando o SFCL transita do estado supercondutor/normal é muito baixa exigindo vários quilômetros de fita para atingir a resistência necessária para a limitação da corrente.

Assim, sua aplicação ficou restrita aos equipamentos de ressonância magnética nuclear, que utilizam corrente contínua para geração de campos magnéticos intensos em grandes volumes, operando em 77 K refrigerados com nitrogênio líquido com redução significativa de custo.

2.4.2 Segunda geração (2G) - YBCO

A segunda geração de fitas supercondutoras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ – Y123 foi desenvolvida com uma estrutura de camadas orientadas depositadas sob um substrato metálico. Esta técnica de deposição auxiliou no desenvolvimento de condutores recobertos para fabricação de longos comprimentos de fitas com potencial de redução de custo em larga escala de produção. Este processo chamado de “reel-to-reel” consiste basicamente de:

- Preparação do substrato metálico;
- Preparação e aplicação das camadas buffer;
- Preparação e aplicação do material HTS e posterior tratamento térmico;
- Preparação e aplicação de camadas passivantes, estabilizantes e de isolamento.

O material do substrato deve ser termicamente e quimicamente compatível com todos os componentes das deposições intermediárias ou com os componentes e condições do processo de crescimento de tal forma a otimizar o contato superfície e filme supercondutor.

As fitas de YBCO da empresa American Superconductors (AMS) são produzidas pelo método RABiTS/MOD (“Rolling Assisted Bi-Axially Textured Substrate”/ Deposição Organometálica) e consistem em um substrato texturizado de liga de Ni (Ni5%atW) recristalizado em forno “reel-to-reel” com espessura de 75 μm (RUPICH et al., 2003; PRUSSEIT et al., 2006), que recebem deposição de camadas sucessivas dos demais materiais.

As camadas intermediárias são formadas por 75 nm de Y_2O_3 (chamada de camada semente - “seed layer”), 75 nm de YSZ (ítrio estabilizado com zircônio compondo a camada barreira - “barrier layer”) e 75 nm de CeO_2 (óxido de cério, camada capa - “cap layer”) depositados por laser pulsado ou pela deposição organometálica (RUPICH et al., 2007). Estas etapas de texturização do substrato e adição de camadas buffer pelo processo RABiTS está esquematizado na Figura 5.

Figura 5. Método de preparação do substrato pelo método RABiTS e deposição das camadas buffer por laser pulsado (Adaptado de METAL OXIDE TECHNOLOGIES, 2005).

O precursor de YBCO consiste em uma solução estequiométrica de TFA (ácido trifluoracético) e é obtido pelo processo MOD. Terras raras (RE: Dy, Er, Ho) e sais carboxilatos são dissolvidos no precursor TFA para preparar os filmes de $Y(RE_x)Ba_2Cu_3O_7$ ($x = 0-0.5$) contendo nanopontos de RE (RUPICH et al., 2007). A mistura seca é redissolvida em metanol formando uma solução orgânica de trifluoracetatos utilizada para cobrir o substrato texturizado. A fita recoberta é aquecida a 200-400 °C sob atmosfera de O_2 a fim de remover água cristalizada ou excesso do solvente orgânico e para converter o filme trifluoracetato na forma de oxifluorídrico. A operação é repetida até a obtenção da espessura adequada. A Figura 6 mostra o diagrama esquemático do processo MOD.

Figura 6. Método de deposição organometálica MOD (Adaptado de METAL OXIDE TECHNOLOGIES, 2005).

O filme processado de $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ é coberto com uma camada de 3 μm de Ag para fornecer baixa resistividade de contato elétrico com a camada HTS e para proteção contra o ambiente externo (PRUSSEIT, 2006; RUPICH, 2007).

O reforço mecânico é executado com a soldagem de duas fitas de aço inoxidável ou cobre, utilizando a liga de Sn42%pPb para unir e selar as laterais do conjunto, tornando-o hermético ao ar.

As principais características de cada camada que compõem a estrutura da fita AMS são descritas a seguir:

- Substrato de Ni5%atW: placa de liga metálica com orientação preferencial (texturização cristalográfica). Fornece uma base para a formação de uma alta ordenação no recobrimento com supercondutor.
- Tratamento da superfície com enxofre: gera reticulado de átomos de enxofre que asseguram uma alta qualidade das camadas “buffers” sobre o substrato.
- Camada semente de óxido de Ítrio: Y_2O_3 cresce epitaxialmente sobre a superfície tratada do substrato. Tem a finalidade de transferir a textura do substrato para o supercondutor YBCO.
- Camada barreira de YSZ (ítrio estabilizado com zircônia): YSZ reproduz a texturização cristalográfica do substrato. Serve como barreira impedindo contaminação do YBCO supercondutor pelos metais do substrato.
- Camada capa de céria: CeO_2 garante compatibilidade química e estrutural para a formação de YBCO. Desta forma, permite a formação de uma camada de YBCO de alta performance através da decomposição do precursor metalorgânico depositado na camada de céria.
- Supercondutor YBCO recoberto com nanopontos: $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) contendo dispersão de nanopontos de óxido de ítrio (Y_2O_3) e cuprato de ítrio ($Y_2Cu_2O_5$) transporta corrente contínua com resistência zero. Os nanopontos melhoram a capacidade de transporte de corrente através do aprisionamento (“pinning”) dos vórtices (linhas de fluxo) dentro do YBCO.

A estrutura de camadas está representada na Figura 7 e o processo MOD/RABiTS pode ser resumido nas etapas mostradas na Figura 8.

Figura 7. Estrutura de camadas de fita YBCO da empresa American Superconductors (Adaptado de AMERICAN SUPERCONDUCTORS CORPORATION, 2009a).

Figura 8. Processo MOD/RABiTS para produção de fitas de YBCO AMS (Adaptado de MALOZEMOFF, 2004).

Outra opção de preparação do substrato metálico é pelo processo de deposição assistida por feixe de íons (IBAD) mostrado na Figura 9 e utilizados pela empresa SuperPower. O processo IBAD difere do processo RABiTS pelo fato de não existir nenhuma texturização forçada no substrato metálico no início do processo. No entanto, após a primeira deposição do buffer o material sofre texturização independente do alinhamento do substrato (SELVAMANICKAM et al., 2001).

O substrato de 100 μm nestas fitas consiste em uma liga de Ni (Hastelloy) escolhida por sua viabilidade de processamento em larga escala com espessura reduzida (0,1 mm), resistência à alta temperatura, e expansão térmica compatível entre as camadas buffer e YBCO. O processo IBAD-YSZ é lento e depositado na fase vapor, já o processo IBAD-MgO, utilizado pela empresa SuperPower é rápido. No processo de deposição IBAD-MgO o substrato deve possuir uma superfície polida e o processo deve ser controlado devido a velocidade de deposição. A rugosidade adequada é obtida por polimento eletrolítico executado no substrato de Hastelloy C276.

As camadas de barreira, nucleação, IBAD-MgO (temperatura ambiente) e MgO epitaxial (temperatura $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) são depositadas *in situ* em um sistema de deposição montado em câmara sob vácuo ou pressão parcial de O_2 . A camada barreira de Al_2O_3 de espessura entre 30-100 nm é depositada sobre o substrato polido. A camada de IBAD-MgO requer uma camada semente de Y_2O_3 para orientação cristalográfica desejada. O processo de preparação da base orientada é finalizada com a deposição de MgO sobre a camada de IBAD-MgO a temperatura entre 300-600 $^{\circ}\text{C}$ (KREISKOTT et al., 2004).

Figura 9. Método de preparação do substrato por IBAD (Adaptado de METAL OXIDE TECHNOLOGIES, 2005).

Antes da deposição do supercondutor, uma camada buffer de STO ($SrTiO_3$) é depositada sobre as demais com a finalidade de melhorar o acoplamento entre as camadas MgO e YBCO.

O YBCO é depositado sobre o substrato coberto com as camadas “buffer” por MOCVD (deposição química de vapores organometálicos). No esquema da Figura 10, precursores de alta pureza de Y, Ba e Cu são introduzidos na forma de vapor. Y, Ba e Cu são obtidos de uma mistura de $Y(TMHD)_3$, $Ba(TMHD)_2$ e $Cu(TMHD)_2$ (onde TMHD é 2,2,6,6-tetrametil-3-5 heptanodionato) preparados em solvente orgânico contendo tetrahidrofurano (THF), isopropanol e tetraglyme. O produto da mistura é bastante sensível a traços de contaminantes e seu alto custo se deve a sua alta pureza. A aplicação do precursor na câmara de MOCVD é mantida a 600-850 °C a uma pressão de 0,13 -1,3 kPa. A mistura de N_2O/O_2 é introduzida através de um tubo de plasma e Y, Ba e Cu vaporizados contendo precursores são transportados pelo fluxo de N_2 a 230 °C (SELVAMANICKAM et al., 1997, 2001; KREISKOTT et al., 2004).

Figura 10. Método de deposição química de vapores organometálicos MOCVD (Adaptado de METAL OXIDE TECHNOLOGIES, 2005).

As fitas da SuperPower são produzidas sem estabilizador ou com a camada de estabilizador de cobre de 0,04 mm de espessura recobrindo o conjunto. O estabilizador protege a fita supercondutora durante a transição aumentando a taxa de evaporação de calor e beneficia o conjunto em aplicações sob altas tensões mecânicas.

As principais características de cada camada que compõem a estrutura da fita da SuperPower são descritas a seguir:

- Substrato de Hastelloy: liga metálica de alta resistividade.
- Barreira para difusão de Alumina (Al_2O_3): evita difusão dos metais do substrato para as camadas depositadas.
- Camada de nucleação de Ítria (camada semente): fornece boa superfície de nucleação para o IBAD-MgO. Esta camada influencia fortemente o plano de orientação da camada guia de MgO.
- Camada “template” (guia) IBAD-MgO: introduz textura biaxial.
- Camada “buffer” Homo-epi MgO: responsável por melhorar a textura.
- Camada capa de STO (SrTiO_3): casa os reticulados de MgO com o reticulado de YBCO com boa compatibilidade química. Protege a camada epitaxial de MgO.
- Supercondutor YBCO: permite a passagem de corrente elétrica com resistência nula.

A estrutura da fita da SuperPower está mostrada na Figura 11.

Figura 11. Estrutura de camadas de fita YBCO da empresa SuperPower (Adaptado de WEBER et al., 2007).

Considerando os processos industriais implementados para fabricação de fitas HTS de YBCO é esperado um aumento nos comprimentos de fitas com características homogêneas, redução no custo de produção e consequentemente redução de custo no produto final e aumento da performance devido a texturização das camadas, sendo assim, viabilizados economicamente para utilização em sistemas de potência e outras aplicações.

3 LIMITADOR DE CORRENTE

3.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Um sistema de potência é projetado para gerar energia elétrica em quantidade suficiente para distribuição e consumo em uma determinada área.

Para garantir um fornecimento eficiente de energia elétrica e a satisfação dos usuários, é feito um alto investimento em equipamentos para o sistema de potência de tal forma que estejam continuamente em funcionamento sem interrupções distribuindo energia com alta qualidade. Isto pode ser atingido com equipamentos de controle, proteção e segurança.

Esta proteção é importante, pois limita possíveis correntes de falta em sistemas de potência mantendo a confiabilidade e a transferência de potência mesmo que as estruturas dos sistemas se alterem ou que o consumo de energia aumente. Desta forma, as exigências básicas para os sistemas de proteção são (HEWTISON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2004):

- Seletividade: selecionando a parte danificada da rede e retirando-a de serviço sem afetar os outros componentes do circuito.
- Estabilidade: mantendo os circuitos em funcionamento intactos assegurando a continuidade do fornecimento.
- Velocidade: entrando em operação quando necessário, minimizando o dano e garantindo segurança aos equipamentos.
- Tempo de resposta: atuando rapidamente prevenindo o aumento da falta local, (a energia de falta é diretamente proporcional ao tempo).
- Sensibilidade: detectando pequenas faltas e anormalidades no sistema e operando corretamente como programado.

Os dispositivos convencionais de proteção utilizados em sistema de potência, mostrados na Figura 12, são:

- Transformadores de tensão e corrente: monitoram e retornam precisos “feedbacks” sobre o sistema atuante.
- Relés: convertem os sinais dos dispositivos de monitoramento e dão instruções para abertura do circuito sob condições de falta ou disparam alarmes quando equipamentos estão próximos a possíveis danos.

- Fusíveis: auto-destrutivo, evitando danos nos equipamentos subsequentes.
- Limitadores de corrente: usados para desviar a corrente de falta evitando que o sistema de potência se danifique.

Figura 12. Exemplos de limitadores: a) Relés de sobrecorrente; b) fusíveis limitadores e; c) reator núcleo de ar.

Os dispositivos de segurança mais adotados para sistemas de potência são os limitadores de corrente de falta. Estes são divididos em: tipo série, tipo “shunt” e os FACTS.

O reator tipo série, cuja foto é mostrada na Figura 13, possui seu enrolamento com condutores de alumínio impregnado com resina epóxi montado em estruturas de alumínio que são geralmente fixadas no solo. Utiliza núcleo de ar evitando o efeito da saturação magnética mantendo a indutância constante. Outros modelos utilizam núcleo magnético refrigerados a óleo, muito se aproximando da alternativa de limitação de corrente de falta com a utilização de transformadores de alta impedância. As desvantagens destes FCL estão: no tamanho (grandes dimensões), elevada força de repulsão magnética, na necessidade de bancos de capacitores para correção do fator de potência, alto custo de investimento e longo tempo de recuperação após atuação.

Figura 13. Reatores limitadores de corrente conectados a um sistema de energia elétrica (TRENCH, 2007).

O limitador tipo “shunt” trabalha abrindo uma chave de desvio da corrente que está em paralelo com a impedância. A desvantagem deste modelo está no tempo de reação da chave que é muito maior ($t > 100$ ms) que o tempo necessário para a operação.

Figura 14. Reator tipo “shunt” (TOSHIBA, 2009).

Os FACTS (Sistema de transmissão flexível em corrente alternada) foram desenvolvidos para regular o sistema de potência, de forma a fornecer estabilidade durante longos comprimentos da distribuição da rede. Consistem em um conjunto de equipamentos que utilizam eletrônica de potência para o controle de transmissão em corrente alternada. As grandes desvantagens deste sistema estão na presença de correntes harmônicas gerados pela corrente AC e no tempo de resposta muito lento. (SONG; JOHNS, 1999).

Figura 15. FACTS – Sistema de transmissão flexível em corrente alternada. (SIEMENS, 2008).

3.2 LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR

O limitador de corrente de falta (LCF) ou “fault current limiter” (FCL) é um dispositivo capaz de reduzir uma corrente de falta quando ocorre um curto-circuito em um sistema de energia elétrica, atuando geralmente antes de $\frac{1}{4}$ de ciclo.

Basicamente um limitador de corrente supercondutor quando submetido a um pico de corrente de valor maior que sua corrente crítica, aumenta sua impedância limitando a corrente que passa pelo circuito quando este deixa de ser supercondutor (como uma chave que habilita ou desabilita uma impedância conectada em série com o circuito) com uma resposta rápida e automática (ARAI et al., 2006).

Figura 16. Resposta da curva de I-t com pico de corrente e circuito equivalente de um limitador de corrente (Adaptado de KOVALSKY et al., 2005).

A utilização de limitadores de corrente supercondutor apresenta as seguintes vantagens (SOKOLOVSKY et al., 2004):

- Desempenho de limitação superior que os dispositivos convencionais (controladores de corrente) devido a eficácia e rapidez de chaveamento (transição do material supercondutor para o estado normal).
- Impedância nula quando o material está no estado supercondutor, não provocando queda de tensão e reduzida dissipação de energia.
- Operam com induções magnéticas baixas, portanto, não exercem indução eletromagnética sobre as estruturas metálicas vizinhas.
- Eliminam a necessidade de implementação de controladores de corrente e reduzem danos aos equipamentos elétricos vizinhos quando limita a corrente de falta.
- Peso e volume reduzidos.
- Aumenta estabilidade da rede.
- Reduz queda de tensão nos alimentadores subsequentes.

Evidentemente, para que o limitador de corrente supercondutor opere, o sistema deve ser refrigerado a temperaturas criogênicas, dependendo do tipo de material supercondutor envolvido.

Os primeiros FCL foram montados com fios supercondutores de baixa temperatura crítica (LTS) e eram resfriados com He líquido, líquido refrigerante de elevado custo e difícil de se trabalhar e, portanto inviável economicamente. Com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica, HTS em 1986, com possibilidade de operação em 77 K utilizando nitrogênio líquido, o desenvolvimento dos FCL foi retomado.

3.3 DESCRIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES QUE UTILIZAM MATERIAL SUPERCONDUTOR

Os FCL podem ser classificados em duas categorias principais: indutivo e resistivo. Os FCL indutivos, Figura 17, podem ter várias formas, a mais simples equivale a um transformador com um anel supercondutor como secundário. Em operação, não há resistência no secundário e a indutância do dispositivo é baixa. A corrente de falta no primário induz corrente elevada no secundário levando o anel supercondutor ao estado normal, o secundário se torna resistivo e a impedância total aumenta limitando a corrente. A vantagem desta configuração é que não há calor produzido pelo fluxo de corrente no supercondutor, no entanto, grande volume de ferro é necessário para construção do núcleo magnético do FCL tornando-os equipamentos de grande porte e de peso elevado (WHTC HYPER-LIBRARIAN, 1997).

Figura 17. Limitador de corrente indutivo (Adaptado de WHTC HYPER-LIBRARIAN, 1997).

Nos FCL resistivos, Figura 18, a corrente passa no supercondutor e o limitador é praticamente invisível para o circuito. Quando o pico de corrente se inicia o supercondutor transita para o estado normal e aumenta sua resistência rapidamente. O FCL resistivo pode estar associado a um resistor (“shunt”) ligado em paralelo ao elemento supercondutor, para

limitar o campo elétrico no conjunto (V/mm). Quando o supercondutor transita para o estado normal, a resistência aumenta e seu valor é maior que a resistência do resistor em paralelo e por isso, parte da corrente é desviada para o resistor “shunt”, permitindo a recuperação do material supercondutor ou abertura do circuito pelos dispositivos de proteção ($t > 100$ ms).

Figura 18. Limitador de corrente resistivo (Adaptado de WHTC HYPER-LIBRARIAN, 1997).

Na Figura 19, o gráfico de KALSI et al (2004), mostra a resposta de um FCL resistivo sem e com “shunt” em paralelo. A corrente sofre um pico de 5 ciclos e a resposta do HTS é mostrada em ambos os gráficos. No caso do HTS com “shunt” em paralelo, Figura 19b, parte da corrente é desviada diminuindo o fluxo de corrente circulante no HTS.

Figura 19. Performance de um limitador de corrente (pico com duração de 100 ms).

a) sem “shunt”; b) com “shunt” em paralelo (KALSI et al., 2004).

Em geral, os FCL resistivos são de tamanho, volume e peso reduzidos e possuem as características ideais para aplicação na rede de transmissão e distribuição de energia, pois não exigem bancos de capacitores para correção do fator de potência como ocorre nos FCL indutivos.

3.4 LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR UTILIZANDO LTS

Com o estudo e desenvolvimento dos supercondutores de baixa temperatura crítica, os limitadores de corrente LTS começaram a serem estudados. Dentre os materiais LTS, os fios de NbTi/CuNi foram os mais indicados para utilização em escala industrial, já que este material supercondutor possui alta densidade de corrente a 4,2 K (temperatura do He líquido utilizado como líquido refrigerante), boa conformabilidade e perdas em corrente alternada reduzidas devido a sua matriz de CuNi (JIANG et al., 2001).

Homrich et al. (2002) estudou duas configurações de FCL utilizando NbTi/CuNi, a primeira com três bobinas concêntricas, cilíndricas e helicoidais associadas em paralelo e a segunda com duas bobinas helicoidais e cilíndricas superpostas, conectadas em série e com polaridades invertidas. As bobinas foram testadas em linha trifásica de 380 V durante curto-circuito induzido entre fases num gerador de 90 kVA; a corrente de pico atingiu 1200 A. A resistência introduzida no circuito durante a transição foi de $9,43 \Omega$ a 4,2 K, limitando a corrente de falta de $1200 A_{pico}$ em $470 A_{pico}$.

A Figura 20a mostra o conjunto de bobinas concêntricas e a simulação da intensidade de campo magnético distribuído na bobina. A curva da Figura 20b representa a resposta de corrente sem o limitador de corrente quando da aplicação do curto de corrente (eixo y da direita), enquanto que a curva cujo eixo é o da esquerda mostra a mesma resposta com o limitador de corrente atuante.

Figura 20. a) Bobinas concêntricas e b) resposta de corrente com e sem limitador de corrente (HOMRICH et al., 2002).

Os resultados obtidos em corrente alternada foram muito próximos aqueles para os quais os limitadores descritos foram projetados (HOMRICH, 2001) apresentando erro de 8%.

Desta forma, o sistema de montagem serviu como modelo para a construção de outros tipos de FCL com diferentes materiais supercondutores.

Porém, os FCL utilizando LTS, apesar do excelente desempenho não foi viabilizado economicamente devido ao alto custo do He líquido, custo da engenharia criogênica e por apresentar elevadas perdas em corrente alternada evaporando o líquido refrigerante (BALDAN et al., 2004).

3.5 LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR UTILIZANDO HTS

A partir da descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica que podem ser refrigerados com nitrogênio líquido (LN_2), o custo dos FCL utilizando HTS reduziu significativamente o custo de operação do equipamento em comparação aos que utilizam LTS, fazendo com que os limitadores de corrente voltassem mais uma vez a serem estudados para aplicações em sistemas de potências.

As principais vantagens de utilização de supercondutores HTS em relação aos LTS em limitadores de corrente são:

- HTS requer custo de refrigeração menor;
- Apresenta melhor estabilidade térmica;
- Possui maior resistividade, em torno de $10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ que é 25 vezes maior que a resistividade do NbTi.

Os limitadores de corrente testados utilizando tubos de Bi-2212 apresentaram excelente desempenho, porém exigem a utilização de resistência “shunt” para evitar a formação de pontos de aquecimento localizados (“hot-spots”). Durante a transição para o estado normal o aquecimento pode causar a alteração na estequiometria do composto degradando irreversivelmente as suas propriedades supercondutoras. Os tubos de Bi-2212, usinados em passo helicoidal para formação de bobinas bifilares, foram testados com sucesso para protótipos de 15 kV (BOCK et al., 2004) e em 220 V (BALDAN et al., 2006,2008), limitando a corrente de pico de 20 kA para 7 kA e 12 kA para 5 kA, respectivamente, em tempo inferior a 16 ms (1 ciclo em 60 Hz). A utilização deste dispositivo ainda é limitada pela dificuldade de fabricação reprodutiva de tubos com características homogêneas e pelo alto custo inicial, cuja redução depende da produção em grande escala.

A Figura 21 mostra (a) o desenho esquemático do “bulk” de Bi-2212, (b) do sistema imerso em LN₂ e a resposta do supercondutor quando da aplicação do pico de corrente para medidas realizadas por (c) Bock (2004) e (d) Baldan (2008).

Figura 21. a) Desenhos esquemático do Bulk; b) Montagem do bulk em LN₂; resposta do supercondutor c) BLOCK et al., 2004; d) BALDAN et al., 2008.

A dificuldade na produção de barras homogêneas levou ao estudo de FCL utilizando fitas HTS principalmente de YBCO (90 K), Bi-2212 (80 K) e Bi-2223(110 K) (JIANG, 2001).

O filme supercondutor das fitas possui boas condições criogênicas (utilizando LN₂, 77 K) e também apresenta reduzido tempo de recuperação, sendo apropriado para utilização em limitadores de corrente.

As fitas supercondutoras a base de BSCCO e YBCO apresentam características excelentes para aplicação em limitadores de corrente. No entanto, o desenvolvimento das fitas de YBCO pelo método de deposição leva este material a ter maior potencial para utilização em FCL, devido as seguintes características (XIE et al., 2007; AMERICAN SUPERCONDUCTORS CORPORATION, 2009b):

- Processo produtivo permite obter longos comprimentos ($l > 300$ m) com propriedades uniformes.

- Propriedades eletro-mecânicas superiores: reduz chance de falha mecânica e aumenta a flexibilidade na configuração e montagem do FCL.
- Apresentam maior área de contato para troca de calor o que auxilia na recuperação rápida do supercondutor.
- Características estruturais podem ser reguladas para otimizar o desempenho do FCL.

Em Arai et al. (2006), um FCL foi montado com um reator supercondutor utilizando fitas de Bi-2223. O ensaio foi realizado simulando curto de corrente para diferentes tempos de aplicação.

Figura 22. Bobinas utilizando fitas de Bi-2223 (ARAI et al., 2006).

Os testes confirmaram que houve limitação para correntes de pico de 120 A para níveis abaixo de 50 A com tempo de aplicação de 0,09 s e para níveis próximos a 90 A para tempos de 0,17 s.

Figura 23. Resposta de corrente no FCL (I_s) e no reator em paralelo (I_n) para tempos de:

a) 0,09 e b) 0,17 s (Adaptado de ARAI et al., 2006).

Embora as fitas supercondutoras de Bi-2223 tenham alcançado correntes críticas de até 120 A, ou seja, $J_c = 140 \text{ A/mm}^2$ a 77 K, devido à sua fabricação utilizar prata como matriz estabilizadora inviabilizou a sua aplicação em FCL devido a sua baixa resistividade elétrica após transição para o estado normal, sendo necessários comprimentos de fitas de 250 m para obter resistência de 10Ω na temperatura de 300 K. Resultados experimentais comprovaram que em grandes comprimentos de fitas (para testes com altas correntes de pico) somente parte

do comprimento transitava para o estado normal devido a excelente condutividade térmica e elétrica da prata.

O desenvolvimento das fitas de YBCO utilizando tecnologia de deposição de filme supercondutor sobre substrato de alta resistividade possibilitou a aplicação deste tipo de supercondutor na construção de FCL resistivo.

Baldan et al. (2007) construiu uma bobina com quatro espiras de 0,9 m de comprimento de fita conectada em paralelo com um resistor “shunt” de 68 mΩ e o sistema foi testado com corrente de falta de 600 A e 800 A durante períodos de 16 a 80 ms (1 a 5 ciclos). O desempenho do FCL usando fita YBCO mostrou a viabilidade técnica na utilização deste tipo de supercondutor comprovando a recuperação para o estado supercondutor após a eliminação da falta, sob corrente de carga (BALDAN et al., 2007; MASUR et al., 2003).

A Figura 24 mostra a bobina com fitas supercondutoras e a resposta do sinal de tensão do limitador e do “shunt”.

Figura 24. a) Bobinas contendo fitas HTS; b) Resposta de tensão do supercondutor e do “shunt” (BALDAN et al., 2007).

No trabalho de Park et al. (2007) foi desenvolvido um SFCL consistindo de três solenóides não indutivos conectados em série usando fitas YBCO com estabilizador de cobre avaliando a estabilidade da tensão após o curto e a resistência atingida pelo sistema no início e fim da falta.

A Figura 25a mostra a montagem dos solenóides e a resposta de tensão quando da aplicação do pulso de corrente.

Figura 25. a) Bobinas contendo fitas HTS; b) Resposta de tensão do supercondutor (Adaptado de PARK et al., 2007).

O pico de corrente de 3,4 kA levou o conjunto a atingir $0,1 \Omega$ no início da falta e $0,2 \Omega$ no final da mesma ($t_{\text{falta}} = 100 \text{ ms}$). O gráfico mostrado na Figura 25b mostra que houve estabilidade no valor de tensão permanecendo constante e igual a $220 \text{ V}_{\text{rms}}$ (tensão da rede). O tempo de recuperação após a falta foi de 1,3 s sob corrente de 300 A.

Yazawa et al. (2008) estudou a utilização de fitas de YBCO com e sem estabilizador de nícrômio (liga de Ni20%pCr) para diversas aplicações. Um exemplo de aplicação foi em limitadores de corrente de falta onde duas bobinas foram enroladas utilizando as fitas com e sem estabilizador. Cada bobina contém quatro camadas de fita de diâmetros distintos posicionados concetricamente e ligadas em série.

A Figura 26 mostra a configuração desta bobina e a resposta de corrente e tensão quando da aplicação do pulso de corrente.

Figura 26. a) Bobina com fita de YBCO; b) Resposta de tensão e corrente sob curto (Adaptado de YAZAWA et al., 2008).

Dos resultados utilizando fitas sem estabilizador tem-se que para corrente de curto de 1,4 kA a limitação ocorreu suprimindo o pico para correntes menores que 500 A em um tempo de 2 ms.

Os FCL com fitas com estabilizador apresentaram redução na resistência equivalente total devido a contribuição do estabilizador e consequentemente diminuem a eficiência da limitação de corrente. No entanto, a presença do estabilizador diminui a temperatura atingida pelo conjunto devido a troca térmica favorecida pelo estabilizador de nícrômio.

Xie et al. (2007) estudou juntamente com a empresa SuperPower um limitador de corrente utilizando fitas YBCO em paralelo. Nesta configuração, Figura 27a, o sistema foi montado com 12 elementos contendo fitas de 0,4 m de comprimento.

A Figura 27b mostra a resposta do limitador quando a corrente aplicada atinge 90 kA de pico. O tempo de atuação foi de 1 ms limitando a corrente em 3,2 kA no elemento supercondutor. A corrente total no conjunto foi de 32 kA sendo que 29 kA foram desviados para os “shunts” em paralelo. A tensão no supercondutor foi constante e igual a 0,21 V/mm pico durante toda a falta (XIE et al., 2007).

Figura 27. a) Conjunto de fitas YBCO em paralelo; b) Resposta de tensão e corrente sob corrente de falta (Adaptado de WEBER et al., 2007).

Este resultado mostrou que este tipo de configuração também é propício para utilização como limitador de corrente com a vantagem que a indutância equivalente total é reduzida.

A partir dos resultados destes modelos de limitadores de corrente pode-se afirmar que a performance elétrica atingida ao longo do desenvolvimento dos FCL associada a redução do custo do líquido refrigerante indicam que a construção de novas unidades com materiais supercondutores é promissora e viável para a proteção de sistemas de potência.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentadas as características das fitas supercondutoras utilizadas no presente trabalho, assim como a metodologia utilizada em cada medida de caracterização e teste do FCL.

4.1 SUPERCONDUTORES DE Bi-2223 (BSCCO)

As fitas supercondutoras de filamentos de Bi-2223 em matriz de Ag foram produzidas comercialmente sem reforço mecânico externo pela empresa European Superconductors – EAS, e com reforço de aço inoxidável pela empresa American Superconductors – AMS. As Figuras 28 e 29 mostram as microestruturas das fitas de BSCCO, e sua estrutura esquemática está mostrada na Figura 30.

Figura 28. Microestrutura mostrando os filamentos de BSCCO em matriz de prata com revestimento (AMS).

Figura 29. Microestrutura mostrando os filamentos de BSCCO em matriz de prata sem revestimento (EAS).

Figura 30. Estrutura esquemática da fita de BSCCO.

As fitas EAS sem revestimento externo apresentam a sua superfície rugosa. A ausência do revestimento torna a fita frágil (ocorrência de rupturas quando flexionadas), sem flexibilidade e dificultando seu manuseio que pode degradar irreversivelmente o material. Já o revestimento de aço inox da amostra da AMS proporciona à fita uma resistência mecânica

superior, permitindo o seu manuseio fácil para montagens de enrolamentos e de limitadores em diversas geometrias.

Durante o período de desenvolvimento do processo industrial para produção das fitas de Bi-2223 pôde-se observar o aumento significativo de sua densidade de corrente crítica e a otimização deste processo possibilitou a fabricação de longos comprimentos com alta homogeneidade.

No estágio atual são disponíveis fitas de Bi-2223 com densidade de corrente crítica de $J_c = 135 \text{ A/mm}^2$ (77 K) (OH et al., 2002) fabricados pela empresa AMS com espessura variando de 0,21 mm a 0,33 mm. As fitas produzidas pela EAS (antiga VAC – Vacuumschmelze) possuem densidade de corrente crítica de 85 A/mm^2 (77 K) (EHTS BSSCO, 2003). Existem ainda outros fabricantes na Europa e Japão, mas estes materiais não foram utilizados neste trabalho devido ao seu custo ainda muito elevado.

No processo de caracterização elétrica das fitas supercondutoras um parâmetro importante é o expoente n ou índice n , que indica quão rápida é a resposta do supercondutor quando ocorre a transição para o estado normal. Para fitas de BSCCO estes valores variam entre 10- 20 .

As principais características das fitas de Bi-2223 produzidas pelas empresas EAS e AMS, utilizadas no desenvolvimento de limitadores de corrente deste trabalho, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das fitas HTS de BSCCO.

	American Superconductors	European Superconductors
Dimensões	4,1 mm x 0,21(0,33) mm	4,0 mm x 0,22 mm
Matriz	Ag-AgMg	AgMg
Número de filamentos	65	121
Reforço	Aço inoxidável	Sem reforço
Fração Supercondutora	38% (25%)	30%
Densidade de corrente crítica (77K)	135 A/mm^2	85 A/mm^2

4.2 SUPERCONDUTORES DE Y123 (YBCO)

As fitas supercondutoras de YBCO são produzidas através de deposição de camadas em substrato metálico. Para a realização deste trabalho foram selecionadas fitas das empresas

AMS e SuperPower (SP). As micrografias das fitas podem ser visualizadas nas Figuras 31, 32, 33 com suas respectivas estruturas esquemáticas, sendo o processo produtivo já descrito nos capítulos anteriores.

Figura 31. a) Micrografia MEV mostrando as camadas da fita AMS; b) Estrutura da fita YBCO AMS (AMERICAN SUPERCONDUCTORS CORPORATION, 2007a).

Figura 32. a) Micrografia MEV mostrando as camadas da fita SuperPower YBCO SCS12050; b) Estrutura da fita SCS12050 com estabilizador de cobre (SUPERPOWER INC, 2008, 2009).

Figura 33. a) Micrografia MEV mostrando as camadas da fita SuperPower YBCO SF12100; b) Estrutura da fita SF12100 sem estabilizador externo (SUPERPOWER INC, 2008, 2009).

As fitas produzidas pela AMS utilizam uma tecnologia baseada em um processo de deposição contínua (MOD/RABiTS) “reel-to-reel”, em substrato texturizado, seguidas de corte e laminação para as dimensões 4,3 mm x 0,15 mm de seção transversal com corrente crítica de 86 A, densidade de corrente de 136 A/mm² em LN₂ – 77 K. O índice $n = 30$ é característico destas fitas, duas vezes superior ao valor dos índices de fitas de BSCCO (AMERICAN SUPERCONDUCTORS CORPORATION, 2007a).

As fitas de YBCO produzidas pela SuperPower (SP), utilizam a deposição em um substrato de alta resistividade, onde a texturização é feita a partir das camadas “buffers” de material cerâmico (MOCVD). A seção transversal típica é de 12 mm x 0,10 mm com correntes críticas de 200 A para as séries SF12100 (sem estabilizador) e 250 A para as fitas SCS12050 (com estabilizador). A densidade de corrente de engenharia destas fitas está na faixa de 210-290 A/mm² a 77 K (com campo próprio), com índice $n > 30$ (SUPERPOWER INC, 2009a; 2009b).

Na Tabela 4 são apresentadas as principais características de fitas de YBCO AMS e SuperPower séries SCS12050 e SF12100.

Tabela 4 - Características das fitas HTS de YBCO.

	American Superconductor	Superpower	
		SCS12050	SF12100
Espessura	0,13 -0,17 mm	0,095 mm	0,105 mm
Largura	4,3 mm	12 mm	12 mm
Substrato	Ni5%atW	Hastelloy	Hastelloy
Propriedades magnéticas	Magnético	Não-magnético	Não-magnético
Produção	MOD/RABiTS*	MOCVD**	MOCVD
Estabilizador	Aço inoxidável	Cobre	Livre de estabilizador
Densidade de corrente crítica (77K)	136 A/mm ²	210 A/mm ²	290 A/mm ²

* MOD/RABiTS - (deposição organometálica/Rolling Assisted Bi-Axially Textured Substrate). **MOCVD – (deposição química de vapores organometálicos).

A diferença no valor de corrente crítica entre as fitas YBCO se deve ao tipo de deposição efetuado na sua fabricação. A deposição nas fitas AMS é feita de forma grosseira (camadas grossas) com subsequente queima do material orgânico atingindo a espessura projetada. Já as fitas SP apresentam deposições de camadas com espessuras definidas de forma controlada. Desta forma, fitas SP possuem camadas altamente orientadas, portanto

apresentam corrente crítica superior quando comparadas as fitas que sofrem queima do material orgânico.

Outro fator que auxilia no aumento do valor de corrente crítica das fitas YBCO é a presença de nanopontos no material HTS. Estes nanopontos são aprisionadores de vórtices, ou seja, as linhas de fluxo magnético não se movimentam facilmente aumentando a região entre H_{c1} e H_{c2} (estado misto) e conseqüentemente aumentando o valor de corrente crítica.

É esperado que fitas produzidas por deposição possuam melhores características para utilização em limitadores de corrente devido ao transporte de corrente mais eficiente na camada HTS. O transporte de corrente nos multifilamentos de BSCCO é prejudicado pelos contornos dos filamentos (originando perdas por acoplamento) fazendo com que a corrente seja interrompida a cada filamento do material HTS (GÖMÖRY et al., 2006).

4.3 COMUNICAÇÃO ENTRE INSTRUMENTOS E LINGUAGENS UTILIZADAS

Para comunicação entre o computador e os instrumentos de aquisição foi utilizada a interface GPIB por ser uma interface comum entre os equipamentos de aquisição disponíveis.

A interface GPIB é uma interface paralela de comunicação de oito bits, com uma taxa de transferência de até 1 MB/s, de fácil utilização. Esta interface pode ser cascadeada suportando até 15 dispositivos, sendo que o comprimento total dos cabos não pode exceder a 20 m, pois pode comprometer a eficiência na leitura e no armazenamento de dados.

A identificação dos instrumentos pela porta GPIB ocorre devido ao endereço característico de cada instrumento (este valor pode ser alterado manualmente no instrumento). Este endereço é obtido através do próprio equipamento ou através do software Measurement & Automation Explorer (MAX) que permite a identificação e comunicação dos instrumentos antes do início do experimento.

A linguagem adotada para a elaboração dos programas de aquisição para instrumentos Keithley foi a linguagem do MatLab (versão 6p5). O programa MatLab (“Matrix Laboratory”) foi elaborado como uma ferramenta prática e conveniente para a manipulação de matrizes. Apresenta uma linguagem de alto nível, cuja estrutura de dados principais são matrizes que não precisam ser previamente dimensionadas. Além disso, é orientada por objetos o que torna sua programação mais simples e eficiente (MATSUMOTO, 2004; HANSELMAN, 2003).

Instrumentos Agilent possuem três tipos de comunicação: GPIB, Serial e LAN. A comunicação GPIB e Serial para estes equipamentos requerem a linguagem SCPI (“Standard Commands for Programmable Instruments”) cujos comandos são textos ASCII. A comunicação LAN é mais simples entre as três já que o próprio instrumento fornece uma interface web de comunicação com o usuário. Esta interface permite o controle do instrumento pela rede através do endereço IP da máquina e do instrumento.

Uma das vantagens em se utilizar a porta LAN está no tempo de transferência binária sendo que para 64K o tempo da LAN é de 192 ms contra 337 ms da porta GPIB (AGILENT TECHNOLOGIES INC, 2007).

As interfaces utilizadas serão mostradas na forma de figuras juntamente com a metodologia de cada ensaio.

4.4 CRITÉRIO UTILIZADO NA CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE CRÍTICA DE SUPERCONDUTORES

Os ensaios para obtenção da curva V-I são realizados pelo método das quatro pontas, onde são medidos os valores de corrente e tensão na amostra. Os demais valores são obtidos através de equações ou cálculos que relacionam estas duas variáveis.

Para definição da corrente crítica foi utilizado o critério de $E_c = 0,1 \mu\text{V/mm}$, onde E_c corresponde ao campo elétrico longitudinal na amostra (CLARK, 1977).

O índice n que aparece na equação 1 esta relacionado com a inclinação da transição do estado supercondutor para o estado normal. Um supercondutor ideal apresenta $n \rightarrow \infty$ enquanto que um condutor ôhmico apresenta $n = 1$. O cálculo do índice n é obtido pela equação 1 (WALTER, 1974; BRUZZONE, 2004):

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (1)$$

onde E é o campo elétrico medido e E_c é valor de campo elétrico utilizado como critério para determinar a corrente crítica I_c . Para a obtenção do índice n utiliza-se a equação 2:

$$\log E = \log E_c + n \cdot \log \left(\frac{I}{I_c} \right) \quad (2)$$

4.5 CARACTERIZAÇÕES DE FITAS SUPERCONDUTORAS

4.5.1 Caracterização Elétrica

4.5.1.1 Obtenção da curva tensão vs. corrente (V-I)

4.5.1.1.1 Montagem do suporte

Para obtenção das curvas V-I foi utilizado um suporte que consiste em uma placa de fibra de vidro G10 de dimensões iguais a $(5 \times 50 \times 200) \text{ mm}^3$, contendo 2 barras de cobre de dimensões $(5 \times 20 \times 100) \text{ mm}^3$ em suas laterais. Foi montado um “shunt” em paralelo com a amostra apenas para os ensaios com amostras de YBCO, já que a proteção fornecida pelo “shunt” atua desviando parte da corrente circulante do material supercondutor após a transição, evitando superaquecimento da fita e consequentemente degradação do material.

A montagem completa da amostra com o “shunt” em paralelo, os terminais de tensão e os cabos de corrente é mostrada na Figura 34. As amostras denominadas “curtas” de BSCCO e YBCO possuem entre 170 e 200 mm de comprimento, sendo seus terminais de tensão soldados a uma distância de 140 mm.

Figura 34. Foto do suporte de fibra de vidro contendo amostra curta soldada entre barras de cobre com “shunt” em paralelo.

As fitas supercondutoras são sensíveis ao calor e por isso, foram utilizados ferros de solda com temperatura controlada para soldagem, modelo Weller WSD 50-55 W ou WD2 160W que permitem que todo o processo seja realizado sem degradação de suas propriedades.

O tempo de contato do ferro de solda com o local a ser soldado deve ser reduzido para evitar degradação na amostra, que também pode ocorrer por fricção mecânica nas fitas sem estabilizador. A temperatura máxima que o supercondutor com reforço externo de aço inoxidável pode ser exposto não pode exceder a temperatura de fusão da solda (liga de Pb-Sn a 179 ° C) utilizada para a soldagem deste reforço. Por isso, é recomendável a utilização de solda de baixo ponto de fusão de In48%pSn (118° C) e aplicação de fluxo HF260 (contendo álcool isopropílico, ácido hidroxiacético e monoetanolamina) para soldar os terminais de corrente e terminais de tensão (AMERICAN SUPERCONDUCTORS CORPORATION, 2007b).

O processo de soldagem pode ser descrito pelas etapas de:

- Preparação e corte da amostra nas dimensões apropriadas para o ensaio;
- Pré-aquecimento das barras de cobre com soprador térmico modelo HL 1800-E Steinel aproximadamente à 100 °C para então elevar a temperatura localmente até a fusão da liga (118° C) com o ferro de solda.
- Aplicação do fluxo para limpeza, fusão da solda e aumento de sua fluidez na superfície das barras de cobre e da fita supercondutora.
- Aquecimento para fusão da solda e contato entre fita supercondutora e barra de cobre. Após a soldagem o conjunto foi resfriado utilizando esponja úmida com água.
- Limpeza do local soldado para retirada de resíduos de fluxo.

No caso de amostra de Bi-2223 EAS é necessário que as superfícies a serem soldadas sejam lixadas, retirando o óxido formado no tratamento térmico final da fita, para melhorar o contato elétrico e permitir a aderência da solda.

4.5.1.1.2 Procedimento experimental

Para a leitura de tensão na amostra seus terminais foram conectados ao multímetro Keithley 182 Sensitive Digital Voltmeter (7½ dígitos) e a leitura do sinal do “shunt” de corrente foi feita através do multímetro 199 System DMM/Scanner Keithley (5½ dígitos) ou DMM 2000 (6½ dígitos).

A fonte de corrente utilizada PowerTen (10 V/ 1000 A), foi programada para fornecer no máximo um excesso de corrente de 10% além de I_c , sendo este valor controlado pela fonte de controle através de sinais de tensão definidas pelo usuário.

Para este ensaio foram desenvolvidos programas de aquisição no MatLab chamados “Progaq Final Version” e “Picos I Histerese”. O “Progaq Final Version” foi utilizado para determinação das curvas V-I em amostras de BSCCO, e o “Picos I Histerese” em amostras de YBCO que necessitam de corrente pulsada. O fluxograma dos programas em MatLab pode ser observado no Anexo A.

Figura 35. Programa de aquisição de dados “Progaq Final Version” – rampa de corrente.

A Figura 35 mostra a interface gráfica do programa “Progaq Final Version”. Este programa controla a rampa de corrente até um intervalo máximo atribuído. O incremento estipulado é de 2 A para corrente contínua. O programa limita o valor de corrente máxima ou comanda a interrupção do ensaio pela tensão limite de 1×10^{-4} V (valores definidos pelo usuário).

As amostras de YBCO não suportam correntes elevadas durante um longo período de tempo e por isso se faz necessário que o incremento de corrente seja pulsado. Os pulsos

ocorrem de 2 em 2 A com um intervalo entre picos de 5 s. A interface que mostra os dados obtidos e parâmetros de ensaios ajustados pode ser observada na Figura 36.

Figura 36. Programa de aquisição de dados “Picos I Histerese” – pulsos de corrente.

Basicamente ambos os programas podem ser descritos pelas etapas:

- Seleção de instrumentos de medição, fontes de potência e “shunt”;
- Determinação dos valores de corrente e tensão máximas;
- Definição do tempo de intervalo entre picos e/ou taxa de incremento de corrente;
- Definição do nome do arquivo;
- Execução do ensaio;
- Aquisição de dados. Os dados são gerados na forma ASCII e podem ser facilmente exportados para um programa de planilha.

A partir dos dados obtidos da curva V-I pode-se ajustar uma curva através da equação 1, para determinar o índice n (expoente n) utilizado no projeto do limitador de corrente.

Na Figura 37 é apresentado um diagrama esquemático da montagem utilizada na caracterização de fitas supercondutoras, que apresentam um excelente desempenho e permite controlar de forma segura todos os equipamentos.

O circuito consiste em uma fonte de corrente contínua, Power Ten 10 V/ 1000 A controlada por tensão proveniente de uma fonte de controle modelo Keithley 230A. O sinal de corrente obtido por um “shunt” (1000 A/ 100 mV) foi adquirido no multímetro Keithley modelo 199 System DMM/ Scanner (5 ½ dígitos), e o sinal de tensão foi adquirido pelo multímetro Keithley modelo 182 Sensitive Digital Voltmeter (7 ½ dígitos).

Figura 37. Diagrama esquemático do sistema para aquisição das curvas V-I.

4.5.1.2 Obtenção da curva de resistência vs. temperatura (R-T)

Para determinar a resistência elétrica da fita supercondutora após sua transição para o estado normal foi utilizada a curva V-I para temperaturas variando de 77 K a 300 K. Este resultado permitiu determinar o valor de resistência do limitador de corrente durante a sua atuação no circuito elétrico em função da temperatura limite, geralmente fixada em 300 K.

As amostras utilizadas para este ensaio possuem comprimento de aproximadamente 5 mm. Os terminais de tensão e corrente foram soldados com tinta prata com espaçamento de 2,5 mm entre eles, sendo a amostra imersa em LN₂ em um recipiente termicamente isolado.

A medida de resistência foi calculada pelo método de 4 pontas a partir dos valores de tensão e de corrente na amostra em função da variação de temperatura. O sinal de tensão foi

obtido por um multímetro Keithley modelo 181 Nanovoltmeter Keithley (7 ½ dígitos), a corrente constante de 100 mA foi fornecida pela fonte Keithley modelo 2410/ 1100 V Source Meter e a temperatura obtida por um termopar através do multímetro Keithley modelo 196 System DMM (6 ½ dígitos) e excitado pela fonte de corrente LESBT - 6 (12 V/1 A).

As amostras foram imersas em nitrogênio líquido, até atingir a estabilidade em 77 K, em um recipiente isolante coberto com uma folha de alumínio. O aumento da temperatura ocorreu por evaporação natural do líquido em função do tempo e seu valor foi adquirido através de um termopar, sendo o tempo de aquisição de dados entre 3 a 4 horas.

O circuito esquemático deste ensaio está representado na Figura 38, sendo que o controle da instrumentação foi realizado por um programa desenvolvido em LabView pelo grupo de Supercondutividade EEL/DEMAR.

Figura 38. Diagrama esquemático do sistema para aquisição das curvas R-T.

4.5.1.3 Medidas de E vs. I/I_c em função do campo magnético DC e AC

Como parte da caracterização elétrica em amostras curtas de HTS foram realizadas medidas elétricas de campo elétrico vs. corrente normalizada em função da variação de campo magnético DC e AC. Estes resultados permitiram avaliar o comportamento das fitas

supercondutoras através do cálculo do índice n , indicando se o material manterá suas características supercondutoras quando em operação na presença de campo magnético externo ou por indução (devido a circulação de corrente elétrica) (SHIGUE et al., 2009).

Na construção de um SFCL é importante levar em consideração a forma geométrica utilizada para montagem do limitador. Um limitador na forma de bobinas pode gerar um campo próprio tão intenso de forma a reduzir as propriedades supercondutoras do limitador e consequentemente a sua corrente de operação. No caso da configuração de placas paralelas a contribuição de campo magnético próprio é bastante reduzida, mas ainda existe a indução de campo próprio. Sob a presença de campos AC um supercondutor operando a 77 K deve possuir uma perda AC total menor que 0,5 mW/A.m de forma a competir com o cobre em aplicações de potência. Por isso, uma análise com variação de campo magnético DC e AC se faz necessária de forma a avaliar o comportamento do material supercondutor quando em operação.

As medidas com aplicação de campo magnético externo perpendicular a superfície da amostra foram realizadas em fitas supercondutoras de BSCCO e YBCO imersas em banho de nitrogênio líquido (77 K). Para a geração de campo foi utilizado um núcleo magnético C, com corrente máxima de 20 A, campo máximo de 1 T, alimentado por corrente contínua nas medidas de campo magnético DC e corrente alternada nas medidas de campo magnético AC.

A aplicação de campo DC foi realizada através da fonte de corrente DC EMI 300 A, o sinal de tensão da fonte foi obtida em um multímetro Keithley modelo 195 A (5½ dígitos) utilizando um “shunt” (300 A/ 200 mV). O campo AC foi gerado utilizando um variador de tensão 0-220 VAC – 2kVA sendo a leitura de corrente obtida do amperímetro alicate Keithley (200 A/20 V).

O sinal de tensão na amostra HTS foi obtido através do multímetro Keithley 182 Sensitive Digital Voltmeter (7½ dígitos) e a medição de corrente através do “shunt” de corrente (1000 A/100 mV) e um multímetro 199 System DMM/Scanner Keithley (5½ dígitos). O diagrama esquemático utilizado para obtenção das curvas E-I/I_c pode ser observado na Figura 39.

Figura 39. Diagrama esquemático do sistema para aquisição das curvas E-I/Ic.

Para aquisição dos dados foi utilizado o programa em MatLab “Progaq Final Version”, mostrado na Figura 35. As medidas foram realizadas sem campo magnético externo aplicado (sem a presença do núcleo C), com campo magnético igual a 0 T (corrente circulante no núcleo igual a zero) e para valores constantes de campo magnético.

Os valores de corrente de excitação do núcleo C foram convertidos para valores de campo magnético na região central através dos valores de calibração do magneto C (LAMAS, 2006). O valor de campo magnético máximo aplicado foi selecionado em função da amostra a ser testada. O incremento de campo magnético foi ajustado através do sinal de tensão das fontes DC e AC que excitam o núcleo C, com sensibilidade de 0,5 mV.

4.5.2 Caracterização magnética

4.5.2.1 Medidas de susceptibilidade vs. temperatura (χ -T)

Para determinar o comportamento das fitas supercondutoras (HTS) em função da temperatura foram realizadas medidas de susceptibilidade AC de forma a observar como o material responde as mudanças de campo magnético e da frequência. Nestas medidas, o

substrato em fitas YBCO e a matriz em fitas BSCCO são relevantes no comportamento da curva de susceptibilidade vs. temperatura.

4.5.2.1.1 Funcionamento do equipamento

Durante a medida de susceptibilidade AC utilizando um PPMS (Sistema de medidas de propriedades físicas), um campo magnético alternado (h_{AC}) foi aplicado na amostra. Este campo alternado foi sintetizado pela placa DSP AC e enviado a um conversor digital-analógico. O sinal analógico foi amplificado de modo a excitar as bobinas de direção e compensação do campo magnético.

As primeiras duas medições foram feitas com a amostra posicionada no centro de cada bobina de detecção. Estes sinais foram amplificados, filtrados (em um filtro passa baixa) e digitalizados através de um conversor analógico-digital (A/D). Estes dados foram comparados a um sinal diretor a fim de determinar as componentes reais e imaginárias da susceptibilidade.

A amostra foi então colocada no centro das bobinas de detecção (entre as duas bobinas de detecção). Outras duas medições foram feitas com a bobina de calibração com polaridade diferente. As componentes reais e imaginárias foram obtidas e comparadas com o sinal do detector, seus sinais foram subtraídos e obteve-se um vetor calibração no plano complexo (QUANTUM DESIGN, 2000).

A vantagem de utilizar esta técnica está em obter sinais proporcionais a susceptibilidade magnética diferencial e a dissipação de energia no material devido a excitação do campo magnético (FARIA et al., 2000).

4.5.2.1.2 Procedimento experimental

Inicialmente foi colocado o PPMS, Quantum Design (modelo 6000), em estado de espera da amostra. Em seguida, foi retirado o suporte de amostra e colocado a amostra em posição paralela à superfície do suporte, equivalente a estar perpendicular a direção do campo magnético aplicado. O corte da amostra foi feito com tesoura de corte fino. A área máxima da amostra foi de 25 mm^2 .

As medições realizadas nas amostras foram:

- Susceptibilidade vs. temperatura – h_{AC} constante; verificando a transição de temperatura do material supercondutor.
- Susceptibilidade vs. temperatura – h_{AC} variável; onde o comportamento magnético é melhor descrito em função não só da temperatura mas também em função do campo AC.
- Susceptibilidade vs. temperatura – frequência variável; confirmando os resultados obtidos sobre o comportamento dos HTS com variação de campo alternado.
- Susceptibilidade vs. temperatura – frequência constante de 30, 50, 60 e 120 Hz; verificando o comportamento da susceptibilidade para frequências de utilização conhecidas em amostras de YBCO AMS.

As condições de ensaio foram:

YBCO AMS

Medida	H_{AC} [μT]	H_{DC} [T]	f [Hz]	Passo [K]	T [K]
1. χ_{vsT}	1,26	0	3837	5	70-300
2. χ_{vsT} H_{AC} variável	0,013 – 12,56 (log – 5 pontos)	0	3837	5	70-100
3. χ_{vsT} f variável	0,63	0	10 – 10000 (log – 5 pontos)	5	70-100

YBCO SP SCS12100

Medida	H_{AC} [μT]	H_{DC} [T]	f [Hz]	Passo [K]	T [K]
1. χ_{vsT}	1,26	0	3837	5	60-300
2. χ_{vsT} H_{AC} variável	0,013 – 12,56 (log – 5 pontos)	0	3837	5	70-120
3. χ_{vsT} f variável	0,63	0	10 – 10000 (log – 5 pontos)	5	70-100

YBCO SP SCS12050

Medida	H_{AC} [μT]	H_{DC} [T]	f [Hz]	Passo [K]	T [K]
1. χ_{vsT}	1,26	0	3837	5	60-300
2. χ_{vsT} H_{AC} variável	0,013 – 12,56 (log – 5 pontos)	0	3837	5	70-100
3. χ_{vsT} f variável	0,63	0	10 – 10000 (log – 5 pontos)	5	70-100

BSCCO AMS

Medida	H _{AC} [μT]	H _{DC} [T]	f [Hz]	Passo [K]	T [K]
1. χ_{vsT}	1,26	0	3837	5	60-300
2. χ_{vsT} H _{AC} variável	0,013 – 12,56 (log – 5 pontos)	0	3837	5	70-100

E para a medida de susceptibilidade vs. temperatura com frequências definidas foi utilizada a amostra YBCO AMS sob as seguintes condições:

Medida	H _{AC} [μT]	H _{DC} [T]	f [Hz]	Passo [K]	T [K]
1. χ_{vsT}	12,56	0	30, 50, 60, 120	5	10-100

4.5.2.1.3 Tratamento de dados

Os dados foram salvos no formato ASCII. Para tratamento dos mesmos foi utilizado o Origin 6.1.

Dos dados obtidos nas medidas temos os valores de: ΔM , $\Delta M'$ e $\Delta M''$. Para o cálculo de susceptibilidade foi necessário que estas variáveis sejam divididas pelo valor de campo alternado aplicado (h_{AC}), equação 3.

$$\chi' = \frac{\Delta M'}{h_{AC}} \quad \chi'' = \frac{\Delta M''}{h_{AC}} \quad (3)$$

Em seguida uma normalização foi feita dividindo os valores de χ' e χ'' pelo valor de saturação de χ' .

Tanto χ' quanto χ'' são sensíveis a mudança termodinâmica de fase e são utilizadas para medir a temperatura de transição. Em supercondutores no estado normal a susceptibilidade é pequena (próxima a zero) e no estado supercondutor o material é diamagnético (QUANTUM DESIGN, 2000).

Os dados para estas medidas foram adquiridos da seguinte forma: para uma temperatura constante obtêm-se os valores de magnetização para os campos magnéticos AC definidos (5 campos magnéticos aplicados equivale a uma amplitude de 5) em seguida para um outro valor de temperatura foram obtidos os valores de magnetização para os mesmos campos magnéticos definidos e assim sucessivamente. Desta forma, as amplitudes definem o número de campo alternado ou de frequências atribuídas e estes valores foram utilizados para separação dos dados e cálculos que foram efetuados no Origin através de funções de

programação desenvolvidos pelo Instituto de Nanofísica e Química – INPAC na KULeuven, Bélgica.

4.5.3 Medida do tempo de recuperação da propriedade supercondutora das fitas de BSCCO e YBCO

O objetivo deste ensaio foi de determinar a resposta do material supercondutor, o tempo de recuperação e a energia dissipada na transição supercondutor/normal, após a aplicação de pulsos de corrente. Estes resultados são importantes para avaliar principalmente o desempenho das fitas HTS para o projeto de limitadores de corrente para aplicações em dispositivos de potência.

Os pulsos de corrente simulam a corrente antes e logo após um curto-circuito ou uma corrente de falta que atinge o sistema (ZHOU et al., 2005). As medidas de pulso de corrente foram realizadas em amostras curtas de fitas de BSCCO e YBCO. Os valores de corrente crítica e o expoente n foram determinados através da caracterização elétrica.

Neste ensaio a amostra foi submetida a um pulso de corrente desenhada e fornecida pelo programa Agilent Waveform Editor. Este programa permite a construção de formas de onda arbitrárias para posterior aplicação pelo gerador de função Agilent para excitação da fonte de corrente. O diagrama esquemático da forma de onda utilizada nos ensaios está mostrado na Figura 40 e a Tabela 5 mostra os valores de t_{pico} , I_{pico} , I_{degrau} e tempo total do pulso a ser aplicado na amostra.

Figura 40. Diagrama esquemático da forma de onda utilizada nos ensaios.

Tabela 5 - Valores de tempo e corrente de pico utilizados no pulso de corrente do ensaio DC.

t_{pico} [ms]	T_{total} [ms]	f [Hz]	I_{pico}	I_{degrau} [A]
50; 75; 90; 100	500; 750; 900; 1000	2; 1,33; 1,11; 1	$0,9I_c - 1,5I_c$	25

A altura do pico pode ser ajustada em função do valor de corrente aplicada, e o valor do degrau de corrente foi constante e $I = 25$ A. A corrente do degrau foi mantida de forma a obter o sinal de tensão após transição e consequentemente avaliar se ocorreu ou não a recuperação do estado supercondutor em função do tempo (YANG et al., 2008). Os picos foram definidos para os valores de corrente de $0,9I_c$ a $1,5I_c$. A largura do pulso variou em função do tempo da aplicação do pulso, sendo estes iguais a 50, 75, 90 e 100 ms.

Para este ensaio, um ciclo foi definido como o período total da forma de onda sendo igual a frequência de 1 Hz para 100 ms de pico, 1,10 Hz para 90 ms de pico, 1,33 Hz para 75 ms de pico, e 2 Hz para 50 ms de pico.

Após a forma de onda estar armazenada na memória do gerador de função, Agilent modelo 33220A, foram conectados os multímetros, Agilent modelo 34410A (6½ dígitos), ao computador através da porta LAN e o gerador de função ao computador através da porta USB. A comunicação LAN foi escolhida, pois facilitou a aquisição de dados através do armazenamento dos dados na memória não volátil do multímetro. Os multímetros da Agilent podem armazenar até 10000 valores em sua memória não volátil com intervalo de tempo de 100 μ s, portanto, foram adequados para armazenamento de dados para ensaios de pequena duração.

Os dados foram transferidos via intranet através do IP do multímetro e mostrados na tela do computador através de um programa em JAVA do próprio instrumento.

A aplicação do pulso de corrente foi feita simultaneamente com o “trigger” dos multímetros, de modo a armazenar a resposta de tensão da amostra e do “shunt” no mesmo tempo que o pico de corrente foi aplicado.

A Figura 41 mostra o circuito esquemático do sistema adotado para este ensaio, que consiste em um circuito com uma fonte DC, modelo PowerTen 10 V/1000 A, controlada pelo gerador de função. A leitura de corrente foi feita pelo multímetro através de um “shunt” de corrente de 1000 A/100 mV, e os sinais de tensão na amostra HTS foram obtidos através do multímetro Agilent modelo 34410A. Para as fitas de YBCO a amostra foi conectada em paralelo com um “shunt” de 50 A/200 mV para sua proteção durante o pulso de corrente.

Figura 41. Circuito esquemático do ensaio de pico de corrente.

Através do cálculo de energia pôde-se verificar a dissipação de potência (P) associada ao valor da corrente aplicada e a capacidade de cada tipo de fita HTS suportar corrente de falta durante certo tempo (t). Para isso, foi necessário calcular os valores de potência multiplicando os valores de corrente e tensão ponto a ponto na região do pico de corrente. A energia foi obtida através do cálculo da área embaixo da curva P - t , e a energia dissipada por volume foi calculada em função do volume da amostra.

Todos os cálculos utilizaram o MatLab como ferramenta matemática. A Tabela 6 mostra as dimensões e respectivos volumes das amostras.

Tabela 6 - Dimensões e volumes das amostras HTS.

Fita HTS	Largura [mm]	Espessura [mm]	Comprimento [mm]	Volume [mm ³]
BSCCO EAS	4,02	0,21	172	145,2
BSCCO AMS	4,30	0,27	172	199,7
YBCO 2G AMS	4,35	0,15	174	113,5
YBCO SP SCS12050	12,11	0,14	165	279,7
YBCO SP SF12100	12,06	0,13	170,2	266,8

4.6 CARACTERIZAÇÃO DO LIMITADOR DE CORRENTE CONTENDO 4 FITAS SUPERCONDUTORAS EM PARALELO

Utilizando o critério de limitar a corrente de cada fita em 80% da I_c e considerando também que a corrente garantida pelo fabricante é igual a 72 A foi necessário associar quatro fitas HTS em paralelo para atingir a especificação de corrente nominal do limitador de corrente de 230 A.

Os ensaios com fitas paralelas foram realizados utilizando fitas YBCO AMS com reforço de aço inox. Estas fitas com comprimento de 0,4 m estão eletricamente conectadas em paralelo em um suporte de fibra de vidro G10, que compõe um elemento dos 16 a serem utilizados no limitador. As fitas HTS estão em paralelo com um resistor de proteção “shunt” que tem a função de atuar como estabilizador após a transição do material supercondutor desviando parte da corrente circulante e permitindo a recuperação do estado supercondutor na fita, mesmo mantendo a circulação da corrente normal após a extinção da falta (BALDAN et al., 2007).

A fita YBCO AMS foi escolhida para este elemento de SFCL devido as características adequadas para a construção do SFCL obtidas nas medições em amostra curta e devido a disponibilidade deste material para a execução deste trabalho.

A configuração de fitas em paralelo facilita a troca do material supercondutor em caso de dano, ruptura ou degradação já que a troca pode ser feita apenas na fita ou elemento danificado. Isto não acontece em bobinas SFCL, por exemplo, onde a troca do material é feita em toda a extensão da fita supercondutora. Outra vantagem desta configuração está na excelente troca térmica com o líquido refrigerante, já que a superfície de contato (superior e inferior) é mantida imersa no LN_2 o que não ocorre nas bobinas SFCL onde a superfície disponível para troca térmica é reduzida consideravelmente. Outro fator importante é a redução da indutância equivalente do limitador que evita a inserção de capacitores para a correção do fator de potência e também a redução de campo magnético próprio, devido a configuração de placas, que pode ser suficiente para reduzir as propriedades supercondutoras do sistema (BALDAN et al., 2009).

4.6.1 Simulação do campo magnético em fitas paralelas – 2D

Utilizando o programa FEMM (Finite Element Method Magnetics) versão 2.4 e a ferramenta de cálculo magnético, foi possível determinar a intensidade de campo magnético atingido na superfície transversal das fitas YBCO e a distribuição magnética ao redor das fitas do SFCL.

A corrente aplicada gera um campo magnético induzido que, como citado em itens anteriores, diminui as propriedades supercondutoras do material. Desta forma, é importante simular o comportamento do SFCL em função da corrente aplicada de forma a determinar qual é o campo magnético atuante no SFCL. A partir destes resultados juntamente com aqueles obtidos de $E-I/I_c$ em função do campo magnético externo aplicado pôde-se verificar as perdas do protótipo do SFCL em condições normais de operação e quando atingido por uma falta de corrente.

A simulação foi realizada considerando as dimensões reais da seção transversal da fita HTS YBCO AMS ($4,3 \times 0,13$) mm² e considerou-se comprimento infinito para simulação em 2 dimensões (2D). A simulação do conjunto de fitas reproduz o sistema montado para o SFCL, ou seja, 16 elementos contendo 4 fitas em paralelo. A corrente circulante por elemento apresenta direções opostas como mostrado na Figura 42. A corrente especificada no programa possui um valor constante e igual a 228, 1000 e 2000 A, por elemento, ou seja, 57, 250 e 500 A por fita HTS, simulando a corrente nominal e de falta.

Figura 42. Figura esquemática da corrente circulante nas fitas do SFCL.

Entre cada elemento de fitas há um espaçamento D de 10 mm correspondente a distância entre o elemento superior e inferior e um espaçamento de $L = 35$ mm correspondente ao espaço entre dois elementos adjacentes. Como cada elemento de fitas transporta corrente com direções opostas, é esperado que o campo magnético máximo gerado pela corrente esteja localizado nas fronteiras das fitas e que ocorra um decaimento rápido do campo magnético entre os elementos contendo as fitas em $L/2$ (CLEM, 2008).

4.6.2 Caracterização de um e dois elementos do SFCL

Para o teste em um elemento do SFCL foram posicionadas 4 fitas de 0,42 m em paralelo conectadas eletricamente por barras de cobre e associada em paralelo com um “shunt” de proteção, como mostrado na Figura 43. A conexão intermediária com barras de cobre tem como objetivo limitar a temperatura máxima da fita durante a transição para o estado normal, bem como reduzir o tempo de recuperação para o estado supercondutor após a extinção da falta.

Figura 43. Foto de um elemento do SFCL contendo 4 fitas de 0,4 m com “shunt” em paralelo.

A montagem das fitas no suporte segue o mesmo procedimento adotado em amostras curtas para ensaios de caracterização elétrica. O terminal de tensão foi colocado a 370 mm de distância em uma das fitas em paralelo, sendo a curva V-I obtida pela medida de picos de corrente contínua através da interface gráfica do MatLab “Picos I histerese”.

Nos ensaios em corrente alternada utilizando o gerador de 96 kVA para ensaios AC, os elementos contendo as 4 fitas em paralelo foram conectados a “shunts” com três valores

distintos, $R_{sh} = 175 \text{ m}\Omega$; $R_{sh} = 245 \text{ m}\Omega$ e $R_{sh} = 430 \text{ m}\Omega$ de forma a avaliar o tempo de recuperação do estado supercondutor para diversos valores de corrente de falta.

Foram realizados testes de picos com corrente DC e AC para a configuração de dois elementos associados em série de forma a verificar o comportamento desta nova configuração para a montagem do SFCL. O elemento duplo consiste em quatro fitas em paralelo com um “shunt” de proteção, conectadas em série com outro conjunto de quatro fitas. O “shunt” possui uma resistência de $180 \text{ m}\Omega$. Esta configuração reduz significativamente a utilização da fibra de vidro G10, diminuindo consequentemente o volume total do SFCL.

A leitura do sinal de tensão foi realizada simultaneamente nos dois conjuntos de fitas HTS sendo cada uma delas componentes de cada elemento deste conjunto.

A montagem das fitas no suporte está mostrada na Figura 44.

Figura 44. Foto de dois elementos do SFCL contendo 4 fitas de 0,4 m com “shunt” em paralelo cada.

4.6.3 Teste do protótipo do SFCL contendo 16 elementos

A partir dos testes com a configuração de elemento duplo foi montado o protótipo contendo 8 placas de 16 elementos. Todos eles contêm quatro fitas em paralelo com um “shunt” de $180 \text{ m}\Omega$ de proteção e conectados em série com o outro conjunto de quatro fitas em paralelo. Como especificação no dimensionamento deste SFCL a corrente nominal de 230 A (corrente máxima de operação que corresponde a 80% do valor da corrente crítica atingida pelo material), a resistência máxima a ser inserida no circuito de $R = 600 \text{ m}\Omega$

permitiu limitar a temperatura máxima na fita em 300 K, considerando a resistência apenas das fitas YBCO AMS.

A Figura 45 mostra o protótipo antes do ensaio de pulsos de corrente. As placas foram amarradas com fitas de algodão de forma a manter os fios de cobre isolados sob a placa de fibra de vidro afastando do contato elétrico com a placa inferior. O fio de cobre tem a função de conectar a barra de cobre comum a dois elementos com os “shunts” de proteção. A resistência total do sistema foi de 490 m Ω a 300 K.

Figura 45. Foto do protótipo do SFCL contendo 16 elementos.

Para testar o SFCL foram realizadas medidas de pulsos de corrente AC utilizando um motor gerador de 96 kVA/380 V conectado a carga resistiva associada ao limitador que através de uma chave estática permite curto-circuito com duração de 1 a 5 ciclos, simulando a falta na rede elétrica.

4.6.4 Procedimento experimental da medida de pulsos DC e AC

Os ensaios de picos de corrente contínua DC, em banho de nitrogênio líquido 77 K, foram realizados para avaliar as condições de recuperação das fitas HTS e do crescimento da

resistência nesta configuração. As correntes pulsadas equivalem a 1 a 2,5 vezes o valor de I_c com duração de 100 ms seguida de degrau de corrente de $20\%I_c$. O pulso de corrente foi fornecido por uma fonte de potência DC (10 V/ 1000 A), frequência de 60 Hz. Os sinais de tensão foram obtidos através do multímetro Agilent 34410 A e os pulsos foram criados através de um gerador de função modelo Agilent 33220 A utilizando a ferramenta de forma de onda arbitrária, com aquisição de dados através do programa em MatLab “Picos I Histerese”.

Os ensaios em corrente alternada AC foram realizados simulando o pulso de corrente durante 1 a 5 ciclos da rede (60 Hz) atingindo correntes de 2 kA, correspondendo a oito vezes o valor de I_c . Após a extinção da falta, uma corrente de 150 A é mantida no circuito de forma a determinar o tempo de recuperação em operação.

Os resistores “shunt” utilizados foram de 430, 245 e 175 m Ω para o teste com 1 elemento do SFCL e de 180 m Ω para 2 elementos e para o conjunto de 16 elementos. O “shunt” serviu de “by-pass” desviando parte da corrente durante a recuperação do material supercondutor.

A Figura 46 mostra o circuito esquemático do ensaio de pico em corrente AC.

Figura 46. Circuito esquemático do ensaio de pico em corrente AC.

Basicamente o ensaio foi realizado em duas etapas: determinação da corrente aplicada e aquisição do sinal de tensão proveniente da transição da fita supercondutora durante os testes.

A corrente foi obtida através da leitura de tensão de um “shunt” de corrente de 1000 A/100 mV, 3000 A/ 50 mV ou através de uma bobina Rogowski (calibração de 200 A/

20 mV) (ensaio do SFCL- 16 elementos) e seu sinal adquirido em um osciloscópio digital Tectronix, modelo TDS 5054 – 4 canais. O osciloscópio armazena os dados e a forma de onda do ensaio. A leitura do osciloscópio foi iniciada através de um “trigger” automático acionado por um sinal de disparo que serve como referência. Esse sinal de disparo foi fornecido pelo controle da chave estática, SCR 2,4 kA – 380 V, responsável pelo curto-circuito de parte da carga para gerar picos de corrente com duração de 1 a 5 ciclos, que determinam a duração da falta.

Quando o motor gerador de 96 kVA/380 V foi acionado, uma corrente nominal (limitada pela carga) fluiu para o circuito atravessando o limitador. Como a corrente circulante foi menor que a corrente crítica da fita HTS o estado supercondutor foi mantido. O controlador da chave estática permitiu ajustar através de pulsos a duração da falta de 1 a 5 ciclos e quando acionado gerou um curto-circuito no resistor de carga ($3,5 \Omega$) produzindo um pico de corrente de até 2,1 kA, simulando a falta na rede. Durante a falta, o supercondutor transitou para o estado normal limitando a corrente máxima no circuito. Após o número de ciclos estipulado, a circulação de corrente nominal foi mantida por alguns segundos, atravessando o elemento supercondutor, a fim de avaliar a recuperação do conjunto sob condições de carga e então o gerador foi desligado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA

5.1.1 Medidas de tensão vs. corrente (V-I)

Dois parâmetros importantes para fitas HTS foram obtidos na caracterização elétrica através da curva V-I: corrente crítica e índice n relacionados pela equação (1) descrita no item 4.4.

A corrente crítica define a máxima corrente do estado supercondutor, a partir deste valor o material transita para o estado normal e consequentemente deixa de ter resistência nula. Em um limitador de corrente supercondutor o valor de I_c é importante porque define a máxima corrente circulante que pode ser atingida com perdas reduzidas por dissipação (efeito Joule). Quanto maior é o valor de I_c maior é a corrente circulante no SFCL no estado supercondutor.

Já o índice n indica quão a transição do estado supercondutor para o estado normal. Um condutor ôhmico possui $n = 1$ já que seu comportamento é linear enquanto que um supercondutor ideal apresenta $n \rightarrow \infty$. Assim, um valor de n maior em um SFCL significa que a resistividade do sistema passa de zero para um valor finito em um determinado intervalo de tempo muito pequeno, permitindo a inserção instantânea da resistência no circuito limitando a corrente de falta antes de $\frac{1}{4}$ de ciclo.

Em fitas supercondutoras comerciais é comum encontrar índice n entre 10 e 20 para fitas de BSCCO e índices n de 20 a 40 para fitas de YBCO (XIE et al., 2007).

A Figura 47 mostra as curvas $E-I/I_c$ (normalizadas) obtidas na caracterização das fitas de BSCCO: EAS e AMS; e de YBCO: AMS, SP SCS12050 e SP SF12100. No gráfico menor observamos as curvas $E-I/I_c$ em escala log mostrando a inclinação da curva (índice n).

Comparando e normalizando a corrente crítica (largura de 10 mm) temos que a fita com estabilizador de cobre SCS12050 possui I_c (10 mm de largura) = $I_c^* = 21,1$ A/mm ($n = 30$) enquanto que a fita SF12100 possui $I_c^* = 18,5$ A/mm ($n = 36$). A fita YBCO AMS não possui I_c elevada como as fitas da SP, mas com $I_c = 88$ A (largura 4 mm) o seu valor normalizado pela largura da fita forneceu uma $I_c^* = 20,5$ A/mm e $n = 28$, índice n característico de fitas de YBCO.

As fitas de BSCCO apresentam $I_c^* = 28,3$ A/mm e 18,0 A/mm para fitas AMS e EAS, respectivamente, com índices $n = 16$ para AMS e $n = 17$ para EAS. Estes valores de corrente crítica, corrente crítica normalizada e índice n estão resumidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Correntes críticas e índices n de fitas HTS.

Amostra	I_c [A]	I_c^* [A/mm]	n
BSCCO EAS	72	18,0	17
BSCCO AMS	116	28,3	16
YBCO AMS	88	20,5	28
YBCO SP SCS12050	254	21,1	30
YBCO SP SF12100	223	18,5	36

* Valores de I_c para largura de 10 mm.

Figura 47. Curva $E-I/I_c$ para amostras HTS de BSCCO e YBCO.

A partir destas curvas observamos que a transição das fitas de YBCO são mais acentuadas e, portanto, mais rápidas, o que favorece a limitação de corrente de maneira rápida e eficiente no SFCL. No entanto, para completar a caracterização elétrica foi necessário determinar a resistência por unidade de comprimento (R/l) das fitas HTS de modo a determinar quais fitas possuem maior resistência após transição para o estado normal, que

permita projetar um limitador com resistência suficiente para limitar a corrente utilizando um comprimento de fita HTS que não inviabilize economicamente o SFCL.

5.1.2 Medidas de resistência vs. temperatura (R-T)

A resistência por unidade de comprimento em fitas supercondutoras é um parâmetro de elevada importância. Para que um SFCL suporte elevadas correntes sem danificar o material supercondutor é necessário que a resistência atingida na transição supercondutor/normal seja suficiente para a limitação.

A partir das curvas R-T da Figura 48 pode-se observar que fitas de BSCCO (EAS e AMS) possuem baixa resistência quando o material inicia sua transição e pequena inclinação, o que leva a uma baixa resistência para altas temperaturas (300 K). Essa baixa resistência está associada a sua matriz de prata ($\rho = 1,59 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) que basicamente é responsável pela resistência fornecida após a transição.

As fitas SP SCS12050 e SF12100 possuem o mesmo substrato e teoricamente o mesmo valor de resistividade. No entanto, a fita com estabilizador de cobre tem sua resistência reduzida devido à presença do cobre que atua como resistência em paralelo com o substrato de Hastelloy ($\rho = 120 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), (ROY et al., 2008) diminuindo assim a resistência equivalente da fita.

A liga de Ni5%atW do substrato das fitas YBCO AMS também apresenta elevada resistividade elétrica o que confere a esta fita resistência elétrica superior as fitas de BSCCO na temperatura de 300 K.

O gráfico menor da Figura 48 mostra o comportamento supercondutor/normal na temperatura crítica indicando a transição para todas as fitas HTS. O valor inicial de resistência varia em função do substrato ou matriz utilizada na produção da fita.

Figura 48. Curvas R/l - T para amostras HTS.

As resistências por unidade de comprimento das amostras HTS obtidas experimentalmente e os valores obtidos na literatura (EHTS BSCCO, 2003; YIM et al., 2005; ANH et al., 2007; SCHMIDT et al., 2007) estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de R/l para temperaturas próximas a T_c e a 300 K (medido e da literatura).

HTS	R/l_{T_c} [Ω/m]	$R/l_{300\text{ K}}$ [Ω/m]	$R/l_{300\text{ K}}$ [Ω/m]
	Medido	Medido	Literatura
BSCCO EAS	0,016	0,044	0,044
BSCCO AMS	0,016	0,039	0,038
YBCO AMS	0,14	0,359	0,367
YBCO SP SCS12050	0,02	0,079	0,11
YBCO SP SF12100	0,17	0,442	0,40

Após a análise das curvas R - T as fitas mais indicadas para utilizar como limitador de corrente foram YBCO AMS e YBCO SP SF12100 (sem estabilizador) devido a sua alta resistividade a altas temperaturas ($T_c < T < 300\text{ K}$). Se utilizarmos a fita YBCO SP SCS12050 para o projeto do limitador de corrente, por exemplo, seria necessário utilizar comprimento 4 vezes superior ao da fita SF12100 para obter a mesma resistência equivalente para limitação da corrente.

5.1.3 Medidas de E vs. I/I_c em função do campo magnético DC e AC

5.1.3.1 Curvas $E-I/I_c$ em função de campo magnético DC

Para avaliar a variação do índice n em amostras curtas HTS em função do campo magnético aplicado foi levantada a curva $E-I/I_c$ para valores de campo magnético constantes, selecionados na etapa de projeto do SFCL. Da mesma forma que nas curvas $E-I/I_c$ da caracterização elétrica sem aplicação de campo uma análise em função do índice n foi realizado para cada amostra submetida a um campo magnético externo.

Para amostras de BSCCO, o campo magnético aplicado selecionado foi de: 0, 30, 65, 140, 200 e 250 mT. As curvas $V-I$ da fita através de experimento de rampa de corrente, com o suporte de amostra inserido no núcleo magnético, porém sem campo magnético externo aplicado foi denominado $B = 0$. A medida em rampa de corrente na amostra sem a utilização do núcleo C foi considerada como “sem campo”.

De uma forma geral, o comportamento das curvas mostra que houve redução do valor do índice n e da corrente crítica com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado (KIM et al., 2005).

Na Figura 49 para amostra de BSCCO EAS, os valores do índice n não variaram para campo nulo (sem a presença do núcleo C) e para campo igual a 0 T (com núcleo C). Com o aumento do campo magnético para 30 mT o valor do índice sofreu redução de aproximadamente 50% do seu valor inicial.

Considerando o valor de campo magnético $B = 200$ mT pode-se comparar o efeito em todas as fitas HTS observando-se uma redução de 76% no valor inicial do índice n , tornando-o igual a 4,2 valor muito próximo a um condutor ôhmico ($n = 1$) e a corrente crítica para este campo corresponde a 22% do valor da corrente crítica inicial.

Figura 49. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de BSCCO EAS com variação de campo magnético DC.

A Figura 50 para amostra de BSCCO AMS apresenta um comportamento bastante próximo ao da fita EAS, no entanto, a redução do índice n foi um pouco menor sendo de 67,3% ($n = 5,1$) do valor inicial para um campo externo aplicado de 200 mT e corrente crítica de 25% do valor inicial de I_c .

Figura 50. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de BSCCO AMS com variação de campo magnético DC.

Em fitas YBCO também houve redução do índice n com o aumento do campo magnético. Porém, como o valor do índice n é elevado comparado com as fitas de BSCCO o

seu valor após a redução devido ao aumento da intensidade de campo foi igual ao valor inicial do índice n de fitas de BSCCO sem aplicação de campo magnético.

Para as fitas SuperPower o campo magnético máximo aplicado foi de 550 mT e de 400 mT para fita a YBCO AMS, campos duas vezes maiores que o campo aplicado em fitas de BSCCO, pois a estrutura das fitas de YBCO (camada uniforme) favoreceu a utilização das fitas em campos magnéticos maiores devido a redução de perdas por acoplamento.

A fita YBCO AMS, Figura 51, atingiu um valor constante de índice n a partir do campo magnético de 300 mT não havendo redução do índice com o aumento do campo. Para esta amostra a redução do índice n foi de 22,5% ($n = 22$) para um campo de 200 mT e sua corrente crítica foi de 68% do valor de corrente crítica inicial.

Figura 51. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de YBCO AMS com variação de campo magnético DC.

Para amostras SuperPower, Figura 52 e 53, a redução do índice n foi maior que na fita YBCO AMS sendo de 57% a 200 mT para a fita com estabilizador de cobre e de 59,5% sob o mesmo campo para a fita sem estabilizador, no entanto, estes valores de redução ainda foram menores que aqueles encontrados para as fitas de BSCCO.

Para estas fitas o valor do índice n também atingiu um valor constante após um determinado campo magnético aplicado indicando que mesmo com a redução de suas propriedades supercondutoras o material não atingiu um comportamento ôhmico como acontece nas fitas de BSCCO.

Figura 52. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de YBCO SCS12050 com variação de campo magnético DC.

Figura 53. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de YBCO SF12100 com variação de campo magnético DC.

5.1.3.2 Curvas $E-I/I_c$ em função de campo magnético AC

Foram realizadas medidas com campo magnético alternado de forma a verificar o comportamento das fitas em condições mais severas de campo.

Em todas as fitas supercondutoras testadas o aumento do campo magnético provocou uma redução intensa no valor do índice n .

Em amostras de BSCCO o campo máximo aplicado foi de 70 mT e o valor do índice n foi reduzido para valores menores àqueles encontrados para campos DC de 250 mT.

Considerando um campo magnético de 20 mT como referência para comparação do comportamento das fitas temos que a amostra de BSCCO EAS, Figura 54, apresentou uma redução de 84% do índice n e 70% no valor da corrente crítica. Já na amostra de BSCCO AMS, Figura 55, a redução do índice foi de 68%, mas a corrente crítica manteve 60% do seu valor inicial. Em ambas as amostras, o campo de 70 mT foi suficiente para gerar uma resposta de $E-I/I_c$ equivalente a de um condutor normal.

Figura 54. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de BSCCO EAS com variação de campo magnético AC.

Figura 55. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de BSCCO AMS com variação de campo magnético AC.

Amostras YBCO apresentaram comportamento semelhante das fitas de BSCCO. Em fitas YBCO AMS mostrado na Figura 56 a redução do n foi de 79% e sua corrente foi

reduzida a 50% I_c . Esta fita sofreu maior variação sob campo AC podendo ser associada ao seu substrato magnético. Para campo de 50 mT, por exemplo, o seu índice caiu para $n = 2$ mostrando a redução rápida de suas propriedades supercondutoras com o aumento do campo AC aplicado.

Figura 56. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de YBCO AMS com variação de campo magnético AC.

Em fitas YBCO SuperPower o índice n manteve seu valor inicial constante para campos AC muito baixos e sofreram redução intensa à partir de um campo próximo a 20 mT, sendo de 50% para a fita com estabilizador SCS12050, Figura 57, e de 84% para fita sem estabilizador SF12100, Figura 58. No entanto, fitas SCS12050 possuem corrente crítica de 90% do seu valor inicial, o que não ocorre para a fita sem estabilizador que apresentou redução de 70% de I_c .

Figura 57. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de YBCO AMS com variação de campo magnético AC.

Figura 58. Curvas $E-I/I_c$ para amostra de YBCO AMS com variação de campo magnético AC.

De uma forma geral, a indução magnética AC perpendicular a superfície da fita afetou muito mais o comportamento das fitas HTS devido, principalmente, as perdas AC. Correntes de acoplamento e perdas por corrente parasita contribuem para as perdas AC. Em fitas de BSCCO, os filamentos aumentam as perdas devido as correntes de acoplamento resultantes da passagem da corrente entre os filamentos supercondutores. A matriz também é um fator determinante nas perdas AC, pois induzem a presença de correntes parasitas. Em fitas YBCO as perdas AC estão atribuídas a não homogeneidade da camada YBCO, interação entre material supercondutor e substrato, e pela contribuição de perdas histeréticas no substrato (VOJENCIAK et al, 2007).

5.2 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

5.2.1 Medidas de susceptibilidade vs temperatura (χ -T)

Da curva de susceptibilidade magnética (χ) obtida em função da temperatura utilizando-se o sistema de medidas de propriedades físicas PPMS obteve-se a temperatura crítica do material, o comportamento magnético em função da temperatura e o comportamento da susceptibilidade e da temperatura em função da variação do campo magnético AC.

Em limitadores de corrente, quando utilizamos longos comprimentos de fita torna-se necessário utilizar o arranjo de bobinas concêntricas, onde o campo magnético próprio e das

espiras vizinhas atuam sobre a fita HTS. Se o campo magnético local exceder o valor de H_c do material HTS, ocorrerá a transição levando o material supercondutor para o estado normal. Desta forma, o comportamento destes materiais na presença de campo magnético (componente paralela e perpendicular) passa a ser fator determinante na construção do limitador.

Na Figura 59 são apresentados os valores de temperatura crítica (T_c) das 5 amostras supercondutoras.

Figura 59. Curva χ -T para amostras HTS de BSCCO e YBCO.

A transição na curva χ' indica a T_c do material sendo calculado através da média aritmética entre os valores de temperatura do maior e menor valor de χ' . A Tabela 9 compara os valores obtidos experimentalmente com aqueles encontrados na literatura (EHTS BSCCO, 2003; SUPERPOWER INC, 2009c; DU et al., 2008).

Tabela 9 - Valores de temperatura crítica para fitas HTS (medido e da literatura).

HTS	T_c [K]	T_c [K]
	Medido	Literatura
BSCCO EAS	97	100
BSCCO AMS	106	110
YBCO AMS	89	90
YBCO SP SCS12050	89	90
YBCO SP SF12100	87	90

As medidas de χ -T variando o campo magnético foram feitas em 4 amostras. A amostra de BSCCO EAS não foi avaliada, pois devido as suas características elétricas, concluiu-se que seriam necessários grandes volumes de material para atingir resistência adequada para limitação, por isso, este material não é apropriado para utilização como limitador de corrente. A amostra de BSCCO AMS foi mantida para efeito de comparação e avaliação do comportamento das fitas de BSCCO e YBCO.

Na Figura 60, as curvas χ -T da fita de BSCCO são apresentadas e observamos que para campos baixos utilizados, praticamente não houve alteração de T_c . A partir da transição o material se torna paramagnético ($\chi' \approx 0$) conforme discutido na metodologia.

A parte imaginária χ'' está relacionada aos processos dissipativos que ocorrem na amostra. A curva de χ'' mostra que para $h_{AC} = 1 \mu T$ a dissipação foi grande diminuindo o valor de T_c . A partir da transição foi esperado que a dissipação volte a zero já que não houve mais alteração de fase. No entanto, a matriz de prata favorece o transporte de correntes parasitas devido a indução de corrente quando submetida a um campo magnético alternado o que justifica a dissipação remanescente em χ'' após a transição (FAGNARD et al., 2002).

Figura 60. Curva χ' e χ'' versus temperatura da fita de BSCCO.

Da curva χ -T para a amostra de YBCO AMS, mostrada na Figura 61, foi observado que existe uma grande dependência de χ com h_{AC} aplicada, muito embora o valor de T_c seja pouco alterado. Após a transição o valor de χ' foi maior que zero o que indica o comportamento ferromagnético, que se deve ao substrato magnético de Ni5%atW.

A curva de χ'' indica pouca dissipação e após a transição o seu valor é próximo a zero.

Figura 61. Curva χ' e χ'' versus temperatura da fita de YBCO AMS.

A Figura 62 mostra a curva χ -T para a amostra de YBCO SP com estabilizador de cobre. Neste caso a variação de h_{AC} não alterou significativamente o valor de T_c diferente do que ocorre em fitas de BSCCO. Após a transição o valor de χ' foi próximo a zero (comportamento paramagnético).

Em χ'' a dissipação foi significativa para campos acima de 2,24 μT e assim como em amostras de BSCCO o valor de χ'' apresentou valor diferente de zero após transição. Em amostras YBCO com cobre, o cobre toma o lugar da prata nas fitas de BSCCO, e correntes parasitas no cobre circulam devido a indução do campo magnético aplicado.

Figura 62. Curva χ' e χ'' versus temperatura da fita de YBCO SP SCS12050.

Já a fita de YBCO sem estabilizador, Figura 63, sofreu alteração de T_c com o aumento do campo aplicado. Após a transição, χ' e χ'' estão próximos a zero, ou seja, não houve dissipação de energia para variações de campo magnético nesta região.

Figura 63. Curva χ' e χ'' versus temperatura da fita de YBCO SP SF12100.

A seguir são apresentadas as curvas de χ -T para diferentes frequências a fim de avaliarmos o comportamento dessas fitas em função da frequência de trabalho.

O gráfico da Figura 64 mostra as curvas para amostras YBCO AMS para diferentes frequências. A variação dos sinais de χ' e χ'' foi intenso apenas para a frequência mais elevada de 10 kHz, sendo bastante estável para as demais frequências.

Figura 64. Curva χ' e χ'' versus temperatura com diferentes frequências da fita de YBCO AMS.

Para comprovar a estabilidade da frequência nesta amostra foram obtidas curvas de χ' e χ'' vs. temperatura para frequências específicas de 30, 50, 60 e 120 Hz, frequências de utilização conhecidas. Para estas frequências não houve alteração no comportamento das curvas χ' e χ'' , conforme mostrado na Figura 65, comprovando que o material pode ser utilizado para as frequências de operação sem apresentar diferenças em seu comportamento.

Figura 65. Curva χ' e χ'' versus temperatura para frequências de 30, 50, 60 e 120 Hz para amostra de YBCO AMS.

A Figura 66 e 67 mostram o comportamento de χ' e χ'' para as amostras de YBCO SCS12050 e SF12100 da SuperPower, respectivamente. No caso da amostra com estabilizador de cobre, Figura 66, houve grande variação na dissipação de energia para altas frequências associado ao estabilizador. Já para a fita sem estabilizador, Figura 67, não houveram alterações com a variação de frequência mostrando maior estabilidade no material para um intervalo maior de frequências.

Figura 66. Curva χ' e χ'' versus temperatura com diferentes frequências da fita de YBCO SCS12050.

Figura 67. Curva χ' e χ'' versus temperatura com diferentes frequências da fita de YBCO SF12100.

A partir destes ensaios concluímos que fitas de YBCO apresentam melhor desempenho para utilização em limitadores de corrente, sendo as mais indicadas as fitas de YBCO AMS e SP SF12100 (sem estabilizador), pelos seguintes motivos:

- Alta corrente crítica/mm de largura: 20,5 A/mm para fita AMS e 18,5 A/mm para fita SF12100;
- Maior resistência após transição para o estado normal, a 300 K: 0,36 Ω/m para AMS e 0,44 Ω/m para SF12100, uma ordem de grandeza maior que as demais fitas HTS testadas;

- Maior índice n (≥ 30), o que indica rápida resposta do supercondutor quando ocorrer a falta de corrente e;
- Fita YBCO AMS mostrou melhor desempenho sob campo magnético constante perpendicular à superfície da amostra. A perda em corrente crítica e no valor do índice n foi menor quando comparado com as demais fitas.
- Comportamento uniforme na presença de campo magnético perpendicular, não ocorrendo indução de correntes parasitas após transição para o estado normal e conseqüentemente reduzindo perdas por efeito Joule resultantes destas correntes.

5.3 MEDIÇÃO DO TEMPO DE RECUPERAÇÃO

As caracterizações elétricas e magnéticas definiram alguns parâmetros importantes que serão utilizados para o projeto do limitador de corrente. Porém, as características da fita durante e após a atuação do limitador, ou seja, após a transição, foram também importantes já que é esperado que o limitador recupere suas propriedades e esteja pronto para nova atuação a fim de evitar subseqüentes picos de corrente na rede. Por isso, estudos de tempo de recuperação em fitas HTS foram realizados observando o comportamento do material após a aplicação de um pulso de corrente.

Os pulsos aplicados neste ensaio variam entre $0,9I_c$ a $1,5I_c$ com tempo de duração de 50, 75, 90 e 100 ms, simulando 3 a 6 ciclos da rede (60 Hz – 16,7 ms/ciclo).

Como os valores de corrente crítica foram diferentes para as amostras HTS utilizadas, as comparações foram feitas através de normalizações em função da corrente crítica (I/I_c).

A Figura 68 mostra as curvas de tensão para pulsos de corrente iguais a respectivas correntes críticas com duração de 100 ms por pulso.

Figura 68. Tensão nas fitas HTS para pico de corrente $I = I_c$ para $t = 100$ ms.

As curvas da Figura 68 mostram que as fitas não sofreram transição supercondutor/normal, exceto a fita YBCO AMS que iniciou sua transição. A amostra YBCO AMS apresentou transição iniciada com um tempo de 100 ms após o início do ensaio. Para as demais amostras nestas condições, o tempo de 100 ms não foi suficiente para que a corrente pulsada levasse o material a transição.

Além disso, as curvas mostram que existe uma tensão induzida gerada pela variação de corrente (dI/dt na subida e descida de corrente). Estes valores de tensão variam dependendo da corrente aplicada e do tempo de duração do pico.

As amostras da BSCCO EAS, YBCO AMS e YBCO SF12100 apresentaram tensão induzida positiva com a subida do pico de corrente e, tensão induzida negativa com a descida do pico de corrente. Esta característica permitiu a determinação de corrente crítica através do ponto de tensão correspondente ao início da transição.

As tensões induzidas foram contrárias ao sentido da corrente em amostras BSCCO AMS e YBCO SCS12050, devido à presença do reforço externo ou do estabilizador. A indução contrária pode ser justificada pela presença de correntes parasitas circulantes no estabilizador, conforme mostrado na curva χ'' -T de ambas as amostras. A corrente que passa na fita induziu campo magnético no cobre, por exemplo, gerando correntes parasitas perceptíveis através da tensão induzida no sinal de tensão.

Valores de indução aumentaram com o aumento da intensidade da corrente de pico, ou seja, com a variação de corrente dI/dt até que a corrente crítica seja atingida. Com a transição da amostra, os valores de tensão aumentaram fazendo com que a contribuição que foi induzida não fosse significativa perante o valor de tensão atingido após a transição. A Figura 69 mostra o comportamento dessa tensão induzida com relação a transição do material na fita YBCO AMS.

Figura 69. Gráfico V-I em amostra YBCO AMS (tensão devido a transição e tensões induzidas).

A curva V-I da fita YBCO AMS foi indicada pelo símbolo Δ , enquanto que as induções: positiva e negativa foram indicadas por $\square$ e $\bullet$, respectivamente. Para corrente abaixo de I_c as induções possuem valores variando em torno de 0,5 mV tanto positiva quanto negativa. Quando a corrente atingiu o valor $I = I_c$ houve um máximo nos valores de tensão induzida, para valores $I > I_c$, ambos os valores de tensão (+ e -) diminuíram tendendo a zero.

Na Figura 70 pode-se observar que as curvas de tensão para corrente aplicada $I = 1,4I_c$ durante 100 ms, indicam que todas as fitas transitaram para o estado normal e após a extinção do pulso de corrente todas recuperaram suas propriedades supercondutoras.

Figura 70. Tensão nas fitas HTS para pico de corrente igual a $1,4I_c$ para $t = 100$ ms.

O sinal de tensão da fita SF12100 foi de 48 mV, seis vezes maior que o sinal de tensão da fita SCS12050. Isto mostra que a resposta de tensão ao pico de corrente foi maior em fitas SuperPower sem estabilizador devido a sua rápida transição (elevado valor do índice n).

Pelo gráfico podemos observar o comportamento do sinal de tensão da fita YBCO AMS com e sem “shunt” em paralelo. O “shunt” tem como função desviar parte da corrente da fita para o “shunt” a fim de evitar degradação do supercondutor sob altas correntes. Desta forma, o valor de tensão no HTS apresenta redução de 35% com o “shunt” de $4\text{ m}\Omega$ em paralelo. As fitas da SuperPower também foram medidas com o mesmo valor de “shunt” em paralelo.

Fitas de BSCCO apresentaram sinais muito baixos com relação as fitas de YBCO com tensão em torno de 1,2 mV para a mesma corrente equivalente aplicada.

Na Figura 71 foram apresentadas as curvas $E-I/I_c$ para diferentes tempos de aplicação de pulso (50, 75, 90 e 100 ms) em amostras de BSCCO e YBCO.

Figura 71. Curva $E-I/I_c$ com dados obtidos a partir dos valores experimentais para 50, 75, 90 e 100 ms em fitas de BSCCO e YBCO.

Na Figura 71 observamos que em todas as amostras de BSCCO e YBCO a diferença no tempo de aplicação do pulso não alterou o comportamento da curva V-I para correntes aplicadas de valores de até $1,5I_c$.

Outro fator importante foi que as tensões medidas nos terminais das amostras de BSCCO foram equivalentes, ou seja, atingiram o mesmo nível de tensão para o mesmo valor de corrente normalizada I/I_c , o que equivale a um campo elétrico de 15 mV/m para $I = 1,4I_c$.

Em relação ao sinal de tensão medidos nas amostras das fitas de YBCO verificamos que os valores atingidos foram diferentes, indicando uma influência do processo de fabricação. A fita SF12100 como mencionado anteriormente atingiu maior valor de tensão devido a sua rápida transição (elevando expoente n) atingindo um campo elétrico de 0,4 V/m para $I = 1,4I_c$. Fitas AMS e SCS12050 também possuem índice n elevado e, portanto, apresentaram tensões semelhantes e superiores aos valores de tensão verificados em amostras de BSCCO. A Figura 72 mostra a tensão por tempo para fitas HTS, com $I = 1,4I_c$ e duração de 90 ms, e indicando como foi calculado o valor de dV/dt (decaimento de tensão com o tempo) e o tempo de recuperação.

Figura 72. Curva V-t para fitas HTS. ($I = 1,4I_c$ e $t_{pico} = 90$ ms).

Para avaliar o comportamento das fitas em função do tempo de aplicação do pulso foi válida a análise de energia dissipada por volume em função da corrente. Na Figura 73 são apresentadas as curvas de energia/volume por I/I_c em todas as amostras HTS testadas.

Figura 73. Curva Energia/Volume- I/I_c com tempos de pico de corrente de 50, 75, 90 e 100 ms em fitas de BSCCO e YBCO.

Basicamente, o aumento de corrente levou a um aumento do valor de energia dissipada por volume. No entanto, a dissipação não ocorreu de maneira tão intensa para pulsos de menor duração. Embora a corrente de pulso aplicada fosse a mesma, o tempo de exposição do material supercondutor a esta corrente foi muito pequeno, e, portanto, o valor de tensão foi reduzido. Através dos gráficos da Figura 73 pode-se comprovar este comportamento. Em todas as amostras a dissipação foi menor para tempos de pico de 50 ms, aumentando a medida que a duração do pico aumentou.

Se analisarmos os valores de energia dissipada com o tempo de recuperação ($t_{recuperação}$) das fitas pode-se encontrar uma relação entre ambas. Para um dado tempo de recuperação, quanto maior for a energia associada ao pico de corrente melhor será o comportamento (desempenho) do material supercondutor. Isto indica que o material suporta

dissipação de potência elevada em um determinado intervalo de tempo sem apresentar degradação de suas propriedades supercondutoras.

Comparando-se os dados de energia e de tempo de recuperação apresentadas na Tabela 10, para tempo de pico de 90 ms (considerando um pouco mais que 5 ciclos da rede) e $I/I_c = 1,4$ observa-se que amostras de YBCO suportam maior valor de energia dissipada em relação as de BSCCO, recuperando-se em um menor intervalo de tempo. A fita YBCO AMS, embora apresente um tempo sete vezes maior que as demais fitas de YBCO da empresa SuperPower, é capaz de suportar alta densidade de energia recuperando-se em um intervalo de tempo de 75 ms para a corrente de pico de $1,4I_c$. Este comportamento diferenciado está associado a arquitetura da fita e aos diferentes materiais utilizados como substrato e estabilizador, que apresentam diferentes propriedades de condutividade térmica refletindo na capacidade de troca de calor com o meio refrigerante.

Tabela 10 - Valores de energia/volume, tempo de recuperação, taxa de decaimento de tensão para fitas HTS com tempo de pico de 90 ms e $I_{pico} = 1,4I_c$.

Amostra	Energia/volume [J/m^3]	$t_{recuperação}$ [s]	dV/dt [V/s]
BSCCO EAS	$3,0 \times 10^4$	0,085	-0,096
BSCCO AMS	$3,9 \times 10^4$	0,124	-0,170
YBCO AMS	$1,2 \times 10^5$	0,075	-0,286
YBCO SP SCS12050	$3,4 \times 10^5$	0,011	-0,590
YBCO SP SF12100	$2,1 \times 10^6$	0,010	-4,540

A informação dV/dt na Tabela 10 indica os valores de decaimento de tensão por tempo no final do pico aplicado. Quanto mais negativo for este valor, mais rápida é a resposta do supercondutor a redução de pico de corrente, que na prática equivale a extinção da falta.

O tempo de resposta do material é muito importante em fitas de YBCO para a performance do SFCL, que depende da velocidade de propagação e do valor da resistência gerada na transição do estado supercondutor para o estado normal, que define o fator de limitação da corrente. Como resultado de uma baixa difusividade térmica e inadequada dissipação de energia que pode ocorrer em fitas YBCO, o aquecimento considerável ($T > 450$ K) no filme supercondutor pode acarretar degradação no SFCL (ROY et al., 2008). No pior caso, o material HTS não retorna para seu estado supercondutor após a falta e toda corrente circulante passa no material resistivo até que o dispositivo seja degradado de forma irreversível devido ao aquecimento Joule.

Assim, quanto mais rápida for a recuperação após transição (utilizando um “shunt” em paralelo, por exemplo, como dissipador de boa parte da energia) menores serão as chances de danificar o SFCL supercondutor.

Dentre as fitas mencionadas para utilização no SFCL a fita YBCO AMS apresentou excelentes propriedades elétricas, magnéticas, assim como rápida resposta a corrente de falta associada a um bom tempo de recuperação. Além destas características foi considerado o fator econômico destas fitas quando comparadas com as demais fitas YBCO (\$70/m YBCO AMS e \$115/m SF12100), e desta forma a fita YBCO AMS foi escolhida para montagem do protótipo do SFCL de 16 elementos.

5.4 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DO ELEMENTO DO SFCL COM FITAS SUPERCONDUTORAS EM PARALELO.

5.4.1 Simulação da distribuição do campo magnético

Simulando a corrente nominal de 228 A, temos que o campo magnético máximo atingido foi de 14 mT nas bordas laterais das fitas HTS. Através da Figura 74 vemos que o campo foi mais intenso ao redor da fita e diminuiu com a distância. No entanto, existe um mínimo de campo magnético entre duas fitas e entre dois elementos adjacentes, sendo o campo mínimo encontrado neste último caso já que a distância é longa o suficiente para que o campo magnético gerado seja extinto. O campo mínimo entre fitas de um mesmo elemento pode ser explicado por: quando a corrente positiva circula em uma fita, ela cria um campo magnético com sentido horário a direção da corrente. Quando a fita adjacente gera um campo similar, já que a corrente também é positiva, existe um encontro entre elas onde as contribuições de campo se anulam e consequentemente, há um valor mínimo de campo magnético. Já entre dois elementos, superior e inferior, temos um valor maior de campo devido a contribuição aditiva das linhas de campo formadas entre as fitas superiores e inferiores.

Figura 74. Distribuição de campo magnético em fitas HTS para $I = 228$ A

Aumentando a ampliação para dois elementos, Figura 75, podemos verificar o comportamento descrito anteriormente.

Figura 75. Ampliação da distribuição de campo magnético nas fitas centrais para $I = 228$ A.

E para a ampliação em uma fita, Figura 76, vemos a distribuição máxima de campo magnético nas extremidades da fita (efeito de borda) e como a intensidade diminuiu a medida que o campo entra na fita HTS e também quando o campo se afasta da fita HTS.

Figura 76. Ampliação de 1 fita HTS para $I = 228$ A

Uma análise do perfil pode ser feita considerando as quatro fitas HTS de um elemento. Como esperado o campo máximo está localizado nas bordas e diminui dentro da fita e entre fitas, atingindo um valor mínimo de campo magnético, conforme mostrado na Figura 77. Outro detalhe importante é o efeito de borda pronunciado nas laterais mais externas do conjunto de 4 fitas. Neste ponto o valor de campo foi mais intenso do que aquele das bordas das fitas internas no elemento SFCL.

Figura 77. Perfil da distribuição de campo entre quatro fitas HTS.

Alterando o valor da corrente aplicada para 1000 A e 2000 A observamos que a distribuição do campo foi similar em todos os casos, ocorrendo alteração na intensidade de campo magnético dependendo da corrente atuante. As Figuras 78 e 79 mostram que as intensidades de campo magnético encontradas para ambas as correntes atingiram o valor máximo de 58,7 mT e 117,4 mT, respectivamente.

Figura 78. Distribuição de campo magnético em fitas HTS para $I = 1000$ A

Figura 79. Distribuição de campo magnético em fitas HTS para $I = 2000$ A

Para corrente de 1000 A a intensidade máxima encontrada foi de 58,7 mT, enquanto que para uma corrente de 2000 A a intensidade de campo magnético máximo foi de 117,4 mT.

Se analisarmos estes resultados com aqueles obtidos nas curvas $E-I/I_c$ com variação de campo magnético, temos que para corrente nominal de 228 A o campo máximo de 14 mT (nas bordas da fita HTS) praticamente não altera o valor do índice n e nem do valor de corrente crítica. Além disso, o valor médio de campo magnético na fita foi em torno de 1,4 mT, o que sugere reduções de n e I_c muito menores ou praticamente nulas. Sendo assim, o campo induzido gerado pelas fitas devido a corrente circulante não foi suficiente para reduzir as propriedades supercondutoras das fitas HTS utilizadas no protótipo do SFCL.

Para correntes de 1000 A e 2000 A, o campo seria capaz de causar uma redução de 15% em I_c e no índice n , mas esta corrente é tão alta que o material passa para o estado normal pela corrente maior que I_c . É importante salientar que estas correntes permanecem no máximo durante 5 ciclos da rede (83,5 ms) e em seguida a corrente de operação é mantida. Sendo assim, o campo magnético induzido não contribui significativamente no processo de transição do material supercondutor para o estado normal.

5.4.2 Ensaios de pulsos de corrente contínua DC

5.4.2.1 Para um elemento do SFCL contendo 4 fitas em paralelo

Para possibilitar a operação dos limitadores com corrente nominal de 230 A, considerando o valor da corrente crítica $I_c = 72$ A (garantido pelo fabricante) para as fitas de YBCO da AMS com reforço mecânico de aço inoxidável, foram associados quatro fitas de 0,42 m conectadas em paralelo.

De forma a testar a influência dos contatos de cobre laterais do suporte e das conexões intermediárias de cobre, duas condições de soldagem foram testadas a saber:

- Soldagem da fita supercondutora nas extremidades laterais das barras de cobre, isto é, comportamento de 0,4 m sem qualquer apoio, e;
- Conexão elétrica intermediária das fitas supercondutoras a cada 100 mm através de barras de cobre laterais e intermediárias do suporte.

Na curva V-I da Figura 80 pode-se observar que a soldagem de barras de cobre a cada 100 mm favoreceu no aumento da corrente crítica. Estas barras atuaram como pontos de troca de calor da fita HTS limitando a temperatura máxima e reduzindo o tempo de recuperação. Além disso, as fitas soldadas desta forma evitaram a sua movimentação quando atravessadas por altas correntes o que minimizou possíveis quebras das camadas depositadas e desta forma, evitaram ou reduziram as condições extremas que levam a interrupção do fluxo de corrente e a degradação do material supercondutor.

Figura 80. Curva V-I de 4 fitas em paralelo soldadas nas extremidades laterais e com conexões intermediárias a cada 100 mm.

O valor da corrente crítica total medida para este elemento foi de $I_T = 268$ A (com conexão intermediária a cada 100 mm) e $I_T = 224$ A para solda da fita apenas nas extremidades (terminais de corrente). Considerando que o valor da corrente crítica garantida pelo fabricante é de $I_c = 72$ A para uma fita YBCO AMS, temos que a corrente total medida equivale a 93% do valor total esperado, o que é satisfatório devido as condições de soldagens das quatro fitas e possíveis tensões mecânicas durante a montagem.

Para avaliar o crescimento da resistência e as condições de recuperação o teste de pulsos de corrente foi realizado do mesmo modo que o descrito para os ensaios em amostras curtas. Os pulsos variam de 1 a 2,5 vezes do valor de I_c com duração de 100 ms seguidos de degraú de corrente equivalente a 60 A, para comprovar o retorno ao estado supercondutor. O pulso aplicado não foi retangular conforme fornecido pelo gerador de função devido ao capacitor interno da fonte de potência utilizada para aplicar corrente.

Para um pulso de corrente de 300 A o resultado é mostrado na Figura 81, onde se observa que para um pico de corrente de $I = 319$ A o conjunto de fitas não atingiu o ponto de

transição. Porém, como observado em amostras curtas, verificamos o mesmo comportamento da fita, ou seja, a tensão medida correspondente a tensão induzida devido a variação dI/dt .

Figura 81. Corrente de pico de 319 A com duração de 100 ms em conjunto de fitas paralelas.

A Figura 82 mostra as curvas de corrente e tensão em função do tempo para um pico de 590 A. Neste caso a transição ocorre 0,05 s após a aplicação do pulso atingindo o valor de tensão de 4,1 V. O conjunto após suportar o pulso de corrente de $2,2I_c$, foi mantido sob fluxo de corrente circulante de 60 A, e nesta condição de carga levou aproximadamente 0,3 s para recuperar o seu estado supercondutor. A resistência equivalente do conjunto após a transição atingiu $R \approx 7$ m Ω .

Figura 82. Corrente de pico de 590 A com duração de 100 ms em conjunto de fitas paralelas.

Para a corrente de pico de 647 A seguido de corrente constante de 60 A, mostrado na Figura 83, houve transição do conjunto simultaneamente com a aplicação do pulso atingindo 8,3 V em consequência do aumento da resistência para 12,8 m Ω . Para esta corrente o tempo de recuperação foi maior que 1 s, para a condição de fluxo de corrente constante mantido em 60 A. No gráfico menor da Figura 83 pode-se observar que o sinal de tensão começou a decair antes de atingir 1 s indicando que a recuperação ocorreu a partir deste valor de tempo.

Figura 83. Corrente de pico de 590 A com duração de 100 ms em conjunto de fitas paralelas.

Para avaliar a influência da resistência “shunt” foram testados diversos valores e selecionados $R_{sh} = 175 \text{ m}\Omega$, porém nos ensaios de corrente contínua não foram observados mudanças significativas no valor do campo elétrico máximo ou no tempo de recuperação.

5.4.2.2 Para dois elementos do SFCL contendo 4 fitas em paralelo cada

Um novo tipo de configuração foi testado de forma a minimizar a quantidade de contatos elétricos para associar os elementos no suporte de fibra de vidro G10 e principalmente para diminuir o volume total do protótipo do SFCL final.

A Figura 84 mostra a curva V-I obtida para esta configuração, sendo possível observar que os elementos apresentaram resultados de correntes críticas diferentes, porém, ambos os valores foram maiores que o valor garantido pelo fabricante. Em um elemento a transição ocorre após a corrente crítica atingir $I_c = 270 \text{ A}$ (índice $n = 28$) e no outro elemento não foi

observado a transição para o estado normal neste ensaio. Contudo, é evidente que a corrente crítica do segundo elemento foi superior e, portanto o valor mínimo de corrente crítica a ser utilizado como referência corresponde ao menor valor encontrado igual a 270 A.

Figura 84. Curva V-I da configuração dupla (dois elementos em série).

A partir do valor de corrente crítica obtido experimentalmente foi possível avaliar o comportamento do conjunto com a aplicação de um pulso de corrente contínua durante um intervalo de tempo de 100 ms determinando o aumento da resistência com o aumento do pulso de corrente.

Para corrente de pico de 315 A, Figura 85, um elemento atinge 0,53 mV mostrando que o primeiro elemento iniciou sua transição para o estado normal com este valor de pulso de corrente atingindo uma resistência de $1,7 \mu\Omega$. Porém, o outro elemento apresentou apenas tensões induzidas e conseqüentemente não apresentou transição. Em ambos os casos a recuperação foi imediata após o término do pulso de corrente.

Figura 85. Curva (V,I)-t para $I_{\text{pico}} = 315$ A com duração de 100 ms.

Quando aplicado uma corrente de pico de 420 A ($2,7I_c$), Figura 86, os dois elementos transitaram para o estado normal. O segundo elemento, no entanto, por apresentar maior corrente crítica, apresentou uma resposta de tensão menor que o primeiro elemento. A resistência atingida no primeiro elemento foi de $18,5 \mu\Omega$ e no segundo elemento de $11,2 \mu\Omega$, sendo o tempo de recuperação dos dois elemento imediatamente após a retirada do pulso de corrente.

Figura 86. Curva (V,I)-t para $I_{\text{pico}} = 420$ A com duração de 100 ms.

A Figura 87 mostra o gráfico para um pulso de 583 A quando os dois elementos transitam para o estado normal atingindo respectivamente tensões de 3,1 V e 3,8 V. A recuperação para este valor de pulso de corrente ocorre após 300 ms e 350 ms, sendo a resistência equivalente 5,3 e 6,5 m Ω , valores próximos a $R \approx 7$ m Ω encontrados para a configuração de um único elemento.

Figura 87. Curva (V,I)-t para $I_{\text{pico}} = 583$ A com duração de 100 ms.

As configurações da placa G10 forneceram resultados similares indicando que as duas configurações foram indicadas para a montagem do SFCL. Após estes ensaios a nova configuração com o arranjo de dois elementos associados em série foi utilizado para a construção do protótipo do SFCL.

5.4.3 Ensaios de pulsos de corrente alternada AC

5.4.3.1 Para um elemento do SFCL contendo 4 fitas em paralelo

Para avaliação do desempenho do elemento SFCL, contendo 4 fitas em paralelo, foram realizados ensaios utilizando um motor-gerador de 96 kVA/380 V, conforme circuito já descrito na Figura 46. Durante os ensaios, o elemento SFCL foi conectado em série com um resistor de carga que mantém circulando a corrente nominal de 150 A. Os pulsos de

corrente com duração de 1 a 5 ciclos foram obtidos através do curto-circuito do resistor de carga. Nesta condição o pico de corrente máxima foi de 2,1 kA, sendo que após a extinção da falta a corrente nominal foi mantida para avaliar a recuperação do estado supercondutor.

Utilizando o resistor “shunt” de 175 m Ω e corrente de pulso com duração de 1 ciclo, a Figura 88 mostra que ao atingir 1,8 kA a tensão máxima no elemento foi de 19,8 V e a atuação do supercondutor ocorreu simultaneamente com o pico de corrente aplicado. Quando o pulso de corrente cessou e a corrente se manteve constante em 150 A, a tensão decaiu para 14 V em meio ciclo e atingiu 1,57 V no meio ciclo seguinte. Após 80 ms a tensão caiu para 0,5 V e a recuperação ocorreu no tempo de 100 ms.

Figura 88. Curva (V,I)-t em 1 ciclo de falta utilizando “shunt” de 175 m Ω .

As Figuras 89 e 90 mostram as curvas V-t e I-t para 3 e 5 ciclos. Em ambos os gráficos o comportamento foi o mesmo que aquele mostrado no gráfico de um ciclo, porém, o tempo de recuperação foi maior a medida que a duração em ciclos do pulso de corrente aumenta.

Figura 89. Curva (V,I)-t para 3 ciclos de falta utilizando “shunt” de 175 mΩ.

Para três ciclos com corrente de falta de 1,7 kA de pico, o supercondutor atuou em 4 ms atingindo uma tensão de 16,3 V e resistência de 9,6 mΩ. Após a extinção do pulso e sob corrente constante a tensão caiu para 1 V e depois de 100 ms a tensão caiu para 0,5 V, indicando que ocorreu recuperação depois de 0,5 s.

Figura 90. Curva (V,I)-t para 5 ciclos de falta utilizando “shunt” de 175 mΩ.

Com 5 ciclos de falta a tensão máxima foi de 19 V para 1,8 kA_{pico} com resistência de 10 mΩ reduzindo para 1,14 V após a falta, atingindo 1 V após 50 ms da extinção da falta, ou seja, em ambos os casos a recuperação ocorreu após alguns poucos segundos.

Para avaliar o comportamento do elemento do SFCL em paralelo com um “shunt” de maior resistência, ou seja, quando uma fração menor de corrente foi desviada do elemento supercondutor, foram repetidos os ensaios utilizando o “shunt” de 430 mΩ.

Com o resistor “shunt” de 430 mΩ o processo de recuperação não foi observado para 3 e 5 ciclos e a tensão do elemento aumenta mesmo com a corrente constante de 150 A (valor abaixo de I_c) indicando um aumento da degradação irreversível.

Figura 91. Curva (V,I)-t para 5 ciclos de falta utilizando “shunt” de 430 mΩ.

A Figura 91 mostra a resposta do elemento para falta de 5 ciclos, onde a tensão foi de 17,1 V para I_{pico} de 1,7 kA. Após a extinção do pulso a tensão decaiu a 1,6 V e após 40 ms atingiu 1,9 V. Isto pode ser explicado considerando duas resistências em paralelo: SFCL e “shunt”. Se a resistência “shunt” é muito maior que a resistência do supercondutor no estado normal, a maior parte da corrente flui para o SFCL, o desvio então de parte da corrente não será suficiente para reduzir o aquecimento por efeito Joule que ocorrerá no HTS impossibilitando a sua recuperação do estado supercondutor.

O resumo dos ensaios do elemento para faltas de 1 a 5 ciclos com os três valores de “shunt” selecionados é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Respostas de recuperação nos ensaios com pulso AC.

“Shunt” (mΩ)	Pico de corrente (kA)	Tensão de pico e após a falta (V)	Recuperação depois de (ciclos)		
			1	3	5
173	1,7	19,8/1,6/0,5	S	S	S
245	1,8	16,3/1,3/0,5	S	S	S
430	1,7	17,1/1,6/1,9	S	N	N

Na Tabela 11 observamos que para “shunt” de 173 mΩ e 245 mΩ ocorreu a recuperação em tempo inferior a 0,5 s, porém para $R_{sh} = 430$ mΩ não houve recuperação do estado supercondutor para faltas de 1,7 kA com duração de 3 e 5 ciclos mesmo mantendo a condição de projeto de limitar o campo elétrico em $E = 0,05$ V/mm.

Após as medidas realizadas com aplicação de picos de corrente DC e AC, a curva V-I foi repetida para verificar se algum tipo de degradação ocorreu no elemento supercondutor. A Figura 92 mostra a curva inicial e as curvas obtidas após cada ensaio de pulso de corrente.

Figura 92. Curva V-I do elemento supercondutor após os ensaios de pulsos de corrente.

A partir da Figura 92 observamos que após dezenas de pulsos de corrente aplicados, o comportamento do elemento, através de sua curva V-I, não foi alterado indicando que o supercondutor não sofreu nenhum tipo de degradação por corrente de falta. Mesmo nas condições extremas quando não ocorreu a recuperação do estado supercondutor, ou seja, com

o “shunt” de 430 m Ω , o elemento atuou efetivamente para proteger a fita supercondutora e desviar uma fração da corrente.

5.4.3.2 Para dois elementos do protótipo do SFCL conectados em série

Para os testes em dois elementos do SFCL foram aplicados pulsos de corrente AC variando de 1 a 5 ciclos conforme descrito para os ensaios em um elemento do SFCL. A corrente de pico atingiu 1,7 kA com tensão máxima de 10,3 V. A corrente de operação do motor-gerador foi de 275 A_{pico} (195 A_{rms}) e a leitura do sinal de tensão foi feita nos dois elementos do topo do SFCL.

A Figura 93 mostra a forma de onda durante a transição e o processo de recuperação para 1 ciclo de pulso de corrente. A partir do momento que ocorreu a falta de corrente, o SFCL levou aproximadamente 1 ms para atuar atingindo tensões de 10 V no primeiro ciclo para o primeiro elemento e 2,8 V para o segundo elemento. A resistência atingida para este valor de tensão foi de 5,9 m Ω e 1,65 m Ω , respectivamente. Após a extinção da falta as tensões decaíram para 0,5 V e 0,16 V havendo recuperação em 80 ms em ambos os conjuntos de fitas após o término da falta.

Figura 93. Curva (V,I)-t para 1 ciclo de falta 1 em dois elementos do SFCL.

O comportamento para 3 e 5 ciclos foi semelhante ao encontrado para 1 ciclo, exceto pelo tempo de recuperação que aumentou com o número de ciclos de duração da falta.

Para 3 ciclos de falta, Figura 94, a tensão atingida para o primeiro elemento foi de 10,3 V com resistência de 6 m Ω e para o segundo elemento foi de 2,8 V com resistência de 1,65 m Ω . O tempo de atuação do SFCL foi próximo a 1,5 ms após o início da falta e a recuperação ocorreu em tempo maior que 80 ms, após a falta.

Figura 94. Curva (V,I)-t para 3 ciclos de falta em dois elementos do SFCL.

A falta com duração de 5 ciclos, Figura 95, e o pulso de corrente aplicado foi de 1,8 kA, resultam em tensão nos dois elementos igual a 7,3 V o que corresponde a uma resistência de 4 m Ω . Como os dois elementos estão associados em série a resistência equivalente (considerando dois elementos) nos ensaios com 1 e 3 ciclos foi de aproximadamente 7,7 m Ω e para o ensaio com 5 ciclos temos 8 m Ω , assim o SFCL manteve o mesmo fator de limitação para a corrente de falta de 2 kA e duração de até 5 ciclos (80 ms).

Figura 95. Curva (V,I)-t para 5 ciclos de falta em dois elementos do SFCL.

O tempo de atuação foi também de 1,5 ms após o início da falta, mas a recuperação ocorreu para tempos maiores. No entanto, existe recuperação do SFCL, pois os valores de tensão decaíram com o tempo atingindo 0,7 V e 0,4 V nos elementos 1 e 2, respectivamente, e 40 ms após a extinção da falta a tensão reduziu para 0,4 V e 0,2 V, respectivamente.

Assim como em medidas DC, os resultados foram satisfatórios, pois houve limitação da corrente de falta em tempos próximos a 1,5 ms. A utilização do “shunt” de proteção evitou a degradação do material supercondutor e a diminuição da tensão pós falta indica que houve recuperação do elemento após alguns poucos segundos.

Considerando os resultados obtidos e as informações referentes a limitadores de corrente da literatura, temos que a utilização de fitas de YBCO com campo elétrico máximo de 0,05 V/mm é segura e viável. Em todos os ensaios realizados no elemento supercondutor, com 4 fitas em paralelo, nenhum valor ultrapassou este valor de campo elétrico e o elemento limitou a corrente de falta atuando com um tempo máximo de 4 ms.

5.4.3.3 Protótipo do SFCL contendo 16 elementos

Para testar o protótipo do SFCL contendo 16 elementos arranjados em 8 placas de fibra de vidro, contendo dois elementos associados em série e cada conjunto, conectados eletricamente por terminais de cobre, com terminais para leitura de tensão na primeira e

última fita do primeiro e último elemento, de forma a obter a resposta total de tensão do protótipo do SFCL. As condições do ensaio em corrente alternada AC, utilizando o gerador de 96 kVA/ 380 V, para aplicação de pulsos de corrente foram as mesmas adotadas para os testes com 1 e 2 elementos do SFCL.

O SFCL contém 16 elementos associados em série, contendo cada quatro fitas HTS com 0,42 m de comprimento, totalizando 26,9 m de fita YBCO da empresa American Superconductor. Para proteção de cada elemento foi instalado um resistor “shunt”, não indutivo em paralelo com resistência de 180 mΩ. A resistência total do SFCL foi de 490 mΩ e a indutância foi de 4,0 μH medida a baixa frequência de 120 Hz, utilizando um LCR Meter modelo 4262A da Hewlett Packard na configuração série.

A Figura 96 mostra o gráfico I-t e V-t para o SFCL total. A medida de tensão foi feita utilizando uma ponteira diferencial. A corrente de pulso de 1,9 kA gerou uma tensão de 150 V no SFCL o que significa que o conjunto atingiu uma resistência de 78,9 mΩ que limita a corrente de pulso. Após 1 ciclo a corrente retornou a sua corrente de operação de 275 A_{pico} (195 A_{rms}) e a tensão imediatamente caiu para o valor medido de 24 V. O tempo de atuação do SFCL foi de 2 ms e houve indicação de recuperação em poucos ciclos devido ao decaimento de tensão para 1,9 V após 150 ms da aplicação da corrente de falta de 1,9 kA.

Figura 96. Curva (V,I)-t do SFCL sob corrente de 1,9 kA durante 1 ciclo.

A Figura 97 mostra a resposta de tensão para 3 ciclos de corrente de falta. Para 1,65 kA a tensão no SFCL atingiu 112,5 V e a resistência foi de 68,2 mΩ. Cessado a corrente

de falta, a tensão caiu a 21 V e após 120 ms do início da falta a tensão foi de 0,8 V indicando recuperação do conjunto.

Figura 97. Curva (V,I)-t do SFCL sob corrente de 1,65 kA durante 3 ciclos.

O mesmo comportamento foi encontrado para 5 ciclos de falta, Figura 98, onde para 1,8 kA de corrente de pulso a tensão atingiu 132,3 V e a resistência foi de 73,5 mΩ. A queda de tensão pós falta mostrou a recuperação do conjunto. O tempo de atuação para 3 e 5 ciclos foi da ordem de 2,5 ms.

Figura 98. Curva (V,I)-t do SFCL sob corrente de 1,8 kA durante 5 ciclos.

Além da tensão obtida no conjunto também foi medida a tensão em um elemento do SFCL. Para uma corrente de 1,8 kA durante 5 ciclos a tensão atingida foi de 6,5 V com resistência de 3,6 m Ω . O tempo de atuação foi da ordem de 2,5 ms e a recuperação ocorreu 120 ms após o início da falta.

Se considerarmos que cada elemento atinge 6,5 V quando ocorre a falta de corrente teremos uma tensão total de 104 V no SFCL. Obviamente os elementos podem suportar valores de tensão maior ou menor que 6,5 V devido a corrente crítica da fita HTS utilizada no elemento ($I_c = 72$ A é o menor valor de corrente conforme fabricante) e por isso, a resposta de tensão total para esta condição de corrente de pulso foi de 120 V, conforme mostrado na Figura 99. A condição limite de projeto foi de 0,05 V/mm, ou seja, 20 V/elemento e tensão máxima de 320 V_{pico} (~ 220 V_{rms}) para o limitador.

Figura 99. Curva (V,I)-t do SFCL e de um elemento sob corrente de 1,8 kA durante 5 ciclos.

As fotos contidas na Figura 100 mostram o SFCL em operação antes, durante e após a falta de corrente. As bolhas mostram a dissipação do calor quando o SFCL atuou limitando a corrente de falta. A homogeneidade do conjunto pode ser verificada pela distribuição uniforme das bolhas e sua recuperação pela diminuição da turbulência do LN₂.

Figura 100. Fotos quadro a quadro do SFCL em operação quando da aplicação de uma corrente de pulso durante 5 ciclos.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios com o protótipo do SFCL podemos chegar as seguintes conclusões:

- A construção de um SFCL na configuração de fitas paralelas é viável considerando os resultados obtidos de campo elétrico atingido (máximo de 0,02 V/mm por elemento).
- O SFCL apresentou boas características de limitação a 2 kA de falta, tanto em tempo de atuação quanto em tempo de recuperação.
- A baixa indutância do sistema evita que outros dispositivos, como banco de capacitores, sejam colocados no sistema para correção de potência.
- O baixo campo magnético próprio e induzido diminui redução do índice n e da corrente crítica total do SFCL.
- A troca térmica do líquido refrigerante com as fitas HTS é favorecido devido a configuração de placas paralelas aumentando a área de contato. Os contatos interligados a cada 100 mm reduzem a temperatura máxima auxiliando na rápida recuperação do SFCL.

- A homogeneidade na produção de fitas HTS leva a um comportamento similar e homogêneo dos elementos do SFCL, ou seja, transição e recuperação uniformes.
- Não houve degradação no material supercondutor após os diversos ensaios com corrente de falta de 2 kA, o que indica confiabilidade na utilização deste dispositivo de potência na utilização como limitador de corrente.

6 CONCLUSÕES

A partir da estrutura das fitas HTS e juntamente com as medidas realizadas em amostras curtas foi possível chegar as seguintes conclusões:

A estrutura das fitas de YBCO em camadas depositadas favorece o fluxo de corrente que é transportado na camada HTS, quando no estado supercondutor, sem interrupção do fluxo de corrente devido a presença de contornos dos filamentos. Os multifilamentos de material supercondutor em amostras de BSCCO criam barreiras para o fluxo de corrente gerando perdas de acoplamento quando a corrente circulante passa pelos contornos dos filamentos.

A caracterização elétrica, através das medidas de V-I e R-T, definiu as correntes críticas, índices de inclinação da transição (n) e valores de resistência por metro.

As fitas de YBCO fabricadas pela empresa SuperPower apresentaram correntes críticas I_c (10 mm de largura) = $I_c^* = 18,5$ A/mm e $I_c^* = 21,1$ A/mm para fitas SF12100 (sem estabilizador) e SCS12050 (com estabilizador), respectivamente. As fitas de YBCO fabricadas pela AMS apresentaram $I_c^* = 20,5$ A/mm enquanto que as fitas de BSCCO fabricadas pela EAS $I_c^* = 18,0$ A/mm e BSCCO da AMS $I_c^* = 28,3$ A/mm. O alto valor do índice n encontrado em fitas YBCO se deve a produção em camadas orientadas, depositadas em matriz de alta resistividade, e conseqüentemente transitam mais rapidamente que fitas de BSCCO, que utilizam Ag como matriz.

A partir dos resultados de medidas R-T observamos que a resistência alcançada no início da transição e a 300 K foi muito maior em fitas (YBCO) SF12100 e AMS. Isto se deve a elevada resistividade da matriz de ambas as fitas, o que não ocorrem em fitas de BSCCO com matriz de prata e na fita SCS12050 devido a contribuição do cobre na resistência equivalente. Assim, a quantidade de material supercondutor necessária para a construção do limitador de corrente será bem menor se forem utilizadas as fitas de YBCO SF12100 ou YBCO AMS.

As medidas de E-I/ I_c com variação de campo magnético DC e AC permitiram analisar o comportamento do índice n e da corrente crítica em função do campo perpendicular aplicado. Em campo DC as amostras mostraram redução em ambas as propriedades a partir de campos $B > 200$ mT. Apenas a fita YBCO AMS apresentou perda reduzida, conservando 78% do seu valor inicial do índice n e 70% do seu valor de I_c para o campo de 200 mT. As

demais fitas apresentaram reduções tão intensas quanto 76% do seu valor inicial de n e 78% de redução em I_c como foi o caso das fitas de BSCCO EAS.

Sob campo magnético AC todas as fitas apresentaram intensas reduções ($> 50\%$) no seu valor de índice n para campos de 20 mT e para campos maiores que 50 mT o índice n foi próximo a $n=1$ (indicativo de condutor ôhmicos), o que sugere que a propriedade supercondutora foi substituída por um comportamento de condutor normal. Com relação a corrente crítica apenas a fita com estabilizador de cobre SCS12050 apresentou 10% de redução do seu valor inicial. Todas as demais fitas apresentaram redução maior que $50\%I_c$.

Na caracterização magnética realizada utilizando medidas de susceptibilidade AC podemos observar que fitas BSCCO AMS e YBCO SCS12050 apresentaram comportamento similar em χ'' após a transição, devido ao fluxo de correntes parasitas na prata e no cobre que geram dissipação de energia. As fitas YBCO AMS apresentaram sinal ferromagnético após a transição devido ao substrato magnético, enquanto que a fita da SuperPower sem estabilizador apresentou sinal paramagnético.

As fitas YBCO AMS e SF12100 sofreram maior redução da fração supercondutora com o aumento do campo magnético AC sendo mais intenso em fitas YBCO AMS. As demais fitas praticamente não apresentaram grandes variações da fração supercondutora para campos de até 2,2 μ T. No entanto, fitas de BSCCO e YBCO SF12100 apresentaram maior redução de T_c com o aumento do campo AC.

Com relação ao aumento da frequência nos ensaios com as fitas de YBCO apenas a fita SCS12050 sofreu intensa variação no seu valor após a transição. As fitas YBCO AMS e SF12100 são estáveis, não apresentando alteração significativa de suas propriedades com a variação da frequência.

Considerando os resultados das caracterizações realizadas concluímos que as fitas YBCO proporcionam melhores propriedades estruturais, elétricas e magnéticas para aplicação em limitadores de corrente. As fitas da SuperPower SF12100 e American Superconductors YBCO apresentaram excelente desempenho devido a sua alta corrente crítica/mm associado ao seu elevado valor de índice n (~ 30), alta resistência por metro a altas temperaturas (300 K) e pelo comportamento estável na presença de campo magnético sem contribuição de corrente parasitas.

O estudo do tempo de recuperação em fitas HTS proporcionou informações sobre o comportamento das fitas após aplicação de um pulso de corrente da ordem de $1,5I_c$, com duração de 1 a 5 ciclos, apresentando diferentes tempos de recuperação sob carga com circulação de corrente nominal pós pulso.

Destes ensaios observamos que as fitas de YBCO atingiram tensões muito maiores que fitas de BSCCO, ou seja, permitem o projeto do SFCL com campo elétrico máximo de 0,05 V/mm, sendo que a diferença foi de 10 vezes para o mesmo valor de pulso aplicado. Também foi observado a existência de tensão induzida que varia em função do material utilizado no substrato ou na matriz para a produção da fita HTS.

As fitas YBCO AMS não atingiram valores de tensão tão alto quanto as fitas SuperPower, no entanto, seu tempo de recuperação de 0,075 s foi duas vezes maior que o tempo da fita de BSCCO da AMS. Comparando os valores calculados de energia dissipada por volume os valores obtidos para as fitas de YBCO AMS foram próximos aos das fitas SuperPower SCS12050.

De um modo geral, quanto maior é a energia dissipada por volume para um mesmo intervalo de pulso de corrente, mais adequada será a fita supercondutora para utilização como limitador de corrente.

Após as medidas para caracterização das fitas HTS utilizando amostras curtas, duas fitas foram selecionadas para construção do protótipo do limitador de corrente: YBCO AMS e SF12100. Devido ao alto custo das fitas da SuperPower SF12100, \$115/m, comparando com \$70/m da fita YBCO AMS e a disponibilidade destes materiais no departamento optou-se por utilizar fitas YBCO AMS.

Antes da montagem do protótipo do SFCL foram testadas, em corrente DC e AC, um e dois elementos contendo 4 fitas em paralelo por elemento e foram realizadas simulações da distribuição de campo magnético nas 64 fitas do conjunto. Dos resultados da simulação temos que o campo atingido pela corrente nominal não afetou significativamente o SFCL. O campo máximo gerado de 14 mT, comparado com os resultados de $E-I/I_c$ em função do campo magnético, não alterou os valores do índice n e de I_c . O campo magnético para a corrente de 2 kA, em contra partida, acarretaria uma redução de 15% no valor de n e I_c . Porém, a transição se dá pela corrente e não pelo campo magnético que seria atingido.

No primeiro teste com 4 fitas de YBCO associadas em paralelo com comprimento de 0,4 m, o valor de corrente crítica do conjunto foi de $I_c = 268$ A, sendo que a cada 100 mm as fitas foram soldadas nas barras de cobre intermediárias. Estas barras de cobre auxiliam na troca térmica com o líquido refrigerante, mantendo a temperatura do conjunto, bem como evitam a flexão da fita durante a circulação de altas correntes quando as forças eletromagnéticas são intensas.

Para avaliar o tempo de recuperação das fitas HTS de YBCO após a transição para o estado normal, mantendo-se a circulação da corrente nominal, foram realizados ensaios de

pulsos em corrente DC, foi observado a recuperação do estado supercondutor após falta em tempo de até $t = 300$ ms para picos de $I = 2,2I_c$ e de $t = 800$ ms para picos de $I = 2,5I_c$.

Nos ensaios com pulsos de corrente AC com picos próximos a 2 kA, observamos que a limitação da corrente ocorreu no máximo após 4 ms do início da falta. Houve recuperação total do supercondutor para faltas com duração de 1, 3 e 5 ciclos, utilizando resistores “shunt” de valores de 245 m Ω e 175 m Ω . Não houve recuperação para os picos de corrente de 2 kA com duração de 3 e 5 ciclos quando foi utilizado o “shunt” de 430 m Ω . Após as medidas de pulso de corrente DC e AC não se constatou nenhum tipo de degradação no material supercondutor o que foi confirmado quando foi levantado a curva V-I comparativa, ou seja, antes e após os ensaios.

A alteração da configuração de um elemento para dois elementos série por placa G10 não alterou o comportamento do SFCL e os resultados obtidos foram satisfatórios e similares àqueles obtidos para um elemento. Houve resposta de atuação do SFCL em tempos próximos a 1,5 ms, recuperação rápida de poucos segundos e não houve degradação do material supercondutor.

Os testes no protótipo do SFCL mostraram excelentes resultados, com tempos de atuação e recuperação de acordo com o projetado para o limitador de corrente. A tensão em um elemento do conjunto de 6,5 V mostra que a tensão total no SFCL de 120 V é coerente com a homogeneidade de todos os elementos, isto é, a transição ocorre simultaneamente e com características similares em todos os elementos. Nos ensaios futuros a serem realizado no IEE/USP para condição de corrente de 2 kA o campo elétrico deveria atingir seu valor máximo de 0,05 V/mm, resultando em uma tensão total de $V = 311V_p$ ($220 V_{ef}$).

A configuração escolhida de placas paralelas permitiu ao limitador operar com indutância total reduzida (4 μ H) e o campo magnético máximo no conjunto de 14 mT (para $I_{circulante} = 228$ A), aumentando consideravelmente a troca térmica entre líquido refrigerante e fitas HTS, devido ao aumento da área de contato entre eles.

Não houve degradação do material supercondutor após dezenas de testes ($I_{falta} > 2$ kA) o que mostra a confiabilidade deste dispositivo para aplicações em sistemas de potência.

Assim, este protótipo supriu as expectativas esperadas para a construção do limitador de corrente supercondutor. Todas as etapas estipuladas no cronograma foram realizadas com êxito, sendo seus resultados ao longo do desenvolvimento deste projeto publicados na IEEE Transactions on Applied Superconductivity nos anos de 2007 e 2009.

7 TRABALHOS FUTUROS

Após o desenvolvimento deste trabalho são sugeridas duas medições para continuação e complementação do projeto:

1. Medidas utilizando um sensor Hall para determinação do campo magnético gerado nas fitas HTS devido ao transporte de corrente no SFCL;
2. Ensaios com tensão constante de 220 V, utilizando um transformador de 3 MVA para correntes de 600, 800, 1000, 1500, 2000 e 2500 A para falta com duração de 1 a 5 ciclos de forma a obter sinais de tensão de cada elemento do limitador de corrente supercondutor avaliando a homogeneidade da transição e da recuperação em todo o SFCL.

REFERÊNCIAS

AGILENT TECHNOLOGIES INC. Agilent 33220A 20 MHz Function/Arbitrary Waveform Generator. *Manual do Usuário*. Santa Clara, CA: Agilent Technologies, 2007. 362 p.

AIR LIQUIDE. *Nota fiscal da Air Liquide*. São José dos Campos. Junho, 2009.

AMERICAN SUPERCONDUCTORS CORPORATION. *About Superconductivity*, 2009. Disponível em: <http://www.amsc.com/aboutus/about_super.html>. Acesso em: 19 fev. 2009.

_____. *2G Wire Architecture*, 2009. Disponível em: <<http://www.amsc.com/products/htswire/2Gwirearchitecture.html>>. Acesso em: 11 mar. 2009.

_____. *HTS Fault Current Limiters to Rescue*, 2009. Disponível em: <www.amsc.com/products/faultcurrentlimiters/index.html>. Acesso em: 26 mar. 2009.

AMERICAN SUPERCONDUCTORS CORPORATION. 2G HTS Wire Fact Sheet. *Dados Técnicos*. Devens, MA: American Superconductors, 2007.

_____. *Guidelines for Handling, Soldering and Splicing of 344 Superconductors. Service Note*. American Superconductor Corporation 2007.

ANH, M. C. et al. Current limiting characteristics of coated conductors with various stabilizers. *Cryogenics*, v.47, p. 425-430, 2007.

ARAI, K. et al. Test of resonance-type superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.16, n.2, p.650-653, 2006.

BALDAN, C. A. et al. Resistive fault current limiter using HTS single-layer coils. *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, v.408-10, p.937-939, 2004.

BALDAN, C. A. et al. Test Results of a Superconducting FCL Using Bifilar Coil of BSCCO-2212. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.16, n.2, p.695-698, 2006.

BALDAN, C. A. et al. Test results of a superconducting fault current limiter using YBCO coated conductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.17, n.2, p.1903-1906, 2007.

BALDAN, C. A., SHIGUE, C. Y., ERNESTO FILHO, R. Fault Current Test of a Bifilar Bi-2212 Bulk Coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.18, n.2, p.664-667, 2008.

BALDAN, C. A. et al. Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor – The Limiting Factor and its Recovery Time. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.19, n.3, p.1810-1813, 2009.

BOCK, J. et al. Development and successful testing of MCPBSCCO 2212 components for a 10 MVA resistive fault current limiter. *Supercond. Sci. Technol.*, v.17, p.S122-S126, 2004.

- BOCK, J. et al. CURL 10: 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, p. 1955-1960, 2005.
- BRUZZONE, P. The index n of the voltage-current curve, in the characterization and specification of technical superconductors. *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, v. 401, n.1-4, p.7-14, 2004.
- CLARK, A. F., EKIN, J. W. Defining Critical Currents, *IEEE Transactions on Magnetism*. v. 13, n. 1, p. 38-40, 1977.
- CLEM, J. R. Field and current distributions and ac losses in a bifilar stack of superconducting strips. *Physical Review B*, v. 77, n. 13, p. 7, 2008.
- DU, H. I. et al. Study on over-current characteristics of HTS tape by stabilizing material. *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, v.468, n.15-20, p.1706-1709, 2008.
- EHTS BSCCO. *Data sheet*. Germany: European High Temperature Superconductors, 2003.
- FARIA, C. C. et al. Estudo de Materiais pela Técnica de Susceptibilidade Magnética AC. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. v.22, n.3, p.416-420, 2000.
- FAGNARD, J. F. et al. Intragranular and intergranular behaviour of multifilamentary Bi-2223/Ag tapes. *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, v. 372, p. 970-973, 2002.
- GÖMÖRY, F. et al. Predicting AC loss in practical superconductors. Institute of Physics Publishing. *Superconductor Science and Technology*. v.19, p.S60-S66, 2006.
- HANSELMAN D., LITTLEFIELD B. *MATLAB 6: curso completo*. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- HEWITSON, L., BROWN, M., BALAKRISHNAN, R. *Practical Power Systems Protection*. Newnes: Elsevier, 2004.
- HOMRICH, R. P. *Limitador de corrente supercondutor resistivo monofásico: projeto, construção e ensaio*. 2001. 164 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 2001.
- HOMRICH, R. P. et al. Single-phase resistive superconductor electrical current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.12, n.1, p.1386-1389, 2002.
- JIANG, Y. et al. Comparison of Superconducting Fault Current Limiter in Power System. In: *IEEE-POWER-ENGINEERING-SOCIETY SUMMER MEETING*, Jul 15-19, 2001. Vancouver, BC, p.43-47.
- KALSI, S. S. et al. HTS fault current limiter concept. In: *IEEE-POWER-ENGINEERING-SOCIETY GENERAL MEETING*, Jun 06-10, 2004. Denver, CO, p.1426-1430.

KIM J. H., et al. Characteristics of Critical Current and Index n of Bi-2223/Ag Tape up to 30T at 4.2K *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, p.2470-2473, 2005.

KOVALSKY, L. et al. Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.15, n.2, p.2130-2133, 2005.

KREISKOTT, S. et al. Reel-to-reel preparation of ion-beam assisted deposition (IBAD)-MgO based coated conductors. *Superconductor Science and Technology* 17, p.S132-S134, 2004.

KÜHLWEIN, L. *Helium recovery*: Tailor made and absolutely gastight. Bauer Kompressoren GmbH, April 11, 2007. Disponível em: <www.bauer-kompressoren.de/en/aktuell/news/2007/070411.php>. Acesso em: 19 fev. 2008.

LAMAS, J.S. *Desenvolvimento de programa computacional para controle de equipamentos e aquisição de dados para ensaios de materiais supercondutores de alta temperatura crítica em corrente contínua e corrente alternada*. Lorena: EEL-USP, 2006. 46 p. (Relatório científico, Fapesp Ref. Proc. 04/15663-6).

MALOZEMOFF, A. P. *Second Generation HTS Wire: An assessment*. American Superconductor Corporation, 2004. Disponível em: <http://www.amsc.com/products/htswire/documents/4122GWhitePaper_v5.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2009.

MASUR L. J. et al. The status of commercial and developmental HTS wires. *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, v.392, p.989-997, 2003.

MATSUMOTO E. Y. *MATLAB 7: Fundamentos*. São Paulo: Érica, 2004.

McCHESNEY, D. *Cryogenic Facility*. Brookhaven National Laboratory, 29 July 2005. Disponível em: <www.bnl.gov/magnets/Cryo/facility.asp>. Acesso em: 19 fev. 2008.

MEISSNER, W.; OCHSENFELD, R. Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit. *Die Naturwissenschaften*. Tradução Allister M Forrest. *European Journal. Physics.*, v. 4, p.117-120, 1983.

METAL OXIDE TECHNOLOGIES. *HTS Technology update*. In. 2003-2005. Disponível em: <www.metox.biz/tech_update>. Acesso em: 5 dez. 2008.

OH, S. S. et al. Development of Bi-2223HTS tape and its application to coil and current leads. *Cryogenics*, v. 42, n. 6-7, p. 377-382, 2002.

OOMEN, M. P. *AC loss in superconducting tapes and cables*. 2000. 177 f. Tese (Doutorado) - Universiteit Twente, Netherlands, 2000.

PARK, D.K. et al. Development of 220 V/300 A Class Non-Inductive Winding Type Fault Current Limiter Using 2G HTS Wire. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p.1863-1866, 2007.

POOLE JR., C. P.; FARACH H. A.; CRESWICK, R. J. *Superconductivity*. California: Academic Press, 1995.

PRUSSEIT, W. et al. Reel to reel coated conductor fabrication by evaporation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 16, n. 2, p. 996-998, 2006.

QUANTUM DESIGN. Introduction to AC susceptibility. *Manual de publicação da Quantum Design*. Califórnia: Quantum Design, 2000.

ROY, F. et al. Magneto-Thermal Modeling of Second-Generation HTS for Resistive Fault Current Limiter Design Purposes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 18, n. 1, 2008.

RUPICH, M. W. et al. YBCO coated conductors by an MOD/RABiTS (TM) process. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 13, n. 2, p. 2458-2461, 2003.

RUPICH, M. W. et al. The development of second generation HTS wire at American superconductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 3379-3382, 2007.

SCHMIDT, W. et al. Investigation of YBCO Coated Conductors for Fault Current Limiter Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 3471-3474, 2007.

SELVAMANICKAM, V. et al. Fabrication of biaxially-textured thick film Y-Ba-Cu-O Superconductor by MOCVD on cube-textured metal substrates, In: TMS MEETING, 1997, USA.

SELVAMANICKAM, V. et al. High-current Y-Ba-Cu-O coated conductor using metal organic chemical-vapor deposition and ion-beam-assisted deposition. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 11, n. 1, p. 3379-3381, 2001.

SHIGUE et al. Analysis of the E-J Curve of HTS Tapes Under DC and AC Magnetic Fields at 77 K. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v.19, n.3, p.3332-3335, 2009.

SIEMENS. *Flexible AC Transmission System (FACTS)*. Disponível em: <https://www.energy-portal.siemens.com/static/hq/en/products_solutions/14901_127225_flexible%20ac%20transmission%20system%20facts.html>. Acesso em: 17 jun. 2009.

SOKOLOVSKY, V. et al. Superconducting FCL: Design and application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 14, n. 3, p. 1990-2000, 2004.

SONG, Y. H., JOHNS, A.T. *Flexible AC transmission systems (FACTS)*. UK: The Institution of Engineering and Technology/ IEE Power and energy series 30, 1999.

SUPERCONDUCTORS. *Type 1 Superconductors and a Periodic Chart Comparison*. Disponível em: <<http://www.superconductors.org/Type1.htm>>. Acesso em: 16 mar. 2009.

SUPERPOWER INC. *2G HTS Wire*. Disponível em: <<http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>>. Acesso em: 5 dez. 2008.

SUPERPOWER INC. 2G HTS Wire Specification Sheet - Fault Current Limiter Application. *Dados Técnicos*. NY, USA: SuperPower, 2009.

SUPERPOWER INC. 2G HTS Wire Spec Sheet - Coil Application. *Dados Técnicos*. NY, USA: SuperPower, 2009.

TINKHAM, M. **Introduction to Superconductivity**. Florida: Krieger, 1980.

TRENCH GROUP. *Reactors* 2007. Disponível em: <http://www.trenchgroup.com/Trench%20Group/Trench_Reactors/Trench_Reactors.html> Acesso em: 17 jun. 2009.

VOJENCIAK, M. et al. Influence of DC magnetic field on AC loss of YBCO coated conductor with ferromagnetic substrate. *Polish Acad Sciences Inst Physics*, 2008. p.359-362.

WALTER, C. R. *Brookhaven National Laboratory Informal Report* BNL 18928 AADD 74-2 January 30, 1974.

WEBER, C. et al. Transmission Level HTS Fault Current Limiter. Providing HTS solutions for a new dimension in power – today. Superconductivity for Electric Systems. In: *U.S. DEPARTMENT OF ENERGY MEETING*. August 7-9, 2007. U.S.

WTEC HYPER-LIBRARIAN. *Fault-Current limiters*, September 1997. Disponível em: <www.wtec.org/loyola/scpa/04-03.htm>. Acesso em: 10 mar. 2008.

XIE, Y. Y. et al. Second generation high-temperature superconducting wires for fault current limiter applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, p. 1981-1985, 2007.

YANG, S. E. et al. Experimental Method for Determining the Recovery of Superconducting Fault Current Limiter using Coated Conductor in a Power System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 18, n. 2, p. 652-655, 2008.

YAZAWA, T. et al. Superconducting fault current limiter using high-resistive YBCO tapes. *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, v. 468, p. 2046-2049, 2008.

YIM, S. W. et al. Electrical Behaviour of Bi-2223/Ag Tapes Under Applied Alternating Over-Currents. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, p. 2482-2487, 2005.

ZHOU, Y. S. et al. Quench and recovery behaviors of Bi-2223/Ag HTS tapes under pulsed over-currents with different durations. *Physica C-Superconductivity and Its Applications*, v. 433, n. 1-2, p. 37-42, 2005.

ANEXO A - Fluxograma dos programas “Progaq Final Version” e “Picos I Histerese”