



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTM/12
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO -XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -
GTM**

**AValiação DA CURVA V-I DE MATERIAIS SUPERCONDUTORES PARA APLICAÇÕES NO SETOR
ELÉTRICO**

A. Polasek (*) CEPEL	R. Dias CEPEL	W.T.B. de Sousa COPPE/UFRJ	F.C. Lopes CEPEL	O. Orsino Filho CEPEL
F. G. dos Reis Martins COPPE/UFRJ	F. Sass COPPE/UFRJ	A.C. Ferreira COPPE/UFRJ	R.M. Stephan COPPE/UFRJ	R. de Andrade Jr. COPPE/UFRJ
	G. Gonçalves Sotelo UFF		D. H. Nogueira Dias UFF	

RESUMO

O levantamento da curva V-I é considerado o ensaio mais importante para aplicações de supercondutores. A curva V-I fornece a corrente crítica (I_c), acima da qual o material passa a apresentar perdas. No presente trabalho, levantou-se a curva V-I de supercondutores de alta temperatura crítica (HTS) de primeira e de segunda geração (1G e 2G). As curvas V-I foram obtidas pelo método de quatro terminais, com fontes de corrente e nanovoltímetros. As mesmas amostras foram ensaiadas em dois laboratórios diferentes. Verificou-se uma boa reprodutibilidade nos resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Supercondutores, Aplicações, Curva V-I, Corrente Crítica

1.0 - INTRODUÇÃO

Aplicações de supercondutores no setor elétrico encontram-se em franco desenvolvimento. Protótipos em escala real já tiveram seus desempenhos avaliados em redes elétricas de diversos países e certas aplicações estão em vias de comercialização (1). Para tais aplicações é fundamental avaliar a curva tensão-corrente (V-I) dos materiais supercondutores empregados. A curva V-I fornece o valor da corrente crítica de transição (I_c), acima da qual o material passa a apresentar uma resistividade significativa. Ela também mostra o grau de não linearidade da transição do estado supercondutor para o estado normal (não supercondutor). Supercondutores apresentam um comportamento V-I altamente não linear, que pode ser aproximado por $V = 0$ ($I < I_c$) e $V > 0$ ($I > I_c$). Este comportamento pode ser melhor representado pela equação (2):

$$V = V_c (I/I_c)^n \quad (1)$$

Os valores críticos V_c e I_c correspondem ao ponto em que se inicia a transição do estado supercondutor para o estado normal. O expoente n dá o grau de não linearidade desta transição. Os valores de I_c e de n dependem fortemente da temperatura, do campo magnético, do material supercondutor empregado e de sua microestrutura. Em um supercondutor ideal, perfeitamente homogêneo, o valor de I_c é o mesmo em todos os pontos e o expoente $n \rightarrow \infty$ nas vizinhanças do ponto crítico (I_c, V_c), mas em materiais reais, heterogêneos, n apresenta um valor finito variando em uma larga faixa em função do material empregado (3,4). Quanto maior o valor de n , mais homogêneo é o material. Fitas supercondutoras com boa qualidade apresentam $n = 20-50$ em baixos campos magnéticos (4).

No presente trabalho, procedeu-se ao levantamento da curva V-I de supercondutores de alta temperatura crítica (HTS - High Temperature Superconductors). Supercondutores HTS apresentam temperatura crítica de transição (T_c) superior a 30-40 K, sendo que alguns ultrapassam a temperatura do nitrogênio líquido (77 K), refrigerante relativamente barato e bastante disponível (5).

(*) CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Departamento de Tecnologias Especiais,
Grupo ELETROBRÁS, Av. Horácio Macedo, 354, 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ – Brasil,
Tel: (+55 21) 2598-6069, Fax: (+55-21) 2280-3537, E-mail: polasek@cepel.br

Fitas supercondutoras HTS de primeira e de segunda geração (1G e 2G) foram investigadas no presente trabalho, pois são os materiais mais empregados em equipamentos e dispositivos supercondutores (1). Tais fitas alcançam elevadas densidades de corrente crítica (J_c), da ordem de 10^2 - 10^4 A/mm², possibilitando a redução do peso e do volume de equipamentos e dispositivos supercondutores. A J_c é definida pela razão I_c/A , onde A é a área da seção reta de material supercondutor. As fitas 1G baseiam-se no cerâmico supercondutor Bi-2223 do sistema BSCCO (bismuto-estrôncio-cálcio-cobre-oxigênio) enquanto que as fitas 2G baseiam-se no cerâmico supercondutor YBCO (ítrio-bário-cobre-oxigênio). Estas fitas consistem em um compósito de materiais cerâmicos e metálicos. Os materiais metálicos atuam como matriz e/ou revestimento, tendo, entre outras funções, a de proteger o supercondutor e conferir maleabilidade à fita. A forma de fitas planas (ao invés de fios de seção circular) deve-se ao caráter anisotrópico dos supercondutores HTS, de modo que o material privilegie a direção preferencial de transporte de corrente (5).

As fitas supercondutoras investigadas no presente trabalho apresentaram valores de I_c na faixa de 85-142 A e expoente $n = 20$ -35, a temperatura de 77 K, sem aplicação de campo magnético externo. São apresentados resultados obtidos no Laboratório de Supercondutividade do CEPEL (LAS/CEPEL) e no Laboratório de Aplicações de Supercondutores da UFRJ (LASUP/COPPE-UFRJ), utilizando as mesmas amostras, de modo a avaliar a reprodutibilidade dos resultados. Tal intercomparação laboratorial é possivelmente pioneira no Brasil e espera-se que este trabalho induza a realização de mais comparações semelhantes visando aprimorar os procedimentos e métodos de medição de I_c de transporte (V_{xl}) adotados em diversos laboratórios.

2.0 - LEVANTAMENTO E AVALIAÇÃO DE CURVAS $V \times I$

No presente trabalho procedeu-se à medição de I_c de fitas supercondutoras HTS de três diferentes modelos e fabricantes. As mesmas amostras foram ensaiadas no LAS/CEPEL e no LASUP/COPPE, adotando-se o mesmo procedimento de medição em ambos os laboratórios, mas em sistemas de medição com características distintas, conforme descrito na próxima seção. A norma IEC61788-3 fornece um guia para a medição de corrente crítica de transporte de fios e fitas HTS 1G através do levantamento da curva V_{xl} (6). Contudo, esta norma não cobre as fitas HTS 2G, mas esforços estão sendo realizados em grupos de trabalho internacionais no sentido de desenvolver uma norma para a medição de I_c nestas fitas (7).

Em geral, a medição de I_c de fitas 1G é similar a de fitas 2G. No entanto, estas últimas requerem cuidados especiais, pois são mais sensíveis a danos por efeitos térmicos, seja durante a soldagem de contatos, seja durante a medição. Tais danos também podem ocorrer em fios e fitas 1G, mas estas são menos sensíveis, pois consistem em filamentos supercondutores em uma matriz de prata, que evita a formação e a propagação de pontos quentes. Já as fitas 2G baseiam-se em um filme fino supercondutor em uma arquitetura multicamadas de diferentes materiais com funções distintas. O revestimento metálico protege as fitas 2G, mas não confere a mesma estabilidade térmica que a prata confere às fitas 1G.

Mesmo que não ocorra dano, o aquecimento local pode provocar erros de medição tanto em fitas 1G quanto 2G (4,6). Isto se deve ao fato de o valor de I_c ser fortemente dependente da temperatura. No presente trabalho adotaram-se certos cuidados no procedimento de medição, a fim de evitar danos às fitas 2G, bem como erros devidos ao aquecimento local das amostras. Os mesmos procedimentos foram empregados às fitas 1G, para facilitar a comparação dos resultados.

2.1 Procedimento Experimental

As curvas V - I foram obtidas pelo método de quatro terminais, empregando-se fontes de corrente e nanovoltímetros. O procedimento consiste em aumentar gradualmente o valor de corrente e medir a tensão correspondente. Os equipamentos são conectados a um computador via interface GPIB-USB. Programas de aquisição e controle foram empregados para o levantamento das curvas V_{xl} . Conforme a norma, foram empregadas fontes de corrente contínua (6), pois correntes alternadas provocam dissipação não desprezível devido a fenômenos de histerese no supercondutor, bem como a correntes parasitas e a outros efeitos nas partes metálicas não supercondutoras (5). Isso não impede a aplicação em corrente alternada, mas requer procedimentos para minimizar estas perdas, em geral bem inferiores às perdas em condutores convencionais de cobre e alumínio (1). Como I_c é, por definição, a maior corrente em que as perdas são nulas, não se utiliza corrente alternada para medir I_c .

O sistema de medição utilizado no LAS/Cepel emprega uma fonte de corrente contínua de 500 A / 30 V e um nanovoltímetro. O sistema de medição empregado no LASUP/COPPE gera pulsos de corrente a partir de uma fonte de corrente contínua de 220 A / 8 V e um nanovoltímetro da mesma marca e modelo daquele empregado no CEPEL. Mais detalhes sobre o sistema de medição do LASUP/COPPE podem ser encontrados em (8). As fontes de corrente e nanovoltímetros empregados no presente trabalho atendem aos requisitos de precisão e acurácia da norma (6).

A figura 1 apresenta o porta-amstras utilizado em cada laboratório. O porta-amostra 1A (LAS/Cepel) já era utilizado para medição de fitas 1G e neste trabalho também foi empregado para fitas 2G. O porta-amstras 1B foi desenvolvido no LASUP/COPPE para a medição de fitas 2G, as quais são mais sensíveis a variações locais da temperatura do que as fitas 1G. O porta-amstras 1A tem um suporte de G10, um compósito de fibra de vidro em matriz epóxi adequado para baixas temperaturas. O porta-amstras 1B inclui uma barra de cobre eletricamente isolada para facilitar a extração de calor, de modo a manter a temperatura da amostra constante. Amostras de três diferentes fabricantes foram empregadas (Tabela 1). Os valores nominais de I_c correspondem ao valor mínimo medido pelo fabricante, posto que I_c pode variar ao longo do comprimento da fita devido a heterogeneidades do material supercondutor. As mesmas amostras foram ensaiadas no LAS/CEPEL e no LASUP/COPPE, a fim de se verificar a reprodutibilidade dos resultados. Todas as amostras tinham 70 mm de comprimento, com 10 mm de espaçamento entre os contatos de tensão e 15-30 mm de espaçamento entre cada contato de tensão e o contato de corrente mais próximo. Estes espaçamentos estão de acordo com a norma, de modo a evitar erros de medição (4, 6).

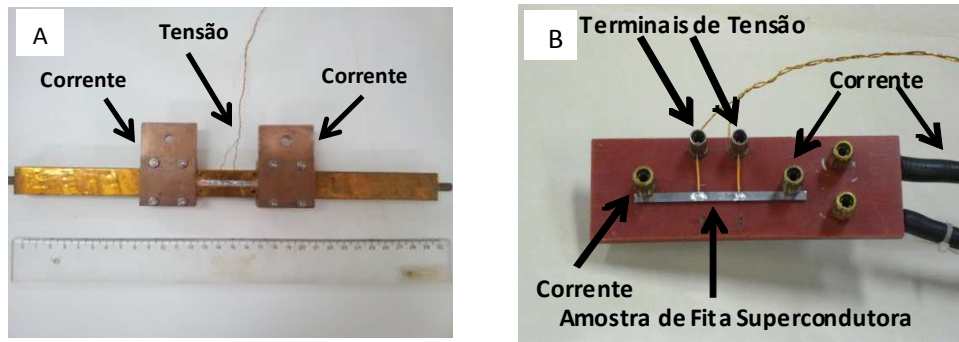


Figura 1 – Porta-amstras empregados no presente trabalho (A – LASUP/COPPE; B – LAS/CEPEL).

Tabela 1 – Amostras de fitas supercondutoras

Amostras	Geração	Revestimento	Largura (mm)	Espessura (mm)	I_c nominal (A) ¹
1A,1B	1G	Prata	4,0	0,22	70
2A,2B	2G	Cobre	4,0	0,10	130
3A,3B	2G	Aço Inox	4,5	0,16	60

¹ O valor nominal corresponde ao valor mínimo de I_c , a 77 K, conforme descrito no texto.

A ordem de grandeza das tensões medidas, sobretudo na parte inicial das curvas V-I de supercondutores até a região de transição, requer procedimento de medição adequado para evitar qualquer efeito de resistência de contato, ruídos, interferência eletromagnética e influência do arranjo de ensaio e dos instrumentos utilizados. Apesar de se utilizar o método de quatro terminais, deve-se observar que os contatos de corrente têm que ser realizados de modo a minimizar sua resistência. Isso porque o aquecimento local nos contatos pode alterar o valor de I_c , visto que este é fortemente dependente da temperatura. No caso das fitas 2G, deve-se tomar um cuidado adicional devido à possibilidade de danos ocasionados pelo aquecimento durante o processo de soldagem. Os contatos de corrente foram realizados por pressão no porta-amostra 1A e uma combinação de soldagem e pressão no porta-amstras 1B. Em todos os casos, os contatos de tensão foram realizados por soldagem. Em ambos os laboratórios empregaram-se ferros de solda com controle de temperatura e solda de baixo ponto de fusão à base de In-Sn (índio-estanho). O sobreaquecimento no ponto de solda pode provocar danos, tais como a delaminação da fita. Fluxo de solda foi aplicado sobre a superfície antes de aplicar a solda.

As amostras foram mergulhadas em banho de nitrogênio líquido (77 K), temperatura típica de operação na qual ambos os materiais estudados apresentam propriedades supercondutoras. O valor de I_c é obtido através do critério segundo o qual $I = I_c$ quando $E (V/L) = 100 \mu V/m$ ou $1 \mu V/cm$ (L é o comprimento linear do supercondutor). Esse critério é o mais comumente empregado para a medição de I_c de supercondutores HTS (4,5,6). O valor do expoente n é obtido a partir da equação abaixo, derivada da equação (1):

$$\log(V) = \log(V_c) + n \cdot \log(I/I_c) \quad (2)$$

Deste modo, n é a inclinação da reta dada pela equação (2). Quanto aos parâmetros de medição, foram utilizados tempos de integração (corrente contínua) ou largura de pulso (corrente pulsada) de 0,1 s (100 ms) por ponto de aquisição. Um tempo de aquisição muito longo pode levar ao aquecimento local e até danificar a amostra; já um

tempo muito curto tende a aumentar o efeito de ruídos. O tempo de aquisição por ponto é particularmente mais crítico no caso de fitas 2G, pois estas são mais sensíveis a aquecimentos locais, podendo delaminar-se ou até romper-se. Ainda que efeitos térmicos também possam afetar fitas 1G, estas são menos sensíveis, pois possuem uma matriz de prata que dissipa o calor mais facilmente. Testes realizados com fitas 1G e tempos de integração de até 1 s não mostraram variação significativa dos resultados obtidos com 0,1 s, de modo que se adotou o tempo de 0,1 s / ponto para todas as medições aqui apresentadas. De acordo com o fabricante dos nanovoltímetros empregados, os mesmos são otimizados para medir tensões com tempos de integração de 1 a 5 ciclos, o que em 60 Hz corresponde a um tempo de integração na faixa de 0,016 a 0,083 s (16,7 a 83,3 ms), minimizando o efeito do ruído. O intervalo entre pontos consecutivos de medição ($I=0$) deve ser suficiente para evitar efeitos térmicos. Deste modo utilizou-se intervalos de 1 - 10 s, empregando-se intervalos de 5-10 s em correntes próximas ao valor nominal de I_c . Para evitar danos às amostras, especialmente às fitas 2G, foi empregado um critério de parada, i.e., o ensaio parava quando o campo elétrico $E > 2-3 \mu\text{V}/\text{cm}$. Este valor baseou-se em informações dadas por um fabricante de fitas 2G. Foram ensaiadas duas amostras de cada fita. Cada amostra foi ensaiada de 2 a 4 vezes em cada laboratório envolvido neste trabalho. As amostras foram primeiramente ensaiadas no CEPEL e posteriormente na COPPE, após o que elas foram novamente ensaiadas no CEPEL a fim de se verificar se houve alguma modificação em relação aos resultados inicialmente obtidos no CEPEL.

2.2 Resultados e Discussão

As Figura 2 e 3 mostram as curvas V_{xl} de ensaios realizados no CEPEL e na COPPE, respectivamente. Os valores de I_c e do expoente n extraídos das curvas V_{xl} estão apresentados na Tabela 2.

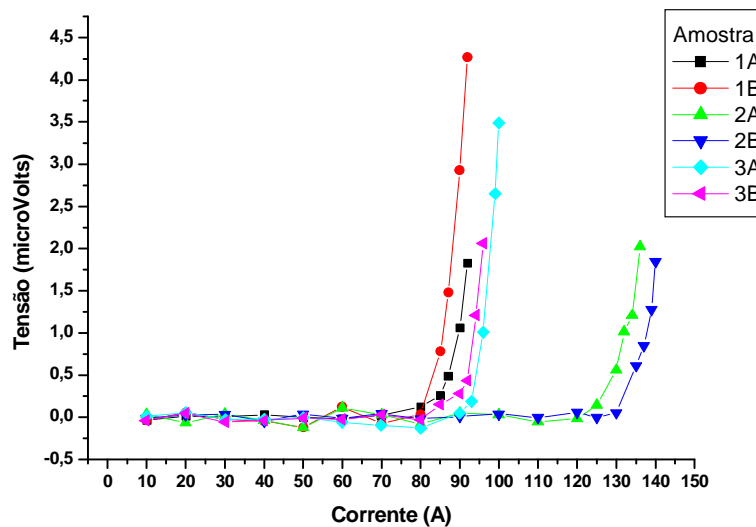


Figura 2 – Curvas V_{xl} de ensaios realizados no LAS/CEPEL.

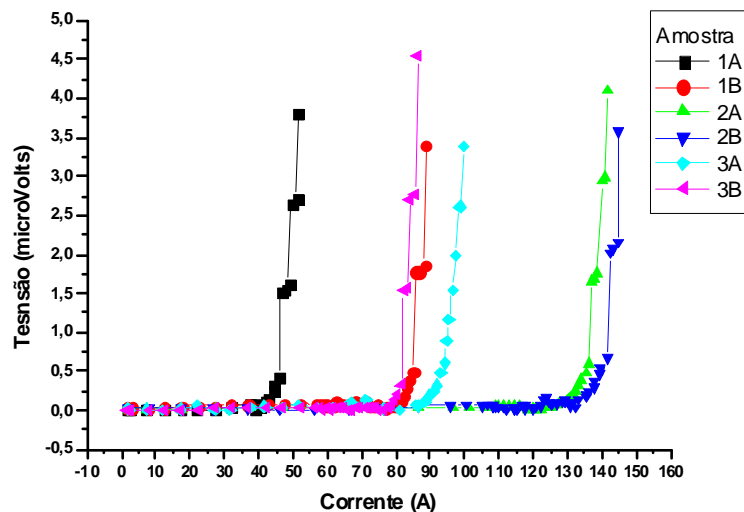


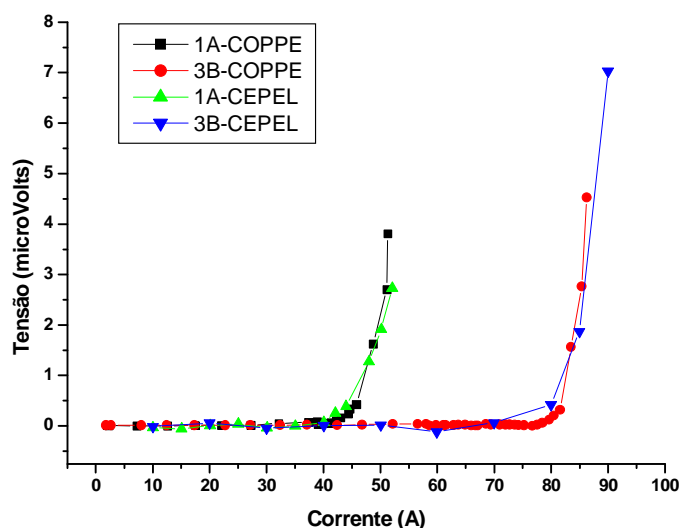
Figura 3 – Curvas V_{xl} de ensaios realizados no LASUP/COPPE.

Tabela 2 – Valores de I_c e do expoente n extraídos das curvas $V_x I$ ($I_c \pm 1A$; $n \pm$ erro)

Amostra	I_c – CEPEL (A)	I_c – COPPE (A)	n – CEPEL	n – COPPE
1A	90	46	24,2 (0,6)	8,6 (2,2)
1B	86	85	21,6 (1,2)	14,7 (9,7)
2A	132	137	23,1 (6,7)	34,2 (4,9)
2B	138	142	34,7 (5,7)	23,8 (16,9)
3A	96	95	30,5 (0,5)	24,8 (0,7)
3B	94	82	35,9 (5,1)	22,3 (5,5)

Os resultados dos ensaios, quando comparados para cada laboratório, apresentaram boa repetitividade, com variações desprezíveis entre medições efetuadas em uma mesma amostra.

Com exceção das amostras 1A e 3B, quando comparados os resultados das medições realizadas no LAS/CEPEL com os do LASUP/COPPE, os valores de I_c apresentaram uma razoável reprodutibilidade, com diferenças inferiores a 4 %. Estas diferenças são aceitáveis para fins práticos, considerando-se que a corrente de operação deve ser significativamente inferior a I_c , para evitar que instabilidades térmicas levem à transição para o estado normal. Outro fator é a própria heterogeneidade intrínseca do material cerâmico que leva às diferenças observadas entre duas amostras de uma mesma fita, medidas em um mesmo laboratório e sob as mesmas condições.

Figura 4 – Curvas $V_x I$ das amostras 1A e 3B, ensaiadas na COPPE e no CEPEL (ver texto)

As diferenças entre os resultados de I_c obtidos nos dois laboratórios, para uma mesma amostra, podem ser atribuídas a diversas causas, pois a medição de I_c é influenciada por diversos fatores, tais como porta-amostras, contatos elétricos, efeitos térmicos, sistema de medição, interferências eletromagnéticas, etc. (2,4). O valor de I_c também é sensível a tensões e deformações mecânicas, de modo que I_c depende do porta-amostras devido à contração térmica diferencial entre amostra e porta-amostras, assim como entre os diferentes materiais constituintes do porta-amostra (4,6). Os contatos elétricos também podem influenciar significativamente em função de aquecimento local induzido pelas resistências de contato. Estas podem variar de uma montagem para outra, o que também pode explicar as diferenças observadas. Contudo, a grande diferença observada entre os valores de I_c da amostra 1 A (90 e 46 A) deveu-se a uma pressão excessiva aplicada na montagem dos contatos de corrente no porta-amostras do LASUP (Figura 1), provocando danos visíveis na amostra. Isto sugere que a diferença entre os valores medidos para a amostra 3B (94 e 82 A) também possa ser devida a efeitos relacionados aos contatos elétricos, tais como aquecimento excessivo na soldagem ou pressão excessiva nos contatos de corrente do porta-amostra, visto que, em cada laboratório, os demais parâmetros de medição foram os mesmos para todas as amostras estudadas. Outra possibilidade seria uma possível degradação devido à ciclagem térmica provocada pela retirada e reinserção em banho de nitrogênio líquido. Entretanto, ensaios realizados no Cepel mostraram boa repetitividade após ciclagem térmica de amostras, o que leva à conclusão de que não foi esta a causa. Efeitos relacionados ao sistema de medição e/ou a interferências eletromagnéticas só poderiam ser de caráter aleatório, pois se fossem sistemáticos deveriam ter afetado as demais medições do mesmo modo. Considerando a alta estabilidade e classe de exatidão dos instrumentos empregados, bem como os cuidados adotados nos ensaios, é

mais provável que fatores relacionados a manuseio (montagem da amostra no porta-amostras) ou variações da resistência de contato elétrico (pressão e/ou soldagem) sejam as causas para a diferença observada entre os resultados obtidos com a amostra 3B. Para elucidar esta questão, as amostras foram novamente ensaiadas no CEPEL, após as medições realizadas na COPPE. A figura 4 mostra as curvas V_{xl} das amostras 1A e 3B obtidas na COPPE e na segunda medição realizada após o retorno das amostras para o CEPEL. Observa-se uma ótima concordância entre os resultados obtidos nos dois laboratórios para cada amostra, que por sua vez apresentam considerável discrepância em relação aos resultados obtidos na primeira medição efetuada no CEPEL (Tabela 2). Conclui-se daí que não apenas a amostra 1A danificou-se, mas que a amostra 3B também pode ter sofrido algum dano ou degradação. Vale observar que as amostras 3A e 3B são mais difíceis de serem soldadas devido ao revestimento de aço inox. Mesmo que a temperatura de soldagem seja controlada, o tempo de soldagem também é crítico e a maior dificuldade em soldar estas amostras é um possível motivo para afetar o valor de I_c . As demais amostras apresentaram valores de I_c muito próximos daqueles medidos inicialmente no CEPEL, antes de serem levadas a COPPE, indicando que as mesmas não se degradaram.

Para diversas amostras, os valores de n apresentaram uma grande dispersão, possivelmente devido a baixa amostragem de pontos acima de I_c , insuficientes para um ajuste mais adequado da curva (Equação 2). O valor de n só é calculado para $I > I_c$, não sendo definido em $I = I_c$. Uma maior amostragem em $I > I_c$ poderia ser conseguida se o critério de parada (tensão máxima) fosse maior ou se fossem adquiridos mais pontos respeitando-se o critério de parada adotado. Em ambos os casos, haveria maior risco de danificar a amostra, mas uma possibilidade futura seria realizar o ensaio com poucos pontos acima de I_c até obter-se a corrente que fornece o máximo de tensão permitido ($I_{máx}$) e posteriormente obter mais pontos no intervalo $I_c < I < I_{máx}$. Ocorre que é difícil controlar a tensão máxima previamente, dada a alta não-linearidade das curvas quando $I > I_c$. De todo modo, com exceção da amostra 1A, os valores médios observados para o expoente n são coerentes com a literatura (2,9). O valor de n está relacionado à distribuição estatística dos valores locais de corrente crítica no núcleo supercondutor (3). Quanto maior n , mais homogêneo é o material e, por conseguinte mais homogênea é a distribuição de valores locais de I_c .

3.0 - CONCLUSÃO

Os resultados de curvas V_{xl} para materiais supercondutores obtidos no presente trabalho indicaram boa repetitividade em medições de I_c realizadas para uma mesma amostra, com mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e no mesmo local, havendo uma variação dos resultados entre diferentes amostras do mesmo material (fitas 1G e 2G). As diferenças observadas entre os valores de I_c de amostras de um mesmo material foram atribuídas a heterogeneidades intrínsecas do material supercondutor.

Já nas intercomparações laboratoriais, foram observadas ligeiras diferenças entre os resultados, que podem ser principalmente atribuídas ao uso de diferentes porta-amostras e variações das resistências de contato, sem excluir a possibilidade de haver algum efeito do sistema de medição empregado em cada laboratório. Nos dois casos em que a diferença dos valores de I_c entre os dois laboratórios foi maior que as demais amostras, a variação foi atribuída a manuseio da amostra (deformação induzida por pressão nos cotantos de corrente) e possivelmente também a aquecimento excessivo durante o processo de soldagem de contatos.

Valores do expoente n ajustados para as equações que caracterizam as curvas V_{xl} apresentaram grande dispersão, possivelmente ocasionada pela baixa amostragem de pontos experimentais, insuficiente para um ajuste adequado da curva em $I > I_c$. Contudo esses valores estão na faixa esperada para estes materiais.

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam os aspectos críticos para obtenção prática de curvas V_{xl} para supercondutores, sobretudo pela ordem de grandeza das tensões a serem medidas na faixa inicial da curva e pelos cuidados necessários com os porta-amostras, bem como com a preparação das amostras e do circuito de medição. A reprodutibilidade alcançada na intercomparação laboratorial realizada, no entanto, é considerada boa e aceitável para fins práticos de aplicação de supercondutores em equipamentos e dispositivos para o setor elétrico, já que, para estas aplicações, a corrente de operação deve ser significativamente inferior à corrente crítica I_c obtida por meio da curva V_{xl} , para evitar que instabilidades térmicas levem à transição para o estado normal.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRE WG D1.15, Status of development and field test experience with high-temperature superconducting power equipment, CIGRE Tech. Broch., No 418, Junho 2010, França.
- (2) Goodrich L.F., Bray S.L. High T_c superconductors and critical current Measurement, Cryogenics Vol 30, No 667, Agosto 1990, Holanda.

- (3) Rimikis A., Kiinmich R., Schneider Th. Investigation of n-values of composite superconductors, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 10, No 2, p. 1239-, 2000, Estados Unidos.
- (4) Ekin J., Experimental Techniques for Low Temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties and Superconductor Critical-Current Testing, Oxford University Press, 2006, Estados Unidos.
- (5) Sheahen, T.P. Introduction to High-Temperature Superconductivity, Plenum Press, 1994, Estados Unidos.
- (6) INTERNATIONAL STANDARD - IEC61788-3, Second edition, 2006-04, Superconductivity – Part 3: Critical current measurement – DC critical current of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide.
- (7) IEC TC 90, Superconductivity - http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0:::FSP_ORG_ID:1285, acessada em abril de 2013.
- (8) Martins F. G. R., Sass F., Sotelo G. G., Dias D. H. N. e de Andrade Jr. R. Caracterização de Fitas Supercondutoras 2G na Presença de Campos Magnéticos, XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2012, de 02 a 06 de setembro de 2012, Campina Grande, Paraíba. Anais do CBA 2012, p. 2642, Brasil.
- (9) Nishijima G., et al. Ic–B–T Evaluation for High-Tc Superconductors in Pressurized/Depressurized Liquid Nitrogen, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 23, NO. 3, 2013, Estados Unidos.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Alexander Polasek nasceu no Rio de Janeiro-RJ em 1972. Em 1995, graduou-se em Engenharia Metalúrgica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), onde também obteve os títulos de Mestre (1997) e Doutor (2002) em Ciência e Engenharia de Materiais. Parte de seu doutorado foi realizada no Max-Planck-Institut für Metallforschung, em Stuttgart, Alemanha. Atualmente, é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Grupo ELETROBRÁS. Atua na pesquisa e no desenvolvimento de materiais e dispositivos supercondutores voltados para o setor elétrico de potência, com ênfase em limitadores de corrente de curto-circuito. Também atua em P&D de nanocompósitos poliméricos para isolamento elétrico e no estudo de baterias avançadas. É membro do CIGRÉ.

Rodrigo Dias nasceu no Rio de Janeiro-RJ em 1984. Formou-se como Técnico em Metal-Mecânica pelo CEFET/RJ e possui Título de Técnico credenciado pelo CREA/RJ desde 2001. Iniciou sua carreira na Divisão de Potência e Automação da ABB, onde permaneceu até 2007. Atualmente exerce a função de Técnico de Laboratório do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Grupo ELETROBRÁS, onde atua nas áreas de Engenharia de Materiais e de Engenharia Elétrica. Participa de projetos de pesquisas em Células a Combustível, Limitadores de Corrente Supercondutores e Baterias de Sódio.

Flávio Goulart dos Reis Martins nasceu em 1988 no Rio de Janeiro. Graduado em Engenharia Elétrica (2012) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente é aluno de mestrado também pela UFRJ, na área de Eletrônica de Potência. Suas especializações são nas áreas de aplicações de dispositivos supercondutores em sistemas elétricos, em especial, no desenvolvimento de máquinas elétricas com fitas supercondutoras de segunda geração.

Felipe Sass nasceu em Niterói, RJ, Brasil, em 1985. Graduou-se engenheiro eletricista pela Universidade Federal Fluminense (UFF) no ano de 2008. Concluiu o mestrado na área de eletrônica de potência pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) no ano de 2011. Atualmente é aluno de doutorado na área de eletrônica de potência e professor do departamento de engenharia elétrica da UFRJ. Sua experiência profissional inclui o desenvolvimento de equipamentos elétricos e eletrônicos e seus trabalhos mais recentes foram nas áreas de mancais magnéticos e supercondutividade.

Orsino Borges Filho nasceu em Itapira, SP, Brasil, em 1959. Graduou-se em Engenharia Eletrotécnica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ em 1984, M.Sc. pela COPPE/UFRJ em 1991. Trabalha como engenheiro pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel desde 1984, atuando em projetos de P&D sobre equipamentos elétricos e técnicas de ensaio e medição em Alta Tensão. Atualmente é coordenador do Comitê de Estudos – CE D1: Materiais e Tecnologia Emergentes de Ensaio do Cigre-Brasil.

Wescley Tiago Batista de Sousa nasceu em Santo André, São Paulo, Brasil, em 1983. Graduou-se em Bacharelado em Física pela Universidade Estadual de Ponta Grossa, PR, em 2008. É mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009). Entre 2009 e 2012 foi bolsista do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobras - CEPEL) e atualmente é aluno de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro com período no exterior (Karlsruher Institut für Technologie - Alemanha). Sua experiência profissional inclui processamento, caracterização e simulações de materiais supercondutores para aplicações tecnológicas.

Guilherme Gonçalves Sotelo nasceu no Rio de Janeiro em 1977. Possui graduação em Licenciatura em Física (2000) e em Engenharia Elétrica (2009) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Obteve os títulos de Mestre (2003) e Doutor (2007) em Ciências em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ. Fez pós-doutorado no LASUP (Laboratório de Aplicação de Supercondutores) da UFRJ entre 2007 e 2009. De 2009 até a data atual ocupa o cargo de Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica (TEE) da Universidade Federal Fluminense (UFF). Tem experiência na área de aplicação de dispositivos supercondutores em sistemas elétricos, magnéticos e mecânicos, simulação de dispositivos eletromagnéticos pelo método de elementos finitos, modelagem matemática de supercondutores com modelos fenomenológicos e desenvolvimento de sistemas de medidas e instrumentação.

Daniel Henrique Nogueira Dias possui graduação em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2003), mestrado em Física pela Universidade Federal Fluminense (2005), Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009) e graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2011). Atualmente exerce o cargo de Professor Adjunto I da Universidade Federal Fluminense no Departamento de Engenharia Elétrica. Tem experiência na área de Física, com ênfase em Física da matéria condensada, e Engenharia Elétrica, na área de Sistemas de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Supercondutividade e sua aplicação em dispositivos elétricos. Trabalha atualmente no desenvolvimento de tecnologias que utilizem mancais magnéticos supercondutores, como por exemplo Flywheels e veículos Maglev, e a utilização de fios supercondutores de segunda geração (fios 2G) no desenvolvimento de equipamentos elétricos.

Rubens de Andrade Junior nasceu em Araçatuba (SP) em 1962, é Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) desde 1999. Recebeu os títulos de Bacharel e Licenciado em Física, Mestre em Física e Doutor em Ciências da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) em 1985, 1989 e 1995 respectivamente. Trabalhou com superfícies seletivas para aquecedores solares, deposição eletroquímica de ligas, dinâmica de vórtices de supercondutores e preparação e caracterização de supercondutores de alta temperatura crítica. No momento seu principal interesse é no estudo, simulação, projeto e construção de dispositivos supercondutores. Participa da equipe do projeto Maglev-Cobra da UFRJ desde o seu início em 1998. Desenvolve também projetos de Limitadores de Corrente de Curto Circuito, em parceria com o CEPEL/Eletróbrás, e Motores Elétricos Supercondutores, em parceria com a UFF – Universidade Federal Fluminense.

Francisco da Costa Lopes nasceu no Rio de Janeiro, RJ, em 26 de outubro de 1976. Possui graduação em Engenharia Eletrônica pela UFRJ (2003), é mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ (2006) e doutorando em Engenharia Elétrica pela mesma COPPE/UFRJ. Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletróbras Cepel) onde realiza pesquisa com células a combustível, sistemas de geração distribuída, limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores e sistemas de armazenamento de energia.

Antonio C. Ferreira nasceu em Muiraé, MG, Brasil, em 1963. Recebeu os títulos de Engenheiro (1987) e M.Sc. (1991) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil e Ph.D. da Universidade de Cambridge, Reino Unido (1997), todos em Engenharia Elétrica. É professor e coordenador do Programa de Engenharia Elétrica/COPPE/UFRJ. Seus principais interesses são sistema de potência e máquinas elétricas. Antonio leciona em níveis de graduação e pós-graduação e tem participado de vários projetos de pesquisa financiados pelo governo e indústria.

Richard M. Stephan, carioca nascido em 1953 e formado em Engenharia Elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) em 1976. Possui o título de M.Sc. pela COPPE/UFRJ (1980) e Dr.-Ing. pela Ruhr-Universitaet Bochum, Alemanha (1985), ambos em Sistemas de Controle. MBA (2005) pelo Centre for Scientific Enterprise Limited (CSEL), UK, em transferência e comercialização de inovações tecnológicas. Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ trabalha com projetos nas áreas de Acionamento Eletrônico, Controle de Máquinas Elétricas, Levitação Magnética e Supercondutividade