

ENSAIOS COM MÓDULOS SUPERCONDUTORES PARA LIMITAÇÃO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

A. POLASEK*
Cepel
Brasil

R. DIAS
Cepel
Brasil

F.A. SILVA
Cepel
Brasil

F. C. LOPES
Cepel
Brasil

E.T. SERRA
Cepel
Brasil

O. ORSINO FILHO
Cepel
Brasil

Resumo – Limitadores de Corrente Supercondutores (LCSC's) começam a entrar no mercado. O funcionamento do LCSC baseia-se na rápida transição do supercondutor para o estado normal, provocando um súbito aumento da impedância da rede. No presente trabalho, são apresentados e analisados os resultados de ensaios realizados com módulos LCSC's do tipo resistivo. Estes módulos foram conectados em série ($1kV_{ef}/300A_{ef}$). Correntes de Curto-circuito de até $90kA_{pico}$ (correntes presumidas) foram limitadas a cerca de $11kA_{pico}$ no primeiro quarto de ciclo. Os resultados revelam que o valor de corrente limitada depende pouco do valor de corrente presumida, o que é uma grande vantagem deste tipo de limitador.

Palavras chave: Limitador de corrente de curto-circuito – Supercondutor – Bi-2212

1 INTRODUÇÃO

Quando da efetiva expansão do consumo e, conseqüentemente, da oferta de energia elétrica em uma rede, é inevitável o aumento dos níveis de corrente de curto-circuito e considerações devem ser feitas sobre a provável superação da capacidade operacional de equipamentos e dispositivos existentes na rede elétrica, que pode resultar em danos e falhas com impacto no suprimento [1]. Os limitadores de corrente supercondutores (LCSC's) têm demonstrado desempenho excepcional para evitar essa superação [2,3]. Há vários tipos de LCSC baseados em diferentes conceitos e modos de atuação [4]. Atualmente, o LCSC do tipo resistivo é o que está em maior ascensão, devido à sua alta capacidade de redução da corrente de curto-circuito, sua relativa simplicidade e sua baixa relação reatância/resistência (X/R). O LCSC resistivo baseia-se na rápida transição de estado do material supercondutor frente a picos de corrente, o que se traduz em um súbito aumento de impedância na rede. O LCSC atua por tempo suficiente para que o disjuntor abra em segurança. Após o curto-circuito, o LCSC volta naturalmente ao seu estado inicial, através do resfriamento do material supercondutor, que está permanentemente imerso em nitrogênio líquido. Portanto, o LCSC resistivo não requer qualquer sensor ou mecanismo de acionamento e de desligamento. Durante a operação normal da rede, o LCSC apresenta impedância desprezível, pois se encontra no estado supercondutor (temperatura e corrente abaixo dos valores críticos, T_c e I_c , respectivamente). Em 2009, os primeiros LCSC's comerciais foram instalados em redes de distribuição, enquanto que protótipos para transmissão encontram-se em desenvolvimento [5, 6].

No presente trabalho, são apresentados resultados de ensaios de limitação de curto-circuito com um conjunto de módulos limitadores comerciais baseados no supercondutor Bi-2212. Este material é um dos principais cerâmicos supercondutores de alta temperatura crítica (T_c). Supercondutores de alta T_c são aqueles cuja temperatura de transição para o estado normal está acima de 30-40 K (Kelvin). De particular interesse são

aqueles cuja T_c é maior do que a temperatura do nitrogênio líquido (77 K), pois este refrigerante reduz em muito o custo de refrigeração, quando comparado ao hélio líquido empregado nos supercondutores de baixa T_c . Correntes presumidas (correntes medidas sem a presença do limitador no circuito) de 30 a 90 kA_{pico} (23 a 63 kA_{ef}) foram limitadas a menos de 11 kA_{pico} no primeiro quarto de ciclo, sob uma tensão de até 1 kV_{ef}. O valor de corrente limitada depende pouco do valor de corrente presumida, o que é uma grande vantagem do limitador resistivo. Contudo, os módulos são sensíveis à tensão e à duração do curto-circuito a que são submetidos. A duração do curto-circuito e a tensão entre os terminais do limitador não podem ultrapassar os valores máximos especificados pelo fabricante.

2 ENSAIOS

Módulos limitadores fabricados pela NEXANS SuperConductors GmbH (www.nexans.com) foram utilizados nos ensaios. Estes módulos consistem de elementos helicoidais à base do supercondutor Bi-2212 revestidos com uma liga metálica de baixa condutividade (cerca de 4% da condutividade do cobre). Esta liga é soldada ao longo de todo o elemento, atuando como *shunt* durante a limitação da corrente [7]. O *shunt* promove a homogeneidade da transição do supercondutor para o estado normal, evitando a propagação de pontos quentes oriundos de heterogeneidades intrínsecas ao cerâmico supercondutor. Quando o supercondutor transita para o estado normal, a maior parte da corrente flui para o *shunt*. Cada módulo limitador é dotado de terminais de cobre em suas extremidades possibilitando a conexão em série e/ou em paralelo com outros módulos similares, para atender as especificações de tensão e corrente nominais para cada aplicação.

Ao todo, 12 módulos limitadores foram conectados em série através de abraçadeiras de cobre. Os módulos supercondutores apresentam valores de corrente crítica de transição (I_c) de aproximadamente 500 A CC¹. A corrente crítica de transição é medida através do levantamento da curva $V \times I$ de cada módulo. A medição é realizada pelo método dos quatro pontos e o valor de I_c é definido pelo critério de 1 microVolt/cm, segundo o qual, $I = I_c$ quando $V/L = 1$ microVolt/cm (L = comprimento total do elemento supercondutor). O conjunto foi montado em uma estrutura projetada pelo fabricante para suportar as condições de ensaio em baixa temperatura. O conjunto de módulos pode ser observado na Fig. 1, a qual mostra também hastes metálicas de suporte e placas à base de uma resina polimérica reforçada com fibra de vidro. Este material apresenta excelente comportamento mecânico e alta rigidez dielétrica quando resfriado em nitrogênio líquido [6].

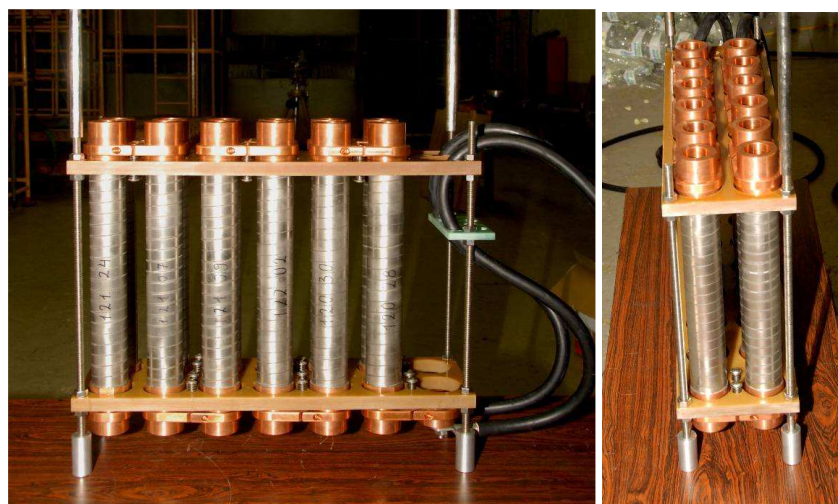


Fig. 1 - Conjunto de 12 módulos limitadores supercondutores conectados em série. A foto à esquerda mostra os cabos empregados para conectar os limitadores ao circuito de ensaios no CEPEL.

¹ A corrente crítica é medida em corrente contínua, pois corresponde ao maior valor de corrente que pode fluir no supercondutor sem que haja perdas. Em corrente alternada, há perdas relativamente baixas, devido a um fenômeno de histerese magnética, a correntes de fuga e de acoplamento.

O conjunto mostrado na Fig. 1 foi mergulhado em um banho de nitrogênio líquido, como pode ser visto na Fig. 2. O reservatório de nitrogênio líquido mostrado na Fig. 2 é feito de polipropileno expandido (EPP), material similar ao isopor, mas com maior resistência mecânica e melhor capacidade de isolamento térmico. Este método de resfriamento em banho aberto de nitrogênio líquido atende perfeitamente aos propósitos dos ensaios realizados no presente trabalho. Cabe ressaltar que LCSC's para aplicação na rede elétrica empregam um reservatório (criostato) fechado e pressurizado conectado a um sistema de resfriamento de ciclo fechado (*cryocooler*) que reaproveita o nitrogênio evaporado [5,6].

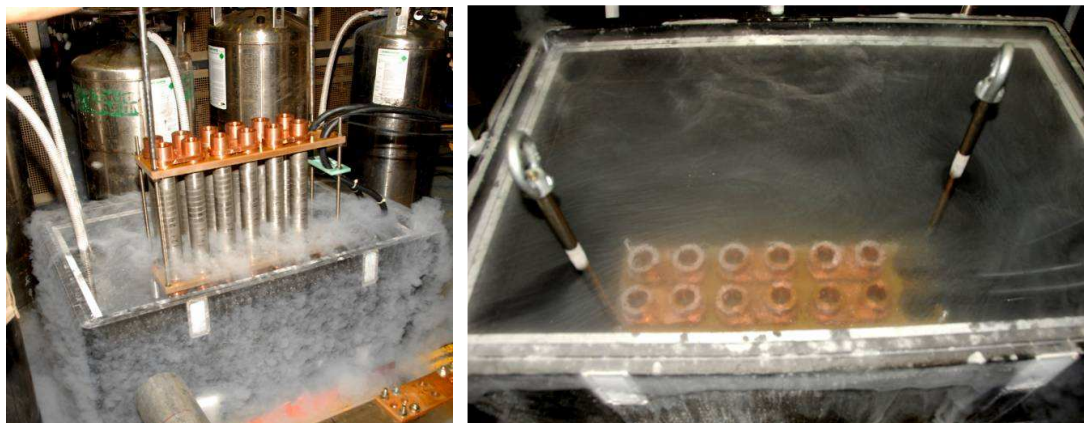


Fig. 2 - Conjunto de módulos limitadores supercondutores em banho de nitrogênio líquido no CEPTEL.

Os ensaios de curto-circuito foram realizados no Laboratório de Alta Corrente do Cepel - Unidade de Adrianópolis. O circuito de ensaio foi configurado para aplicação de curtos monofásicos. A Fig. 3 mostra um esquema simplificado deste circuito, o qual é composto de dois transformadores; o primeiro reduz a tensão da rede de entrada do Cepel de 138 kV para 4,16kV; o segundo reduz a tensão V_a , controlada pelos valores da resistência R e da indutância L , para um valor V_o dentro do limite de suportabilidade do LCSC sob ensaio. O curto-circuito é controlado pela abertura ou fechamento da chave S . As impedâncias no lado de 138 kV e no lado de V_o , desconhecidas *a priori*, são rebatidas para o lado de “média” tensão (trecho do circuito onde está a chave S) e somadas a R e L . Em geral, os valores das resistências e indutâncias presentes no lado de 138 kV e no lado de V_o são bem inferiores aos valores das cargas R e L . Deste modo, pode-se considerar que as cargas R e L têm valores próximos aos da resistência e da indutância equivalentes de todo o circuito.

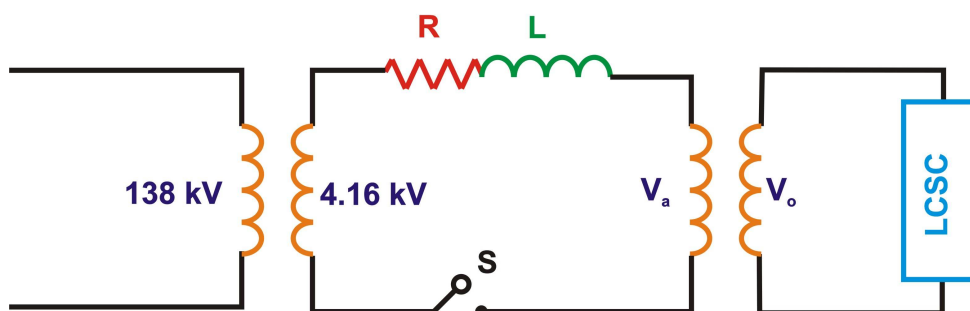


Fig. 3 - Esquema simplificado do Circuito de Ensaio empregado no presente trabalho.

O LCSC foi conectado ao circuito através de cabos convencionais de cobre (Fig. 1). Adicionalmente, outros dois cabos conectaram um divisor de tensão aos terminais do LCSC. Os sinais de medição de corrente e tensão foram transmitidos dos sensores ao sistema de aquisição de dados do laboratório por meio de fibras ópticas. Antes de cada ensaio de limitação de corrente, foi realizada uma aplicação de curto-circuito sem a presença do LCSC. No lugar do mesmo era colocada uma barra de cobre, a fim de se medir o valor de corrente presumida. Os ensaios de limitação de corrente foram realizados pelo menos duas vezes para cada

valor de corrente presumida, a fim de se verificar a repetibilidade dos resultados. Cada ensaio teve a duração de 60 ms. Foram realizados ensaios com circuito predominantemente resistivo ($R \gg L$) e circuito predominantemente indutivo ($L \gg R$). Em todos os ensaios, o LCSC ficou sempre completamente submerso em nitrogênio líquido, através da monitoração visual e reposição de nitrogênio sempre que necessário. Seguindo recomendação do fabricante, aguardou-se de 10 a 15 minutos entre os ensaios, de modo a garantir que a temperatura do dispositivo retornasse à temperatura do banho de nitrogênio líquido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 4 mostra o resultado de um ensaio de limitação em circuito predominantemente resistivo. A corrente presumida foi de $28 \text{ kA}_{\text{pico}}$ ($20 \text{ kA}_{\text{ef}}$), no primeiro pico negativo, com $V_o = 600 \text{ V}_{\text{ef}}$. O oscilograma mostra que o LCSC limitou a corrente presumida a apenas 5-6 kA nos primeiros picos e 2-3 kA nos picos subsequentes. A diferença entre os primeiros picos de corrente e os subsequentes deve-se ao fato do elemento supercondutor só transitar completamente para o estado normal em um intervalo de meio ciclo a um ciclo [3, 7]; quando esta transição se completa, o material atinge um valor de resistência muito superior à do *shunt*, de modo que quase toda a corrente passa a circular pelo *shunt* até que o disjuntor seja aberto. No *shunt*, a corrente tende a um valor praticamente constante, já que sua resistência pouco depende da temperatura [8]. Apesar de o limitador começar a atuar em menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo, a resistência do elemento supercondutor continua aumentando até atingir um valor máximo de saturação. Isto se deve à inércia térmica deste elemento. Quando a corrente supera o valor crítico do supercondutor (I_c), inicia-se um processo dissipativo devido ao movimento de vórtices magnéticos presentes no interior do supercondutor e esta dissipação provoca o aumento da temperatura do supercondutor [9]. A transição ocorre quando a temperatura supera o valor de T_c do supercondutor (92-95 K para o material aqui estudado). Quanto maior for a diferença entre o valor da sobrecorrente no supercondutor e a o valor de I_c , mais rápida será esta transição do estado supercondutor para o estado normal, devido à maior quantidade de energia envolvida. Mais detalhes sobre o comportamento do supercondutor na transição para o estado normal podem ser vistos em [8], que descreve simulações da limitação de corrente realizadas pelo grupo do Cepel. O “estado normal” é o estado em que o material torna-se resistivo, deixando de ser supercondutor.

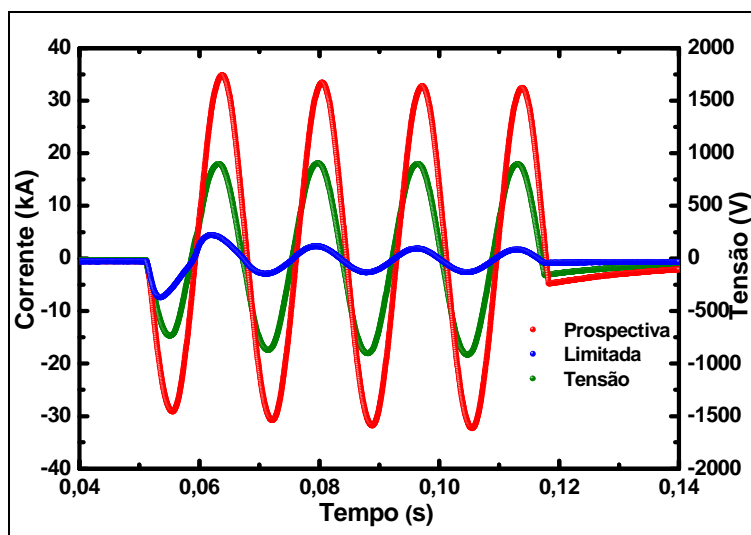


Fig.4 - Ensaio de limitação de corrente com o LCSC. Corrente presumida = $28 \text{ kA}_{\text{pico}}$ ($20 \text{ kA}_{\text{ef}}$); $V_o = 600 \text{ V}_{\text{ef}}$. Circuito predominantemente resistivo ($R \gg L$).

O valor de tensão entre os terminais do LCSC atingiu cerca de $544 \text{ V}_{\text{ef}}$ no último semi-ciclo (Fig. 4). A proximidade entre este valor e o de V_o ($600 \text{ V}_{\text{ef}}$) mostra que o LCSC atingiu uma impedância muito acima da soma das demais impedâncias do circuito de ensaio (Fig. 3).

A discussão sobre o comportamento mostrado na Fig. 4 é válida para os próximos resultados. A Fig. 5 mostra o oscilograma de um ensaio com corrente presumida de $32 \text{ kA}_{\text{pico}}$ ($23 \text{ kA}_{\text{ef}}$) e $V_o = 1 \text{ kV}_{\text{ef}}$, em um

circuito predominantemente resistivo. O comportamento é similar ao mostrado no oscilograma anterior, sendo que, desta vez, a corrente no primeiro semi-ciclo (negativo) foi limitada em $8,3 \text{ kA}_{\text{pico}}$, tendo se reduzido a $3,1 \text{ kA}_{\text{pico}}$ a partir do terceiro semi-ciclo. A tensão no último semi-ciclo foi de $899 \text{ V}_{\text{ef}}$.

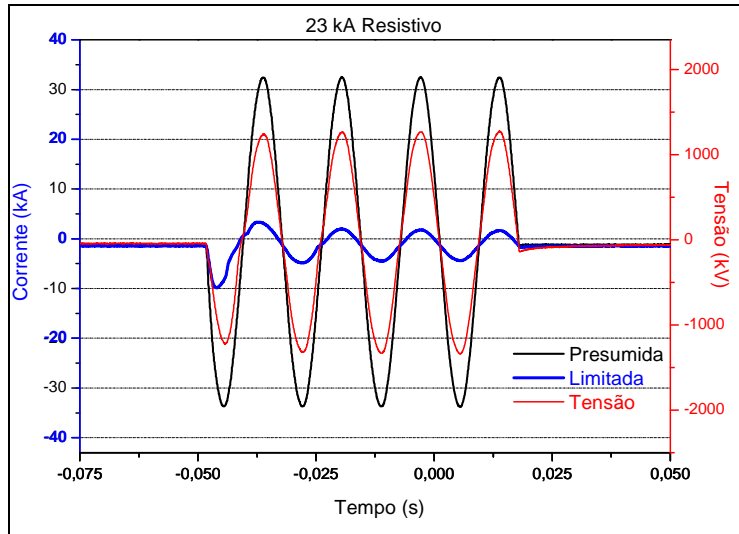


Fig. 5 - Ensaio de limitação de corrente. Corrente presumida = $32 \text{ kA}_{\text{pico}}$ ($23 \text{ kA}_{\text{ef}}$); $V_o = 1 \text{ kV}_{\text{ef}}$. Circuito predominantemente resistivo ($R \gg L$).

As figuras 6 e 7 apresentam resultados obtidos para um circuito predominantemente indutivo. Em ambos os casos empregou-se $V_o = 1 \text{ kV}_{\text{ef}}$, sendo que a Fig. 6 corresponde a uma corrente presumida de $33 \text{ kA}_{\text{pico}}$ ($23 \text{ kA}_{\text{ef}}$), no primeiro pico negativo, e a Fig. 7 corresponde a uma corrente presumida de $92 \text{ kA}_{\text{pico}}$ ($63 \text{ kA}_{\text{ef}}$), no primeiro pico negativo. As distorções presentes em ambos os oscilogramas devem-se à saturação do núcleo do transformador do circuito de ensaios, pois o valor de V_o estava muito próximo ao valor máximo do *tap* empregado nestes ensaios.

A comparação entre as figuras 5 e 6 mostra que, para um mesmo valor eficaz de corrente presumida ($23 \text{ kA}_{\text{ef}}$) e uma mesma tensão V_o (1 kV_{ef}), o valor de corrente limitada foi maior no caso indutivo ($10 \text{ kA}_{\text{pico}}$ no primeiro pico e $5\text{-}3 \text{ kA}_{\text{pico}}$ nos picos subseqüentes). Já a comparação entre as figuras 6 e 7 mostra que ao se aumentar o valor da corrente presumida em quase 3 vezes, pouca variação sofre a corrente limitada ($10,8 \text{ kA}_{\text{pico}}$ no primeiro pico e $5,8 - 3,3 \text{ kA}_{\text{pico}}$ no picos subseqüentes).

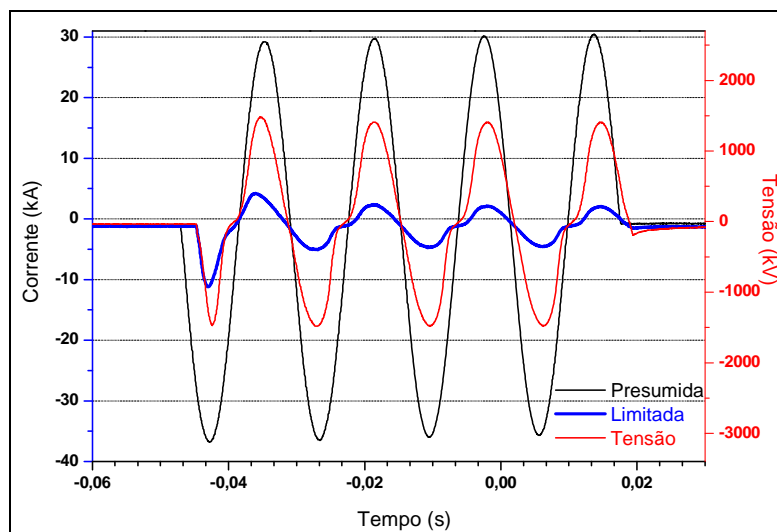


Fig. 6 - Ensaio de limitação de corrente. Corrente presumida = $33 \text{ kA}_{\text{pico}}$ ($23 \text{ kA}_{\text{ef}}$); $V_o = 1 \text{ kV}_{\text{ef}}$. Circuito predominantemente indutivo ($L \gg R$).

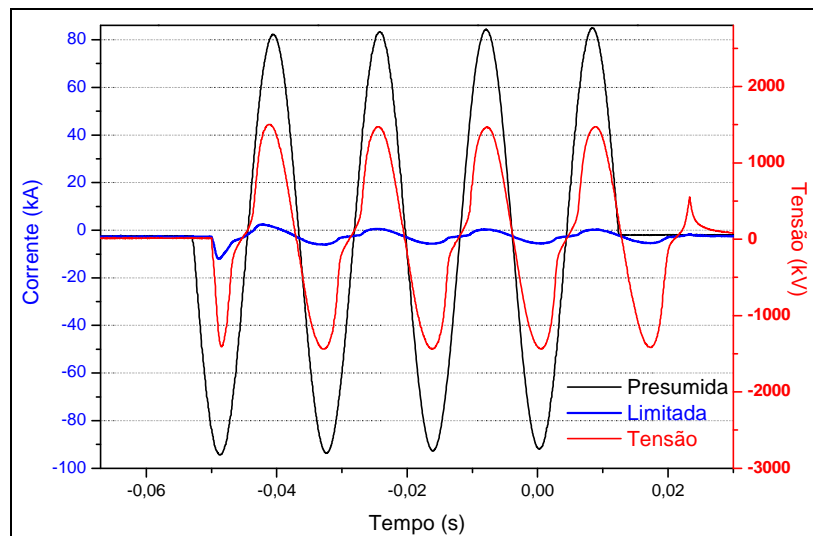


Fig. 7 - Ensaio de limitação de corrente. Corrente presumida = 92 kA_{pico} (primeiro pico negativo) (63 kA_{ef}); $V_o = 1$ kV_{ef}. Circuito predominantemente indutivo ($L \gg R$).

Portanto, a corrente limitada varia pouco com o valor da corrente presumida. Este resultado está em acordo com resultados de ensaios anteriores [3]. A baixa correlação entre o valor da corrente limitada e o da corrente presumida é uma característica vantajosa dos limitadores de corrente supercondutores do tipo resistivo [7]. Por outro lado, aumentos significativos da corrente limitada podem ser observados quando se aumenta V_o ou quando se passa de um circuito resistivo para um indutivo, conforme pode ser observado através da comparação dos resultados apresentados neste trabalho. No entanto, o LCSC mostrou uma alta capacidade de limitação de corrente em todos os ensaios realizados, reduzindo a corrente presumida a 10-30% do seu valor no primeiro pico.

No caso de circuito indutivo, observou-se também que o emprego do LCSC resistivo reduziu a assimetria da corrente de curto-circuito. Isto se deve à redução da razão X/R do circuito promovida pela introdução do LCSC resistivo.

Os módulos limitadores são sensíveis à tensão entre seus terminais e à duração do curto-circuito. De acordo com o fabricante, os limites suportáveis por cada módulo empregado são 138 V_{ef} / 80 ms ou 81 V_{ef} / 120 ms. Para 12 módulos conectados em série tem-se: 1,65 kV_{ef} / 80 ms ou 972 V_{ef} / 120ms. Se estes limites forem ultrapassados, o *shunt* pode superaquecer-se danificando o dispositivo. No presente trabalho, os ensaios foram realizados com boa margem de segurança: todos os ensaios duraram cerca de 60 ms e a tensão máxima foi inferior a 1 kV_{ef}. Esse limite de tensão máxima nos terminais dos limitadores foi controlado, na prática, por meio do valor de V_o obtido pelo circuito de ensaio mostrado na Fig. 3.

Outro parâmetro crítico é o intervalo entre ensaios sucessivos. Este intervalo deve ser suficiente para que o material volte à temperatura do nitrogênio líquido e retorne ao estado supercondutor. Para módulos limitadores com os empregados no presente estudo (Bi-2212 bulk), este tempo é da ordem de 10 minutos. Ensaios sucessivos com intervalos de 30 a 60 segundos danificaram um módulo supercondutor semelhante [10]. Materiais supercondutores menos massivos do que os elementos Bi-2212 “bulk”, ou seja, com menor inércia térmica, podem reduzir consideravelmente o tempo de recuperação. Este é o caso de limitadores à base de fios supercondutores de segunda geração à base do supercondutor (material) YBCO [6]. Tais fios permitem tempos de recuperação da ordem de segundos. Por outro lado os módulos Bi-2212 “bulk” apresentam certas vantagens em relação aos fios de segunda geração [11]. A principal é a capacidade de suportar correntes de *inrush* por 10 a 15 segundos sem transitar para o estado normal e sem se danificar [5, 11]. Estas correntes de *inrush* são da ordem de 2 a 4 vezes a corrente nominal, não sendo portanto suficientes para promover a transição do bobina supercondutora (bulk Bi-2212) em 10-15 segundos. Já as correntes de

curto-circuito são muito superiores às corrente de *inrush*, provocando a atuação do limitador em poucos milissegundos. Por outro lado, limitadores baseados em fios de segunda geração são bem mais sensíveis a correntes de *inrush* podendo atuar e até ficar danificados devido às mesmas. Portanto, a escolha entre um ou outro tipo de material pode variar de acordo com as exigências de cada aplicação específica na rede. Do mesmo modo, a configuração do dispositivo LCSC, que se traduz em tensão e corrente nominais, dependerá das solicitações a que o dispositivo será submetido no ponto da rede em que for instalado.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram realizados ensaios de limitação de corrente com um conjunto de módulos limitadores de corrente supercondutores (LCSC's) conectados em série. Estes módulos baseiam-se em elementos helicoidais à base do supercondutor Bi-2212 na forma maciça (*bulk*). Os resultados mostraram a efetividade do dispositivo na limitação de correntes de curto-circuito, sendo capaz de reduzir o primeiro pico de corrente a 10-30% do valor presumido (sem o limitador) e 10-15% do valor presumido nos demais picos. Contudo, os módulos empregados requerem cerca de 10 minutos de intervalo entre aplicações sucessivas de curto-circuito, a fim de recuperar completamente o estado supercondutor. Isso limita a aplicação destes módulos limitadores a pontos da rede que possam ficar desenergizados por vários minutos. Uma aplicação viável e interessante é em acoplamentos de barramentos [1,4-6]. Outra possibilidade também testada com sucesso é conectar limitadores supercondutores a geradores auxiliares de usinas elétricas [5].

O limitador supercondutor do tipo resistivo apresenta certas vantagens, como baixa correlação entre a corrente limitada e a corrente presumida e redução da relação X/R do circuito. No caso de circuitos indutivos, a redução da relação X/R traduz-se em diminuição da assimetria da corrente de curto-circuito, bem como da defasagem entre corrente e tensão.

Limitadores supercondutores à base da tecnologia empregada no presente estudo já começam a entrar no mercado. A escolha do material supercondutor e da configuração do limitador (tensão e corrente nominais) dependem dos requisitos de cada aplicação específica na rede elétrica.

5 AGRADECIMENTOS

A todo o pessoal do Lab. de Alta Corrente do CEPEL, Unidade Adrianópolis, pelo inestimável apoio para a realização dos ensaios de limitação de corrente de curto-circuito.

6 REFERÊNCIAS

- [1] A3-03 (SC) 13 IWD, "Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems", Working Group 10 of Study Committee A3 (High Voltage Equipment), CIGRÉ, June 2003.
- [2] A. Polasek, M.A. Sens, E.T. Serra - "Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores", in Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu - PR, Maio, 2007.
- [3] A. Polasek, R., Dias, O. Orsino Filho, D.B. Niedu, "Short-Circuit Testing of Monofilar Bi-2212 Coils Connected in Series and in Parallel", Journal of Physics: Conference Series 234 032048, 2010
- [4] M. Noe and M. Steurer - "High-temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status", Superconductor Science and Technology, vol. 20, 2007, p. 15-29.
- [5] R Dommerque et al, "First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: production, test and installation", Supercond. Sci. Technol. 23 034020, 2010.
- [6] CIGRE Paper No. D1-418, "Status of Development and Field Test Experience with High-Temperature Superconducting Power Equipment", By WG SC D1.15, June, 2010

[7] S. Elschner et. al., "Manufacturing and Testing os MCP-2212 Bifilar Coils for a 10MVA Fault Current Limiters", IEEE Trans. App. Superconductivity, vol. 18, n° 2, p. 1980-1983, June 2003.

[8] W.T.B. de Souza et al., "ENSAIOS E SIMULAÇÕES PARA LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO CIRCUITO SUPERCONDUTOR MCP – BSOCO – 2212 TIPO RESISTIVO", submetido para o XIV ERIAC, Ciudad del Este, Paraguay, 22 a 26 de maio de 2011

[9] W.Paul, et al. - "Fault Current Limiter Based on High Temperature Superconductors - Different Concepts, test results, simulations, applications", Physica C, Elsevier, 2001, p. 27-33.

[10] A. POLASEK, C.V. de SENA, R. Dias, E.T., SERRA, F. C. Rizzo, "Testing of a resistive fault current limiter component based on Bi-2212 bifilar coils", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 19, Issue 3, Pages:1823 – 1826, 2009.

[11] S. Elschner et al., "ENSYSTROB - Resistive Fault Current Limiter based on Coated Conductors for Medium Voltage Application", Applied Superconductivity Conference, Washington D.C., USA, 2010