



## XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

### Estudo de Caso das Falhas em Transformadores de Corrente de Neutro em Banco de Capacitores de 138kV

<b>José Romeu Dellacqua</b>	<b>Lino Henrique Pedroni Jr</b>	<b>Rodrigo Gasparini Croce</b>
<b>EDP-ECELSEA</b>	<b>EDP-ECELSEA</b>	<b>EDP-ECELSEA</b>
jromeu@edpbr.com.br	lino.pedroni@enbr.com.br	gasparini@edpbr.com.br

#### Palavras-chave

Banco de Capacitores  
Transformadores de Corrente  
Sobretensões

#### Resumo

Em recentes substituições de transformadores de correntes (TCs) nos neutros de bancos de capacitores de 138kV, instalados em subestações da Espírito Santo Centrais Elétricas S/A (EDP-ECELSEA), verificou-se que esses equipamentos novos (TCs em EPOXI) estavam falhando prematuramente. Desta forma, iniciou-se um estudo para constatar a causa das falhas e propor soluções para evitá-las. O presente trabalho irá descrever os problemas encontrados, as soluções adotadas e as ações realizadas para interromper a crescente taxa de falhas nos TCs de neutro em banco de capacitores de subestações da EDP-ECELSEA.

#### 1. Introdução

Neste artigo serão descritos o tipo de configuração dos bancos de capacitores de 138kV da EDP-ECELSEA, a metodologia de proteção utilizando TCs de neutro, o histórico das falhas, as primeiras soluções adotadas, tais como as substituições dos TCs e substituições dos centelhadores por para-raios nos primários desses equipamentos.

Essas medidas não foram eficazes. Desta forma estudos mais detalhados foram realizados e as novas propostas de adequação de proteção no primário dos TCs foram implementadas para testes. A nova proteção contra surtos instaladas nos TCs de neutro dos banco de capacitores conseguiram evitar as falhas, porém a sua implementação em todos os TCs de neutro era inviável devido ao alto custo do equipamento de proteção contra surtos que foi testado.

Sendo assim, a Engenharia de Manutenção pesquisou e encontrou outro dispositivo que poderia ser utilizado, com um custo muito menor. Esse equipamento foi testado e aprovado nos testes em campo, sendo atualmente utilizado como proteção contra surtos no primário dos TCs de neutro dos bancos de capacitores de 138kV da EDP-ECELSEA.

## 2. Configuração do sistema

Bancos de capacitores em subestações tem como finalidade o suprimento de energia reativa ao sistema de potência e consequentemente o controle da tensão nos barramentos onde esses equipamentos estão instalados [1, 2]. A Foto 1 mostra bancos de capacitores de subestações.



Foto 1 – Bancos de capacitores 138kV em subestações.

Os bancos de capacitores de 138kV instalados nas subestações da EDP-ESCELSA são configurados como ligação estrela (Y) com neutro aterrado (Figura 1), contendo 6 grupos por fase, e 8 ou 16 capacitores por grupo [3]. Desta forma, esse sistema oferece uma baixa impedância para terra às correntes harmônicas, reduzindo substancialmente os níveis de sobretensão em virtude dos harmônicos referidos [2].

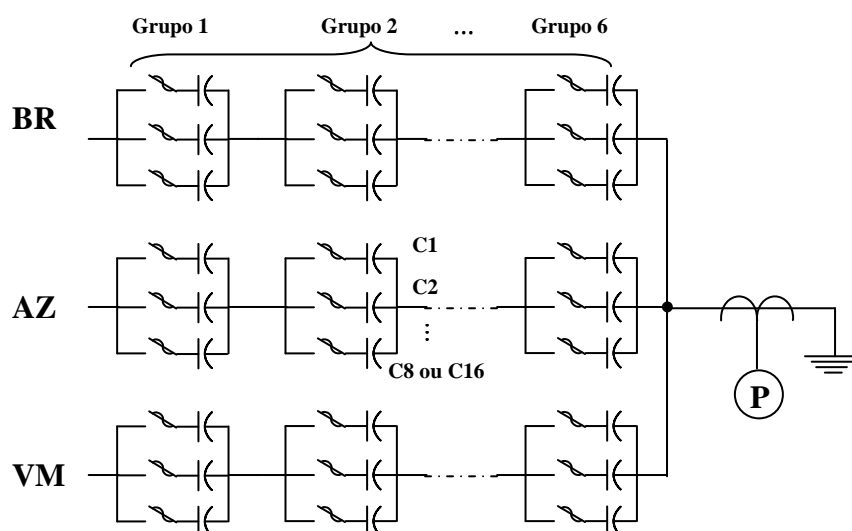


Figura 1 – Diagrama de ligações em banco de capacitores Y com neutro aterrado.

O transformador de corrente (TC) ligado entre o ponto comum da configuração Y e o terra exerce a função – juntamente com arranjos de circuitos nos secundários desse TC – de medição de desequilíbrio elétrico no banco de capacitores e acionamento da função de proteção de relés caso seja necessário desligá-lo.

Esse desequilíbrio elétrico ocorre quando existe uma falha em uma célula capacitiva do banco e a queima do elemento fusível de proteção individual, provocando circulação de corrente pelo neutro do sistema conectado à terra e ao qual está ligado o TC que pode alimentar um relé de sobrecorrente ou sobretensão ligado em paralelo com um resistor variável, conforme mostrado na Figura 2 [2].

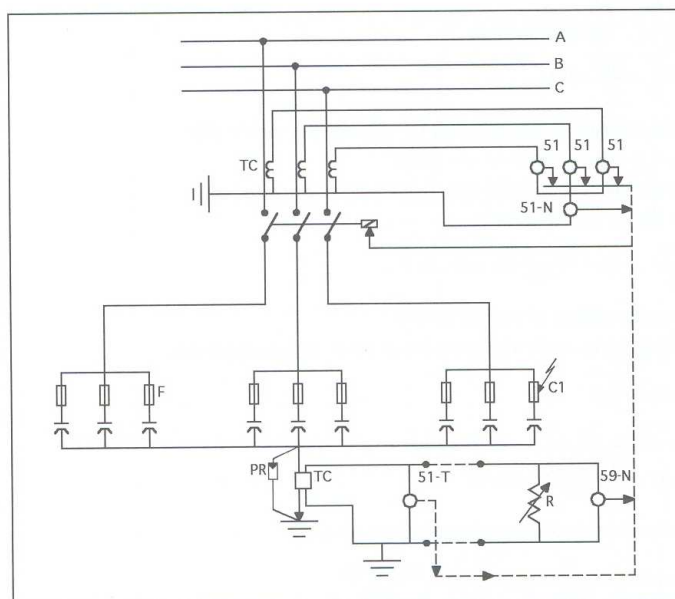


Figura 2 – Banco de capacitores em estrela aterrada com TC de proteção de neutro.  
 Fonte: MAMEDE FILHO, J. (2005) [2].

A proteção do banco de capacitor está ajustada para retirá-lo de operação quando, devido a falhas em elementos capacitivos, a sobretensão nas unidades remanescentes for superior a 10% de sua tensão nominal [2, 3].

### 3. Substituição de TCs de neutro em banco de capacitores de 138kV

Até o final do ano de 2006, existiam em operação no sistema EDP-ESCELSA 16 TCs de 15kV operando nos neutros em banco de capacitores de 138kV, conforme mostrado na Foto 2 [4].

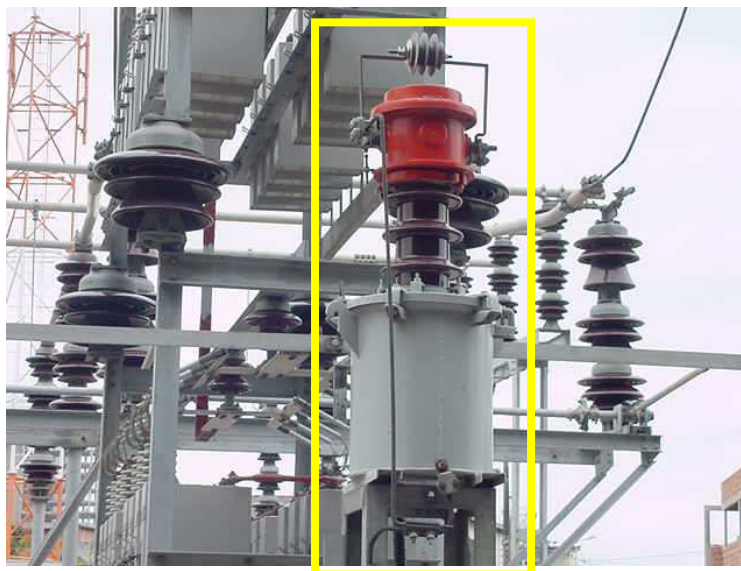


Foto 2 – TCs de 15kV instalados em neutro de banco de capacitores.

Os primeiros estudos realizados pelas áreas de Engenharia de Manutenção e Projetos, até esse ano, recomendava substituir os equipamentos com classe de tensão de 15kV, por TCs de 34,5kV, devido à falhas ocorridas nos equipamentos de 15kV, e conseqüentemente a inoperabilidade dos bancos de capacitores, ocasionando perda de qualidade no fornecimento de energia elétrica [1, 4].

Iniciou-se assim a substituição gradativa dos TCs de 15kV instalados em neutro de banco de capacitores por equipamentos com classe de tensão de 34,5kV. Esses novos equipamentos tinham como material isolante resina de EPOXI, devido aos fabricantes não confeccionarem mais TCs com isolamento à óleo nesse nível de tensão.

A Foto 3 mostra TC de 34,5kV com isolamento em EPOXI, instalado em banco de capacitores em subestações da EDP-ESCELSA.



Foto 3 – TC de 34,5kV com isolamento em EPOXI.

#### 4. Falhas em TCs 34,5kV instalados em neutros de bancos de capacitores

##### 4.1 Características das ocorrências

A partir das substituições de TCs 15kV, isolamento à óleo (Foto 2), por TCs classe de tensão de 34,5kV, em EPOXI (Foto 3), nos neutros de bancos de capacitores de 138kV, observou-se que em alguns locais ocorreram falhas nestes equipamentos, pouco tempo após sua instalação.

Em inspeções pela área de manutenção de subestações, verificou-se que os equipamentos avariados estavam com as espiras em curto circuito, pois não era possível medir a ralação de transformação (corrente de excitação muito alta). Os ensaios de isolamentos estavam bons.

A frequência como ocorreram essas falhas levaram as áreas de engenharia, além de investigar com os fabricantes, a efetuar estudos sobre os acontecimentos.

##### 4.2 Características dos TCs

Os equipamentos adquiridos foram especificados para uso externo, em EPOXI e os dados elétricos estão mostrados no Quadro 1.

O diagrama elétrico básico de um TC está mostrado na Figura 3.

Classe de tensão	34,5kV
NBI	200kV
Frequência	60Hz
Carga nominal	50VA
Corrente térmica	0,80kA/s
Corrente dinâmica	2,00kA
Fator térmico	2,0
Exatidão	10B200
Relação	5X10 – 5A

Quadro 1 – Dados elétricos dos TCs de EPOXI.

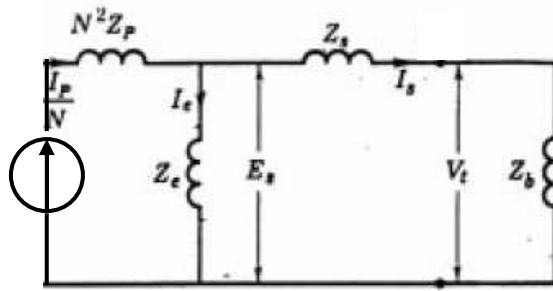


Figura 3 – Circuito equivalente, referido ao secundário, de um TC.

Sendo:

N	Relação de transformação nominal ( $I_{Pn}/I_{Sn}$ )
$I_p$	Corrente do primário (A)
$I_s$	Corrente do secundário (A)
$I_e$	Corrente de excitação (A)
$Z_p$	Impedância do enrolamento primário ( $\Omega$ )
$Z_s$	Impedância do enrolamento secundário ( $\Omega$ )
$Z_e$	Impedância de excitação ( $\Omega$ )
$Z_b$	Carga ligada ao secundário ( $\Omega$ )
$E_s$	Tensão induzida no secundário (V)
$V_t$	Tensão na carga $Z_b$ (V)

A carga ligada nos secundários desses TCs tem resistência de  $R_L=16\Omega$  e os cabos de controle reatância indutiva de  $L_S=0,219\text{mH}$  ( $\approx 50$  metros de cabo) (Figura 2).

O valor da impedância  $Z_b$  do circuito é calculado pela Equação (1):

$$Z_b = \sqrt{R_L^2 + (2.\pi.f.L_S)^2} \quad (1)$$

Desta forma, a impedância ( $Z_b$ ) fica em torno de  $18\Omega$ , à frequência de  $5.890\text{Hz}$  (frequência que ocorre a sobretensão).

## 5. Estudos realizados e soluções propostas

### 5.1 Características das grandezas elétricas envolvidas

Foi verificado que as falhas ocorriam em subestações da malha principal do sistema elétrico do Espírito Santo (ES), e que com o aumento da potência de curto circuito, devido às novas configurações dessa malha (entradas em operação de usinas geradoras de indústrias e subestações de transmissão), as correntes fase-terra, com fontes nas subestações da EDP-ESCELSA, tiveram um acréscimo considerável.

Tais correntes de fase-terra, também tem retorno pelo neutro dos bancos de capacitores em configurações Y aterrado.

Em novos estudos realizados pela área de Projetos e Engenharia, verificou-se que essas correntes máximas durante os surtos teriam valores médios de  $216\text{A}$ , atingindo picos instantâneos de  $314\text{A}$  e com atuação da proteção de  $0,5$  segundos.

Para TCs de baixa reatância, tais como os de construção toroidal (classe B - Quadro 1), a tensão secundária pode ser obtida através da Equação (2) [2].



$$V_s = 3,5 \times Z_b \times \left( \frac{I_p}{RTC} \right)^{0,73} \quad (2)$$

Sendo:

- $I_p$  Corrente do primário (A)
- $Z_b$  Carga ligada ao secundário ( $\Omega$ )
- RTC Relação de transformação de corrente nominal
- $V_s$  Tensão na carga  $Z_b$  (V)

Para uma corrente primária de pico de  $I_p=314A$ , carga de  $Z_b=18\Omega$  (Equação (1)) e RTC de  $10/5=2$  (Quadro 1), utilizando a Equação (2), a tensão de pico na carga no secundário do TC fica em torno de 2.537V.

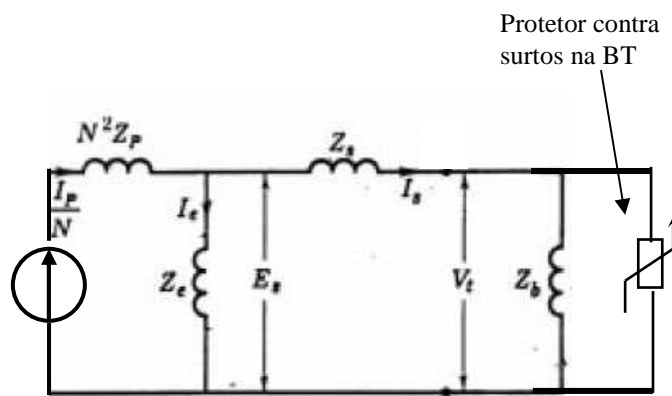
Essa tensão é menor que a tensão de pico máxima secundária permitida por norma ( $V_{Spico Max}=3.500V$ ) [5].

A tensão de pico máxima refletida para o primário é de 1.268V ( $2.537/RTC=2$ ).

## 5.2 Soluções adotadas

### a) Sobretensões secundárias

Por critérios de segurança, mesmo que as sobretensões estejam dentro da norma, em todos os secundários dos TCs de neutro de banco de capacitores são instalados dispositivos protetores contra surtos de tensão, mostrado na Figura 4, em paralelo com a carga, que tem o objetivo de evitar sobretensões nos enrolamentos secundários, carga e relés de tensão [6].



a) Dispositivo protetor contra surtos.

b) circuito equivalente do TC com protetor de surtos.

Figura 4 – Dispositivo de proteção contra surtos de tensão em secundários de TCs.

Esse protetor limita a tensão secundária conforme norma NBR 6856 [5].

O dispositivo utilizado tem tensão nominal de 275V, corrente máxima de descarga de 150kA (8/20 $\mu$ s), nível de tensão residual menor que 1.300V e tempo de resposta menor que 100ns [6].

## b) Sobretensões primárias

Como proteções de surtos para os enrolamentos primários utilizava-se anteriormente o centelhador primário, montado entre P1 e P2 (AT do TC de neutro), ajustado em 1,2mm, ou para-raios primários, de 3kV/10kA, conforme mostrado na Foto 4 [3].



a) Para-raios 3kV/10kA.



b) Centelhadores primários.

Foto 4 – Supressores de surto instalados no primário de TCs de neutro de banco de capacitores.

Porém, nos centelhadores primários existia o problema de carbonização de seus terminais ocasionado pelo aquecimento de dispersão de surtos, provocando aumento dos *gaps* (distância entre os terminais dos centelhadores), sendo sua operação comprometida.

Os para-raios de 3kV/10kA não surtiam efeito, pois as sobretensões que aparecem no primário são menores que a tensão nominal desses supressores.

Desta forma, os surtos de tensão no primário dos TCs de neutro ainda estavam ocasionando curtos circuitos entre espiras (trilhamento do isolamento), provocando as falhas nesses TCs.

Em contatos com fabricantes, foi recomendado que se instalasse nos primários desses equipamentos varistores de óxido de zinco (ZnO), conforme mostrado na Foto 5.

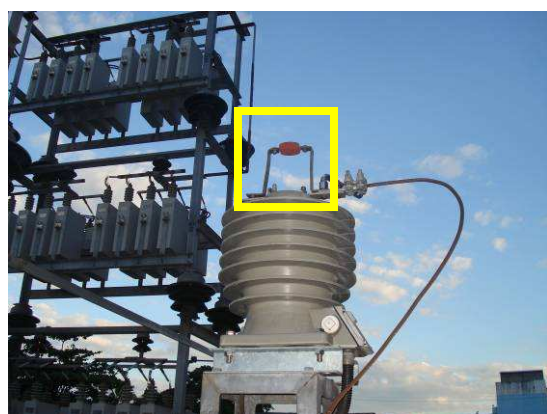


Foto 5 – Varistores de ZnO instalados nos primários de TCs de neutro em banco de capacitores.

O equipamento utilizado foi o varistor a ZnO tipo RV 0,66-5. Este supressor é especificado para tensão nominal de 660V e corrente de descarga de 5kA.

O preço unitário do equipamento ficou em R\$800,00. Desta forma, devido ao custo elevado, foram utilizados 2 varistores em TCs de neutro de banco de capacitores de 138kV para testar sua eficácia.

### c) Falhas nos varistores

Logo após a instalação dos varistores, foram observadas duas ocorrências em bancos de capacitores, nas subestações Bento Ferreira e Linhares. Os supressores de surto recentemente instalados nos terminais AT dos TCs entraram em colapso devido a não suportar a alta energia que está submetido durante os surtos de tensão, ocasionando a falha nesses varistores conforme mostrado na Foto 6.



Foto 6 – Explosão de varistor de ZnO devido a alta energia do surto de tensão.

Porém, os ensaios realizados nos TCs de neutro diagnosticaram que este equipamento continuavam apto para operação, não ocorrendo falhas nos isolamentos, mantendo a relação de transformação e resistências ôhmicas dentro dos padrões exigidos por norma [5].

Assim, os varistores instalados na AT dos TCs de neutro estavam cumprindo sua função principal que é a proteção desses TCs.

Então, o novo problema a ser resolvido era como evitar as falhas nos varistores, pois esses equipamentos tem um alto custo e não poderiam ser substituídos frequentemente.

### 5.3 Realização de novos estudos

#### a) Cálculo da energia dissipada

O valor médio da energia dissipada é dado pela integral de Joule, conforme mostrado na Equação (3) [7].

$$\int_0^t i^2 dt = i^2 \times t \quad (3)$$

Sendo:

- i Corrente de surto (A)
- t Tempo de circulação da corrente (s)

Como o valor médio da corrente de surto nos primários dos TCs é 216A e o tempo de atuação de proteção de 0,5 segundos (Seção 5.1), utilizando a Equação (3), a energia média dissipada por um surto de tensão nos varistores ZnO é de:  $i^2 \times t = (216)^2 \times 0,5 = 23.328A^2 \cdot s$ .

#### b) Determinação do dispositivo de proteção primária dos TCs de neutro

Em pesquisas com fabricantes de equipamentos destinados à proteção de surtos, foi definido que seriam testados os para-raios a ZnO tipo PRBT-RDS 440V/20kA [8].

O preço unitário do equipamento ficou em R\$54,00.

A Figura 5 mostra o equipamento utilizado.



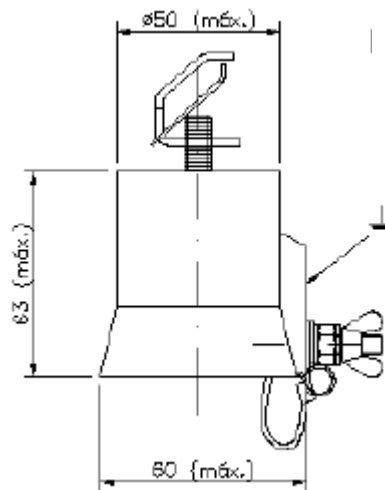


Figura 5 – Para-raios ZnO PRBT-RDS 440V/20kA.

O dispositivo utilizado tem máxima tensão de operação contínua de 440V, corrente nominal de surto de 20kA (8/20 $\mu$ s), nível de tensão residual menor que 1.800V e tempo de resposta menor ou igual a 25ns [8].

Com essas características técnicas, a energia que pode ser dissipada por um para-raios tipo PRBT-RDS 440V/20kA, utilizando a Equação (3) é de:

$$i^2 \times t = (20.000)^2 \times 20.10^{-6} = 8.000A^2.s.$$

Assim, optou-se por utilizar para testes 3 para-raios 440V/20kA em paralelo conforme mostrado na Foto 7.



Foto 7 – Para-raios ZnO 440V/20kA, em paralelo, instalados nos primários dos TCs de neutro.

Como os para-raios são de ZnO, garante-se o disparo simultâneo dos três equipamentos e, desta forma, a energia que pode ser dissipada pelo conjunto é de 24.000A<sup>2</sup>.s, que é maior que a energia do surto de tensão (23.328A<sup>2</sup>.s), mostrado na Seção 5.3.

Para efeito de testes, e devido ao baixo custo dos para-raios, optou-se por instalar esse arranjo em 4 subestações da ESCELSA (Bento Ferreira, Linhares, Barra do Sahy e João Neiva).

Após a instalação desses dispositivos em paralelo com os TCs de neutro dos bancos de capacitores de 138kV, está ocorrendo o monitoramento desses equipamentos, sendo que ainda não foram identificadas falhas nos arranjos propostos.

## **6. Conclusão**

A utilização de bancos de capacitores em subestações é necessária para controle do nível de tensão nos barramentos dessas instalações e conseqüentemente melhora na qualidade de energia que será entregue ao cliente [1].

Assim como outros equipamentos, os bancos de capacitores de 138kV devem utilizar proteções adequadas para garantir sua boa operação [2].

As proteções de banco de capacitores na EDP-ESCELSA, devido suas características de arranjo elétrico, utilizam a filosofia do TC de neutro e relé de sobretensão [2, 3].

Com as recentes alterações no sistema elétrico do ES, as subestações de 138kV da ESCELSA foram influenciadas pelo aumento da potência de curto circuito da malha principal do estado.

Essas novas características elétricas tornaram as técnicas de proteção de TCs de neutro de banco de capacitores de 138kV ineficientes. Assim, esses equipamentos começaram a falhar de forma sistêmica, o que levou a Engenharia de Manutenção a investigar tais casos.

Novos estudos realizados pelas áreas de Projetos e Engenharia, e Planejamento da Manutenção identificaram esses casos e propuseram soluções, eficientes e de baixo custo.

As medidas ora tomadas, muito de acordo com os bons procedimentos de manutenção deverão ser melhoradas no futuro.

Como solução mais adequada está sendo realizados estudos pela área de Projetos e Engenharia para substituir a solução até então adotada, por outra proteção mais à luz das novas tecnologias existentes no mercado. A proteção de bancos de capacitores 138kV em estrela aterrada adotada pela EDP-ESCELSA apresenta uma relação custoxbenefício bastante atraente, se comparado com relés de detecção de defeito em unidades capacitivas, via medição de tensão diferencial, desempenhadas por relés a estado sólido. Estas proteções evoluíram bastante, e hoje tem-se relés equivalentes, em versões microprocessada, e que podem ser o novo caminho para o uso de dessas tecnologias e que apresentarão desempenho à altura das necessidades atuais da empresa.

A Engenharia, preocupada com a repercução dos incidentes provocados com as saídas de bancos de capacitores de 138kV devido a queima de TCs de neutro, tem realizado estudos no sentido de apresentar uma solução definitiva e de baixo custo para este tipo de proteção.

## Referências

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) (Brasil), Resolução N° 505 de 26 de novembro de 2001. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 27 nov. 2001. Seção 1, p. 16, v. 138, n. 226. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres2001505.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2009.
- [2] MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005;
- [3] ENERGIAS DO BRASIL. **PR-MA-03-23-000**: procedimento para montagem e comissionamento de bancos de capacitores de subestações. São Paulo, [200-];
- [4] ENERGIAS DO BRASIL. **Solicitação de investimento 1000653**: substituição de TCs de neutro de 15kV de banco de capacitores – 1ª etapa. Serra, 2007;
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6856**: transformador de corrente – especificação. Rio de Janeiro, 1992;
- [6] GLC N/PE slim. Clamper. Disponível em: <[http://www.clamper.com.br/produtos\\_linhas.asp?linha=&tipo=15&titulo=GCL%20\(DPS\)](http://www.clamper.com.br/produtos_linhas.asp?linha=&tipo=15&titulo=GCL%20(DPS))>. Acesso em: 24 abr. 2009;
- [7] ABNT. **NBR 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004;
- [8] PRBT-RDS (rede convencional). Clamper. Disponível em: <[http://www.clamper.com.br/produtos\\_linhas.asp?linha=&tipo=2&titulo=Para-raio%20de%20Baixa%20Tensão](http://www.clamper.com.br/produtos_linhas.asp?linha=&tipo=2&titulo=Para-raio%20de%20Baixa%20Tensão)>. Acesso em: 28 abr. 2009.