



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GSE 14  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO VIII**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - GSE**

#### **SUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS – ALTERNATIVAS DAS TRANSMISSORAS PARA EVITAR A SUBSTITUIÇÃO – CASO FURNAS**

**Frederico Penna Pereira \***  
**José Márcio Peralta**

**Márcio Goldenberg Sereno**  
**Marco Antônio Paiva Fontes**

**Jorge Amon Filho**

**FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

## **RESUMO**

O presente artigo descreve o processo praticado por FURNAS Centrais Elétricas S. A. desde a identificação da possibilidade de ocorrência de superação até análises de alternativas para evitar a(s) superação (ões) das características nominais dos equipamentos pelas solicitações de sistema (3) e as substituições dos equipamentos.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Característica Nominal, Equipamento, Expansão, Mitigação, Superação de equipamentos.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A Lei nº 10847, de 15.03.2004, autorizou a criação da Empresa de Planejamento Energético (EPE) e concedeu uma série de atribuições dentre as quais “elaborar estudos necessários para o desenvolvimento dos planos de expansão da geração e da transmissão de energia elétrica de curto, médio e longo prazo”.

Com relação à expansão da transmissão o critério utilizado consiste em prover o Sistema Interligado Nacional (SIN) da capacidade de preservar um desempenho adequado para condições de perda de um elemento da rede de transmissão, critério “N-1”, e com a função objetivo de mínimo custo global.

Nesta atividade de planejamento da expansão da transmissão é examinada, entre outras, a questão de superação dos equipamentos, onde os custos de substituição dos equipamentos superados são incluídos na(s) alternativa(s) para as quais são verificadas as mesmas.

Entretanto, a questão de superação de equipamentos para as Transmissoras muitas vezes significa a troca da quase totalidade dos equipamentos de uma subestação, como disjuntores, seccionadores, transformadores de corrente, bobinas de bloqueio, bem como o reforço dos barramentos, estruturas e malha de terra na subestação. Ainda que para o planejamento do sistema tenha sido considerado o custo mínimo global para a expansão da transmissão, tal conclusão não é extensiva às Transmissoras, no tocante ao problema da superação.

Do ponto de vista da empresa transmissora a superação de uma subestação existente apresenta, além de custos elevados, as dificuldades inerentes ao processo de substituição mantendo a subestação em operação, o que demanda desligamentos nem sempre autorizados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Ademais, historicamente, as empresas apresentam orçamentos de investimento limitados e a inclusão de uma substituição geral de equipamentos superados numa subestação pode demandar um deslocamento de outro investimento ou reduzir a capacidade de participação em leilões de transmissão, visto o caráter de risco que caracteriza a

superação por curto-circuito. É importante destacar que as transmissoras para as quais foram verificadas superações são empresas que antecederam à mudança do modelo, portanto em sua grande maioria estatais.

O artigo apresenta o processo de avaliação de superação de equipamentos tendo como exemplo a subestação de Tijuco Preto.

## 2.0 - SUBESTAÇÃO DE TIJUCO PRETO

A subestação de Tijuco Preto mostrada na Figura 1, localizada no município de Mogi das Cruzes (SP) entrou em operação em setembro de 1982. Sua função é interligar as regiões Sul e Sudeste do país, bem como disponibilizar energia elétrica, proveniente da usina de Itaipu, ao estado de São Paulo, através da transformação 750/345 kV, 3 bancos de 1500 MVA e linhas de 345 kV, e ao estado do Rio de Janeiro através da transformação 750/500 kV, 3 bancos de 1650 MVA.



Figura 1 – Subestação de Tijuco Preto

Os esquemas de manobra dos pátios dessa subestação são do tipo disjuntor e meio, e os equipamentos do pátio de 345 kV, objeto desse artigo, tem na sua maioria a suportabilidade para curto-circuito de 50 kA. Nesse pátio estão em operação 3 bancos de autotransformadores de 750/345kV, de 1500MVA, e linhas de 345kV para Ibiúna (duas), Baixada (três), Terminal Leste (três) e Itapeti (duas), 9 bancos de capacitores em derivação de 200 Mvar cada e as barras possui dois vãos de interligação de barra que operam normalmente fechados.

## 3.0 - ANÁLISE DO PROBLEMA

Nas análises de curto-circuito realizados no ano de 2003 foi detectado que, com a entrada em operação dos reforços de transmissão necessários para atender a expansão da Área São Paulo, constituída pelos circuitos 3 e 4 da LI 345 kV Tijuco Preto – Itapeti e circuito 1 da LT 345 kV Itapeti – Nordeste, juntamente com o 4º banco de autotransformadores 765/345 kV na subestação de Tijuco Preto, o nível de curto-circuito nesse barramento atingirá o valor de cerca de 52 kA, indicando a superação de 29 disjuntores, 14 TC's e 77 seccionadores, das quais 11 com lâmina de terra, no setor de 345 kV desta subestação.

No trabalho da referência (1) são descritos todas as análises que são realizadas por FURNAS para evitar a necessidade de troca da quase a totalidade dos equipamentos de manobra das subestações.

Para o caso de superação na SE Tijuco Preto onde o nível de curto-circuito será muito elevado destaca-se que os equipamentos disponíveis no mercado de linha de montagem apresentam uma suportabilidade máxima de 63 kA, embora haja indicações de fabricantes que possam fornecer equipamentos de 80 kA, mas de fabricação especial, com custos elevados.

A substituição dos equipamentos superados por novos com suportabilidade de 63 kA foi descartada uma vez que além dos custos elevados, anteviram-se dificuldades para execução das substituições, ante a necessidade de um grande número de desligamentos por períodos de duração prolongada, o que demandaria um prazo muito extenso e, além disso, essa solução poderia não se mostrar eficaz na prática. Isto se deve ao fato que o critério utilizado pelas transmissoras, baseado em metodologia aprovada em conjunto com o ONS, para avaliar a superação dos

equipamentos indica que para níveis de curto-circuito da ordem de 85% da capacidade do disjuntor este deverá ser objeto de outros estudos que poderão determinar a sua superação.

Na sua configuração final ainda entrarão em operação o 4º banco 750/345 kV e 2 linhas para Itapeti, já constantes dos documentos da EPE e ONS desde 2003, conforme pode ser visto na Figura 2. Com a entrada em operação do 4º banco de autotransformadores e da linha de 345 kV em circuito duplo para Itapeti, licitada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no leilão nº 001/2005 [5], foi avaliada a possibilidade de operar a subestação de Tijuco Preto com o disjuntores de interligação de barra aberto (Figura 2). Essa proposta equivale a ter 2 subestações eletricamente distantes, com dois bancos de autotransformadores 750/345kV, seis linhas em 345 kV em cada seção, além de 4 bancos de capacitores em derivação de 200 Mvar cada, e um compensador síncrono de 300 Mvar numa seção e 5 bancos capacitores em derivação remanescentes de 200 Mvar na outra barra.

O arranjo do setor de 345 kV de Tijuco Preto viabilizou a idéia de operar dessa forma, uma vez que com o quarto banco de transformadores, teríamos 2 bancos em cada um dos setores criados com a abertura dos disjuntores de interligação. De modo a equilibrar os carregamentos e manter um perfil de tensão similar nos dois setores do barramento de 345 kV é necessária a mudança da conexão elétrica de apenas 2 linhas, 1 para Ibiúna e o outra para Leste, bem como de quatro bancos de capacitores em derivação. Essa alteração topológica propicia um perfeito equilíbrio nos carregamentos dos quatro bancos de transformadores 765/345 kV.

Cabe salientar que estas alterações topológicas não se darão por meio de remanejamento físico dos equipamentos citados, e sim por meio de novas conexões elétricas como novos trechos de barramento rígido e flexível. O setor que receberia os 4 bancos de capacitores corresponde ao que tem o compensador síncrono e o outro ficaria com os 5 bancos de capacitores.

Nessas condições o valor calculado do curto-circuito monofásico atinge cerca de 42 kA.

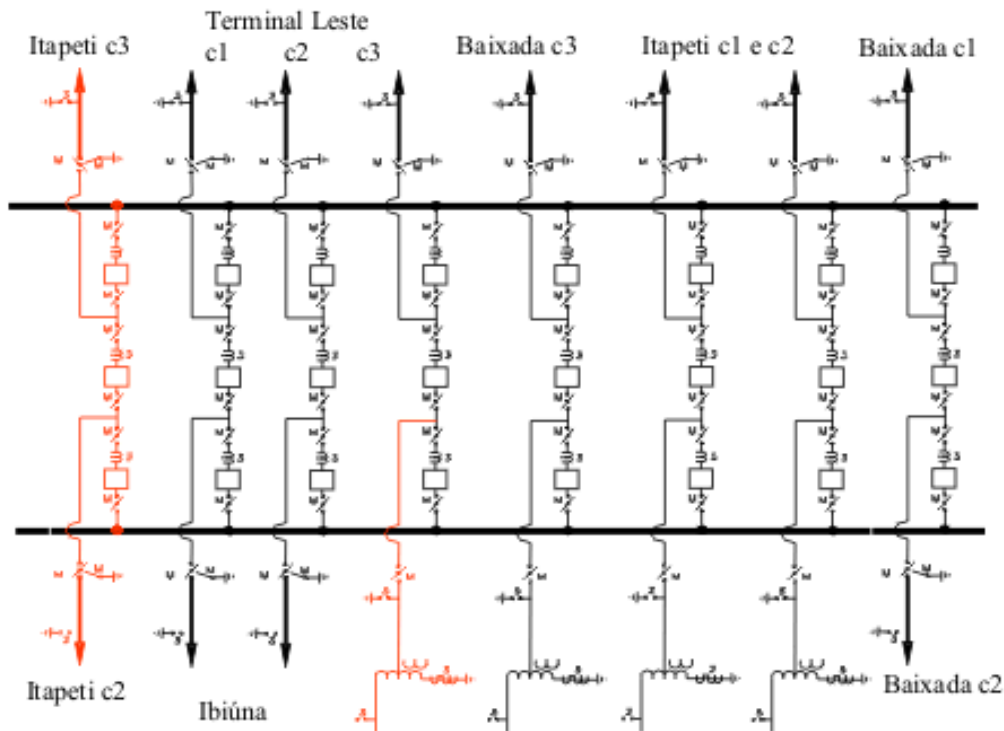


Figura 2 – Unifilar do pátio do setor de 345 kV da subestação de Tijuco Preto – na cor preta os equipamentos existentes e em vermelho os futuros.

#### 4.0 - INTERAÇÃO COM O OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS

De posse dos resultados das análises de fluxo de potência e curto-circuito com essa configuração do barramento de Tijuco Preto, FURNAS submeteu essa proposição para análise do ONS – Operador Nacional do Sistema. Foram estabelecidas discussões técnicas, e análises adicionais de Tensão de Restabelecimento de Transitório (TRT), como por exemplo, a indisponibilidade de transformadores, indicou a possibilidade de superação por TRT. As soluções de mitigação analisadas compreenderam desde a revisão das premissas adotadas nos estudos iniciais, de acordo com avaliações mais apuradas, passando pela adoção de medidas operativas, tais como o

chaveamento seqüencial. Todavia, a posição do ONS foi de que não poderia considerar essas medidas operativas, por não se tratar de solução estrutural.

Essa decisão conduziu à conclusão de que haveria necessidade de se manter o barramento de 345 kV sem seccionamento, atendendo às condições de emergência independentemente da possibilidade da manobra de disjuntores e seccionadores do barramento.

### 5.0 - SOLUÇÃO COM APLICAÇÃO DE REATOR LIMITADOR DE CORRENTE (RLC)

A partir da constatação de superação dos disjuntores de 345 kV, e considerando-se que a simples troca dos mesmos por outros de capacidade acima de 63 kA não se apresentava como uma solução economicamente e operacionalmente viável optou-se pelo seccionamento do barramento com a instalação de um RLC.

Tomando como base os mesmos remanejamentos dos vãos de linha de 345 kV e bancos de capacitores na SE Tijuco Preto necessários para se atingir o equilíbrio de cargas e tensão nos dois setores de barra foi realizada uma análise paramétrica do valor do RLC e o correspondente NCC. Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos curtos-circuitos obtidos variando o RLC.

Tabela 1 – Resultado da análise paramétrica

REATOR LIMITADOR (Ohms)	NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO (kA)	
	BARRAMENTO 1	BARRAMENTO 2
∞	41,9	41,2
5	46,1	44,8
10	44,5	43,8
15	43,8	43,2
20	43,6	42,9
30	41,9	41,2

Verificou-se que a instalação de um RLC de 15 ohms era suficiente para reduzir o NCC para valores de 90% da capacidade de CC dos disjuntores de 345 kV que são de 50 kA.

A seguir são apresentados os cálculos de TRT obtidos para condições de expansão da SE Tijuco Preto com a consideração do 3º e 4º circuito da LT Tijuco Preto - Itapeti e a instalação de um RLC de 15 ohms no seccionamento do barramento de 345 kV.

Na Figura 3 destaca-se o fato de que tanto pela envoltória de TRT de Norma do disjuntor, quanto à envoltória de especificação do mesmo não indica superação do disjuntor, quando nesta nova configuração de solução, mesmo após a entrada em operação da terceira e quarta LT de 345 kV Tijuco Preto - Itapeti.

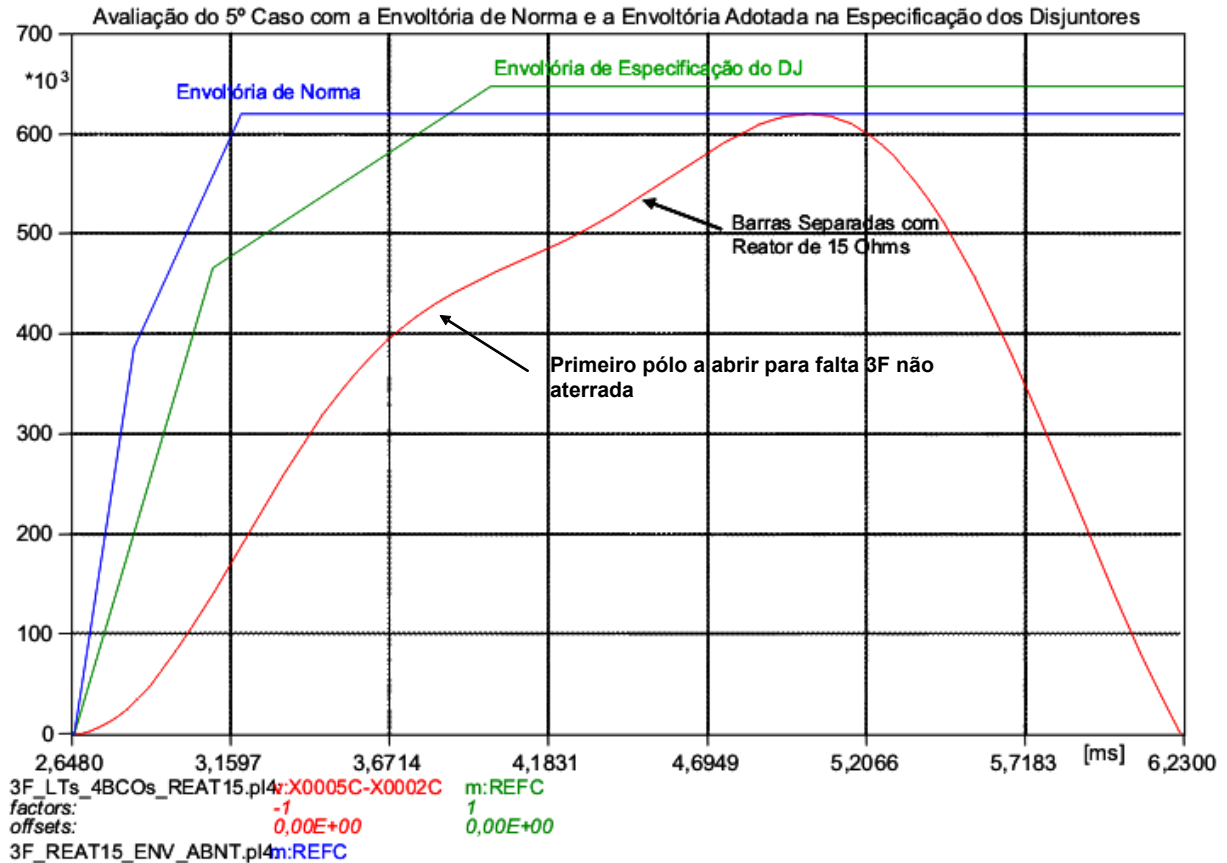


Figura 3 – Resultado da análise de TRT

## 6.0 - SOLUÇÃO COM APLICAÇÃO DE REATOR LIMITADOR DE CORRENTE (RLC)

As premissas adotadas na concepção e especificação do RLC foram as seguintes:

- Arranjo da conexão do reator capaz de inseri-lo em qualquer uma das barras através da manobra de seccionadores e disjuntores de barra, mantendo-o disponível mesmo quando uma barra estiver impedida para manutenção, munido de um disjuntor normalmente aberto em paralelo com ele. Esse arranjo viabiliza a implantação de um sistema especial de proteção (SEP) que comandaria o fechamento do disjuntor, retirando-o de atuação, para configurações da rede de transmissão em que o fechamento direto entre as barras não estabelece risco de superação dos disjuntores existentes.
- Limitação prestada pelo RLC mantida mesmo após a falha de uma das fases do equipamento, mediante a entrada em serviço de unidade reserva.
- A capacidade nominal do RLC determinada de forma a atender a pior contingência do sistema de transmissão considerando qualquer um outro elemento de transmissão previamente indisponível, para cenários de máximo intercâmbio SUL=> SUDESTE, nas condições mais desfavoráveis de distribuição de fluxo entre as transformações de 765/345 kV e 765/500 kV na SE Tijuco Preto.

A partir destas premissas foi concebido um arranjo com 4 seccionadores, mostrado na Figura 4, que atende a todas as condições postuladas desde que se tivesse instalado um total de 4 unidades monofásicas, sendo uma reserva. Esta unidade reserva deveria ser dotada de barra de transferência para que se pudesse, em um reduzido espaço de tempo, substituir qualquer uma das unidades em operação que apresentassem falhas.

Porém, as análises de projeto e engenharia indicaram que a seção de barramento que dispõe dos disjuntores seccionadores de barra, conforme indicado na Figura 5, está localizada numa área de elevadas interferências com as instalações existentes. A casa de controle da subestação se encontra instalada exatamente entre os dois barramentos na área em que existem os dois seccionamentos de barra e, portanto, é onde convergem todas as canaletas com cabeados dos sistemas de controle, supervisão, proteção e teleproteção, constituindo, portanto num local de inúmeras interferências para que se implementem as fundações destes 4 reatores monofásicos.



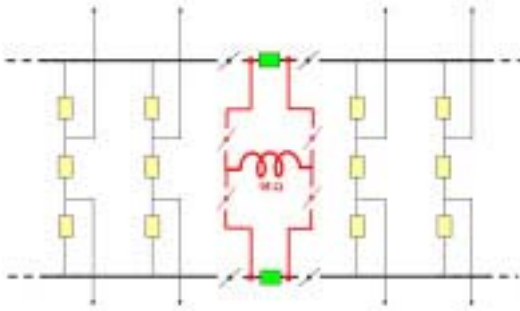


Figura 4: Barramentos seccionados e interligados  
- arranjo com 8 seccionadores



Figura 5: Arranjo físico do local de instalação do RLC  
com 4 seccionadores

A alternativa para contornar este problema seria a instalação dos mesmos em um dos lados do barramento, fora da área de interferência das canaletas. Mais especificamente o local que dispõe de espaço para as 4 seccionadoras e 4 reatores monofásicos, com o respectivo barramento de transferência, seria o lado superior segundo a Figura 6 apresentada, mais próximo da BARRA B.

Porém, neste caso seria necessário o lançamento de cabos subterrâneos entre a barra oposta e o local da instalação das chaves seccionadoras e reatores monofásicos e, portanto, visualizam-se também custos elevados além das dificuldades de lançamento destes cabos atravessando a linha de canaletas que convergem para a região da casa de controle.

Desta forma, buscou-se outra alternativa que consiste na instalação de 6 reatores limitadores monofásicos, três por barramento, que operarão alternativamente, um como reserva do outro, utilizando também 4 seccionadores, conforme indicado na Figura 7. Com este arranjo não será necessário atravessar a linha de canaletas e nem a compra e instalação dos cabos subterrâneos em 345 kV, que oneraria demasiadamente o projeto, apesar de necessitar de 6 unidades monofásicas ao invés de apenas 4, propostos nos outros arranjos.

Assim, após a apresentação desses resultados a solução de consenso foi a utilização de 6 reatores monofásicos, sendo um reserva do outro.

Além da vantagem econômica desta solução, já que o custo de dois reatores corresponde, aproximadamente, ao de um disjuntor apenas, a experiência no uso de tais dispositivos (4) mostra que esta configuração escolhida para os reatores de núcleo de ar em relação ao barramento da subestação acarreta vários outros benefícios e vantagens, tais como:

- perdas por efeito joule mínimas;
- melhor regulação da tensão e redução de ruídos e
- de poluição por campos eletromagnéticos, quando comparada a outras possíveis posições (em série com circuitos, alimentadores, etc, que chegam ou partem da referida subestação).

Devido à instalação dos 2 reatores de núcleo de ar mostrados na Figura 6, diversos estudos de avaliação foram realizados a fim determinar os novos requisitos de TRV impostos aos atuais disjuntores da subestação de Tijuco Preto, devido à introdução de uma nova impedância no circuito quando sob a condição de faltas. É importante mencionar aqui que apenas um dos dois reatores ficará inserido permanentemente entre os dois trechos de barramento. O outro ficará de reserva, para substituir o primeiro sempre que necessário e para fins de manutenção.

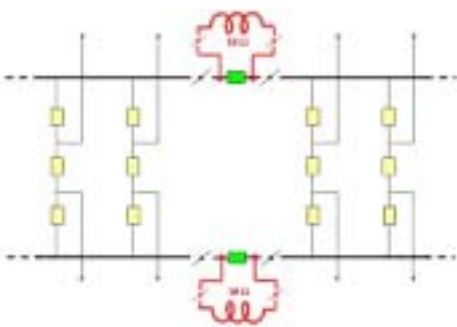


Figura 6: Barramentos seccionados e interligados  
através de 2 reatores de núcleo de ar

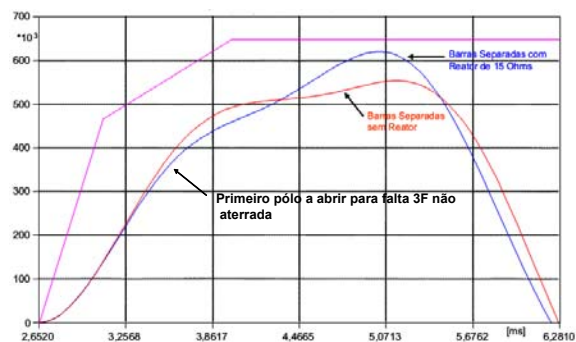


Figura 7: Requisitos de TRV para as diversas  
configurações de barras

Como pode-se ver na Figura 7, os novos requisitos do valor de pico da TRT aumentarão quando o reator limitador estiver em operação. Estes novos requisitos de TRT diferentes daqueles para a configuração sem o reator limitador inserido, ocorrem devido às propagações e reflexões das ondas trafegantes causadas pelo reator durante a aplicação dos curtos-circuitos. Todavia, os novos requisitos de TRT ainda são atendidos pela Norma IEC de disjuntores, condição que é necessária para atestar a viabilidade da solução. Cabe salientar que esta solução, além da viabilidade técnica e da atratividade econômica, não causa impactos no sistema de proteção existente, exigindo somente alguns novos ajustes em função da nova topologia de rede, por envolver o uso apenas de dispositivo limitador do tipo passivo.

Na Tabela 2 são mostradas as características elétricas básicas especificadas para cada RLC.

Tabela 2 – Características elétricas básicas do RLC

- Tensão nominal (kV):	345
- Frequência nominal (Hz):	60
- Indutância por fase ( $\mu$ H):	40000
- Corrente nominal (A):	680
- Máxima queda de tensão (kV, eficaz):	10,2
- Potência nominal (Mvar):	470
- Corrente nominal de curto-circuito (kA, eficaz):	5,6
- Nível de isolamento ao impulso (kV, pico):	1175
- Nível de isolamento à manobra (kV, pico):	950
- Fator de qualidade:	$\geq 300$
- Tipo de instalação:	exterior

## 7.0 - CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi apresentar o processo de análise de alternativa para evitar a substituição quase que total dos equipamentos de manobra do setor de 345 kV da subestação Tijuco Preto.

Esse processo teve a participação importante do ONS, uma vez inicialmente mudaria a forma de operar o pátio de 345 kV de uma subestação existente.

Como proposições aos agentes:

- à EPE que nos estudos de expansão do sistema de transmissão deva ser incluído não somente os custos de troca dos equipamentos superados mas também o tempo necessário a realizar essas trocas e os desligamentos existentes.
- Considerar a possibilidade de reconfiguração da topologia de rede elétrica para evitar esses casos de superação de subestações de grande porte.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) AMON F. J. – “Limitação de curto-circuito: Experiência de FURNAS e análise de novas tecnologias existentes e em desenvolvimento, cada vez mais necessárias para viabilizar a conexão de novos produtores independentes à rede básica” – IX ERLAC, Foz do Iguaçu, maio de 2001.

(2) AMON F. J., HARTUNG K. H. – “Aplicação de novas técnicas de limitação de curto-circuito face à conexão de produtores independentes à rede básica sob o novo ambiente desregulamentado do setor elétrico brasileiro” – XVI SNPTEE, Campinas, outubro de 2001.

(3) AMON F. J., Fernandes, P. C. A., Pimenta, D. G. – “Análise da superação das características nominais de equipamentos: métodos para a identificação da possibilidade de ocorrência e estudo de soluções de mitigação face as regras do atual modelo do setor elétrico” – XVIII SNPTEE, Curitiba, outubro de 2005.

(4) AMON F., J., D’AJUZ, A., Castanheira, A., Fernandez, P. C., Rose, E. H. – “Brazilian successful experience in the usage of current limiting reactors for short-circuit limitation” – IPST 2005, Montreal, Canada.

(5) Edital de Leilão no. 001/2005 da Aneel – LT Tijuco Preto - Itapeti - Nordeste – 345 kV.

**9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS**

Frederico Penna Pereira

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 03 de abril de 1954.

Pós-graduação (1981) e Graduação (1977) em Engenharia Elétrica: PUC – Rio de Janeiro – RJ

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1980.

Gerente do Departamento de Planejamento de Transmissão

Márcio Goldemberg Sereno

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 27 de abril de 1953.

Pós-graduado (1983) em Sistemas de Potência na PUC – RJ e Graduação (1977) em Engenharia Elétrica na UERJ – Rio de Janeiro.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1978.

Chefe da Divisão de Estudos do Sistema de Transmissão do Departamento de Planejamento de Transmissão.

Jorge Amon Filho

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 08 de agosto de 1952.

Mestrado (1986) e Graduação (1975) em Engenharia Elétrica: PUC – Rio de Janeiro – RJ

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1976.

Gerente da Divisão de Estudos de Equipamentos do Departamento de Planejamento de Transmissão

Membro do SC A3 e do WG A3.16 do CIGRÉ Internacional, Coordenador do Comitê de Estudos A3 do CIGRÉ-Brasil e do Comitê Brasileiro de Usuários do EMTP/ATP

Marco Antonio de Paiva Fontes

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 26 de agosto de 1959.

Pós-graduação em controle (1983) pela COPPE-UFRJ e Graduação (1982) em Engenharia Elétrica: UFRJ – Rio de Janeiro – RJ.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas S.A., desde 1983.

Gerente da Divisão de Análise do Sistema do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação

José Márcio Peralta

Nascido em Maringá, PR em 29 de julho de 1950.

Graduação (1972) em Engenharia Elétrica: EFEI – Itajubá – MG

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas S.A., desde 1982.

Gerente do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação, tendo sido Gerente da Divisão de Análise do Sistema.