



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

GSC - 21  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO X  
GRUPO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO - GSC**

**ESTUDO DA COORDENAÇÃO DOS ISOLAMENTOS DE CABOS SUBTERRÂNEOS 230 KV DIRETAMENTE  
CONECTADOS A LINHAS AÉREAS NA SE ANGELIM 500/230 KV E AVALIAÇÃO DO IMPACTO NAS  
INSTALAÇÕES EXISTENTES**

**Fernando Rodrigues Alves \***  
CHESF

**Fabiana da Silva Leal**  
CHESF

**André Luiz Pereira da Cruz**  
CHESF

**RESUMO**

O projeto de ampliação dos setores de 500kV e 230kV da subestação (SE) de Angelim, integrante da Rede Básica da Chesf, mostrou como solução mais viável, nos aspectos técnicos e de confiabilidade, o remanejamento de três entradas de linha (ELs) 230kV destinadas à subestação de Tacaimbó, do quadro antigo para o quadro novo mediante cabos subterrâneos. Nesta alternativa, os cabos ficariam confinados ao pátio da subestação.

A instalação destes cabos, diretamente conectados às linhas de transmissão (LTs), poderia originar esforços de tensão nos equipamentos, incompatíveis com a suportabilidade destes componentes já em operação na subestação. Em função destes aspectos, foram efetuados estudos de coordenação dos isolamentos a impulso atmosférico de modo a quantificar as conseqüências para os equipamentos existentes bem como dimensionar os novos. O trabalho apresenta, de forma conclusiva, o efeito dos cabos subterrâneos sobre as instalações existentes bem como fornece as características elétricas básicas para especificação destes cabos, muflas de conexão com as linhas de 230kV existentes e dos pára-raios necessários, além de determinar a localização mais adequada para estes últimos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sobretensões. Cabos subterrâneos. Coordenação dos Isolamentos. Coordenação dos Isolamentos a Impulso Atmosférico. Pára-raios.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A ampliação da SE Angelim 500/230kV com instalação, dentre outros eventos, de dois autotransformadores de 600MVA nesta subestação teve como conseqüência a necessidade de remanejar três ELs de 230kV destinadas à SE Tacaimbó 230kV, do quadro antigo para o quadro novo de 230kV. Os estudos realizados pela Chesf indicaram a necessidade de executar esta transferência através de cabos subterrâneos. As análises concluíram que esta alternativa se mostrava viável, atendia aos requisitos do Edital da ANEEL e apresentava as seguintes vantagens em relação à alternativa de relocação através de cabos aéreos:

- Maior flexibilidade operacional, pois as linhas remanejadas ficariam imunes a desligamentos acidentais em face de não existência de cruzamentos com outras linhas de transmissão existentes;
- Maior facilidade para sua implantação, não requerendo desligamentos prolongados das linhas a serem remanejadas;

- Maior agilidade na implantação dos remanejamentos, eliminando riscos de atrasos decorrentes da obtenção da licença ambiental para viabilização do empreendimento;
- A implantação dessa alternativa seria na própria subestação de Angelim não sendo necessárias desapropriações.

Em função desses aspectos, foi proposta pela Chesf a execução da transferência das LTs através de cabos subterrâneos a serem instalados desde o local das novas ELs (pátio novo) até alcançar a primeira estrutura de cada um dos circuitos existentes e em operação na época. Neste sentido, foi encaminhado a ANEEL um pedido de autorização para implantação do empreendimento que foi consolidado em março de 2003, sendo a empresa autorizada a efetuar as obras necessárias para o remanejamento das LTs 230kV Angelim – Tacaimbó C1/C2/C3, utilizando esta alternativa que solucionaria os problemas decorrentes do grande número de travessias com as linhas existentes e das dificuldades de implantação de novas estruturas necessárias à transferência dos bays de linha através de linhas aéreas convencionais.

Foi então observada a necessidade de efetuar estudos detalhados de coordenação dos isolamentos dos cabos, definir as características elétricas básicas para subsidiar a sua especificação no que concerne aos aspectos de suportabilidade dielétrica e avaliar o seu impacto nas instalações existentes.

Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados das análises de coordenação dos isolamentos a impulso atmosférico nos cabos e na SE Angelim 230kV, instalados no trecho entre o pátio antigo e o pátio novo 230kV, de forma a definir a suportabilidade dos cabos e demais componentes da subestação.

## 2.0 - CRITÉRIOS

### 2.1 Margens de proteção dos isolamentos

As margens de proteção são usadas para prevenir possíveis erros nas estimativas de distâncias entre o pára-raios e os equipamentos protegidos, na corrente máxima do surto, no valor da taxa de crescimento da frente de onda, envelhecimento dos isolamentos, além de outras eventuais imprecisões nos dados utilizados. A Norma Brasileira, NBR 8186–Guia de Aplicação de Coordenação do Isolamento, recomenda utilizar um fator de segurança mínimo de 1,20 para proteção dos equipamentos contra surtos atmosféricos. Desta forma, nestas análises será considerada uma margem de proteção de 20% entre a solicitação e a suportabilidade destes equipamentos.

### 2.2 Suportabilidade dos equipamentos

Os equipamentos da subestação de Angelim, transformadores de potência, transformadores de potencial, transformadores de corrente, chaves seccionadoras, disjuntores, filtros de onda e pára-raios estão dimensionados para uma TSNIA de 950kV. Considerando-se uma margem de proteção de 20%, a máxima sobretensão admissível para os componentes da subestação não deverá ser inferior a 760kV.

O valor da TSNIA para os cabos subterrâneos e para as muflas de conexão do cabo à linha de transmissão ainda não está disponível, devendo ser posteriormente informado pelo fabricante destes componentes em função dos estudos aqui apresentados e do projeto do cabo.

## 3.0 - PARÂMETROS UTILIZADOS

### 3.1 Configuração simulada

A Figura 1 apresenta a planta baixa do trecho da subestação sob estudo, visualizada em corte na Figura 2, enquanto que um diagrama esquemático da referida SE está indicado na Figura 3. A configuração adotada refere-se à situação de operação mais pessimista, onde o disjuntor da EL para Tacaimbó foi considerado na posição aberta. Esta condição de operação é bastante conservativa para as análises de sobretensões nos equipamentos decorrentes da incidência de impulso atmosférico via LT.

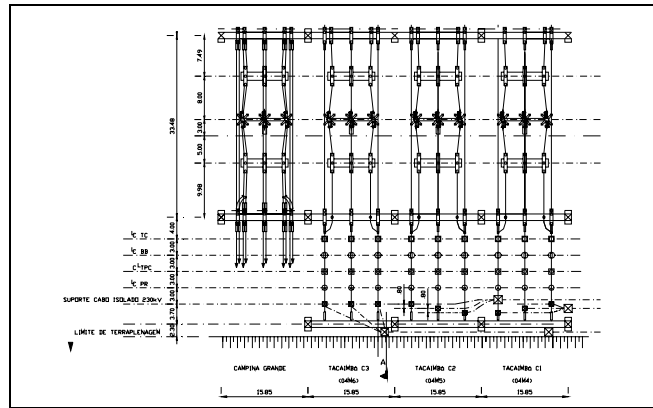


FIGURA 1 – Planta Baixa da SE Angelim

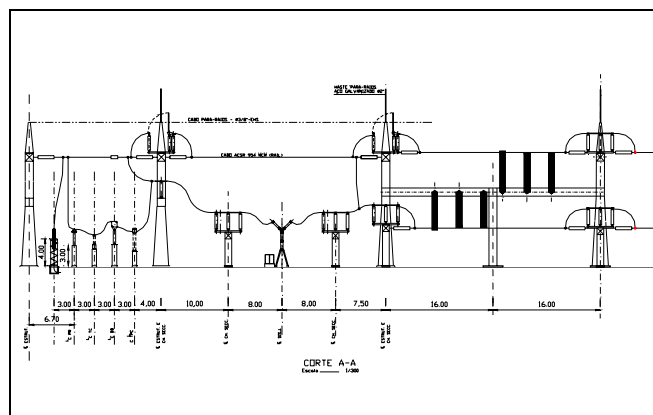


FIGURA 2 – Vista em Corte da SE Angelim

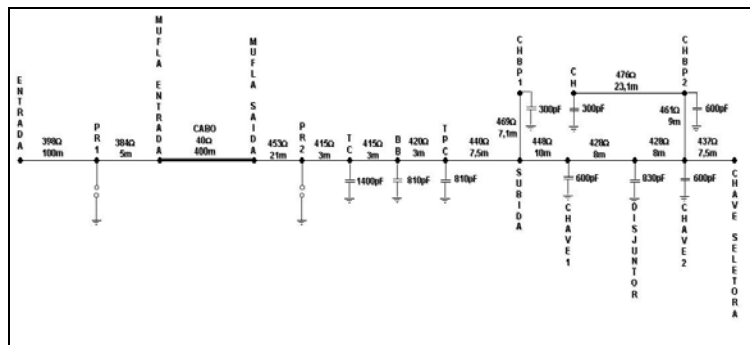


FIGURA 3 – Diagrama Esquemático da SE Angelim

### 3.2 Impedâncias de surto e velocidade de propagação da onda

As simulações foram efetuadas representando-se as linhas de transmissão, barramentos e interligações entre equipamentos da subestação por suas respectivas impedâncias de surto.

Para o cabo subterrâneo foi assumida uma impedância de 40 ohms e uma velocidade de propagação do surto no cabo igual a 50% da velocidade da luz. Estes parâmetros são normalmente utilizados nas simulações de incidência de surto atmosférico em cabos. Destaca-se que estes valores deverão ser posteriormente confirmados pelo fabricante fornecedor do cabo. A Tabela 1, a seguir, apresenta os valores de impedância de surto e velocidade de propagação da onda, utilizados para os diversos elementos da subestação.

TABELA 1 - Parâmetros dos Condutores Utilizados nas Simulações

Elemento	Característica do condutor	Impedância de surto (ohms)	Velocidade de propagação (m/μs)
Linhas de transmissão	Grosbeak 1x636MCM/fase	398	300
Barramentos	Grosbeak 2x636MCM/fase	322	300
Ligações entre equipamentos	Grosbeak 2x636MCM/fase	322	300
Cabos subterrâneos	-	40	150

### 3.3 Capacitâncias parasitas

Na modelagem da subestação de Angelim para as simulações de injeção de surto, foram considerados os seguintes valores de capacitâncias parasitas para os diversos equipamentos 230kV:

- Disjuntor 830 pF
- Secionador 600 pF
- Filtro de Onda 810 pF
- Transformador de potencial capacitivo 810 pF
- Transformador de corrente 1400 pF
- Mufla de conexão entre a linha e o cabo subterrâneo -

Observa-se que as muflas de conexão do cabo subterrâneo com a linha de transmissão não foram representadas pelas suas capacitâncias por não se ter ainda informações sobre o valor deste parâmetro. A não consideração desta capacitância leva a resultados mais conservativos. Os valores de capacitâncias parasitas utilizados neste estudo para os demais equipamentos são valores típicos encontrados no sistema.

### 3.4 Pára-raios 192kV – Características VxI

A característica tensão x corrente dos pára-raios, utilizada nas simulações, é apresentada na Tabela 2, a seguir:

TABELA 2 - Parâmetros dos Condutores Utilizados nas Simulações

Corrente (A)	Tensão (kV)
0,001	261,3
0,01	280,0
0,1	288,0
1	299,3
10	306,7
100	333,3
1000	373,3
5000	418,0
10000	442,0
20000	482,0
40000	530,0

### 3.5 Amplitudes das sobretensões, frentes e formas de onda

O valor máximo da sobretensão que pode atingir a subestação está limitado pela suportabilidade da cadeia de isoladores para ondas de polaridade negativa.

As LTs Angelim – Tacaimbó 230kV possuem cadeia com 16 isoladores cerâmicos de vidro com as seguintes características:

- $V_{50\%}$  = 1500 kV
- $V_{3\sigma}$  = 1650 kV
- $\sigma$  = 3%

Dessa forma, a máxima sobretensão que poderá atingir a subestação deverá estar em torno de 1650 kV.

A frente considerada para a onda de tensão foi de 1650 kV/ $\mu$ s. A Figura 4, a seguir, mostra a forma de onda utilizada no estudo.

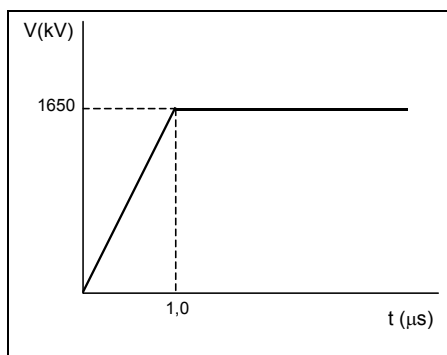


FIGURA 4 – Frente de Onda Utilizada no Estudo

#### 4.0 - ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

As análises de incidência de descargas atmosféricas na entrada de linha da subestação de Angelim, considerando a instalação de um cabo subterrâneo com 400m de extensão conectando as entradas das linhas Angelim – Tacaimbó 230kV C1, C2 e C3, foram efetuadas a partir dos arranjos físicos da instalação. As distâncias envolvidas e a localização dos pára-raios foram determinadas a partir dos desenhos apresentados nas Figuras 1 e 2.

Vale observar que, para efeito de simplificação e de forma a ser mais conservativo nas análises, o disjuntor da entrada de linha foi considerado na posição aberta no momento da incidência do surto.

As simulações foram efetuadas através do programa ATP (Alternative Transients Program).

Foi considerado um surto com amplitude de 1650kV e tempo de frente de 1 $\mu$ s incidindo pelo trecho aéreo da linha de transmissão Angelim – Tacaimbó 230kV.

As seguintes situações de localização do pára-raios foram analisadas:

##### 4.1 Com um conjunto de pára-raios localizado antes da primeira mufla do cabo subterrâneo

Os resultados das simulações estão apresentados na Tabela 3, a seguir. Nesta situação, constata-se que o pára-raios localizado antes da mufla de conexão da linha com o cabo não é suficiente para oferecer proteção a todos os equipamentos da entrada de linha. As sobretensões no transformador de corrente, transformador de potencial capacitivo, chaves seccionadoras do disjuntor e no próprio disjuntor, são superiores ao valor suportável por estes equipamentos, estabelecido no item 3.2 (760kV). Para o disjuntor, a sobretensão chega a exceder 18% deste valor.

TABELA 3 - Tensões e margens de proteção nos pontos de conexão dos equipamentos

Ponto de Medição	Tensão (kV) / Margem de Proteção (%)		
	Pára-raios antes do cabo	Pára-raios depois do cabo	Pára-raios antes e depois do cabo
Pára-raios de entrada	467,3/51,0	576,0/39,4	412,2/56,6
Mufla de entrada do cabo	522,6/ -	576,1/ -	439,5/ -
Mufla de saída do cabo	711,2/ -	532,3/ -	467,5/ -
Pára-raios saída do cabo	801,3/15,7	446,7/53,0	434,6/54,3
Transformador de corrente	820,0/13,7	457,5/52,0	457,0/51,9
Bobina de Bloqueio	831,2/12,5	488,0/48,6	487,6/48,7
T de potencial capacitivo	841,2/11,4	513,5/46,0	513,3/46,0
Chave entrada de linha	884,7/6,9	654,5/32,1	654,0/31,2
Disjuntor entrada de linha	898,0/5,5	703,3/26,0	702,5/26,1

Para esta situação, as muflas de entrada e saída do cabo deveriam ter uma tensão suportável a impulso atmosférico mínima de 627kV e 853kV, respectivamente, considerando uma margem de proteção de 20%.

Os cabos subterrâneos deveriam ser especificados com uma TSNIA mínima de 853kV.

As figuras abaixo apresentam os oscilogramas das tensões nas muflas do cabo para essa situação:

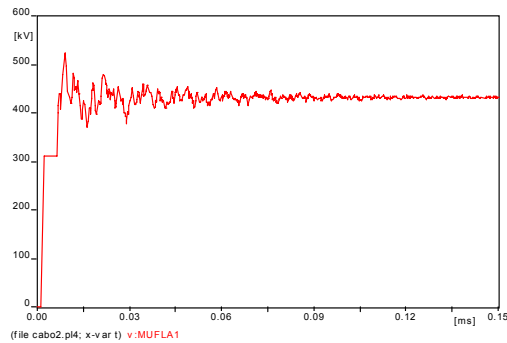


FIGURA 5 – Tensão na Mufla de Entrada do Cabo Subterrâneo

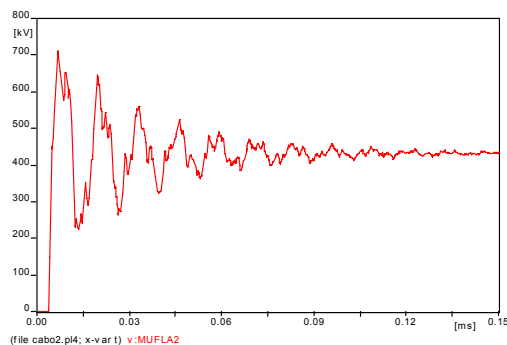


FIGURA 6 - Tensão na Mufla de Saída do Cabo Subterrâneo

#### 4.2 Com um conjunto de pára-raios localizado após a mufla de afloramento do cabo subterrâneo

No item anterior verificou-se que a colocação de um conjunto de pára-raios antes da mufla não é suficiente para proteger todos os equipamentos da entrada de linha. Neste item é analisado se o deslocamento deste conjunto de pára-raios para uma posição após a mufla é mais eficaz na proteção dos componentes da entrada de linha.

Verifica-se na Tabela 3 que nesta situação todos os equipamentos ficam submetidos a sobretensões inferiores à sua suportabilidade máxima estabelecida nos critérios (760kV). A máxima sobretensão na mufla de entrada do cabo fica em torno de 576kV, o que leva à necessidade de especificar uma tensão suportável mínima para este componente de 691kV. Este mesmo valor deverá também ser considerado na especificação do cabo subterrâneo nesta configuração. As figuras abaixo apresentam os oscilogramas das tensões nas muflas do cabo para essa situação:

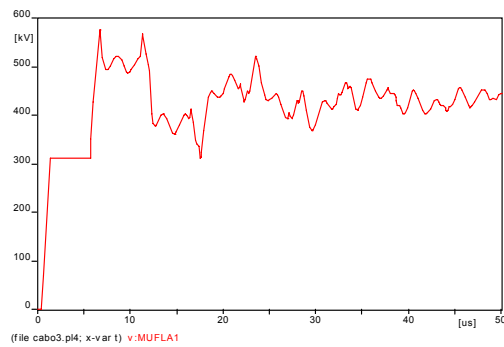


FIGURA 7 - Tensão na Mufla de Entrada do Cabo Subterrâneo

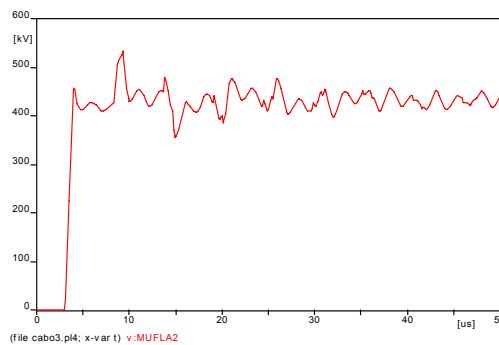


FIGURA 8 - Tensão na Mufla de Saída do Cabo Subterrâneo

#### 4.3 Com conjuntos de pára-raios localizados nos terminais do cabo subterrâneo

Foram efetuadas análises de injeção de surto atmosférico na entrada de linha considerando conjuntos de pára-raios localizados em ambos os terminais do cabo subterrâneo. Nesta configuração, verifica-se que as sobretensões máximas nas muflas de entrada e saída do cabo sofrem uma redução da ordem de, respectivamente, 137kV (24%) e 65kV (12%), quando comparadas com as obtidas considerando pára-raios localizados apenas na saída do cabo.

A máxima sobretensão que pode atingir a mufla ou o cabo subterrâneo na configuração de instalação de pára raios na entrada e saída do cabo deverá ser de 468kV.

Levando em consideração a margem de proteção de 20% recomendada pela norma NBR 8186, a mínima tensão suportável a impulso atmosférico que deverá ser especificada para o cabo e para as muflas deverá estar em torno de 561kV. Este valor é 19% inferior ao valor recomendado para a TSNIA do cabo subterrâneo para a situação de instalação de apenas um conjunto de pára-raios após a mufla (691kV). As figuras abaixo apresentam os oscilogramas das tensões nas muflas do cabo para essa situação:

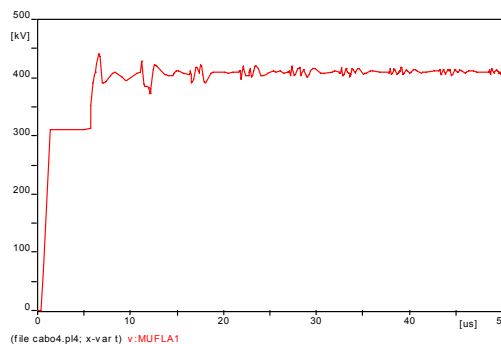


FIGURA 9 – Tensão na Mufla de Entrada do Cabo

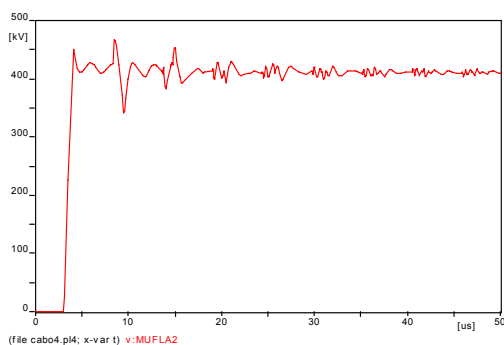


FIGURA 10 – Tensão na Mufla de Saída do Cabo

## 5.0 - CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas pode-se obter as seguintes conclusões:

A colocação de apenas um conjunto de pára-raios próximo à mufla de entrada do cabo subterrâneo não é suficiente para proteger todos os equipamentos da entrada de linha Angelim – Tacaimbó 230kV.

A instalação de um conjunto de pára-raios após a mufla de afloramento do cabo subterrâneo no pátio da SE oferece proteção adequada a todos os componentes da entrada de linha. Nesta situação, a tensão suportável a ser especificada para as muflas e para os cabos subterrâneos deverá estar em torno de 692kV.

A filosofia de proteção de cabos subterrâneos contra impulso recomenda a instalação de um conjunto de pára-raios próximo ao terminal de entrada deste elemento, dado que não se conhece, com precisão, a forma de onda do surto incidente pela linha. Considerando que esta proteção não é suficiente para dar cobertura a todos os equipamentos da entrada de linha e face às incertezas quanto aos parâmetros utilizados no estudo, deverão ser instalados conjuntos de pára-raios na entrada e saída dos cabos. Este arranjo deverá propiciar um perfil de sobretensão mais uniforme ao longo deste componente, além de reduzir o valor da TSNIA das muflas e dos cabos em 24% e eventualmente o seu custo de aquisição. Nesta situação, o valor mínimo de tensão suportável a ser especificado para estes componentes fica em torno de 561kV.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CHESF. SE Angelim 230kV: Remanejamento das linhas Angelim – Tacaimbó, C1, C2 e C3 - Estudo de coordenação de isolamentos, RT-01-01-05/2003.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Guia de aplicação de coordenação do isolamento - NBR 8186. Brasil.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Coordenação do isolamento - Procedimento - NBR 6939. Brasil.