



**GRUPO VIII**  
**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)**

**ESTUDO DE INJEÇÃO DE SURTO ATMOSFÉRICO  
NAS SUBESTAÇÕES DA INTERLIGAÇÃO NORTE-SUL**

A.S.B.Câmara(\*) P. C.V.Esmeraldo J.Amon F<sup>2</sup> M. Accioly J. Honda M. J. A. Maia  
A.Nakazato F. M.Resende F. M.Salgado C. C.M.F.Oliveira D. O. C. Brasil R. L. Leoni  
**FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. PROMON/THEMAG ELETROBRÁS**  
BRASIL

**RESUMO**

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os critérios, modelagens e representações adotadas, bem como as principais conclusões e recomendações, referentes aos estudos de injeção de surto atmosférico realizados para as subestações que compõem o tronco principal da chamada Interligação Norte-Sul.

**PALAVRAS-CHAVE**

Surto Atmosférico, Coordenação de Isolamento, TCSC, Pára-raios

**1.0 - INTRODUÇÃO**

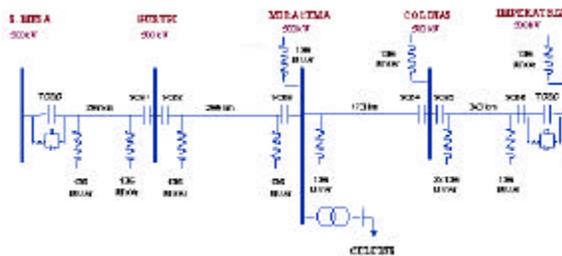
A Interligação Norte-Sul tem seu tronco principal entre as subestações de Imperatriz (ELETRONORTE) no Maranhão, e Serra da Mesa (FURNAS), em Goiás.

No seu estágio inicial (1<sup>a</sup> etapa) esta interligação consta de um circuito de 500kV em torre compacta, com capacidade máxima de transmissão de 1300 MW. Com aproximadamente 1100 km de extensão, esta linha é seccionada através de três subestações intermediárias: Colinas, Miracema e Gurupi (Figura 1).

Prevê-se ainda um aumento da capacidade de intercâmbio energético da Interligação N/S, que possivelmente se dará com a entrada em operação de um segundo circuito paralelo ao primeiro (2<sup>a</sup> etapa), elevando a capacidade de transmissão do tronco para 2500MW.

No âmbito dos estudos de transitórios eletromagnéticos para especificação das características elétricas dos equipamentos associados ao primeiro circuito da Interligação Norte-Sul, foram definidas e verificadas as características dos pára-raios a serem adotados ao longo do tronco.

Nos transitórios elétricos de manobra, as distâncias entre os equipamentos no interior da subestação podem ser desprezadas em função da natureza dos fenômenos envolvidos (de baixa e média frequência). O mesmo não ocorre com fenômenos de alta frequência, como as sobretensões originadas por descargas atmosféricas; diferentes distâncias entre os pára-raios e o elemento protegido ou, ainda, diferentes arranjos físicos da subestação provocam composições diferentes das diversas ondas de tensão refletidas no interior da subestação, resultando em diferentes sobretensões com maior ou menor severidade. Assim, para se verificar a adequacidade da proteção para sobretensões de origem atmosférica provida pelos pára-raios é necessário uma análise detalhada e específica, sendo esta análise o objeto do estudo em pauta[1].



**Figura 1 – DIAGRAMA UNIFILAR DA INTERLIGAÇÃO N/S – 1<sup>a</sup> ETAPA**

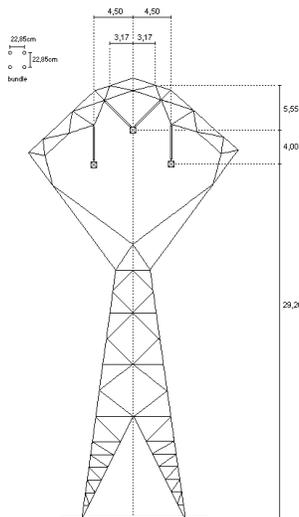
## 2.0 – CRITÉRIOS ADOTADOS

### 2.1 Surtos atmosféricos

Define-se descarga direta como sendo o raio que incide diretamente no condutor-fase da linha de transmissão, devido à falha de blindagem.

Define-se descarga indireta como sendo o raio que incide no topo da torre ou nos cabos-guarda, que provoca a ruptura do isolamento da cadeia de isoladores da linha de transmissão.

Considerou-se para análise das descargas diretas, uma corrente de surto com 10kA de amplitude, calculada a partir do ângulo de blindagem da torre (Figura 2), com um tempo de frente de onda de  $0,5\mu\text{s}$  e tempo de cauda de  $50\mu\text{s}$ . Para descarga indireta, a corrente de raio adotada foi de 200kA com tempo de frente de onda de  $4\mu\text{s}$  e tempo de cauda de  $50\mu\text{s}$ .



**Figura 2-** TORRE COMPACTA DE 500kV UTILIZADA

Para as duas situações, descarga direta ou indireta, considerou-se a incidência do raio na torre mais próxima à subestação.

### 2.2 Contingências

Para efeito de análise, principalmente nas simulações da 2ª etapa, foram consideradas as subestações com até dois circuitos fora de operação (contingência dupla).

### 2.3 Máxima sobretensão admissível

Considerou-se que a máxima sobretensão admissível no interior das subestações de 500kV da Interligação Norte-Sul, deveria manter uma margem mínima de proteção de 15% em relação ao nível de isolamento dos equipamentos (isolamento não auto-regenerativo), devido a impulso atmosférico. Sendo assim, para o nível de isolamento a impulso atmosférico adotado (1550kV), a máxima sobretensão admissível é:

$$0,85 \times \text{Nível de isolamento}, \text{ ou seja,} \\ \text{Máxima sobretensão admissível} = 1317\text{kV}$$

## 3.0 - DADOS CONSIDERADOS

### 3.1 Configuração das subestações

As configurações das SE Colinas e Miracema estão conforme originalmente considerado no projeto básico (Figura 4(a)). Para Gurupi, 1ª etapa, considerou-se o remanejamento do segundo reator da LT Gurupi-Miracema para a LT S.Mesa-Samambaia II. Este remanejamento do reator está associado à utilização de religamento monopolar na Interligação [2,3].

Para a SE de Imperatriz (Figura 4(b)), 1ª etapa, considerou-se um reator na LT Imperatriz-Colinas e outro conectado ao barramento de 500kV.

Os barramentos flexíveis e os rígidos, bem como os cabos de conexão foram representados por impedâncias de surto:  $Z_{\text{surto}} = 350 \Omega$   $\text{veloc.} = 250 \text{ m}/\mu\text{s}$

### 3.2 Linhas de Transmissão

Para simulações de descargas e propagação de surtos atmosféricos, as linhas de transmissão de 500kV foram representadas através do modelo de parâmetros distribuídos para linhas não transpostas (ATP), sendo modeladas por um sistema acoplado de um condutor-fase e dois cabos-guarda. Os cabos adotados foram:

- cabo fase: bundle 4xRail 954kcmil 45x7
- cabo guarda: HS bitola 3/8 - 7fios

Foram consideradas cinco torres com vãos de 450m e resistência de aterramento de  $20\Omega$ . As dimensões das torres e o esquema de representação da linha de transmissão estão representados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

A torre foi representada pela impedância de surto:  $Z_{\text{surto}} = 120\Omega$   $\text{veloc.} = 200 \text{ m}/\mu\text{s}$



300	870000	15000	1096000
500	892700	20000	1140000
1000	919000	40000	1245000

### 3.5 Descargas atmosféricas

#### 3.5.1 Descarga direta

As descargas diretas no condutor, devido à falha de blindagem, foram calculadas a partir de um ângulo de blindagem estimado em 8,5°, que, considerando-se as alturas dos cabos-fase e guarda da torre, corresponde a uma corrente de surto de aproximadamente 10kA. Adotou-se, para esta corrente, uma frente de onda de 0,5µs, com tempo de cauda de 50µs.

#### 3.5.2 Descarga Indireta

Para as descargas indiretas, isto é, aquelas que incidem no topo da torre ou nos cabos guardas foi admitida uma corrente de 200kA, associada a uma frente de 4µs e um tempo de cauda de 50µs.

Na definição da tensão de ruptura da cadeia de isoladores, considerou-se  $V_{50\%} = 2200\text{kV}$  e o desvio padrão  $\sigma = 3\%$ , com a cadeia de isoladores sendo modelada por uma chave com tensão de fechamento:

$$V = V_{50\%} (1 - 3\sigma)$$

que corresponde à uma tensão de ruptura de 2070kV.

## 4.0 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 SE's Intermediárias: Colinas, Miracema e Gurupi:

De um modo geral, para as subestações intermediárias, os valores das sobretensões obtidos foram todos inferiores ao do critério e, em particular, aqueles referente às descargas diretas são menos severos que os obtidos com descargas indiretas. O surto atmosférico ao atingir a torre se divide em várias parcelas de acordo com os caminhos possíveis de propagação; cabos- guarda, torre e, se ocorrer uma descarga pela cadeia de isoladores, através também do cabo-fase. Se, ao invés de atingir a torre, o surto atingir diretamente o cabo- fase, rompendo a blindagem dos cabos guarda, o surto se divide em apenas duas parcelas; uma propagando-se em direção à subestação e outra em direção à linha.

No caso de descarga direta, a parcela que atinge a subestação é significativamente menor que a parcela devida a uma descarga indireta, mesmo com esta se dividindo em um número maior de “caminhos”. Por este motivo as sobretensões na subestação devido à uma descarga direta tendem a ser inferiores.

Evidentemente, esta constatação é vinculada às correntes de surto adotadas como critério neste estudo; 10kA para descarga direta e 200kA, no caso de descarga indireta.

As margens mínimas de segurança obtidas para cada subestação, foram:

#### SE Colinas

24% 1ª etapa, condição normal de operação, descarga indireta na LT Colinas-Imperatriz

32% 2ª etapa. condição normal de operação, descarga indireta na LT Colinas-Imperatriz.

24% 2ª etapa, contingência dupla, descarga indireta na LT Colinas-Imperatriz.

Para o caso de contingência dupla (saída das LT's Colinas-Imperatriz I e Colinas-Miracema I), foi encontrado um valor máximo de sobretensão de 1375kV numa das extremidades do barramento, ou seja, superior ao limite imposto como critério. Contudo, esta sobretensão não constitui risco de dano ao barramento por seu isolamento ser auto-regenerativo.

#### SE Miracema

22% 1ª etapa, condição normal de operação, descarga indireta na LT Miracema-Colinas.

28% 2ª etapa. condição normal de operação, descarga indireta na LT Miracema-Colinas.

25% 2ª etapa, contingência dupla, descarga indireta na LT Miracema-Colinas.

#### SE Gurupi

23% 1ª etapa, condição normal de operação, descarga indireta na LT Gurupi-S.Mesa.

27% 2ª etapa. condição normal de operação, descarga indireta na LT Gurupi-S.Mesa.

21% 2ª etapa, contingência dupla, descarga indireta na LT Gurupi-S.Mesa.

### 4.2 SE Imperatriz

#### 1ª Etapa

Não foram previstos, inicialmente, pára-raios para proteção do TCSC e capacitor-série no vão da LT Imperatriz-Colinas, embora houvesse um conjunto de pára-raios para o divisor capacitivo de entrada de linha e outros dois conjuntos para os reatores de linha e de barra (Figura 4(b)).

Em função da limitação de espaço no terreno original da subestação, a solução de projeto adotada para a implantação do TCSC e do banco de capacitor-série, uma vez que ambos demandam grande espaço para sua instalação, foi o de instalá-los em um terreno contíguo

separado da subestação original pela rodovia Belém-Brasília ( BR-010 ).

Assim, o TCSC e o capacitor série seriam protegidos apenas secundariamente pelos conjuntos de pára-raios do banco de reator e divisor capacitivo de potencial de entrada de linha. O vão, sem proteção, entre esses conjuntos de pára-raios e o primeiro barramento, do outro lado da rodovia, seria superior a 500m. Consequentemente, o TCSC e o capacitor-série seriam submetidos a sobretensões severas quando da propagação das parcelas de surtos atmosféricos que atingem a linha de transmissão e adentram na subestação que foi confirmado pelos resultados das simulações.

Em situações de contingência dupla, sem a LT Imperatriz-Marabá I e a LT Imperatriz-P.Dutra I, ou ainda, sem os dois circuitos da LT Imperatriz-P.Dutra, as máximas sobretensões observadas se mostraram superiores ao valor de 1317kV adotado como critério (1361kV e 1328kV, respectivamente).

Ilustrando o grau de severidade dos resultados são apresentadas na Tabela 1 as margens de segurança verificadas no TCSC e capacitor série. Os demais equipamentos, reatores e divisor capacitivo de potencial, estão adequadamente protegidos pelos respectivos pára-raios.

**TABELA 1**  
MARGENS DE SEGURANÇA PARA O TCSC E CAPACITOR-SÉRIE – SE IMPERATRIZ

	cap.série (%)	TCSC (%)
<b>Desc. direta</b>		
Condição normal de operação	31	26
<b>Desc. Indireta</b>		
Condição normal de operação	21	19
<b>Desc. Indireta</b>		
s/ LT's P.Dutra I e II	18	14
<b>Desc. Indireta</b>		
s/LT Imperatriz-Marabá cir 1	19	12
s/LT Imperatriz-P.Dutra cir 1		
<b>Desc. Indireta</b>		
s/LT Imperatriz-Marabá cir 2	21	18
s/LT Imperatriz-P.Dutra cir 2		

Este quadro de severidade é alterado com a implantação da LT Imperatriz-Marabá III, ainda na 1ª etapa, isto é, com apenas um circuito da Interligação. Nesta configuração todas as sobretensões verificadas no TCSC e capacitor série são inferiores a 1274kV, o que corresponde a uma margem de segurança de 18%. A entrada em operação da LT Imperatriz-Marabá III proporciona uma melhoria geral nas margens de segurança. No entanto, a implantação deste terceiro circuito está prevista somente após a entrada em

operação da Interligação Norte-Sul, em data ainda não definida.

Os resultados da Tabela 1 demonstram a necessidade de instalação de um conjunto adicional de pára-raios junto ao TCSC. Assim, na Tabela 2 são apresentadas as novas sobretensões máximas com um conjunto adicional de pára-raios (a)entre o TCSC e o capacitor série, e (b) junto ao TCSC, do lado do barramento.

**TABELA 2**  
DEFINIÇÃO DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS PÁRA-RAIOS DO TCSC

	cap.série (%)		TCSC (%)	
	(a)	(b)	(a)	(b)
<b>Desc. Indireta</b>				
s/ LT's P.Dutra I e II	23	26	26	29
<b>Desc. Indireta</b>				
s/LT Imperatriz-Marabá I	23	27	26	29
s/LT Imperatriz-P.Dutra I				
<b>Desc. Indireta</b>				
s/LT Imperatriz-Marabá II	23	25	28	29
s/LT Imperatriz-P.Dutra II				

**Nota:**

(a) - Conjunto adicional de pára-raios entre o TCSC e o capacitor série

(b) - Conjunto adicional de pára-raios junto ao TCSC, do lado do barramento

O melhor local de instalação do conjunto de pára-raios mostrou-se ser junto ao TCSC, no vão entre o equipamento e o barramento.

**2ª Etapa**

Com a entrada em operação do segundo circuito da LT Imperatriz-Colinas, o capacitor série, na 1ª etapa conectado ao primeiro circuito, é deslocado para o segundo circuito, com o TCSC permanecendo no seu local original de instalação. Ainda para esta 2ª etapa, no vão do reator de barra, foi considerado o terceiro circuito da LT Imperatriz-Marabá. Considerou-se ainda o conjunto adicional de pára-raios recomendado para ser instalado entre o TCSC e o reator de linha, conforme necessidade detectada na análise efetuada para a 1ª etapa.

Nas simulações, considerou-se parcelas de surto adentrando na subestação tanto pelo primeiro como segundo circuito. A maior sobretensão verificada foi de 1263kV (margem de segurança=19%), no capacitor série. Ressalta-se que no capacitor série, agora deslocado para o segundo circuito, não foi considerado um outro conjunto de pára-raios.

No TCSC, protegido por um conjunto de pára-raios exclusivo, a máxima sobretensão verificada foi de 1172kV (em condição normal de operação).

**4.3 SE Serra da Mesa**

### **1ª Etapa**

Na implantação da LT S.Mesa-Gurupi I, foi previsto um conjunto de pára-raios para a proteção do divisor capacitivo de entrada de linha e outro conjunto para o reator de linha. Entretanto, assim como para a SE de Imperatriz, também não foi previsto um conjunto de pára-raios para proteção do TCSC. Neste caso, as simulações efetuadas confirmaram não ser necessária uma proteção adicional. A distância entre o pára-raios do reator, pára-raios mais próximo do TCSC, é relativamente curta, apenas 75m, e o vão livre entre este conjunto de pára-raios e o barramento, onde é previsto a instalação do TCSC, é de apenas 175m, devido a solução de projeto adotada para a sua conexão. Estes detalhes contribuem para a ocorrência de uma sobretensão não elevada.

As máximas sobretensões sobre o TCSC ocorrem durante a descarga indireta e oscilam na estreita faixa de 1236kV a 1259kV, tanto em condição normal de operação como em situações de contingência dupla, sinalizando serem insensíveis às mudanças de configuração da subestação.

### **2ª Etapa**

Com a entrada em operação do segundo circuito da LT S.Mesa-Gurupi, é planejado o remanejamento do reator para a SE Gurupi. Assim, o vão da LT S.Mesa-Gurupi I passa a dispor de apenas um conjunto de pára-raios: o do divisor capacitivo de entrada de linha. O vão definido pela distância entre este conjunto e o barramento, onde é instalado o TCSC, passa a ser de 225m. Em condições normais de operação da subestação, esse aumento da distância não implica em sobretensões elevadas; máximo de 1291kV no TCSC, com margem de proteção de 17%. No entanto, na simulação com a contingência do segundo circuito da LT S.Mesa-Gurupi, a máxima sobretensão verificada é de 1327kV, superior a máxima de critério (1317kV), com margem de proteção correspondente de 14%. Esse resultado mostra a necessidade de um conjunto de pára-raios adicional no vão da instalação do TCSC.

## **5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **5.1 SE Colinas, SE Miracema e SE Gurupi**

Os conjuntos de pára-raios previstos para cada um dos reatores, capacitores séries e divisores capacitivos de potencial de entradas de linhas são suficientes para proporcionar uma proteção adequada aos equipamentos das subestações, independentemente do número de circuitos da Interligação.

### **5.2 SE Imperatriz**

Os conjuntos de pára-raios previstos para cada reator, de linha e de barra, e para o divisor capacitivo de

potencial de entrada de linha, relativos ao primeiro e segundo circuito da LT Imperatriz-Colinas, protegem adequadamente estes equipamentos.

Inicialmente, para esta subestação não haviam sido previstos conjuntos de pára-raios específicos para proteção do TCSC e capacitor-série. Este fato, associado ao grande comprimento do vão de instalação do TCSC e do capacitor série, causam sobretensões elevadas no TCSC, demonstrando ser necessário um conjunto de pára-raios adicional para a sua proteção. As maiores sobretensões observadas no TCSC foram de 1328kV e 1361kV (margens de proteção de 14% e 12%, respectivamente), ambas superiores à máxima sobretensão admissível de 1317kV, adotada como critério.

Com a instalação de um conjunto de pára-raios entre o TCSC e o barramento, a maior sobretensão verificada foi de 1102kV.

Não foram verificadas sobretensões elevadas no capacitor-série, mesmo sem o conjunto de pára-raios adicional junto ao TCSC, independentemente do número de circuito da Interligação.

### **5.3 SE Serra da Mesa**

Na etapa referente a entrada em operação do primeiro circuito da Interligação, os conjuntos de pára-raios previstos para o reator e divisor capacitivo de potencial na entrada de linha proporcionam uma proteção adequada para os mesmos e também para o TCSC, onde não é previsto um conjunto de pára-raios específicos para a sua proteção.

Com o remanejamento planejado do reator para a SE Gurupi, condicionado à entrada em operação do segundo circuito, o TCSC é protegido apenas pelo conjunto de pára-raios do divisor capacitivo de potencial de entrada de linha, instalado a uma distância de 225m. Nesta condição, o TCSC é exposto a uma sobretensão elevada de 1327kV, superior a máxima admissível, quando da contingência da LT S.Mesa-Gurupi II. Este fato mostra a necessidade de um conjunto de pára-raios adicional junto ao TCSC, condicionada então ao remanejamento do reator.

## **6.0 - BIBLIOGRAFIA**

- (1) Avaliação da Adequação dos Pára-raios de 420kV ZnO da Interligação Norte-Sul para Surtos Atmosféricos.- Eletrobrás (ref: N/S-GEE.053.97)
- (2) Estudo de Religamento Monopolar – Condições de Extinção do Arco secundário para um Circuito da Interligação Norte-Sul - Eletrobrás (ref: N/S-GEE.036.97)
- (3) Estudos de Religamento Monopolar da Linha de Transmissão de Serra da Mesa-Samambaia II – Eletrobrás (ref: N/S-GEE.048.97)
- (4) Características Elétricas dos Equipamentos de 500kV.- Eletrobrás (ref: N/S-GEE.018.96)