



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

GSC - 03
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO (GSC)

ESTUDO DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DA SUBESTAÇÃO BLINDADA E ISOLADA A SF6, 550 kV, ASSOCIADA À SEGUNDA ETAPA DA UHE TUCURUÍ - ELETRONORTE

Camilo Machado Júnior *	Eber Hávila Rose	Alain Girodet	Gilles Cayon	Gwenael Marquezin
ELETRONORTE	ELETRONORTE	AREVA	AREVA	AREVA

RESUMO

Apresentamos neste trabalho a síntese do estudo de coordenação de isolamento associado à GIS da segunda etapa da UHE Tucuruí, abrangendo os aspectos relevantes da modelagem dos componentes da GIS, a análise da influência dos diversos parâmetros sistêmicos no valor das sobretensões aos equipamentos e a análise de alternativas para a redução das solicitações elétricas transmitidas à GIS numa situação onde as resistências de pé-de-torre são anormalmente elevadas e localizadas numa região de elevado nível cerâmico. São apresentadas as sobretensões nos diversos pontos da GIS (Pára-raios, bucha SF6/Ar, barramento, Bucha Óleo/SF6, disjuntor, chave seccionadora, TPC e Transformadores).

PALAVRAS-CHAVE

Coordenação de Isolamento, Subestação Blindada, Sobretensão, GIS.

1.0 - INTRODUÇÃO

A determinação das sobretensões a que os diversos equipamentos que compõem uma Subestação Blindada e Isolada a Gás SF6 (GIS) estarão submetidos, quando da incidência de surtos atmosféricos e de manobra, é de fundamental importância para assegurar as margens de segurança adotadas no projeto. A análise minuciosa da modelagem do sistema e a avaliação de alternativas que visem a reduzir os impactos das solicitações elétricas aos equipamentos adquirem maior importância no caso de instalações implantadas em terreno de elevada resistividade e localizadas em regiões de elevado nível cerâmico.

A UHE Tucuruí, localizada no Estado do Pará, teve sua implantação dividida em duas etapas. A primeira etapa, em operação desde 1984, possui uma potência instalada de 4200 MW. A segunda etapa, objeto do presente trabalho, será composta de 11 geradores de 390 MVA, sendo cada unidade conectada ao respectivo transformador elevador 13,8/550 kV, trifásico, com potência de 405 MVA. Há quatro módulos formados por dois conjuntos gerador-transformador e 1 módulo formado pela conexão de três conjuntos gerador-transformador. Em cada módulo, os transformadores são conectados entre si, no lado de alta tensão, por meio de uma subestação isolada a SF6, GIS, 550 kV, sendo estas conectadas a uma subestação convencional de manobra, por meio de um pequeno trecho de linha aérea de aproximadamente 1 km de extensão.

O projeto e a fabricação da GIS e dos transformadores elevadores são efetuados por três diferentes fabricantes, havendo um fabricante da GIS e dois fabricantes dos transformadores. Destaca-se que o desenvolvimento dos estudos elétricos associados aos equipamentos foi realizado com elevada interação entre os fabricantes, caracterizada pela troca de dados e análise conjunta dos mesmos. O estudo de coordenação de isolamento da GIS foi um dos estudos solicitados. Sua elaboração baseou-se em dados fornecidos pelos diversos fabricantes e pelos parâmetros fornecidos pela Eletronorte. Sendo as LTs de interligação GIS-AIS, implantadas com duas torres sobre um solo de elevada resistividade, localizadas numa região de elevado nível cerâmico e sujeitas a elevadas descargas atmosféricas, torna-se fundamental a análise de diversas alternativas que assegurem margens de segurança adequadas, para os diversos equipamentos da GIS, quando a mesma estiver submetida tanto a surtos de origem atmosférica quanto de surtos de manobra.

2.0 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Os estudos de coordenação de isolamento foram realizados com a utilização do programa computacional ATP (Alternative Transient Program). A preocupação se refere aos efeitos de ondas trafegantes criando uma sobretensão quando uma descarga atmosférica ocorrer perto da subestação.

Um raio atingindo diretamente o cabo de guarda cria uma elevada tensão na estrutura da torre. A tensão através de uma cadeia de suspensão (suportando os condutores de fase) ultrapassa os limites de suportabilidade das cadeias, rompendo o seu isolamento. Como esta descarga vem da torre para o condutor de fase, é denominada “descarga elétrica de retorno”. O caso mais grave é quando as torres mais próximas da subestação são atingidas, porque então o impulso tem menos oportunidade de se dissipar. A margem de segurança é definida pelo cálculo da relação entre as sobretensões que os equipamentos estarão submetidos e o nível de suportabilidade dielétrica dos equipamentos. Dadas as influências de diversos parâmetros nos cálculos das sobretensões nos diversos pontos da GIS, o estudo levou em consideração a influência dos seguintes fatores:

- Localização dos pontos de incidência das descargas atmosféricas;
- Parâmetros e modelos dos transformadores;
- Tipo de conexão dos módulos da GIS: duas ou três unidades geradoras conectadas;
- Presença do TPC (o qual está localizado na entrada da GIS, em apenas uma das fases);
- Resistência de pé-de-torre;
- Presença da conexão dos equipamentos de média tensão no lado BT dos transformadores;
- Modelagem da LT de interconexão (parâmetros fixos versus J.Marti);
- Estado das chaves seccionadoras: aberto ou fechado;
- Instalação adicional de TPC;
- Efeito da incidência de descargas diretas nos cabos fase da LT de interligação;
- Efeito da instalação de pára-raios em paralelo à cadeia de isoladores.

3.0 - MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem do sistema foi iniciada a partir dos modelos em alta frequência dos componentes da GIS, modelos de transformadores, simplificado e completo (alta frequência), fornecidos pelos fabricantes e dados do projeto fornecidos pela Eletronorte. Inicialmente, foram consideradas três torres intermediárias nas LTs de interligação, com valores típicos conservativos para as resistências impulsivas de pé-de-torre. Para fins de cálculo, considerou-se que os raios atingem diretamente o cabo pára-raios situado no topo das torres. Foram variados os locais de aplicação das descargas atmosféricas. A descarga entre a linha e a torre é modelada como uma chave controlada por tensão conectada entre o cabo pára-raios e o cabo condutor da linha. A modelagem da rede abrange:

- a) **Raios:** Foram simulados, inicialmente, por uma onda de corrente de descarga atmosférica de amplitude igual a 200 kA, correspondendo a uma probabilidade de ocorrência inferior a 1% (de 0,1 a 0,3%), com tempo de frente de 4 μ s (tempo entre U10 e U90) e um tempo de cauda de 80 μ s.
- b) **Linha de Transmissão Aérea (1,2 km):** A linha aérea foi inicialmente modelada por parâmetros distribuídos, calculados para uma frequência de 400 kHz, representativa da gama de frequência de uma onda de impulso de descarga atmosférica. As torres foram representadas por suas impedâncias de surto ($Z=115 \Omega$) com resistência de pé-de-torre igual a 10 Ω . O nível de isolamento da LT aérea foi considerado como V50% igual a 1920 kV. O cabo pára-raios foi modelado como uma linha monofásica, também na frequência de 400 kHz. O cabo pára-raios é conectado à malha de aterramento da subestação GIS.
- c) **Transformador de Potencial Capacitivo, TPC:** Apenas uma fase é equipada com um TPC. Devido ao elevado valor de sua capacitância (5000pF), este equipamento reduz a amplitude e a taxa de crescimento da frente de onda. Portanto, os cálculos foram efetuados sem o mesmo, exceto nos casos mais graves, recalculados para se avaliar sua influência nas sobretensões.
- d) **Pára-raios:** Foram modelados por sua curva $V \times I$, considerando-se a indutância do cabo de aterramento deste equipamento à malha de terra.
- e) **Bucha SF6/Ar da GIS:** A Bucha SF6/Ar da GIS foi representada por uma capacitância à terra de 100 pF.
- f) **Barramento da GIS:** Cada seção de barramento da GIS foi modelada como uma linha distribuída com as seguintes características: Impedância de surto: 63 Ω ; Velocidade: 3 e8m/s; Resistência: 1m Ω /m
- g) **Disjuntor:** Foi modelado com linha distribuída e capacitâncias à terra.

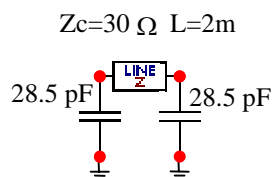


FIGURA 1 – Modelo de disjuntor

- h) **Chave Seccionadora:** Representada com linha distribuída e capacitâncias à terra.

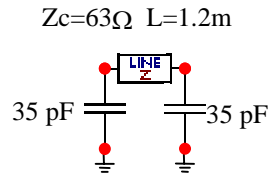


FIGURA 2 – Modelo de chave seccionadora

- i) **Transformador elevador 13,8/550 kV:** Um modelo capacitivo pode representar um modelo de alta frequência do transformador de potência no qual são distribuídas as capacitâncias dos enrolamentos AT e BT, assim como a capacitância das buchas. O circuito equivalente e os componentes globais de uma fase do transformador de potência são extrapolados do modelo completo a alta frequência conforme apresentados nas Figuras 3 e 4 e Tabela 1.

TABELA 1 – Parâmetros do modelo simplificado

	Fabricante A	Fabricante B
Cbh	346 pF	346 pF
Cbx	500 pF	500 pF
Cs1	119 pF	140 pF
Cs2	128 pF	150 pF
Cs3	219 pF	120 pF
C12	14073 pF	12100 pF
C23	2089 pF	2060 pF
Cg1	10576 pF	8350 pF
Cg3	635 pF	1200 pF

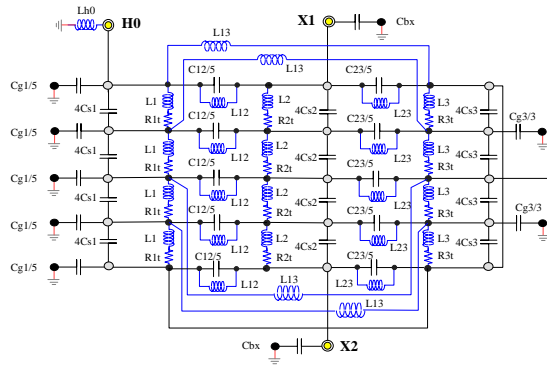
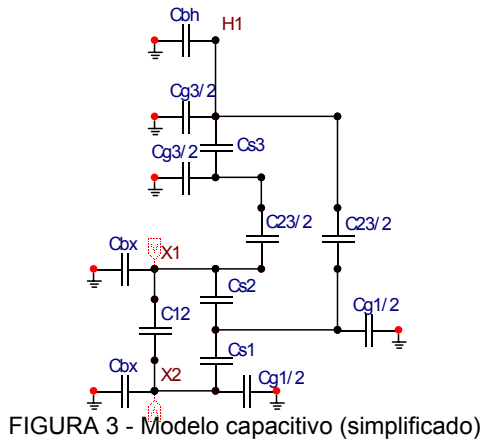


FIGURA 4 - Modelo do transformador para altas frequências

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS

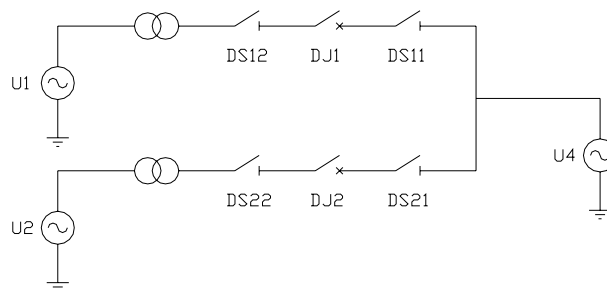


FIGURA 5 - Diagrama esquemático das configurações da rede

4.1 Condições iniciais do estudo (RT=10 OHM, duas ou três torres na LT de interligação)

TABELA 2 – Configurações estudadas

Caso	Tipo de linha aérea	Tipo de transformador conectado / Seccionadores. abertos:	Ponto atingido pelo raio	Modelo do transformador	TPC
C1	Grupo n°2	Tipo A	1ª torre	alta frequência	Não
C2	Grupo n°2	Tipo A	2ª torre	alta frequência	Não
C3	Grupo n°2	Tipo B	2ª torre	alta frequência	Não
C4	Grupo n°1	Tipo B	2ª torre	alta frequência	Não
C5	Grupo n°1	Tipos A e B	2ª torre	alta frequência	Não
C6	Grupo n°1	Tipo B	3a torre	alta frequência	Não
C7	Grupo n°1	Tipo B	2ª torre	Modelo completo de alta frequência	Não
C8	Grupo n°1	Tipo B	2ª torre	alta frequência	Sim
C9	Grupo n°1	Tipos A e B	2ª torre	alta frequência	Sim
C10	Grupo n°2	Secion. DS11, DS21	2ª torre	alta frequência	Não
C11	Grupo n°1	Secion. DS11, DS21	2ª torre	alta frequência	Não
C12	Grupo n°1	Secion. DS12, DS22	2ª torre	alta frequência	Não
C13	Grupo n°1	Secion. DS12, DS21	2ª torre	alta frequência	Não
C14	Grupo n°1	Secion. DS11, DS22	2ª torre	alta frequência	Não
C15	Grupo n°1	Secion. DS11, DS21	2ª torre	alta frequência	Sim

Grupo 1 → Lt de interligação representada com 3 torres intermediárias **Grupo 2** → com 2 torres intermediárias

TABELA 3 – Sobretensões devidas a surtos de descarga atmosférica

Ponto	Linha aérea	Pára-raios	Bucha SF6/AR	GIS	GIS	Bucha Óleo/SF6	Transf. elevador	Bucha Óleo/SF6	Transf. elevador	TPC
Nível de suport dielétrica (kV)	+1885 -1920	1550	1675	1550	1550	1800	1675	1800	1675	1550
Caso 1 (sem corrente de retorno)	0	0	0	0		0	0			
Caso 2	1351 28.3% polar.+	1123 27.5%	1190 28.95%	1266 18.3%	1234 20.4%	1302 27.6%	1302 22.3%			
Caso 3	1359 27.9%+	1120 27.7%	1192 28.8%	1267 18.3%	1215 21.6%	1310 27.2%	1310 21.8%			
Caso 4	1500 20.4%	1250 19.3%	1190 28.9%	1259 18.7%	1200 22.6%	1303 27.6%	1303 22.3%			
Caso 5	1440 23.6%	1213 21.7%	1124 32.9%	1164 24.9%	1156 25.4%	1161 35.5%	1161 30.7%	1148 36.2%	1148 31.4%	
Caso 6	1372 27.2%+	1190 23.2%	1158 30.8%	1209 22%	1207 22.3%	1233 31.3%	1233 26.4%			
Caso 7	1500 20.4%	1175 24.1%	1265 24.5%	1311 15.4%	1297 16.3%	1286 28.5%	1286 23.2%			
Caso 8	1606 14.8%	1219 21.3%	1090 34.9%	1112 28.2%	1103 28.8%	1127 37.4%	1127 29.8%			1065 31.3%
Caso 9	1642 13%	1286 17%	1099 34.4%	1102 28.9%	1109 28.4%	1121 37.7%	1121 33%	1130 37.2%	1130 32.5%	1111 28.3%
Caso 10	1512 20%	1290 16.8%	1325 21%	1307 15.7%	1307 15.7%					
Caso 11	1460 22.5%	1218 21.4%	1307 22%	1407 9.2%	1526 1.5%					
Caso 12	1427 24.3%	1184 23.6%	1250 25.4%	1307 15.7%	1372 11.5%					
Caso 13	1490 21%	1252 19.2%	1313 21.6%	1449 6.5%	1350 12.9%					
Caso 14	1420 24.7%	1216 21.5%	1274 24%	1371 11.5%	1526 1.5%					
Caso 15	1572 17%	1226 21%	1142 31.8%	1206 22.2%	1224 21.1%					1146 26%

A Figura 6 apresenta, a título ilustrativo, a forma de onda para o caso C2 sobre o transformador elevador, no lado de alta tensão, obtida nos estudos de coordenação de isolamentos.

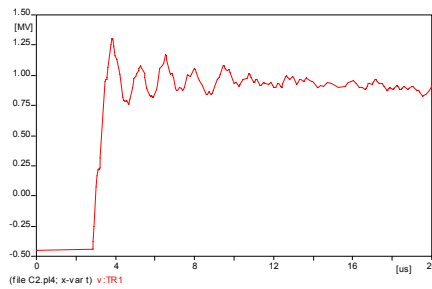


FIGURA 6 – Forma de onda típica

4.2 Consideração dos equipamentos de média tensão conectados

O modelo completo de alta frequência é usado para os transformadores de potência. As três fases foram consideradas na conexão DELTA do lado primário e Y no secundário. Três configurações foram estudadas para o lado de média tensão dependendo do comprimento do barramento e do transformador de serviços auxiliares conectado. Foram modelados os barramentos auxiliar e principal, por meio de suas impedâncias de surto, o transformadores de excitação e de serviços auxiliares, por suas capacitâncias à terra e entre enrolamentos, a capacitância do gerador e o pára-raios de média tensão.

Diferentes configurações foram estudadas a fim de cobrir todas as diferentes possibilidades de operação da subestação. Em relação ao estudo apresentado no item 4.01, o caso mais crítico corresponde a uma descarga atmosférica na torre n°2. Há três arranjos diferentes para conexão dos equipamentos de média tensão: modelo 1 (unidades 13-15-17-19), modelo 2 (unidade 21) e modelo 3 (unidades 14-16-18-20-22 e 23). Foram considerados: → O tipo de transformador conectado à rede; → A influência do transformador potencial capacitivo; → O arranjo dos equipamentos de média tensão. Essas configurações e resultados estão apresentados nas Tabelas 4 e 5.

TABELA 4 – Configurações estudadas com equipamentos de média tensão conectados

Caso	Tipo de transformador de força conectado	Modelo dos equipamentos de média tensão associados aos geradores	Fase de ocorrência da descarga indireta
C611	A	Modelo 1	Fase C
C612	B	Modelo 1	Fase C
C621	A	Modelo 2	Fase C
C631	A	Modelo 3	Fase C
C613	B	Modelo 1	Fase B
C641	B	Modelo 1	Fase C

TABELA 5 – Sobretensões devida a surtos de descarga atmosférica com equipamentos de média tensão

Ponto	Linha aérea	Pára-raios	Bucha SF6/Ar CVT	GIS	Bucha Oleo/SF6	Transf	Transf. MV Bucha	Transf. Auxiliar	Transf. de Excitação	Gerador
Nível de suport dielétrica (kV)	+1885 -1920	1550	1675	1550	1800	1675	110	110	110	110
Caso 611	1484 21% polar. +	1178 24%	1292 22%	1321 14.8%	1239 31%	1239 31%	40.2 63%	23.7 78%	23.9 78%	24.3 78%
Caso 612	1455 23% polar. +	1171 24%	1261 25%	1321 14.8%	1257 30%	1257 25%	39.6 63%	23.6 78%	23.7 78%	24.1 78%
Caso 621	1480 21% polar. +	1185 24%	1286 23%	1304 16%	1242 31%	1242 26%	40 63%		23.8 78%	24.3 78%
Caso 631	1480 21% polar. +	1184 24%	1289 23%	1301 16%	1238 31%	1238 26%	31.8 71%		23.8 78%	24.2 78%
Caso 613	1572 16.6% polar. +	1156 25%	1089 35% CVT 1079 35.5%	1149 25.8%	1154 35.8%	1154 31.1%	41 62.7%	23.8 78.4%	23.7 78.4%	24.2 78%
Caso 641	1341 28% polar. +	1171 24%	1270 24%	1332 14%	1286 28%	1286 23%	37.9 65%	23.7 78%	23.7 78%	24.1 78%

4.3 Descargas diretas

Este estudo se refere à suportabilidade de todos os equipamentos (transformador auxiliar, gerador, barramento, cubículo de proteção, transformador de excitação) a uma onda direta de 15 kA com uma taxa de 1200 kV/ μ s.

Sendo o fenômeno de onda direta bem menos severo que o de descarga indireta, foram simulados os dois casos mais críticos do capítulo anterior com uma descarga de 15 kA. A configuração dos casos 741 e 742 (diferindo no tipo de transformador) é exatamente a mesma que a do caso 641 e a dos casos 711 e 712 idêntica à configuração do caso C11 do item 4.01.

Por outro lado, a taxa de crescimento da onda de corrente é de 1200 kV/ μ s, medidos entre 10 e 90% na alta do transformador, e não mais de 710 kV/ μ s como nos casos anteriores. Os resultados estão na Tabela 6.

TABELA 6 – Resultados obtidos para os casos com descarga direta
Onda de corrente = 15kA – Taxa de crescimento =1200 kV/ μ s

Ponto	linha	Pára-raios	Bucha SF6/Ar	GIS	Transformador	Transformador Auxiliar
Nível de suport dielétrica (kV)	+1885 -1920	1550	1675	1550	1675	110
Caso 741	1016 46%	1000 35.5%	1031 38.4%	1068 31%	1078 35.6%	23.4 78.9%
Caso 742	1130 40%	1079 30.3%	1135 32.2%	1204 22.3%	1220 27%	23.4 78.9%
Caso 711	1016 46%	963 37.8%	990 40.8%	1011 34.7%		
Caso 712	1146 39.2%	1065 31.3%	1128 32.6%	1170 24.5%		

4.4 Utilização do modelo JMARTI

Estudos de otimização do projeto das linhas de interligação GIS-AIS definiram como melhor alternativa a configuração com **duas torres** para todos os circuitos associados aos geradores da segunda etapa da UHE Tucuruí. Esta configuração é de maneira geral mais favorável em relação às sobretensões injetadas na subestação GIS. Os casos mais críticos dos itens anteriores foram aqueles em cuja configuração havia três torres. Foi introduzido na modelagem o modelo JMARTI para considerar a variação de impedância com a frequência e a presença de dois cabos de guarda. Os demais dados foram mantidos constantes, como no item 4.0.2, ou seja, com os equipamentos de média tensão conectados à rede.

Foi feita uma outra simulação do caso 641 com o modelo JMARTI das linhas denominado 641_JMartI como apresentado na Tabela 7.

TABELA 7 – Resultados obtidos com a utilização do modelo JMARTI

Ponto	Linha aérea	Pára-raios	Bucha SF6/Ar	GIS	Bucha Oleo/SF6	Transf.	Transf. MV Bucha	Transf. Auxiliar	Transf. de Excitação	Gerador
Nível de suport dielétrica (kV)	+1885 -1920	1550	1675	1550	1800	1675	110	110	110	110
Caso 641_jmartI	1221 35.2% polar +	1078 30.4%	1145 31.6%	1172 24.4%	1231 31.6%	1231 26.5%	42 61.8%	37.1 66.2%	35.7 67.5%	23.6 78.9%

4.5 Análise de alternativas com elevada resistência de aterramento

Estudos de coordenação de isolamento são usualmente efetuados utilizando-se o valor de resistência impulsiva de aterramento da ordem de 5 a 10 Ω . Por não se dispor, à época de realização deste estudo, dos resultados de um projeto específico que visasse à redução das resistências de pé-de-torre da LT intermediária, conforme referência 5, considerou-se que a estrutura rochosa do solo sob as torres intermediárias da UHE Tucuruí poderia impor um valor sensivelmente mais alto da resistência de pé de torre. Este item apresenta uma análise de sensibilidade dos diferentes fatores que influem nos valores de sobretensões transmitidas à GIS numa situação onde as resistências de pé de torre são anormalmente elevadas. Buscam-se diferentes soluções técnicas que assegurem margens de segurança de, pelo menos, 20% na coordenação de isolamento, nesta situação.

Dados extremamente conservativos foram usados no início do presente estudo de coordenação de isolamento: Correntes de descarga atmosférica com amplitude de 200 kA têm uma baixíssima probabilidade de ocorrência (de 0,1 a 0,5%). Conseqüentemente, houve consenso pela adoção, neste item, de correntes de descargas atmosféricas de 120 kA – 4 μ s (U10% - U90%). Foi utilizado o valor de 50 Ω para a impedância de aterramento das torres intermediárias. O ponto de partida para este item é o caso n° 641 com o modelo completo de alta frequência do transformador e com os equipamentos de média tensão conectados. A descarga atmosférica foi aplicada na fase C na primeira torre intermediária da linha GIS-AIS como apresentado nas Tabelas 8 e 9.

TABELA 8 – Configurações analisadas considerando elevada resistência de aterramento

Caso	Resistência de pé de torre GIS, 1a torre, 2a torre, AIS	Cabos de guarda	Interconexão entre cabos de guarda de circuitos diferentes	Pára-raios em paralelo à cadeia de isoladores	Capacitância em cada fase
C641_1	10, 50, 50, 10	1	NÃO	NÃO	NÃO
C641_2	10, 50, 50, 10	2	NÃO	NÃO	NÃO
C641_3	10, 50, 50, 10	2	SIM	NÃO	NÃO
C641_4	10, 50, 50, 10	1	NÃO	SIM na 1a torre	NÃO
C641_5	10, 50, 50, 10	1	NÃO	NÃO	SIM
C641_6	10, 50, 50, 10	1	NÃO	SIM na torre de entrada na GIS	NÃO

TABELA 9 – Resultados para os casos com elevada resistência de aterramento

Ponto	Linha aérea	Pára-raios	Bucha SF6/Ar	GIS	Bucha Oleo/SF6	Transf.	Transf. MV Bucha	Transf. Auxiliar	Transf. de Excitação	Gerador
Nível de suport dielétrica (kV)	+1885 -1920	1550	1675	1550	1800	1675	110	110	110	110
Caso 641_1	1297 31.2% polar. +	1219 21.3%	1322 21%	1376 11.2%	1335 25.8%	1335 20.3%	36.9 66.4%	23.5 78.6%	23.5 78.6%	24 78.6%
Caso 641_2	1296 31.2% . +	1204 22.3%	1310 21.8%	1367 11.8%	1314 27%	1314 21.5%	38.2 65.2%	23.8 78.6%	23.8 78.6%	24.3 78.6%
Caso 641_3	1297 31.2% +	1161 25%	1264 24.5%	1313 15.3%	1254 30.3%	1254 25.1%	36.1 67.1%	22.9 79.2%	23.3 78.6%	23.5 78.6%
Caso 641_4	1061 43.7% +	1024 33.9%	1064 36.4%	1114 28.1%	1127 37.3%	1127 32.7%	29.3 73.3%	22.5 79.5%	22.5 79.5%	22.5 79.5%
Caso 641_5	1533 18.6% +	1150 25%	1203 28.1%	1289 16.8%	1330 26.1%	1330 20.5%	35.7 67.5%	23.2 78.9%	23.5 78.6%	24 78.1%
Caso 641_6	1151 38.8% polar. +	1157 25.3%	1339 20%	1321 14.7%	1295 28%	1295 22.6%	36.4 66.9%	23.8 78.3%	23.6 78.5%	24.3 77.9%

5.0 - CONCLUSÕES

Para as condições inicialmente estabelecidas no estudo de Coordenação de Isolamento, caracterizada por resistências de pé-de-torre das torres intermediárias de, no máximo, 10 Ω , as margens de segurança resultaram adequadas para todos os equipamentos da GIS, tanto a surtos atmosféricos quanto a surtos de manobra. As margens mínimas de segurança foram respectivamente 22% e 50%. As condições que constituíram a base inicial deste estudo são pessimistas, tendo a magnitude do impulso atmosférico, de 200 kA, uma probabilidade de ocorrência inferior a 0,5 %.

Para as condições mais críticas posteriormente estabelecidas, ou seja, resistências impulsivas das torres intermediárias na faixa de 50 Ω , foram reavaliados os casos mais críticos, concluindo-se:

- Quanto maior as resistências de pé-de-torre, menores as margens de segurança da GIS. A instalação de pára-raios em paralelo com as cadeias de isoladores das torres da LT intermediária é a medida mais eficaz para restabelecer margens de segurança maiores (no mínimo em torno de 30%) sobre a totalidade dos equipamentos.
- O quadro de resultados mostra que considerar dois cabos de guarda e a interligação entre cabos de guarda de dois circuitos adjacentes traz uma melhora pouco significativa.
- A instalação de capacitores adicionais do lado da GIS também proporciona uma melhora pouco significativa nas margens de segurança.
- A conexão de dois grupos a uma mesma linha de alimentação reduz ligeiramente a sobretensão.
- As sobretensões nos diversos componentes da GIS e nos transformadores (TPC e transformadores de potência) não são influenciadas pelos respectivos parâmetros dos transformadores de potência, pois os mesmos são muito similares que não alteram a forma da onda de sobretensão, nem seu valor de crista.
- A utilização do modelo completo de alta frequência do transformador reduz a sobretensão aplicada à GIS e ao transformador. A tensão nas buchas SF6/Ar é mais elevada, mas ainda conserva uma margem de segurança superior a 20%.
- Apenas uma fase está equipada com um transformador de potencial capacitivo. Uma diferença é observada em relação aos resultados obtidos a partir de uma fase sem esse dispositivo. Todos os equipamentos percorridos pela onda trafegante antes que alcance o transformador de potencial capacitivo sofrem uma maior fadiga de sobretensão, enquanto a GIS e o transformador são submetidos a uma fadiga menor (caso 8 com caso 4, caso 9 com caso 5 no item 4.01).

- h) De maneira geral, a margem de segurança, ou seja, a relação calculada entre os valores das sobretensões obtidas e o nível de suportabilidade dielétrica dos equipamentos é sempre superior a 20% para todos os equipamentos analisados, exceto para alguns casos obtidos para uma configuração da linha intermediária composta por três torres. A sobretensão máxima é obtida nas configurações nas quais as chaves seccionadoras isolam os dois/três transformadores elevadores do restante da rede. A tensão máxima está localizada nos terminais das duas/três chaves seccionadoras de saída de linha. Estes casos, tendo uma margem de segurança baixa, devem ser considerados como configurações temporárias de curta duração. A linha desconectada da subestação GIS será aterrada após seu completo isolamento pela abertura do disjuntor da subestação de manobra. Na configuração final os surtos de sobretensão causados por descargas atmosféricas serão escoados para a terra pelas chaves de aterramento sem que a sobretensão seja transmitida para o equipamento.
- i) Quanto ao efeito da conexão dos equipamentos de média tensão (transformador auxiliar, gerador, barramento, cubículo de proteção, transformador de excitação), tais equipamentos estarão perfeitamente protegidos frente às descargas atmosféricas incidentes nas linhas aéreas, com uma margem de segurança superior a 65%. A presença destes equipamentos melhora as margens de segurança do transformador elevador, aumentando-as de 2 a 3% em relação às calculadas nos casos em que os mesmos não estão conectados.
- j) Com relação às descargas diretas, caracterizadas pela incidência de uma descarga de 15 kA no cabo fase da LT intermediária, a instalação está perfeitamente protegida em relação a este fenômeno apresentando margens de segurança superiores a 23 %. Portanto, estas solicitações elétricas são menos severas em relação às descargas indiretas.
- k) Considerando-se que os resultados de um estudo específico, detalhado na referência 5, definiram alternativas que possibilitaram a redução das resistências impulsivas das torres intermediárias, para valores inferiores a 10 Ω , conclui-se que haverá aumento das margens de segurança em relação aos valores calculados neste trabalho. O esquema de melhoria do aterramento das torres intermediárias é apresentado na Figura 7.

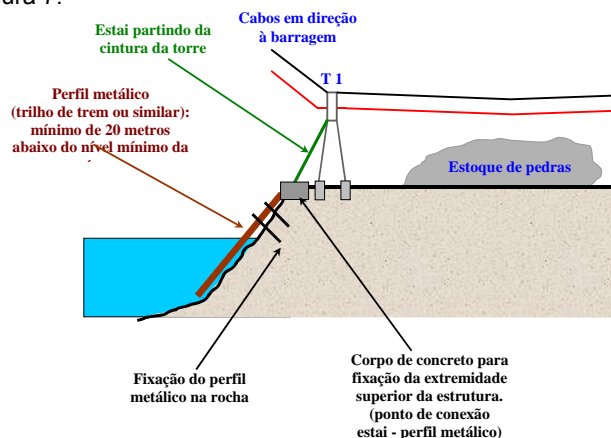


FIGURA 7 - Esquema de aterramento das torres das LTs intermediárias

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Estudo de Coordenação de Isolamento da Subestação Blindada da UHE Tucuruí, Casa de Força –Unidades 13 a 23. Relatório TUF-E-GIS-4061-NT-R0, Consórcio ASA II / Eletronorte
- (2) Electromagnetic Transients Program, Application guide, EPRI EL4650.
- (3) “Insulation Coordination for GIS – New aspects” : M.P.Meirelles, M. Lacorte et al, CIGRÉ 1998.
- (4) “La manœuvre synchronisée des lignes de transport THT”, U. Samitz, H. Siguerdidjane, J.P Dupraz et al, CIGRE 2002
- (5) Análise e Proposição de Soluções para Proteção dos Novos Circuitos da Usina de Tucuruí contra Descargas Atmosféricas, no Trecho de Interligação entre a Casa de Força e a Subestação de Manobra. Silvério Visacro Filho e Amilton Soares Jr., UFMG, Agosto 2003.
- (6) Relação dos dados técnicos (GIS) TUF-E-GIS-4064-FD-ROA
- (7) Relação dos dados técnicos (para-raios) TUF-E-PRA-5124-FD-ROA
- (8) Relação dos dados técnicos (TPC) TUF-E-TPC-3014-ET-ROA
- (9) Especificação técnica ELN (Transformadores elevadores 405 MVA) TUC-E-CAF-530-0001-ET
- (10) Arranjo geral : TUF-E-GIS –4040-ROC (05-04-02)