



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

GCQ-24
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

**QUEIMA DE EQUIPAMENTOS EM SUBESTAÇÃO DE UHE DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
- ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES**

**Amilton Soares Jr* Silvério Visacro F.
LRC - Lightning Research Center (UFMG/CEMIG)
Universidade Federal de Minas Gerais
Brasil**

**Dejair Soares Porto
Leme Engenharia Ltda
Brasil**

**Nélio Rodrigues Borges
UHE Guilman-Amorim
Belgo Mineira - Samarco
Brasil**

RESUMO

Este trabalho apresenta soluções para proteção da subestação de uma usina hidroelétrica contra descargas atmosféricas. Através da análise de relatórios de ocorrência na subestação, dois tipos de eventos relacionados à incidência de descargas foram eleitos como potenciais causas para queima verificada de equipamentos: incidência de descargas na torre de telecomunicações da subestação e incidência (direta) de descargas na linha de distribuição de 13,8 kV (linha para alimentação dos serviços auxiliares da usina). Tais ocorrências foram associadas à geração de tensões significativas entre pontos na malha de aterramento da subestação por ocasião da incidência de descargas. Este trabalho apresenta também as soluções propostas para proteção dos equipamentos. A redução dos níveis de diferença de potencial elétrico na malha de aterramento para as ocorrências analisadas atingiu níveis acima de 70%.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção de subestações, Descargas atmosféricas, Equalização de potencial,.

1.0 - INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas, por ocupar a posição inicial na cadeia geração-transmissão-distribuição, devem apresentar níveis bastante reduzidos de interrupções em seu funcionamento, sob pena de comprometer uma parcela significativa do sistema em que está interligada. Dentre os tipos mais importantes de eventos que podem levar ao desligamento parcial ou total da usina estão as descargas atmosféricas. Estas, na verdade, destacam-se como um aspecto que requer

atenção especial para o sistema elétrico como um todo.

O objetivo deste trabalho é apresentar alguns resultados obtidos em uma investigação desenvolvida para prover proteção à subestação de uma usina hidroelétrica frente a descargas atmosféricas. As análises foram centradas em aspectos relacionados a aterramentos elétricos, compatibilidade eletromagnética e filosofia de instalação de protetores de surto.

Nas seções seguintes, aspectos relacionados à usina hidrelétrica e às ocorrências de queima de equipamentos são resumidos. Em seguida, os desenvolvimentos do trabalho e as soluções propostas são apresentadas.

2.0 - TOPOLOGIA DA USINA HIDROELÉTRICA

A usina hidrelétrica de Guilman-Amorim apresenta uma topologia peculiar, na qual a casa de força, a barragem, o vertedouro e a subestação estão substancialmente afastados entre si. Além disso, a subestação está situada em local relativamente elevado em relação à região vizinha, estando conseqüentemente altamente exposta à incidência direta e indireta de descargas atmosféricas.

A subestação da usina está conectada ao sistema CEMIG por duas linhas de transmissão de 230 kV. Internamente à usina, duas linhas de distribuição de 13,8 kV alimentam os serviços auxiliares, energizando as diversas instalações. Ambas as linhas de 13,8 kV apresentam configuração aérea com três condutores fase e um neutro, sem a presença de cabos pára-raios. Os sistemas de aterramento da casa de força e da

* Rua Jornalista Guilherma Apgaua, 153 / 302 - CEP 30575-270 - Belo Horizonte - MG - BRASIL
Tel.: (031) 3499-4878 - Fax: (031) 3499-5455 - E-MAIL: soaresjr@cpdee.ufmg.br

subestação são interligados por um cabo nu enterrado. A Figura 1 apresenta, de forma ilustrativa, as conexões existentes entre a casa de força, a barragem/vertedouro e a subestação, através das linhas de 13,8 kV. Os pontos onde se encontram instalados dispositivos pára-raios e chaves com elos fusíveis estão indicados.

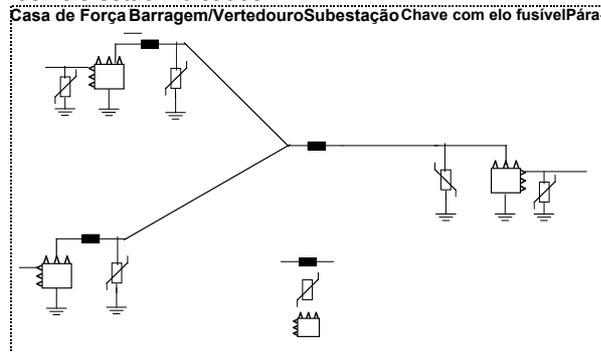


FIGURA 1 – INTERCONEXÃO DAS INSTALAÇÕES DA USINA HIDRELÉTRICA PELA LINHA DE 13,8 kV

Na entrada da linha de 13,8 kV na subestação, a tensão é baixada por um transformador para 380/220V, sendo este o nível de tensão de alimentação interna local, para os serviços auxiliares. Na sala de controle da SE, circuitos de corrente contínua (C.C.) são alimentados através de retificadores. Tais circuitos em corrente contínua fazem parte da malha de controle de alguns equipamentos da subestação, como sistemas de monitoramento e medição, disjuntores etc. Os circuitos C.C. partem da sala de controle e são distribuídos pela área da subestação, chegando a diversos equipamentos instalados.

O circuito de controle em C.C. apresenta apenas um ponto de aterramento, o qual está localizado na sala de controle e é implementado através de dispositivo relê de alta impedância. Tal configuração é parte de um sistema de alarme que tem como objetivo detectar qualquer circulação não intencional de corrente para o solo.

3.0 DANOS AOS EQUIPAMENTOS DEVIDO À INCIDÊNCIA DE DESCARGAS

O estudo em referência foi motivado por uma seqüência de ocorrências na subestação da usina nas quais alguns equipamentos e/ou dispositivos foram queimados. Nestes eventos, os circuitos de abertura de vários disjuntores foram não intencionalmente energizados causando a interrupção da operação da usina e, consequentemente, sua desconexão do sistema CEMIG. A investigação seguiu duas etapas principais. Na primeira, os relatórios das ocorrências foram examinados e as causas potenciais para os danos foram indicadas. A etapa seguinte se compôs da análise da potencialidade das causas indicadas e da proposição de soluções.

Os relatórios das ocorrências denotaram queima em diversos componentes eletro/eletrônicos nos circuitos C.A. e C.C., como placas de circuito integrado, diodos, resistores, relês, fusíveis e alguns outros. Com relação à linha de 13,8 kV (alimentação dos serviços auxiliares

da usina), queima de dispositivos pára-raios e operação de elos fusíveis foram indicados.

4.0 -DEFINIÇÃO DAS POSSÍVEIS CAUSAS PARA AS QUEIMAS DOS EQUIPAMENTOS

Os danos em dispositivos dos circuitos são resultantes da circulação de correntes de elevadas amplitudes. Isso denota o estabelecimento de altos valores de tensão ao longo dos caminhos correspondentes, no circuito. As possíveis causas para essas altas tensões tiveram que ser investigadas.

Em uma análise inicial, a fonte para tais correntes de alta amplitude poderia estar relacionada a eventos constituídos por componentes harmônicas de baixas freqüências (como faltas à terra) ou eventos associados a componentes de alta freqüência (como incidência de descargas – atingem freqüências acima de 1 MHz). Nesta análise, faltas à terra resultantes de incidência de descargas foram consideradas como sendo primariamente devidas a eventos do segundo tipo citado. A falta de evidências para suportar a hipótese de causas relacionadas a eventos em baixa freqüência e, por outro lado, os diversos aspectos apontados nos relatórios de ocorrências suportando a possibilidade de incidência de descargas (inclusive o relato de ocorrência de chuva e trovoadas nos momentos de queima dos equipamentos) determinaram a consideração neste estudo da segunda hipótese como sendo a mais provável.

Tendo-se em conta a área ocupada pela subestação e as instalações nos arredores, diversas possibilidades de incidência de descargas foram consideradas como passíveis de ocorrer. No caso de incidência direta, poderiam ser atingidos os cabos guarda e os condutores fase da linha de 230kV; os pórticos, os cabos guarda e a torre de telecomunicações da SE; as instalações da casa de força e da barragem/vertedouro e os condutores da linha de 13,8 kV. Por outro lado, outro evento possível seria a indução de tensões nas instalações citadas, devido a descargas incidentes em pontos próximos.

Considerando aspectos de probabilidade de ocorrência e potencialidade de danos, os eventos descritos a seguir foram eleitos para investigação, por representarem as situações mais críticas. Para a incidência direta em instalações da subestação, a situação mais crítica é a incidência na torre de telecomunicações. Para eventos que ocorrem fora da subestação (mas que poderiam causar danos a esta), a situação mais crítica é a incidência de descargas na linha de distribuição de 13,8 kV.

Diversas simulações computacionais foram realizadas com o objetivo de investigar os efeitos das incidências em foco. O modelo aplicado na simulação é descrito em [1, 2].

4.1 Representação da forma de onda da corrente de descarga

A Figure 2 apresenta a forma de onda considerada para representar a corrente de descarga, nas

simulações realizadas. É uma onda tipo rampa com 1,2 μ s de tempo de frente e 50 μ s de tempo de meia onda. Considera-se que a onda tem uma amplitude máxima (pico) de 1 kA, o que significa que os resultados de tensões calculadas entre pontos do sistema estão num sistema de valor por kA de corrente injetada.

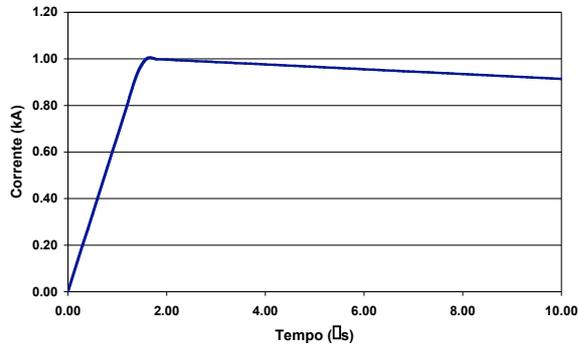


FIGURA 2 – FORMA DE ONDA CONSIDERADA PARA A CORRENTE DE DESCARGA

A seguir, aspectos relacionados às simulações realizadas são apresentados.

4.2 Configuração da malha de aterramento da subestação e resistividade do solo local

Conforme apresentado nas seções seguintes, a malha de aterramento da subestação foi considerada nas simulações com um grande nível de detalhamento.

A resistividade do solo foi considerada como sendo 600 Ω .m, o qual é um valor médio desse parâmetro na região onde se localiza a subestação.

4.3 Simulação 1

A simulação 1 considerou o caso de incidência direta de descarga na torre de telecomunicações, conforme ilustrado na Figura 3.

Os pontos (1 a 7) indicados na Figura 3 referem-se aproximadamente à localização, relativamente à malha de aterramento da subestação, da sala de controle (ponto 1) e dos disjuntores (pontos 2 ao 7). Resultados relacionados às tensões calculadas para esses pontos são apresentadas na seção 5.1.

7654132

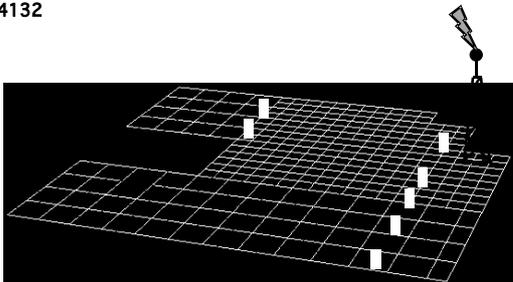


FIGURA 3 – CONFIGURAÇÃO DE ATERRAMENTO CONSIDERADA NA SIMULAÇÃO 1

4.4 Simulação 2

Na simulação 2, assim como no caso anterior, simulou-se a incidência de descarga na torre de

telecomunicações. Contudo, neste caso considera-se adicionalmente a presença da linha de 13,8 kV (de uma forma simplificada, considerando apenas um condutor fase e o cabo neutro). O objetivo dessa simulação é de estimar os níveis de tensão resultante no isolamento da linha devido à incidência de descarga na torre de telecomunicações.

A configuração do sistema considerado na simulação 2 é apresentado na Figura 4 e os resultados associados são apresentados na seção 5.2. Para este caso, um sistema de aterramento reduzido foi utilizado. A distância entre o limite da malha de aterramento e o primeiro poste da linha de 13,8 kV (poste onde estão colocados os transformadores) é de 25 m. A distância entre postes adjacentes é de 50 m e a impedância de aterramento do cabo neutro em cada poste é de 120 Ω .

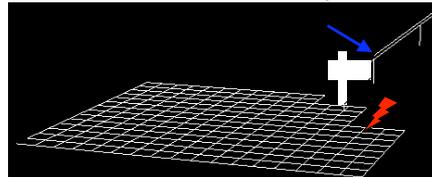


FIGURA 4 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA CONSIDERADA NA SIMULAÇÃO 2

4.5 Simulação 3

A terceira possibilidade investigada contemplou o caso da incidência direta de descarga na linha de 13,8 kV. A configuração do sistema de aterramento da subestação utilizada nesta simulação é o mesmo da simulação anterior. Para este caso, considerou-se que a descarga incidiu junto ao primeiro poste da linha (onde os transformadores 13,8 / 380 kV estão colocados). Neste poste, o condutor fase foi conectado ao cabo neutro, de forma a considerar a atuação do pára-raios. A configuração do sistema para essa simulação é apresentada na Figura 5. Os pontos indicados se referem à sala de controle e aos disjuntores. Os resultados das tensões resultantes nestes pontos são apresentados na seção 5.3.

12435

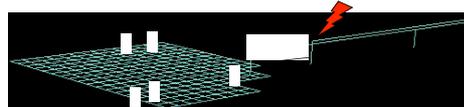


FIGURA 5 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA CONSIDERADA NA SIMULAÇÃO 3

5.0 - RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados das simulações descritas na seção anterior são apresentados nesta seção, juntamente com as respectivas análises.

5.1 Análise dos resultados da simulação 1

As diferenças de potencial resultantes entre os pontos 2 a 7 em relação ao ponto 1 (sala de controle), os quais são indicados na Figura 3, devido à incidência de descarga no topo da torre de telecomunicações são apresentadas na Figura 6. É possível verificar que uma condição de equipotencialização elétrica não consegue ser garantida pela malha de aterramento, para o fenômeno transitório considerado.

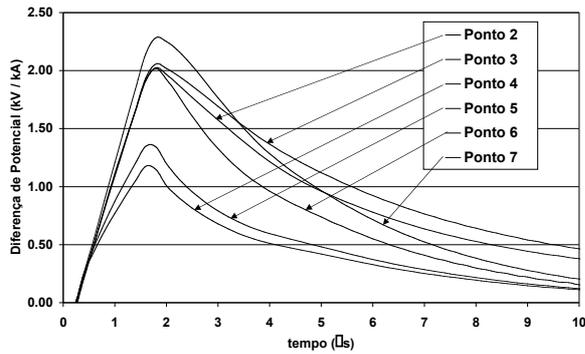


FIGURA 6 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 1

É possível observar que diferenças significativas de potencial surgem entre os pontos em análise e o ponto 1, onde o circuito de comando (C.C.) dos disjuntores está aterrado. Numa ocorrência conforme a simulada, a elevação de potencial na sala de comando (ponto 1) seria "levada" aos outros pontos onde o circuito de comando se faz presente, incluindo o local onde os disjuntores estão localizados. Nestes pontos, a elevação de potencial na malha de aterramento é significativamente menor. Tal condição determina o estabelecimento de valores de tensão consideráveis através do isolamento do circuito e, eventualmente, a ocorrência de disrupção elétrica, causando curto-circuito e queima de componentes.

Conforme apresentado na Figura 6, uma corrente de descarga com 48 kA de valor de pico (valor mediano de Minas Gerais [3]), incidindo no topo da torre de telecomunicações, é capaz de gerar ddp's acima de 100 kV entre os pontos investigados. Para uma corrente de descarga com valor de pico de 100 kA, essas diferenças podem ser maior que 220 kV.

5.2 Análise dos resultados da simulação 2

A Figura 7 apresenta os resultados para a simulação 2 (seção 4.4, Figura 4). O objetivo da simulação é estimar os níveis de tensão resultantes no isolamento da linha de 13,8 kV (desconsiderando a presença dos pára-raios situados próximos aos transformadores) devido à incidência de descarga no topo da torre de telecomunicações.

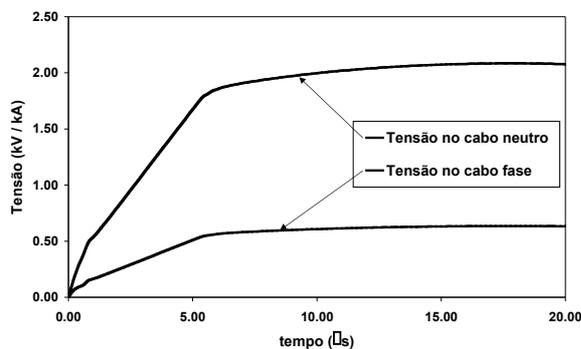


FIGURA 7 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 2

O resultado obtido sugere que os pára-raios da linha de 13,8 kV são solicitados até mesmo para o caso de incidência em questão. Apesar do nível de tensão resultante não ser elevado (em comparação com

outras situações aqui investigadas), é suficiente para injetar corrente nos condutores fase da linha. De qualquer maneira, as soluções a serem adotadas para o caso de incidência direta na linha de 13,8 kV também serão efetivas para a presente situação.

5.3 Análise dos resultados da simulação 3

A Figura 8 apresenta os resultados para a simulação 3 (seção 4.5, Figura 5). Mostra os valores de elevação de potencial gerados em diversos pontos da subestação (correspondentes à localização da sala de controle e dos disjuntores) devido à incidência de descarga num cabo fase da linha de 13,8 kV. A injeção de corrente de descarga na malha de aterramento se faz através do cabo neutro, o qual é aterrado dentro da sala de controle da subestação.

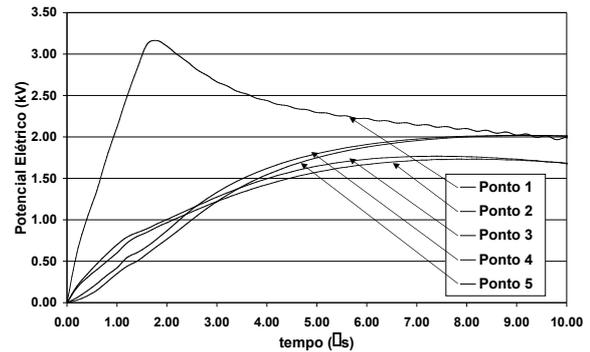


FIGURA 8 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 3

Diferenças de potencial consideráveis podem ser observadas entre os pontos no aterramento referentes às localizações da sala de controle e dos disjuntores. Os níveis de ddp são da mesma ordem de grandeza que aqueles obtidos na simulação 1 e, conseqüentemente, as mesmas implicações (com relação aos danos) podem ser esperadas.

Deve ser ressaltado que, para uma incidência como essa, a queima de componentes pode-se dever também à injeção direta do surto na sala de controle através dos cabos fase. A proteção para este caso foi provida através da proposição de instalação de protetores de surto (seção 6.4).

6.0 - SOLUÇÕES PROPOSTAS

O primeiro grupo de soluções propostas tratou de ações para redução dos níveis de potencial resultantes na malha de aterramento da subestação, devido aos eventos indicados como prováveis causas das queimas relatadas: incidência de descargas nas torres de telecomunicações e na linha de 13,8 kV.

O segundo grupo de soluções abrangeu uma proposição de filosofia de proteção local para os equipamentos sensíveis.

6.1 Instalação de barras de equalização

A primeira proposição para mitigação dos potenciais na malha de aterramento consiste na interconexão dos pontos da malha de aterramento relativos à sala de controle a aos disjuntores através de uma barra de

equalização metálica, não enterrada. Esta deve ser instalada dentro das canaletas pré-existentes, onde circulam os cabos de energia e de controle da subestação, respeitando distâncias de segurança. Apesar da configuração ideal para a barra de equalização, no caso em questão, ser uma estrutura que envolvesse metalicamente os cabos de controle, a implantação de tal solução não foi possível por demandar uma intervenção mais brusca nas instalações, inclusive com a desenergização temporária da subestação.

O objetivo da utilização da barra é equalizar, tanto quanto possível, o potencial entre os pontos interconectados. Tal condição não pode ser garantida pela malha de aterramento sozinha para fenômenos transitórios devido à atenuação do surto de tensão que se propaga em um meio com altas perdas, como é o solo.

Deve-se enfatizar que essa solução é efetiva para os dois casos de incidência em investigação: incidência na torre de telecomunicações e na linha de 13,8kV.

Uma simulação para cálculo do potencial resultante nos pontos de interesse foi realizada, considerando a presença da barra de equalização. A configuração simulada é apresentada na Figura 9. 1327654

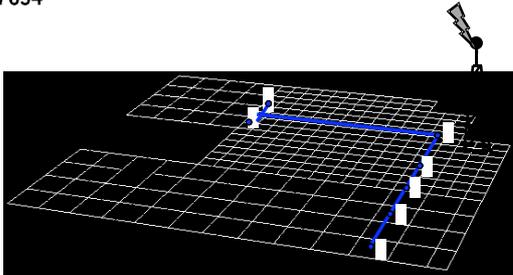


FIGURA 9 – MALHA DE ATERRAMENTO DA SE COM BARRA DE EQUALIZAÇÃO

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 10 e são diretamente comparáveis com aqueles apresentados na Figure 6. Pode-se observar que foi possível mitigar as ddp's em aproximadamente 30%. Para surtos com tempos de frente maiores (surtos mais lentos – tempo de crista maior que 1,5 μ s), os quais são mais representativos dos valores medianos deste parâmetro para ondas de corrente de descarga reais medidas, as tensões poderiam ser mais eficientemente mitigadas (~ 50 a 60 %).

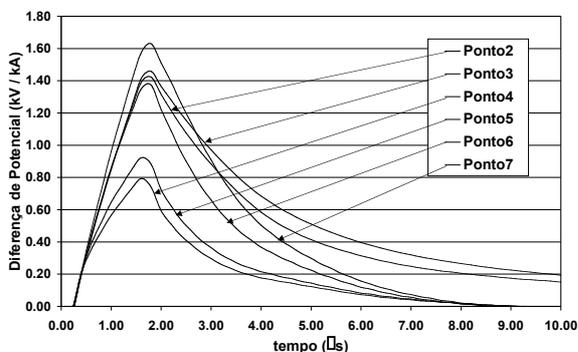


FIGURA 10 – RESULTADOS CONSIDERANDO A BARRA DE EQUALIZAÇÃO

6.2 Trecho subterrâneo de linha de distribuição

Esta solução objetiva especificamente a redução dos efeitos das descargas que incidem na linha de distribuição de 13,8 kV. A proposição foi modificar um trecho da linha para uma configuração subterrânea e instalação de pára-raios nas extremidades deste trecho. A Figura 11 ilustra tal proposição. O cabo neutro e as blindagens dos cabos fase, no trecho subterrâneo, devem ser aterrados regularmente.

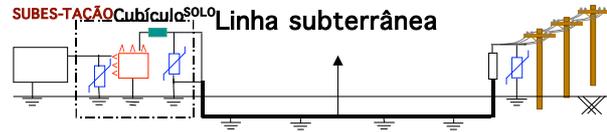


FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DO TRECHO DA LINHA SUBTERRÂNEA

Com o objetivo de investigar a performance dessa nova configuração, foi simulado uma incidência de descarga no final do trecho aéreo (último poste antes da transição aéreo-subterrâneo). Os resultados obtidos se referem aos potenciais desenvolvidos na malha de aterramento da subestação, nos pontos de interesse. Os resultados são apresentados na Figura 12 e são diretamente comparáveis àqueles da Figura 8.

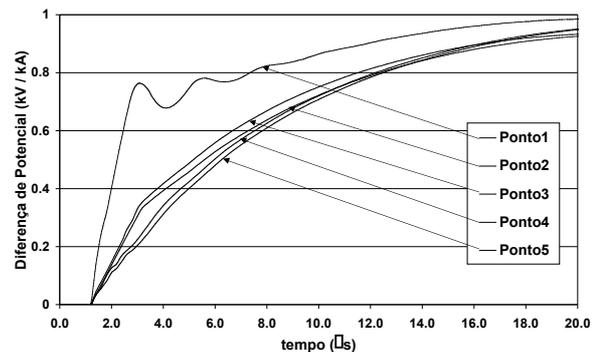


FIGURA 12 – RESULTADOS CONSIDERANDO A LINHA SUBTERRÂNEA

Pode-se notar que essa prática é capaz de mitigar as tensões entre os pontos de interesse em mais de 70 %. Deve ser ressaltado que, nesta simulação, a barra de equalização apresentada anteriormente não foi considerada. Caso seja, uma redução adicional dos potenciais seria atingida.

6.3 Proteção aérea adicional

Esta solução é não convencional, requerendo considerações específicas para sua instalação, apesar dos bons resultados que ela oferece. Ela é específica para diminuir os danos causados por descargas que atingem diretamente a torre de telecomunicações da subestação.

Esta solução foi elaborada pela consideração de que, para o caso de incidência direta de descarga na torre de telecomunicações, uma distribuição mais equilibrada do fluxo da corrente na malha de aterramento da subestação seria eficiente na mitigação das diferenças de potencial resultantes. Desta forma, a proposição é interligar a parte superior da torre (ponto

da subestação mais exposto à incidência de descargas) aos pórticos da subestação, os quais são estruturas aterradas, de forma a criar diversos pontos de injeção de corrente de descarga na malha de aterramento.

Várias configurações diferentes foram simuladas. Os melhores resultados foram alcançados com a utilização da configuração apresentada na Figura 13.
1236754

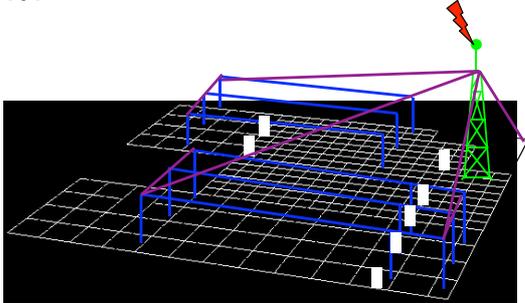


FIGURA 13 – SOLUÇÃO POR CABOS AÉREOS ADICIONAIS

Os resultados da simulação da configuração apresentada (neste caso, adicionalmente considerando a barra de equalização) são apresentados na Figura 14. Os resultados são diretamente comparáveis àqueles da Figura 6. Os níveis de tensão foram mitigados em até 70% em comparação a seu valor inicial. Apesar das dificuldades inerentes à implementação dessa solução, sua eficiência é marcante.

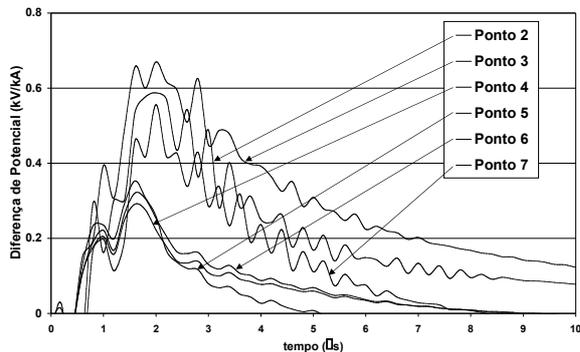


FIGURA 14 – RESULTADOS COM A UTILIZAÇÃO DE CABOS AÉREOS ADICIONAIS

6.4 Instalação de dispositivos de proteção contra surtos

A utilização de protetores de surto para realização de proteções seletivas e específicas é um recurso eficaz. No caso em questão, para o circuito C.A., sugeriu-se a colocação de um protetor principal no quadro de distribuição de energia da sala de controle, que é o local de chegada dos cabos oriundos do transformador 13,8 / 380 kV (serviços auxiliares). Além disso, sugeriu-se também a colocação de protetores junto aos equipamentos sensíveis, como os retificadores e rádios de comunicação.

Com relação ao circuito C.C., a recomendação foi de prover proteção diferencial e de modo comum aos pontos que se mostraram mais susceptíveis à queima, que foram alguns grupos de dispositivos situados no

quadro de controle local dos disjuntores e em painéis na sala de controle.

7.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou algumas soluções para proteção da subestação de uma usina hidrelétrica contra incidência de descargas. Danos a equipamentos eletro-eletrônicos da subestação motivaram esta investigação.

As duas fontes mais importantes de estresse nos isolamentos das instalações da subestação devido a descargas atmosféricas foram detectados como sendo a incidência direta de descargas na torre de telecomunicações e na linha de distribuição de 13,8 kV (que alimenta os serviços auxiliares da usina). Ambos os tipos de incidência são capazes de causar elevações de potencial significativas na malha de aterramento, representando assim fontes em potencial de disrupções elétricas locais no isolamento e, conseqüentemente, causa de circulação de correntes indesejadas e de queima de equipamentos.

As soluções propostas consistiram em três práticas. Primeiramente, a instalação de barra de equalização interconectando pontos específicos na malha de aterramento. Estes pontos correspondem à localização da sala de controle e dos disjuntores. A segunda solução compreendeu a modificação de parte da linha de 13,8 kV para a configuração enterrada e a instalação de dispositivos para-raios. A última proposição, menos convencional, mostrou a efetividade de um sistema alternativo para distribuir a injeção da corrente de descarga na malha de aterramento devido a incidências na torre de telecomunicações. Tais soluções foram capazes de mitigar aos potenciais desenvolvidos em até 70%.

Além disso, a proteção de equipamentos e dispositivos eletro-eletrônico nos circuitos de C.A. e C.C., através da instalação de protetores de surto, foi sugerida com o objetivo de ajustar sua operação ao nível de sobretensões estimadas para as novas práticas.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S. Visacro, F., A. Soares Jr., M.A.O. Schroeder. An Interactive Computational Code for Simulation of Transient Behavior of Electric System Components for Lightning Currents; Anais do 26º ICLP (International Conference on Lightning Protection), Cracóvia, Polônia, 2002.
- (2) S. Visacro F., A. Soares Jr., M.H.M. Vale, M.A.O. Schroeder, Evaluation of Current and Potential Distribution for Lightning Protection System Including the Behavior of Grounding Electrodes; Anais do 25º ICLP (International Conference on Lightning Protection), Rodes, Grécia, 2000.
- (3) M.A.O. Schroeder, A. Soares Jr., S. Visacro, F. Lightning Current Statistical Analysis: Measurements of Morro do Cachimbo Station; Anais do 26º ICLP (International Conference on Lightning Protection), Cracóvia, Polônia, 2002.