

.....

**ANÁLISE DE FALHA DO SISTEMA SUPERVISÓRIO DE UNIDADES
GERADORAS HIDRÁULICAS DEVIDO A SURTOS DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS***

Cleber Jandir Dos Santos¹
Darci Cidade Junior²

Resumo: O presente trabalho apresenta um estudo sobre proteção a danos causados em equipamentos eletrônicos do sistema supervisório de Usina Hidrelétrica (UHE) e Subestação Elevadora (SE) devido a surtos de descargas atmosféricas, apresentando medidas a nível de instalação para minimizar tais danos. Descargas atmosféricas são fontes de perturbações que podem afetar o funcionamento de uma usina hidrelétrica, deste modo o funcionamento contínuo de uma Usina Hidrelétrica é condição desejada para o sistema elétrico prover energia aos consumidores. O bom funcionamento da usina tornou-se extremamente dependente do desempenho satisfatório dos sistemas e equipamentos eletrônicos digitais que compõem o sistema de supervisão e controle.

Palavras-chave: Descargas Atmosféricas. Usina Hidrelétrica. Subestação. Sistema Supervisão e Controle.

¹ Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL - egresso do curso de Engenharia Elétrica

² Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL - egresso do curso de Engenharia Elétrica

* Trabalho de conclusão de curso Orientado pelo professor Dr. João Luiz Alkaim - joao.alkaim@unisul.br



1 INTRODUÇÃO

Descargas atmosféricas são fontes de perturbações que podem afetar o funcionamento de uma usina hidrelétrica (UHE). As tensões induzidas por descargas atmosféricas constituem-se em um dos mais importantes fenômenos capazes de causar danos aos equipamentos eletrônicos digitais do sistema de supervisão e controle (SSC) de um complexo de geração hidráulica.

Dessa forma cuidados a nível de instalação nos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDAs) podem ser tomados para prevenção e minimização destes efeitos e danos.

1.1.1 Forma de onda da corrente de descarga

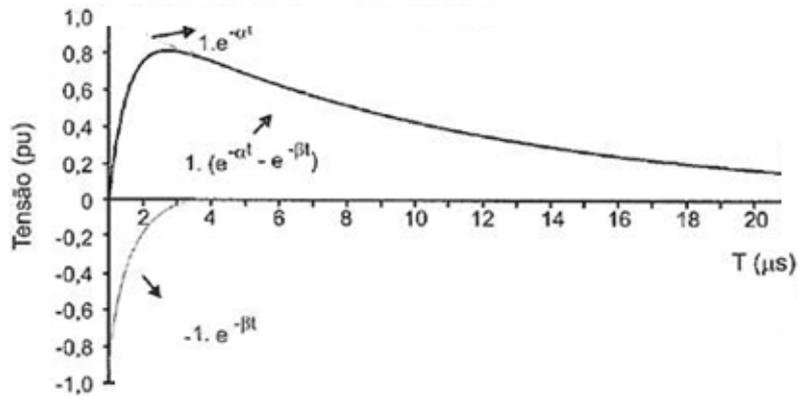
Conforme KINDERMANN, 1997 (p. 22) “A corrente elétrica do raio é alternada, e nos trechos nos quais é aparentemente contínua, ela é na realidade contínua-pulsante, ou seja, a corrente varia muito rapidamente no tempo.”

A onda constitui-se na soma de duas ondas exponenciais de sinais contrários e constantes de tempo de valor muito diferente, no instante inicial, ambas as ondas têm a mesma amplitude, resultando em um valor nulo para a soma. Enquanto a onda positiva se atenua lentamente no tempo, muito rapidamente, a onda negativa se anula, e a soma resultante tem o aspecto impulsivo, indicado pela linha mais espessa na figura abaixo. (VI-SACRO FILHO, 2005, p. 78).



.....

Figura 1 – Forma da Onda da Corrente Curva Dupla Exponencial



Fonte: Visacro Filho (2005)

1.1.2 Amplitude da Corrente de Descarga

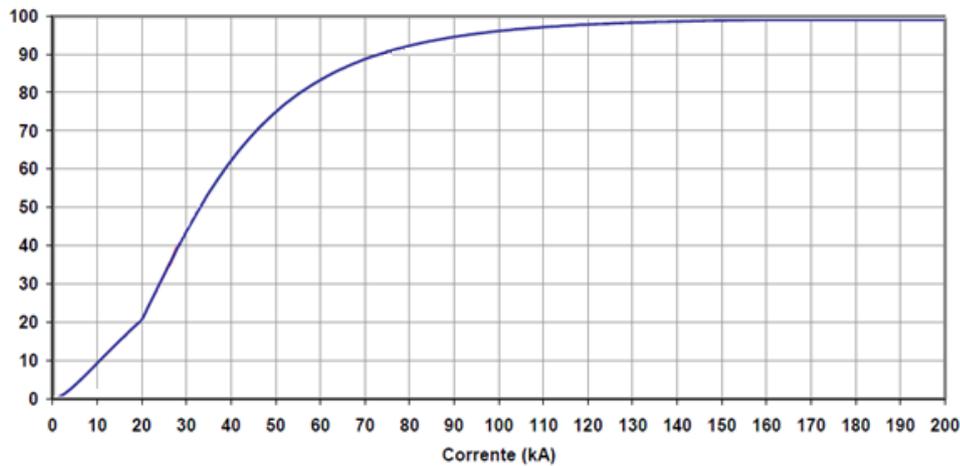
Caracteriza-se o valor de crista ou de pico como a amplitude da corrente de descarga, isto é, o máximo valor que a corrente atinge em uma descarga.

Segundo guia de estudo do IEEE-1243, descargas com correntes acima de 110 kA são raras, ou seja, menos de 1% das correntes de pico das descargas atingem valores superiores a 110 kA. A probabilidade de ocorrer uma descarga com corrente de pico superior a 200 kA é praticamente nula. (INSTITUTE ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 1997).



.....

Gráfico 1 - Probabilidade Acumulada de Ocorrência de Corrente de Pico de Descargas Atmosféricas (%).



Fonte: IEEE-1243 (1997)

1.2 SISTEMAS DE SUPERVISÃO E CONTROLE

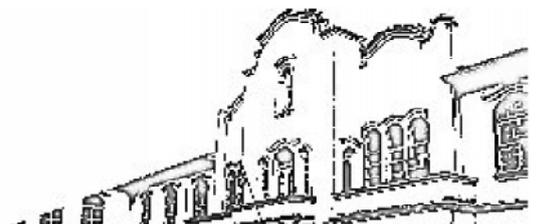
Segundo (Souza, 2009) dentro de uma visão mais ampla, a supervisão de uma usina é abordada considerando dois níveis básicos: sistema de medição e de monitoramento.

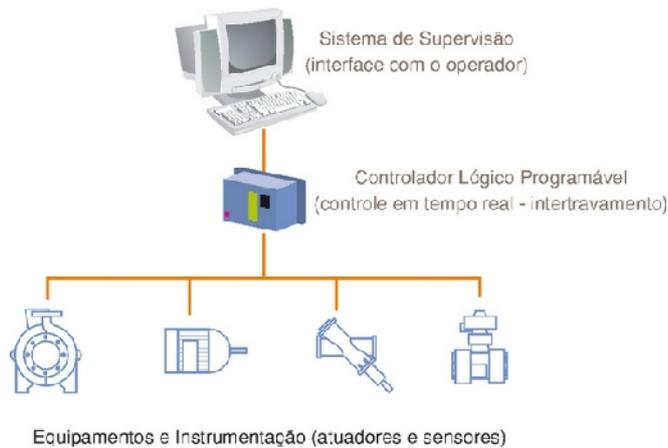
O sistema de medição é uma evolução para os sistemas de monitoramento, onde estes fornecem subsídios para a automação e o controle de uma Usina, tais como o sistema SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition System*. Nesta concepção, grandezas elétricas e mecânicas são tomadas em pontos estratégicos que permitirão traçar um completo diagnóstico do comportamento da usina. Um sistema de monitoramento traz grandes vantagens, tais como: baixo custo, confiabilidade, repetibilidade das medidas, fácil instalação e manutenção, transparência para máquina e reinicialização automática.

Figura 2 – Sistema SCADA

.....

Cadernos Acadêmicos, Palhoça, SC, v.5, n. 2, ago-dez 2013



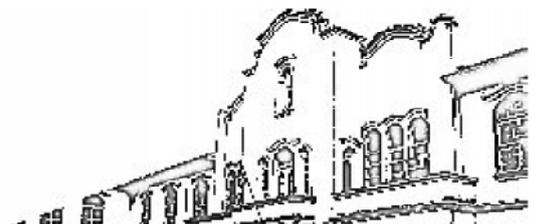


Fonte: Mecatrônica Atual, 2012.

O PLC – *Programmable Logic Controller* é o equipamento capaz de efetuar controles diversos além de lógicas. É nele que ficam armazenadas diversas funções de medições e monitoramento que possa tomar providências para o desempenho da usina.

Segundo SILVEIRA, 1998 (p. 83). “Um PLC é composto por dois elementos principais: uma CPU (Unidade Central de Processamento) e interface para os sinais de entrada e saída.”

O sistema de entrada e saída realiza a conexão física entre a CPU e o mundo externo por meio de vários tipos de circuitos de interfaceamento. Essa interligação entre dois pontos distantes corre o risco de ser afetado por uma descarga atmosférica e o Sistema de Supervisão e Controle – SSC, ficar fora de operação.



.....

2. EFEITOS E PERTURBAÇÕES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NOS SSCS DE UHES

2.1 PERTURBAÇÕES TRANSITÓRIAS E SOBRETENSÕES

Para Kouyoumdjian (1996, p. 57), perturbações transitórias e sobretensões são as perturbações impulsivas, bruscas e de forte amplitude, compostas por uma grande variedade de frequência.

As tensões e correntes resultantes podem ser de diversos níveis. As sobretensões provocadas pelos raios podem atingir muitos milhares de volts.

2.2 TRANSMISSÃO DAS PERTURBAÇÕES

As perturbações podem ser transmitidas pelos cabos e ligações entre aparelhos.

Uma perturbação emitida num local “A” pode propagar-se e transmitir-se aos aparelhos e instalações “B” ligados ao ponto “A”, ou situados em seu ambiente.

3. FENÔMENOS DE ACOPLAMENTO

Segundo CAMPANER (1999, p. 71) podem existir três formas básicas de acoplamentos: condutivo, indutivo e capacitivo. Uma das formas mais óbvias, mas às vezes esquecida, é a interferência conduzida por condutores (fios, cabos e partes metálicas) até o sistema, que será abordado neste trabalho.

O(s) acoplamento(s) possibilita(m) o aparecimento de interferência nas vítimas sob dois modos:



.....

a) Modo comum: Um sinal interferente pode se sobrepor ao sinal desejado (ruído eletromagnético), causando uma diferença de potencial entre os terminais da vítima e o aterramento. Esta tensão é denominada de tensão de modo comum, normalmente é causada por acoplamentos capacitivos ou magnéticos entre a cablagem e sistemas de aterramento ou partes metálicas. Ela pode romper o isolamento do cabo entre condutores e a terra ou entre os terminais do equipamento (vítima) e a terra. (CAMPANER, 1999, p. 71).

b) Modo diferencial: O ruído eletromagnético pode se manifestar sob a forma de uma tensão diferente entre cada um dos terminais e o aterramento ou, em outras palavras, uma tensão entre os terminais da vítima. Esta tensão é denominada tensão de modo diferencial (pode-se encontrar também com os nomes de tensão de modo normal ou tensão de modo série). O aparecimento desta tensão se deve ao desbalanceamento dos fatores de acoplamento (normalmente capacitivos) do ruído em cada um dos terminais do sinal, por assimetria de condutores ou da terminação no circuito de interface (desbalanceamento). A tensão de modo diferencial pode alterar o conteúdo da informação transmitida ou danificar o isolamento correspondente do cabo ou da interface do equipamento terminal (vítima). (CAMPANER, 1999, p. 71).

4. O PROBLEMA DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Uma descarga atmosférica incidindo no SPDA escoar para a terra através dos cabos de descida e se dissipa na malha de terra causando um potencial de malha.

A descarga atmosférica em um SPDA de um local A, por exemplo, a casa de força, irá criar um potencial na malha de terra dessa estrutura, tal potencial alcançará



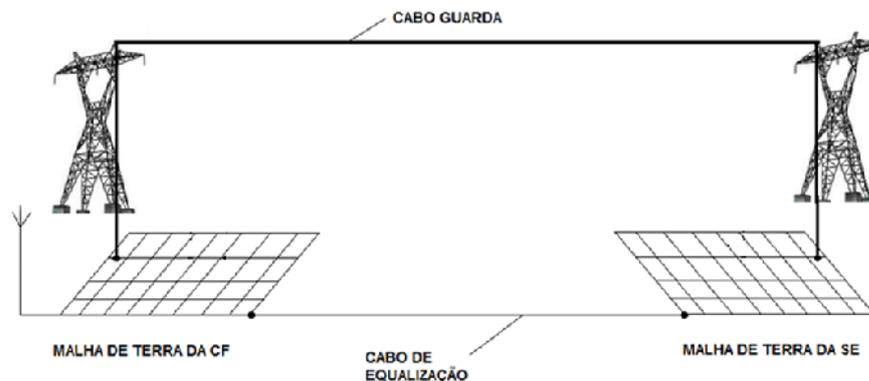
.....

certa intensidade de passo e toque de modo que não causará danos a pessoas e equipamentos.

Casa de força e subestação, quando separadas geograficamente, são interligadas por um cabo de terra para equalização de potencial de suas malhas, conforme figura abaixo.

A presença de uma descarga em uma das malhas causará entre elas potenciais diferentes por um período de tempo.

Figura 3 – Esquemático – Sistema de Proteção



Fonte: Elaboração dos Autores, 2012.

Em regime permanente as malhas das estruturas interligadas não apresentam diferenças de potencial significativas.

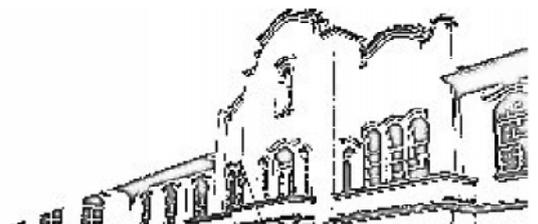
4.1 Queima de Equipamentos Eletrônicos

Os equipamentos eletrônicos do SSC da CF e da SE são interligados através de cabos de controle para troca de informações, como por exemplo: abertura de disjuntor.

Todos os equipamentos eletrônicos do SSC, fisicamente estão instalados dentro de painéis alocados dentro da UHE e SE.

.....

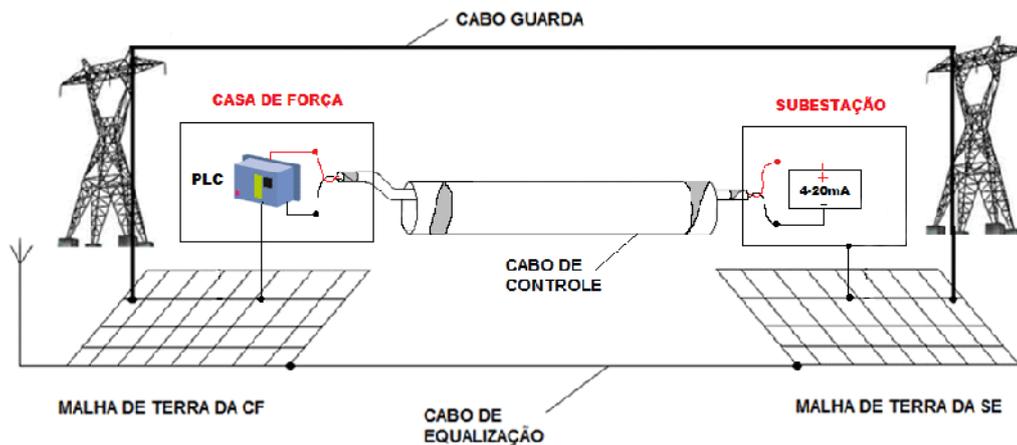
Cadernos Acadêmicos, Palhoça, SC, v.5, n. 2, ago-dez 2013



.....

Todos os painéis tem sua carcaça aterrada em suas respectivas malhas para proteção contra contato direto. Logo o painel e a malha estarão no mesmo potencial.

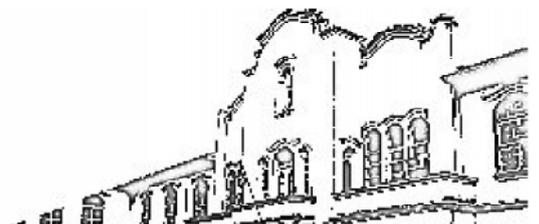
Figura 4 – Representação Esquemática das Instalações



Fonte: Elaboração dos Autores, 2012.

O cabo de controle irá transferir o potencial da malha de terra da CF para a placa de circuito impresso do equipamento eletrônico da SE. Esta irá sentir a diferença de potencial, entre o borne do cabo de controle e o potencial do ponto comum deste circuito.

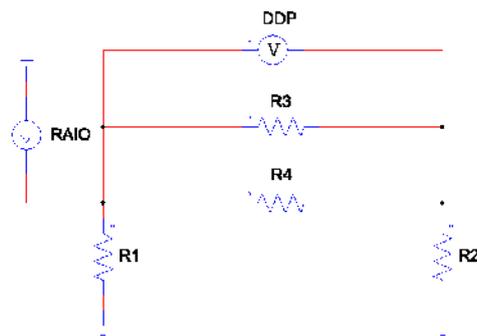
Esta diferença de potencial poderá ocasionar a queima do equipamento dependendo da intensidade alcançada. Quanto à classe de isolamento de acoplamentos de modo comum, a IEC 61000-4 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL, 2006), estabelece que os equipamentos eletrônicos devam suportar até um pico de 4kV surtos de tensão máxima.



4.1.2 Representação do Circuito Equivalente

Para análise da diferença de potencial, modela-se a seguir o sistema em questão como um circuito elétrico equivalente, conforme a figura 5 a seguir:

Figura 5 – Circuito Equivalente



Fonte: Elaboração dos Autores, 2012.

em que:

R1 representa a resistência da malha de terra da estrutura 1 (CF)

R2 representa a resistência da malha de terra da estrutura 2 (SE)

R3 representa a resistência do cabo guarda

R4 representa a resistência do cabo de equalização de potencial das malhas.

5 PROPOSTAS DE MITIGAÇÕES CONTRA DANOS NO SSC DE UHES

Conforme visto no item anterior, com o evento de uma descarga atmosférica surge uma DDP aplicada nos equipamentos do SSC. Essa DDP é função da corrente e

Cadernos Acadêmicos, Palhoça, SC, v.5, n. 2, ago-dez 2013



.....
resistência, conforme lei de ohm $V = R \times I$. Onde a resistência é a do condutor de interligação das malhas para equalização de potencial e cabo guarda (R3 e R4), dada por:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Sendo que:

ρ - é a resistividade elétrica do condutor (em ohm metros, Ωm);

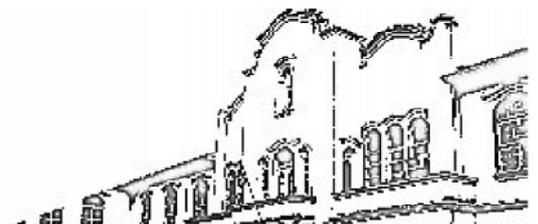
R - é a resistência elétrica do material (em [ohms](#), Ω);

L - é o comprimento do condutor (medido em metros);

A - é a área da secção do condutor (em metros quadrados, m^2).

Dessa forma sendo a DDP função de R e I , onde I é a corrente do raio e depende da intensidade da fonte. Como não temos o controle da corrente usaremos valores probabilísticos. Uma forma de variar a DDP é alterando o valor da resistência. Conforme visto acima essa resistência é função da área do condutor e do comprimento, dessa forma variamos a resistência mudando o comprimento do cabo, alterando sua bitola e associando condutores em paralelo, conforme o conceito de associação de resistores de circuitos elétricos pode-se associar estes em paralelo diminuindo assim o valor da resistência total equivalente.

Para os valores de corrente utilizou-se 110 kA, sendo que valores acima deste são pouco prováveis de acontecer.



6. SIMULAÇÕES

Este tópico tem a finalidade de apresentar as simulações feitas considerando as variações de resistência do condutor de interligação das malhas e variando a resistência equivalente da malha de terra da casa de força. Para valores de resistência das malhas de terra Mamede Filho (2001, p. 517) recomenda um valor de até 5 ohms para uma tensão de até 138kV e 10 ohms para valores de tensão acima de 138kV, dessa forma consideramos o pior caso 10 ohms para a SE e para a CF variamos do pior caso 10 ohms para valores de até 1 ohm.

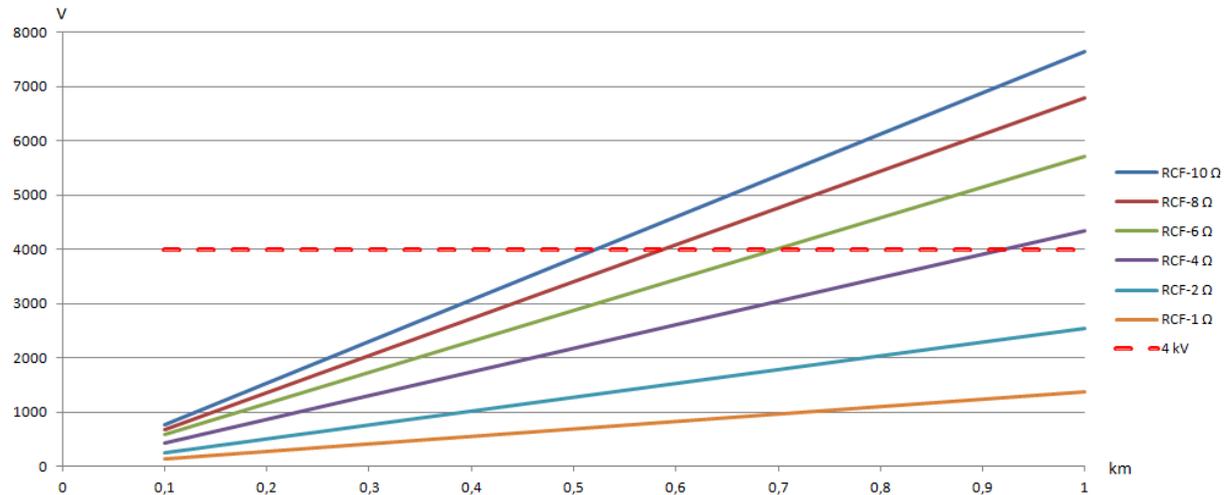
Para efeito de análise foi considerado um valor crítico de referência na faixa 4kV, como valor máximo admissível para não ocasionar a queima dos equipamentos eletrônicos do SSC, conforme recomendações de alguns fabricantes.

6.1 Variação da DDP em função da Resistência do cabo variando o comprimento

Nesta simulação considerou-se a faixa de distância entre 100 m e 1 km, para um cabo de interligação de 95 mm² cuja resistividade é de 0,119 ohm por km. Quanto ao cabo guarda, sua resistividade é 0,47 ohm por km, conforme catálogo de fabricante. Geralmente o cabo 95 mm² é adotado como secção transversal mínima em critérios de projeto.



Gráfico 2 – Valores para Simulação (DDP x Distância).



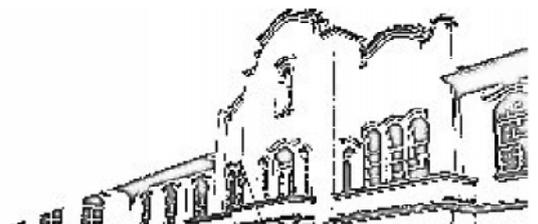
Fonte: Elaboração dos Autores, 2012.

Conforme o gráfico acima, a variação da distância entre as estruturas influencia na DDP, ao aumentar a distância observa-se um aumento na diferença de potencial entre as estruturas.

Para este caso, verificou-se que o cabo de 95mm² atende:

para uma distância de até 1km o nível crítico estabelecido pela norma para até 20% da resistência da malha de terra da estrutura atingida em relação a não atingida.

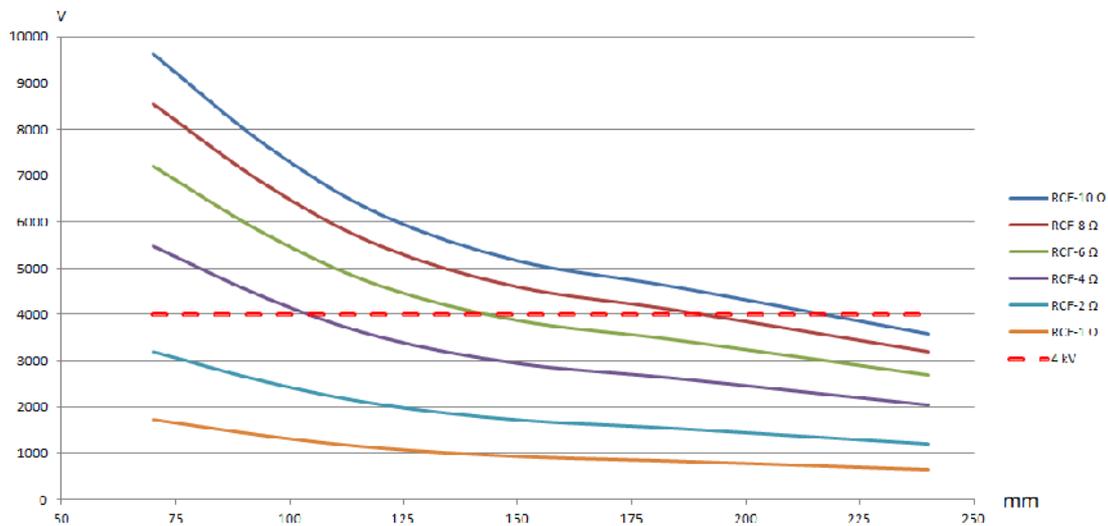
a distância de até 900 m atende o nível crítico estabelecido pela norma para até 20% da resistência da malha de terra da estrutura atingida em relação a não atingida.



6.2 Variação da DDP em função da Resistência do cabo variando a Bitola

Nesta simulação considerou-se uma distância fixa de 1 km entre as estruturas como pior caso e variou-se a secção do cabo de interligação entre 70 mm² e 240 mm². O cabo guarda foi mantido a um valor fixo de 0,47 Ω/km, conforme catálogo de fabricante.

Gráfico 3 – Valores para Simulação (DDP x Secção).



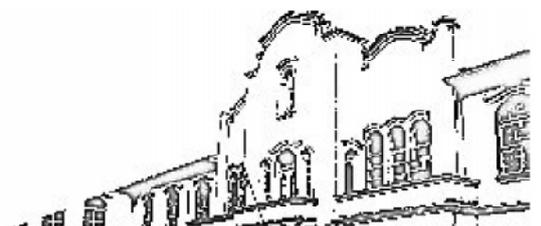
Fonte: Elaboração dos Autores, 2012.

Conforme o gráfico acima se observa que quanto maior a secção do cabo, menor será a DDP para distância de 1 km entre as estruturas.

Para este caso:

1 cabo de 95mm² atende o nível crítico estabelecido pela norma para até 20% da resistência da malha de terra da estrutura atingida em relação a não atingida.

1 cabo de 120mm² atende o nível crítico estabelecido pela norma para até 40% da resistência da malha de terra da estrutura atingida em relação a não atingida.



.....

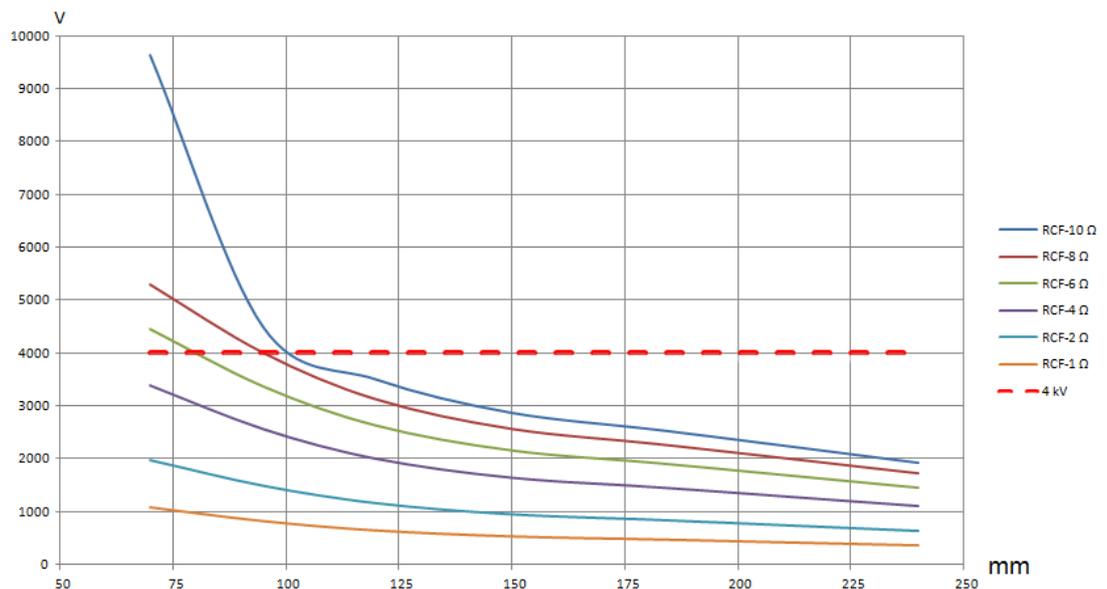
1 cabo de 150mm² atende o nível crítico estabelecido pela norma para até 60% da resistência da malha de terra da estrutura atingida em relação a não atingida.

1 cabo de 240mm² atende o nível crítico estabelecido pela norma para valores acima de 80% da resistência da malha de terra da estrutura atingida em relação a não atingida.

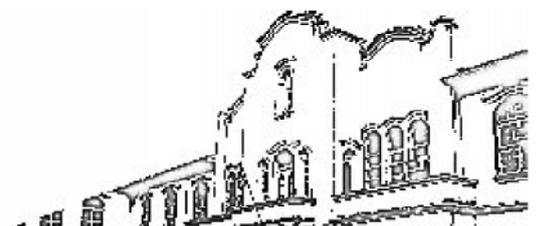
6.3 Variação da DDP em função da resistência associando cabos em paralelo

Nesta simulação considerou-se uma distância fixa de 1 km entre as estruturas como pior caso e variou-se a secção do cabo de interligação entre 95 mm² e 240 mm² para dois cabos associados em paralelo. O cabo guarda foi mantido em um valor fixo de 0,47 Ω/km, conforme catálogo de fabricante.

Gráfico 4 – Valores para Simulação (DDP x Cabos em Paralelo).



Fonte: Elaboração dos Autores, 2012.



.....

Conforme o gráfico acima se observa quanto maior a secção dos cabos em paralelos menor será a DDP, para distância de 1 km entre as estruturas.

Para esse caso:

2 cabos em paralelo de 95mm² atende o nível crítico estabelecido pela norma para até 60% da resistência da malha de terra da estrutura atingida em relação a não atingida.

2 cabos em paralelo de 120mm² atende o nível crítico estabelecido pela norma para acima de 60% da resistência da malha de terra da estrutura atingida em relação a não atingida.

7 CONCLUSÕES

A descarga atmosférica em uma UHE pode causar uma perturbação na forma de uma diferença de potencial (DDP). Se separadas geograficamente, Casa de Força e Subestação, esta diferença de potencial pode ultrapassar o limite de isolamento, podendo causar danos a equipamentos eletrônicos do SSC, representando um risco para a operação normal da UHE.

A partir dos resultados da análise efetuada, conclui-se que:

Quanto menor a distância entre as estruturas menor será a DDP;

Quanto menor o valor da resistência de aterramento do local atingido menor a DDP;

Quanto menor a resistência do cabo de equalização de potenciais de malha menor a DDP.

Dessa forma, recomenda-se para mitigação dos danos causados aos equipamentos eletrônicos por surtos de tensão causados por descargas atmosféricas:

A instalação da subestação próximo da unidade de geração;

Caso contrário:

Utilizar cabos de maior secção, ou cabos em paralelo.



2 REFERÊNCIAS

CAMPANER, R. M. Introdução básica aos conceitos teóricos e práticos do estudo de interferências e compatibilidade eletromagnética em instalações elétricas. Curitiba, 1999. (Notas de Aula).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000- 4**: Electromagnetic Compatibility Testing and Measurement Techniques, 2006.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE- 1243**: Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. 1997.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE - 80**: Guide for Safety in AC Substation Grounding. 2000.

KINDERMANN, G. **Descargas atmosféricas**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra DC Luzzato, 1997.

KOUYOUMDJIAN, A. **A Compatibilidade eletromagnética**. São Paulo: MM , 1996.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2001. **MECATRÔNICA ATUAL. Sistema de supervisão e controle**. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/381>>. Acesso em: 19 mai. 2012.

SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W. **Automação e Controle Discreto**. São Paulo: Érica, 1998.

SOUZA, Z. et al. Centrais Hidrelétricas, Implementação e Comissionamento. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

VISACRO FILHO, S.. Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia. São Paulo: Artiliber, 2005.

