



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO - X**

**GRUPO DE ESTUDO DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**UMA ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DA EFICIÊNCIA DA BLINDAGEM DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SUBESTAÇÕES**

**Sandro de Castro Assis(\*)  
CEMIG DISTRIBUIÇÃO**

**Elilson Eustáquio Ribeiro  
NSA CONSULTORIA**

**Roberto Márcio Coutinho  
CEMIG DISTRIBUIÇÃO**

**RESUMO**

Este artigo busca realizar uma análise da eficiência das blindagens dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas de subestações de distribuição de 138 kV (SEs) através de uma análise tridimensional, verificando a eficiência dos mesmos contra descargas atmosféricas que possam provocar desligamentos ou danos aos equipamentos presentes na SE. Para isto é apresentado um exemplo do cálculo da eficácia do sistema de proteção contra descargas atmosféricas de uma subestação da CEMIG DISTRIBUIÇÃO, indicando os ganhos de tempo de projeto e execução de obra, bem como otimização de recursos financeiros que podem advir de uma análise tridimensional.

**PALAVRAS-CHAVE**

Blindagem, Subestações, Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, Análise tridimensional

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os equipamentos de um sistema de potência podem ser submetidos a elevados valores de tensão em função da ocorrência de descargas atmosféricas originadas tanto por descargas diretas na subestação como por descargas diretas ou indiretas nas linhas de transmissão que chegam à subestação.

Neste artigo trataremos das descargas incidentes nas subestações. Devido à baixa resistência de aterramento das malhas da SEs, a ocorrência de falhas de isolamento causadas por descargas atmosféricas que atingem o sistema de proteção destas - cabos para-raios e mastros - é praticamente nula. Por causa desta baixa resistência de aterramento, o potencial no topo dos pórticos é reduzido de maneira rápida, impedindo a ocorrência de ruptura elétrica através dos isoladores.

Para sistemas de proteção contra descargas atmosféricas de SEs adequadamente projetados, a ocorrência de descargas atmosféricas atingindo diretamente os condutores/barramentos no interior das subestações deve ser um evento extremamente raro. No projeto da blindagem contra descargas atmosféricas das SEs deve ser verificada a altura dos mastros e dos cabos para-raios em relação ao solo e dos elementos protegidos, quantitativo a ser instalado, bem como a qualidade do material e estética.

Considerando as características volumétricas de uma subestação, que possui limites dimensionais nos eixos x, y e z do plano cartesiano, fica evidenciada a necessidade de uma análise tridimensional.

(\*) Avenida Barbacena, n° 1200 – 11º Andar - Ala B2 – CEP 30.190-131 Belo Horizonte, MG – Brasil  
Tel: (+55 31) 3506-2967 – Fax: (+55 31) 3506-2948 – Email: sandro.assis@cemig.com.br

Esta análise tridimensional possibilita:

- Adequação das alturas e quantitativo dos mastros utilizados no sistema de blindagem de SEs;
- Um melhor posicionamento dos elementos protetores, tendo em vista descargas críticas incidentes;
- Verificação da eficiência de sistemas existentes.

No item 2.0 são apresentadas as características da modelagem considerada.

## 2.0 - MODELAGEM CONSIDERADA

### 2.1 Modelo eletrogeométrico

Para determinar a eficiência da blindagem dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em subestações é necessário realizar estudos através do modelo eletrogeométrico [1].

Um conceito fundamental para a descrição do modelo eletrogeométrico é o de distância crítica. A distância crítica é definida como a distância entre o precursor da descarga e um objeto sobre o solo (ou o próprio solo) a qual, uma vez atingida, define este objeto como ponto de impacto do precursor. Esta distância crítica é função da amplitude da corrente da descarga atmosférica. Na bibliográfica específica do tema, algumas equações vem sendo propostas para a determinação desta distância crítica. A referência [3] sugere que, para análises de blindagens de SEs, seja adotada a equação (1) na determinação da distância crítica.

$$S = 8I^{0,65} \quad (1)$$

Onde:

$S \rightarrow$  distância crítica (m)

$I \rightarrow$  amplitude da corrente de retorno da descarga atmosférica (kA)

### 2.2 Método de Monte Carlo

Devido à natureza probabilística das amplitudes das correntes e dos ângulos de incidência das descargas atmosféricas, foi implementado o método de Monte Carlo. Este método está baseado no sorteio aleatório dos parâmetros que interferem em determinados processos.

Basicamente, para cada parâmetro sorteia-se um número entre 0 e 1, que representa a probabilidade acumulada de ocorrência do parâmetro. A partir desta probabilidade estima-se o valor do parâmetro sob análise. Quanto maior o número de amostras geradas (neste caso descargas atmosféricas), maior a precisão dos resultados obtidos, pois estará sorteando mais pontos dentro das curvas de probabilidades dos parâmetros envolvidos.

### 2.3 Programa implementado

Com o objetivo de verificar a eficiência da blindagem dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas que possam provocar desligamentos ou danos aos equipamentos presentes nas SEs da CEMIG, foi utilizado o programa *SE\_SPDA* desenvolvido pela NSA CONSULTORIA. Este programa foi desenvolvido após interação entre a CEMIG DISTRIBUIÇÃO e a NSA CONSULTORIA. Com auxílio do programa foi possível realizar uma análise dos padrões de blindagem utilizados nas SEs, através de simulação tridimensional das subestações.

O programa utiliza o método eletrogeométrico com enfoque tridimensional, onde cada parte dos elementos protetores, que compõem o sistema de proteção contra descargas atmosféricas das SEs (mastros e cabos para-raios) ou protegidos, compostos pelos condutores e barramentos, representam o centro de uma esfera com raio igual à distância crítica. Estas esferas, definidas para cada amplitude da corrente de descarga incidente, se superpõem, definindo áreas dos elementos a serem protegidos contra descargas atmosféricas que estão blindadas eficazmente ou expostas.

No programa *SE\_SPDA*, a especificação da geometria a ser analisada, composta pelos elementos protetores e protegidos, pode ser feita definindo-se segmentos lineares com coordenadas iniciais e finais (x, y, z), bem como os seus respectivos raios (definindo um cilindro) ou através da importação de ambiente CAD. A Figura 1 ilustra uma vista de uma SE da CEMIG DISTRIBUIÇÃO.

Na geração das descargas atmosféricas para verificação do sistema de blindagens é possível:

- Gerar descargas com amplitudes aleatórias, de acordo com curvas de probabilidade definidas pelo usuário;
- Gerar descargas com ângulos de incidências aleatórios, de acordo com curvas de probabilidade definidas pelo usuário;

- Definir limites mínimos e máximos da amplitude da descarga, normalizando a distribuição existente (uma vez que descargas de amplitude elevada serão blindadas pelo sistema de proteção existente, devido às elevadas distâncias críticas);
- Gerar descargas com amplitude fixa, avaliando a eficiência do sistema de proteção para determinada amplitude de descarga, podendo esta possuir ângulo de incidência aleatório ou fixo;
- Gerar uma descarga específica, para avaliação de um local definido no projeto.

A Figura 2 apresenta uma tela que sintetiza as possibilidades de geração de descargas existentes.

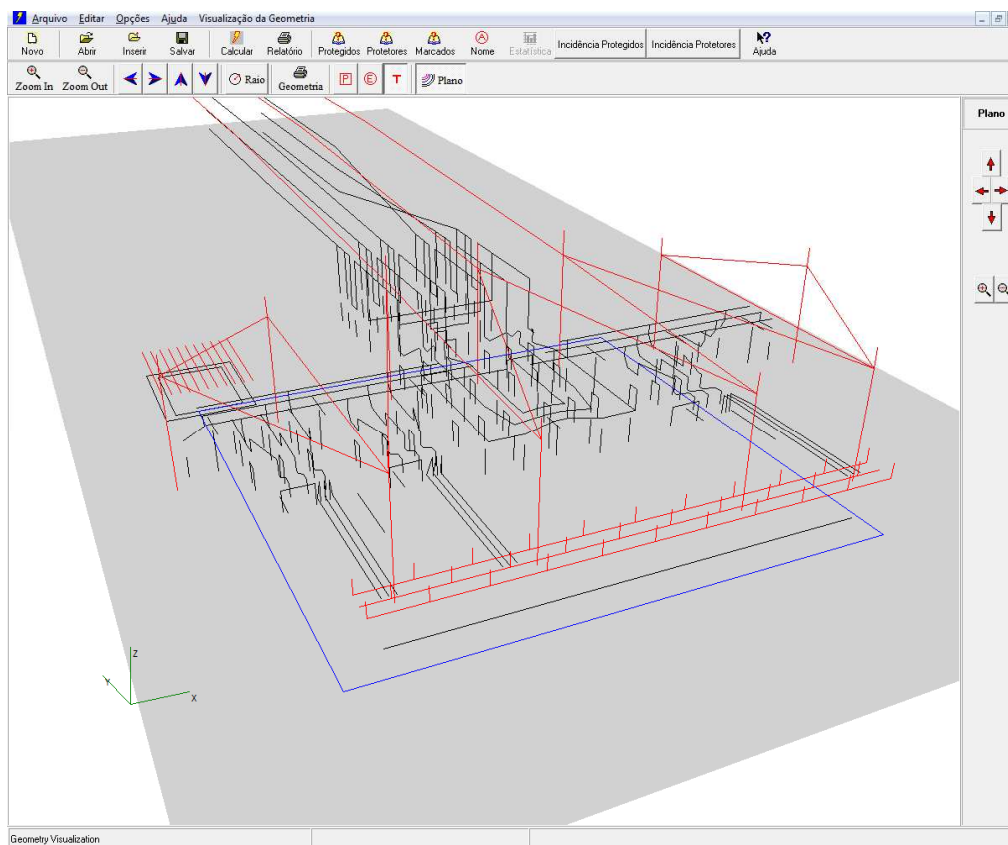


FIGURA 1 – Vista em perspectiva da SE

**Especificação dos cálculos**

**Número de Descargas Atmosféricas Simuladas**

☒ Número fixo de descargas : 50000

☐ Anos simulados : 100

Descargas avaliadas a partir do

☐ Nível cerâmico : 40,0

☒ Descargas/km2/Ano : 8,0

**Amplitude das descargas**

☒ Aleatória

☐ Aleatória entre (kA): 1,0 40,0

☐ Igual a (kA): 3,0

**Ângulo de incidência das descargas**

☒ Aleatório

☐ Igual a (°): 0,00

**Coordenadas do Canal das Descargas**

☒ Determinadas randomicamente ☐ Coordenadas especificadas (abaixo)

Especificação de coordenadas (m):

Ponto inicial (X,Y,Z): 0,00 0,00 1000,00

Ponto final (X,Y,Z): 0,00 0,00 0,00

Curvas de probabilidade...

FIGURA 2 – Opções de geração de descargas existentes

Em cada simulação, de forma a não gerar descargas que não possam vir a ser interceptadas pelos elementos protetores e/ou protegidos, define-se uma área quadrada limite de incidência. Nesta área limite todas as descargas geradas pelo programa incidiriam caso não houvesse elementos para “atrair” as descargas incidentes.

Como principais saídas do programa, temos:

- Apresentação visual dos locais de incidência das descargas nos elementos protetores.
- Apresentação visual dos locais de incidência das descargas nos elementos protegidos.
- Gráfico indicando distribuição das amplitudes das descargas que incidiram nos elementos (protetores e/ou protegidos) selecionados;
- Relatório contendo amplitudes mínima e máximas de corrente de descarga e quantitativo incidente em cada elemento simulado.

Estas informações que fornecem subsídios ao projetista para correção/adequação do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, caso seja necessário.

### 3.0 - EXEMPLO DE CÁLCULO

Existe uma amplitude máxima de corrente que pode atingir os barramentos e os componentes de uma determinada SE sem que haja danos para os equipamentos da mesma. Este valor depende, basicamente, da Tensão Suportável a Impulso Atmosférico (TSIA) dos equipamentos. Considerando a incidência de uma descarga direta em uma SE, ela irá gerar uma onda de tensão que se propagará dentro da subestação. Caso a onda de tensão, ao atingir determinado equipamento, possua amplitude superior ao TSIA do equipamento, ocorrerá uma falha no isolamento do mesmo, que poderá danificá-lo permanentemente e/ou provocar um curto-circuito interno à SE.

A impedância de surto dos barramentos pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$Z = 60 \ln \frac{2h}{r}$$

onde:

$Z \rightarrow$  impedância de surto ( $\Omega$ )  
 $h \rightarrow$  altura do condutor (m)  
 $r \rightarrow$  raio do condutor (m)

A máxima corrente que pode incidir nos barramentos de 138 kV da SE considerada, de forma a não provocar danos aos equipamentos pode ser avaliada como:

$$I_{desc} = \frac{2 \times TSIA}{Z}$$

onde:

$I_{desc} \rightarrow$  amplitude da corrente de descarga (kA)  
 $Z \rightarrow$  impedância de surto ( $\Omega$ )  
 $TSIA \rightarrow$  tensão suportável de impulso atmosférico (kV)

Uma maneira de avaliar a eficiência do sistema de blindagem contra descargas atmosféricas que possam provocar danos é através de uma análise determinística. Neste caso é assumido que somente descargas com amplitudes inferiores aos valores de descargas críticas podem atingir os barramentos e equipamentos. O arranjo do sistema de proteção é dimensionado considerando este valor.

As Figuras 3 e 4 apresentam detalhes de projeto da SE simulada.

Os barramentos flexíveis à SE possuem os seguintes dados:

Altura : 10,7 m  
 Raio : 9,14 mm

Os barramentos rígidos possuem:

Altura : 4,3 m  
 Raio : 38,10 mm

A TSIA dos equipamentos de 138 kV é de 550 kV. As menores amplitudes de correntes de descarga capazes de gerar valores de sobretensões maiores que a TSIA dos equipamentos são:

- Barramentos flexíveis:
  - $Z = 465 \, \Omega \rightarrow I_{desc} = 2,36 \, \text{kA}$
- Barramentos rígidos:
  - $Z = 325 \, \Omega \rightarrow I_{desc} = 3,38 \, \text{kA}$

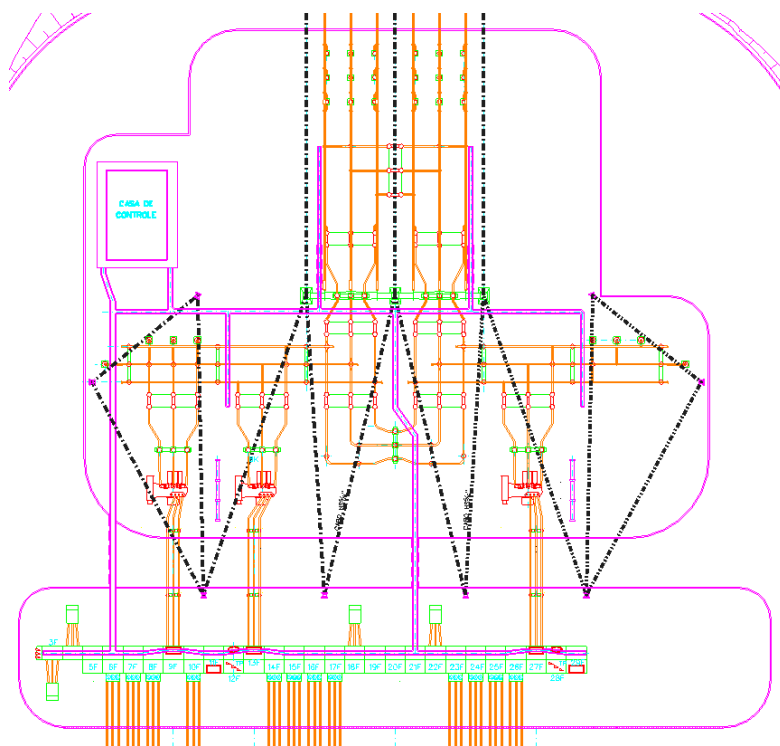


FIGURA 3 - Planta da SE, arranjo dos equipamentos externos no pátio de 138kV. As linhas traço-ponto indicam os cabos para-raios das LTs e os cabos de blindagem da SE.



FIGURA 4 – Foto da SE construída. Sistema de blindagem existente.

Desta forma, descargas com amplitudes de corrente menores que 2,36 kA podem incidir em qualquer elemento protegido sem causar danos aos equipamentos de 138 kV instalados.

A partir deste valor, foram geradas pelo programa 50.000 descargas, com valor de 2,36 kA e ângulo de incidência conforme distribuição probabilística apresentado em [1]. O local de incidência, sem considerar os raios de atração dos elementos da SE, seria o quadrado em azul apresentado na Figura 5. Esta área pode ser redimensionada pelo usuário, de forma a verificar a eficiência em regiões específicas.

O sistema de proteção se demonstrou totalmente eficiente. Desta forma, não foi avaliada a eficiência da blindagem para a corrente de 3,38 kA, uma vez que esta amplitude resulta em um raio de atração maior.

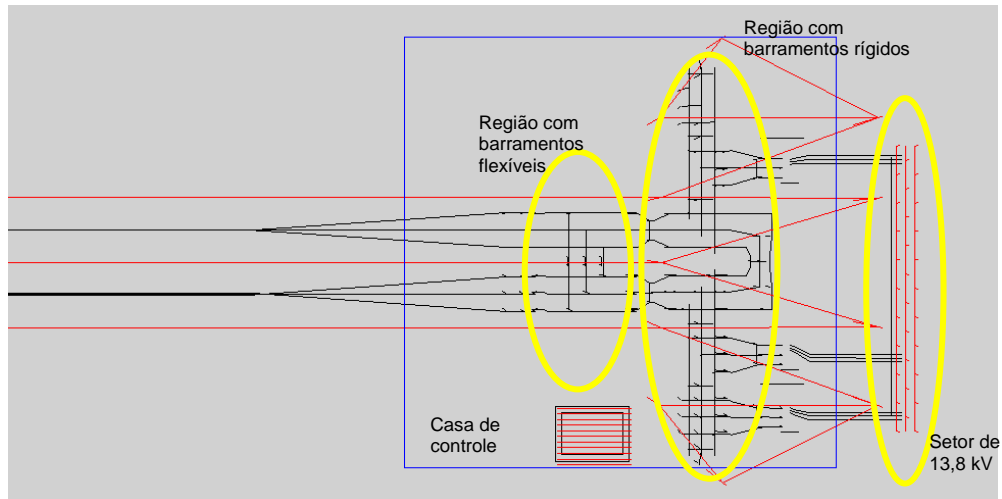


FIGURA 5 – Identificação da área de incidência de descargas e caracterização do pátio modelado.

Buscando uma otimização do sistema de proteção contra descargas atmosféricas originalmente proposto, foram realizadas diversas simulações buscando uma economia de material, porém sem permitir falha de blindagens para correntes com amplitudes acima dos valores críticos.

Na Figura 6 é apresentada a geometria da nova configuração proposta. Esta possui uma redução de 3 mastros captadores e 28% de cabos. Para a obtenção desta geometria foi necessário o rearranjo dos cabos para-raios e relocação de mastros.

O sistema de proteção contra descargas proposto, mantém a necessária eficiência da proteção contra descargas atmosféricas no pátio de 138 kV.

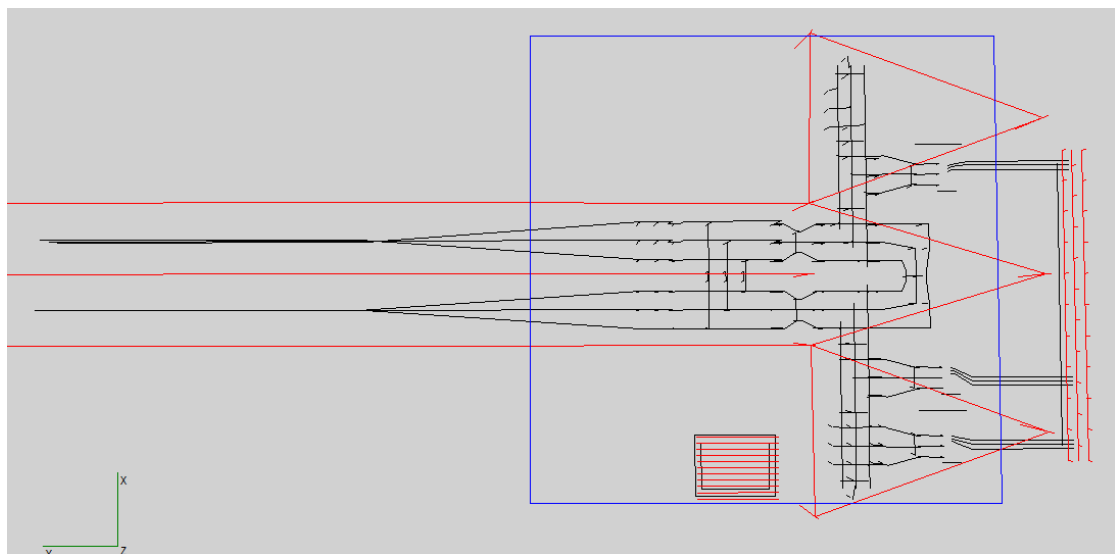


FIGURA 6 – Geometria proposta. Utilização de 5 mastros captadores.

A Figura 7 apresenta os locais de incidência das descargas atmosféricas, para a geometria proposta. Nesta análise foram geradas 50.000 descargas com amplitudes de acordo com curva de probabilidade da Cemig e curvas de probabilidade de ângulo de incidência de acordo com [1]. Cada ponto marcado indica um local de que o sistema de proteção interceptou a descarga.

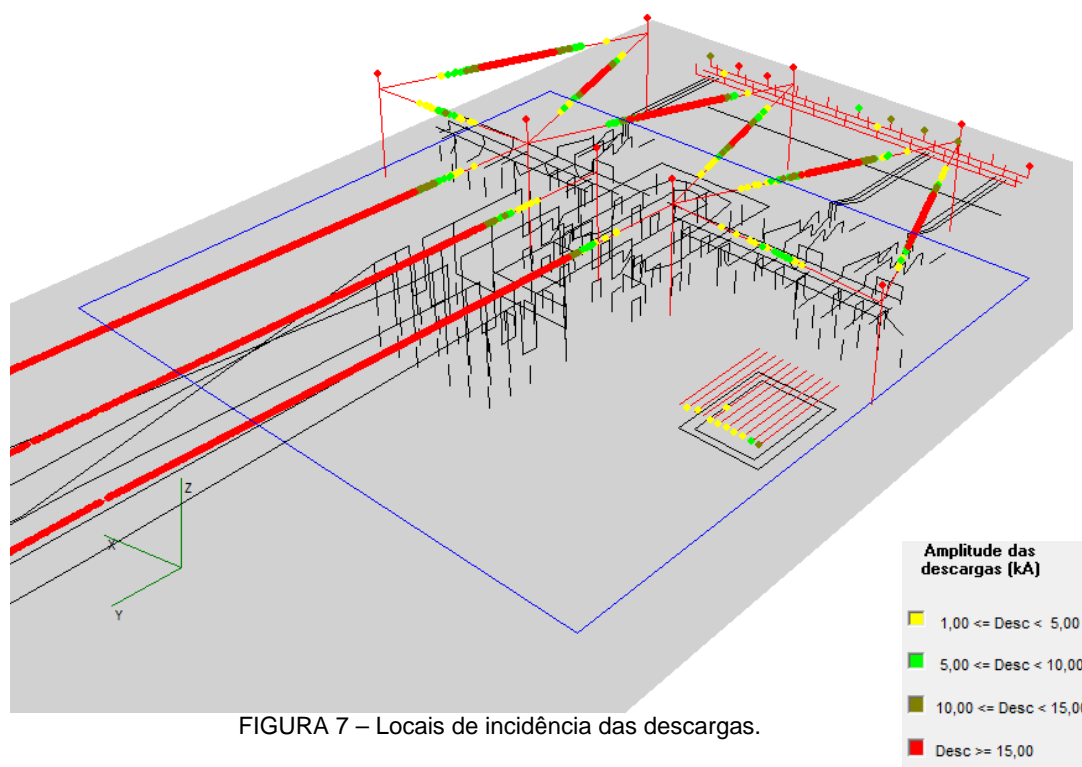


FIGURA 7 – Locais de incidência das descargas.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Conforme apresentado, a implementação computacional do modelo eletrogeométrico permite ao projetista avaliar com facilidade e com maior precisão a eficiência do sistema de proteção contra descargas atmosféricas de uma SE. Além de análises determinísticas, conforme apresentado no artigo, é possível realizar análises probabilísticas, determinando riscos de falhas para as instalações.

A CEMIG vem utilizando este modelo, implementado no programa SE\_SPDA, para avaliar seus padrões de proteção contra descargas atmosféricas, buscando reduções de custos e complexidade nas obras. Pelo fato das subestações serem partes importantes do sistema de transmissão, estas análises são conduzidas de maneira determinística, visando minimizar que descargas capazes de danificar os equipamentos atinjam a SE.

Devido à grande capacidade de geração de descargas atmosféricas por simulação (até 50.000) e facilidades de edições, aliado ao fato de termos uma visão tridimensional da subestação, o trabalho do projetista é facilitado, apresentando ganhos significativos no tempo de elaboração de projetos eficientes de proteção contra descargas atmosféricas em subestações. Adicionalmente é obtido redução de custos com materiais, tempo de execução de obras e com transportes de mastros com tamanhos superiores aos efetivamente necessários para uma blindagem eficiente.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ARY D'AJUZ, et all – Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão – Furnas – 1987
- (2) VICTOR HUGO GOMES DE ANDRADE – Proteção de Subestações Contra Descargas Atmosféricas Diretas – II Seminário Sobre Pesquisas Aplicáveis a Sistemas de Transmissão – Rio de Janeiro – RJ – Maio 1985
- (3) IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations, 1996
- (4) EPRI – Electric Power Research Institute - Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above, Second Edition, 1975

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Sandro de Castro Assis.** Nascido em 1980 em Coronel Fabriciano, MG. Engenheiro eletricitista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2004 e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2006. É engenheiro de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações da Cemig Distribuição.



**Roberto Márcio Coutinho.** Nascido em 1952 em Belo Horizonte, MG. Engenheiro eletricitista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1978. Pós-graduado em sistemas elétricos de potência em 1985 pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É engenheiro de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações da Cemig Distribuição. Membro do Cobei. Coordenador do guia de aplicação de para-raios de resistor não linear em sistemas de potência de corrente alternada -procedimentos.



**Elilson Eustáquio Ribeiro.** Nascido em 1961 em Morada Nova de Minas, MG. Engenheiro eletricitista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1984 e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1987. É engenheiro consultor da NSA Consultoria e professor da PUC-MG.