



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

GSE 26  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO VIII**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – GSE**

#### **OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DA BLINDAGEM DE SUBESTAÇÕES DE ALTA E EXTRA-ALTA-TENSÃO COM RECURSOS DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL BLINDASE**

**Fabio Nepomuceno Fraga \*      Cinthia Souza dos Santos Xavier      Silvania Maria da Silva  
Ronaldo Sena de Oliveira      Jose Messias Cavalcante Junior**

**CHESF – COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO**

## **RESUMO**

O presente trabalho apresentará um programa computacional para avaliar a efetividade da blindagem de subestações de alta-tensão e extra-alta-tensão. Este programa desenvolvido avalia configurações, simulando de maneira tridimensional, a subestação (barramentos, equipamentos, hastes, estruturas, etc..) e as descargas atmosféricas que caem na subestação e em sua vizinhança.

A análise da efetividade de blindagens contra descargas atmosféricas de subestações consiste em explorar diferentes configurações de proteção, combinando o uso de cabos guarda e mastros (hastes) e avaliar as características estatísticas de descargas diretas nos elementos das subestações.

O modelo eletrogeométrico é utilizado para avaliar a efetividade da blindagem e a técnica de Monte Carlo para simular as variáveis que têm comportamento estatístico.

É apresentado um estudo de caso em uma subestação onde a configuração de cabos e mastros são ajustados a partir de simulações realizadas com a ferramenta computacional BlindaSE.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Blindagem , Modelo Eletrogeométrico, Descargas Atmosféricas

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Um dos primeiros problemas enfrentados na exploração de redes elétricas foram as descargas atmosféricas diretas nos cabos condutores, provocando a destruição de equipamentos e instalações. A solução visualizada foi a adição de cabos e hastes, com a função de atrair as descargas atmosféricas, impedindo que estas caíssem sobre os cabos condutores e equipamentos.

A especificação dessa proteção (blindagem) evoluiu à medida que se ampliava o conhecimento do fenômeno das descargas atmosféricas, principalmente da sua natureza estatística e do desenvolvimento de modelos que simulassem a sua trajetória para o solo. Neste sentido a CHESF, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, desenvolveu uma ferramenta capaz de avaliar o desempenho da blindagem de subestações frente a descargas atmosféricas, incorporando uma análise estatística das variáveis envolvidas.

Nesta ferramenta computacional os elementos da subestação são simulados de maneira tridimensional (barramentos, equipamentos, hastes, estruturas, etc.), as descargas atmosféricas que caem na subestação e em

(\*) Rua Delmiro Gouveia, N° 333, Ed. André Falcão - DEPS - Bloco D - Sala 218 - Bongü - Recife - CEP: 50761-901 - PE - BRASIL - Tel.: (081) 3229.3042 - Fax: (081)3229.3269 - e-mail: fabionf@chesf.gov.br

sua vizinhança são modeladas através da utilização do modelo eletrogeométrico e a técnica de Monte Carlo é utilizada para simular as variáveis que têm comportamento estatístico.

Através desta modelagem são realizadas simulações da incidência de várias descargas, com seus parâmetros aleatoriamente escolhidos. As características climáticas da região em que a subestação está localizada são consideradas. O resultado desejado é a observação do destino de cada descarga por meio do modelo eletrogeométrico. Este procedimento é repetido um número de vezes suficiente, com o objetivo de obter-se uma análise estatística da vulnerabilidade da subestação frente a descargas atmosféricas, fornecendo assim áreas críticas para possíveis redimensionamentos. Novas configurações geradas serão simuladas até a obtenção de uma configuração otimizada.

## 2.0 - MODELAGEM EMPREGADA

O programa computacional BindaSE foi desenvolvido utilizando o modelo Eletrogeométrico para avaliar a blindagem e a técnica de Monte Carlo para simular o comportamento estatístico das variáveis de interesse. A seguir apresentaremos os modelos empregados.

### 2.1 Modelo Eletrogeométrico

Quando o canal principal da descarga se aproxima do solo ou de objetos ligados ao mesmo, há uma tendência de formar-se um último canal que dá origem a descarga final. Tal fato ocorre se a distância entre a ponta do canal e o solo, ou a um objeto ligado ao solo for inferior a uma distância denominada distância de incidência.

Como uma definição podemos dizer que formal distância de incidência, é a distância compreendida entre a ponta do canal da descarga e o objeto mais próximo, desde que haja um campo eletrostático crítico provocado pela magnitude da carga existente no canal. Na análise tridimensional, conforme referências (4), (5) e (6), o termo distância de incidência dá lugar a outro: raio da esfera de incidência, conservando as mesmas características.

O modelo eletrogeométrico utilizado para avaliar o desempenho da blindagem da subestação apresenta as seguintes premissas:

- a) A distância de incidência para os componentes do sistema está diretamente relacionada com a magnitude da corrente de descarga:

$$R_{SC} = K_{SC} \times K_I \times I^b \quad (1)$$

onde:

- $K_I$  e  $b$  dependem da forma do relacionamento entre a distância de incidência e a corrente de descarga;
- $K_{SC}$  é uma constante que depende do tipo de componente assumido pelo ponto fonte da descarga;

- b) A distribuição de frequência da magnitude da corrente de descarga é conhecida;

- c) A distribuição estatística do ângulo de incidência da descarga em qualquer plano vertical é conhecida:

$$g(\theta) = \begin{cases} 0, & \psi < -\frac{\pi}{2} \\ K_m \times \cos^m \psi, & -\frac{\pi}{2} < \psi < \frac{\pi}{2} \\ 0, & \psi > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

onde:

- $K_m$  e  $m$  são constantes e  $\psi$  é o ângulo de aproximação medido a partir da vertical.

- d) O ponto terminal de uma descarga não é influenciado por qualquer componente do sistema, até que o mesmo se encontre dentro de uma superfície de atração, ou seja, a probabilidade de um ponto do interior de uma subestação ser atingido por uma descarga é a mesma em todas as direções;

- e) A subestação é admitida como localizada no centro de um terreno horizontal, de 2,25 km<sup>2</sup>, sendo que a altura dos elementos da mesma é tomada como a real.

## 2.2 Técnica de Monte Carlo

Os parâmetros requeridos para cada descarga incidente são selecionados de forma aleatória, através de distribuições probabilísticas apropriadas, utilizando a técnica de Monte Carlo. Na simulação do desempenho dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas de subestações os parâmetros que se seguem, são requeridos para o equacionamento de cada descarga incidente e são selecionados aleatoriamente através de suas distribuições, conforme referência (1):

- Magnitude da corrente de descarga;
- Projeção do ângulo de incidência da descarga no plano vertical e no plano horizontal;
- Ponto teórico de terminação da descarga, independente dos componentes do sistema modelado.

## 2.3 Freqüência de Distribuição da Intensidade de Corrente de Descarga

A corrente de descarga ao ser estudada de forma estatística é representada por uma distribuição estatística acumulada, no caso, utilizando-se estudos anteriores, de acordo com as referências (1) e (3), foram adotadas as curvas de distribuição estatísticas de Popolanski, do CIGRE e da CEMIG conforme mostrado na figura a seguir.

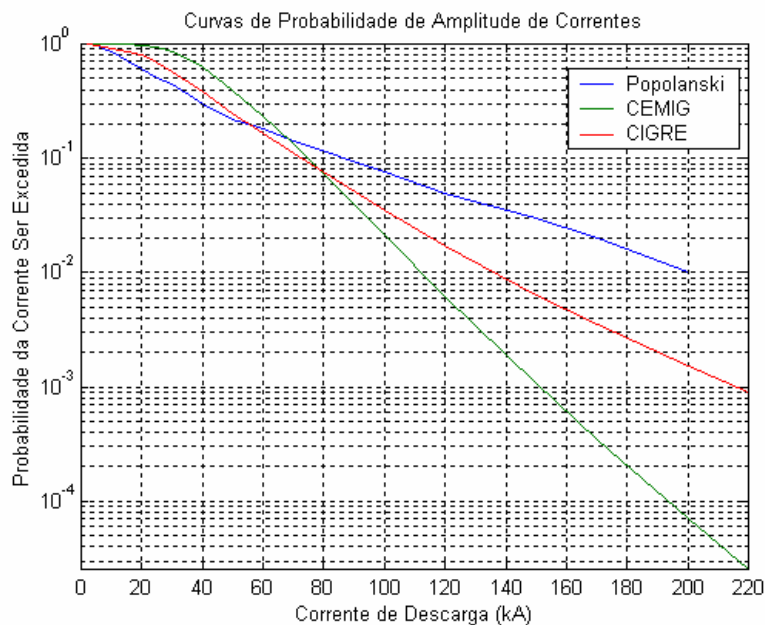


FIGURA 1 – Curva de Probabilidade de Amplitude de Correntes

## 3.0 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA

O programa computacional BlindaSE foi desenvolvido em Borland Delphi 5.0, para a plataforma Windows 32 bits e apresenta uma interface amigável e de fácil utilização possibilitando a rápida simulação de várias configurações diferentes para a blindagem da subestação.

O programa computacional BlindaSE calcula os índices de falha da blindagem e a partir da análise destes índices de falha da blindagem são efetuados ajustes na configuração da proteção, de forma a obter uma blindagem adequada para garantir os níveis de proteção requeridos.

### 3.1 Fluxograma do Programa

O fluxograma para determinação do desempenho da subestação utilizado no BlindaSE esta mostrado na Figura 2.

### 3.2 Interface Gráfica do Programa

A Figura 3 mostra a tela de configuração dos parâmetros de simulação utilizada pelo programa BlindaSE, onde o usuário deverá informar os dados estatísticos para a simulação das descargas atmosféricas e do desempenho da configuração proposta.

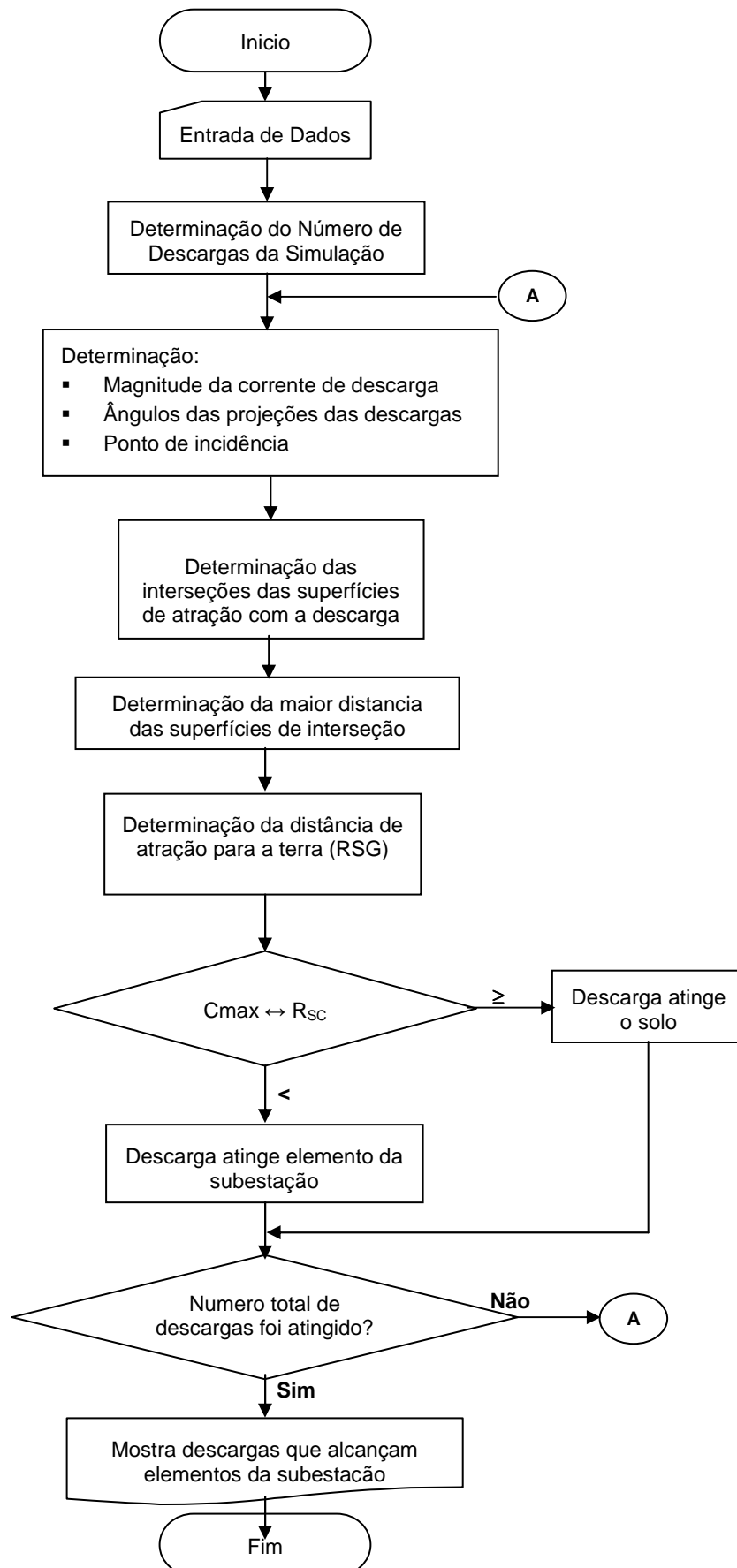


FIGURA 2 – Fluxograma do Programa

A Figura 4 mostra a tela de configuração da geometria da subestação a ser simulada pelo programa BlindaSE, onde o usuário deverá informar os dados dos barramentos, equipamentos, proteções e edificações.

A Figura 5 mostra a tela de resultados da simulação onde são apresentados os índices de falha da proteção e os elementos atingidos pelas descargas. A Figura 6 mostra o layout da subestação simulada indicando os pontos atingidos com respectivos números de descargas que os atingiram.

FIGURA 3 – Tela de Configuração dos Parâmetros

Y1	Y2	Y3	Y4
55.0	66.0	77.0	88.0

Nome	X Inicial	Y Inicial	Z Inicial	X Final	Y Final	Z Final
CABO PR	86.0	55.0	15.0	116.1	56.988	11.7
CABO PR	86.0	66.0	15.0	116.1	65.988	11.7
CABO PR	86.0	77.0	15.0	116.1	78.988	11.7
CABO PR	86.0	88.0	15.0	116.1	87.988	11.7
CABO PR	38.5	28.0	15.0	38.5	50.0	15.0
CABO PR	110.1	28.0	15.0	110.1	50.0	15.0

FIGURA 4 – Tela de Configuração da Geometria da Subestação

A tela de visualização dos elementos atingidos, mostrada na Figura 6, apresenta uma codificação de cores que representa os elementos conforme descrito na legenda abaixo:

- **Azul:** cabos do sistema de proteção;
- **Preto:** Hastes do sistema de proteção;
- **Verde:** Elementos da subestação (barramentos, equipamentos, edificações, etc..)
- **Vermelho:** Elementos da subestação que foram atingidos pelas descargas durante a simulação.

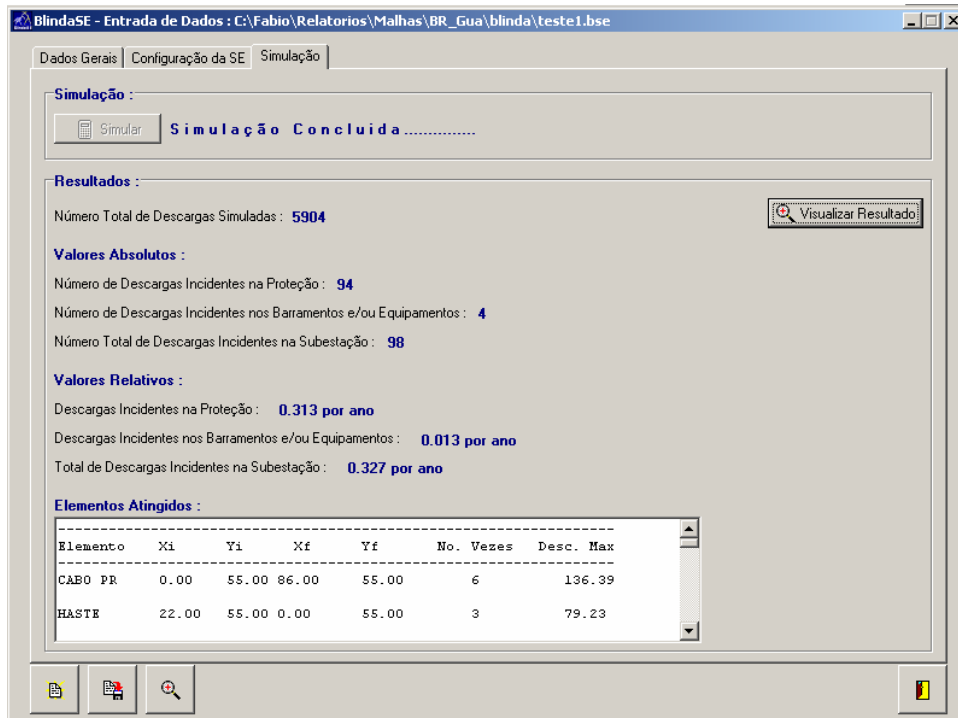


FIGURA 5 – Tela de Resultados

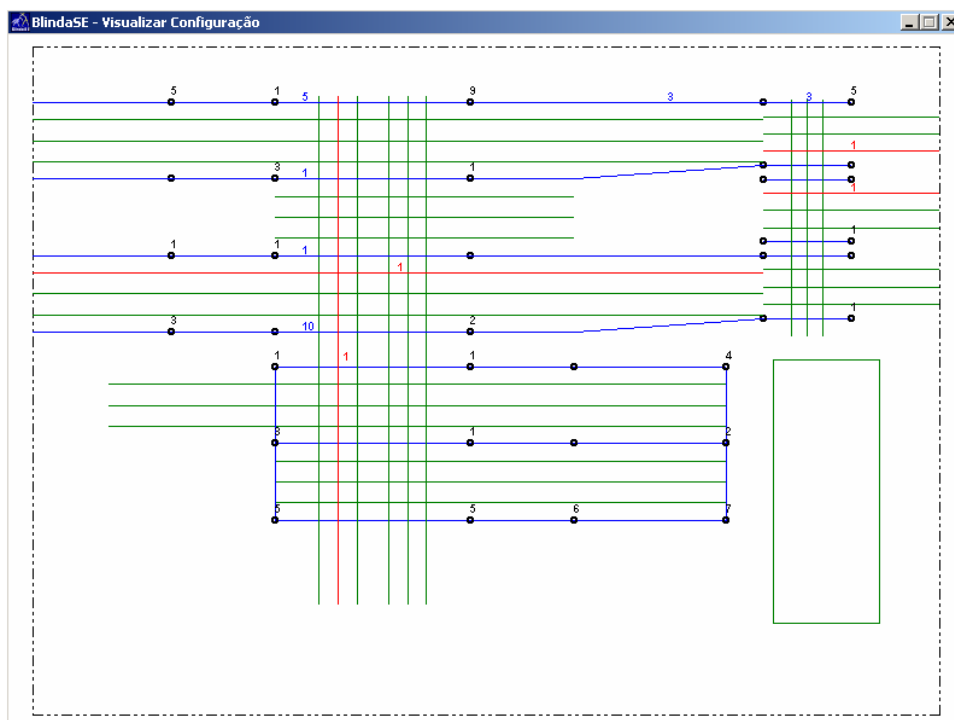


FIGURA 6 – Tela de Visualização dos Elementos Atingidos

### 3.3 Validação da Ferramenta Computacional

Utilizando a modelagem descrita em 2 e o fluxograma apresentado na Figura 2, procurou-se avaliar o programa desenvolvido, utilizando-se o modelo da subestação Ontario-Hydro 500 kV, cujo arranjo e resultados foram apresentados na referencia [1] obtendo-se os resultados apresentados na tabela a seguir:

TABELA 1 - Comparação dos Resultados

Tipo do Sistema de Proteção	Descargas / Ano		Total
	Na Proteção	No Barramento	
<b>Cabos Guardas</b>	0.140	0.000	0.140 (1)
	0.135	0.005	0.140 (2)
<b>Mastros</b>	0.145	0.025	0.170 (1)
	0.155	0.015	0.170 (2)

(1) Resultados do BlindaSE

(2) Resultados da Referência [1]

## 4.0 - ESTUDO DE CASO

Foi realizado um estudo de caso com uma subestação 230 kV onde Inicialmente foi simulada a configuração do sistema de blindagem de acordo com a apresentada no projeto básico, conforme mostrada na Figura 6. Os elementos em azul representam os cabos guardas, enquanto os elementos em preto representam as hastes e os elementos em verde representam os componentes a serem protegidos. De acordo com a referência (7) o tempo de exposição utilizado na simulação será de 300 anos e não deverá ocorrer mais de uma descarga neste período.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos nas simulações envolvendo três curvas de distribuição da intensidade de corrente de descarga onde podemos ver que ocorreram descargas acima do limite estabelecido conforme referência (7)

TABELA 2 - Desempenho da configuração do projeto básico

Distribuição Estatística <sup>(1)</sup>	Nº de Descargas na Blindagem	Nº de Descargas nos elementos protegidos	Nº de Descargas Totais
Popolanski	<b>94</b> (0,313/ano)	4 (0,013/ano)	<b>98</b> (0,327/ano)
CIGRE	<b>91</b> (0,303/ano)	4 (0,013/ano)	<b>95</b> (0,317/ano)
CEMIG	<b>105</b> (0,35/ano)	2 (0,007/ano)	<b>107</b> (0,357/ano)

(1) Foram geradas 5904 descargas atmosféricas durante a simulação de 300 anos de operação.

Foram realizadas modificações no arranjo do projeto básico conforme mostrado na Figura 7 e nova simulação foi realizada e os resultados apresentados na Tabela 3.

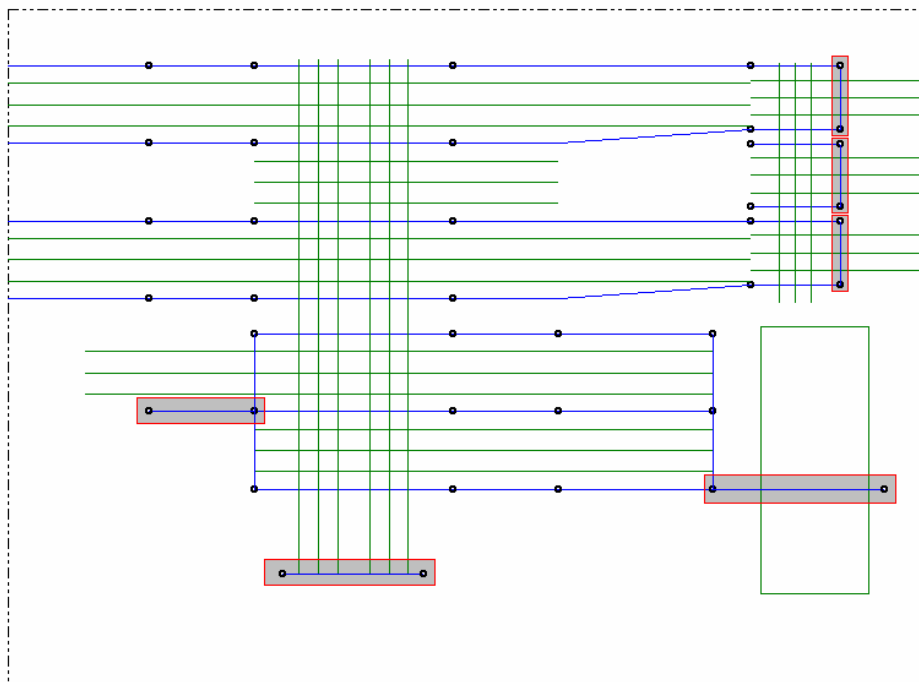


FIGURA 7 – Nova Configuração Proposta

TABELA 3 - Desempenho da Configuração Proposta

Distribuição Estatística <sup>(1)</sup>	Nº de Descargas na Blindagem	Nº de Descargas nos elementos protegidos	Nº de Descargas Totais
Popolanski	<b>108</b> (0,360/ano)	<b>0</b> (0,0/ano)	<b>108</b> (0,360/ano)
CIGRE	<b>106</b> (0,353/ano)	<b>1</b> (0,003/ano)	<b>107</b> (0,356/ano)
CEMIG	<b>118</b> (0,393/ano)	<b>0</b> (0,0/ano)	<b>118</b> (0,393/ano)

(1) Foram geradas 5904 descargas atmosféricas durante a simulação de 300 anos de operação.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos nas simulações envolvendo três curvas de distribuição da intensidade de corrente de descarga, para a nova configuração proposta, onde podemos ver que os limites estabelecidos, conforme referência (7), são atendidos.

## 5.0 - CONCLUSÃO

- Os resultados apresentados na Tabela 1 do item 3.3 mostram que a ferramenta desenvolvida apresentou resultados consistentes;
- A metodologia empregada para desenvolvimento deste programa representa uma evolução com relação a anteriormente empregada pela CHESF, sobretudo pelo seu caráter estatístico, que permite quantificar pontos mais prováveis de queda;
- A ferramenta computacional desenvolvida, por apresentar uma interface amigável e de fácil utilização, possibilita a rápida simulação de várias configurações diferentes para a blindagem da subestação facilitando o trabalho de otimização da configuração a ser adotada.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Sargent, Michel A., "Monte Carlo simulation of the lightning performance of overhead shielding networks of high voltage station", IEEE Trans. Vol. PAS-91, No 4, July/Aug. 1977;
- Anderson, I.G., "Monte Carlo computer calculation of transmission line lightning performance", AIEE Trans. Vol. 80, Aug. 1961;
- Schroeder, Marcos Aurélio, "Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: Aplicação as medições da estação do morro do cachimbo", UFMG, Tese de Doutorado - Março/2001;
- H. Linck, "Shielding of modern substations against direct lightning strokes", IEEE Trans., vol. PAS-94, No. 5, September/October 1975, pp 1674/1679;
- A. M Mousa, "Shielding of high-voltage and extra-high-voltage substations", IEEE Trans., vol. PAS-95, no. 4, July/August 1976, pp. 1303/1310;
- C.F. Wagner, G.D. McCann, C.M. Lear, "Shielding of substations", IEEE Trans. Vol. 61, February 1942, pp. 96/100;
- A, Varejão de Godoy, "Desempenho de subestações frente a descargas atmosféricas, padronização da blindagem", X SNTPEE.