



XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

Análise do Sistema de Aterramento de Estruturas Metálicas com aplicação de Algoritmos Genéticos

Ricardo Nunes Wazen
COPEL
ricardo.wazen@copel.com

Palavras-chave

Algoritmos Genéticos

Aterramento

Estrutura Metálica

Linhas de Transmissão

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo a aplicação de Algoritmos Genéticos para a determinação de valores de resistência dos cabos de aterramento de uma estrutura metálica autoportante. Para o estudo a função objetivo foi determinada pelo circuito equivalente do sistema de aterramento e definido os tipos de estrutura e cabos mais frequentes nas Linhas de Transmissão 138kV da COPEL (Companhia Paranaense de Energia). O principal resultado apresentado está relacionado a possibilidade de aplicação de diferentes comprimentos de cabo contra-peso nas pernas de uma mesma estrutura, com a mesma eficiência do uso convencional de comprimentos iguais.

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica são compostos em grande parte por equipamentos aéreos e requerem grande confiabilidade quanto sua operação, devido a probabilidade de desligamentos originados por falhas de componentes, acidentes involuntários ou mesmo causados por fatores climáticos. Visando manter a integridade dos componentes são utilizados sistemas de aterramento para dissipar correntes parasitas ou sobrecorrentes que incidam sobre transformadores, disjuntores, cabos condutores ou estruturas metálicas.

As Linhas de Transmissão são projetadas de forma que possam interligar fontes de energia à maior quantidade possível de centros consumidores de carga. De acordo com a distância entre os centros, as Linhas passam por regiões de grande diversidade quanto a densidade demográfica, relevo, vegetação e tipos de solo. Considerando os fatores citados e a necessidade de proteção dos cabos condutores, o sistema de proteção mais difundido é constituído de cabos interligados estrutura a estrutura e conectados ao solo em cada uma das torres.

Em estruturas metálicas, o sistema de proteção contra descargas elétricas é composto por cabos e conectores de material metálico. Estes materiais têm como finalidade escoar para o solo toda corrente

incidida sobre a estrutura, sem afetar o transporte de energia realizada pelos cabos condutores sustentados.

A principal ligação entre a torre e o solo se dá pelo sistema de aterramento. Este trabalho apresenta um estudo sobre uma forma de determinar o sistema de aterramento de uma torre de transmissão considerando: uma descarga atmosférica incidida sobre o topo, a divisão da corrente nas primeiras torres adjacentes, a resistência elétrica dos metais componentes das torres e a resistência do solo em seu valor limite.

A aplicação da técnica de algoritmos genéticos visa determinar os melhores valores de aterramento a serem utilizados nos quatro pés da torre. O modelo equivalente para simulação do algoritmo é determinado a partir das conexões elétricas existentes entre os componentes de uma Linha de Transmissão.

2. ESTRUTURAS METÁLICAS

2.1. Função na Linha de Transmissão

Linhas de Transmissão são circuitos que fazem a interligação entre Subestações, Usinas ou Distribuidores de Energia. Estes circuitos são compostos por cabos metálicos sustentados por torres (estruturas metálicas) ou postes. Sua função principal é o transporte de grandes volumes de energia elétrica com a menor perda possível. Sua composição é determinada pela capacidade de energia a ser transportada, pela região onde serão construídas as Linhas e pela importância dos pontos que serão interligados.

A transmissão elétrica em alta tensão pode ocorrer em corrente contínua ou corrente alternada. Hoje, existe apenas uma LT em corrente contínua operando em todo território nacional. Portanto, o sistema mais utilizado é em corrente alternada, padronizada com frequência de 60Hz. Estas composições realizam a interligação de energia entre diversos centros consumidores, bem como alimentam grandes instalações industriais.

O uso de nível de tensão predeterminada faz-se necessária devido à padronização de equipamentos (como seccionadoras, disjuntores e transformadores). Assim, o nível da Linha se refere ao valor da tensão entre fases, enquanto os equipamentos são classificados entre o referencial de terra e a fase.

O nível de tensão interfere diretamente na distância de segurança para trabalhos próximo aos condutores e diferentes distâncias são definidas entre os cabos condutores e entre um condutor e o potencial de terra. Por segurança, os condutores devem estar distantes de pessoas e objetos estranhos, para não ocorrerem descargas involuntárias. Por estas razões, surgiu a necessidade de uso de estruturas autoportantes, para garantirem que os campos eletromagnéticos induzidos pelos cabos condutores fiquem distantes o suficiente para não gerarem descargas.

2.2. Identificação de tipos e formas de Torres

As dimensões e formas das estruturas dependem da disposição dos cabos condutores, da distância entre os condutores, das dimensões e forma do isolamento, das flechas projetadas para os condutores, da altura mínima de segurança, além do número de circuitos envolvidos.

A função de uma estrutura numa Linha de Transmissão está associada aos esforços pelos quais cada estrutura deverá ser submetida. Estes esforços podem possuir componentes verticais (associados ao peso dos cabos, das cadeias de isoladores e ferragens), componentes horizontais transversais (tração e vento sobre os cabos e equipamentos) e cargas horizontais longitudinais (todos esforços no sentido da Linha).

Para a melhor sustentação dos cabos condutores, foram estudadas formas de transmissão de energia por estruturas de diversos materiais e formatos. Os formatos são definidos com base na disposição dos condutores, sejam no sentido vertical, horizontal ou triangular. Dentre os tipos mais difundidos de estruturas existem as compostas por concreto ou metal.

As torres metálicas geralmente são fabricadas com aço-carbono, normal ou de alta resistência mecânica, de geometria perfilada ou tubular. A divisão do corpo em peças permite a montagem e o transporte. A galvanização das peças garante a vida útil acima dos 25 anos, mantendo baixos índices de corrosão. Para a definição da composição da estrutura, deve-se considerar a dimensão da estrutura aérea, quer dizer, das partes expostas aos esforços aéreos. Neste estudo não será contemplado o tipo de fundação aplicado na estrutura, já que este varia de acordo com o tipo de solo.

2.3. Tipo de Estrutura a ser analisado

Apesar da grande variedade de estruturas metálicas existentes e aplicadas em Linhas de Transmissão 138kV, o estudo será realizado com a torre tipo S1-138kV. Este tipo é o de maior incidência nas Linhas da COPEL, além do fato de possuir características consideradas intermediárias (forma e quantidade de material aplicado) em comparação com outros tipos de torres.

Além da grande variedade de projetos – considerando uma diversidade de relevos, construções e vegetações - as estruturas também variam quanto a suas alturas. Com isto, dentre todas estruturas em operação, pode-se identificar que possuem altura média de 25,40 metros. O valor total da altura é definido pela medição da base da estrutura até seu ponto mais alto (ponto este em contato direto com cabos pára-raios).

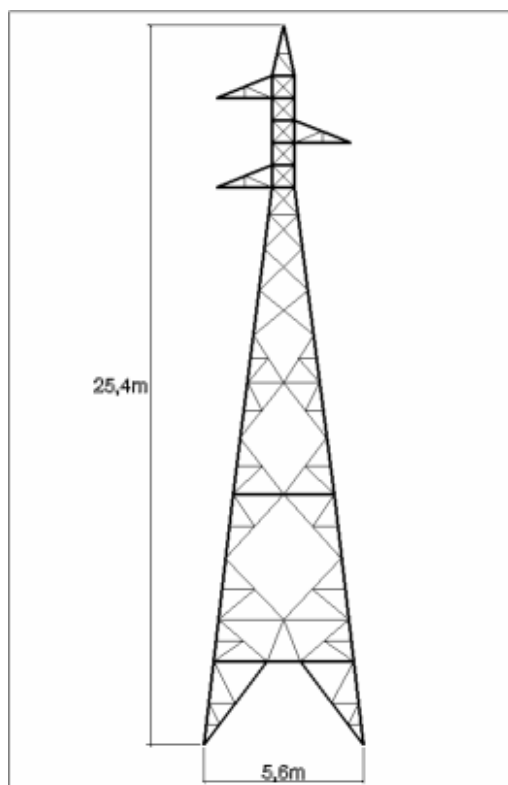


Figura 1 - Representação da torre tipo S1 e suas dimensões

2.4. Cabo Pára-raios

Os cabos são diferenciados pelas diversas funções que possuem numa Linha de Transmissão, onde podem ser condutores de energia, protetores contra surtos atmosféricos e sobrecorrentes ou

dissipadores de energia em pontos aterradas. Geralmente os materiais dos cabos utilizados são de alumínio, cobre e aço galvanizado.

Os cabos pára-raios tem a principal função de escoar correntes que possam surgir no corpo da estrutura, seja causado por uma descarga franca na torre ou mesmo por descarga causada pela disrupção das cadeias de isoladores. As cadeias de isoladores possuem uma capacidade de isolamento limitada e quando ocorre um aumento de energia nos condutores, a cadeia chega a sua saturação e a energia excedente é dissipada para a torre.

Nas Linhas de transmissão o pára-raios é utilizado ao longo de toda a linha, lançado acima dos cabos condutores, mantendo uma distância mínima para não causar um curto-circuito e acarretar na interrupção do transporte de energia. Os tipos mais encontrados são feitos de cordoalhas de aço ou cabos de alumínio com alma de aço. O primeiro tipo é o que será considerado neste caso, devido a grande aplicação em Linhas com estruturas metálicas, já que o próprio corpo da estrutura é um meio condutor, facilitando o escoamento da energia circulante no pára-raios. Além disto a cordoalha é o material que possui a menor capacidade de escoamento quando comparada com os cabos de alumínio com alma de aço.

2.5. Sistemas de Aterramento em Torres Metálicas

O sistema de aterramento tem a finalidade de escoar correntes, flutuantes na torre, para o solo. Ou seja é um meio para facilitar a dissipação de energia excedente. Este é composto por cabos metálicos instalados sob a superfície do solo, fixados nos pés das estruturas.

O arranjo dos cabos de aterramento é feito utilizando cordoalhas de aço ou composições de alumínio. A disposição dos cabos varia de acordo com as características do solo e do relevo. Após a utilização de vários arranjos, os formatos apresentados na Figura 2 são os mais difundidos.

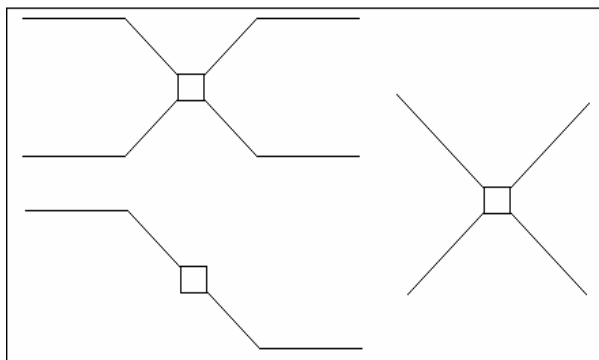


Figura 2 - Tipos de aterramento mais utilizados em estruturas metálicas autoportantes.

3. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

As descargas atmosféricas são causadoras de diversos desligamentos em Linhas de Transmissão. Uma descarga gera uma injeção de energia que somada à energia transportada, torna-se superior aos limites suportados pelos componentes da Linha. Este grande volume de energia causa a exposição de equipamentos a esforços durante o surto e conduz grande volume energia para a terra.

As Linhas são projetadas para suportar valores equivalentes a potência de curto-circuito ocorrido no barramento de uma das subestações onde está conectada. Muitas vezes a energia injetada por uma descarga é superior ao limite projetado, incorrendo no desligamento da Linha, pelo acionamento do relé de distância, instalados nas subestações nas extremidades da Linha.

Uma descarga atmosférica pode ocorrer diretamente sobre a torre ou no meio do vão, incidindo sobre o cabo pára-raios. Os históricos indicam que a proporção de raios sobre os cabos torna-se equivalente

à descargas em estruturas, quando o relevo onde a LT está implantada é praticamente regular. Nas situações de relevos planos, a relação aproximada é de 60% para descargas nos cabos e de 40% no topo da estrutura. Isto ocorre porque a torre normalmente está instalada em pontos mais altos que os cabos, atraindo as cargas elétricas contidas nas nuvens para si.

Com a descarga no topo da torre, a corrente elétrica se divide em três frentes: entre o corpo da estrutura, no pára-raios com sentido da torre à sua esquerda e no pára-raios com sentido da torre à direita. Já que cada uma das estruturas possui um sistema de aterramento auxiliando na dissipação destas correntes ao solo.

Um grande volume de energia normalmente é escoado pela estrutura que sofreu a descarga e pela primeira torre adjacente de cada lado, onde apesar das torres seguintes ainda possuem correntes circulantes, seus níveis normalmente já estão dentro do suportável pela isolação das cadeias de isoladores. A Figura 3 apresenta a incidência do raio sobre a estrutura e sua divisão, sendo escoada principalmente pelo sistema de aterramento da torre central.

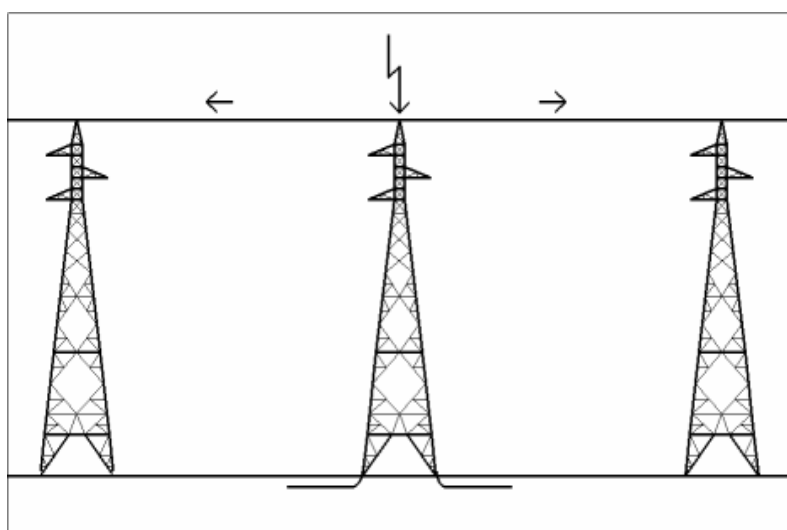


Figura 3 - Representação da descarga incidida sobre uma Linha de Transmissão.

3.1. Circuito Equivalente do Sistema

Cada um dos itens envolvidos numa descarga atmosférica pode ser representado através de uma modelagem compreendendo os valores de impedância relacionados aos componentes e representando a descarga através de um surto de tensão ou corrente. A figura 4 representa o comportamento da sobretensão que ocorre sobre o sistema.

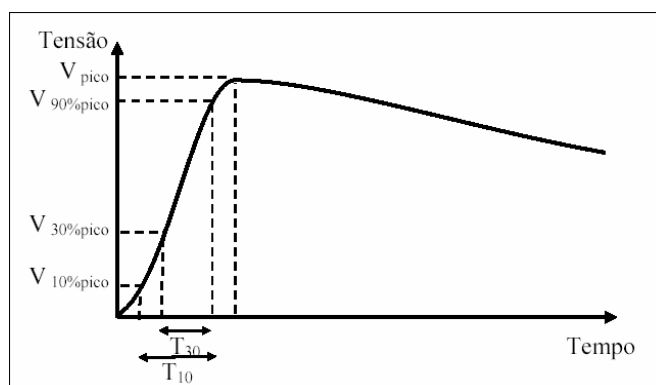


Figura 4 - Representação do gráfico de sobretensão gerada por uma descarga atmosférica.

A capacidade de condução, dos materiais metálicos, varia de acordo com os níveis de tensão aplicados. Sofrendo a interferência: dos diferentes níveis de tensão dos equipamentos em operação normal (sem tensão ou corrente circulante), no momento de incidência de um surto, com a presença de altos valores de corrente ou com a presença de altos valores de tensão.

O comportamento da descarga sobre o sistema depende das conexões que existem entre os componentes, sejam eles com grande ou pequena capacidade de condução de energia. A partir da incidência, a corrente tende a descarregar com maior intensidade sobre os equipamentos de grande capacidade condutiva, por isso a contribuição torna-se maior sobre a própria torre, que neste estudo será chamada de Torre A. Como citado anteriormente, as torres adjacentes também serão consideradas no sistema e descritas como Torres B e C.

Um dos principais fatores que interferem no bom funcionamento do aterramento é a resistividade do solo, esta varia de acordo com a própria composição do solo. A resistência do solo pode ser determinada por seu valor de resistividade considerando a base da estrutura, área compreendida entre os pés da torre a ser avaliada.

Conforme NBR 5419, pode-se adotar como limite para que descargas possam fluir e serem neutralizadas no solo o valor de 20 ohms. Este valor foi determinado com base em estudos de injeção de corrente e o comportamento das correntes na região de interferência do local aplicado

4. ALGORITMOS GENÉTICOS

O algoritmo genético é uma técnica de otimização de resultados baseada na representação de indivíduos pela formação de códigos específicos para cada possibilidade populacional. Cada indivíduo possui seu próprio código, avaliando quais destes melhor se enquadram em determinadas funções. Os problemas de otimização são baseados em três pontos principais: a codificação do problema, a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar e o espaço de soluções associado.

Os algoritmos genéticos são uma família de modelos computacionais inspirados na evolução, que incorporam uma solução potencial para um problema específico numa estrutura semelhante a de um cromossomo e aplicam operadores de seleção e "cross-over" a essas estruturas de forma a preservar informações críticas relativas à solução do problema. Uma das vantagens de um algoritmo genético é a simplificação que eles permitem na formulação e solução de problemas de otimização.

Uma implementação de um algoritmo genético começa com uma população aleatória. As estruturas são avaliadas e associadas a uma variação de tal forma que as maiores probabilidades de variação são associadas aos códigos que representam uma melhor solução para o problema de otimização. A aptidão da solução é definida com relação à população corrente.

A função objetivo de um problema de otimização é construída a partir dos parâmetros envolvidos no problema. Ela fornece uma medida da proximidade da solução em relação a um conjunto de parâmetros. O objetivo é encontrar o ponto ótimo. A função objetivo permite o cálculo da aptidão bruta de cada indivíduo.

Neste modelo a função objetivo é determinada pela relação das equações elétricas dos componentes, conforme circuito apresentado na Figura 5.

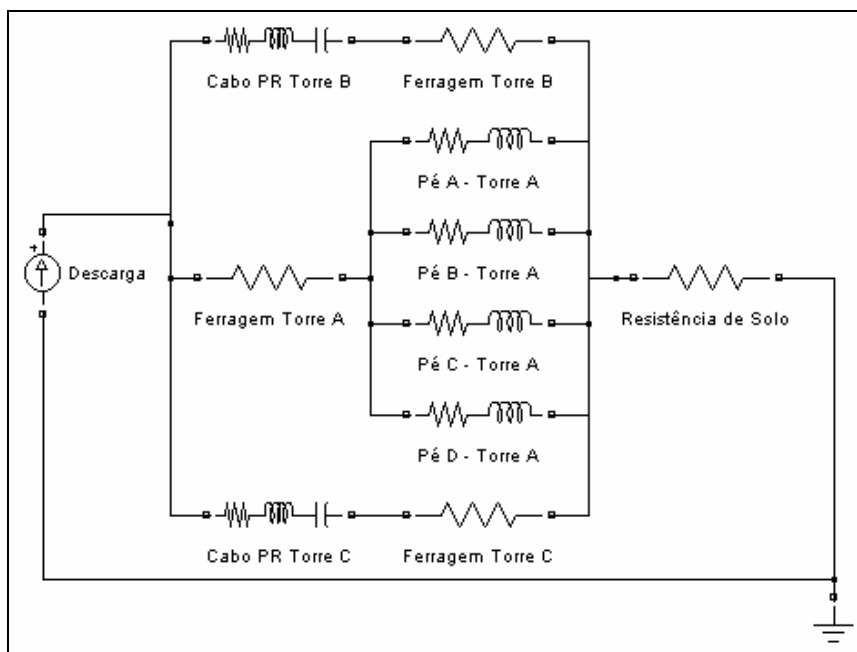


Figura 5 - Circuito equivalente do sistema para dissipação de uma descarga.

4.1. Análise do circuito utilizando Matlab

Para aplicação do modelo é necessário definir as funções que regem o sistema, considerando as relações entre as variáveis e a interferência nas impedâncias decorrentes dos cabos, das estruturas e do solo.

A curva da Figura 4 nos dá o comportamento da tensão durante uma descarga e para a referida simulação será considerada a incidência de uma corrente com valor de pico de 50kA e com duração de 40ms. Para efeito da análise, a situação crítica no sistema de aterramento ocorre neste intervalo, onde as capacidades de condução podem ser expostas ao seu limite de condutividade.

As estruturas metálicas possuem características construtivas que causam alterações nos valores de resistência metálica, seja pelo formato da torre ou mesmo pelo uso de matérias de diferentes composições. As Linhas de Transmissão da COPEL, em sua maioria, são compostas por estruturas metálicas de formato piramidal e treliçadas utilizando ferragens iguais e unidas por parafusos, porcas e arruelas de forma que o contato entre as treliças seja direto. Por isso a estrutura é considerada com o corpo de apenas um material metálico, o aço galvanizado.

Conforme os dados de tipo da estrutura, os valores da impedância das ferragens podem ser calculados a partir da equação para torres piramidais:

$$Z_T = 30 \cdot \ln \left[\frac{2(h_f^2 + r^2)}{r^2} \right] \quad (1)$$

Onde “ht” é o valor total da estrutura e “r” é o valor da distância entre os pés.

Conforme a Imagem 1, podemos considerar que $h_t = 25,4\text{m}$ e que $r = 5,6\text{m}$. Para esta situação é possível considerar que as torres A, B e C são de mesmo tipo e com mesma altura, para definição dos valores de resistência de suas ferragens.

A determinação dos valores referentes aos cabos pára-raios depende do material componente dos mesmos. No caso da cordoalha de aço, esta possui valor de 4,305 ohms/quilômetro. Com isto o valor da resistência é encontrado proporcionalmente, dependendo do tamanho dos vãos entre as torres A-B e A-C. Considerando um vão médio entre as estruturas de 500m e definindo que a distância A-B e A-C são as mesmas podemos encontrar os valores de impedância relacionadas aos cabos pára-raios.

A análise do relacionamento entre as resistências ocorre considerando o fato de estarem em série ou paralelo, conforme as equações:

$$\text{Circuito Série: } Z_T = Z_A + Z_B \quad (2)$$

$$\text{Circuito Paralelo: } Z_T = \frac{Z_A + Z_B}{Z_A * Z_B} \quad (3)$$

Onde Z_T é resultado entre as relações entre as impedâncias Z_A e Z_B .

4.2. Resultados obtidos pela aplicação do sistema no MATLAB

A partir das funções e do circuito apresentados, é possível realizar simulações utilizando o software MATLAB. Para tanto, foram considerados os quatro pés da estrutura como informação a ser otimizada. Os valores encontrados são as impedâncias relacionadas ao contato da estrutura com o solo e os resultados foram apresentados nas figuras 6 e 7.

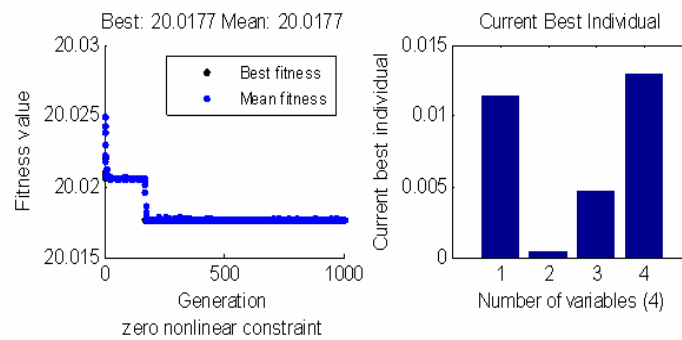


Figura 6 - Resultados da Modelagem do Algoritmo Genético – Simulação 1

Os valores associados à simulação 1 são de: 0,0114 ohms para o aterramento do Pé A; 0,0003 ohms para o Pé B; 0,0048 ohms para o Pé C e; 0,0130 ohms para o Pé D.

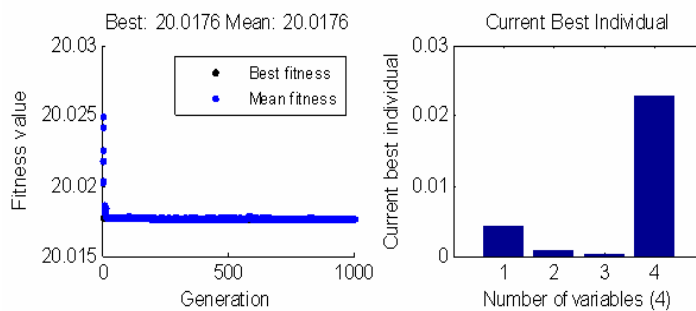


Figura 7 - Resultados da Modelagem do Algoritmo Genético – Simulação 2.

Os valores associados à simulação 2 são de: 0,0042 ohms para o aterramento o Pé A; 0,0008 ohms para o Pé B; 0,0004 ohms para o Pé C e; 0,0230 ohms para o Pé D.

A variação entre os resultados ocorre devido ao resultado entre a associação em paralelo dos pés, ser fixo. E com este resultado, é possível provar que existem inúmeras possibilidades de combinação em os quatro pés, acarretando em diferentes soluções para o problema. Porém realizando o cálculo de impedância equivalente entre os 4 pés, sempre deve-se ter o valor de 1,065e-3 ohms como valor de resultante da torre.

5. CONCLUSÃO

Pelas simulações realizadas é possível verificar que não existe um valor específico para cada um dos pés no sistema de aterramento. Contudo, a adoção do melhor valor deverá levar em conta fatores externos que possam influenciar no sistema, tais como a inclusão de cabos em solos mistos ou mesmo a utilização de materiais diferentes entre os pés.

Os projetos de Linhas definem os comprimentos das pernas como valores fixos e de mesmo material, com a tendência de que cada perna forneça uma contribuição igual para o sistema, dependendo tanto da resistividade elétrica do material quanto do contato com o solo.

Como a finalidade principal do sistema de aterramento é melhorar o escoamento de correntes para o solo, quanto maior seu comprimento, maior sua área de contato com o solo, com maior dissipação ao longo do cabo enterrado. Assim, o tipo de material a ser utilizado no sistema poderá ser determinado pela comparação entre o uso de um cabo (ou cordoalha) com dado comprimento e outro cabo com resistência inferior, necessitando aplicar uma menor quantidade de material.

Além disto, os resultados apresentados nos mostram que não há necessidade das pernas serem de mesmo tamanho, desde que o valor da impedância equivalente entre as pernas não sofra aumento em seu valor. Com isto pode-se identificar que é possível em situações críticas de solo ou áreas com limitação para lançamento de cabos enterrados, utilizar pernas com comprimentos maiores ou mesmo deixar de utilizar uma das pernas.

A análise realizada também sugere que existe a possibilidade de apenas uma ou duas pernas serem suficientes para escoar a energia, desde que o valor da resistência seja inferior ao valor equivalente determinado. Quanto a esta situação, devemos levar em consideração que apesar da resistência ser pequena o suficiente para facilitar o escoamento, a área de contato entre o cabo e o solo pode ser muito pequena, dificultando a dissipação da energia.

Com as informações acima, também pode-se verificar que a perda de uma das pernas durante a operação da Linha, seja causada por desconexão da estrutura ou mesmo arrancada por maquinário agrícola, pode não acarretar em prejuízo para o sistema como um todo, desde que os valores associados às outras pernas possuam comprimentos e valores em que o valor equivalente tenha pequena alteração.

Para efeito de análise do comportamento de sistemas de aterramento, o modelo utilizado pode ser utilizado para simular alterações em resistência de solo ou mesmo nas ferragens da estrutura, partindo dos valores encontrados para o sistema de aterramento. Somado a isto, o uso deste modelo permitirá avaliar o comportamento de cada uma das partes e quanto cada um contribui para o perfeito funcionamento do sistema como um todo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PINHEIRO, Fernando Henrique C. Estudo Teórico e Computacional do Desempenho de Linhas de Transmissão de Alta-tensão na presença de Descargas Atmosféricas. UFMA, São Luis, 2008, p. 57–80.

GODOY, Antonio V. Sobretensões em Cadeia de Isoladores frente a Descargas Atmosféricas: Um estudo comparativo dos métodos de Cálculo do Parâmetro Z_t . Unicamp, 1989, p. 53–72.

LABEGALINI, Paulo Roberto; FUCHS, Rubens Dario; ALMEIDA, Márcio Tadeu. Projetos mecânicos das linhas de transmissão. Ed. Edgard Blücher, 1992.

ABNT NBR 5419. Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

ZANETTA Junior, Luis Cera. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2003, p. 720.