

Análise Comparativa de Modelos do Fenômeno da Ionização do Solo nos Aterramentos das Redes Aéreas de Distribuição

A comparative analysis of soil ionization models for grounding of overhead distribution lines

Hugo Dominguez Almaguer^{1,2}  orcid.org/0000-0002-3215-750X

Murilo Velho²  orcid.org/0000-0001-5517-3900

Alexandre Orsi²  orcid.org/0000-0001-9499-2757

Vilson Luiz Coelho³  orcid.org/0000-0001-8957-3902

¹ Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, Brasil,

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - Mestrado, Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, Brasil,

³ Faculdade SACT, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

E-mail do autor principal: Hugo Dominguez Almaguer hugo@furb.br

Resumo

Neste artigo analisa-se o comportamento dos níveis de sobretensão no lado primário das redes aéreas de distribuição de energia na situação de descarga atmosférica, levando em considerando o fenômeno da ionização do solo nos aterramentos elétricos. Para esse fim, duas formulações da resistência de aterramento sob o efeito da ionização foram avaliadas: o Modelo Dinâmico e o Modelo Geométrico. O equacionamento destes modelos foi incorporado mediante rotinas *Models* no programa *Alternative Transient Program* (ATP). O caso de estudo correspondeu a um trecho de rede de distribuição do tipo compacta, com parâmetros reais praticados pelas concessionárias de energia. As simulações foram executadas considerando três situações: 1 - sem levar em consideração o fenômeno da ionização do solo, sendo o aterramento representado por uma resistência de valor constante (situação comumente encontrada na prática); 2 - considerando a ionização do solo pelo Modelo Dinâmico; e 3 - considerando a ionização do solo pelo Modelo Geométrico. Foi constatado que os efeitos da ionização alteram drasticamente o comportamento da resistência de aterramento durante o período transitório da descarga, variando sensivelmente seu valor. Conseqüentemente, os resultados sinalizaram para uma diminuição significativa nos níveis de sobretensão nas estruturas da rede. Desta forma, o trabalho vem a contribuir para uma análise mais realista dos processos transitórios que acontecem nas redes de distribuição, decorrentes dos efeitos das descargas atmosféricas.

Palavras-Chave: ATP; Aterramento elétrico; Descargas atmosféricas; Ionização do solo; Redes aéreas de distribuição.

Abstract

This paper analyzes the behavior of the overvoltage levels on the primary side of overhead distribution lines considering the phenomenon of soil ionization at grounding under lightning condition. To this end, two formulations were evaluated: The Dynamic and the Geometric Models. Both were implemented by using MODELS, a tool available in the Alternative Transient Program

(ATP), a software for the analysis of power systems. Thus, MODELS/ATP replace the fixed value commonly used to represent the resistance of grounding topologies. The case studied corresponds to a section of a compact type of overhead distribution power network, with real parameters practiced by power utilities. The simulations were carried out considering three situations: 1 - not taking into account the phenomenon of soil ionization and the grounding being represented by a resistance of constant value (situation generally found in practice); 2 - considering soil ionization by the Dynamic Model; 3 - considering soil ionization by the Geometric Model. It was found that the effects of ionization drastically alter the behavior of the soil resistivity and the grounding resistance during the transient period of the discharge. Consequently, a significant decrease of the overvoltage levels in the network structures happened, when compared to the situation that uses a fixed resistance value to represent the grounding. In this way, the results show that the adequate representation of the grounding when overhead distribution networks are struck by lightning allow a more realistic analysis and should not be ignored.

Key-words: ATP; Electrical grounding. Lightning; Soil ionization; Overhead distribution lines.

1 Introdução

É usual nos estudos das redes aéreas de distribuição (RAD) considerar o aterramento a partir de um valor constante de resistência, que representa o comportamento elétrico da malha ou eletrodo de aterramento no ponto de injeção da corrente de falha para o solo.

No entanto, essa representação simplificada do aterramento na condição de descarga atmosférica pode apresentar resultados equivocados. Para uma abordagem mais realista, esse parâmetro deveria ser referido como uma resistência transitória, capaz de representar melhor a resposta do sistema na presença de ocorrências associadas com fenômenos rápidos e de alta intensidade. Deste modo, as práticas convencionais de aterramento, que são consistentes para condições de baixa frequência (ex. falhas oriundas de curto-circuito), podem não ter sentido quando o sistema é submetido à ação de descargas atmosféricas, devido ao fato do comportamento eletromagnético do aterramento nessas condições ser muito mais complexo.

Sabe-se que as altas magnitudes das correntes produzidas pelas descargas atmosféricas que escoam através do aterramento, desencadeiam um processo de ionização do solo no entorno dos condutores devido aos elevados valores de campo elétrico induzidos, levando à ruptura dielétrica do solo. Esse fenômeno altera consideravelmente o comportamento da resistividade do solo e, conseqüentemente, provoca uma variação

transitória significativa da resistência de aterramento do eletrodo [1 – 4].

Portanto, no intuito de se obter resultados mais confiáveis, alguns modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para considerar a ionização do solo e o comportamento transitório da resistência na modelagem dos sistemas de aterramento. O mais simples e conhecido de todos é o modelo Geométrico, desenvolvido por um grupo de trabalho do CIGRE (*International Council on Large Electric System*) [5, 6]. Este método é principalmente aplicado em estudos de linhas de transmissão de energia de alta tensão [7].

Um outro modelo recorrente na literatura acadêmica é o conhecido como Dinâmico. Este modelo se caracteriza por realizar uma abordagem mais física do fenômeno de ionização, pois considera a variação do parâmetro da resistividade elétrica do solo na região ionizada [8, 9].

A maioria dos estudos que utilizam o modelo Dinâmico são focados na análise isolada da topologia de aterramento, sem interação com as outras estruturas do sistema elétrico. A implementação é efetuada a partir de técnicas de modelagem numérica, em especial o método FDTD [10, 11]. Esta ferramenta computacional, apesar da sua robustez e de proporcionar resultados altamente precisos, demanda um esforço computacional considerável, podendo um problema de dimensões geométricas relativamente pequenas levar vários dias de execução da simulação.

Neste contexto, será apresentado no artigo uma proposta de incorporação das formulações analíticas dos modelos da ionização do solo (Geométrico e Dinâmico), em uma plataforma para o cálculo de transitórios eletromagnéticos, no caso o programa ATP Draw® (*Alternative Transient Program*).

Assim, a partir de simulações que demandam baixo tempo de processamento, poderá ser avaliada a influência do aterramento ionizado nas demais estruturas componentes da rede de distribuição. Isto permitirá fazer uma análise mais realista dos processos transitórios que ocorrem na rede – originários dos efeitos das descargas atmosféricas – em relação aos casos em que os modelos tradicionais de resistência de aterramento invariável no tempo são empregados.

A revisão bibliográfica realizada pelos autores deste trabalho constatou que poucas publicações abordam a temática de simulação ATP de redes de distribuição considerando a ionização do solo nos aterramentos elétricos. Por exemplo, Mata *et al* [12] fizeram a modelagem ATP de uma rede aérea de distribuição experimental a dois condutores, sendo o aterramento representado pelo modelo Geométrico. Já Gondim *et al* [13] implementaram no ATP o modelo Dinâmico, como parte de um estudo de qualidade de energia e análise de danos em equipamentos elétricos de baixa tensão.

Mais especificamente, neste artigo será mostrado um estudo comparativo do comportamento dos níveis de sobretensão nas fases do lado primário (média tensão) e no cabo mensageiro ou guarda de uma RAD do tipo compacta na situação de descarga direta. As simulações ATP irão considerar os dois modelos de ionização do aterramento (Geométrico e Dinâmico) e a representação convencional aplicada pelas concessionárias (resistência de valor constante).

2 Referencial teórico

2.1 Aterramento elétrico em RAD

As malhas de aterramento empregadas nas RAD são geralmente de pequenas dimensões, devido aos custos envolvidos e às restrições impostas pelas limitações de espaço físico para sua instalação. Tipicamente, as topologias consistem em hastes cilíndricas condutoras enterradas verticalmente no solo, alinhadas e interligadas. Em

geral, as hastes são de aço cobreado com 2,4 metros de comprimento, 16 mm de diâmetro e espaçadas a 3 metros (no caso do uso de mais de uma haste), enterradas a uma profundidade mínima de 30 centímetros.

O cabo neutro do lado de baixa tensão da rede e o cabo de guarda (no caso específico das redes do tipo compactas), devem estar aterrados no máximo a cada 200 metros, aproximadamente. Ainda, todas as massas dos equipamentos de média tensão instalados nos postes (ex. transformadores), assim como os finais de linha e para-raios, devem também obrigatoriamente estar aterrados. O aterramento é executado no solo na proximidade da base dos postes, estando ligado pelo cabo de descida às estruturas da rede localizadas no topo.

Para o cálculo analítico da resistência de aterramento de uma haste vertical simples, é usual aplicar a expressão clássica de Sunde [14],

$$R_h = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left(\frac{4l}{r_0} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

onde: R_h (Ω) é a resistência de aterramento da haste vertical; ρ ($\Omega \cdot m$) é a resistividade elétrica aparente do solo; r_0 e l , em metros, são o raio da seção transversal e o comprimento da haste, respectivamente.

A utilização na expressão (1) da resistividade aparente vista pelo aterramento em integração com o solo, no lugar de simplesmente uma resistividade uniforme (por exemplo, aquela da camada superficial do solo), contribui para uma modelagem mais precisa. Este parâmetro considera a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas e a não homogeneidade do solo, pois para sua obtenção é levado em consideração a estratificação do solo em camadas horizontais [15].

No caso do uso de várias hastes verticais interligadas, para obter a resistência equivalente do conjunto é aplicado um fator de redução à Equação (1). Este coeficiente depende da quantidade de hastes e da separação entre elas. Por exemplo, para a configuração mais empregada nos aterramentos de RAD, que é a topologia de três hastes com espaçamento regular de 3 metros, o fator de redução a ser aplicado é igual a 0,397

[15]. Assim, para representar os eletrodos de aterramento na modelagem de RAD o uso de expressão (1) ou outras equivalentes, que fornecem um valor constante de resistência, é suficientemente preciso nas situações em que as correntes de falha que circulam pelo aterramento não apresentarem níveis muito elevados. Isto acontece, por exemplo, nos casos de curtos-circuitos fase-terra à frequência industrial (50/60 Hz). Já na condição de descarga atmosférica, os surtos de corrente podem atingir picos da ordem de dezenas e até centenas de kiloampères [16], capazes de provocarem a ionização do solo. Nestas condições, a resistência do aterramento irá apresentar um comportamento dinâmico, que não é contemplado pelos modelos convencionais.

2.2 Fenômeno da ionização do solo

Se a amplitude da corrente de surto oriunda da descarga atmosférica que atinge o aterramento é muito alta, um processo de ionização pode ocorrer no solo no entorno do eletrodo de injeção, devido aos elevados valores de campos elétricos associados.

Quando o gradiente do potencial elétrico no solo excede um determinado patamar crítico, ocorre um processo disruptivo no solo. Este valor de campo elétrico crítico depende do tipo de solo (caracterizado pela resistividade elétrica) e da condição de umidade. Valores relatados na literatura compreendem uma faixa de 300 a 1.100 kV/m [5, 17]. Para quantificar este parâmetro, Oettle [18] propôs o emprego de uma expressão em que o campo crítico é função da resistividade do solo na condição de pré ionização, isto é,

$$E_c = 241 \cdot \rho^{0,215} \quad (2)$$

em que E_c (kV/m), é o campo elétrico crítico e ρ ($\Omega \cdot m$) representa a resistividade elétrica inicial do solo. Na medida que a intensidade da corrente que flui pelo solo aumenta, *streamers* são gerados e evaporam a umidade. Como consequência, arcos elétricos são produzidos ao redor do eletrodo de aterramento. Este comportamento é ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Representação da ruptura dielétrica do solo (ionização) ao redor de um eletrodo de aterramento. Fonte: [17].

Nestas regiões de arco e *streamers*, a resistividade elétrica do solo diminui de forma não linear até um valor muito baixo, se comportando como um material bom condutor. Desta forma, o solo ionizado passa a atuar como uma extensão do eletrodo, podendo ser considerado que houve um acréscimo no diâmetro e no comprimento dele. Consequentemente, a resistência do aterramento também irá sofrer uma variação não linear, reduzindo seu valor durante a parte do transitório eletromagnético em que a ionização do solo se manifesta [17].

2.3 Modelo Geométrico da ionização do solo

De acordo com o Modelo Geométrico [1, 2, 5, 6], a corrente no ponto de injeção do eletrodo de aterramento, necessária para atingir o gradiente de potencial elétrico crítico que provoca a ruptura no solo é determinada por,

$$I_c = \frac{E_c \cdot \rho}{2\pi \cdot R_0^2} \quad (3)$$

onde E_c (kV/m), é o campo elétrico crítico, que pode ser estimado pela Equação (2), ρ ($\Omega \cdot m$) e R_0 (Ω) são, respectivamente, a resistividade do solo e a resistência do aterramento para baixas correntes, antes do processo de ionização ocorrer. A resistência R_0 depende da geometria do aterramento, conforme descrito no item 2.1. Para

correntes maiores que I_c , a disrupção no solo continua a se espalhar, atingindo uma distância radial limitada por,

$$r_c = \frac{\rho \cdot I_c}{2\pi l \cdot E_c} \quad (4)$$

onde l (m) é o comprimento longitudinal do eletrodo de aterramento. Nesta região ionizada do solo a resistividade tende a zero, podendo ser considerada como um material condutor perfeito, uma extensão do eletrodo. Uma representação esquemática do fenômeno é apresentada na Figura 2.

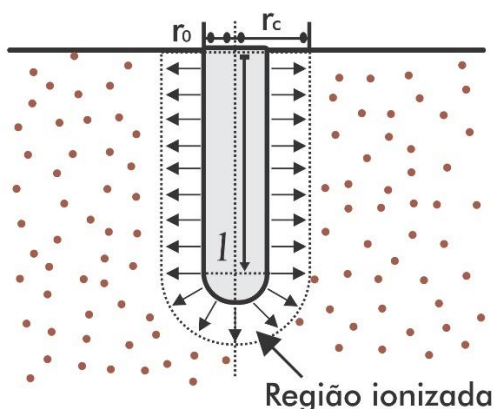


Figura 2 - Região ionizada do solo no entorno do eletrodo de aterramento, conforme o Modelo Geométrico.

Fonte: Adaptada de [6].

Desta forma, a resistência do aterramento deixa de ser constante e passa a ter um comportamento dinâmico não linear, representada por,

$$R(t) = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{i(t)}{I_c}}} \quad (5)$$

onde $i(t)$ é a corrente transitória do surto atmosférico que atinge o eletrodo de aterramento. Assim, segundo o Modelo Geométrico, no processo da incidência da descarga atmosférica no aterramento, a resistência inicial do eletrodo é

mantida até que a corrente de surto ultrapasse o valor crítico, quando a ionização no solo ao redor do eletrodo é desencadeada. A partir daí, ocorre a diminuição da resistência, representada por (5). Conforme o surto vai se dissipando e a corrente diminuindo seu valor após atingir o pico, a resistência de aterramento retorna gradualmente ao seu patamar inicial R_0 .

2.4 Modelo Dinâmico da ionização do solo

A proposta do Modelo Dinâmico parte da premissa de quantificar a variação não linear da resistividade elétrica do solo ao longo do período transitório da descarga, considerando as etapas de ionização e deionização.

Na condição da ionização do solo não acontecer, a resistividade do solo permanece constante, sendo denominada de resistividade inicial ρ_0 . Entretanto, assim que a corrente escoada pelo aterramento aumentar de intensidade, ao ponto do campo elétrico ultrapassar o valor limite para a ocorrência da ruptura dielétrica do solo – dando início ao processo de ionização – a resistividade passará a ter um forte comportamento não linear, decrescendo em relação ao valor inicial ρ_0 e posteriormente retornando ao mesmo, na medida em que a intensidade da corrente do surto diminui após ter atingido o pico [8, 9]. Este comportamento pode ser representado como um ciclo histerético, conforme mostrado na Figura 3.

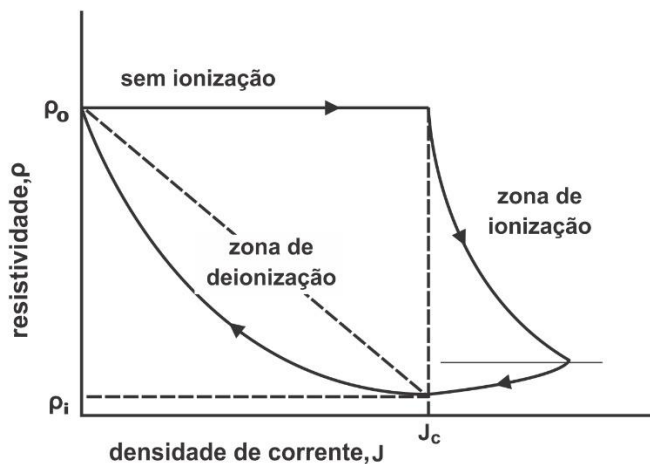


Figura 3 - Comportamento da resistividade do solo no aterramento durante o processo de ionização, segundo o Modelo Dinâmico.

Fonte: Adaptada de [8].

Desta forma, a resistividade do solo é definida conforme as seguintes condições:

Para $J < J_c$ (etapa inicial):

$$\rho = \rho_0 \quad (6)$$

onde J (A/m²) é a densidade superficial de corrente transitória na região do solo no entorno do eletrodo de aterramento e J_c é o correspondente valor crítico ou limite, a partir do qual inicia-se a ionização. A relação entre J_c e o campo elétrico crítico E_c pode ser estabelecida a partir da lei de Ohm localizada (ou relação constitutiva para condução elétrica em materiais):

$$J_c = \frac{E_c}{\rho_0} \quad (7)$$

Para a obtenção de J , considerando a distribuição da corrente uniforme na superfície equipotencial que envolve o eletrodo de aterramento, tem-se:

$$J = \frac{i(t)}{A} \quad (8)$$

em que $i(t)$ representa a corrente transitória de surto proveniente da descarga atmosférica e A (m²) é a área da superfície equipotencial do potencial elétrico no solo, obtida pela somatória da parede lateral de um cilindro com comprimento l igual ao do eletrodo e uma superfície hemisférica de raio r , correspondente à parte inferior do eletrodo (ver Figura 2):

$$A = 2\pi rl + 2\pi r^2 \quad (9)$$

- Para $J \geq J_c$ (etapa de ionização):

Nesta situação, inicia-se o processo de ionização, onde a resistividade se torna variável e com valores menores que o inicial ($\rho < \rho_0$). A mesma é descrita como:

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau_i}\right)} \quad (10)$$

onde t é o instante de tempo computado a partir do início da ionização e τ_i é a constante de tempo de ionização.

- Para $J < J_c$ (etapa de deionização):

Após a corrente de surto atingir seu valor máximo, a ionização continuará a acontecer até o campo elétrico enfraquecer e ficar abaixo do ponto crítico ($E < E_c$). Nesse instante, inicia-se o processo de deionização, no qual a resistividade do solo tende a crescer, retornando ao seu valor original ρ_0 no final do transitório. Nesta etapa, o comportamento da resistividade é definido como

$$\rho = \rho_i + (\rho_0 - \rho_i) \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau_d}\right)}\right) \cdot \left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^2 \quad (11)$$

sendo ρ_i ($\Omega \cdot m$) a resistividade mínima, atingida no instante que marca o início da etapa de deionização e τ_d é a constante de tempo de deionização.

As constantes de tempo de ionização (τ_i) e de deionização (τ_d) são determinadas empiricamente, a partir de resultados experimentais [8, 10].

Nos próximos itens será apresentada a aplicação dos Modelos Geométrico e Dinâmico no ATP, a partir do uso da ferramenta *Models*.

3 Método da pesquisa

3.1 Implementação computacional no ATP

O ATP possui uma extensa gama de recursos para a modelagem de sistemas de potência, sendo um dos programas mais utilizados pelos pesquisadores da área para a simulação de redes elétricas envolvendo transitórios eletromagnéticos. A principal ferramenta do ATP aplicada neste trabalho foi a rotina de suporte *Models*, que permite ao usuário configurar blocos contendo modelos de equipamentos e componentes que

apresentam comportamento não linear. Neste caso, foram implementadas em *Models* as formulações matemáticas apresentadas no item 2, que consideram a ionização do solo nos aterramentos pelo Modelo Dinâmico e pelo Modelo Geométrico.

Os casos de estudo corresponderam a RAD do tipo compactas, com parâmetros reais utilizados pelas concessionárias de energia. A Figura 4 ilustra esquematicamente um trecho das redes estudadas, sendo atingido de forma direta por uma descarga atmosférica, que incide no cabo de guarda.



Figura 4 - Trecho de RAD compacta (lado primário), atingida por descarga atmosférica direta. Fonte: Dos autores.

Neste artigo, será apresentada a modelagem e simulação para um trecho de 350 metros de comprimento. Foi considerado apenas o lado primário da linha (média tensão de 23,5 kV). O segmento de rede possui 5 postes, com vãos entre eles de 70 metros. A Figura 6 apresenta um exemplo do circuito ATP implementado para modelar este trecho de rede.

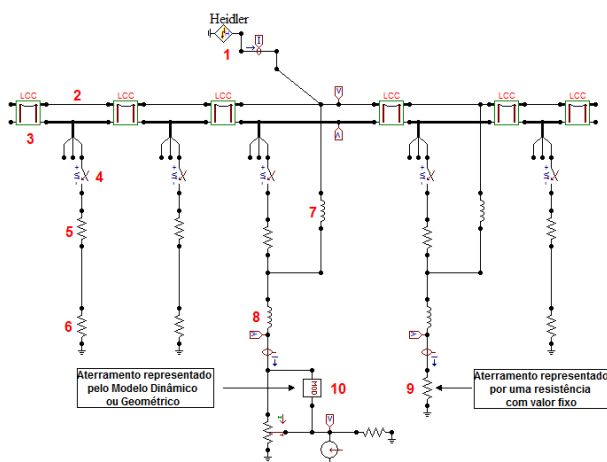


Figura 5 - Circuito ATP para a modelagem de um trecho de RAD compacta (lado primário). Fonte: Dos autores.

Os elementos componentes que conformam o modelo ATP de RAD da Figura 5 são descritos a seguir:

1. Surto de corrente da descarga atmosférica (excitação do modelo). Representado por uma curva do tipo dupla exponencial, conforme a Equação de Heidler [19],

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (12)$$

onde τ_1 e τ_2 são as constantes de tempo que determinam o tempo de subida e de cauda, n o fator de inclinação da corrente e η um fator de correlação da corrente de pico. O surto é injetado no cabo guarda, representado uma descarga direta.

2. Cabo guarda ou mensageiro;
3. Elemento "LCC" que representa os cabos das fases como linhas de transmissão (incluindo parâmetros geométricos e materiais);
4. Chave controlada por tensão que representa a ruptura dielétrica dos pinos isoladores, quando o nível básico de isolamento destes é ultrapassado (no caso, 150 kV);
5. Resistência dos postes (de concreto, tipo Duplo T), definida como [20],

$$R_{poste} = 60 \cdot \ln \left(2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{H_c}{rc} \right) - 60 \quad (13)$$

onde H_c é a altura média dos postes e rc é o raio médio da base, ambos em metros.

6. Resistência de aterramento para os casos dos postes não aterrados (representando o engastamento do poste no solo). O valor é igual a duas vezes o da resistência de aterramento constante aplicada nos postes aterrados [21];
7. Indutância do cabo de ligação entre o cabo de cobertura e o cabo de descida, com valor de $1,2\mu\text{H}$;

8. Indutância do cabo descida, que faz a ligação com o eletrodo de aterramento, com valor de $11\mu\text{H}$;
9. Resistência de aterramento "convencional" (valor constante), quantificada pela Equação (1). Representa o eletrodo de aterramento (hastes verticais);
10. Resistência de aterramento transitória, considerando a ionização do solo (pelo Modelo Dinâmico ou pelo Modelo Geométrico). O bloco *Models* comporta os procedimentos matemáticos descritos no item 2.

3.2 Situações simuladas no ATP

As simulações foram executadas considerando que o poste próximo ao ponto onde ocorre a descarga está aterrado e todos os outros estão sem aterramento. Neste poste aterrado, foram avaliados os seguintes casos para representar o eletrodo de aterramento:

- Aterramento representado por uma resistência de valor constante, conforme Equação (1) e o elemento 9 da Figura 5;
- Aterramento representado por uma resistência transitória, considerando a ionização pelo Modelo Dinâmico. Neste caso a ferramenta *Models* é aplicada (elemento 10 da Figura 5);
- Aterramento representado por uma resistência transitória, considerando a ionização pelo Modelo Geométrico. Neste caso a ferramenta *Models* é aplicada (elemento 10 da Figura 5).

As grandezas e parâmetros analisados após a execução das simulações foram (ver Figura 6):

- Sobretensão transitória no cabo de cobertura, no ponto de impacto da descarga atmosférica;
- Sobretensão transitória nas fases de média tensão (lado primário), no ponto da descarga;
- Tensão e corrente no eletrodo de aterramento pelo qual acontece o

escoamento da corrente de descarga atmosférica;

- Resistência dinâmica no eletrodo de aterramento, nas situações em que o modelo de aterramento considera a ionização do solo.

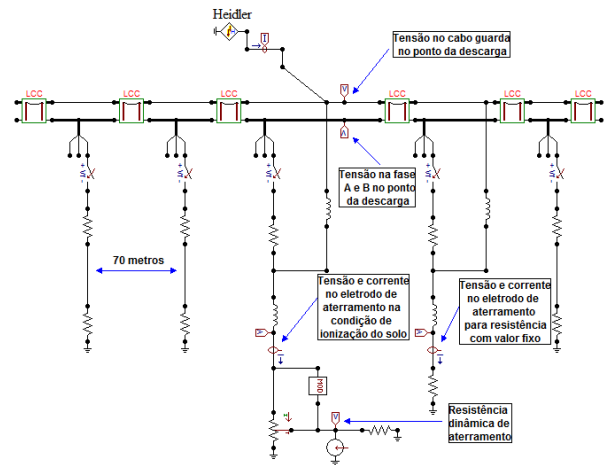


Figura 6 – Identificação das grandezas e parâmetros obtidos a partir das simulações ATP da RAD compacta. Fonte: Dos autores.

4 Resultados da pesquisa

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações ATP para a RAD compacta descrita no item 3, quando atingida por uma descarga atmosférica direta. Especificamente, para as simulações do presente trabalho foi considerado um solo com resistividade elétrica aparente de $80 (\Omega \cdot \text{m})$. Assim, o campo elétrico crítico, calculado pela Equação (2), é de $618 (\text{kV}/\text{m})$. Como eletrodo de aterramento foi aplicada uma haste vertical de $2,4 (\text{m})$ de comprimento e seção transversal de $0,0124 (\text{m})$ de diâmetro, apresentando uma resistência de aterramento de $33 (\Omega)$, obtida a partir da Equação (1). No caso do surto atmosférico, modelado por (12), foi considerada uma corrente de pico de $35 (\text{kA})$, um tempo de subida de $5,6 (\mu\text{s})$ e um tempo de cauda de $75 (\mu\text{s})$. Na situação em que o Modelo Dinâmico foi aplicado, as constantes de tempo de ionização e deionização utilizadas foram $\tau_i = 1,5 (\mu\text{s})$ e $\tau_d = 0,5 (\mu\text{s})$ respectivamente, conforme Darveniza *et al* [8].

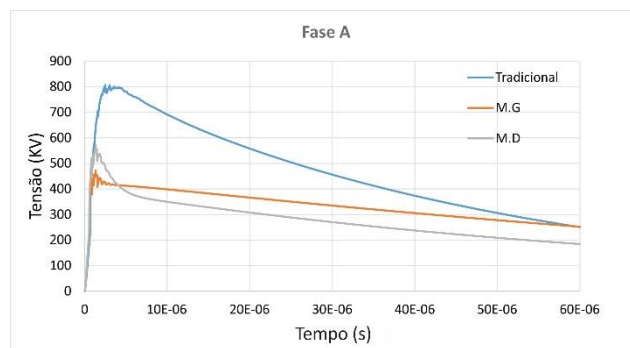
Na Figura 7 são apresentadas as curvas de sobretensão transitória no cabo guarda, para os três modelos de aterramento avaliados.



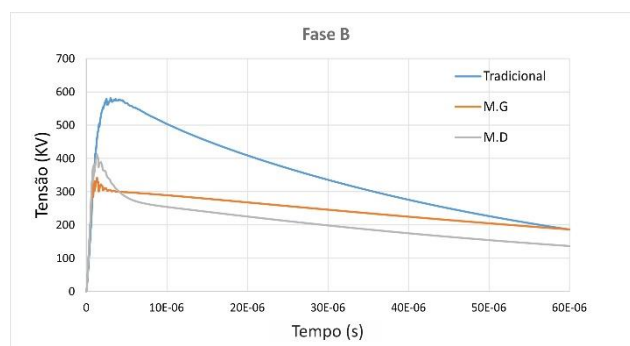
Figura 7 - Sobretensões no cabo guarda. Aterramento representado por uma resistência fixa (azul), aterramento representado pelo Modelo Geométrico (laranja) e aterramento representado pelo Modelo Dinâmico (cinza).
Fonte: Dos autores.

Percebe-se na Figura 7 que a sobretensão no caso em que se considera o aterramento como uma resistência fixa é nitidamente maior quando comparada às situações em que a ionização do solo é incluída. Por outro lado, no comparativo entre os resultados para as configurações onde o aterramento sofre a ionização, o Modelo Dinâmico atingiu um pico maior de sobretensão, mas a queda é ligeiramente mais acentuada do que para o Modelo Geométrico, registrando valores menores no final do transitório. Esta tendência de comportamento apresentada pelas sobretensões no cabo de guarda se repete nas fases do primário da rede, conforme pode ser observado na Figura 8.

O comportamento da curva de sobretensão na fase C não foi mostrado na Figura 8 pelo fato de ser idêntico ao da fase A, devido à simetria transversal da disposição dos cabos na configuração da rede compacta. Para todas as situações, as fases A e C tiveram valores de pico de sobretensão ligeiramente inferiores aos do cabo guarda, mas sempre superiores aos níveis atingidos pela fase B, pelo fato desta última estar mais afastada.



(a)



(b)

Figura 8 - Sobretensões nas fases. Aterramento representado por uma resistência fixa (azul), aterramento representado pelo Modelo Geométrico (laranja) e aterramento representado pelo Modelo Dinâmico (cinza). a) Fase A; b) Fase B.
Fonte: Dos autores.

Na figura 9 são mostrados os resultados para os níveis de sobretensão no ponto de injeção do eletrodo de aterramento.

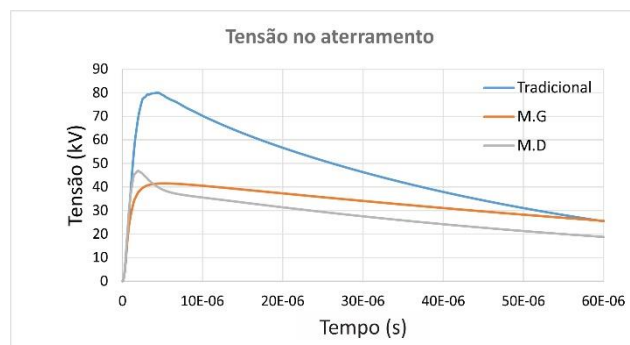


Figura 9 - Níveis de sobretensão no eletrodo de aterramento. Aterramento representado por uma resistência fixa (azul), aterramento representado pelo Modelo Geométrico (laranja) e aterramento representado pelo Modelo Dinâmico (cinza).
Fonte: Dos autores.

Novamente, nota-se que quando a ionização do solo é considerada no aterramento, os valores de

tensão são menores em relação ao caso com valor fixo de resistência.

Os níveis de corrente no ponto de injeção do eletrodo de aterramento são apresentados na Figura 10.

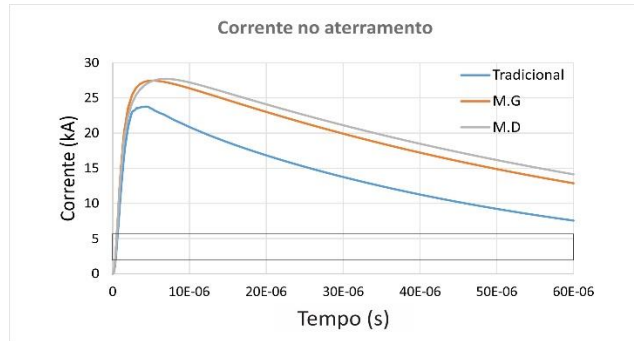


Figura 10 - Níveis de corrente no eletrodo de aterramento. Aterramento representado por uma resistência fixa (azul), aterramento representado pelo Modelo Geométrico (laranja) e aterramento representado pelo Modelo Dinâmico (cinza).
Fonte: Dos autores.

No caso das correntes, a amplitude é maior quando se considera a ionização do solo, já que nessa situação a resistência de aterramento possui um comportamento dinâmico não linear, com uma forte queda nos momentos iniciais do transitório. Desta forma, a corrente da descarga ecoa com maior facilidade através do aterramento, de forma mais acentuada do que para as mesmas condições da RAD, mas com o uso do modelo convencional de resistência de aterramento constante.

A Figura 11 apresenta o comportamento transitório da resistência de aterramento durante a descarga atmosférica, segundo os modelos matemáticos que consideram o fenômeno da ionização do solo.

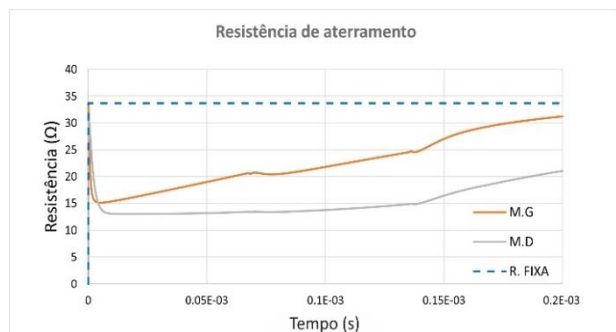


Figura 11 - Resistência de aterramento na condição de ionização do solo. Aterramento representado pelo

Modelo Geométrico (laranja) e aterramento representado pelo Modelo Dinâmico (cinza).
Fonte: Dos autores.

A partir dos resultados da Figura 11 é possível comprovar que o comportamento entre os dois modelos de resistência aterramento é muito similar. Ambos partem de um valor muito próximo da resistência constante (sem ionização do solo), sendo que a curva do Modelo Geométrico sofre menos diminuição do seu valor e deioniza mais rapidamente que para o caso do Modelo Dinâmico.

As Tabelas 1 e 2 sintetizam os principais resultados obtidos.

Tabela 1 - Comparativo dos resultados mais significativos obtidos nas simulações ATP da RAD (valores máximos).

Grandeza	Condição do Modelo de Aterramento		
	Resistência Fixa	Modelo Dinâmico	Modelo Geométrico
Tensão no Cabo Guarda (kV)	825	633	553
Tensão na Fase A (kV)	815	612	532
Tensão na Fase B (kV)	585	442	386
Tensão no Aterramento (kV)	81,4	49,3	46,3
Corrente no Aterramento (kA)	23,49	27,89	27,55

Fonte: Dos autores.

Tabela 2 - Desvio relativo entre os resultados para os três modelos de resistência de aterramento.

Grandeza	Desvio Relativo (%) entre:		
	Modelo Dinâmico e Resistência Fixa	Modelo Geométrico e Resistência Fixa	Modelo Dinâmico e Modelo Geométrico
Tensão no Cabo Guarda	23,3	33,0	12,6
Tensão na Fase A	24,9	34,7	13,1
Tensão na Fase B	24,4	34,0	12,7
Tensão no Aterramento	39,4	43,1	6,1
Corrente no Aterramento	-11,2	-10,0	1,0

Fonte: Dos autores.

Verifica-se que para todas as simulações realizadas os valores de pico de tensão sempre são

menores nas situações em que a ionização do solo foi considerada. Também se observou que no comparativo entre os Modelos Dinâmico e Geométrico, o primeiro apresentou valores de pico maiores, tanto para as tensões (nos cabos e aterramento), quanto para a corrente no ponto de injeção do aterramento.

Em relação aos tempos de processamento computacional, as simulações envolvendo o modelo Geométrico levaram apenas cinco (05) segundos, enquanto aquelas utilizando o modelo Dinâmico demandaram em torno de noventa (90) segundos. Os recursos empregados nas simulações foram um Notebook com Processador Intel® Core™ i5-4210U CPU @ 1.70GHz 2.40 GHz, Memória RAM de 4,00 GB e Sistema Operacional Windows 10 de 64 Bits.

5 Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho veio a contribuir para a análise mais realista dos processos transitórios que acontecem nas redes aéreas de distribuição de energia, decorrentes de descargas atmosféricas. O principal objetivo foi desenvolver um estudo comparativo de modelos do aterramento elétrico, com e sem a consideração do fenômeno da ionização do solo, visando avaliar seus efeitos nos níveis das tensões e correntes, tanto nas fases do lado primário da rede, quanto na própria topologia de aterramento.

A incorporação do equacionamento dos modelos Dinâmico e Geométrico da ionização do solo no ATP, utilizando a ferramenta *Models*, viabilizou a interação entre o subsistema de aterramento (com comportamento transitório) e as demais estruturas componentes da rede de distribuição de energia.

Em relação ao comparativo direto entre os dois modelos de aterramento elétrico com ionização do solo (Dinâmico e Geométrico), pode ser ponderado que as diferenças entre os resultados obtidos não foram muito significativas. Desta forma, avalia-se que o Modelo Geométrico seja mais indicado para efetuar simulações de redes aéreas de distribuição. Pesou nesta decisão a formulação mais simples, sua facilidade de implementação computacional, o menor tempo de processamento das simulações e o fato de depender apenas de um parâmetro experimental, que é a resistividade elétrica aparente do solo. Por outro lado, o Modelo Dinâmico traz uma representação mais física do

comportamento do solo, ao quantificar diretamente as variações da resistividade durante todo o processo transitório. No entanto, apresenta uma importante limitação, que é a dependência do seu equacionamento de dois coeficientes experimentais (constantes de tempo de ionização e deionização), de difícil obtenção e sobre os quais existem poucas informações na literatura.

De qualquer forma, os resultados da pesquisa enfatizaram a importância da consideração do fenômeno da ionização do solo nos estudos das redes aéreas de distribuição. Para uma condição típica de descarga atmosférica direta, a probabilidade da ruptura dielétrica do solo é elevada, levando à redução severa da resistividade elétrica do solo no entorno do eletrodo e, conseqüentemente, da resistência de aterramento.

De fato, as situações simuladas constataram que, para todos os casos, os níveis de sobretensões tanto no cabo de guarda quanto nas fases da linha foram muito superiores quando a ionização do solo não é considerada no modelo do aterramento.

No caso das correntes injetadas no eletrodo de aterramento, as magnitudes foram maiores para os casos em que a ionização do solo foi contemplada. Isto significa que uma parcela considerável da descarga é dissipada através do próprio sistema de aterramento, propiciando que menores níveis de corrente se propaguem através das fases da rede durante o processo da descarga atmosférica.

Desta forma, a partir deste estudo foi percebido que a incorporação do fator "ionização do solo no aterramento" nas etapas de projeto de redes aéreas de distribuição poderia levar a uma análise menos conservadora para a escolha de algumas das estruturas componentes destas redes (ex. dispositivos de proteção e isoladores), contribuindo na redução de custos.

Referências

- [1] IEEE 1410: IEEE Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines. IEEE Power Engineering Society, 2004.
- [2] COORAY, V. Lightning protection. Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2010.

- [3] GRCEV, L. Modeling of grounding electrodes under lightning currents. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 51, p. 559-571, 2009.
- [4] KORSUNTCEV, A. V. Application of the theory of similitude to the calculation of concentrated earth electrodes. Electrichestvo, p. 31-35, 1958.
- [5] CIGRE Task Force on Soil Ionization – WG 33.01. Perspectives on soil ionization investigation, p. 105-106, 2000.
- [6] SEKIOKA, S. Discussion of CIGRE current-dependent grounding resistance model. 2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013, p. 184-189, 2013.
- [7] MATA, C. T. et al. EMTP modeling of a triggered-lightning strike to the phase conductor of an overhead distribution line. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, p. 1175-1181, 2000.
- [8] LIEW, A. C.; DARVENIZA, M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, v. 121, p. 123-135, 1974.
- [9] WANG, J.; LIEW, A. C.; DARVENIZA, M. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, p. 2160-2165, 2005.
- [10] ALA, G. et al. Finite difference time domain simulation of earth electrodes soil ionization under lightning surge condition. IET Science, Measurement and Technology, p. 134-145, 2008.
- [11] SANTOS, T. L. T.; OLIVEIRA, R. M.S.; SOBRINHO, C. L and ALMEIDA, J. F. Soil Ionization in Different Types of Grounding Grids Simulated by FDTD Method. The SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics Conference, 2009, Belém - Brazil.
- [12] MATA, C. T.; FERNANDEZ, M. I.; RAKOV, V. A. and UMAN M. A. EMTP Modeling of a Triggered-Lightning Strike to the Phase Conductor of an Overhead Distribution Line. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 4, p. 1175-1181, 2000.
- [13] GONDIM, I.N.; OLIVEIRA, J.; TAVARES, C.E.; BARBOSA, J.A.F. and MENDOÇA, M.V.B. Grounding system modelling and its impact on computational refunding analysis for equipment damages. Renewable Energy and Power Quality Journal, p. 917-922, 2011.
- [14] SUNDE, E. D. Earth conduction effects in transmission systems, New York: Dover Publications, 1968.
- [15] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. Aterramento Elétrico. Porto Alegre: Ed. Sagra – DC Luzzatto, 1995.
- [16] SALDANHA, J. O. P. et al. Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos elétricos em instalações, Lagoa Santa: Editora Clamper, 2016.
- [17] TELLO, M. et al. Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequência, Porto Alegre: Ed. EdIPUCRS, 2007.
- [18] OETTLE, E. A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, p. 2020-2029, 1988.
- [19] GAMEROTA, W. R. et al. Current waveforms for lightning simulation. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 54, p. 880-888, 2012.
- [20] CABRAL, R. J. et al. Analysis of distribution lines performance against lightning using ATP-EMTP. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, p. 8-12, 2012, Rome- Italy.
- [21] SEKIOKA, S.; YAMAMOTO, K. and YOKOYAMA, S. Measurements of a concrete pole impedance with an impulse current source. Proc. of International Conference on Power Systems Transients, p. 457-462, 1995, Lisbon- Portugal.