



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

FI/GDS/22  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - X**

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

**AValiação DOS EFEITOS DO SOLO E DA FREQUÊNCIA NOS PARÂMETROS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS TRIFÁSICAS**

**Rodolfo A. R. Moura(\*)**      **Marco A. O. Schroeder**      **Luiz C. Nascimento**  
Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL)  
Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)

**Antônio C. S. Lima**  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

**RESUMO**

As linhas de transmissão, principalmente em países continentais (Brasil), são alvos de interações eletromagnéticas indesejadas. Estas geram transitórios que culminam em elevadas sobretensões. Para o cálculo destas sobretensões, é fundamental a determinação das matrizes de impedância longitudinal e admitância transversal. Tais parâmetros sofrem influência decisiva do solo subjacente e do espectro de frequência do fenômeno solicitante. Este artigo analisa as referidas influências nos parâmetros citados e nas distribuições de tensão e corrente ao longo de uma linha. Os resultados ilustram a importância de uma metodologia confiável para a quantificação da variação da resistividade e permissividade do solo com a frequência.

**PALAVRAS-CHAVE:**

Linhas de Transmissão, Domínio da Frequência, Efeitos do Solo e da Frequência, Transitórios Eletromagnéticos.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

As linhas de transmissão de alta e extra alta tensão no país estão sujeitas a incidência de descargas atmosféricas e manobras, demandando uma coordenação de isolamento detalhada e precisa para evitar desligamentos imprevistos. Para avaliar as sobretensões e sobrecorrentes advindas desses fenômenos, é necessário estabelecer um modelo preciso do comportamento da linha de transmissão, incluindo a variação dos parâmetros com a frequência e o comportamento a parâmetros distribuídos. Assim, a modelagem do solo é revestida de particular importância em estudos desta natureza. Ademais, o comportamento de grandezas físicas do solo (nomeadamente, resistividade e permissividade) varia de forma significativa com a frequência característica dos distúrbios que solicitam a linha. Esta pesquisa visa avaliar, qualitativa e quantitativamente, as influências das modelagens do solo e da variação com a frequência nos parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão aéreas trifásicas. Considera-se um espectro de frequência compreendido entre 100 Hz a 1 MHz (fenômenos desde curtos circuitos até descargas atmosféricas).

A metodologia utilizada na pesquisa que culminou com a elaboração deste artigo é descrita a seguir. Inicialmente, procede-se à apresentação de uma modelagem eletromagnética, muito difundida na literatura, para estabelecer a resposta de linhas quando submetidas a fenômenos transitórios. Tal modelagem divide o comportamento da linha em dois efeitos: longitudinal (quedas de tensão de naturezas resistiva e indutiva) e transversal (fugas de corrente de naturezas condutiva e capacitiva).

O efeito longitudinal, traduzido pela impedância longitudinal da linha ( $Z_L$ ), sofre influência significativa do solo, uma vez que o mesmo faz parte do caminho de retorno da corrente transitória que submete a linha. Tal influência é processada de duas formas: a profundidade de penetração da corrente no solo e a variação dos parâmetros do solo com a frequência. O efeito do solo em  $Z_L$  é considerado por meio da modelagem elaborada por A. Deri e outros [1].

Por outro lado, para a consideração do efeito transversal, traduzido pela admitância transversal ( $Y_T$ ), normalmente, o solo é modelado como um plano condutor elétrico perfeito (condutividade infinita). Neste estudo, a consistência física de tal modelagem é verificada, mediante a consideração da formulação desenvolvida por M. Nakagawa [2,3].

(\*) Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura, Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170 – Centro – CEP: 36.307-352, Departamento de Engenharia Elétrica, São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil, e-mail: moura@ufsj.edu.br

Para inclusão da variação dos parâmetros do solo (condutividade/resistividade e permissividade elétricas) com a frequência cinco formulações matemáticas (determinadas por meio de medições) são consideradas, quais sejam: H. S. Scott [4]; C. L. Longmire e K. S. Smith [5]; S. Visacro e C. M. Portela [6]; C. M. Portela [7]; e R. Alípio e S. Visacro [8].

## 2.0 - DESENVOLVIMENTOS

As equações diferenciais que permitem determinar, no domínio da frequência, as distribuições espaciais dos fasores de tensão e corrente, amplamente divulgadas na literatura [9], são representadas nas Equações (1) e (2).

$$-\frac{dV}{dx} = Z_L * I \quad (1) \quad -\frac{dI}{dx} = Y_T * V \quad (2),$$

onde:  $V = V(x, \omega)$  e  $I = I(x, \omega)$  são, respectivamente, os fasores de tensão e corrente, sendo  $x$  um ponto qualquer ao longo da linha e  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular ( $f$  é a frequência cíclica);  $Z_L = R + j\omega L$  e  $Y_T = G + j\omega C$  correspondem, respectivamente, à impedância longitudinal e à admitância transversal da linha, sendo  $R$ ,  $L$ ,  $G$  e  $C$  a resistência, a indutância, a condutância e a capacitância (todas por unidade de comprimento). Para linhas aéreas,  $G \equiv 0$ . Nas subseções seguintes descrevem-se as principais características destes parâmetros.

### 2.1 Impedância Longitudinal ( $Z_L$ )

A impedância longitudinal é dividida em três parcelas: i) Impedância interna ( $Z_{int} = R_{int} + j\omega L_{int}$ ) que quantifica o efeito joule ( $R_{int}$ ) e energia magnética armazenada no campo magnético interno ao condutor ( $L_{int}$ ); ii) Impedância externa ( $Z_{ext} = j\omega L_{ext}$ ) que quantifica o efeito do fluxo magnético concatenado entre a superfície do condutor e a interface ar-solo e iii) Impedância do solo ( $Z_{solo} = R_{solo} + j\omega L_{solo}$ ) que quantifica os efeitos resistivo ( $R_{solo}$ ) e indutivo ( $L_{solo}$ ) referentes ao caminho de retorno de corrente pelo solo. Assim sendo,  $Z_L = Z_{int} + Z_{ext} + Z_{solo}$ .

O cálculo de  $Z_{int}$  (e sua dependência com a frequência – efeito pelicular) é amplamente divulgada na literatura, sendo fornecida pela Equação (3), [10,11].

$$Z_{int} = \sqrt{j\omega\mu_{condutor} l(\sigma_{condutor})} * \left( \frac{1}{(2 * \pi * r_{ext})} \right) * \frac{((I_0(\rho_1))(K_1(\rho_0)) + ((K_0(\rho_1))(I_1(\rho_0))))}{((I_1(\rho_1))(K_1(\rho_0)) - ((I_1(\rho_0))(K_1(\rho_1))))} \quad (3),$$

onde:  $\rho_0 = r_{int} \sqrt{j\omega\mu_{condutor} * (\sigma_{condutor})}$ ;  $\rho_1 = r_{ext} \sqrt{j\omega\mu_{condutor} * (\sigma_{condutor})}$ ;  $I_0(\cdot)$  é a função modificada de Bessel de primeira espécie e ordem zero;  $I_1(\cdot)$  é a função modificada de Bessel de primeira espécie e ordem um;  $K_0(\cdot)$  é a função modificada de Bessel de segunda espécie e ordem zero;  $K_1(\cdot)$  é a função modificada de Bessel de segunda espécie e ordem um;  $\mu_{condutor}$  é a permeabilidade magnética do condutor;  $\sigma_{condutor}$  é a condutividade elétrica do condutor;  $r_{int}$  e  $r_{ext}$  são os raios interno e externo do condutor, respectivamente.

Para a determinação de  $Z_{ext}$  e  $Z_{solo}$  considere a Figura 1.  $Z_{ext}$  é determinado pela relação entre o fluxo magnético enlaçado entre a superfície do solo e a interface ar-solo, considerando o solo como condutor elétrico perfeito. Sua expressão matemática é aquela da Equação (4), [9].

$$Z_{ext} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln(D_{ik} / d_{ik}) \quad (4),$$

onde: para  $i \neq k$  (elementos mútuos),  $d_{ik} = \sqrt{dl_{ik}^2 + (H_i - H_k)^2}$  e  $D_{ik} = \sqrt{dl_{ik}^2 + (H_i + H_k)^2}$ , onde, neste caso,  $k'$  corresponde ao condutor imagem do condutor real  $k$ ; para  $i = k$  (elementos próprios),  $d_{ik} = d_{ii} = r_{ext}$  e  $D_{ik} = D_{ii} = 2H_i$ .

Para o cômputo de  $Z_{solo}$  existem diversas formulações divulgadas na literatura. As mais conhecidas são as seguintes:

J. R. Carson [12]; F. Pollaczek [10], M. Nakagawa [2,3]; A. Deri e outros [1] e T. Noda [13]. Em [14,15,16], Moura mostrou que as diferenças entre os resultados obtidos pelas metodologias de cálculo do efeito do solo nos parâmetros de linhas de transmissão mediante aproximação assintótica (Deri e Noda), quando comparados com os decorrentes de metodologias via integração numérica (Carson e Nakagawa), atingem, no máximo, 5 %. De um modo geral, para quaisquer configurações de linhas atualmente utilizadas em sistemas de energia elétrica, as diferenças percentuais não ultrapassam este valor, justificando a utilização de métodos aproximados e de fácil implementação computacional. Por conseguinte, neste artigo o efeito do solo é considerado mediante a metodologia de Deri [1]. A formulação resultante do trabalho de Deri é exatamente a mesma da Equação (4), porém com [1,14]:  $D_{ik} = \sqrt{dl_{ik}^2 + (H_i + H_k + 2p)^2}$  e  $d_{ik} = \sqrt{dl_{ik}^2 + (H_i - H_k)^2}$  quando  $i \neq k$ ; por outro lado, para os elementos próprios,  $D_{ik} = D_{ii} = 2(H_i + p)$  e  $d_{ik} = d_{ii} = r_{ext}$ ;  $p = 1/\sqrt{j\omega\mu_{solo}(\sigma_{solo})}$ , que corresponde à profundidade complexa.

No trabalho original de A. Deri a densidade de corrente de deslocamento no solo não foi considerada. Com o intuito de acrescentar este importante termo (em altas frequências) uma correção é necessária na expressão da profundidade complexa, conforme Equação (5).

$$p = 1 / \sqrt{j \omega \mu_{\text{solo}} (\sigma_{\text{solo}} + j \omega \epsilon_{\text{solo}})} \quad (5)$$

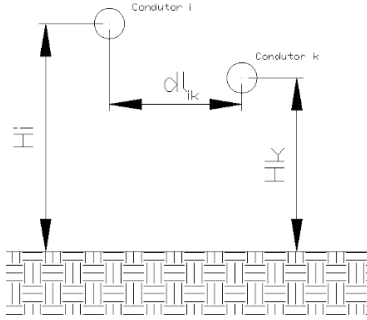


Figura 1 – Geometria genérica de uma linha de transmissão aérea composta por dois condutores ( $i$  e  $k$ ).

## 2.2 Admitância Transversal ( $Y_T$ )

Em 1981, M. Nakagawa apresentou dois trabalhos, baseados no de Carson, onde simultaneamente considera a influência do retorno pelo solo nos parâmetros transversais (e longitudinais) de linhas de transmissão, [2,3]. Todavia, a grande maioria dos estudos considera que para a consideração do efeito do solo nos parâmetros transversais o mesmo pode ser modelado como um condutor elétrico perfeito. Contudo, a despeito de tal fato, neste artigo, os trabalhos de Nakagawa são utilizados para o cômputo de tal efeito.

As Equações (6), (7) e (8) traduzem matematicamente as formulações propostas por Nakagawa. A solução da integral presente na Equação (8) foi realizada via método numérico de Quadratura de Gauss-Legendre.

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} [\ln(D_{ik}/d_{ik}) + M + jN] \quad (6), \quad [Y_T] = j\omega[P]^{-1} \quad (7),$$

$$M + jN = 2 \int_0^\infty \frac{(\delta + \alpha_1) e^{-(h_i + h_k)\delta}}{(\delta + \alpha_1)(\delta/\tau^2 + \alpha_1)} \cos(\delta \cdot dl_{ik}) d\delta \quad (8),$$

onde (com base na Figura 1):  $D_{ik} = \sqrt{dl_{ik}^2 + (H_i + H_k)^2}$  e  $d_{ik} = \sqrt{dl_{ik}^2 + (H_i - H_k)^2}$  para  $i \neq k$ ;  $D_{ii} = 2H_i$  e  $d_{ii} = r_{ext}$  para  $i = k$ ;  $\alpha_1 = \sqrt{\ell^2 + \gamma_1^2 - \gamma_0^2}$ ;  $\gamma_0^2 = -\omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ ;  $\gamma_1^2 = j\omega \mu_0 (\sigma_{\text{solo}} + j\omega \epsilon_{\text{solo}})$ ;  $\tau^2 = \gamma_0^2 / \gamma_1^2$ .

## 2.3 Correção da Variação da Condutividade e Permissividade Elétricas do Solo com a Frequência

Na literatura técnica consultada, acerca da modelagem do solo, duas informações estão bem consolidadas: i) a característica magnética do solo (permeabilidade magnética próxima da do vácuo) não sofre influência da excitação do distúrbio e ii) as características elétricas (condutividade e permissividade elétricas) sofrem influência significativa da frequência do sinal eletromagnético de excitação. Os trabalhos mais citados sobre correção da condutividade e permissividade do solo são os propostos por: H. S. Scott [4]; C. L. Longmire e K. S. Smith [5]; S. Visacro e C. M. Portela [6]; C. M. Portela [7] e o mais recente proposto por R. Alípio e S. Visacro [8]. Vale ressaltar que, destes trabalhos, o único cujas medições foram realizadas diretamente em “solo natural” é aquela da referência [8]. Os demais são oriundos de medições laboratoriais de amostras extraídas do solo [17]. A seguir é apresentada uma breve descrição de cada um destes trabalhos.

### 2.3.1 Metodologia de H. S. Scott

Dos trabalhos presentes nesse artigo, Scott foi o primeiro pesquisador a apresentar uma correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo. Scott propôs sua metodologia por volta de 1967, onde o mesmo estimou a correção da condutividade e permissividade do solo de acordo com a frequência do sinal injetado por amostras em laboratório. Sua estimativa é válida para uma faixa de frequência entre 100 Hz e 1 MHz e sua formulação foi obtida com o auxílio de técnicas avançadas de estatística. Segundo Scott, para a obtenção da condutividade e da permissividade do solo para qualquer frequência é necessário apenas conhecer sua característica condutiva em baixa frequência (100 Hz) e a frequência de interesse. As formulações resultantes de suas medições são apresentadas na Equações (9) e (10).

$$K = 0,028 + 1,098 K_{100} - 0,068 F + 0,036 K_{100}^2 - 0,046 FK_{100} + 0,018 F^2 \quad (9),$$

$$D = 5,491 + 0,946 K_{100} - 1,097 F + 0,069 K_{100}^2 - 0,114 FK_{100} + 0,067 F^2 \quad (10),$$

onde:  $F$  é o logaritmo na base 10 da frequência (em Hz);  $K_{100}$  é o logaritmo na base 10 da condutividade medida em baixa frequência (em mS/m);  $K$  é o logaritmo na base 10 da condutividade corrigida (em mS/m);  $D$  é o logaritmo na base 10 da constante dielétrica corrigida.

### 2.3.2 Metodologia de C. L. Longmire e K. S. Smith

Da mesma maneira que Scott, os pesquisadores Longmire e Smith apresentaram uma formulação de correção dos parâmetros elétricos do solo considerando a frequência de excitação dos campos eletromagnéticos que penetram no mesmo. Eles aproveitaram as medições feitas por Scott, mas utilizaram uma técnica muito diferente para obtenção das equações. Segundo Longmire e Smith, pode-se modelar volumes infinitesimais de solo como redes de resistores e capacitores diferenciais. Traduzindo essa rede equivalente, eles obtiveram as Equações (11) e (12), válidas para a mesma faixa de frequência de Scott.

$$\sigma = \sigma_{100} + 2\pi\epsilon_0 \sum_{n=1}^N \frac{a_n f_n \left(\frac{f}{f_n}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_n}\right)^2} \quad (11) \quad \epsilon_r = \epsilon_\infty + \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{1 + \left(\frac{f}{f_n}\right)^2} \quad (12)$$

onde:  $\sigma_{100}$  é a condutividade medida a 100 Hz;  $f_n = \left(\frac{P}{10}\right)^{1,28} 10^{n-1}$  [Hz]; P é o percentual de água na amostra e pode ser calculada a partir da Equação (13);  $\epsilon_\infty$  é obtido extrapolando a curva proposta por Scott para cálculo de  $\epsilon_r$  para uma frequência muito elevada, da ordem de  $10^{12}$  Hz; segundo [5] esse valor é de 5;  $a_n$  é dado conforme Tabela 1.

$$P = \left( \frac{\sigma_{100}}{8} \cdot 10^{-3} \right)^{\frac{1}{1,54}} \cdot 10 \quad (13)$$

Tabela 1 - Coeficientes para solo universal propostos por L. Longmire e K. Smith, [5].

N	$a_n$	n	$a_n$	n	$a_n$
1	$3,4 \times 10^6$	6	$1,33 \times 10^2$	11	$9,8 \times 10^{-1}$
2	$2,74 \times 10^5$	7	$2,72 \times 10$	12	$3,92 \times 10^{-1}$
3	$2,58 \times 10^4$	8	$1,25 \times 10$	13	$1,73 \times 10^{-1}$
4	$3,38 \times 10^3$	9	4,8		
5	$5,26 \times 10^2$	10	2,17		

### 2.3.3 Metodologia de S. Visacro e C. Portela

É de fundamental importância que dentre as metodologias de correção existam aquelas cujas medições sejam realizadas em solos brasileiros. A primeira metodologia que considera amostras de solos brasileiros é o trabalho proposto pelos pesquisadores Visacro e Portela, [6]. Eles amostraram solos do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais e dessa maneira elaboraram fórmulas para correção da resistividade e permissividade utilizando como variáveis de entrada a resistividade medida em baixa frequência (100 Hz) e a frequência de excitação do distúrbio. Estas formulações, Equações (14) e (15), são válidas para uma faixa de frequência entre 100 Hz e 1 MHz.

$$\rho = \rho_{100} \left( \frac{100}{f} \right)^{0,072} \quad (14) \quad \epsilon_r = 2,34 \cdot 10^{-6} (\rho_{100})^{-0,535} (f)^{-0,597} \quad (15),$$

onde:  $\rho_{100}$  é a resistividade medida a 100 Hz; f é a frequência de excitação;  $\rho$  é a resistividade corrigida;  $\epsilon_r$  é a constante dielétrica corrigida.

### 2.3.4 Metodologia de C. Portela

Após 12 anos da publicação do trabalho anteriormente citado, Portela apresentou um novo trabalho, onde refaz formulações para correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  em função da frequência, [7]. Em seu novo trabalho, gera uma formulação, Equação (16), capaz de abranger fenômenos de frequências mais elevadas (100 Hz a 2 MHz).

$$\sigma \mp j\omega\epsilon = \sigma_{100} + \Delta i \left[ \cot g \left( \frac{\pi}{2} \cdot \alpha_m \right) \pm j \right] \left( \frac{\omega}{2\pi \cdot 10^6} \right)^{\alpha_m} \quad (16)$$

Os parâmetros  $\Delta i$  e  $\alpha_m$  utilizados neste artigo são os considerados, segundo [7], como razoavelmente seguros:  $\Delta i = 11,71$  (mS/m) e  $\alpha_m = 0,706$ .

### 2.3.5 Metodologia de R. Alípio e S. Visacro

Os pesquisadores brasileiros Alípio e Visacro foram pioneiros, segundo a literatura, na formulação de equações oriundas de medições realizadas em solos em seus estados naturais, [8]. Em conformidade com os autores, as medições foram realizadas em diversas regiões do Brasil. A formulação resultante, Equações (17) e (18), é válida na faixa entre 100 Hz e 4 MHz.

$$\rho = \rho_{100} \left\{ 1 + \left[ 1,2 \cdot 10^{-6} \rho_{100}^{0,73} \right] \left[ (f - 100)^{0,65} \right] \right\}^{-1} \quad \epsilon_r = 7,6 \cdot 10^{-3} f^{-0,4} + 1,3 \quad (18)$$

(17)

### 3.0 - RESULTADOS

Com o objetivo de apresentar alguns resultados de interesse aplicado uma linha trifásica real é utilizada como caso base (500 kV). Os principais parâmetros elétricos e geométricos desta linha encontram-se descritos na Tabela 2. Os resultados são apresentados na forma de análise de sensibilidade, ao longo de um espectro de frequência de 100 Hz a 1 MHz, em função de resistividades de solos típicos (100, 1.000, 2.400, 5.000 e 10.000  $\Omega.m$ ).

Tabela 2 – Parâmetros Elétricos e Geométricos da Linha de Transmissão de 500 kV – Caso Base.

Número de Condutores/Fase	4	Altura Condutores Para-Raios	22
Números de Cabos Para-Raios	2	Diâmetro de Condutores fase	29,591 mm
Distância entre condutores	0,457 m	Diâmetro de Condutores Para-Raios	9,14 mm
Altura Fase A	11 m	Distância Horizontal entre Condutores	5 m
Altura Fase B	15,5 m	Distância Horizontal Entre Cabos Fase	7 m
Altura Fase C	11 m	Vão Típico	400 m

Em todos os resultados, apresentados a seguir, as diferenças percentuais são calculadas com base na Equação (19).

$$VP = [(G_{cor} - G_{conv}) / G_{conv}] * 100 \quad (19),$$

onde:  $VP$  é a variação (ou diferença) percentual;  $G_{cor}$  é a grandeza corrigida (de acordo com cada formulação para consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência);  $G_{conv}$  é a grandeza convencional, entendida como aquela grandeza obtida com a consideração dos parâmetros do solo constantes (independentes da frequência) e sem a inclusão da corrente de deslocamento no solo (neste caso, a constante dielétrica do solo é igual a 15). A metodologia de cálculo de “grandezas convencionais” é adotada por diversas plataformas computacionais de simulação de transitórios eletromagnéticos, como por exemplo, a do *Alternative Transients Program* (ATP), [18].

Ademais, todos os resultados associados aos parâmetros da linha são apresentados no domínio dos modos: i) um denominado homopolar (sequência zero) e ii) outro não homopolar (sequências positiva e negativa).

#### 3.1 Impedância Longitudinal ( $Z_L$ ) e Admitância Transversal ( $Y_T$ )

A Figura 2 ilustra o comportamento com a frequência da variação percentual da resistência longitudinal da linha sob estudo, considerando as cinco formulações descritas na seção 2 e um solo de 10.000  $\Omega.m$ . A parte (a) desta figura refere-se ao modo homopolar, enquanto a (b) ao não homopolar. As Figuras 3 e 4 são similares, contudo, descrevem, respectivamente, os comportamentos da indutância longitudinal e capacitância transversal.

Com base nas Figuras 2, 3 e 4 percebe-se a significativa influência da inclusão da variação com a frequência dos parâmetros do solo. As maiores variações percentuais ocorrem para a resistência longitudinal. Tal comportamento é esperado, pois com o aumento da frequência o retorno de corrente pelo solo fica mais próximo da interface ar-solo, diminuindo, assim, a seção transversal de circulação de corrente. Isto explica, também, o aumento deste parâmetro com a frequência e a respectiva diminuição da indutância longitudinal. Observa-se, adicionalmente, que a resistência em altas frequências diminui. Atribui-se a tal fato a importância, nesta faixa de frequência, da densidade de corrente de deslocamento no solo. Vale destacar que as grandes variações percentuais no modo não homopolar da resistência são decorrência do fato do caso “convencional” não levar em consideração a corrente de deslocamento. Assim, pequenas diferenças acarretam grandes variações percentuais. Por conseguinte, as variações percentuais no modo homopolar são mais impactantes em termos práticos.

Por outro lado, o comportamento da capacitância transversal (para os dois modos) é menos sensível à variação dos parâmetros do solo com a frequência, justificando, desta forma, a aproximação de solo ideal (condutor elétrico perfeito), amplamente utilizada na literatura, nos cálculos de tais parâmetros.

Naturalmente, para todas as situações as variações percentuais mais significativas referem-se ao modo homopolar (que corresponde ao modo que inclui o solo). Ademais, destaca-se que para os parâmetros longitudinais as formulações de Portela acarretam maiores variações percentuais, enquanto para o transversal a situação se inverte.

Com o intuito de apresentar uma visão geral das maiores variações percentuais, para cada uma das formulações de variação dos parâmetros do solo com a frequência, bem como a frequência em que tais variações ocorrem, é apresentada a Tabela 3. Nesta tabela são destacadas em amarelo as principais variações percentuais para cada resistividade e em vermelho para a maior resistividade.

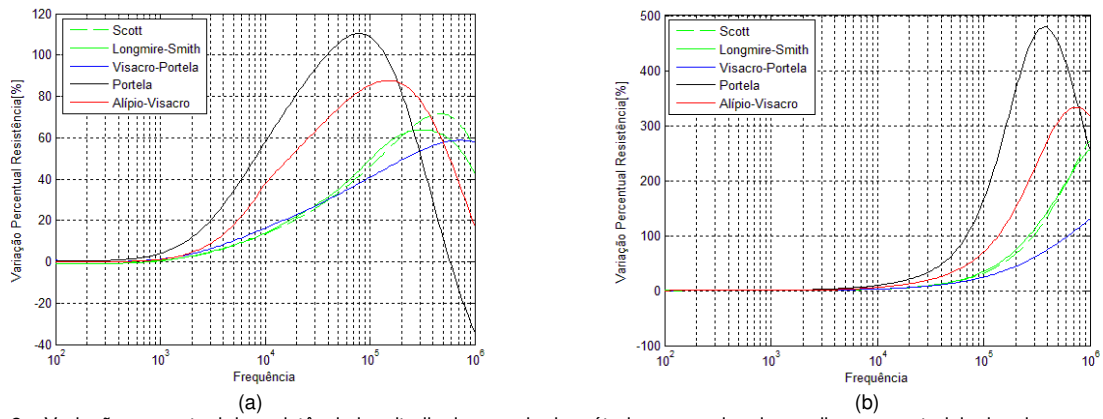


Figura 2 – Variação percentual da resistência longitudinal por meio do método convencional e as diversas metodologias de correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo. Resistividade 10.000  $\Omega$ .m. (a) Componente homopolar. (b) Componente não homopolar.

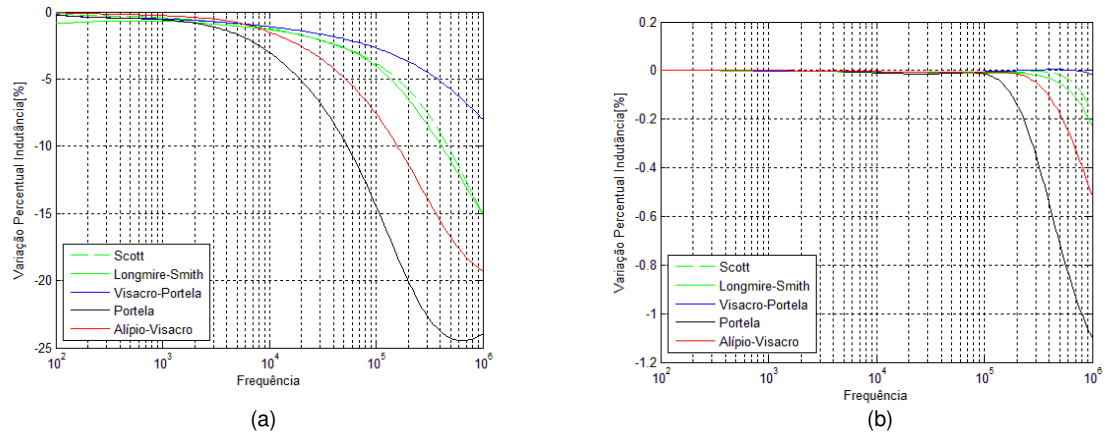


Figura 3 – Variação percentual da indutância longitudinal por meio do método convencional e as diversas metodologias de correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo. Resistividade de 10.000  $\Omega$ .m. (a) Componente homopolar. (b) Componente não homopolar.

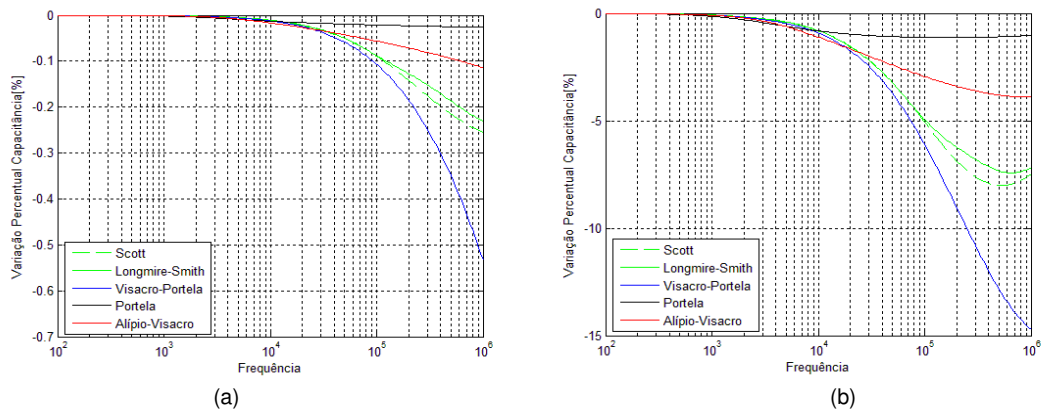


Figura 4 – Variação percentual da capacitância transversal por meio do método convencional e as diversas metodologias de correção de  $\sigma$  e  $\epsilon$  do solo. Resistividade de 10.000  $\Omega$ .m. (a) Componente homopolar. (b) Componente não homopolar.

### 3.2 Comportamento na Frequência de Tensões e Correntes

Em muitas situações práticas é de interesse aplicado conhecer as condições terminais das linhas de transmissão [19,20]. Para tal análise considera-se a Figura 5, onde a parte (a) corresponde à energização da linha com os terminais receptores em aberto, enquanto a (b) com os mesmos em curto-circuito. Um dos terminais transmissores é alimentado por uma fonte de tensão de 1 V (1 p.u.) e os demais são curto-circuitados (em ambos os casos).



Figura 5 – Energização de linha de transmissão em: (a) circuito aberto e (b) curto-circuito. Adaptado de [19].

As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, as respostas no domínio da frequência da tensão no ponto 4 (Figura 3a) quando o mesmo está aberto e da corrente de curto circuito no ponto 1 (ver Figura 3 b).<sup>1</sup> As partes (a) destas figuras referem-se a solos de 1.000  $\Omega.m$ , enquanto a (b) correspondem a solos de 10.000  $\Omega.m$ . As Figuras 8 e 9 são similares às 6 e 7. Porém, apresentam as respectivas variações percentuais.

Percebe-se, claramente, pelas Figuras 6 a 9, e principalmente com base nas Figuras 8 e 9, elevadas variações percentuais entre as tensões e correntes ao longo da frequência. Tais variações são mais significativas à medida que a resistividade do solo (medida em baixa frequência) é maior e para a consideração da formulação de Portela para inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo aborda a questão relativa à influência da consideração da variação das características elétricas do solo (condutividade e permissividade elétricas) com a frequência nos: i) parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão trifásicas aéreas; ii) nos comportamentos na frequência de tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito. De um modo geral, os resultados ilustram que: i) a inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência acarreta impactos significativos nos comportamentos no domínio da frequência das grandezas citadas acima; ii) as maiores diferenças percentuais ocorrem para o modo homopolar (dos parâmetros longitudinais e transversais), aumentam com a resistividade do solo (medida em baixa frequência) e para o espectro superior de frequência; iii) as maiores diferenças percentuais no caso dos parâmetros longitudinais estão associadas à inclusão das formulações de Portela [7]; iv) para o caso de parâmetros transversais as diferenças percentuais não são expressivas (justificando a utilização da aproximação do solo como condutor elétrico perfeito); v) as variações percentuais de tensões e correntes são mais significativas para solos com resistividades mais elevadas e para as formulações de Portela. Considera-se que a principal contribuição deste estudo refere-se às análises de sensibilidade dos parâmetros longitudinais em função da consideração da variação com a frequência (com diferenças expressivas como as relatadas anteriormente).

É merecedor de destaque que as formulações de Portela [7] e de Alípio e Visacro [8] geram resultados razoavelmente próximos (em termos práticos). Isto deve estar associado ao fato de terem sido obtidas a partir de amostras em solos brasileiros. Como Alípio e Visacro validaram experimentalmente suas formulações, por meio de medições em malhas de aterramento, considera-se que tais formulações devem ser utilizadas em estudos de transitórios eletromagnéticos estabelecidos em linhas de transmissão nacionais.

As análises de sensibilidade descritas acima podem causar impactos nas distribuições temporais de sobretensões (atmosféricas e/ou de manobra) que são estabelecidas nas cadeias de isoladores de linhas de transmissão. Os autores estão atualmente trabalhando na determinação de tais distribuições e em futuro próximo submeterão os resultados desta pesquisa.

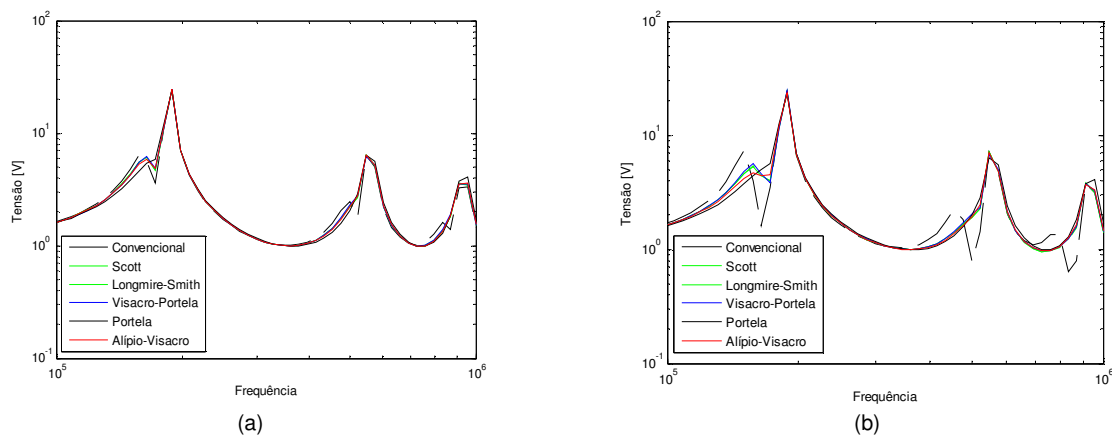
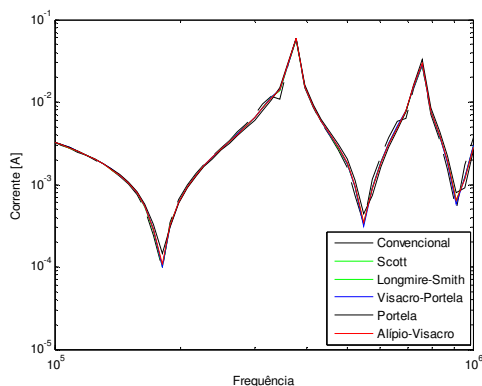


Figura 6 - Resposta a circuito aberto no ponto 4 (Figura 3a). Solos de resistividades de: (a) 1.000  $\Omega.m$  e (b) 10.000  $\Omega.m$ .

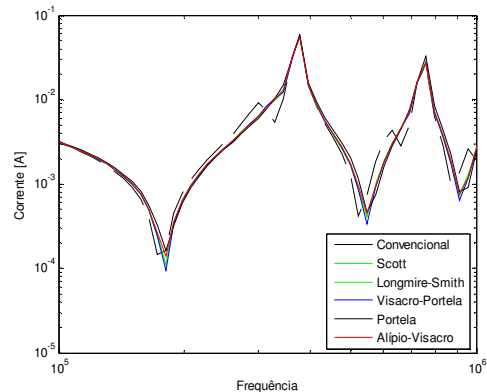
<sup>1</sup> De posse de tais comportamentos, a obtenção dos resultados no domínio do tempo é direta, mediante o uso de integrais de convolução [19]. Todavia, as soluções neste domínio estão fora do escopo deste trabalho.

Tabela 1 – Máxima variação percentual da consideração das características dispersivas do solo para cada metodologia.

Resistividade do Solo [ $\Omega \cdot m$ ]		Maior Diferença Percentual [%] / Frequência de ocorrência					
		Modo Homopolar			Modo Não Homopolar		
		Resistência	Indutância	Capacitância	Resistência	Indutância	Capacitância
100	Scott	2,6 / 43 kHz	-1,12 / 1 MHz	-0,61 / 1 MHz	6,09 / 227 kHz	-0,08 / 1 MHz	-0,01 / 1 MHz
	Longmire-Smith	1,56 / 13 kHz	-1,04 / 1 MHz	-0,64 / 1 MHz	6,02 / 125 kHz	-0,07 / 1 MHz	-0,01 / 1 MHz
	Visacro-Portela	-17,23 / 1 MHz	-2,83 / 75 kHz	-0,42 / 1 MHz	12,11 / 43 kHz	-0,16/378 kHz	-0,01 / 1 MHz
	Portela	14,45 / 500 kHz	-2,34 / 1 MHz	-0,66 / 1 MHz	25,39 / 723 kHz	-0,16 / 1 MHz	-0,01 / 1 MHz
	Alípio-Visacro	-2,27 / 1 MHz	-0,90 / 1 MHz	-0,62 / 1 MHz	4,33 / 345 kHz	-0,06 / 1 MHz	-0,01 / 1 MHz
1000	Scott	15,38 / 415 kHz	-5,38 / 1 MHz	-3,62 / 1 MHz	52,26 / 1 MHz	-0,20 / 1 MHz	0,08 / 1 MHz
	Longmire-Smith	18,05 / 523 kHz	-5,76 / 1 MHz	-3,50 / 1 MHz	57,21 / 954 kHz	-0,21 / 1 MHz	0,08 / 1 MHz
	Visacro-Portela	12,26 / 113 kHz	-4,81 / 1 MHz	-3,62 / 1 MHz	41,39 / 573 kHz	-0,19 / 1 MHz	0,08 / 1 MHz
	Portela	53,25 / 130 kHz	-12,42 / 660 kHz	-1,05 / 499 kHz	145,11/344 k Hz	-0,72 / 1 MHz	0,03 / 1 MHz
	Alípio-Visacro	23,32 / 217 kHz	-6,94 / 1 MHz	-2,78 / 1 MHz	62,83 / 601 kHz	-0,30 / 1 MHz	0,06 / 1 MHz
2400	Scott	31,35 / 500 kHz	-8,52 / 1 MHz	-5,48 / 1 MHz	105,4 / 1 MHz	-0,20 / 1 MHz	-0,15 / 1 MHz
	Longmire-Smith	34,10 / 396 kHz	-9,13 / 1 MHz	-4,96 / 1 MHz	106,23 / 955 kHz	-0,25 / 1 MHz	-0,13 / 1 MHz
	Visacro-Portela	25,24 / 378 kHz	-6,17 / 1 MHz	-6,92 / 1 MHz	72,33 / 1 MHz	-0,13 / 1 MHz	-0,18 / 1 MHz
	Portela	74,96 / 99 kHz	-17,32 / 601 kHz	-1,10 / 300 kHz	246,37 / 345 kHz	-0,90 / 1 MHz	-0,03 / 1 MHz
	Alípio-Visacro	44,16 / 189 kHz	-11,42 / 1 MHz	-3,45 / 1 MHz	130,03 / 629 kHz	-0,41 / 1 MHz	-0,09 / 1 MHz
5000	Scott	50,19 / 499 kHz	-11,72 / 1 MHz	-6,81 / 793 kHz	177,19 / 1 MHz	-0,19 / 1 MHz	-0,21 / 1 MHz
	Longmire-Smith	49,33 / 329 kHz	-12,09 / 1 MHz	-6,24 / 954 kHz	169,77 / 1 MHz	-0,24 / 1 MHz	-0,19 / 1 MHz
	Visacro-Portela	41,13 / 573 kHz	-7,2 / 1 MHz	-10,67 / 1 MHz	103,24 / 1 MHz	-0,07 / 1 MHz	-0,33 / 1 MHz
	Portela	93,30 / 86 kHz	-21,18 / 601 kHz	-1,12 / 217 kHz	357,37 / 344 kHz	-1,03 / 1 MHz	-0,03 / 1 MHz
	Alípio-Visacro	65,73 / 164 kHz	-15,51 / 1 MHz	-3,75 / 1 MHz	218,48 / 690 kHz	-0,47 / 1 MHz	-0,11 / 1 MHz
10000	Scott	71,52 / 476 kHz	-14,93 / 1 MHz	-8,02 / 523 kHz	272,67 / 1 MHz	-0,17 / 1 MHz	-0,26 / 1 MHz
	Longmire-Smith	63,83 / 314 kHz	-15,04 / 1 MHz	-7,43 / 659 kHz	256,60 / 1 MHz	-0,23 / 1 MHz	-0,23 / 1 MHz
	Visacro-Portela	58,77 / 723 kHz	-7,99 / 1 MHz	-14,71 / 1 MHz	129,93 / 1 MHz	-0,02 / 1 MHz	-0,53 / 1 MHz
	Portela	110,27 / 78 kHz	-24,48 / 629 kHz	-1,13 / 172 kHz	479,06 / 378 kHz	-1,10 / 1 MHz	-0,03 / 1 MHz
	Alípio-Visacro	87,64 / 149 kHz	-19,24 / 1 MHz	-3,89 / 870 kHz	333,18 / 757 kHz	-0,52 / 1 MHz	-0,11 / 1 MHz



(a)



(b)

Figura 7 - Resposta a curto-circuito no ponto 1 (Figura 3b). Solos de resistividades de: (a) 1.000  $\Omega \cdot m$  e (b) 10.000  $\Omega \cdot m$ .



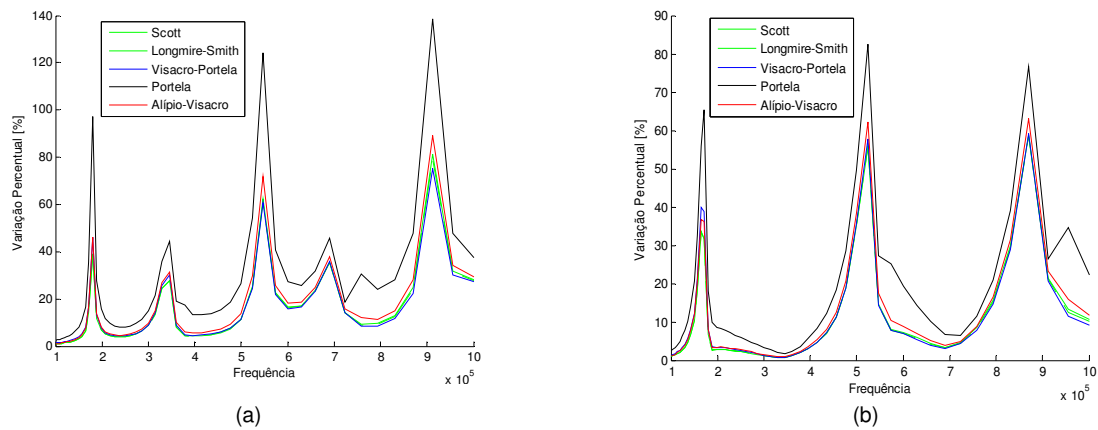


Figura 8 – Variações percentuais de: (a) corrente de curto-circuito e da (b) tensão de circuito aberto no domínio da frequência. Solo de resistividade medida em baixa frequência igual a 1.000  $\Omega$ .m.

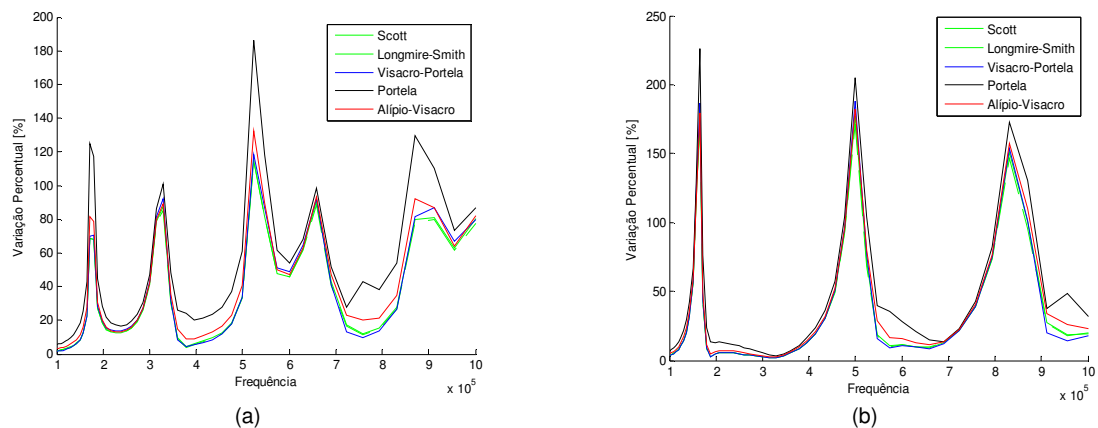


Figura 9 – Variações percentuais de: (a) corrente de curto-circuito e da (b) tensão de circuito aberto no domínio da frequência. Solo de resistividade medida em baixa frequência igual a 10.000  $\Omega$ .m.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Deri, G. Teva, A. Semlyen and A. Castanheira, "The Complex Ground Return Plane – A Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return," *IEEE Power Apparatus and Systems*, pp. 3686 - 3693, 1981.
- [2] M. Nakagawa, "Admittance Correction Effects of a Single Overhead Line," *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vols. 1, no. 3, pp. 1154-1161, 1981.
- [3] M. Nakagawa, "Further Studies on Wave Propagation Along Overhead Transmission Lines: Effects of Admittance Correction," *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vols. 1, no. 7, pp. 3626-3633, 1981.
- [4] H.S. Scott, "Dielectric Constant and Electrical Conductivity Measurements of Moist Rocks: A New Laboratory Method," *J. Geophys. Res.*, Vol. 1, no. 20, pp. 5101-5115, 1967.
- [5] C.L. Longmire e K.S. Smith, "Universal Impedance for Soil," *Defense Nuclear Agency*, 1975.
- [6] S. Visacro and C. Portela, "Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems," *Proceedings of Sym. High Voltage Engineering, Braunschweig, Alemanha*, 1987.
- [7] C. Portela, "Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior," *Proceedings of the IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Society*, pp. 1004-1009, 1999.
- [8] R.S. Alípio, S. Visacro, "Frequency Dependence of Soil Parameter: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, pp. 132-139, 2013.
- [9] L.C. Zanetta, *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, São Paulo: EDUSP, 2003.
- [10] F. Pollaczek, "Über das Feld einer unendlich langen wechsel stromdurchflossenen Einfachleitung," *ENT, Heft 9, Band 3*, pp. 339 - 3359, 1926.
- [11] H.B. Dwight, "Skin Effect in Tubular and Flat Conductors," *AIEE*, vol. 19, pp. 1379 - 1403, 1918.
- [12] J.R. Carson, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return," *Bell System Technical Journal*, vol. 05, pp. 539 - 554, 1926.
- [13] T. Noda, "A Double Logarithmic Approximation of Carson's Ground-Return Impedance," *IEEE Tran. on Power Delivery*, vol. 1, nº 1, 2006.
- [14] R.A.R. Moura, *Comparação de Formulações para Inclusão do Efeito do Solo no Comportamento Transitório de Linhas de Transmissão*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), 2014.
- [15] R.A.R. Moura, M. A. O. Schroeder, A.T. Lobato, P.H.L. Menezes e L.C. Nascimento, "Influence of the Soil and Frequency Effects to Evaluate Atmospheric Overvoltages in Overhead Transmission Lines Part I: The Influence of the Soil in the Transmission Lines Parameters," *ICAE - International Conference on Atmospheric Electricity, Norman - USA*, 2014.
- [16] S.M.M. Lúcio, R.A.R. Moura, M.A.O. Schroeder, "Propagação de Surtos Atmosféricas em Linhas de Transmissão: Ênfase no Efeito da Variação dos Parâmetros do Solo com a Frequência". XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, 2011.
- [17] A.G. Pedrosa, R.S. Alípio, M.A.O. Schroeder, R.K. Oliveira, "Estudo Comparativo entre Formulações de Medição de Variação da Condutividade e da Permissividade de Solos Típicos com a Frequência". XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009, Recife, 2009.
- [18] ATP Alternative Transients Program Rule Book, Leuven: K. U. Leuven EMTP Center, 1987.

- [19] B. Gustavsen, "Validation of Frequency-Dependent Transmission Line Models," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 925 - 933, 2005.
- [20] B. Gustavsen e A. Semlyen, "Application of Vector Fitting to State Equation Representation of Transformers for Simulation of Electromagnetic Transients," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 3, pp. 834 - 842, 1998.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura:** nasceu em Pará de Minas – MG, em março de 1990. Possui Graduação e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). É professor assistente do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) da Universidade Federal de São João del-Rei. É membro do Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI), cadastrado na base do CNPq. Atua nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas, Coordenação de Isolamento.

**Marco Aurélio de Oliveira Schroeder:** nasceu em Cataguases-MG, em novembro de 1968. Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP) e Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). É líder do Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI), cadastrado na base do CNPq, e Coordenador do Laboratório Integrado de Pesquisas Eletromagnéticas (LAIPE) do DEPEL/UFSJ. Atua nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos, Descargas Atmosféricas, Técnicas de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento.

**Antônio Carlos Siqueira de Lima:** nasceu no Rio de Janeiro-RJ, em maio de 1971. Possui Graduação, Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente é professor associado da UFRJ/COPPE. Tem experiência em Engenharia Elétrica, com ênfase na área de Transmissão da Energia Elétrica e Modelagem de Equipamentos Elétricos, atuando principalmente nos seguintes temas: transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia, modelagem de linhas de transmissão e cabos subterrâneos/submarinos, métodos de solução de redes elétricas.

**Luiz Carlos do Nascimento:** nasceu em São Paulo-SP, em abril de 1980. Possui Graduação em Engenharia Elétrica e Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). É professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). É membro do Grupo de Alta Tensão e Coordenação de Isolamento (GATCI), cadastrado na base do CNPq, e Chefe do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL/UFSJ). Atua nas seguintes áreas: Planejamento e operação de Sistemas Elétricos de Potência.