



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

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

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**PROPAGAÇÃO DE SURTOS ATMOSFÉRICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO: ÊNFASE NO EFEITO DA
VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA**

Simone M. M. Lúcio(*)
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
PPGEL - UFSJ / CFFET-MG

Rodolfo A. R. Moura
Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica
UFSJ

Marco A. O. Schroeder
Departamento de Engenharia
Elétrica
DEPEL – UFSJ

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a influência da consideração da variação com a frequência da condutividade e permissividade elétricas do solo no cálculo dos parâmetros longitudinais de uma linha de transmissão aérea. São utilizadas quatro metodologias de cálculo que computam o efeito do solo variando com a frequência. Os resultados obtidos ilustram que a impedância característica e a constante de propagação da linha podem ser sensivelmente menores que os valores obtidos quando se considera σ e ϵ do solo constantes, dependendo da metodologia adotada para a consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência. Ademais, indicam que as diferenças se acentuam para solos de maiores valores de resistividade.

PALAVRAS-CHAVE

Efeito do solo, Variação com a frequência, Profundidade complexa, Transitórios eletromagnéticos, Linhas de transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Um aspecto essencial no estudo e simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão (LT's) é a modelagem adequada do solo para a determinação das grandezas elétricas das mesmas. Os modelos matemáticos das linhas são cada vez mais complexos, porém é importante representar adequadamente a condutividade (σ) e o produto da frequência angular do sinal (ω) incidente no solo pela permissividade elétrica do mesmo (ϵ).

Entretanto, as considerações feitas pela maior parte dos procedimentos e metodologias de cálculo não inclui a variação dos parâmetros elétricos σ e ϵ com a frequência, mantendo-os constantes ao longo de todo o espectro característico. Tais considerações não são fisicamente consistentes, pois são válidas somente para os casos analisados em baixa frequência, podendo originar um modelo impróprio do solo para as mais diversas aplicações, principalmente para fenômenos transitórios (rápidos e altas frequências), como no caso de ocorrência de descargas atmosféricas e solos com altos valores de resistividade. Portanto, torna-se fundamental para o estudo completo dos transitórios eletromagnéticos em LT's a determinação do comportamento de tais parâmetros de forma mais próxima possível da realidade.

Este trabalho tem por objetivo principal ilustrar os efeitos nos resultados de simulação dos parâmetros longitudinais de uma linha de transmissão monofásica quando é incluída a dependência dos parâmetros do solo com a frequência. Sob a mesma consideração, também são avaliadas duas importantes grandezas que caracterizam o comportamento de uma LT, a impedância característica e a constante de propagação. É objetivo também incitar uma discussão sobre a possibilidade de definição de uma metodologia ideal de cálculo dos parâmetros elétricos do

solo dependentes da frequência, pois este trabalho utiliza quatro metodologias (1), (2), (3) e (4) na obtenção dos resultados, e foi possível observar que existem diferenças nos resultados obtidos por metodologias distintas.

Na seção 2 deste trabalho é descrita de maneira sucinta as quatro metodologias adotadas para o cálculo da condutividade e permissividade elétricas do solo dependentes da frequência. Na seção 3 são apresentadas as formulações adotadas para o cálculo da impedância longitudinal da linha, com suposições relativas à geometria da linha e à propagação dos campos eletromagnéticos. Na seção 4 são apresentados resultados de simulação que contemplam indutância e resistência de uma linha monofásica por unidade de comprimento, bem como impedância característica e constante de propagação. Tais resultados ilustram os efeitos da inclusão da dependência dos parâmetros do solo com a frequência. Ao fim, na seção 5, são apresentadas as principais conclusões e implicações de ordem prática deste trabalho.

2.0 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA

Um dos principais pilares de um estudo adequado dos fenômenos transitórios em sistemas elétricos é uma representação apropriada dos parâmetros longitudinais da linha de transmissão, em que o comportamento eletromagnético do solo possui fundamental importância. Tal comportamento é caracterizado pelos seguintes parâmetros: permeabilidade magnética (μ), permissividade elétrica (ϵ) e condutividade elétrica (σ). Entretanto, as considerações feitas pela maior parte dos procedimentos e metodologias de cálculo não inclui a variação dos parâmetros elétricos σ e ϵ do solo com a frequência. Para ocorrências em baixas frequências a caracterização do solo, ou seja, sua condutividade e permissividade, já são satisfatoriamente abordadas na literatura. Normalmente, a permissividade é desconsiderada e a resistividade ($1/\sigma$) é medida na frequência próxima de 100 Hz (5). Tal consideração é fisicamente consistente, pois em baixas frequências a corrente de deslocamento pode ser desprezada e, assim, a composição de corrente no solo considera apenas a parcela da corrente de condução. Por outro lado, quando o aterramento é submetido a fenômenos impulsivos como no caso de ocorrência de descargas atmosféricas, a corrente de deslocamento não pode ser negligenciada e os parâmetros eletromagnéticos do solo variam significativamente com a frequência, fazendo com que as correntes de condução e deslocamento também variem.

2.1 Descrição das metodologias de cálculo de σ e ϵ do solo variando com a frequência

Esta seção apresenta as quatro metodologias de cálculo da condutividade e da permissividade de solos em função da frequência utilizadas neste trabalho, formuladas por Longmire (1), Portela (2), Scott (3) e Visacro (4). Existem na literatura outras formulações, mas que não atendem as características deste trabalho por motivos diversos, como por exemplo, o espectro de frequência utilizado ser da ordem de GHz, o que foge ao escopo deste estudo, já que a faixa de interesse é a característica de descargas atmosféricas.

2.1.1 Metodologia segundo Longmire

Uma formulação universal para a impedância do solo foi proposta por C. L. Longmire e K. S. Smith (1), baseado na idéia de que cada elemento de volume do solo pode ser representado por uma rede de resistores e de capacitores. O espectro de frequência que é válido para a formulação está entre 100 Hz e 1 MHz. As equações desenvolvidas são:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{1 + (f/f_n)^2} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_i + 2\pi\epsilon_0 \cdot \sum_{n=1}^N a_n f_n \frac{(f/f_n)^2}{1 + (f/f_n)^2} \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2) tem-se que: $\epsilon_\infty = 5$, $f_n = (P/10)^{1,28} \times 10^{n-1}$ Hz, $\sigma_i = 8 \times 10^{-3} (P/10)^{1,54}$ mho/m (P é ajustável segundo o valor da resistividade do solo em baixa frequência) e a_n assume os valores da Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes para solo universal

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	$2,72 \times 10^{-2}$	12	$3,92 \times 10^{-1}$
3	$2,58 \times 10^4$	8	$1,25 \times 10^{-2}$	13	$1,73 \times 10^{-1}$
4	$3,38 \times 10^3$	9	4,8		
5	$5,26 \times 10^2$	10	2,17		

2.1.2 Metodologia segundo Portela

Carlos Portela (2) desenvolveu procedimentos para medir e modelar parâmetros eletromagnéticos do solo no domínio da frequência. Este trabalho é adequado para estudo do comportamento do solo submetido a transitórios típicos de descargas atmosféricas. O cálculo estimado dos parâmetros do solo são realizados da seguinte forma:

$$\sigma(\omega) \pm j\omega\epsilon(\omega) = \sigma_0 + \Delta i \left[\cot \text{ang} \left(\frac{\pi}{2} \alpha_m \right) \mp j \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \times 10^6} \right)^{\alpha_m} \quad (3)$$

Na equação (3) tem-se que: $\sigma(\omega)$ é a condutividade do solo (S/m), $\epsilon(\omega)$ é a permissividade do solo (F/m), ω é a frequência angular $2\pi f$ (rad/s) e σ_0 é a condutividade elétrica do solo medida em baixa frequência (S/m).

Os parâmetros α_m e Δi são do modelo do solo e definem a variação dos parâmetros σ_{solo} e ϵ_{solo} com a frequência e são necessários para definir valores razoáveis da condutividade e permissividade. Os valores utilizados neste presente trabalho foram: $\alpha_m = 0,706$ e $\Delta i = 11,71$ (mS/m), que são valores razoavelmente seguros, segundo (2) .

2.1.3 Metodologia segundo Scott

James H. Scott (3) desenvolveu um trabalho para estimar a variação da condutividade e da permissividade de solos com a frequência, em que a condutividade e a permissividade de solos e rochas para a faixa de frequência de 100 Hz a 1 MHz foram estimadas baseando-se em valores de condutividade obtidos a partir de valores de resistividade medidas em campo, juntamente com correlação estatística de três parâmetros obtidos em laboratório: frequência, condutividade a 100 Hz e condutividade de solos e rochas obtidos por meio de medições. As formulações obtidas com esta metodologia são:

$$K = 0,028 + 1,098K_{100} - 0,068F + 0,036K_{100}^2 - 0,046FK_{100} + 0,018F^2 \quad (4)$$

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

Nas equações (4) e (5) tem-se que: k é o \log_{10} da condutividade (mS/m), k_{100} é o \log_{10} da condutividade (mS/m) a 100 Hz, F é o \log_{10} da frequência (Hz) e D é o \log_{10} da constante dielétrica.

2.1.4 Metodologia segundo Visacro

A metodologia proposta por Visacro (4) é similar à adotada por Scott (3), toma como base a condutividade medida a 100 Hz, teor de umidade e frequência para estimar a permissividade e condutividade de solos para todo o espectro de frequência. As formulações são as seguintes:

$$\rho \cong \rho_0 \left(\frac{100}{f} \right)^{0,072} \quad (6)$$

$$\epsilon_r \cong 2,34 \times 10^6 (\rho_0)^{-0,535} f^{-0,597} \quad (7)$$

Nas equações (6) e (7) tem-se que: ρ e ϵ_r são, respectivamente, a resistividade e a permissividade relativa na frequência (f) de interesse e ρ_0 é a resistividade medida em baixa frequência (100 Hz).

3.0 - METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS LONGITUDINAIS DA LINHA

Algumas suposições relativas à geometria da linha são necessárias para a obtenção das formulações que calculam os parâmetros elétricos da linha de transmissão, tais como considerar a superfície do solo plana; considerar o cabo paralelo ao solo, distância entre condutor e solo muito maior que o raio do condutor e o comprimento do condutor muito maior que a altura do mesmo em relação ao solo.

Considerando as suposições descritas acima, por meio da manipulação das equações de Maxwell, é possível encontrar a representação complexa da impedância longitudinal da linha como sendo:

$$Z = R + j\omega L \quad (8)$$

A impedância longitudinal da linha é composta por três parcelas distintas:

$$Z = Z_{\text{int}} + Z_{\text{ext}} + Z_{\text{solo}} \quad (9)$$

Os tipos de contribuição da impedância podem ser dissociados em parcelas resistivas e indutivas. O efeito resistivo é composto por duas parcelas, uma associada ao campo eletromagnético interno ao condutor (R_{int}) e outra à contribuição do campo eletromagnético no solo (R_{solo}):

$$R = R_{\text{int}} + R_{\text{solo}} \quad (10)$$

O efeito indutivo é composto por três parcelas, a primeira associada ao campo eletromagnético interno ao condutor (L_{int}), a segunda ao campo eletromagnético externo ao condutor (L_{ext}) no ar e a terceira à contribuição do solo no retorno de corrente (L_{solo}):

$$L = L_{\text{int}} + L_{\text{ext}} + L_{\text{solo}} \quad (11)$$

A resistência e indutância internas por unidade de comprimento (R_{int} e L_{int}) variam com a frequência devido ao efeito pelicular. São obtidas mediante o quociente entre campo elétrico longitudinal na superfície do condutor pela

corrente que flui no interior do mesmo, e dependem essencialmente de parâmetros elétricos do condutor e de características físicas, como raio interno e externo. A formulação desta parcela da impedância (Z_{int}) utiliza as funções modificadas de Bessel de primeira e segunda espécies (6).

Para o cálculo da indutância externa (L_{ext}) é utilizado o método das imagens, supondo o solo um condutor perfeito. Como é sabido que o solo não é um condutor perfeito, pois possui condutividade finita, as outras parcelas da impedância longitudinal (R_{solo} e L_{solo}) são encontradas pelo método das imagens complexas proposto por Deri (7), onde o sistema físico real é substituído por um sistema equivalente. Esse método consiste na concepção de um plano complexo de retorno de corrente pelo solo. Este plano possui condutividade infinita e está situado abaixo do solo a uma distância igual à profundidade complexa (P). O efeito do solo subjacente é substituído por condutores imagens posicionados de forma simétrica em relação aos condutores reais e a distância em que os condutores imagens estão em relação à superfície do solo está relacionado com o parâmetro P , que é a profundidade complexa de penetração das ondas eletromagnéticas no solo. A partir do conceito do plano complexo obtêm-se fórmulas simples para o cálculo das parcelas de resistência e indutância do solo (8).

A fórmula que fornece a profundidade complexa P é proporcional aos parâmetros elétricos do solo (μ , σ e ϵ) é:

$$P = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}} \quad (12)$$

Para a consideração da variação da condutividade e da permissividade elétricas do solo com a frequência, a Eq. 12 é reescrita da seguinte forma:

$$P = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu(\sigma(\omega) + j\omega\epsilon(\omega))}} \quad (13)$$

4.0 - RESULTADOS

Nesta seção são apresentados dois tipos de resultados para avaliação da influência da inclusão da variação dos parâmetros elétricos solo com a frequência. Na seção 4.1 são ilustrados gráficos dos resultados das parcelas resistivas e indutivas e na seção 4.2 são calculados os valores de impedância característica e constante de propagação. Para tanto, foram desenvolvidas diversas simulações computacionais, que permitiram uma série de análises de sensibilidade. O espectro de frequência utilizado está entre 100 Hz e 1 MHz, pois este intervalo corresponde às frequências típicas dos surtos a que são submetidas as linhas aéreas, que abrange desde curto-circuitos até descargas atmosféricas. Foram considerados os valores típicos de resistividade do solo brasileiro (de acordo com seu relevo e constituição físico-química): 100, 500, 1.000, 2.400, 5.000 e 10.000 $\Omega.m$. A configuração simulada consiste em um modelo de linha de transmissão monofásica rural da CEMIG, com retorno pela terra, nível de tensão de 19,92 kV da fase para terra (vãos típicos de 150 m). O cabo fase é do tipo CAA Quail, altura total de 14 m e raio externo de 5,05 mm.

4.1 – Parcelas Resistivas e Indutivas

Os resultados obtidos no cálculo destes parâmetros estão ilustrados nas Figuras 1 a 4, que expõem a contribuição do efeito do solo no valor total da resistência e da indutância longitudinais.

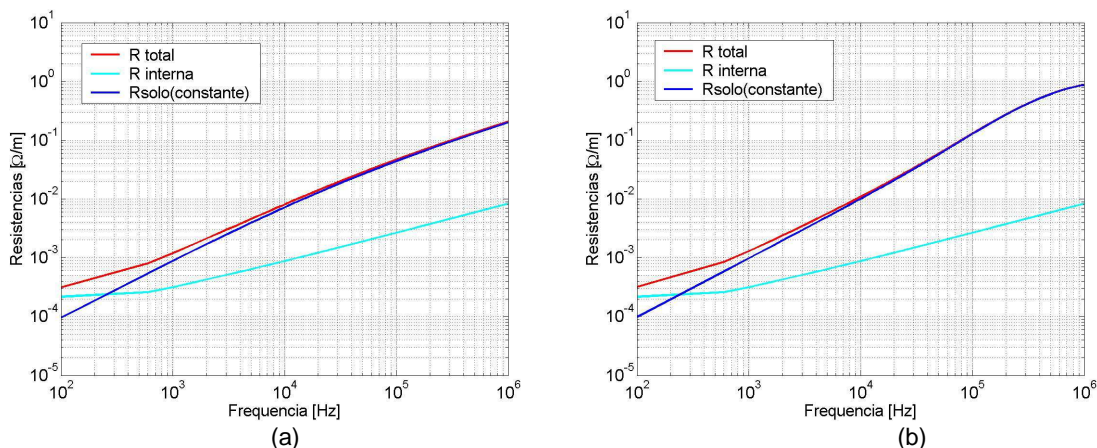


FIGURA 1 – Gráficos da parcela resistiva da impedância longitudinal. Resistência total, interna e do solo (considerando σ e ϵ do solo constantes). a) solo com resistividade de 100 $\Omega.m$ e b) solo com resistividade de 10.000 $\Omega.m$.

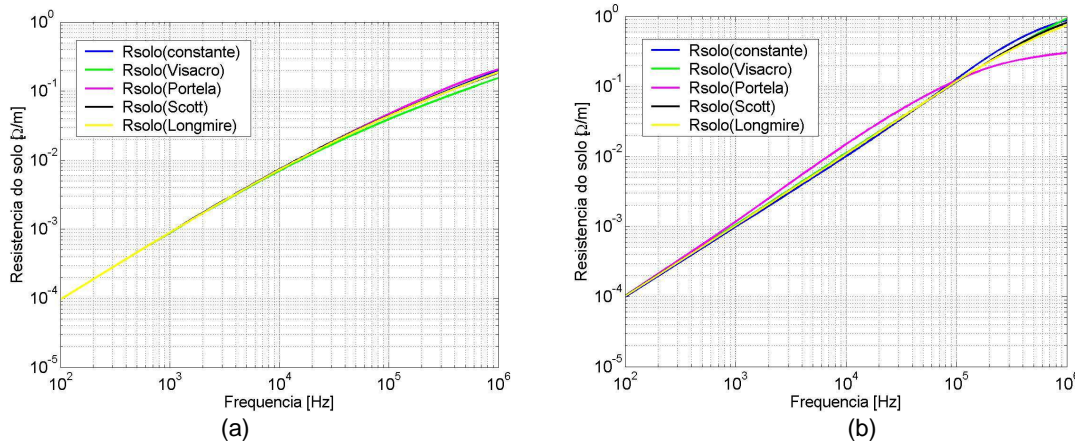


FIGURA 2 – Gráficos da resistência do solo. Comparação entre os resultados obtidos com as metodologias de cálculo e a consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes. a) solo com resistividade de $100 \Omega.m$ e b) solo com resistividade de $10.000 \Omega.m$.

Os resultados ilustrados na Figura 1 mostram que a contribuição do solo na parcela resistiva da impedância longitudinal aumenta com a frequência. Abaixo de 1 kHz a contribuição da resistência interna é maior que a do solo, com o aumento da frequência a contribuição do solo passa a ser mais significativa. Na Figura 2 é feita uma comparação entre os resultados de resistência do solo com e sem a consideração dos parâmetros do solo variando com a frequência. Para solos de maior resistividade (Fig. 2-b), a metodologia de Portela (2) fornece uma resistência do solo 15% menor que as demais.

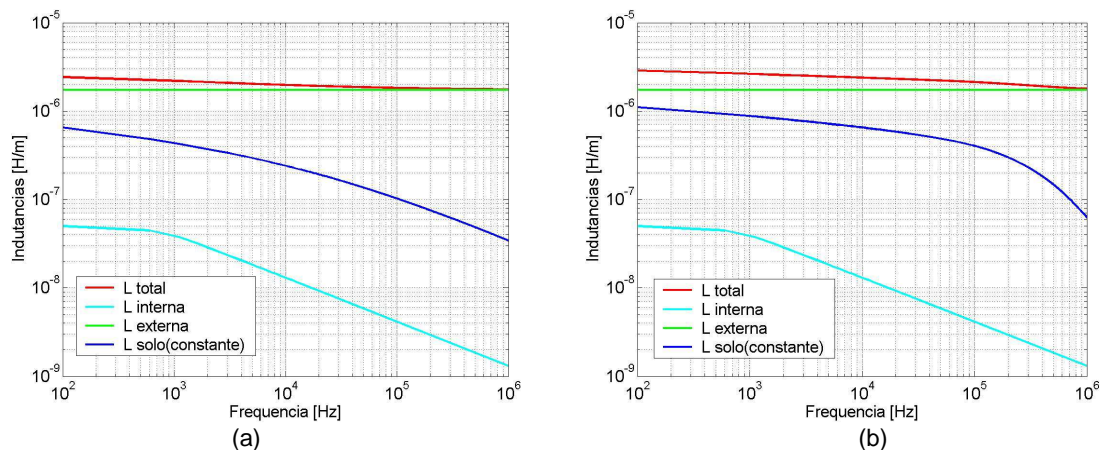


FIGURA 3 – Gráficos da parcela indutiva da impedância longitudinal. Indutância total, interna e do solo (considerando σ e ϵ do solo constantes). a) solo com resistividade de $100 \Omega.m$ e b) solo com resistividade de $10.000 \Omega.m$.

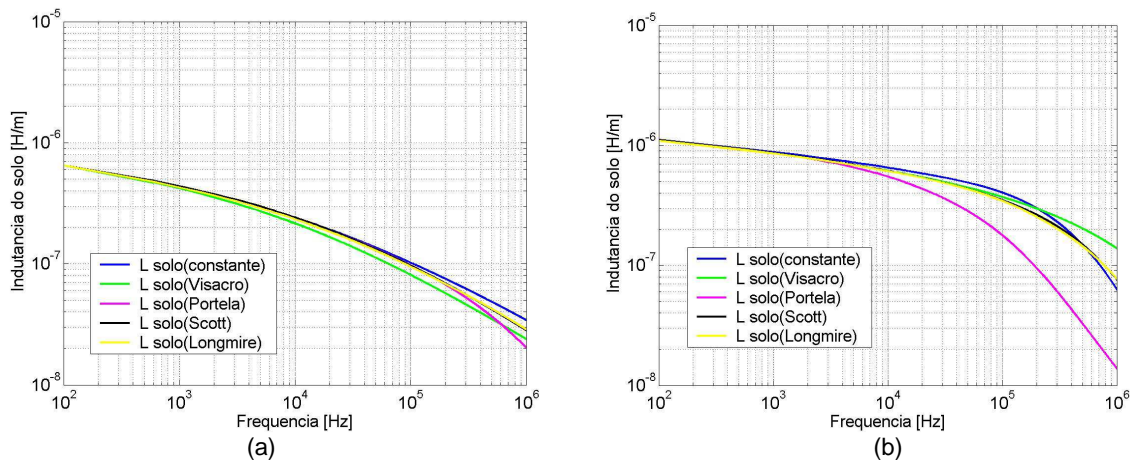


FIGURA 4 – Gráficos indutância do solo. Comparação entre os resultados obtidos com as metodologias de cálculo e a consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes. a) solo com resistividade de $100 \Omega.m$ e b) solo com resistividade de $10.000 \Omega.m$.

A Figura 3 representa as parcelas indutivas da impedância longitudinal. É possível observar que, semelhante ao comportamento da resistência do solo, a indutância do solo é maior em altas frequências em solos de maior resistividade. Por outro lado, diminui com o aumento da frequência. Já na Figura 4 é possível observar a diferença entre as curvas da indutância do solo obtidas pelas quatro metodologias abordadas neste trabalho e a curva obtida com a consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes. Para solos de baixa resistividade o comportamento das curvas é semelhante, com diferenças significativas somente próximo de 1 MHz (Fig 4-a). Já em solos de alta resistividade os resultados começam a se diferenciar a partir de 10 kHz, sendo que apenas a metodologia de Portela obtém valores menores que a consideração de σ e ϵ do solo constantes em altas frequências.

4.2 – Impedância Característica e Constante de Propagação

A impedância característica e a constante de propagação são duas grandezas importantes na caracterização do comportamento transitório de uma linha de transmissão.

A impedância característica Z_C é calculada pela seguinte relação:

$$Z_C = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad (14)$$

Porém, a admitância transversal $(G + j\omega C)$ é reduzida ao termo $j\omega C$, porque a condutância é desprezada, pois o condutor está imerso no ar, que é considerado um bom dielétrico. De acordo com os resultados apresentados em (9) e (10), a capacitância transversal é calculada satisfatoriamente na condição de solo ideal. As figuras 5 e 6 ilustram os resultados de Z_C (módulo e ângulo).

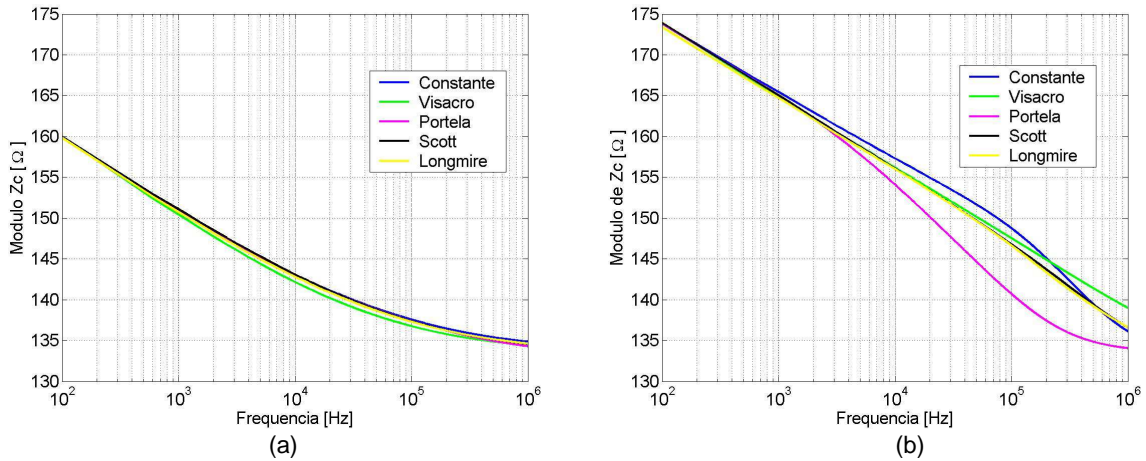


FIGURA 5 – Gráficos do módulo da impedância característica. Comparação entre os resultados obtidos com as metodologias de cálculo e a consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes. a) solo com resistividade de 100 Ω.m e b) solo com resistividade de 10.000 Ω.m.

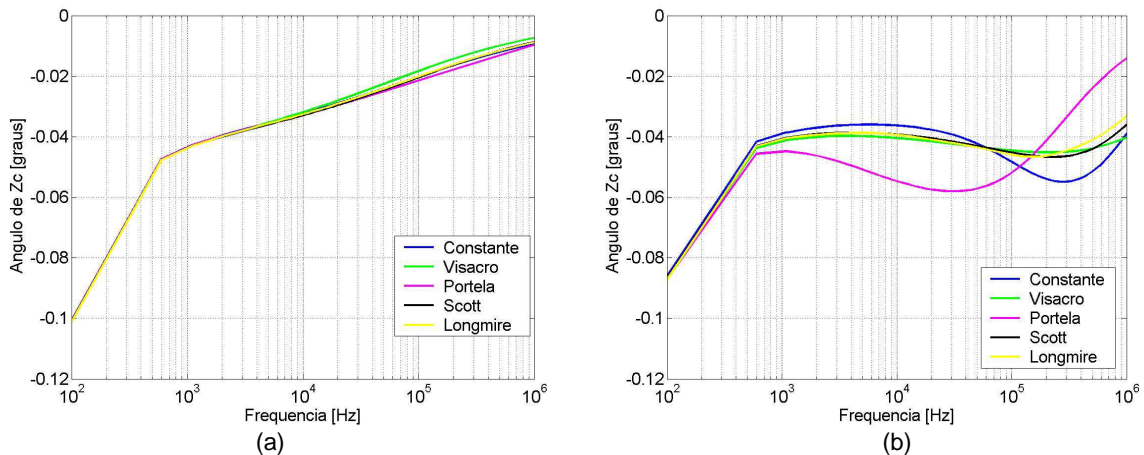


FIGURA 6 – Gráficos do ângulo da impedância característica. Comparação entre os resultados obtidos com as metodologias de cálculo e a consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes. a) solo com resistividade de 100 Ω.m e b) solo com resistividade de 10.000 Ω.m.

O comportamento de Z_C também varia com a resistividade do solo, como mostra a Figura 5. Além disso, em solo de maior resistividade, os módulos de Z_C obtidos pelas metodologias apresentaram comportamento diferenciado em altas frequências, sendo que com exceção da metodologia de Portela (2), todas as outras apresentaram valores maiores do que os obtidos com a consideração de σ e ϵ do solo constantes, na frequência próxima de 1 MHz. A Figura 6 apresenta as curvas da variação do ângulo de Z_C com a frequência. É notável que para solo de maior resistividade (Fig. 6-b) o comportamento deste parâmetro é influenciado pela consideração ou não da variação de σ e ϵ do solo com a frequência, e mais uma vez a metodologia que apresentou maior variação foi a de Portela (2).

A constante de propagação é calculada utilizando-se também a impedância longitudinal e a admitância transversal:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (15)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (16)$$

Nas equações (15) e (16) a parte real de γ correspondente a constante de atenuação (α) e a parte imaginária a constante de fase (β). As figuras 7 e 8 ilustram os resultados.

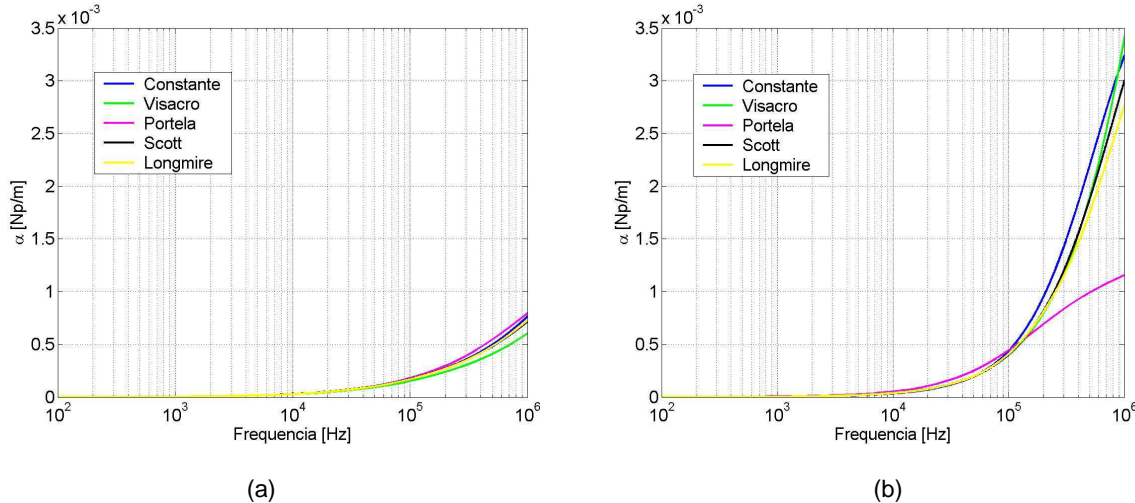


FIGURA 7 – Gráficos da parte real do constante de propagação da linha. Comparação entre os resultados obtidos com as metodologias de cálculo e a consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes. a) solo com resistividade de 100 Ω .m e b) solo com resistividade de 10.000 Ω .m.

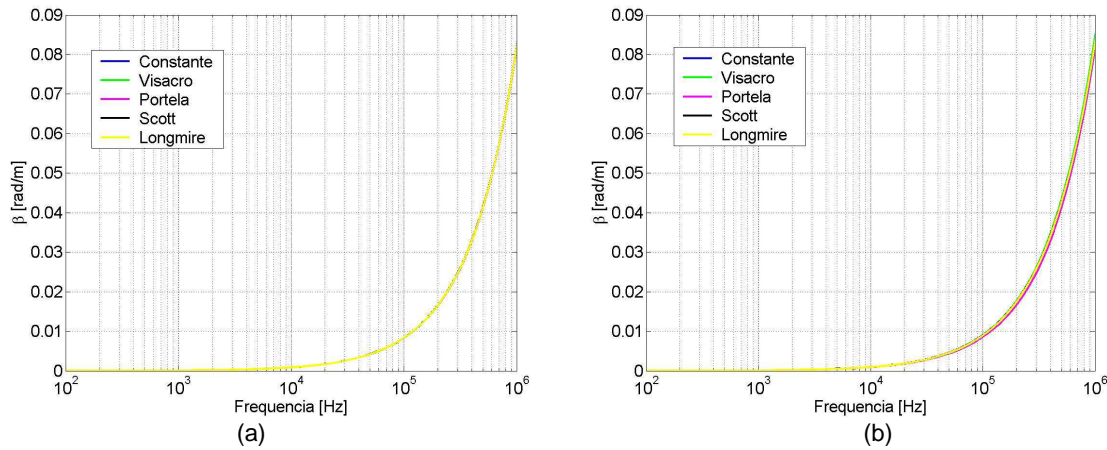


FIGURA 8 – Gráficos da parte imaginária do constante de propagação da linha. Comparação entre os resultados obtidos com as metodologias de cálculo e a consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes. a) solo com resistividade de 100 Ω .m e b) solo com resistividade de 10.000 Ω .m.

Os resultados ilustrados na Figura 7 mostram que os valores da constante de atenuação na consideração dos parâmetros do solo variando com a frequência, quando comparados com os oriundos da consideração dos parâmetros do solo constantes, são menores em solos de baixa resistividade, para altas frequências (Fig. 7-a), com exceção da curva originada pela metodologia de Portela (2). Já para solos de maior resistividade (Fig. 7-b), a metodologia proposta em (2), em maiores espectros de frequências, obteve resultado 60% menor que o obtido considerando σ e ϵ do solo constantes. Porém, a sensibilidade da parcela imaginária da constante de propagação à variação da resistividade do solo e a variação de σ e ϵ do solo com a frequência é insignificante, como ilustra a Figura 8, pois todas as curvas apresentaram comportamento semelhante.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma avaliação do comportamento de parâmetros importantes da linha de transmissão quando submetidas a surtos eletromagnéticos. O foco desta avaliação foi a consideração da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência e a respectiva influência no comportamento transitório da linha. Foram obtidas curvas da impedância longitudinal (resistência e indutância), impedância característica e constante de propagação da linha, variando ao longo do espectro de frequência. Os resultados analisados são oriundos de cálculos realizados considerando os parâmetros elétricos do solo constantes e variando com a frequência. Para esta última consideração foram utilizadas quatro metodologias de cálculo, que por sua vez, apresentaram resultados distintos em cada uma das análises de sensibilidade apresentadas na seção 4 deste trabalho. Dependendo do parâmetro analisado, a consideração de σ e ϵ do solo dependentes da frequência apresentou valores maiores ou menores do quando se considera σ e ϵ do solo constantes. Por exemplo, a contribuição do solo na parcela indutiva da impedância longitudinal, para solo de baixa resistividade e em altas frequências, é maior quando se considera σ e ϵ do solo constantes, porém, em solo de maior resistividade isto não ocorre, os valores obtidos com a consideração de σ e ϵ do solo dependentes da frequência são maiores, com exceção de uma metodologia (4).

Verifica-se, portanto, a fundamental importância da inclusão da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência no cálculo de transitórios eletromagnéticos estabelecidos nas linhas aéreas, tendo em vista que as sobretensões decorrentes dependem diretamente dos parâmetros elétricos da linha de transmissão, que por sua vez dependem dos parâmetros elétricos do solo e da profundidade complexa. Entretanto, os resultados deste trabalho mostram também que existe distinção entre os resultados obtidos pelas quatro metodologias de cálculo do efeito do solo abordadas. Este fato é mais uma ramificação de pesquisa do tema discutido ao longo deste artigo, a busca por uma metodologia ideal de consideração de σ e ϵ do solo com a frequência.

Este estudo tem aplicações nos cálculos das sobretensões que solicitam os isolamentos e equipamentos dos Sistemas de Energia. No caso do Brasil (região com solos típicos de altos valores de resistividade), tais sobretensões, quando associadas às descargas atmosféricas, são responsáveis pela grande maioria das interrupções nos sistemas de transmissão e distribuição, que podem provocar paradas indesejadas no processo produtivo de consumidores industriais e desta forma comprometer a qualidade da energia ofertada. Desta forma, uma continuação natural dessa pesquisa corresponde à avaliação dos resultados obtidos neste trabalho nos níveis de sobretensão em linhas de transmissão. Os autores estão, atualmente, desenvolvendo tais avaliações, objeto de publicação em uma oportunidade futura.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) C. L. LONGMIRE, K. S. SMITH, Universal impedance for soil. *Defense Nuclear Agency*, Washington, Outubro 1975.
- (2) C. M. PORTELA, Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. *Proceedings of the IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Society*, pp. 1004-1009, Seattle, EUA, August 1999.
- (3) H. S. SCOTT, Dielectric constant and electrical conductivity measurements of moist rocks: A new laboratory method. *J. Geophys. Res.*, vol. 72, nº. 20, pp. 5101-5115, 1967.
- (4) F. S. VISACRO, C. M. 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.
- (5) A. G. PEDROSA, Comportamento transitório de eletrodos de aterramento considerando a variação da condutividade e permissividade elétricas de solos típicos com a frequência. *Dissertação de Mestrado*. PPGEL – UFSJ/ Cefet-MG, Julho 2010. Orientador: Prof. Dr. Marco A. O. Schroeder.
- (6) H. B. DWIGHT, Skin Effect in Tubular and Flat Conductors, *AIEE Transactions*, Vol.37, pt. II, p.139-1403, 1918.
- (7) A. DERI, G. TEVAN, A. SEMLYEN, A. CASTANHEIRA, The Complex Ground Return Plane, a Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return, *IEEE Trans. PAS*, vol. 100, no. 8, pp.: 3686-3693, 1981.
- (8) S. M. M. LÚCIO, R. A. R. MOURA, M. A. O. SCHROEDER, Estudo Comparativo entre Metodologias de Cálculo dos Parâmetros Elétricos do Solo Variando com a Frequência, *Anais do I ERMAC – Encontro Regional de Matemática Computacional Aplicada*, São João del-Rei, 11-13 de novembro de 2010.
- (9) J. B. GERTRUDES, M. C. TAVARES, C. PORTELA, Variação da Condutividade e Permissividade do Solo com a Frequência: Influência na Admitância Transversal de Linha de Transmissão – Análise para Caso de um Único

Condutor. *Anais do SBSE 2010 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos de Potência*, Belém do Pará, 18-21 de maio de 2010.

(10) J. B. GERTRUDES, M. C. TAVARES, C. PORTELA, Influence of Accurate Soil Representation for Transmission-Line Parameters: Analyses Based on Carson's Modified Formulations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, submetido em 03 de nov. 2009.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Simone Maria Mendes Lúcio: possui Graduação em Engenharia Industrial Elétrica pelo Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Atualmente, desenvolve seu trabalho de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL), associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e CEFET - MG. Suas pesquisas incluem, principalmente, estudo da variação dos parâmetros eletromagnéticos de solos típicos com a frequência e sua influência no desempenho de sistemas elétricos de potência frente a transitórios eletromagnéticos.

Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura: É aluno do 7o período do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e desenvolve atividade de Iniciação Científica na área de estudo da variação dos parâmetros eletromagnéticos de solos típicos com a frequência.

Marco Aurélio de Oliveria Schroeder: 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 adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) e trabalha nas seguintes áreas: Eletromagnetismo Aplicado, Transitórios Eletromagnéticos, Aterramentos Elétricos e Descargas Atmosféricas.