



SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GSC - 32
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X –
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO –**

Medição e Avaliação da Condutividade e Permissividade no Domínio da Frequência de Amostras de Solo da Região de Cachoeira Paulista SP

João B. Gertrudes (*)

Maria Cristina Tavares

José Pissolato Filho

Carlos Medeiros Portela

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
FEEC/UNICAMP

Universidade Federal do Rio de Janeiro
COPPE/UFRJ

RESUMO

Neste trabalho apresentamos novas medições da condutividade (σ) e permissividade (ϵ) no domínio da frequência, de amostras de solo coletadas na Região de Cachoeira Paulista/SP. É evidenciada a aquisição digital de dados de campo e eliminação de ruídos inerentes ao processo de medição. Devido à importância da correta modelagem do solo em função da frequência foi feito um estudo comparativo numa linha de transmissão trifásica simples, 440 kV, idealmente transposta. Foram analisados os parâmetros longitudinais, velocidade de propagação, fator de atenuação e função de transferência da linha com modelos de solos considerados limítrofes de baixa e alta resistividade.

PALAVRAS-CHAVE

Condutividade, Permissividade, Parâmetros de Solo, Parâmetros de Linhas, Transitórios Eletromagnéticos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Um requisito essencial para a modelagem correta de uma linha de transmissão é a representação adequada do solo, que tem uma influência importante nos parâmetros da linha, além de ser um aspecto dominante para análise e projeto de sistemas de aterramento, tornando imprescindível o conhecimento do comportamento eletromagnético do solo em situações transitórias. Algumas considerações são feitas na literatura [1, 2, 3] assumindo que as características do solo (condutividade e permissividade) não dependem da frequência, com condutividade (σ) constante e com permissividade (ϵ) desprezável ($\omega\epsilon \ll \sigma$). Estas considerações podem originar modelos inadequados para algumas aplicações (estudos de fenômenos rápidos, como descargas atmosféricas), uma vez que esses parâmetros ($\sigma, \omega\epsilon$) são fortemente dependentes da frequência, tornando-se necessário a representação adequada do solo numa faixa de frequência razoável (0 a 2 MHz).

Neste trabalho apresentamos exemplos de novas medições da condutividade (σ) e permissividade (ϵ) no domínio da frequência, de amostras de solo coletadas na Região de Cachoeira Paulista SP (22° 41.2 S , 44°59.0 W). Os parâmetros do solo obtidos a partir dos resultados das medições de campo em Cachoeira são coerentes com os resultados obtidos anteriormente na região Amazônica, o que dá maior suporte aos procedimentos de medição em campo e aos modelos físicos propostos em trabalhos anteriores [6-10], por se tratar de amostras coletadas em regiões muito afastadas (as distâncias envolvidas são de 2000 km) e com características geológicas distintas. Os referidos modelos permitem através de um conjunto de parâmetros, reproduzir os resultados medidos em campo, com coerência física quanto à relação da condutividade e permissividade no domínio da frequência. O processamento dos resultados medidos em campo é apresentado com ênfase na aquisição digital dos sinais e eliminação de ruídos inerentes ao processo de medição através de filtros adequados. Para mostrar a importância da correta modelagem do solo em função da frequência, foi feito um estudo comparativo numa linha de transmissão trifásica simples, 440 kV, idealmente transposta. Foram analisados os parâmetros longitudinais, velocidade de propagação, fator de atenuação e função de transferência da linha, com modelos de solos

(*) DSCE/FEEC / UNICAMP - CP: 6101 – CEP 13083-970 - Campinas, SP
Tel. (19) 37883738 – Fax: (19) 32891395 e-mail: jbosco@dsce.fee.unicamp.br

considerados limítrofes de baixa e alta resistividade. O objetivo foi identificar possíveis faixas de frequência onde a não consideração do modelo adequado pode levar a erros significativos, que podem ser importantes em estudos de transitórios eletromagnéticos, dimensionamento de equipamentos, avaliação, classificação e localização de faltas, proteção rápida de sistemas elétricos e qualidade de energia.

2.0 - COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO DO SOLO

Exceto para campos eletromagnéticos muito intensos, em que pode ocorrer ionização significativa e disrupção do solo, e, em alguns tipos de solos, para fenômenos muito lentos (p. e., espectro de frequência [0 , 1 Hz]), em que pode ocorrer histerese significativa, e para alguns minerais ferromagnéticos (o que não inclui os minérios de ferro brasileiros), o comportamento eletromagnético do solo é essencialmente linear. A permeabilidade magnética (μ) pode ser considerada (com a exceção mencionada acima) igual à permeabilidade magnética do vácuo (μ_0). Porém, a condutividade e permissividade são fortemente dependentes da frequência, sendo necessário utilizar modelos adequados que levem em consideração essa dependência. Para fenômenos rápidos, especificamente aqueles associados a descargas atmosféricas, o comportamento do solo é importante numa faixa de frequência razoavelmente larga, tipicamente de 0 a 2 MHz. Para variações lentas das grandezas eletromagnéticas, um comportamento tipo histerese pode ocorrer. Para corrente contínua ou variações muito lentas das grandezas eletromagnéticas, fenômenos de migração de umidade, incluindo eletrosmose e os efeitos de heterogeneidade de temperatura podem ocorrer, o que não pode ser tratado somente através dos parâmetros locais do solo.

2.1 Procedimentos de medição em campo

Os procedimentos para tais medições foram estabelecidos após intensivos testes de campo, sendo necessários alguns cuidados relacionados com a coleta das amostras [6-10]:

- Assegurar a manutenção da consistência, umidade e todas as propriedades naturais da amostra, de modo que ela represente as características do solo local.
- Evitar efeitos de superfície, como vento, sol, vegetação e raízes.
- Evitar efeitos de heterogeneidade do solo.
- Ter o máximo de cuidados para evitar "rachaduras" nas amostras, pois esse é um dos principais motivos de erros grosseiros nas medições, isso modifica o "meio-material" por onde circulará a corrente.

Para avaliar o comportamento do solo adotamos os mesmos procedimentos descritos em [5]. No caso de solos razoavelmente consistentes o processo adotado consiste na coleta de amostras em forma de cubóide (1,20 m x 0,2 m X 0,2 m) a uma profundidade de aproximadamente 1,5 m. As amostras são esculpidas até atingirem as dimensões apropriadas e em seguida são recobertas com uma tela, e uma camada de parafina (com o objetivo de manutenção das características do solo local) e protegidos por uma caixa de madeira apropriada para medição em bancada (veja Figuras 1 e 2).



FIGURA 1- Amostras de solo sendo retiradas e recoberta com parafina (foto Amostra3 - Cachoeira Paulista -01/08/02)



FIGURA 2 –Amostra de solo sendo colocada na caixa apropriada para medição (fotos Amostra 2) – Cachoeira Paulista - 31/07/02)

A caixa de madeira possui dois orifícios nos quais são inseridos os eletrodos de tensão, VE. As laterais da caixa são removíveis permitindo a colocação de placas de cobre (com ajuste de pressão) para injeção de corrente (CE) na amostra. As placas têm as mesmas dimensões que a seção transversal da amostra, com objetivo de garantir uma distribuição uniforme de corrente na mesma. O arranjo para medição é ilustrado na Figura 3. Essa injeção de corrente é feita por um oscilador de sinal com frequência variável (de 0 Hz a 2 MHz), sendo que a amplitude da

corrente é obtida através da tensão entre terminais do resistor “shunt” de valor conhecido.

Medindo-se a amplitude da queda de tensão no resistor “shunt” (VR) e da queda de tensão entre os eletrodos (VE) inseridos na amostra, a defasagem entre estes sinais (ϕ), e considerando fatores geométricos relativos à amostra de solo, determinam-se a condutividade e a permissividade em toda a faixa de frequência considerada. Com os dados discretos de condutividade e permissividade medidos definem-se os parâmetros que caracterizam o modelo físico de cada amostra em função da frequência. Exemplos de sinais de tensão e correntes de uma amostra de solo na frequência de 1 kHz e 2 MHz são apresentados nas Figuras 4 e 5 respectivamente.

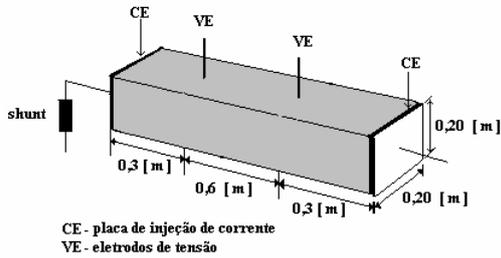
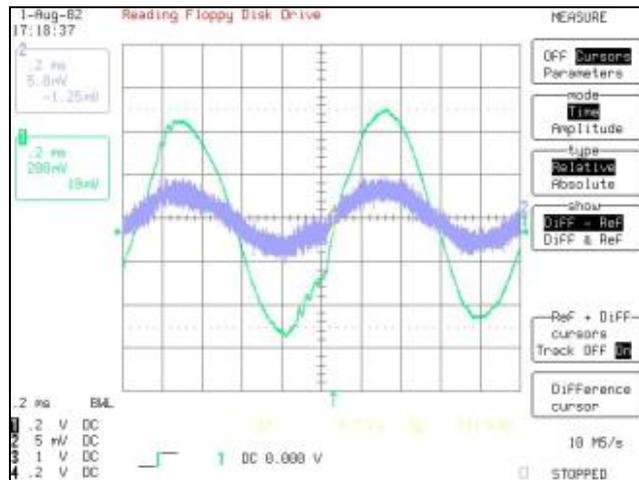
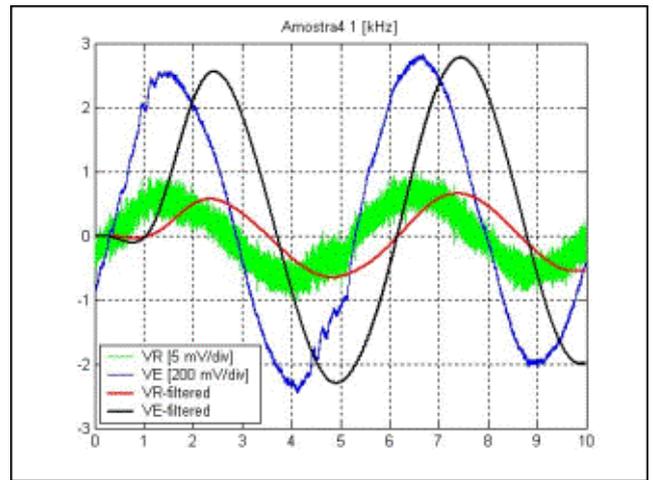


FIGURA 3 – Representação esquemática da amostra do solo para medição de $\sigma + i\omega\epsilon$ em função da frequência

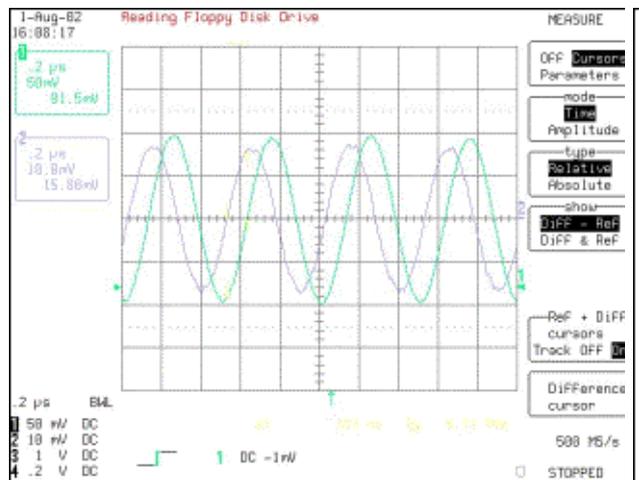


(a)

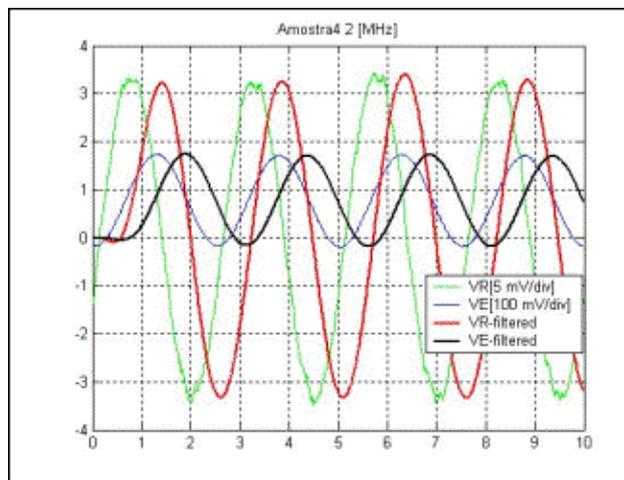


(b)

FIGURA 4 - Sinais de tensão medidos: (a) no osciloscópio ; (b) digitalizados e filtrados (direita): Amostra4 1 kHz



(a)



(b)

FIGURA 5 - Sinais de tensão medidos: (a) no osciloscópio e (b) digitalizados e filtrados: Amostra4 2 MHz

O conteúdo harmônico presente nos sinais VE e VR (veja Figura 4), dificulta uma leitura mais precisa das amplitudes e defasagem entre os sinais. Foi necessário filtrar o conteúdo harmônico do nosso sinal. A digitalização dos dados de tensão para processamento em laboratório foi feita através de arquivos de dados (extensão .dat), obtidos diretamente do osciloscópio digital. Esse procedimento permitiu o uso de bibliotecas de processamento digital de sinais do MATLAB. Após análise espectral, testes e simulações, foi utilizado um filtro Passa-baixas (IIR, Butterworth, ordem 4), com frequência de corte uma década acima da frequência do sinal injetado e ganho unitário na banda de passagem. As vantagens para escolha do filtro Butterworth foram: menor ripple na banda de passagem, menor banda de transição (quanto maior a ordem do filtro menor é a banda de transição), e facilidade de implementação em modelo analógico. A desvantagem do filtro utilizado é a distorção na

fase do sinal filtrado, mas no nosso caso isso não foi um problema, já que estamos interessados na defasagem entre os sinais de tensão e corrente e o filtro insere a mesma defasagem em ambos os sinais (veja Figuras 4 e 5).

2.2 Modelos de solos

Os modelos que foram utilizados nos resultados apresentados são alguns dos modelos descritos em [5-9]. Com a exceção indicada abaixo, os modelos, para os quais os resultados são apresentados, são a soma de parcelas de defasagem mínima, W_j , para os quais se aplica uma magnitude tipo imitância (em formulação complexa ou tensorial de magnitudes alternadas):

Todos os sub-modelos usados para W_j são condições particulares do modelo Tipo 3 descrito em [5], apresentado e, (3) – (6).

Fora fenômenos lentos e fenômeno tipo histerese, o comportamento do solo é, tipicamente, de defasagem mínima. Para um grande número de solos, na faixa de frequência (0 , 2 MHz), numa primeira aproximação, é (3), onde K_0 , K_1 , K_2 , α são parâmetros constantes (independentes da frequência). Para alguns solos, um comportamento semelhante ocorre, mas para uma faixa de frequência menor, e.g. (0 , 100 kHz), e para altas frequências, o comportamento é diferente, especificamente com aumentos menores de $\omega\varepsilon$, ou inclusive com um diminuição de $\omega\varepsilon$, quando a frequência aumenta.

Para analisar o comportamento na frequência de σ , ε , é conveniente considerar formulações complexas das grandezas eletromagnéticas, e considerar $\sigma + i\omega\varepsilon$ como uma imitância. De fato, fora fatores geométricos, $\sigma + i\omega\varepsilon$ pode ser associado com uma admitância de um elemento volumétrico δv .

Um modelo do tipo 3 descrito em [5] é apresentado na equação abaixo, para o qual (4) representando ${}_2F_1[\dots, \dots, \dots]$ a função hiper-geométrica, com quatro argumentos, ${}_2F_1$, de acordo com a notação de [10]. Este sub-modelo tem quatro parâmetros independentes (k , α , a , b) e podem ser associados a distribuições, no domínio f ou de ω , dos tempos de relaxação da estrutura física do solo.

Considerando, neste modelo (4), $a = 0$, o modelo torna-se: (5)

Considerando, neste modelo (4), $a = 0$, $b \rightarrow \infty$ e $\alpha_j = \alpha$, o modelo torna-se : (6)

A parcela W_j conforme indicado em (6) é equivalente a parcela $K_0 \cdot \omega^\alpha$ de σ e a $\omega\varepsilon = K_2 \cdot \omega^\alpha$, como indicado

em (1) e (3), com $K_1 = K_j$, $K_2 = K_j \cdot \text{tg}\left(\frac{\pi}{2}\alpha_j\right)$ e $\alpha_j = \alpha$, com a condição $\frac{K_2}{K_1} = \text{tg}\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)$. Esta condição foi

verificada nas medições do solo, dentro da precisão das medidas e dos efeitos de heterogeneidade do solo.

$$W = \sigma + i\omega\varepsilon \quad (\omega = 2\pi f, f \text{ sendo a frequência}) \quad (1)$$

onde $i = +\sqrt{-1}$

$$W = \sum_{j=0}^m W_j \quad (2)$$

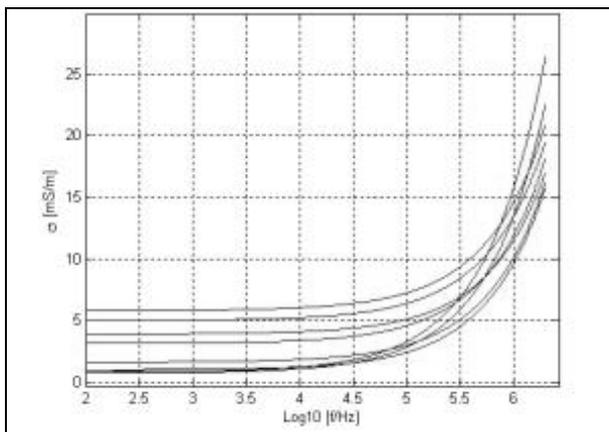
$$\sigma = K_0 + K_1 \cdot \omega^\alpha \quad \text{e} \quad \omega\varepsilon = K_2 \cdot \omega^\alpha \quad (3)$$

$$W_j(\omega) = k \cdot \left\{ \frac{b^\alpha}{\alpha} {}_2F_1\left[1, \alpha, 1+\alpha, \frac{ib}{\omega}\right] - \frac{a^\alpha}{\alpha} {}_2F_1\left[1, \alpha, 1+\alpha, \frac{ia}{\omega}\right] \right\} \quad (4)$$

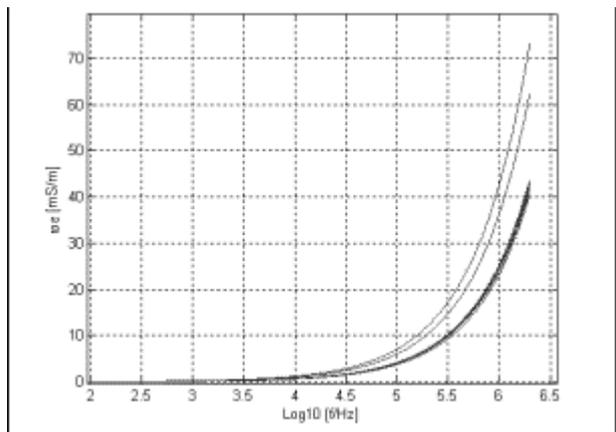
$$W_j(\omega) = k \cdot \frac{b^\alpha}{\omega} {}_2F_1\left[1, \alpha, 1+\alpha, \frac{ib}{\omega}\right] \quad (5)$$

$$= k_1 {}_2F_1\left[1, \alpha, 1+\alpha, \frac{ib}{\omega}\right]$$

$$W_j(\omega) = K_j \cdot \left[1 + i \text{tg}\left(\frac{\pi}{2}\alpha_j\right)\right] \cdot \omega^{\alpha_j} \quad (6)$$



(a)



(b)

FIGURA 6 – Parâmetros de solo de Cachoeira Paulista: (a) condutividade ; (b) permissividade

Considerando, neste modelo (6), $\alpha_j = 0$, o modelo torna-se : σ constante, $\omega\varepsilon$ nulo (condutor “puro”) (7)

Considerando, no modelo (6), $\alpha_j \rightarrow 1$, o modelo torna-se :

σ nulo, $\omega \epsilon$ proporcional a ω , ϵ constante (dielétrico "puro")
(8)

Na faixa (0 , 2 MHz) , para todas as amostras de solo modeladas neste artigo, é suficientemente preciso considerar duas parcelas, para $\sigma + i\omega\epsilon$, uma constante (na maioria dos casos real), e a outra do tipo (4) ou do tipo (5), dependente da frequência. Para poucos casos existe um campo de efeito de histerese, que pode ser modelado com uma parte imaginária de parcela constante. Para todas as amostras, α é o parâmetro dominante da forma relativa da parcela dependente da frequência, W_j , de $\sigma + i\omega\epsilon$. Em todas as amostras, para parcelas dependentes da frequência, tem-se $0 < \alpha < 1$. A figura 6 mostra os parâmetros de algumas amostras de solo da região de Cachoeira em função da frequência. Os parâmetros numéricos foram determinados por critérios de mínima diferença entre os dados de campo e o modelo teórico. As amostras de solos medidos possuem condutividade a baixa frequência muito elevada (comparado com amostras de outras regiões do Brasil). Os valores a baixa frequência variam de 743,5 $\mu\text{S/m}$ a 5800 $\mu\text{S/m}$, e os efeitos da dependência da frequência começam a ser significantes a partir de 10 kHz. Em amostras de solos onde a condutividade a baixas frequências é menor, a dependência com a frequência começa a ser significativa a partir de 1 kHz.

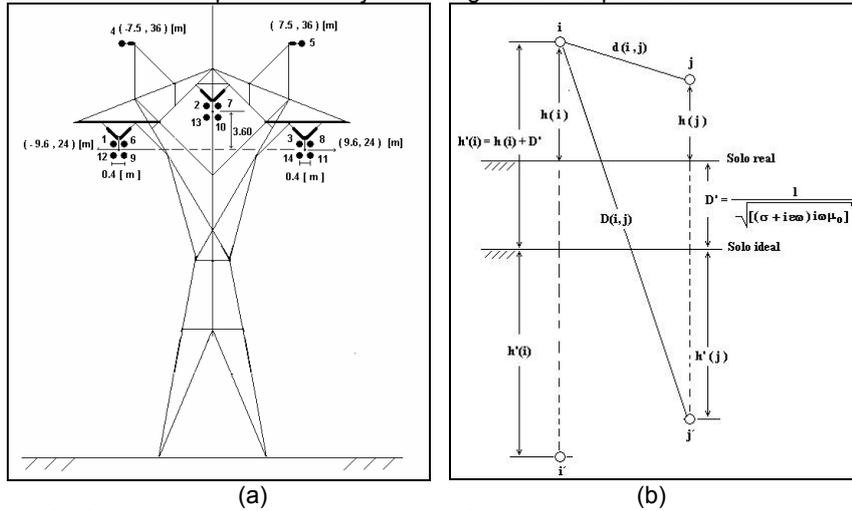


FIGURA 7 – (a) Configuração dos condutores na torre e (b) Condutores nas posições i e j considerando o efeito do solo

3.0 - EFEITO DO SOLO NO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para implementar o modelo de solo, foram feitas simulações no ambiente MATLAB tendo como exemplo uma linha trifásica, transposta, cuja configuração dos condutores na torre é mostrada na Figura 7. Os parâmetros da linha foram calculados no domínio dos modos [14], utilizando uma formulação aproximada que inclui o efeito do solo na impedância longitudinal como sendo equivalente a ter uma superfície de solo ideal a uma profundidade de penetração complexa D' abaixo da superfície física da terra [12]. A matriz de impedâncias longitudinais (Z_{ij}) é formada pela soma da impedância interna (Z_{int}) e a impedância externa (Z_{ext}), representada pelas Equações 9 a 11 a seguir.

Tabela 1 - Casos simulados

Parâmetros	Caso 1 – Baixa Resistividade		Caso 2 – Alta resistividade	
	Solo 1(S1)	Solo 2 (S2)	Solo 1(S1)	Solo 2(S2)
K_0 [$\mu\text{S/m}$]	1700	1700	50	50
K_1 [$\mu\text{S/m.s}^{-1}$]	0	0,9	0	0,0021
α	0	0,62	0	0,82

$Z_{ij} = Z_{ij}^0$ $i, j = 1, 2, \dots, n$	(9)	$Z^0 = Z_{int} + Z_{ext}$	(10)
$Z_{ex} = i \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right)$	(11)	$D' = \frac{1}{\sqrt{(\sigma + i\omega\epsilon)i\omega\mu_0}}$	(12)

Os parâmetros longitudinais da linha são calculados considerando o solo com parâmetros constantes (solo1) e com dependência na frequência (solo2). Essa comparação da influência do solo1 e solo2 na linha é feita para dois casos distintos: solos de baixa resistividade (caso1) e solos de alta resistividade (caso2). Os parâmetros são apresentados na Tabela 1. Observa que os parâmetros do solo1 e solo2 foram convenientemente escolhidos para serem iguais em baixa frequência ($\omega \rightarrow 0$) em ambos os casos, para fins de avaliação dos modelos utilizados.

4.0 - ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção apresentamos os resultados de simulação computacional da influência do modelo de solo na linha de transmissão descrita acima. Na Figura 8 (a) é apresentada a resistência por unidade de comprimento dos modos

naturais de propagação da linha (homopolar e não homopolar) do caso1- solos de baixa resistividade. A resistência do modo não homopolar (S1) é constante até 100 Hz, quando o efeito pelicular se torna significativo nos condutores de fase e passa a ser dominante até próximo de 10 kHz. A partir de 10 kHz o efeito do retorno pelo solo (neste caso a parâmetros constantes) se torna significativo. O modelo do solo com dependência da frequência (solo2) afeta a resistência no modo não-homopolar de forma similar, e é apreciável a partir de 10 kHz, aumentando o valor da resistência à medida que a frequência aumenta. A diferença entre os dois modelos de solo é significativa acima de 10 kHz. No modo homopolar (solo1) o efeito do solo é predominante desde de 1 Hz, porém até 100 Hz o efeito skin ainda é significativo. A partir deste patamar de frequência o retorno pelo solo é dominante e varia linearmente com a frequência. No solo2 (com dependência na frequência), o comportamento é similar, porém a partir de 10 kHz a resistência aumenta com a frequência. Na Figura 8 (b) é apresentada a resistência por unidade de comprimento dos modos naturais de propagação da linha (homopolar e não homopolar) do caso2- solos de alta resistividade. O comportamento da resistência do modo não homopolar (solo1) é similar ao caso anterior, porém a diferença entre os dois modelos de solos é mais acentuada e começa a ser significativa acima de 1 kHz. No modo homopolar o comportamento da resistência também é similar ao caso anterior e a diferença entre os dois modelos de solo é significativa a partir 1 kHz, com diferenças percentuais mais acentuadas (ex.: 20 % em 10 kHz). Nota-se que os valores das resistências e as diferenças percentuais são maiores em solos de resistividade elevada. Nas Figuras 9(a) e 9 (b) estão representadas as indutâncias por unidade de comprimento dos casos simulados. O comportamento da indutância por unidade de comprimento é dual com relação ao comportamento das resistências. As diferenças percentuais para ambos os casos é significativa a partir de 1 kHz, cresce à medida que a frequência aumenta e é mais acentuada em solos de baixa resistividade (Figuras 9a).

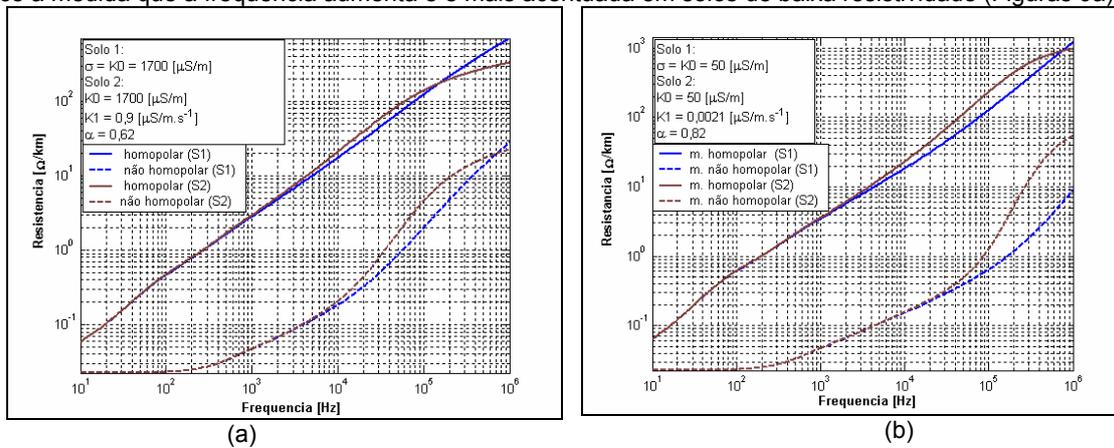


FIGURA 8 - Resistência por unidade de comprimento: (a) caso1-solos de baixa resistividade; (b) caso2- solos de alta resistividade

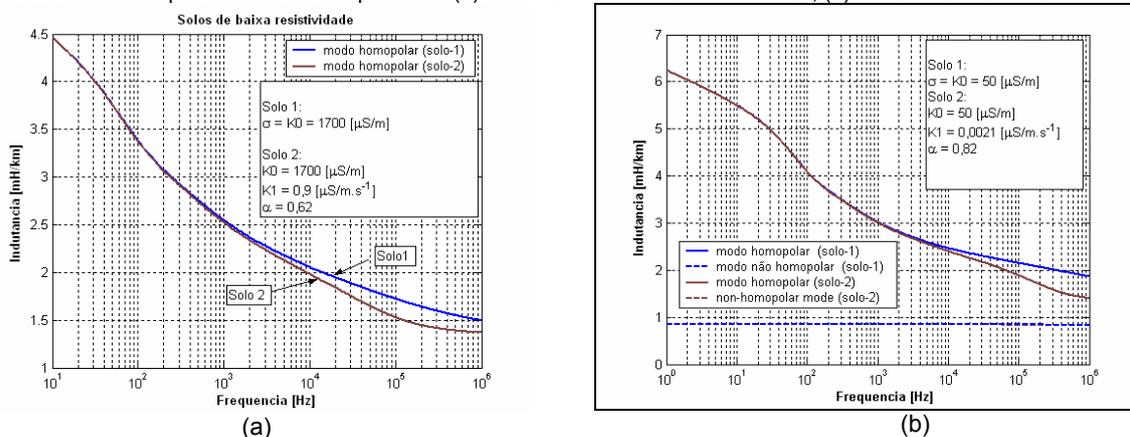


FIGURA 9 – Indutância por unidade de comprimento : (a) caso1-solos de baixa resistividade; (b) caso2- solos de alta resistividade

A velocidade de propagação (v), e o fator de atenuação ($e^{-\alpha l}$) foram calculados nos dois casos em estudo usando os dois modelos de solos, os resultados são apresentados nas Figuras 10 e 11, onde:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{z \cdot y} \quad (13) \quad v = \frac{\omega}{\beta} \quad (14)$$

No caso da velocidade de propagação (Figura 10), não há diferença entre os dois modelos de solos até 1 kHz. A partir de 1 kHz a diferença percentual entre os dois modelos de solos torna-se considerável, nos dois casos simulados. Em solos de alta resistividade a diferença percentual entre os dois modelos é ainda maior. O fator de atenuação (Figura 11) foi calculado para 30, 50 e 300 km de linha, representando, por exemplo, a distância entre uma localização de falta e um ponto de observação. De acordo com as Figuras 11(a) e 11(b) a diferença entre os dois modelos de solo é significativa para frequências acima de 1000 Hz para distancias curtas (30 e 50 km). Para longas distâncias mesmo que o erro relativo seja significativo, o fator de atenuação é muito baixo a partir de 10 kHz. Em distâncias curtas (30, 50 km) as discrepâncias entre os dois modelos de solos são consideráveis, e é

maior em solos de alta resistividade. De acordo com este resultado, se um sinal com espectro de frequência perto de 4,5 kHz é aplicado na extremidade de uma linha de 50 km, a amplitude do sinal chega atenuada à outra extremidade da linha, com fator de atenuação de 0,6. No caso da modelagem a parâmetros constantes esse resultado é alterado.

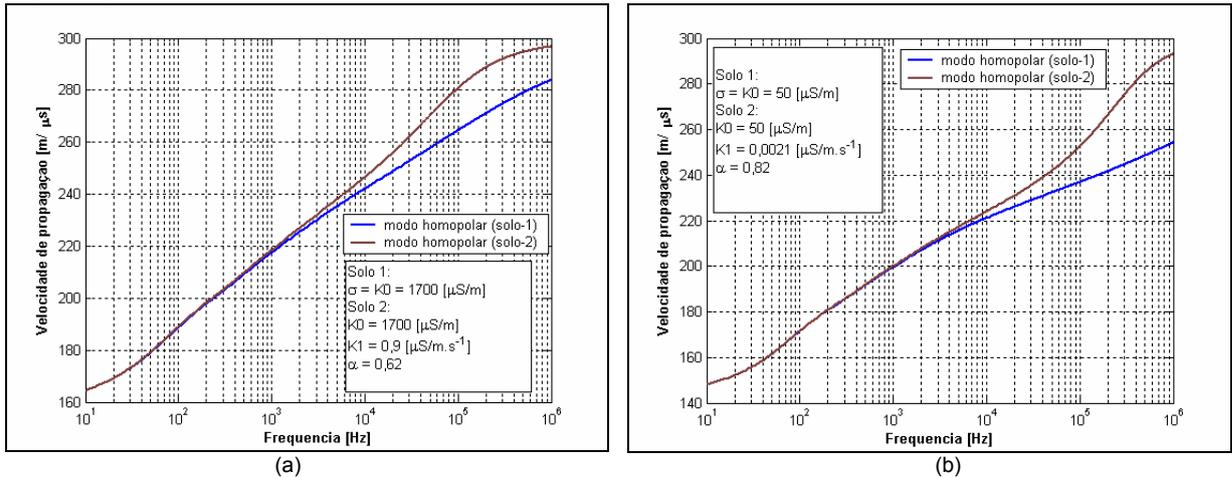


FIGURA 10 – Velocidade de propagação do modo homopolar: (a) caso1- baixa resistividade; (b) caso2- alta resistividade

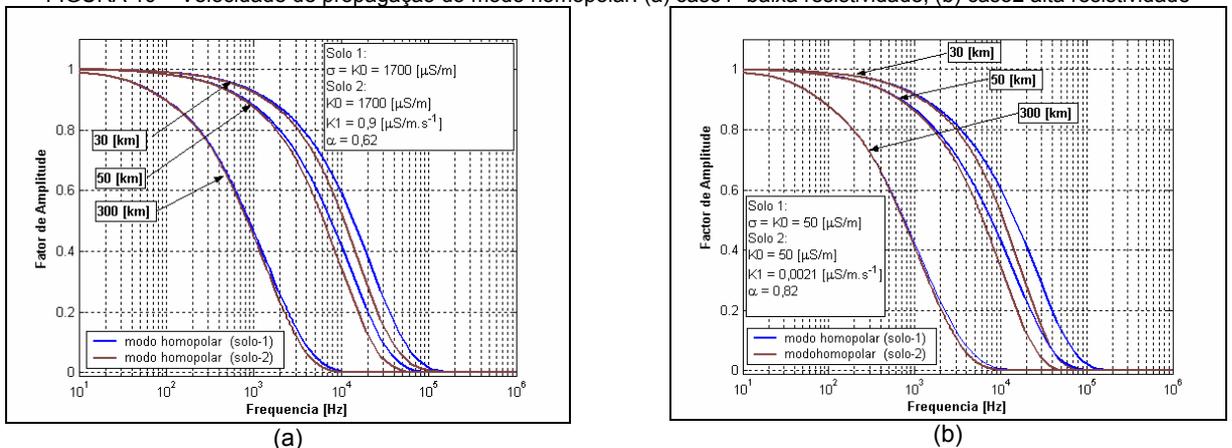


FIGURA 11 – Fator de atenuação para diversos comprimentos de linha: (a) caso1- baixa resistividade; (b) caso2- alta resistividade

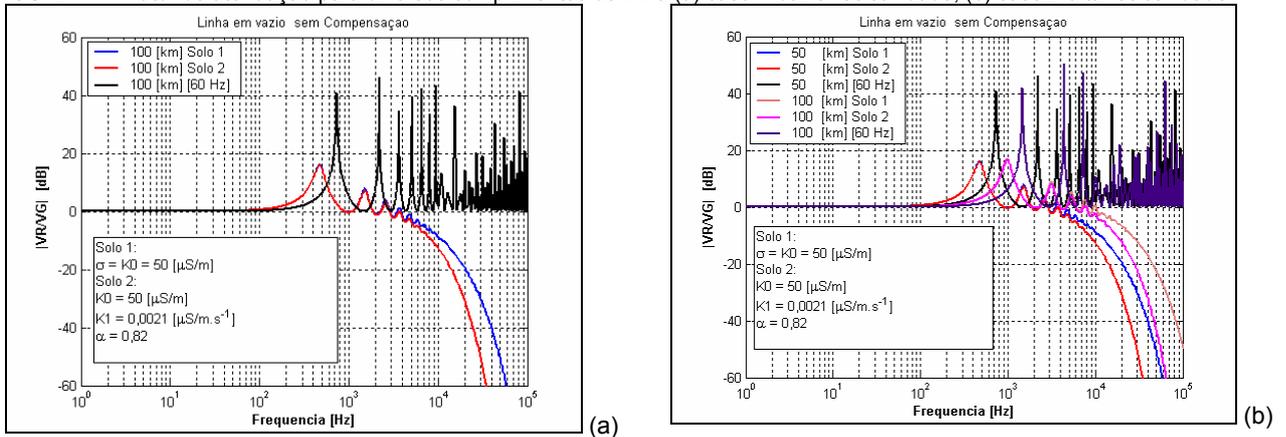


FIGURA 12 – Resposta no domínio da frequência do modo não homopolar : (a) 100 km de Linha ; (b) 50 km, 100 km de linha sendo VR –Tensão no receptor e VG- tensão no Gerador

Na figura 12 é feita uma comparação da função de transferência da linha ($|V_R|/|V_G|$) em vazio e sem compensação considerando dois casos distintos do modo não homopolar, a saber:

- Figura 12(a) - Com os parâmetros da linha calculados na frequência de operação (60 Hz), considerando os parâmetros do solo constantes e independentes da frequência (solo1), e considerando solo de alta resistividade e com dependência na frequência (solo2), 100 km de linha;
- Figura 12(b) – A mesma simulação do caso anterior comparando dois comprimentos de linha: 50 e 100 km. Com parâmetros da linha dependentes da frequência e os parâmetros do solo constantes e independentes da frequência (solo 1) e com parâmetros da linha dependentes da frequência e os parâmetros do solo com dependência da frequência (solo 2).

A relação entre a tensão no terminal gerador (V_G) e o terminal receptor (V_R) numa linha em vazio e sem compensação, considerando o modelo a parâmetros distribuídos é dada por: $|V_R|/|V_G| = 1/\cosh(\gamma(\omega) \cdot l)$. Nota-se na Figura 12 (a) um deslocamento dos picos de ressonância quando se compara a resposta para o caso em que os parâmetros são calculados a 60 Hz, e considerando os parâmetros do solo constante (solo1) e variável com a frequência (solo2). Comparando a resposta nos casos dos solos 1 e 2, nota-se que o sinal é atenuado (o que não acontece com os parâmetros da linha calculados em 60 Hz). A diferença percentual entre os dois modelos que pode ser significativa dependendo da frequência do sinal do gerador. Embora haja picos de ressonância de amplitudes menores em relação ao caso 60 Hz, este resultado mostra claramente que o modelo a parâmetros constantes pode levar a erros consideráveis no caso de sintonia de ressonâncias. A Figura 12 (b), mostra a variação em função do comprimento da linha da atenuação e dos picos de ressonância, comentados anteriormente.

5.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentamos os resultados de novas medições de parâmetros de solos da região da Cachoeira Paulista/SP, e um estudo comparativo da influência do solo no cálculo de parâmetros (no domínio da frequência) de uma linha de transmissão, levando em consideração a abordagem usual (resistividade constante), e dois tipos de solos considerados limitrofes de alta e baixa resistividade. Investigamos a influência do solo nos parâmetros longitudinais, velocidade de propagação, fator de atenuação e função de transferência da linha em vazio em sem compensação. Nossos resultados mostram que no caso de linhas de transmissão, dependendo do tipo de análise a ser realizada é essencial levar em consideração o modelo correto do solo. A diferença entre os dois modelos de solos estudados é considerável para frequência acima de 1kHz no caso de alta resistividade e 10 kHz em solos de baixa resistividade. A diferença percentual entre o modelo usual e o modelo correto é maior em solos de alta resistividade. Para a resposta em frequência ou função de transferência da linha, nota-se um deslocamento dos picos de ressonância quando se compara a resposta nos casos de resistividade constante e variável. Embora os picos de ressonância com o solo apropriadamente representado apresentem amplitudes menores, este resultado mostra claramente que o modelo a parâmetros constantes pode levar a erros consideráveis no caso de transitórios que sintonizem as frequências de ressonância da linha real que não são corretamente identificadas pela representação a parâmetros constantes. O efeito do solo pode também ser importante para a análise harmônica do sistema (projeto de filtros para atenuação e/ou rejeição de harmônicos) e conseqüentemente para a qualidade de energia. Casos típicos nos quais faixas de frequências acima de 10 kHz são importantes são: transitórios originados por descargas atmosféricas, frente de onda de transitórios associados com curto-circuitos, que podem ser importantes no que diz respeito à coordenação de isolamento [14]. Portanto, torna-se importante um modelo correto do solo que leve em consideração a variação em função da frequência da condutividade/permittividade, já que esses parâmetros são fortemente dependentes da frequência. Para fenômenos transitórios com espectro de frequências acima de 10 kHz, a resposta distinta do modo homopolar pode causar efeitos importantes devido a sua elevada atenuação, por exemplo com relação a forma das sobretensões, a frente de onda pode ser bastante diferente com conseqüências para a coordenação do isolamento.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Y. Liu, M. Zitnik, R. Thottappillil "An Improved Transmission-Line Model of Grounding System" in IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 43, NO. 3, Agosto 2001.
- (2) B. G. Gupta and B. Thapar, "Impulse impedance of grounding grids," IEEE. PAS., vol. PAS-99, pp. 2357-2362, Nov./Dec. 1980.
- (3) M. Ramamoorthy, M. M. B. Narayanan, and S. Parameswaran et al., "Transient performance of grounding grids," IEEE IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 4, pp. 2053-2059, Out. 1989.
- (4) J. Curtis, "A Durable Laboratory Apparatus for measurements of Soil Dielectric Properties" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 50, n°5, Out. 2001.
- (5) J. Curtis "Effects of Laboratory Procedures on Soil Electrical property measurements" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. 47, n°6, Dez. 1998.
- (6) Portela, C. – Grounding Requirement to Assure People and Equipment Safety Against Lightning - Proceedings IEEE 2000 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 969-974, August 2000, Washington DC, EUA.
- (7) Portela, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems - Physical and Methodological Aspects", Proceedings 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp 380-384, August 1997, EUA.
- (8) Portela, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems - II Practical Application Examples", *ibid*, pp 385-390.
- (9) Portela, C., "Statistical Aspects of Soil Electromagnetic Behavior in Frequency Domain", Ground 2000 - International Conference on Grounding and Earthing, Proceedings, pp. 99-104, June 2000, Belo Horizonte, Brazil.
- (10) Portela, C. - Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior - Proceedings IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Society, pp. 1004-1009, Ago. 1999, EUA.
- (11) Abramowitz, M., Stegun I., Handbook of Mathematical Functions, National Bureau of Standards, 1964.
- (12) Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A. and Castanheira, A., "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.
- (13) Portela, C., Tavares, M.C., and Pissolato, J., "Accurate Representation of Soil Behaviour for Transient Studies" – IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 150/6, pp 734-744, Nov. 2003.
- (14) Tavares, M.C., Pissolato, J. and Portela, C., "New Multiphase Mode Domain Transmission Line Model" - International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 21/8, pp 585-601, Sept. 1999.
- (15) Tavares, M.C., Pissolato, J. and Portela, C., "Influência da Variação da Condutividade e da Permittividade do Solo em Função da Frequência nos Fenômenos Eletromagnéticos" – anais do XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, Minas Gerias, Brasil, out. 2003.