



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC - 25
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO
DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA**

Michel Gonçalves Pinheiro

Maria Cristina Dias Tavares

Centrais Elétricas Brasileiras
.ELETROBRÁS S.A. (*)

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
FEEC / UNICAMP

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma extensa análise de sensibilidade dos parâmetros longitudinais e transversais de uma linha de transmissão em função da frequência na faixa de 10 Hz a 1 MHz. A linha é suposta idealmente transposta. Os parâmetros variados foram geometria da linha e característica dos condutores de fase e dos pára-raios, mais especificamente: altura dos condutores fase, altura dos cabos pára-raios, distância horizontal entre as fases, geometria dos feixes dos sub-condutores, diâmetros dos cabos pára-raios e dos condutores fase. Em relação à modelagem, o trabalho contribuirá para o desenvolvimento de novas metodologias e de fórmulas simplificadas para cálculo de parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE

Parâmetros elétricos, dependência na frequência, domínio dos modos, análise de sensibilidade, linha de transmissão, transitórios eletromagnéticos.

1.0 - INTRODUÇÃO

O estudo de parâmetros elétricos de linhas de transmissão é de grande importância a diversas áreas de sistemas elétricos de potência, envolvendo análise em regime permanente, bem como fenômenos de transitórios eletromagnéticos.

Um dos aspectos importantes da modelagem de linhas está relacionado à dependência da frequência dos parâmetros elétricos. Modelos de parâmetros constantes (60 Hz) não são adequados para simular a resposta da linha em uma faixa extensa de frequências presentes durante os transitórios. Na maioria dos casos, o modelo a parâmetros constantes produz distorções que exageram o pico das formas de onda (1), sendo os resultados obtidos na maioria das vezes conservativos. Ocorre que não é somente a resistência que varia com a frequência, mas a indutância também. Isto significa que a resposta em frequência da linha é diferente se a linha for representada através de um modelo a parâmetros constante ou se for incluída a dependência com a frequência dos parâmetros longitudinais. Caso uma manobra ou falta sintonize uma ressonância da linha real, a simulação do caso com a linha representada com parâmetros constantes não será necessariamente conservativa, pois não irá reproduzir esta ressonância. A correta modelagem da linha é essencial para se reproduzir o comportamento da linha.

No presente trabalho, os parâmetros elétricos longitudinais (resistência e indutância) e transversais (capacitância) foram calculados no domínio da frequência para uma linha da CESP de 440 kV, considerada a linha exemplo. Para esta linha foram calculadas as matrizes de parâmetros no domínio das fases e no domínio dos modos. O cálculo de parâmetros baseou-se na teoria de conhecimento geral que será resumidamente apresentada nos próximos itens.

É apresentada uma extensa análise de sensibilidade dos parâmetros longitudinais e transversais da linha em função da frequência na faixa de 10 Hz a 1 MHz. A linha de transmissão foi suposta idealmente transposta, apesar da imprecisão desta hipótese para as harmônicas elevadas. No entanto esta simplificação foi necessária para que se possa ignorar os efeitos de segunda ordem devido à existência de modos não homopolares distintos (linha não

(*) Praia do Flamengo 66, Bloco A, 4º Andar – CEP 22210-903 – Rio de Janeiro – RJ – BRASIL
Tel: (21) 2514-5718 – Fax: (21) 2514-5767 – E-mail: michel.pinheiro@eletrobras.com

transposta). A análise de sensibilidade é feita inicialmente para as parcelas que compõem as matrizes primitivas da linha (solo ideal, efeito pelicular dos condutores e do solo não ideal) e numa segunda etapa para os modos homopolar e não homopolar (ou, no caso de linha idealmente transposta, para seqüência zero e positiva).

Os parâmetros variados foram geometria da linha e característica dos condutores de fase e pára-raios, mais especificamente: altura dos condutores de fase, altura dos cabos pára-raios, distância horizontal entre as fases, geometria dos feixes dos sub-condutores, diâmetro dos cabos pára-raios, diâmetro e raio interno dos condutores de fase.

A linha base estudada corresponde à linha da CESP de 440 kV, trecho de Araraquara-Bauru. A linha possui dois cabos pára-raios na parte superior da torre, e 04 sub-condutores por fase (feixe convencional).

Os resultados mostram os parâmetros elétricos da linha original, bem como as parcelas das matrizes de parâmetros referentes à análise de sensibilidade. Essas parcelas foram identificadas na teoria apresentada.

2.0 - INTRODUÇÃO TEÓRICA

2.1 Cálculo de Parâmetros

A matriz Z é a matriz primitiva de parâmetros longitudinais unitários, expressa em $\Omega/\text{comprimento}$; e Y é a matriz primitiva de parâmetros transversais, em $S/\text{comprimento}$. Estas matrizes, de dimensões $n \times n$, são matrizes simétricas e dependentes da freqüência. A matriz primitiva longitudinal corresponde à impedância série por unidade de comprimento de uma linha de transmissão com n condutores. Os elementos desta matriz são dados pela Equação (1).

Algumas hipóteses simplificadoras da modelagem da linha trifásica através das matrizes primitivas foram consideradas em (2): o solo é plano nas vizinhanças da linha e considerado homogêneo com condutividade e constante dielétrica uniforme; os efeitos terminais da linha são desprezados na determinação do campo eletromagnético; o efeito das estruturas também é desprezado no cálculo do campo eletromagnético; os cabos compostos de fios encordoados, e com alma de aço, são representados por um condutor tubular com seção reta com a forma de uma coroa circular, na qual a corrente na alma de aço é desprezada.

A contribuição $R_{cij} + j \cdot X_{cij}$ é a impedância interna de cada condutor. Para $i \neq j$, a impedância interna é nula. A distribuição de corrente não é considerada uniforme nos condutores. Este fato ocorre devido ao campo interno aos condutores, uma vez que a corrente concentra-se na superfície do condutor e diminui em direção ao centro do condutor à medida que a freqüência aumenta (efeito pelicular). Considerando o efeito pelicular e as condições de contorno obtêm-se as expressões de campo elétrico, campo magnético e densidade de corrente através das Equações de Maxwell. Estas grandezas físicas são obtidas da resolução de equações diferenciais, cujas soluções são combinações (soma, produto e quocientes) de Funções de Bessel. Então, chega-se à expressão da impedância interna em (2).

O termo X_{gij} está associado à reatância externa considerando o solo ideal, isto é, de condutividade infinita, é apresentada pela Equação (2-a). Esta expressão foi obtida considerando-se i e j condutores cilíndricos paralelos ao solo plano, conforme mostra a Figura 1-(a). As imagens de i e j são i' e j' , respectivamente. Para $i = j$, chega-se a Equação 2-(b).

$$Z_{ij} = R_{cij} + j \cdot X_{cij} + R_{eij} + j \cdot X_{eij} + j \cdot X_{gij} \quad (1) \quad Z_{eij} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \omega \cdot \int_0^{\infty} \left(\sqrt{\xi^2 + j} - \xi \right) \cdot e^{-(hi+hj) \cdot \xi} \cdot \cos(yij \cdot \xi) \cdot d\xi \quad (3)$$

$$X_{gij} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (2-a) \quad h_i' = H_i \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{\rho}}, \quad h_j' = H_j \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{\rho}} \quad (4)$$

$$X_{gij} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot H_{ij}}{R_i} \right) \quad (2-b) \quad y_{ij}' = y_{ij} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{\rho}}, \quad \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

A contribuição $R_{eij} + j \cdot X_{eij}$ é a impedância Z_{eij} devido à correção de solo real, apresentada em (3). Carson considerou em suas hipóteses dois condutores cilíndricos i e j , mostrados na Figura 1, de extensão infinita, paralelos, de pequeno diâmetro em face da distância entre eles e da distância entre ele e o solo, sendo os condutores paralelos ao solo. A Equação (3) é obtida por Carson para Z_{eij} , variando i e j de 1 até n condutores na linha. A Equação 3, definida para condutores i e j distintos, também se aplica para $i = j$. Os termos H_i , H_j e y_{ij} são definidos na Figura 1.

A partir da matriz primitiva, chega-se à matriz reduzida através de técnicas de Eliminação de Gauss (2) e, na qual chega-se às matrizes equivalentes reduzidas a linha original, cuja dimensões corresponde ao número de fases da linha. Na redução, o efeito dos cabos pára-raios é incorporado nas matrizes equivalentes.

2.2 Linha Transposta

Normalmente as linhas de transmissão são transpostas, ou seja, os feixes das fases trocam de posição em intervalos regulares ao longo da linha, visando balancear os parâmetros elétricos para a freqüência fundamental.

A transposição é dimensionada considerando a hipótese de regime permanente, na qual o intervalo de transposição é inferior a um quarto do comprimento de onda (ciclos de transposição da ordem de 100 km para um comprimento de onda a 60 Hz de aproximadamente 5000 km).

Apesar de considerar-se uma linha transposta ser correto para uma análise a frequência fundamental, algumas propriedades dos parâmetros da linha são mais facilmente identificadas caso a linha seja considerada transposta para toda a gama de frequência sob análise. No entanto, esta é uma aproximação que é válida quando o comprimento de onda das frequências dos fenômenos envolvidos é muito menor do que o trecho de transposição (no caso em torno de 100 km). Muitas vezes esta restrição deixa de ser respeitada e a linha é suposta idealmente transposta para todas as simulações de transitórios, o que acarreta em imprecisões que devem ser analisadas.

No presente trabalho para efetuar a análise de sensibilidade optou-se por considerar a linha idealmente transposta para toda a gama de frequências analisadas para poder identificar efeitos dominantes. Uma análise de sensibilidade considerando a linha como não transposta iria obter características de segunda ordem, função do grau de assimetria da linha específica analisada.

2.3 Transformação Fase-Modo

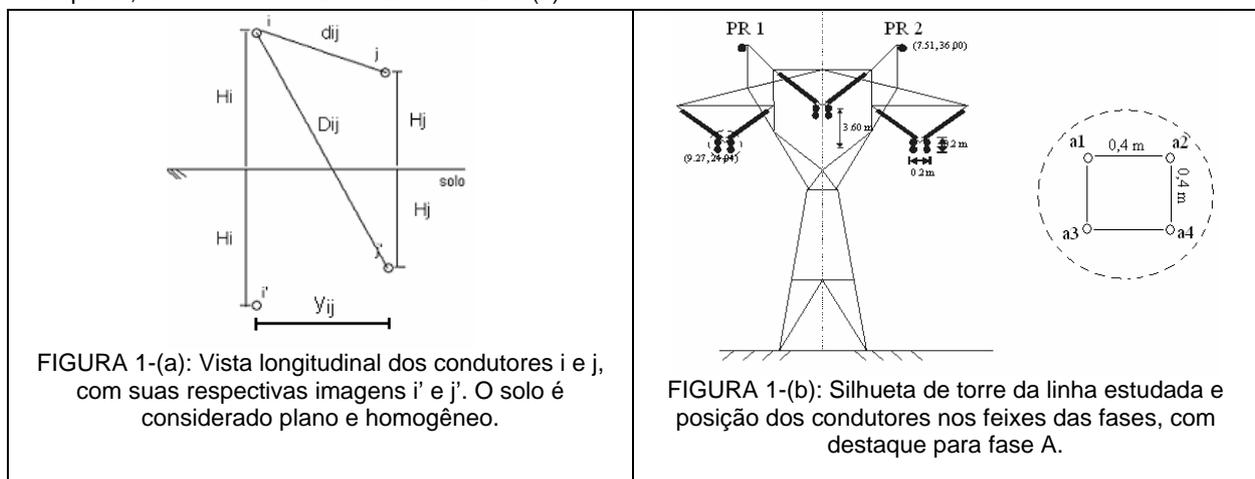
As matrizes de parâmetros longitudinais e transversais são matrizes cheias, ou seja, existe um acoplamento mútuo entre as fases tanto em termos de efeitos longitudinais (indutivo) quanto em termos de efeitos transversais (capacitivo). Este tipo de acoplamento dificulta a análise das características principais, pois acarreta a mistura dos efeitos. Para facilitar a manipulação adotou-se a transformação de coordenadas. Os parâmetros obtidos em componentes de fase foram transformados em modos naturais de propagação. Desta forma as matrizes de parâmetros tornaram-se matrizes de diagonais.

Uma linha polifásica é desacoplada através de matrizes de transformação modal, tal que cada modo pode ser analisado separadamente como um circuito monofásico (9). Na linha trifásica idealmente transposta, estes modos são os modos não homopolares (dois modos idênticos) e o modo homopolar. Os dois primeiros modos foram referidos ao longo do texto como modo alfa devido à transformação utilizada.

A matriz de transformação utilizada no cálculo dos modos naturais, para linha idealmente transposta, corresponde à matriz de Clarke $[T_{ck}]$ (7). Devido às características especiais da linha idealmente transposta, outras matrizes de transformação poderiam ser utilizadas, como a matriz de Fortescue, dentre outras. A matriz impedância em modos é dada pela Equação 6:

$$Z_{modo} = [T_{ck}]^{-1} \cdot Z_{fase} \cdot [T_{ck}] \quad (6)$$

Na Equação 6, Z_{fase} é a matriz impedância no domínio das fases. Aplicando-se a transformação de Clarke à linha transposta, obtêm-se os modos exatos da linha (5).



3.0 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Os estudos de análise de sensibilidade foram aplicados à linha da CESP de 440 kV, trecho de Araraquara-Bauru, cuja silhueta de torre e a posição dos condutores no feixe das fases são mostradas na figura 1-(b). A linha possui dois cabos pára-raios de diâmetro 9,1 mm na parte superior da torre, e no feixe de cada fase, quatro condutores do tipo alumínio com alma de aço (ACSR), código Grosbeak.

A matriz primitiva longitudinal e a matriz reduzida no domínio dos modos foram calculadas variando-se a frequência desde 10 Hz até 1 MHz. Neste cálculo, a resistividade do solo foi considerada constante de valor 1000 Ω .m. Linha foi suposta idealmente transposta.

3.1 Diâmetro dos Cabos Pára-Raios

O cálculo das matrizes de parâmetros na frequência foi implementado, mantendo-se constante a distribuição espacial dos condutores e o diâmetro dos condutores de fase. Nesta etapa variaram-se somente os diâmetros adotados para os cabos pára-raios, sendo o valor original de 9,1 mm, e a faixa de variação de 1,6 mm (menor valor comercial) a 26 mm (maior valor comercial).

A variação do diâmetro dos cabos pára-raios, conforme a teoria apresentada, exercerá influência na impedância interna e na indutância própria externa devido ao efeito do solo real.

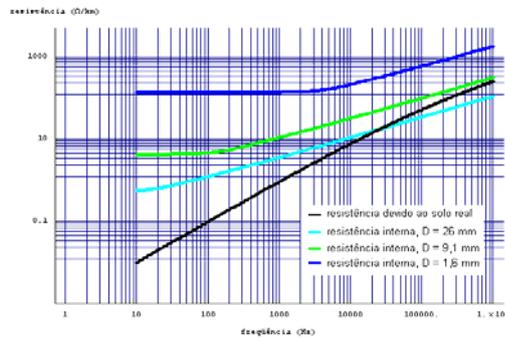


FIGURA 2-(a): Resistência interna de “PR1” e sua correção de solo real na frequência.

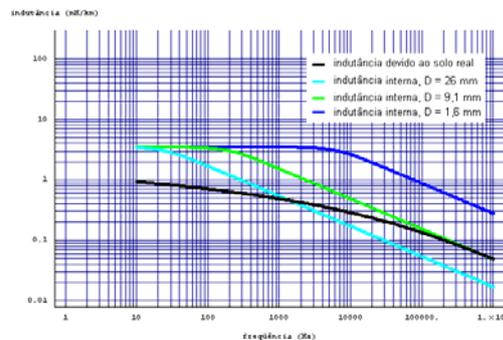


FIGURA 2-(b): Indutância interna de “PR1” e sua correção de solo real na frequência.

A Figura 2-(a) apresenta a resistência interna e o termo próprio do efeito do solo real de “PR1” na frequência, considerando os diâmetros de 1,6 mm; 9,1 mm (linha original) e 26 mm. Nesta figura, para o diâmetro de 26 mm, a resistência interna nas baixas frequências é a menor e o efeito pelicular passa a ser importante a partir de 20 Hz. No caso do diâmetro de 1,6 mm, a resistência interna não sofre variação significativa até a frequência de 2 kHz, a partir da qual o efeito pelicular deixa de ser desprezível.

A resistência própria do cabo pára-raios devido ao efeito do solo nas baixas frequências varia desde 1 % da resistência interna para o menor diâmetro até 10 % da resistência interna para o maior diâmetro. Nas altas frequências, aumentando-se o diâmetro do cabo pára-raios, o efeito do solo aproxima-se mais da resistência interna do que para diâmetros menores.

Resumindo, quanto menor o diâmetro do cabo menor o efeito pelicular na resistência e indutância interna, ou seja, a variação entre a resistência (indutância) para baixa frequência e alta frequência será menor para condutores de menor diâmetro. Além disto, a frequência em que o efeito pelicular começa a ser importante é maior para condutores de menor diâmetro.

Da Equação 2-(b), verifica-se que a indutância externa própria para solo ideal independe da frequência e varia inversamente com o diâmetro do condutor. O aumento no diâmetro do menor ao maior valor comercial provocou uma redução de 24% na indutância externa própria.

A variação do diâmetro dos cabos pára-raios não acarretou mudanças significativas nos modos não homopolares. As alterações no diâmetro de pára-raios são perceptíveis para as matrizes primitivas.

3.2 Diâmetros dos Condutores Fase

Analogamente aos cabos pára-raios, alterações nos diâmetros dos condutores fase influenciaram a impedância interna e a indutância externa própria para solo ideal.

Os condutores de fase da linha, do tipo ACSR, possuem seção reta do tipo coroa circular, de diâmetro interno D_0 e diâmetro externo $k \cdot D_0$, sendo $k > 1$. Conforme os valores comerciais, D_0 varia desde 1,33 mm até 13,1 mm; e k varia de 2,33 até 7,0. O valor de k para a linha original foi de 2,71.

O comportamento da resistência e da indutância internas do condutor fase “a1” em função da frequência, considerando $k = 2,71$ e D_0 variando, são apresentados nas Figuras 3-(a) e 3-(b), respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos em relação às matrizes primitivas, ou seja:

- O aumento de D_0 acarretou diminuição da frequência de início do efeito pelicular.
- Nas altas frequências o efeito do solo real na resistência é predominante e nas baixas frequências predomina o efeito pelicular para a resistência interna.
- A indutância interna em toda a faixa de frequência é desprezível frente ao efeito de solo real.

A indutância externa própria do condutor “a1” considerando solo ideal variou desde 1,3 mH/km, para o maior diâmetro externo até 1,98 mH/km, para o menor diâmetro externo possível.

A Figura 4-(a) mostra a resistência nos modos em função da frequência variando-se o diâmetro interno e fazendo “ k ” constante. Analogamente, a indutância nos modos em função da frequência é apresentada na Figura 4-(b). A indutância nos modos não homopolares diminui com o aumento do diâmetro interno e “ k ” constante. Já a indutância no modo homopolar sofreu pequena variação com o diâmetro interno.

Uma outra análise foi realizada fixando-se D_0 em 9,3 mm (linha original) e variando “k” de 2,33 até 7,0. Desta situação verificou-se que a resistência interna não se alterou, isto é, apenas o efeito da frequência foi observado. Na indutância interna, o aumento de “k” acarretou redução da indutância interna para baixas frequências. Para frequências acima de 1 kHz, houve superposição das indutâncias para os valores limites de “k”.

3.3 Altura dos Condutores

A variação da altura dos condutores afetará os valores de impedância devido ao solo real, reatância externa para o solo ideal e na admitância, conforme Equações (2-a), (2-b) e (3), respectivamente.

Os condutores tiveram suas alturas modificadas de maneira uniforme, através de uma translação vertical do conjunto, na qual variou-se a altura dos condutores inferiores H_0 para os seguintes valores: 5 m, 10 m, 14,92 m (linha original), 20 m e 100 m. Destes valores, chegou-se à altura dos demais condutores, mantendo-se idênticas as alturas relativas da linha original entre os condutores, bem como suas distâncias horizontais. Para cada valor de altura de condutores inferiores, foi realizado o cálculo dos parâmetros elétricos para as matrizes primitivas longitudinais e transversais, nas fases; e no domínio dos modos.

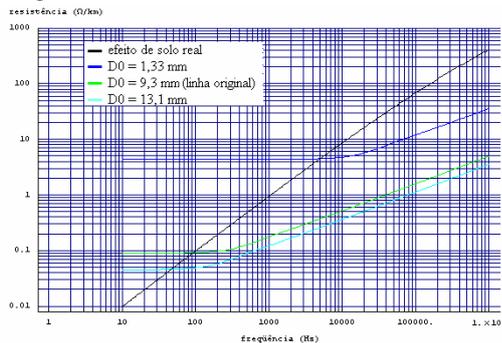


FIGURA 3-(a): Resistência interna de “a1” e sua correção de solo real na frequência.

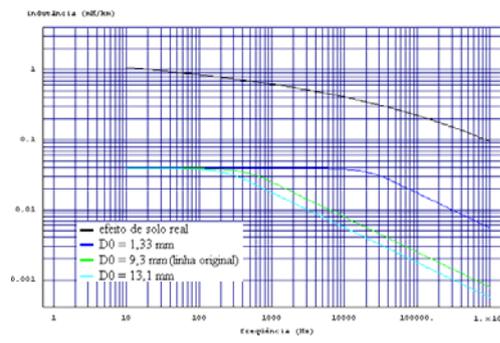


FIGURA 3-(b): Indutância interna de “a1” e sua correção de solo real na frequência.

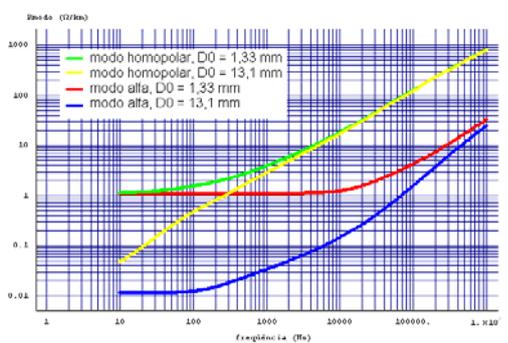


FIGURA 4-(a): Resistência nos modos em função da frequência.

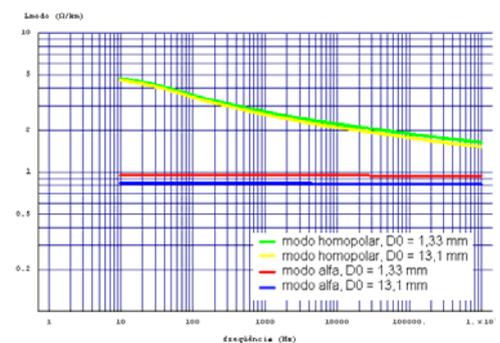


FIGURA 4-(b): Indutância nos modos em função da frequência.

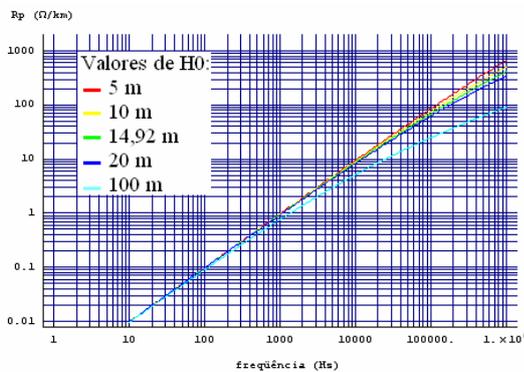


FIGURA 5-(a): Resistência própria de “a1” devido ao efeito de solo real x frequência.

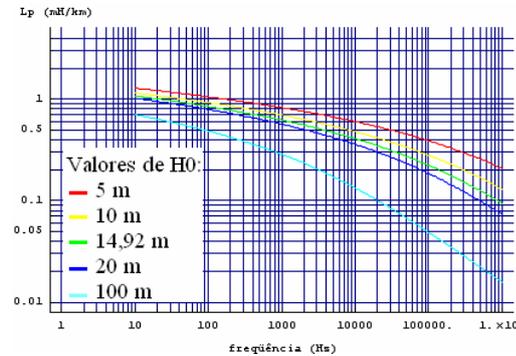


GRÁFICO 5-(b): Indutância própria de a1 devido ao solo real x frequência.

As Figuras 5-(a) e 5-(b) mostram o efeito do solo real, em função da frequência, na resistência própria do condutor

“a1”. Até a frequência de 1 kHz, a resistência devido ao solo real independe da altura dos condutores. Nas altas frequências, a altura é dominante. A partir de 1 kHz, verifica-se que a elevação dos condutores em uma linha provoca a redução na resistência devido ao efeito do solo, adotando-se um mesmo valor de frequência. Em 1 MHz, por exemplo, as resistências variam 83 % com a elevação dos condutores inferiores de 5 m até 100 m.

A Figura 5-(b) mostra a indutância própria devido ao efeito do solo real em função da frequência, considerando-se a faixa de alturas de condutores estudadas. Em todas as faixas de frequência, a indutância de solo real sofre influência da altura. A elevação do conjunto dos condutores da linha provocou uma redução na indutância de solo real. A influência da altura intensifica-se com o aumento da frequência. Considerando a faixa de alturas, para 10 Hz a redução na indutância foi de 53 %; enquanto em 1 MHz a redução foi de 93 %.

A Tabela 1 apresenta os valores de indutâncias e capacitâncias, considerando o solo como um condutor ideal. A elevação dos condutores de 5 m até 100 m acarretou aumento de 43 % na indutância própria e aumento da ordem de 5,6 vezes no acoplamento indutivo. Em termos da capacitância, a própria sofreu redução da ordem 1,6 %; enquanto o acoplamento capacitivo aumentou em 47 %.

TABELA 1 – Indutâncias e capacitâncias para solo ideal e altura H0.

H0 (m)	Lp a1 (mH/km)	Lm a1-b1 (mH/km)	Cp a1 (nF/km)	Cm a1-b1 (nF/km)
5	1,35072	0,108713	12,6258	0,103878
10	1,4818	0,192995	12,5397	0,135939
14,92	1,55927	0,254349	12,5044	0,152373
20	1,61655	0,303511	12,4843	0,162674
100	1,93527	0,604817	12,4271	0,196898

A Figura 6-(a) mostra a resistência nos modos em função da frequência para as diferentes alturas. Até a frequência de 1 kHz, a resistência pouco variou na faixa de alturas analisadas. A resistência nos modos não homopolares mostrou-se independente da altura dos condutores para as frequências inferiores a 1 kHz. Acima deste valor, observa-se que a elevação do conjunto dos condutores da linha acarretou redução na resistência nos modos.

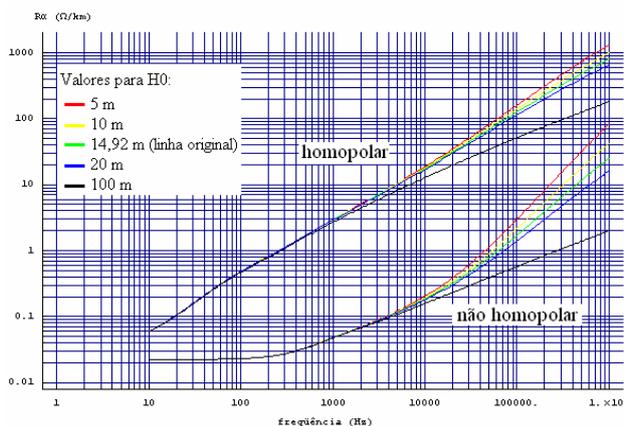


FIGURA 6-(a): Resistência modos x frequência.

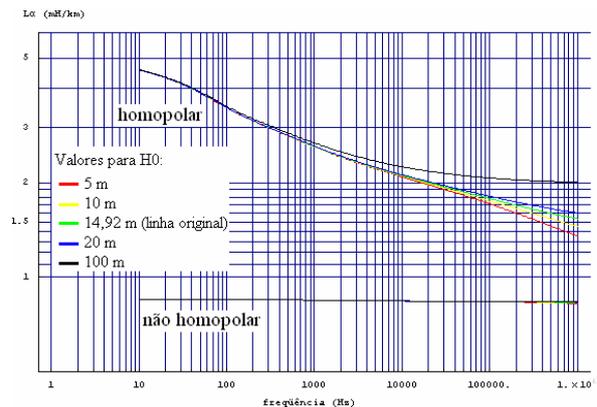


FIGURA 6-(b): Indutância modo alfa x frequência.

A variação da resistência homopolar em função da frequência para a faixa de alturas analisadas é apresentada na Figura 6-(a). Nas duas primeiras décadas de frequências, constatou-se a superposição das curvas para a faixa de alturas analisadas. Em 10 kHz, a variação da resistência homopolar com a elevação dos condutores do menor até o maior valor de altura foi de 9 %. Nas altas frequências, o efeito da altura dos condutores é mais importante e verifica-se que o aumento da altura provoca redução na resistência homopolar. A máxima variação para os valores limites de altura ocorre para 1 MHz e corresponde a 80 %.

A indutância nos modos, mostrada na Figura 6-(b), observa-se a influência da variação das alturas dos condutores da linha. Para todos os casos de variação das alturas, a indutância não homopolar da linha sofreu variações desprezíveis em função da frequência. Conforme a Figura 6-(b), pode-se considerar que as indutâncias não homopolares sofrem pouca influência da frequência e da altura, sendo aproximadamente constantes para estes dois parâmetros. Com relação à indutância homopolar, observou-se a superposição das curvas dos diferentes casos até a frequência de 10 kHz. A partir deste valor, observa-se que a indutância homopolar aumenta com a elevação dos condutores de uma linha, considerando um determinado valor de frequência. A influência da altura é mais importante nas altas frequências, apresentando a máxima variação de 54% em relação à menor altura na frequência de 1 MHz.

3.4 Distância Horizontal entre Condutores

A linha original (caso base) teve suas distâncias horizontais das fases extremas ao eixo de simetria modificadas. Adotou-se como referencial a máxima distância horizontal de condutores ao eixo de simetria. No caso base, esta

foi de 9,47 m. A máxima distância horizontal variou para $\frac{3}{4}$ (caso I), $\frac{1}{2}$ (caso II) e $\frac{1}{4}$ (caso III) do valor referencial (9,47 m). Foram mantidos as posições na torre dos cabos pára-raios e os espaçamentos entre condutores nos feixes de cada fase.

A resistência e indutância devido ao solo real entre os condutores a1 e b1 em função da frequência para os casos propostos são apresentadas na Figura 7-(a), na qual verificou o aumento de ambas com a aproximação das fases. A máxima variação da resistência foi um aumento de 2,6 %, em 1 MHz. Até a frequência de 1 kHz, pode-se considerar que a aproximação das fases não impacta no efeito de solo real na resistência. Na mesma Figura 7-(a), o máximo aumento na indutância ocorreu para 1 MHz, equivalente a 6 % em relação ao caso base. O aumento do acoplamento indutivo foi nítido em toda a faixa de frequências. Para os condutores a1 e c1, as máximas variações ocorreram em 1 MHz e foram de 12 % e 25 % para resistência e indutância de solo real, respectivamente.

A indutância externa e a capacitância entre a1 e b1 em função da distância horizontal é mostradas na Tabela 2. A indutância externa para solo ideal, que não depende da frequência, é influenciada pela distância horizontal entre os condutores. A redução nessa distância provoca o aumento do acoplamento indutivo entre as fases. Ocorreu um aumento de 65 % na indutância mútua entre a1 e b1, provocado pela variação do caso base até o caso III. De maneira análoga à indutância externa mútua, o acoplamento capacitivo mútuo aumenta quando as fases são aproximadas, como pode ser verificado na Tabela 2, na qual o acoplamento capacitivo aumenta cerca de 75 % para a faixa de casos analisados.

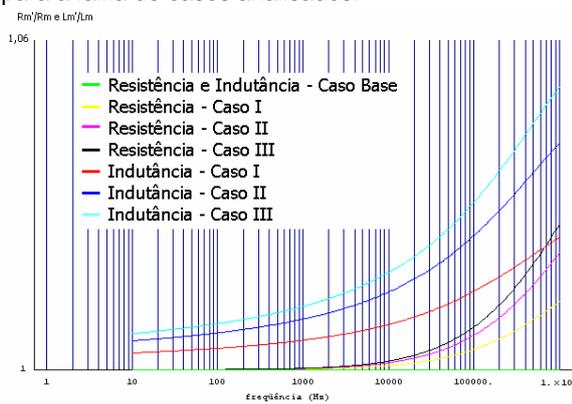


FIGURA 7-(a): Efeito do solo real na resistência e indutância mútuas por unidade na frequência para os casos I, II e III e caso base.

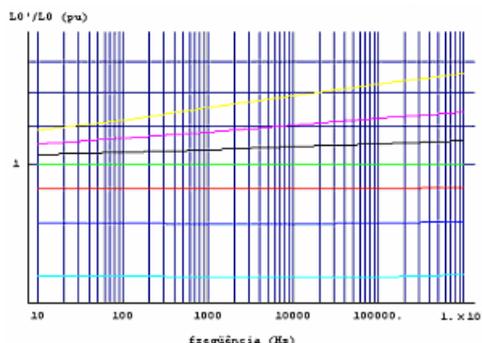
TABELA 2 – Indutância e capacitância externas mútuas.

Caso	Lm a1-b1 (mH/km)	Cm a1- b1 (pF/km)
Caso Base	0,254349	0,152373
I	0,30028	0,186039
II	0,357054	0,230748
III	0,419899	0,278917

TABELA 3 – Indutância relativa ao caso base por unidade não homopolar.

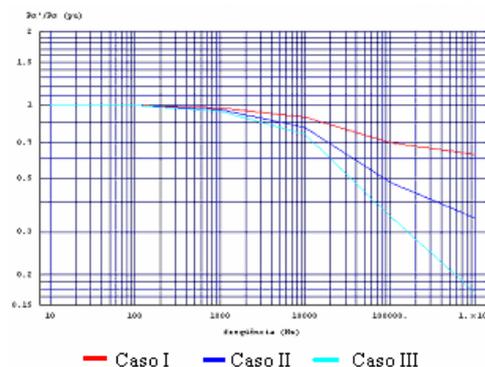
Caso	L_{α} (10 Hz)	L_{α} (1 MHz)
Caso Base	1,00	1,00
I	0,93834	0,940698
II	0,859143	0,862485
III	0,750744	0,753159

Na primeira década de frequências, a resistência não homopolar, na Figura 8-(b), permaneceu constante com a distância horizontal entre os condutores, apresentando os mesmos valores da linha original. A partir de 1 kHz, o efeito da redução da distância horizontal é mais importante. Foi observado que a aproximação dos condutores provocou redução na resistência não homopolar. A máxima redução da resistência ocorreu em 1 MHz para a menor distância horizontal analisada (Caso III). O valor final do caso III foi de 0,16 do caso base (1,0 pu).



homopolar: — caso III — caso II — caso I
 não homopolar: — caso III — caso II — caso I
 caso base —

FIGURA 8-(a): Indutância em relação ao caso base, função da frequência.



— Caso I — Caso II — Caso III

FIGURA 8-(b): Resistências não homopolares em relação ao caso base, em função da frequência, variando-se a distância horizontal entre condutores.

A indutância (p.u.) nos modos é apresentada na Figura 8-(a), na qual a indutância homopolar aumentou diante da aproximação das fases. Já a indutância não homopolar reduziu seu valor diante da aproximação, como mostra a

Tabela 3.

A resistência no modo homopolar sofre um pequeno aumento com a aproximação horizontal dos condutores fase. O maior acréscimo, em função desta aproximação, é de aproximadamente 4 % em relação à linha original e ocorre para 1 MHz.

4.0 - CONCLUSÕES

Uma análise de sensibilidade dos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão em relação a diâmetro de cabos pára-raios, diâmetro dos condutores de fase, altura e distância horizontal dos condutores no domínio da frequência foi apresentada.

Na impedância própria primitiva dos condutores fase, a correção de solo real na resistência é dominante nas altas frequências, enquanto a resistência interna predomina nas baixas frequências. A indutância externa é a principal parcela da indutância primitiva própria. Nas altas frequências, o efeito de solo real e a contribuição interna na indutância tornam-se desprezíveis frente à indutância primitiva própria.

Quanto maior o diâmetro do cabo pára-raios, menores as frequências para iniciar o efeito pelicular. Os valores de resistência e indutância nos modos não homopolares mostraram-se independente da variação do raio dos cabos pára-raios, enquanto que o efeito da variação do diâmetro dos condutores fase apresentou uma maior importância.

A indutância mútua externa e a indutância devido ao efeito do solo real (Carson) apresentaram maior sensibilidade para a elevação dos condutores da linha. Em termos de modos, a resistência sofre pouca influência da altura até 1 kHz; a indutância homopolar teve maior influência da altura, tendo seu valor aumentado com a elevação dos condutores. A variação de altura tornou-se nítida a partir de 10 kHz para resistência e indutância homopolar. A indutância não homopolar mostrou-se pouco dependente da altura e da frequência.

Quanto à distância horizontal, a resistência de solo real independe do espaçamento entre condutores para frequências até 10 kHz. Em termos de modos, a indutância não homopolar é mais sensível a alterações do espaçamento entre condutores; enquanto na variação das alturas, essa se mostra independente. A resistência não homopolar independe da distância horizontal para frequências abaixo de 1 kHz.

Os resultados apresentados no presente estudo poderão servir para o desenvolvimento de novas metodologias e fórmulas simplificadas para cálculo de parâmetros e modelagem de linhas de transmissão.

5.0 - AGRADECIMENTOS

CAPES-CNPq e FAPESP pelo suporte financeiro e Centrais Elétricas Brasileiras – ELETROBRÁS S.A., pelo apoio ao trabalho e viabilização da sua apresentação.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Marti, J.; Accurate Modeling of Frequency-Depend Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations; IEEE Transactions on PAS; Vol. PAS-101, No. 1; 1982.
- (2) Portela, C. M.; Regimes Transitórios – vol. II; Editora COPPE/UFRJ e Eletrobrás; 1984.
- (3) Carson, J. E.; Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return; Bell System Technical Journal; pg 539-554; 1926.
- (4) Pollaczek, V. F.; Über das Feld einer unendlich langen wechsel stromdurchflossenen Einfachleitung; ENT; Band 3; pg 339-359; 1926.
- (5) Kurokawa, S.; Parâmetros Longitudinais e Transversais de Linhas de Transmissão Calculados a Partir das Correntes e Tensões de Fase; Tese de Doutorado; Unicamp; 2003.
- (6) Portela, C. M., Tavares, M. C., Pissolato Filho, J., Accurate Representation of Soil Behaviour for Transient Studies, Accurate Representation of Soil Behaviour for Transient Studies, vol. 150, no. 6 , pgs. 736-744, nov-2003, 2003.
- (7) Tavares, M. C.; Modelo de Linha de Transmissão Polifásica utilizando Quase-Modos; Tese de Doutorado; UNICAMP; 1998.
- (8) Tavares, M. C.; Pissolato, J.; Portela, C. M.; Mode domain multiphase transmission line model-use in transient studies; IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 14, no.: 4, Out-1999, pg: 1533 - 1544; 1999.
- (9) Wedepohl, L. M.; Application of matrix methods to the solution of traveling-wave phenomena in polyphase systems; Proc. IEE; Vol. 110; No. 12; 1963.