
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DEPENDENTES NA FREQUÊNCIA

Michel Gonçalves Pinheiro*
michelgp@petrobras.com.br

Maria Cristina Tavares†
cristina@dsce.fee.unicamp.br

*PETROBRAS - RH/UP/ECTGE
Rua Ulysses Guimarães 565, Cidade Nova
CEP 20211-445 - Rio de Janeiro - RJ

†UNICAMP/FEEC
Caixa Postal 6101 - CEP 13083-970 Campinas - SP

RESUMO

Neste trabalho foi realizada uma extensa análise de sensibilidade dos parâmetros elétricos longitudinais e transversais de uma linha de transmissão trifásica em função da frequência. Uma linha real de 440 kV foi utilizada como base para a parametrização. Na análise de sensibilidade variaram-se as seguintes características da linha: diâmetro dos cabos pára-raios, diâmetros dos condutores fase, altura dos condutores, distância horizontal entre as fases e geometria dos feixes das fases. Para cada variação, observou-se o comportamento dos parâmetros em termos das parcelas das matrizes primitivas e em termos de componentes modais. Em relação à modelagem, o trabalho contribuirá para o desenvolvimento de novas metodologias e de fórmulas simplificadas para cálculo de parâmetros aplicado a análise de transitórios de manobra.

PALAVRAS-CHAVE: dependência na frequência, domínio dos modos, análise de sensibilidade, linha de transmissão, transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

In this work a large sensitivity analysis of longitudinal and transversal electrical parameters of a three-phase transmis-

sion line in frequency domain was performed. An actual 440 kV transmission line was used as reference. In sensitivity analysis, the following line characteristics were varied: ground wires diameter, phase conductors diameter, height of conductors, horizontal distance among phases and vertical spacing within external phase bundle. For each line characteristic, the performance of electrical parameters in frequency domain, in terms of primitive and modal matrices was observed.

KEYWORDS: frequency dependence, modal domain, sensitivity analysis, transmission line, electromagnetic transient.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de parâmetros elétricos de linhas de transmissão é de grande importância para as 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 com a frequência dos parâmetros longitudinais. 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 de tensão e corrente (Marti 1982). Ocorre que não é somente

Artigo submetido em 24/10/2008 (Id.: 00911)

Revisado em 26/02/2009

Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Darizon Alves de Andrade

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. Pode-se afirmar que a correta modelagem da linha é essencial para se reproduzir o comportamento da linha.

Os parâmetros elétricos longitudinais (resistência e indutância) e transversais (capacitância) por unidade de comprimento foram calculados no domínio da frequência para uma linha real, considerada o caso base. 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.

No presente trabalho, 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. A análise de sensibilidade foi feita inicialmente para as parcelas que compõem as matrizes primitivas da linha (solo ideal, efeito pelicular dos condutores e correção de solo real) e numa segunda etapa para os modos homopolar e não homopolar.

As características da linha analisadas 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 das fases, 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).

2 INTRODUÇÃO TEÓRICA

2.1 Cálculo de Parâmetros

A matriz Z é a matriz primitiva de parâmetros longitudinais por unidade de comprimento, correspondentes à impedância série de uma linha, expressa em Ω/km ; e Y é a matriz primitiva de parâmetros transversais por unidade de comprimento, correspondente à admitância em paralelo, expressa em S/km . Essas matrizes, de dimensões $n \times n$ (n = número de condutores), são matrizes simétricas. A matriz primitiva longitudinal é dependente da frequência e tem seus elementos dados pela Equação 1.

$$Z_{ik} = R_{c_{ik}} + j \cdot X_{c_{ik}} + R_{e_{ik}} + j \cdot X_{e_{ik}} + j \cdot X_{g_{ik}} \quad (1)$$

Algumas hipóteses simplificadoras da modelagem da linha trifásica através das matrizes primitivas foram consideradas em (Portela 1984): 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 $R_{c_{ik}} + j \cdot X_{c_{ik}}$ é a impedância interna por unidade de comprimento de cada condutor. Para $i \neq k$, 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 frequência 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 (Portela 1984).

O termo $X_{g_{ik}}$ está associado à reatância externa considerando o solo e condutor ideais, isto é, de condutividade infinita, é apresentada pela Equação 2. Esta expressão foi obtida considerando-se i e k condutores cilíndricos paralelos ao solo plano, conforme mostra a Figura 1. As imagens de i e k são i' e k' , respectivamente. Para $i = k$, chega-se a Equação 3.

$$X_{g_{ik}} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right) \quad (2)$$

$$X_{g_{ik}} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot H_{ik}}{R_{1i}} \right) \quad (3)$$

A contribuição $R_{e_{ik}} + j \cdot X_{e_{ik}}$ é a impedância por unidade de comprimento $Z_{e_{ik}}$ devido à correção de solo real, apresentada por (Carson 1926) e (Pollaczek 1929). Carson considerou em suas hipóteses dois condutores cilíndricos i e k , 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 4 é obtida por Carson para $Z_{e_{ik}}$, variando i e k de 1

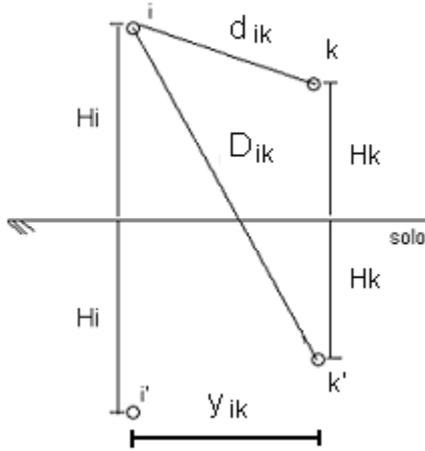


Figura 1: Condutores i e j com suas respectivas imagens i' e k'.

até n condutores na linha. A Equação 4, definida para condutores i e k distintos, também se aplica para i = k. Os termos H_i , H_k e y_{ik} são definidos na Fig. 1.

$$Z_{e_{ik}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \omega \int_0^\infty \left(\sqrt{\xi^2 + j} - \xi \right) e^{-(h'_i + h'_k)\xi} \cos(y'_{ik}\xi) d\xi \quad (4)$$

$$h'_i = H_i \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{\rho}}, \quad h'_k = H_k \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{\rho}} \quad (4a)$$

$$y'_{ik} = y_{ik} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \omega}{\rho}} \quad (4b)$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad (4c)$$

A partir da matriz primitiva, chega-se à matriz reduzida através de técnicas de Eliminação de Gauss (Portela 1984) e, na qual se chega às matrizes equivalentes reduzidas a linha original, cujas dimensões correspondem ao número de fases da linha. Na redução, o efeito dos cabos pára-raios é incorporado nas matrizes equivalentes.

2.2 Linha Transposta

No presente trabalho optou-se por considerar a linha como idealmente transposta para toda a gama de frequências analisadas para poder identificar efeitos dominantes. A correta representação da transposição da linha iria agregar efeitos de segunda ordem e serão objeto de análise em trabalho futuro.

2.3 Transformação Fase-Modo

Uma linha polifásica idealmente transposta é desacoplada através de matrizes de transformação modal, tal que cada modo pode ser analisado separadamente como um circuito monofásico (Wedepohl 1963). Na linha trifásica idealmente transposta, os modos são não homopolares (dois modos equivalentes às componentes de seqüência positiva e negativa) e o modo homopolar (equivalente à componente de seqüência zero).

A matriz de transformação utilizada no cálculo dos modos naturais, para linha idealmente transposta, corresponde à matriz de Clarke [TCK] (Tavares 1998), apresentada na Equação 5.

$$[T_{ck}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

As matrizes de parâmetros por unidade de comprimento da linha trifásica idealmente transposta apresentam os termos próprios idênticos entre si, bem como os termos mútuos idênticos entre si também. Matrizes com estas características apresentam 2 autovalores distintos, sendo um deles de ordem 2. Assim qualquer matriz de transformação (matriz de Fortescue, dentre outras) que se obtenha esses autovalores poderia ser utilizada. A matriz impedância em modos é dada pela Equação 6:

$$Z_{\text{mod } o} = [TCK]^{-1} \cdot Z_{\text{fase}} \cdot [TCK] \quad (6)$$

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.

3 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 2.

A linha possui dois cabos pára-raios de diâmetro 9,1 mm na parte superior da torre, permeabilidade magnética relativa igual a 70; e no feixe de cada fase, quatro condutores do tipo alumínio com alma de aço (CAA), código Grosbeak,

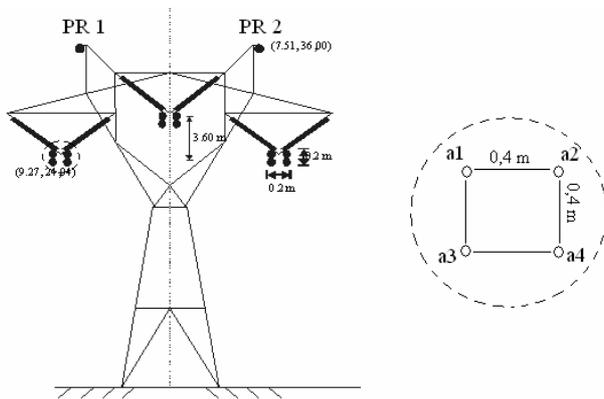


Figura 2: Silhueta da torre para caso base analisado e a posição dos condutores no feixe das fases, com destaque para a fase A.

permeabilidade magnética relativa igual a 1. A altura dos condutores utilizada já considera o efeito das flechas.

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.

3.1 Diâmetros dos Condutores Fase

As alterações nos diâmetros dos condutores fase influenciarão a impedância interna e a indutância externa própria para solo ideal.

Os condutores de fase da linha, do tipo CAA, 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 por unidade de comprimento dos condutores de fase em função da frequência, considerando $k = 2,71$ e D_0 variando, é apresentado nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Alguns resultados foram obtidos em relação às matrizes primitivas:

- Com o aumento de D_0 se reduz a frequência na qual o efeito pelicular inicia.
- 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.

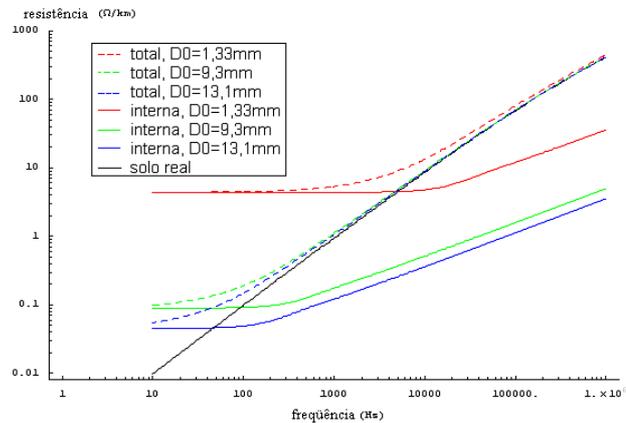


Figura 3: Resistência total unitária de “a₁”, parcelas interna e correção de solo real.

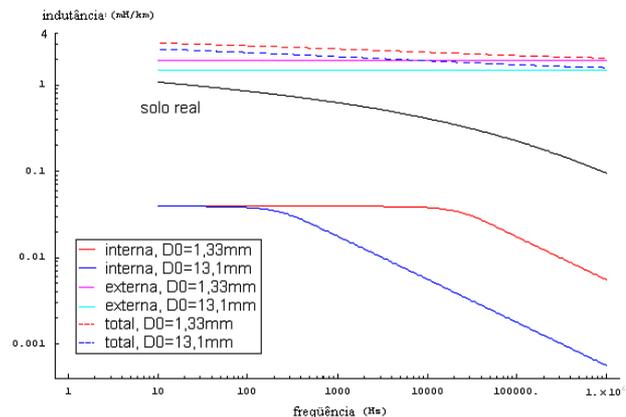


Figura 4: Indutância total unitária de “a₁” e suas parcelas.

A indutância externa própria unitária 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 Fig. 5 mostra a resistência unitária nos modos em função da frequência variando-se o diâmetro interno e “k”. Analogamente, a indutância por unidade de comprimento nos modos em função da frequência é apresentada na Figura 6. A indutância unitária nos modos não homopolares diminui com o aumento do diâmetro interno e “k” constante. Já a indutância unitária no modo homopolar sofreu pequena variação com o diâmetro interno.

Uma outra análise foi realizada fixando-se D_0 e variando “k” de 2,33 até 7,0. Verificou-se que apenas o efeito da frequência foi observado para a resistência interna unitária. O aumento de “k” acarretou redução da indutância interna unitária para baixas frequências. Para frequências acima de 1 kHz, houve superposição das indutâncias unitárias para os valores

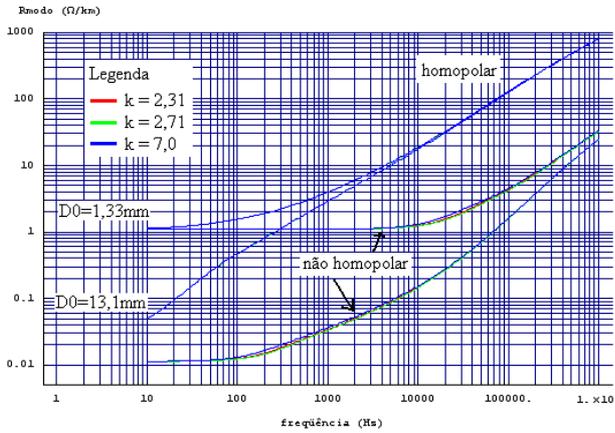


Figura 5: Resistência unitária nos modos em função da frequência.

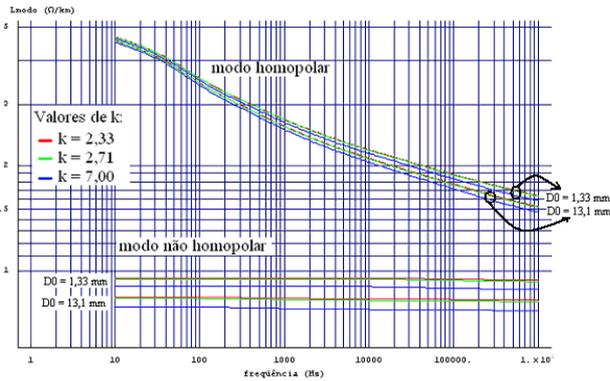


Figura 6: Indutância unitária nos modos em função da frequência.

limites de “k”.

A Tabela 1 apresenta a resistência, indutância e capacitância não homopolares em 60 Hz por unidade de comprimento, a impedância característica e a potência natural da linha, variando-se os diâmetros dos condutores de fase. O diâmetro interno e “k” influenciaram na potência natural da linha com o mesmo grau. O maior aumento na potência natural em relação ao caso base foi de 8,76 %.

3.2 Diâmetro dos Cabos Pára-Raios

O cálculo dos parâmetros na frequência foi implementado, variando-se os diâmetros dos cabos pára-raios, sendo o valor para o caso base de 9,1 mm, e a faixa de variação de 1,6 mm (menor valor comercial) a 26 mm (maior valor comercial).

O comportamento dos parâmetros nos modos em termos da variação dos diâmetros dos cabos pára-raios é mostrado na Fig. 7 e Fig. 8. A Fig. 7 mostra a resistência unitária nos

Tabela 1: Parâmetros elétricos não homopolares por unidade de comprimento, impedância característica e potência natural da linha.

| D_0 (mm) | k | R_{nh} (Ω /km) | L_{nh} (mH/km) | C_{nh} (nF/km) | z_0 (Ω) | S_0 (MVA) |
|------------|------|--------------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------|
| 1,33 | 2,33 | 1,5738 | 0,9534 | 12,10 | 465,22 - j370,95 | 325 |
| | 7 | 0,1454 | 0,9014 | 12,87 | 270,38 - j55,41 | 701 |
| 9,3 | 2,71 | 0,0228 | 0,8493 | 13,66 | 249,46 - j8,86 | 776 |
| 13,1 | 2,33 | 0,0165 | 0,8389 | 13,83 | 246,38 - j6,44 | 786 |
| | 7 | 0,0032 | 0,7817 | 14,85 | 229,40 - j1,23 | 844 |

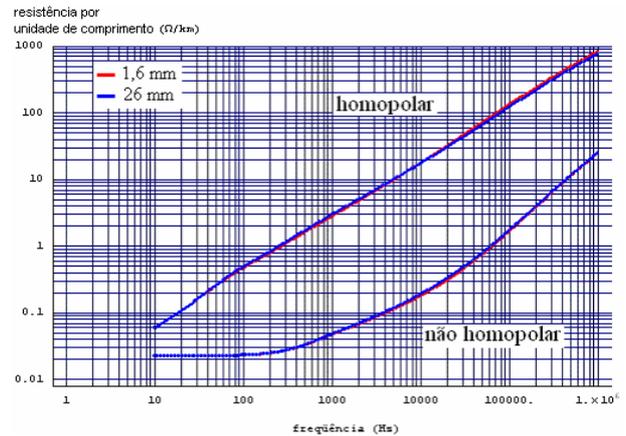


Figura 7: Resistência por unidade de comprimento nos modos em função da frequência - Variação do diâmetro dos cabos pára-raios.

modos em função da frequência, enquanto a Fig. 8 apresenta a indutância unitária nos modos em função da frequência.

A resistência e a indutância unitárias nos modos não apresentaram variações significativas com a variação dos diâmetros dos cabos pára-raios para a faixa de diâmetros comerciais utilizados. As curvas obtidas sobrepuseram-se às curvas referentes ao caso base. Conseqüentemente o fator de aterramento e a potência natural permaneceram inalterados.

3.3 Altura dos Condutores

A variação da altura dos condutores afetará os valores unitários de impedância devido ao solo real, reatância externa para o solo ideal e na admitância.

Os condutores tiveram suas alturas modificadas de maneira

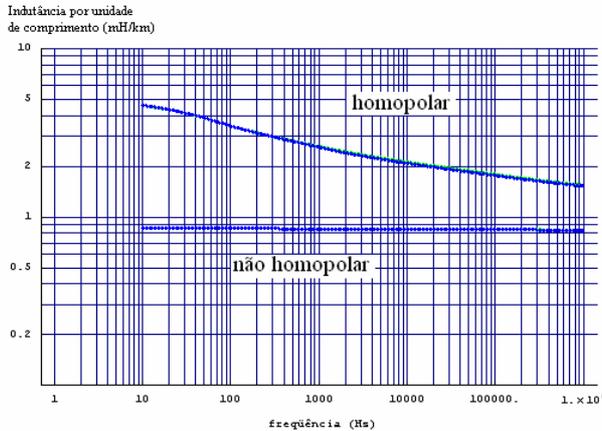


Figura 8: Indutância nos modos por unidade de comprimento em função da frequência - Variação do diâmetro dos cabos pára-raios.

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 H_0 , foi realizado o cálculo das matrizes de parâmetros elétricos nas fases e no domínio dos modos.

As Fig. 9 e 10 mostram a correção de solo real, em função da frequência, na resistência e indutância próprias unitárias de a_1 , respectivamente. Até a frequência de 1 kHz, a resistência unitária 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 unitária devido ao efeito do solo, adotando-se um mesmo valor de frequência. Em 1 MHz, por exemplo, as resistências unitárias variam 83 % com a elevação dos condutores inferiores de 5 m até 100 m.

Conforme a Fig. 10, em todas as faixas de frequência, a indutância unitária de solo real sofre influência da altura. A elevação do conjunto dos condutores da linha provocou uma redução na indutância unitária 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 unitária foi de 53 %; enquanto em 1 MHz a redução foi de 93 %.

A Tabela 2 apresenta os valores de indutâncias e capacitâncias por unidade de comprimento, considerando o solo como um condutor ideal. A elevação dos condutores de 5 m até 100 m acarretou aumento de 43 % na indutância unitária própria e aumento da ordem de 5,6 vezes no acoplamento indu-

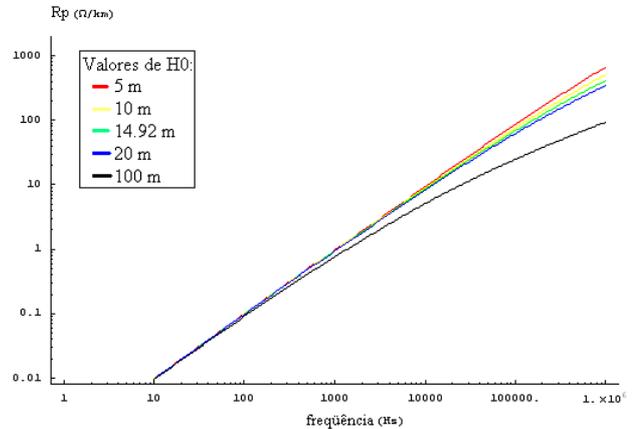


Figura 9: Parte resistiva da correção de solo real própria de “ a_1 ” na frequência.

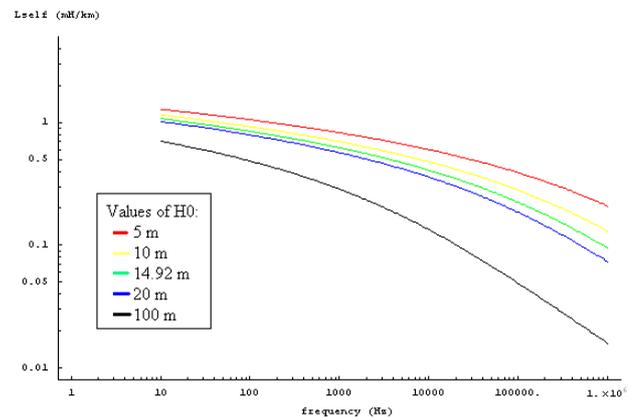


Figura 10: Parte reativa da correção de solo real própria de “ a_1 ” na frequência.

tivo. Em termos da capacitância unitária, a própria sofreu redução da ordem 1,6 %; enquanto o acoplamento capacitivo aumentou em 47 %.

Tabela 2: Indutâncias e capacitâncias por unidade de comprimento para solo ideal e altura H_0 .

| H_0 (m) | $L_p a_1$ (mH/km) | L_m a_1-b_1 (mH/km) | $C_p a_1$ (nF/km) | $C_m a_1-b_1$ (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 |

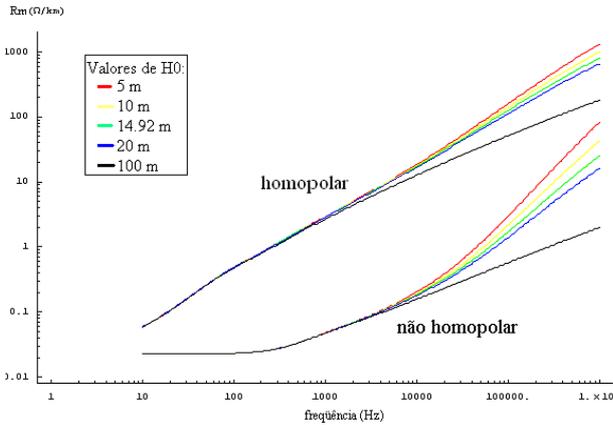


Figura 11: Resistência unitária nos modos em função da frequência.

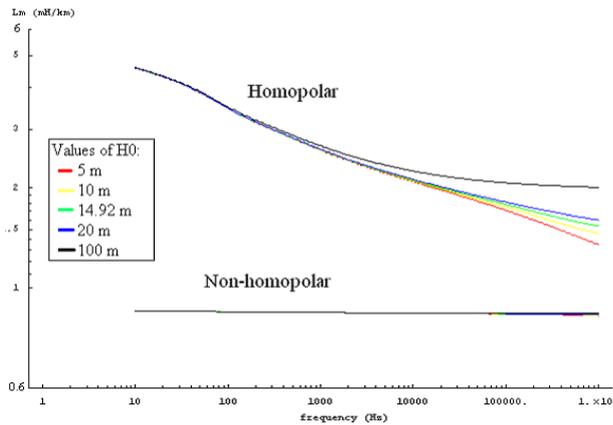


Figura 12: Indutância unitária nos modos em função da frequência.

A Fig. 11 mostra a resistência unitária nos modos em função da frequência para as diferentes alturas. Até a frequência de 1 kHz, a resistência unitária pouco variou na faixa de alturas analisadas. A resistência não homopolar por unidade de comprimento 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 unitária nos modos.

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 unitária homopolar com a elevação dos condutores na faixa de alturas analisadas foi de 9 %. Nas altas frequências, o efeito da altura dos condutores é mais significativo, verificando que o aumento da altura provoca redução na resistência homopolar unitária. A máxima variação ocorreu para 1 MHz e foi de 80 %.

A indutância unitária nos modos é mostrada na Fig. 12. Para

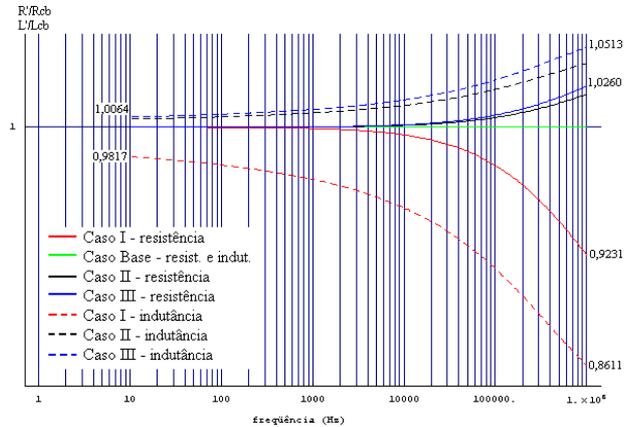


Figura 13: Correção de solo real mútua entre a_1 e b_1 na resistência e indutância.

todos os casos de variação das alturas, a indutância unitária não homopolar da linha sofreu variações desprezíveis em função da frequência. Com relação à indutância unitária 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 unitária 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 do caso base teve suas distâncias horizontais das fases externas ao eixo de simetria modificadas, sendo o 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 2 (caso I), $1/2$ (caso II) e $1/4$ (caso III) do caso base (9,47 m). Foram mantidas as posições dos pára-raios e as alturas dos condutores fase.

As correções de solo real para resistência e indutância mútuas entre a_1 e b_1 por unidade são apresentadas na Fig. 13, na qual se verificou o aumento de ambas com a aproximação das fases.

A máxima variação na parte resistiva da correção de solo real ocorreu em 1 MHz e foi igual a 11%. Até a frequência de 1 kHz, pode-se considerar que a aproximação das fases não impacta na correção de solo real na resistência. Na mesma Fig. 13, a máxima variação na parte indutiva da correção de solo real ocorreu para 1 MHz, equivalente a 19 % em relação ao caso base. O aumento do acoplamento indutivo foi nítido em toda a faixa de frequências. Para os condutores a_1 e c_1 , as

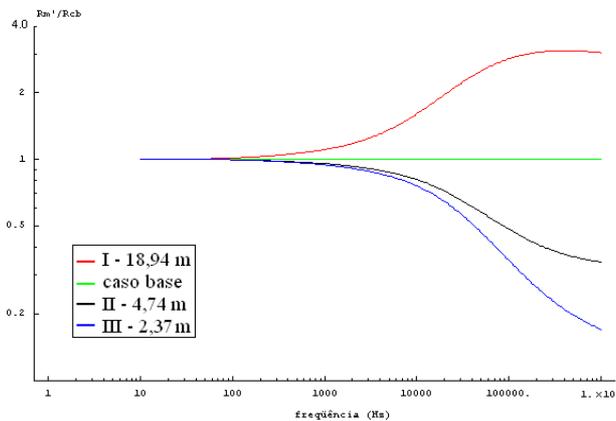


Figura 14: Resistência não homopolar por unidade de comprimento.

máximas variações ocorreram em 1 MHz e foram de 38 % e 65 % para a correção de solo real na resistência e indutância unitárias, respectivamente.

Tabela 3: Indutância e Capacitância externas, indutância não-homopolar por unidade de comprimento.

| Caso | $L_{ext} a_1 - b_1$ (mH/km) | $C_{ext} a_1 - b_1$ (nF/km) | L_{nh} (10 Hz) (pu) | L_{nh} (1 MHz) (pu) |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| I | 0,143125 | 0,078487 | 1,15754 | 1,13957 |
| Caso base | 0,254349 | 0,152373 | 1,00 | 1,00 |
| II | 0,357054 | 0,230748 | 0,859143 | 0,862485 |
| III | 0,419899 | 0,278917 | 0,750744 | 0,753159 |

A indutância externa, a capacitância externa e a indutância não homopolar unitárias em função da distância horizontal são mostradas na Tabela 3. A máxima aproximação das fases aumentou o acoplamento entre a_1 e b_1 indutivo de 193 % e 255% no acoplamento capacitivo, em relação ao Caso I.

Na primeira década de frequências, a resistência unitária não homopolar na Fig. 14, permaneceu constante, 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 em relação ao caso base.

A resistência unitária homopolar sofre um pequeno aumento com a aproximação horizontal dos condutores fase. O maior acréscimo, em função desta aproximação, é de 11 % em re-

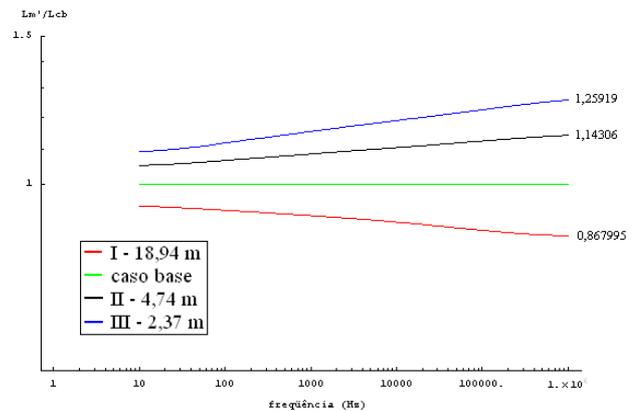


Figura 15: Indutância homopolar por unidade de comprimento.

lação à linha original e ocorreu para 1 MHz.

A indutância (p.u.) homopolar é apresentada na Fig. 15, na qual esta aumentou diante da aproximação das fases. A indutância não homopolar, conforme a Tabela II, reduziu seu valor diante da aproximação.

A resistência, indutância e capacitância não homopolares por unidade de comprimento, a potência natural da linha e a impedância característica são apresentadas na Tabela 4 para 60 Hz. O maior aumento na potência natural foi a 31,57 % ao aproximar as fases da configuração do caso base para o caso III (menor distância entre as fases). O afastamento da configuração do caso base para o caso I, acarretou uma redução na potência natural de 14,12%. Em 60 Hz, indutância e capacitância unitárias não homopolares apresentaram variações mais significativas quando comparadas à resistência. A maior aproximação das fases externas, da configuração do caso I até o caso III, fez com que a resistência unitária reduzisse 0,8 %, a indutância unitária reduzisse 35,17% e a capacitância aumentasse 46,66% em relação ao caso I.

Tabela 4: Parâmetros elétricos não homopolares por unidade de comprimento, impedância característica e potência natural da linha.

| Caso | R_{nh} (Ω /km) | L_{nh} (mH/km) | C_{nh} (nF/km) | z_0 (Ω) | S_0 (MVA) |
|-----------|--------------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------|
| I | 0,0229 | 0,9829 | 12,14 | 284,69 - j8,80 | 680 |
| Caso Base | 0,0228 | 0,8493 | 13,66 | 249,46 - j8,86 | 776 |
| II | 0,0227 | 0,7295 | 15,71 | 215,70 - j8,90 | 897 |
| III | 0,0227 | 0,6372 | 17,80 | 189,40 - j8,95 | 1021 |

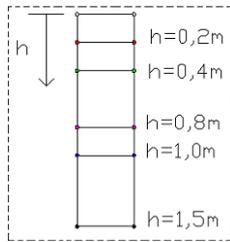


Figura 16: Feixe das fases externas para diferentes “h”.

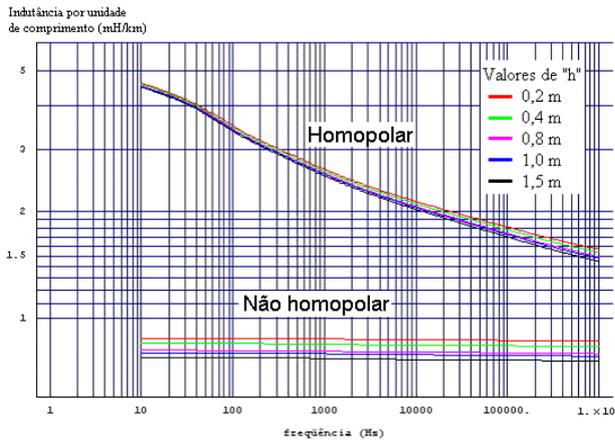


Figura 17: Indutância nos modos por unidade de comprimento em função da frequência.

3.5 Altura dos Condutores nos Feixes Externos

As alterações nas fases externas são mostradas na Fig. 16 na qual a altura “h” relativa entre os sub-condutores no feixe variou para os seguintes valores: 0,2 m; 0,4 m (linha original); 0,8 m; 1,0 m e 1,5 m. Para cada uma destas condições, realizou-se o cálculo dos parâmetros elétricos nas fases e nos modos.

A indutância unitária não homopolar teve maiores alterações que a homopolar diante da variação do espaçamento vertical “h” na mesma fase, cujo aumento provocou a redução nessas indutâncias. A indutância unitária não homopolar apresentou pouca alteração na frequência, predominando a variação de “h”. Já a indutância unitária homopolar apresentou uma redução maior diante do aumento de “h” para as altas frequências.

Conforme a Figura 15, as indutâncias unitárias nos modos apresentaram variações pouco significativas para “h” variando na faixa de 0,2 m até 1,5 m.

A Tabela 5 apresenta a resistência, indutância e capacitância unitárias não homopolares em 60 Hz, bem como a potência

natural da linha e a impedância característica para os diferentes valores de “h”. Considerando a variação de “h” de 0,2 m a 1,5 m, a potência natural aumentou 9,79 %, em relação ao menor “h”.

Tabela 5: Parâmetros elétricos não homopolares por unidade de comprimento, impedância característica e potência natural da linha.

| h(m) | r_{nh} (Ω /km) | l_{nh} (mH/km) | c_{nh} (nF/km) | z_0 (Ω) | S_0 (MVA) |
|------|-----------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------------|
| 0,2 | 0,0228 | 0,8797 | 13,19 | 258,41 - j8,87 | 749 |
| 0,4 | 0,0228 | 0,8493 | 13,66 | 249,46 - j8,86 | 776 |
| 0,8 | 0,0228 | 0,8119 | 14,31 | 238,36 - j8,87 | 812 |
| 1,0 | 0,0228 | 0,7989 | 14,56 | 234,41 - j8,86 | 825 |
| 1,5 | 0,0228 | 0,7746 | 15,06 | 226,96 - j8,85 | 852 |

4 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.

O impacto dos diâmetros dos condutores fase nas resistências unitárias modais foi mais significativo nas frequências inferiores ao início do efeito pelicular. A influência de diâmetros nas resistências unitárias modais foi visualizada nas baixas frequências, sendo que nas altas frequências os modos não homopolares tiveram maior sensibilidade à variação dos diâmetros. Nos condutores CAA, o diâmetro interno exerceu maior influência nos parâmetros elétricos quando comparado à relação diâmetro externo por diâmetro interno. Nas indutâncias unitárias não homopolares, a variação desses diâmetros exerceu maior influência que nas homopolares. Para toda a faixa de frequência, os parâmetros longitudinais não homopolares sofreram maior influência com a variação dos diâmetros.

O aumento nos diâmetros dos condutores, apesar de provocar elevação da potência natural, antecipará a frequência para início do efeito pelicular.

A variação da distância horizontal resultou em maior influência nos parâmetros elétricos quando comparadas a variações na geometria dos feixes das fases externas da linha. Tanto a

aproximação das fases quanto o afastamento dos condutores nos feixes externos provocaram aumento de potência natural na linha. Estas alterações provocarão também elevações nas sobretensões transitórias em função do aumento do acoplamento entre as fases, redução da impedância não homopolar e aumento do fator de aterramento.

As alterações nos feixes das fases externas provocaram variações de capacitâncias e indutâncias unitárias da linha mais significativas que as variações de resistência unitária. Essas alterações quando comparadas à variação da altura dos condutores produziram variações mais importantes nos parâmetros elétricos da linha, e em comparação com a variação dos diâmetros dos condutores de fase, tais alterações nos feixes influenciaram a indutância e capacitância unitárias não homopolares de maneira mais importante.

Para as análises realizadas, a aproximação das fases externas produziu o maior aumento na potência natural da linha, chegando a 31,57 % em relação ao caso base. Em seguida a variação do espaçamento vertical nas fases externas produziu um aumento máximo na potência natural de 9,79 %. O uso dos condutores de fase com o maior diâmetro comercial possível produziu o terceiro maior aumento na potência natural da linha de 8,76 % em relação ao caso base.

Portanto, para os estudos de otimização e re-capacitação de linhas de transmissão, deve-se priorizar as variações na geometria da linha especificamente a aproximação de fases externas e aumento no espaçamento nos feixes das fases externas em detrimento de substituição de condutores de fase.

A análise de sensibilidade possibilitou um aprofundamento dos conhecimentos de cálculo de parâmetros elétricos e da influência das características físicas da linha nesses parâmetros. As observações realizadas servirão de suporte para trabalhos relacionados à modelagem e às suas aplicações em otimização de linhas de transmissão.

REFERÊNCIAS

- Carson, J. E. (1926). Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. *Bell System Technical Journal*. Pg 539-554.
- Marti, J. (1982). Accurate Modeling of Frequency-Depend Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. *IEEE Transactions on PAS*. Vol. PAS-101, No. 1.
- Pinheiro, Michel G.; Tavares, M. C. (2005). Análise de Sensibilidade de Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão no Domínio da Frequência. XVIII SNPTEE.
- Pinheiro, Michel G. (2005). Análise de Sensibilidade de Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão no Do-

mínio da Frequência. Dissertação de Mestrado. UNICAMP.

- Pollaczek, V. F. (1926). Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung. *ENT*. Band 3. Pg 339-359.
- Portela, C. M. (1984). Regimes Transitórios – vol. II. Editora COPPE/UFRJ e Eletrobrás.
- Portela, C. M., Tavares, M. C., Pissolato Filho, J. (2003). 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.
- Tavares, M. C. (1998). Modelo de Linha de Transmissão Polifásica utilizando Quase-Modos. Tese de Doutorado. UNICAMP.
- Tavares, M. C.; Pissolato, J.; Portela, C. M. (1999). Mode domain multiphase transmission line model-use in transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volume: 14, no.: 4, Out-1999. Pg: 1533 - 1544.
- Wedepohl, L. M.; Application of matrix methods to the solution of traveling-wave phenomena in polyphase systems; *Proc. IEE*; Vol. 110; No. 12; 1963.