

## Avaliação do Efeito Ferranti em Linhas Aéreas de Transmissão de Potência Natural Elevada

Marcílio Q. Melo\*, André L. Paganotti\*, Bárbara M. F. Gonçalves\*\*, Marco A. O. Schroeder\*\*\*, Eduardo G. Silveira\* and Márcio M. Afonso\*

\* Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - CEFET-MG – UFSJ, Minas Gerais, Brasil

\*\* Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG, Minas Gerais, Brasil

\*\*\* Universidade Federal de São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil

marcilioq@yahoo.com.br, paganotti@div.cefetmg.br, barbara.goncalves@ifmg.edu.br, schroeder@ufsj.edu.br, eduardo@deii.cefetmg.br, marciomatias@des.cefetmg.br

**Abstract:** The Ferranti effect could be defined as the voltage raise on the receptor of the Transmission Line (TL) often it is associated with long lines and in the situation where the load is low. This phenomenon could influence the technical operation and the costs of the TL. In this paper, a High Surge Impedance Loading Transmission Line (HSIL), obtained by optimization of the conductors position, is used in the reduction of the Ferranti effect. The result shows attenuation of the effect in long lines.

**Resumo:** O efeito Ferranti pode ser definido como o aumento de tensão no receptor da Linha de Transmissão (LT) e frequentemente está associado a linhas longas e na situação em que a carga é baixa. Esse fenômeno pode influenciar a operação técnica e os custos da LT. Neste artigo, uma linha de potência natural elevada (HSIL), obtida por otimização da posição dos condutores, é utilizada no estudo da redução do efeito Ferranti. O resultado mostra atenuação do efeito em linhas longas.

**Keywords:** Capacitance, Ferranti Effect, Transmission Lines, Electric Field Minimization, Optimization.

**Palavras-chaves:** Capacitância, Efeito Ferranti, Linha de Transmissão, Minimização de Campo Elétrico, Otimização.

### 1. INTRODUÇÃO

Os modernos conceitos relacionados à operação dos sistemas elétricos de potência incluem requisitos e indicadores de qualidade. Um problema importante a ser considerado tanto no projeto como no funcionamento de uma linha de transmissão é o da manutenção da tensão, dentro de limites especificados pelas agências reguladoras, nos vários pontos do sistema (Fuchs, 1979) (ANEEL, 2010). Se, de um lado cresce a relevância do assunto no que tange à observância dos padrões regulamentados, de outro, aumenta a demanda de potência requerida e seus consequentes impactos sobre as Linhas de Transmissão (LT's). Fatos como estes têm levado os especialistas a tratar o controle do nível de tensão e da potência reativa com mais rigor (Paganotti et al, 2016).

Diante deste quadro, os estudos de planejamento e operação devem levar em consideração o controle dos níveis de tensão em faixas cada vez mais estreitas de forma a garantir os valores próximos do nominal ou de referência, ou, ainda, do valor contratado.

Quando se trata especificamente do nível de tensão, espera-se que este, na extremidade receptora da linha, seja menor que a tensão na entrada, devido, essencialmente, a perdas. No entanto, esse efeito não acontece rigorosamente em todas as situações, e o caso inverso é comum em linhas médias e longas em determinadas condições de carga (Fuchs, 1979) (Stevenson, 1982).

No Brasil, as linhas de transmissão têm proporções quilométricas devido à extensão territorial do país e a grande distância entre as bacias hidrográficas e os pontos consumidores (Melo et al, 1999). Linhas de transmissão de grandes extensões possuem um comportamento capacitivo muito acentuado devido à característica capacitiva intrínseca dos condutores. Além disso, em períodos de baixo carregamento ou de circuito aberto, o fluxo de corrente capacitiva supera o fluxo da corrente na carga e a diferença de potencial no receptor torna-se maior que na extremidade transmissora da linha. Esse comportamento tem como consequência a elevação do nível de tensão entregue ao consumidor final e é conhecido como efeito Ferranti. Em suma, o efeito Ferranti se caracteriza pela elevação da tensão ao final da linha e aparece frequentemente em linhas com comprimento considerável e na situação em que a carga no receptor é baixa (Stevenson, 1982).

Usualmente o efeito Ferranti é reduzido mediante a instalação de reatores em pontos estratégicos da LT de forma a reduzir a admitância da linha (Electric Power Research Institute, 1987). Contudo, quando o efeito Ferranti acontece, a corrente que flui na linha é baixa, o que diminui a energia do campo magnético e aumenta a do campo elétrico. Nos últimos anos, diversas estratégias de recapacitação de LT foram propostas por diferentes autores para obter aumento na capacidade de transmissão destas linhas (Fuchs, 1979) (Melo et al, 1999).

Dentre estas estratégias destaca-se a Linha Natural de Potência Elevada, obtida por meio da otimização da posição dos condutores. Uma vez que nestas linhas há alteração relevante do nível dos campos eletromagnéticos, propõe-se neste trabalho, avaliar o comportamento do Efeito Ferranti das mesmas.

## 2. MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DA LINHA DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão podem ser simplificadamente representadas por um circuito equivalente. Em linhas longas (acima de 240 km) os efeitos distribuídos dos parâmetros tornam-se significantes e a linha não deve ser representada por um único circuito  $\pi$  equivalente (Stevenson, 1982). Alternativamente, a linha pode ser representada pela menor associação de circuitos  $\pi$  equivalente em cascata. Para a proposta deste artigo, será considerada uma linha longa sendo composta de múltiplos circuitos  $\pi$  equivalentes como mostrado na Fig. 1.

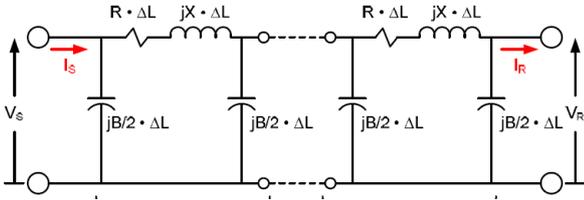


Fig. 1 Cascata de  $\pi$  equivalente para representação de linhas longas. Os subscritos S e R indicam parâmetros do emissor e receptor, respectivamente. R, L, B e X são a resistência, indutância, admitância e reatância, respectivamente.

Seja  $V$  a tensão (volts) e  $I$  a corrente (ampères), as equações diferenciais gerais para as linhas de transmissão em regime permanente são:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = rgV + (rC + Lg) \frac{\partial V}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = rgI + (rC + Lg) \frac{\partial I}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (2)$$

onde  $r$  e  $g$  representam as perdas no condutor (ohm/km) e no dielétrico (siemens/km), respectivamente.  $L$  é a indutância da linha medida em henrie e  $C$  é a capacitância medida em farad (Fuchs, 1979).

As equações (1) e (2) são conhecidas como equações das ondas, cujas soluções representam ondas que podem viajar ao longo de uma linha com velocidade  $v$ , ou seja, ondas viajantes incidentes ou progressivas. As ondas de correntes e tensões, mostradas nas equações (1) e (2) propagam-se ao longo da linha com uma velocidade  $v$  definida como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Em uma dada linha de transmissão, o comprimento de onda das tensões e correntes pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (4)$$

onde  $\beta$  é a parte imaginária da constante de propagação  $\dot{\gamma}$  da linha, dada por:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (5)$$

onde  $\omega = 2\pi f$  é a frequência da linha. Em linhas sem perdas, a parte real de  $\alpha$  é nula e  $\beta = \omega\sqrt{LC}$ , de forma que (4) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (6)$$

Portanto, no domínio da frequência e em função dos parâmetros no receptor, as equações (1) e (2) podem ser reescritas como:

$$\dot{V}_x = \frac{\dot{V}_r + I_r \sqrt{z/\dot{y}}}{2} e^{xy} + \frac{\dot{V}_r - I_r \sqrt{z/\dot{y}}}{2} e^{-xy} \quad (7)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{V}_r + I_r \sqrt{z/\dot{y}}}{2\sqrt{z/\dot{y}}} e^{xy} - \frac{\dot{V}_r - I_r \sqrt{z/\dot{y}}}{2\sqrt{z/\dot{y}}} e^{-xy} \quad (8)$$

onde  $\dot{V}_r$  e  $\dot{I}_r$  são, respectivamente, a tensão e a corrente no receptor. A impedância  $z$  ( $\Omega/\text{km}$ ) e a admitância  $\dot{y}$  (S/km) são obtidas pela capacitância ( $C$ ) e a indutância ( $L$ ). Além disso, a constante de propagação da LT também pode ser definida como  $\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{y}z}$ .

Considerando uma linha perfeitamente transposta e modelada com parâmetros distribuídos, pode-se utilizar a sequência positiva para representar o quadripolo correspondente às grandezas de tensão e corrente em seus terminais (Stevenson, 1982):

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde  $Z_c = \sqrt{\frac{z}{\dot{y}}}$  é a impedância característica da linha e  $l$  é o comprimento da linha.

A capacitância da linha relativa ao campo elétrico  $E$  e à diferença de potencial  $V$  pode ser encontrada aplicando a Lei de Gauss para o campo variante no tempo, tal que:

$$-\frac{\partial}{\partial t} \iint_S \epsilon E = -\frac{\partial q_e}{\partial t} = -C \frac{\partial V}{\partial t} \quad (10)$$

onde  $\epsilon$  é a permissividade do meio (farad/metro) e  $q_e$  é a densidade de carga elétrica (coulomb/metro quadrado) (Balanis, 2012).

Para o cálculo da capacitância nas LTs os condutores são modelados como condutores perfeitamente cilíndricos e paralelos ao solo. O efeito do solo é considerado usando o Método de Imagens conforme ilustrado na Fig. 2.

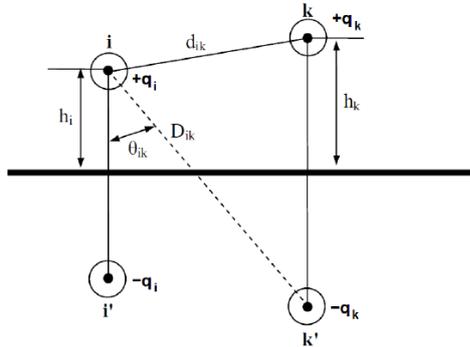


Fig. 2 Condutores i e k, acima de um solo ideal, com suas respectivas imagens i' e k' (Hofmann, 2003).

Após aplicação do método da imagem, capacitância em uma LT trifásica pode ser deduzida como:

$$C_k = \frac{0,02412 \cdot 10^{-6}}{\ln \frac{d_m}{r} \sqrt{1 + \left(\frac{D_m}{2hm}\right)^2}} \quad (11)$$

onde  $C_k$  é dada em farad/quilômetro,  $r$  é o raio do condutor e, para uma linha trifásica:

$$d_m = \sqrt[3]{\prod_{i,k=1}^3 d_{ik}} \quad (12)$$

$$D_m = \sqrt[3]{\prod_{i,k=1}^3 D_{ik}} \quad (13)$$

$$h_m = \sqrt[3]{\prod_{i,k=1}^3 h_{ik}} \quad (14)$$

A posição de cada condutor afeta os parâmetros de capacitância e indutância das LT's e conseqüentemente, o efeito Ferranti (Zanetta, 2005).

### 3. EFEITO FERRANTI

O efeito Ferranti caracteriza-se pelo aumento da tensão no receptor em relação ao emissor. Quando opera a vazio e cujo comprimento se aproxima de  $\lambda/4$  haverá um aumento de tensão ao longo da linha em relação à tensão aplicada no emissor. À medida que se aumenta o comprimento da linha além de  $\lambda/4$ , a diferença de tensão entre o transmissor e receptor diminuirá progressivamente até  $\lambda/2$ . O efeito se torna novamente acentuado em  $3\lambda/4$ .

As principais implicações do Efeito Ferranti nas linhas de transmissão são:

1 – a necessidade de aumento da nível de isolamento das linhas e equipamento terminal em virtude da sobretensão que provoca;

2 – apesar das perdas por dispersão, representadas principalmente pelo efeito Corona, atuarem favoravelmente na redução de sobretensões, essas perdas crescem em função do quadrado da tensão. A radiointerferência e os ruídos audíveis que acompanham o efeito Corona aumentam igualmente com o aumento da tensão. A fim de mantê-las dentro de limites razoáveis será necessário um aumento na bitola dos condutores, o que afeta consideravelmente o custo das linhas;

3 – a corrente de carga muito elevada, limita, por efeito térmico, a capacidade de transporte da corrente de energia da linha, exigindo, para uma mesma potência a ser transmitida, condutores de seções consideravelmente maiores, o que encarece sua construção. Esse fato é particularmente importante para as linhas em cabos subterrâneos ou submarinos, para os quais o comprimento de onda é muito menor do que nas linhas aéreas, pois depende essencialmente de  $v$  que é pequeno nas linhas em tais cabos;

4 – A corrente de carga que a linha absorve das máquinas que a alimentam, quando opera em vazio ou com pouca carga, é capacitiva, para  $0 < \ell < \frac{\lambda}{4}$  e  $\frac{\lambda}{2} < \ell < \frac{3\lambda}{4}$ . Do estudo das características de carga das máquinas síncronas sabe-se que, nessas condições, pode ocorrer o fenômeno conhecido como auto-excitação, dando origem a tensões incontroláveis nessas máquinas, se estas não tiverem capacidade de absorver essa carga capacitiva (Fuchs, 1979).

### 4. RESULTADOS

Uma linha de transmissão trifásica de 345 kV com dois condutores por fase é considerada a fim de demonstrar a efetividade da proposta (CEMIG, 1988). Vale ressaltar que o procedimento pode ser aplicado a qualquer nível de tensão e configuração de condutores. Os parâmetros utilizados para a obtenção das constantes do quadripolo foram obtidos de uma linha de transmissão real.

Com objetivo reduzir o campo elétrico ao nível do solo, a otimização foi realizada pelo método determinístico gradiente cujos detalhes estão demonstrados por Paganotti et al, 2015. Ao longo do processo de otimização, a altura dos condutores em relação ao solo é considerada constante. A Tabela 1 mostra a posição horizontal dos condutores – em metros – na configuração original e otimizada, tal que  $x_{a1}$  identifica o condutor 1 da fase **a**.

Tabela 1. Posição horizontal dos condutores

Configuração	$x_{a1}$	$x_{a2}$	$x_{b1}$	$x_{b2}$	$x_{c1}$	$x_{c2}$
Original	-10,59	-10,36	-0,11	0,11	10,14	10,36
Otimizada	-8,29	-4,14	-0,87	0,38	4,12	7,96

O Matlab® e o ATPDraw® foram as plataformas computacionais utilizadas para obtenção dos resultados. A Fig. 3 mostra a dimensão do efeito Ferranti ao comparar a tensão no receptor – em verde – e a tensão no emissor – em vermelho – para uma fase de uma linha  $\lambda/4$ . A simulação foi feita no ATPDraw® através de circuitos  $\pi$  equivalentes em cascata.

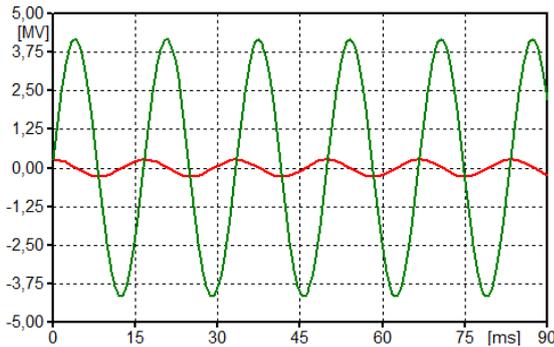


Fig. 3 Efeito Ferranti na linha de transmissão de  $\lambda/4$  obtido com ATPDraw®

A Fig. 4 mostra o efeito Ferranti na linha de transmissão com comprimento de  $1\lambda$  para a configuração original e otimizada. Fazendo uma varredura de zero a  $1\lambda$  pode-se notar o comportamento da tensão no terminal receptor em diferentes pontos da linha. Observa-se a existência de ressonâncias para  $\lambda/4$  e  $3\lambda/4$  onde o efeito Ferranti atinge pontos críticos. A Fig. 5 evidencia o resultado do processo de otimização para uma linha de comprimento  $\lambda/4$  de tal forma que demonstra a redução o efeito Ferranti acima de 30% no receptor. Já a Fig. 6 compara a admitância da linha a vazio nas configurações original e otimizada ao longo do comprimento real da linha. A admitância no receptor chega a ser 30% maior em relação à configuração original.

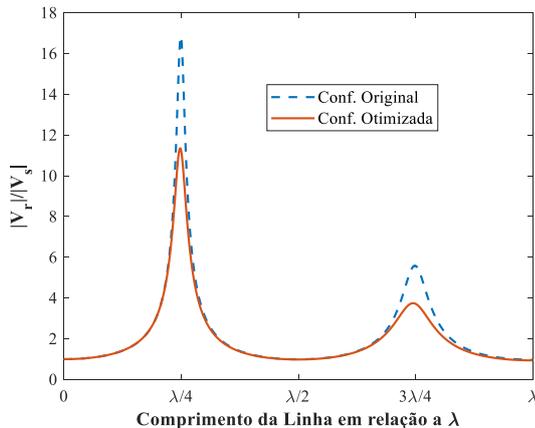


Fig. 4 Efeito Ferranti original e otimizado na linha de transmissão de  $1\lambda$ .

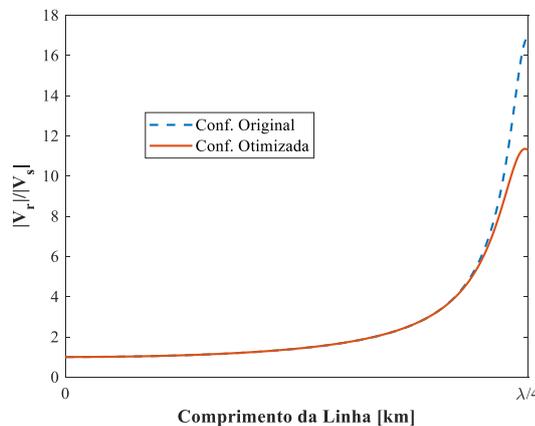


Fig. 5 Efeito Ferranti no final da linha  $\lambda/4$ .

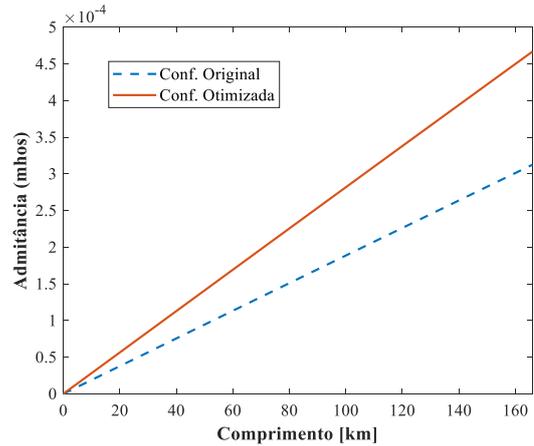


Fig. 6 Admitância a vazio para as configurações original e otimizada.

## 5. CONCLUSÕES

Com a configuração otimizada, ou seja, com o reposicionamento dos condutores de fase de uma linha de transmissão aérea, mostra-se que é possível minimizar o campo elétrico com consequente redução do efeito Ferranti. Essa redução chega a ser de 30% para as linhas de transmissão HSIL com comprimentos  $\lambda/4$  e  $3\lambda/4$ .

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo CEFET-MG, FAPEMIG, CAPES e CNPq.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL (2010). Resolução Normativa nº 398.
- Balanis, C. A. (2012). Advanced Engineering Electromagnetic. 2ed. John Wiley & Sons, Inc..
- CEMIG ER-LT (1988). LT São Gotardo 2 - Três Marias - 345 kV - Características da Linha. Companhia Energética de Minas Gerais S.A..
- Electric Power Research Institute (EPRI)(1987), Transmission Line Reference Book/345 kV and Above, General Electric Company, Brisbane, CT, USA.
- Esmeraldo, P.C.V., Gabaglia, C. P. R., Aleksandrov, G. N., Gerasinov I. A. and Evdokunin, G. N.(1999). "A proposed design for the new Furnas 500 kV transmission lines the high surge impedance loading line," IEEE Transactions On Power Delivery, vol 14, pp 278-286.
- Fuchs, R. D. (1979). Transmissão de Energia Elétrica. LTC.
- Hofmann, L. (2003). Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air, and ground. IEEE Trans. on Power Delivery, New York, v.18, n. 2, p. 564-570.
- Melo, M. O. B. C., Fonseca, L. C. A., Fontana, E. and Naidu, S.R. (1999). "Electric and magnetic fields of compact transmission lines," IEEE Transactions On Power Delivery, vol 14, pp 200-204.
- Paganotti, A. L., Afonso, M. M., Schroeder, M. A. O., Santos, T. A., Alipio, R. S., Gonçalves, E. N. and Saldanha, R. R.(2015). "An Adaptive Deep-Cut Ellipsoidal Algorithm Applied to the Optimization of Transmission Lines," IEEE Transactions on Magnetics, v. 51, n3.
- Paganotti, A. L., Afonso, M. M., Schroeder, M. A. O., Santos, T. A., Alipio, R. S., Gonçalves, E. N. and Saldanha, R. R.(2016). "The surge impedance loading optimization by an adaptive Deep Cut Ellipsoidal algorithm," IJAEM, v. 51, p. S157-S165.
- Stevenson, Jr. W. D. (1982). Elements of Power System Analysis, 4th ed. McGraw-Hill.
- Zanetta, Jr. L. C. (2005). Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência. 1ª. Edição; Editora Livraria da Física, São Paulo.