

Revisão teórica e comparação numérica de fórmulas propostas para determinação de impedância do solo.

Theoretical review and numerical comparison of proposed formulas to determinate earth impedance.

RESUMO

Linhas de transmissão estão sujeitas a interferência da terra, o que modifica sua impedância por meio da interferência eletromagnética. O termo a ser calculado é chamada de impedância mútua do solo e deve ser calculada para melhor representar a linha de transmissão. Existem diversas fórmulas para o cálculo desse valor, sendo a principal referência a integral de Carson. A integral de Carson não pode ser solucionada analiticamente, assim aproximações e técnicas de integração numérica são utilizadas para obter um resultado. Assim, fez-se um código no programa MATLAB, para avaliar a série de Carson usada por Deri, fórmula proposta pelo CCITT e fórmula de Ametani. Também foi feito um código com as fórmulas e Gary e Dubanton. A partir dos valores obtidos numericamente, foi constatado que o algoritmo está correto e para aplicação de potência (baixa frequência) as fórmulas citadas apresentam resultado muito semelhante.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de energia elétrica. Energia elétrica – Transmissão. Interferência eletromagnética.

Bruno Bohn dos Santos
brunobohns@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Edwin Choque Pillco
edwinc@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

Power transmission lines are affected by the presence of earth, which modifies the impedance of the line based on electromagnetic interference. The earth-return impedance is used to better represent the transmission line. There are many different formulas to determine this impedance value, the main reference is the Carson's integral. The Carson's integral can not be analytic solved, therefore, approximations and numerical methods are used to obtain some results. A MATLAB code was written to evaluate the Carson serie used by Dery, the formula proposed by CCITT and the Ametani's formula. Another code featuring the Gary's formula was also written. Based on the results obtained with the desolved algoritmt, the applicability and correctness of the formulas was proven to be satisfactory for low frequencies.

KEYWORDS: Power System. Transmission Lines. Electromagnetic Interference.

INTRODUÇÃO

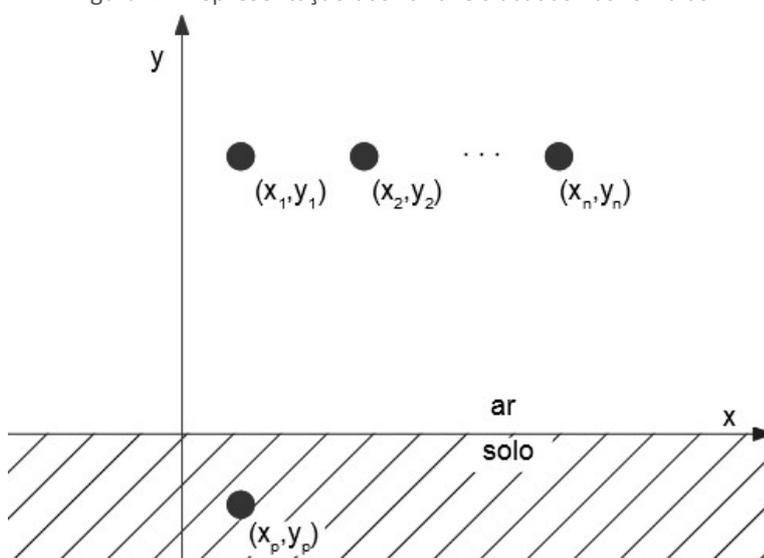
Para um estudo menos rigorosos, desconsiderar a influência da terra é aceitável. Entretanto, para uma análise minuciosa da linha de transmissão é necessário considerar a presença do solo. Tal influência é ainda mais significativa com a presença de objetos condutores próximos dos fios, nos quais podem existir tensões induzidas.

A interferência do solo é representada como uma impedância em série adicional na linha de transmissão e existem várias formas para determinar a impedância mútua do solo. Para comparar algumas das equações de impedância do solo disponíveis, foram desenvolvidos alguns códigos no programa MATLAB, avaliando numericamente tais expressões.

MATERIAIS E MÉTODOS

A configuração que foi simulada é composta de três condutores a certa altura do solo, esse considerado como um semi-plano infinito. Cada condutor pertencente a uma fase. Há também um cabo enterrado no solo, representando algum objeto que possa causar interferência. As variáveis citadas adiante têm seu significado conforme a figura 1.

Figura 1 – Representação das variáveis usadas nas fórmulas



Fonte: Autoria própria (2019).

A primeira fórmula considerada foi proposta por Deri, vista na equação (1), abaixo. É uma aproximação para baixa frequências obtida com o truncamento da série infinita de Carson, que por sua vez é uma alternativa a integral. (DERI, 1981)

$$Z_g = \left\{ 0,987 + j2,869 \log_{10} \left(\frac{\delta}{D} \right) \right\} f \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$\text{Onde } D = \sqrt{(x_n - x_2)^2 + (y_n - y_2)^2}, \quad \delta = 658,37 \sqrt{\rho/f}.$$

Outra fórmula comumente usada para encontrar a impedância é a fórmula sugerida pelo Comitê Consultivo Internacional de Telefonia e Telegrafia (Comité consultatif international téléphonique et télégraphique – CCITT). Para aplicações em baixa frequência, a fórmula sugerida é também uma aproximação e usa como base a série infinita de Carson. (MARISCOTTI, 2011)

$$Z_g = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left\{ \ln \left(\frac{1.851}{jk_e D} \right) - \frac{2jk_e(y_n + y_p)}{3} \right\} \quad (2)$$

Onde $k_e = \sqrt{-j\omega\sigma\mu_0}$.

Diferente da fórmula sugerida pela CCITT, a fórmula de Ametani é uma fórmula fechada simples proposta a partir de aproximações da fórmula de Pollaczek. Seu uso é recomendado apenas para baixas frequência (AMETANI, 1980). A fórmula de Ametani, utilizada no código é:

$$Z_g = j\omega \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \right) \exp \left(\frac{y_p}{h_e} \right) \ln \left(\frac{\sqrt{(y_n - y_p + 2h_e)^2 + (x_n - x_2)^2}}{D} \right) \quad (3)$$

Onde $h_e = \sqrt{-j\sigma/\omega\mu_0}$;

Um pouco menos difundida que outras fórmulas, como CCITT e Lucca, a fórmula proposta por Dubanton e publicada por Gary é válida para o mesmo espectro de frequência que a fórmula proposta por Carson. A fórmula de Gary-Dubanton é a equação (4).

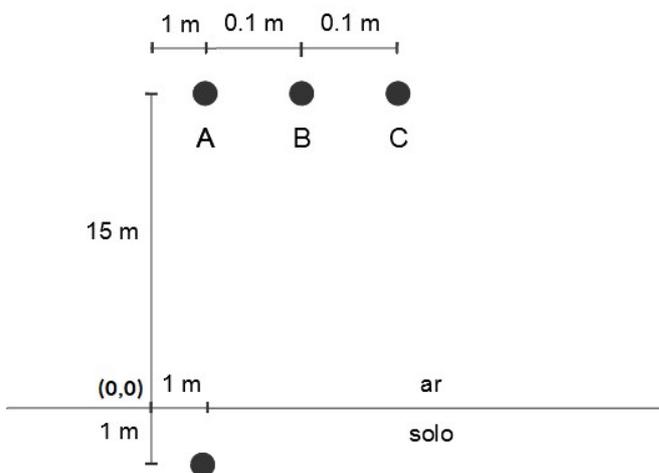
$$Z_g = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \ln \left[1 + \frac{4(\xi\sqrt{-j} - j)}{\xi^2(1 + \eta^2)} \right] \quad (4)$$

Onde $\xi = 2h_i\sqrt{\omega\mu\rho}$, $\eta = x/(y_1 - y_2)$;

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação numérica foi desenvolvida sob o sistema da figura 2.

Figura 2 – Valores utilizados no exemplo numérico

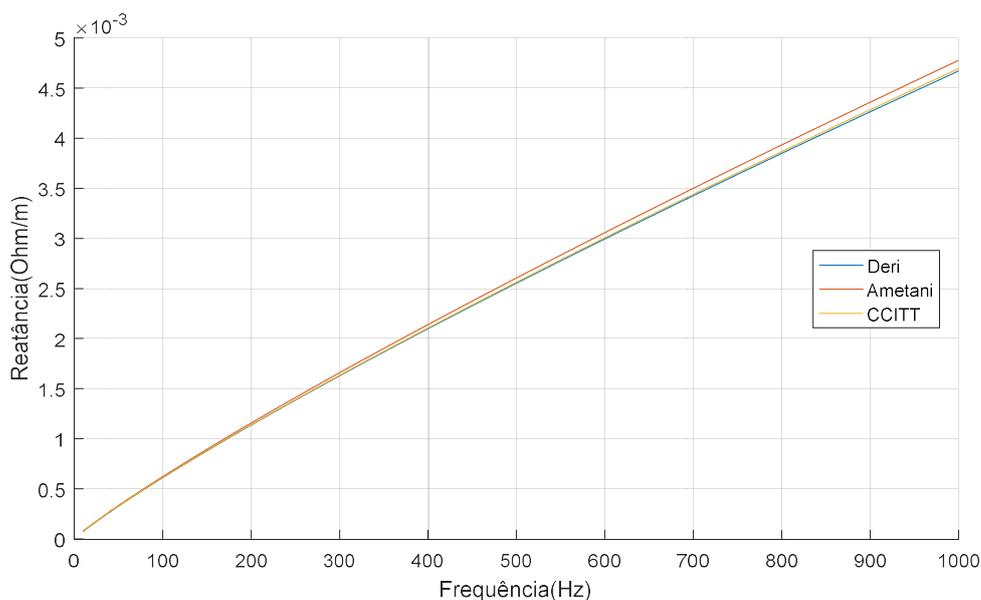


Fonte: Autoria própria (2019).

Neste sistema, há três condutores aéreos compondo um sistema trifásico e um cabo enterrado independente. A resistividade do solo usada nos cálculos é de $1000 \Omega \cdot m$ e a permissividade relativa do ar e do solo foi adotada como unitária, considerando a terra como não-magnética.

A partir dessas premissas foi encontrado o valor da impedância do solo com as três formulações diferentes. A curva resultante para reatância da fase "A" podem ser vista na figuras 3, abaixo.

Figura 3 – Parte imaginária da impedância da terra em função da frequência



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir dos gráficos é possível constatar que os resultados são muito próximos, como esperado com base no que foi estudado. Nota-se que as diferenças percentuais ficaram abaixo de 5% até o máximo valor calculado, de 1kHz. Com foco nos sistemas de potência, os valores 60 Hertz foram extraídos e dispostos no quadro 1.

Quadro 1 – Impedância do solo para 60 Hz ($10^{-5} \Omega/m$)

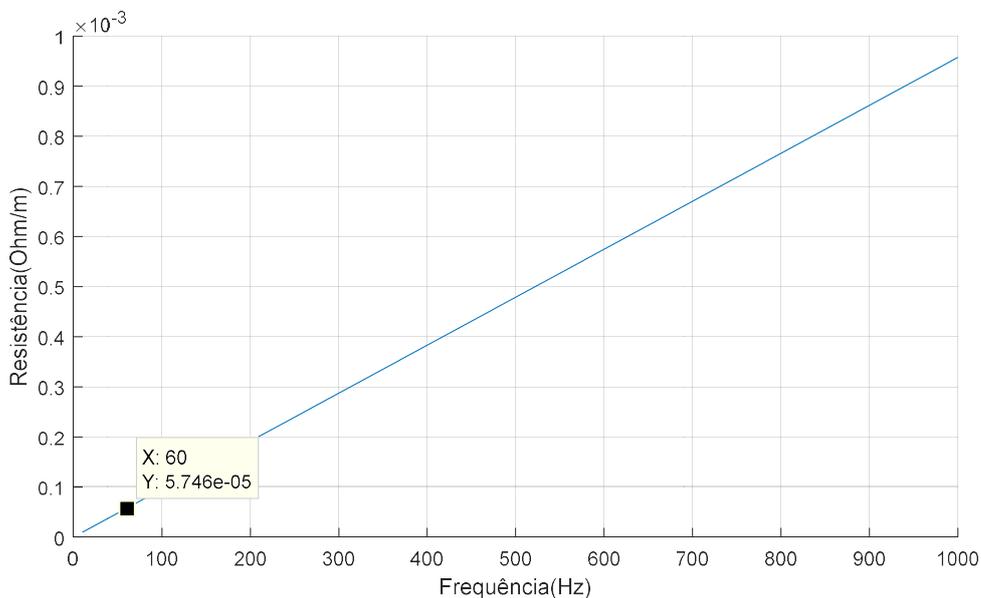
	Resistência	Reatância
Deri	5,92	38,63
Ametani	5,91	39,23
CCITT	5,89	38,67

Fonte: Autoria própria (2019).

Na segunda etapa a fórmula proposta por Gary e Dubanton foi aplicada a um exemplo numérico. O sistema utilizado desta vez foi o mesmo que o anterior, exceto sem o cabo subterrâneo.

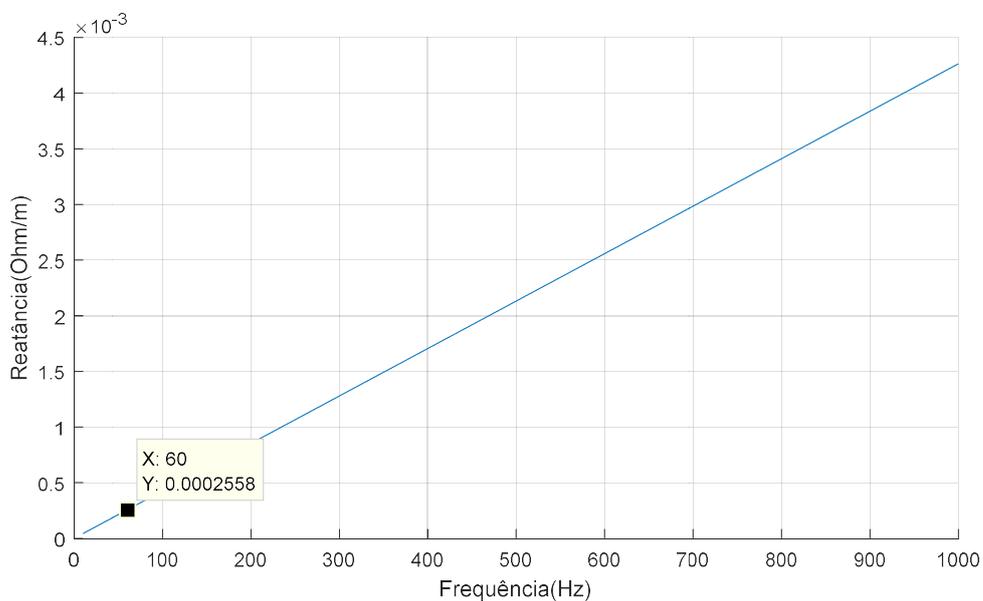
Os gráficos resultantes estão apresentados nas figuras 4 e 5, relativos ao condutor da fase “A”. Novamente, focando na aplicação em sistemas de potência, os valores para 60 Hertz ficaram destacados nos gráficos.

Figura 4 – Resistência da terra em função da frequência, fórmula de Gary-Dubaton



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 5 – Reatância da terra em função da frequência, fórmula de Gary-Dubaton



Fonte: Autoria própria (2019).

Comparando as duas situações, com e sem a influência do cabo enterrado, nota-se uma pequena diferença na resistência e uma diferença significativa na reatância. Para uma melhor visualização, os valores de Ametani e Gary-Dubanton para 60 Hz foram dispostos no quadro 2.

Quadro 2 – Valores de impedância com e sem cabo subterrâneo (60 Hz).

	Re(mΩ/m)	Im(mΩ/m)
Ametani	0,005909	0,3923
Gary-Dubanton	0,005746	0,2558

Fonte: A autoria própria (2019).

Para a parte real, a diferença é de 2,76%, um valor que pode ser considerado pequeno (<3%). Assim, a resistência total altera muito pouco com a inserção do cabo, podendo até ser desconsiderada. A mesma situação não ocorre com a reatância, que tem 34,79% de desvio entre Gary-Dubanton e Ametani. Essa porcentagem é muito significativa para ser ignorada, pois afeta consideravelmente a impedância da linha.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram a validade de se considerar a impedância de retorno da terra, além da aplicação de algumas fórmulas conhecidas para seu cálculo. Observando os valores absolutos, a resistência adicional não é grande comparada com os parâmetros dos condutores. Porém, a indutância tem uma ordem de grandeza maior que a parte real e altera significativamente a impedância total da linha.

As fórmulas utilizadas podem ser consideradas simples, o que facilita o cálculo da impedância. Para uma dada frequência, as funções podem ser até mesmo resolvidas com auxílio de uma calculadora de mão. Isso é possível para certa tolerância e valores muito precisos requerem métodos numéricos computacionais.

REFERÊNCIAS

AMETANI, Akihiro. **A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables**. IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, v.PAS-99, 1980, p. 902-910.

DERI, A; et al. **The Complex Ground Return Plane: a Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return**. IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, v.PAS-100, 1981, p. 3686-3693.

MARISCOTTI, Andrea. **Induced Voltage Calculation in Electric Traction Systems: Simplified Methods, Screening Factors, and Accuracy**. IEEE Transactions On Intelligent Transportation System, v. 12, 2011, p. 201-210.