

Revisão teórica e análise comparativa de fórmulas propostas à impedância de linhas de transmissão

Theoretical review and comparative analysis of proposed transmission lines impedance formulas

RESUMO

Gabriel Bosi Polli
Gabrielpolli12@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.

A determinação da impedância de linhas de transmissão possui considerável relevância em diversas aplicações práticas, devido ao fato de que os corredores de linhas de transmissão são compartilhados, em muitos casos, com ferrovias, tubulações de líquidos e gases, sendo necessária a aferição de sua influência sobre tais elementos. O objetivo do presente trabalho foi fornecer um panorama geral do processo pelo qual se determina a impedância de linhas de transmissão, além de uma análise comparativa de duas técnicas propostas para tal: aproximação exponencial e aproximação de termo único. Aferiu-se que ambas as técnicas fornecem resultados muito próximos para baixas frequências e que o incremento da frequência faz com que o desvio entre as expressões aumente de forma considerável, não havendo mais concomitância entre os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Impedância. Interferência Eletromagnética. Oleodutos.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

The determination of transmission line impedance has considerable relevance in several practical applications, due to the fact that transmission line corridors are shared, in many cases, with railways and pipelines, being necessary to measure their influence on such elements. The objective of the present work was to provide an overview process by which the transmission line impedance is determined, as well as a comparative analysis of two proposed techniques to it: exponential approximation and single term approximation. It was found that both techniques provide very close results for low frequencies and the frequency increase causes the deviation between the expressions to rise considerably and there is no more convergence between the results.

KEYWORDS: Impedance. Electromagnetic Interference. Pipelines

INTRODUÇÃO

O apogeu da sociedade contemporânea ocorreu, em grande parte, devido à utilização da energia elétrica. Sua contribuição tangencia desde os sistemas de iluminação, a motorização dos mais variados processos industriais e mesmo domiciliares, além dos sistemas de telecomunicações. Ocorre que o processo de geração de energia elétrica é realizado espacialmente distante das unidades consumidoras, tornando-se necessário o transporte da eletricidade por meios físicos, ou seja, pelas linhas de transmissão de potência (EPRI, 1982).

No entorno das linhas forma-se uma área que deve ser mantida com a vegetação aparada e com trânsito de veículos e pessoas restrito, devido aos efeitos eletromagnéticos pela linha causados. O controle das áreas próximas às linhas de transmissão torna propícia a inserção de outros elementos, tais como oleodutos, gasodutos ou mesmo ferrovias, vide Figura 1 (OLSEN, 2018).

Figura 1 – Corredor de linha de transmissão compartilhado com ferrovia

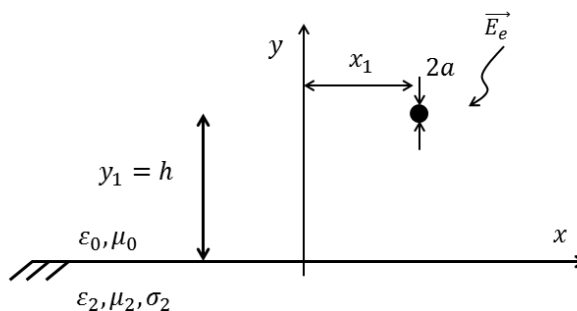


Fonte: OLSEN (2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consiste em se determinar uma expressão geral à corrente elétrica que circula pela linha de transmissão e, a partir disso, obter sua impedância. O esquema analisado está apresentado na Figura 2 (OLSEN, 2018).

Figura 2 – Vista frontal do sistema físico analisado.



Fonte: Autoria própria (2019).

Considera-se que o condutor possui diâmetro $2a$ e está localizado a uma altura h em relação ao solo. Assume-se que o ar possui permissividade ε_0 , permeabilidade μ_0 e condutividade nula. Para o solo, sua permissividade é ε_2 , permeabilidade μ_2 e condutividade σ_2 . $\vec{E}_e$ representa o campo elétrico externo ao condutor e a fonte de tensão representada possui amplitude V em $z = 0$ e amplitude $V = 0$ para $z \neq 0$. Para que seja determinada a corrente, assume-se inicialmente que o condutor possui raio muito inferior à altura em relação ao solo (hipótese do fio fino). Tal consideração torna possível que o campo elétrico seja representado em seu centro. A partir disso, pode-se calcular a componente axial do campo elétrico em todos os pontos da superfície do fio, por meio de elementos infinitesimais de comprimento.

Com a partição da linha de transmissão em elementos infinitesimais, bem como com a aplicação da transformada espacial de Fourier, encontra-se um conjunto de expressões algébricas que descrevem a corrente no condutor. Além disso, utilizando o chamado potencial Hertziano podem ser derivadas expressões para o campo elétrico de modo mais simplificado e adequado à transformada espacial de Fourier. A aplicação de tais operações e propriedades fornece a impedância da linha de transmissão, como se apresenta na Eq. (1).

$$Z_{11} = \frac{j\pi\mu_0}{2\pi} \{\ln(2h/a) - J_C(a, h, h)\}. \quad (1)$$

O termo J_C representa a integral de Carson, definida conforme se apresenta na equação (2) (OLSEN, 2018).

$$J_C(x - x_1, y, y_1) = \frac{2}{k_2} \int_0^\infty (u - \kappa) e^{-(y+y_1)} \cos(\kappa(x - x_1)) d\kappa. \quad (2)$$

A integral de Carson não possui solução analítica. Ou seja, sua solução é dada de forma numérica por aproximações, métodos iterativos, simplificações, ou com considerações diversas, em forma de séries infinitas; dependendo das premissas inicialmente tomadas e da situação física considerada. Nesse caso, será analisada a resolução da integral de Carson por meio de aproximação exponencial, isto é, cada parcela da integral será decomposta em séries com termos exponenciais e, a partir disso, o somatório das componentes parciais oriundas do somatório (KROLO *et al*, 2018).

A aproximação exponencial consiste na suposição de séries baseadas na função núcleo de Carson, permitindo a resolução numérica da integral. Isto é, a parte real, imaginária e a função núcleo como um todo são igualadas a uma série de termos exponenciais e coeficientes, para que no final seja obtida uma aproximação adequada à integral de Carson (MARISCOTTI, 2011). Derivada de forma direta da integral de Carson, a aproximação de termo único consiste no truncamento da série infinita que representa a integral de Carson no seu primeiro termo, levando em consideração o fato de que todos os termos da série decaem à mesma velocidade a zero, conforme as Eq. (3) e Eq. (4).

$$Z_{ii} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_e}{2h_i}\right). \quad (3)$$

$$Z_{ik} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right). \quad (4)$$

$$D_e = 658,8716 \sqrt{\frac{\rho}{f}}. \quad (5)$$

RESULTADOS OBTIDOS

O sistema analisado tem suas dimensões geométricas indicadas na Tabela 1, bem como com suas características físicas de frequência de operação e resistividade do solo, a frequência de operação varia de 10 Hz a 10 MHz.

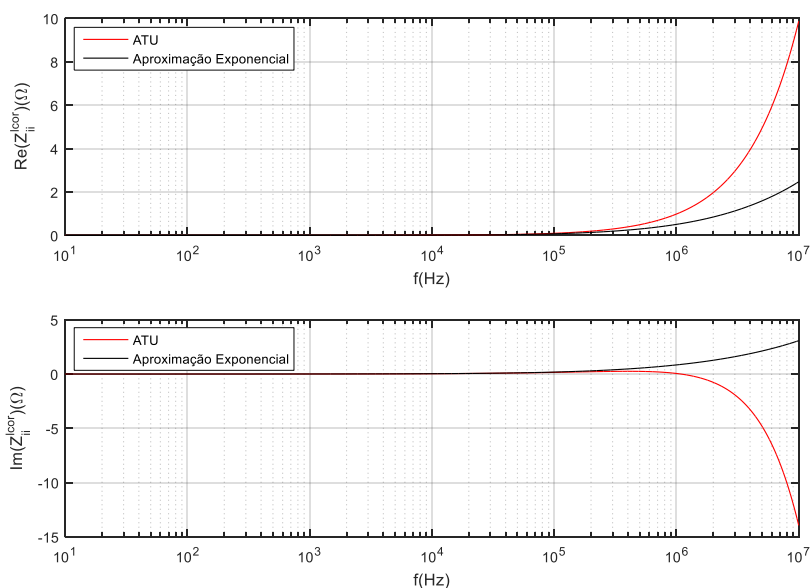
Tabela 1 – Exemplo de tabela

Grandeza	Valor
ρ	1000 Ω /m
h_i	10 m
h_k	11 m
d_{ik}	1,4142 m
D_{ik}	21,038 m
r_i	0,00618 m
a_{ik}	1,0 m

Fonte: Autoria própria (2019).

Por meio da simulação realizada via *software* MATLAB®, foram gerados os gráficos apresentados a seguir. Na Figura 4, tem-se o gráfico correspondente às parcelas reais e imaginárias da impedância própria Z_{ii} , para a aproximação exponencial e para a aproximação de termo único (ATU).

Figura 4 – Parte real e imaginária da impedância própria.

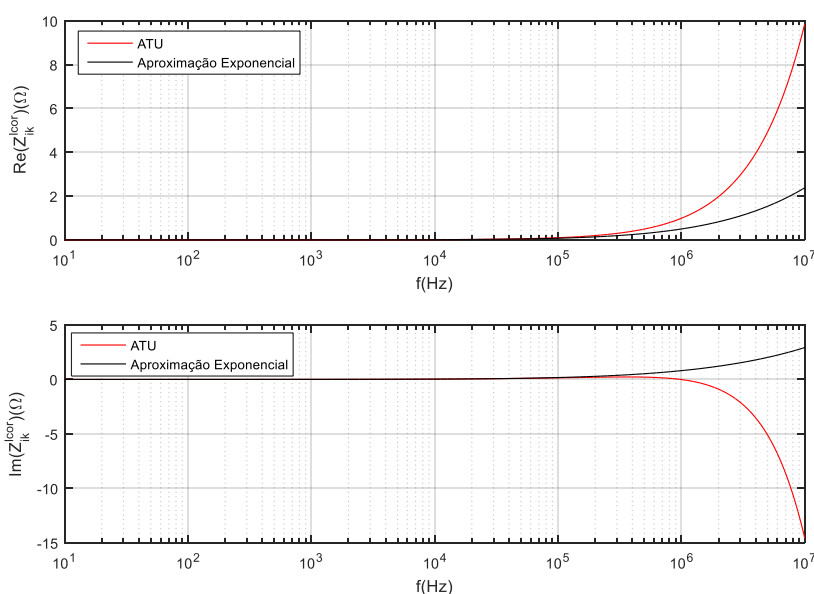


Fonte: Autoria própria (2019).

Como se constata, em ambos os gráficos, os resultados oriundos a aproximação de termo único (ATU) e da aproximação exponencial são praticamente idênticos (sem diferença gráfica perceptível) até a frequência de aproximadamente 200 kHz para a parcela real da impedância e, para a parte imaginária, em torno de 400 kHz. Ou seja, a ATU fornece resultados muito precisos em um largo espectro de frequência, além de ser uma expressão substancialmente mais simples que a oriunda da aproximação exponencial.

Na Figura 5 estão apresentados os gráficos correspondentes à impedância mútua Z_{ik} , ou seja, a impedância que se origina entre os condutores.

Figura 5 – Parte real e imaginária da impedância mútua.



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir da análise gráfica das Figuras (4) e (5), pode-se inferir que a aproximação de termo único e a aproximação exponencial fornecem valores de impedância, tanto mútua quanto própria, muito similares para baixas frequências, de modo que o incremento da frequência elétrica do sistema implica em maiores desvios entre os métodos.

Em ambos os casos, a resistência sofre considerável incremento a partir de 200 kHz, com a ATU divergindo de modo considerável da aproximação exponencial. O efeito de aumento da resistência com a frequência é causado pelo efeito pelicular, no qual a área útil disponível para a passagem da corrente diminui, levando ao incremento da resistência (resistência de um condutor é inversamente proporcional à sua área). Tal efeito não é contemplado pela ATU, devido às hipóteses simplificadoras utilizadas no cálculo.

CONCLUSÕES

O presente relatório apresentou a relevância do cálculo de impedância de linhas de transmissão, devido à sua utilização nos efeitos causados pelas linhas em objetos em seu entorno, tais como ferrovias, dutos, ou mesmo outras linhas de transmissão. Aferiu-se que tal impedância é obtida por meio da integral de

Carson, a qual não possui solução analítica, mas somente pode ser calculada via aproximações numéricas.

Isto é, são desenvolvidos diferentes métodos para que se obtenham soluções à integral, entre as quais está a aproximação exponencial. Tal método foi comparado com a aproximação de termo único (ATU), que é uma expressão derivada diretamente da integral de Carson – e por Carson proposta. Nessa aproximação, a série infinita que compõem a integral de Carson é truncada em seu primeiro termo.

A simulação via *software* mostrou que ambas as aproximações numéricas possuem valores de impedância muito próximos para baixas frequências. Na frequência típica de operação dos sistemas elétricos de potência de 60 Hz, o desvio entre os métodos mostrou-se pequeno, não havendo grande prejuízo à análise realizada. Para frequências na ordem de centenas de quilohertz, as aproximações tornaram-se discrepantes com desvios de 200% a 400%.

Dessa forma, infere-se que tanto a aproximação exponencial quanto a aproximação de termo único são métodos válidos à determinação da impedância de linhas de transmissão, desde que as premissas de análise sejam cumpridas e se atendam as condições de validade do cálculo. Para baixas frequências ambos os métodos podem ser utilizados, de forma que a ATU se mostra conveniente devido à sua grande simplicidade quando comparada à aproximação exponencial. Já para altas frequências, faz-se necessário o uso de um método mais robusto, que é o caso da aproximação exponencial.

REFERÊNCIAS

EPRI. Reference book: 345 kV and above. Palo Alto: EPRI, 1982.

KROLO, Ivan; VUJEVIĆ, Slavko; MODRIĆ, Tonći. HIGLY ACCURATE COMPUTATION OF CARSON FORMULAS BASED ON EXPONENCIAL APPROXIMATION. Departamento de engenharia elétrica, Universidade de Split: 2018. Electric Power System Research, v. 162, 2018, p. 134-141. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.05.008>. Acesso em: 10 de julho. 2019.

OLSEN, Robert. High Voltage Overhead Transmission Line Electromagnetics. Pullman: Washington State University, 2018.

MARISCOTTI, Andrea. INDUCED VOLTAGE CALCULATION IN ELECTRIC TRACTION SYSTEMS SCREENING FACTORS AND ACCURACY. IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM, v. 12, 2011, p. 201-210. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/224180517_Induced_Voltage_Calculation_in_Electric_Traction_Systems_Simplified_Methods_Screening_Factors_and_Accuracy. Acesso em 29 de junho. 2019.