

Simulação e Análise dos Parâmetros Elétricos em Linhas de Transmissão Utilizando Ambiente de Desenvolvimento em C

J. V. A. Santos¹, L. C. M. Buarque², B. M. Silva²

¹Grupo de Pesquisa em Mecanismos de Eficiência Energética em Sistemas Elétricos
Campus Aracaju – Instituto Federal de Sergipe – (IFS) – Aracaju, SE – Brazil.

² Grupo de Pesquisa em Tecnologia da Informação e Comunicação, Campus Aracaju –
Instituto Federal de Sergipe – (IFS) – Aracaju, SE - Brazil.

jvvsantos@globo.com, leila@ifs.edu.br, bruno_7997@hotmail.com

Abstract. *This paper presents a new route simulation mathematical model applied to power transmission lines of electricity using the programming language C. The mathematical model proposed here involves tools with considerable level of complexity, as the phasor representation based on frequency-dependent complex numbers and hyperbolic functions, due to the nonlinear behavior of the parameters studied. Such an implementation is to establish a relationship between precision of results and speed of processing resources involving predefined functions in C. The challenge of this work is to measure the results given real input values extracted from the transmission lines of electricity pass through processing using mathematical functions and libraries specific to the study of this project. These data showed consolidated profile curves of voltage and current and expected satisfactory. The proposed future work is to measure and compare the processing time and increase the number of simultaneous variables to run on a processor in common use and try to saturate it on your potential calculations.*

Resumo. *O presente trabalho apresenta uma nova rota de simulação do modelo matemático aplicado a Linhas de Transmissão de Energia Elétrica utilizando a linguagem de programação C. O modelo matemático aqui proposto envolve ferramentas com considerável nível de complexidade, como a representação fasorial dependente da frequência baseada em números complexos e funções hiperbólicas, devido ao comportamento não linear dos parâmetros estudados. Tal implementação visa estabelecer uma relação entre precisão de resultados e velocidade de processamento envolvendo recursos de funções pré-definidas em C. O desafio deste trabalho é medir os resultados que dado valores reais de entrada extraídos das linhas de transmissão de energia elétrica, passam pelo processamento matemático utilizando funções e bibliotecas específicas para o estudo deste projeto. Esses dados consolidados mostraram curvas de perfil de corrente e tensão satisfatória e esperada. A proposta de trabalhos futuros é medir e comparar o tempo de processamento e aumentar o número de variáveis simultâneas para executar em um processador de uso comum e tentar saturá-lo em seu potencial de cálculos.*

1. Introdução

As fontes de energia desempenham um papel primordial para o progresso e melhoria da qualidade de vida da sociedade em geral. Um dos maiores desafios atuais é conseguir converter as fontes de energias disponíveis em energia elétrica sem comprometer o meio ambiente e acima de tudo utilizar essa energia de maneira racional. O processo de conversão de uma fonte de energia qualquer em energia elétrica, seu transporte e utilização é responsabilidade do Sistema Elétrico de Potência. Nesse contexto, é evidente a importância de estudos e pesquisas que tenham como foco principal a busca, mitigação e solução dos problemas inerentes aos Sistemas Elétricos de Potência visando garantir a continuidade, confiabilidade e eficiência de tais sistemas.

Atualmente as análises, estudos e pesquisas visando o aprimoramento da rede de transmissão são feitos utilizando a simulação digital. Através dessa poderosa ferramenta é possível fazer previsão do comportamento da rede para situações normais e anormais de funcionamento, calcular parâmetros, dimensionar equipamentos, monitorar a rede em tempo real, otimizar a operação, reduzir perdas de energia e fazer planejamento para expansão de toda a rede.

O estudo dos parâmetros de uma linha de transmissão envolve a análise em regime permanente e fenômenos de transitórios eletromagnéticos (ABDEL-SALAM et al., 1999). A modelagem dos parâmetros longitudinais (resistência e indutância) e transversais (capacitância) está diretamente relacionada à dependência com a frequência. O estudo dos modelos de linhas de transmissão em geral é feito em duas partes: São consideradas linhas curtas aquelas que têm comprimento menor que 80 km, e as linhas são chamadas de longas quando seu comprimento é maior que 80 km (GRAINGER E STEVENSON, 1994). Essa divisão é feita de certa forma arbitrária e dependente do grau de precisão que se pretende e do tipo de análise. Para linhas curtas, a indutância é dada simplesmente pelo produto da indutância por unidade de comprimento, multiplicada pelo comprimento da linha. Para linhas longas, a variação da indutância com o comprimento da linha dá-se de forma não linear. Desse modo a linha curta nada mais é que um caso particular da linha longa para o qual é válido considerar uma aproximação linear (PINHEIRO E TAVARES, 2009).

A Figura 1 abaixo mostra a representação de uma linha longa a parâmetros distribuídos (GRAINGER E STEVENSON, 1994):

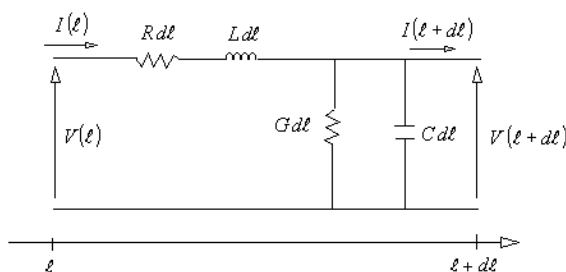


Figura 1 - Representação de uma seção de uma linha longa; $0 \leq l \leq l_0$.

Para um circuito de comprimento infinitesimal (dl), valem as relações:

$$-dV(l) = I(l)(R + j\omega L)dl \quad \text{Equação (1)}$$

$$-dI(l) = V(l)(G + j\omega C)dl \quad \text{Equação (2)}$$

onde $dV(l) = V(l + dl) - V(l)$ e $dI(l) = I(l + dl) - I(l)$, e sendo $R + j\omega L$ a impedância série por unidade de comprimento e $G + j\omega C$ a admitância shunt por unidade de comprimento. O sistema de equações obtido a partir modelo incremental é:

$$V(l) = V(0) \left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \right) - Z_\omega I(0) \left(\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \right) \quad \text{Equação (5)}$$

$$I(l) = I(0) \left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \right) - \frac{V(0)}{Z_\omega} \left(\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \right) \quad \text{Equação (6)}$$

Reescrevendo:

$$V(l) = V(0)\cosh(\gamma l) - Z_\omega I(0)\sinh(\gamma l) \quad \text{Equação (7)}$$

$$I(l) = I(0)\cosh(\gamma l) - \frac{V(0)}{Z_\omega} \sinh(\gamma l) \quad \text{Equação (8)}$$

Com as expressões acima, os valores de tensão e corrente ao longo de toda a linha de transmissão foram determinados, possibilitando assim avaliar os parâmetros longitudinais e transversais da linha. A utilização do processamento digital e programação iterativa foram realizadas em linguagem de programação C, com objetivo de obter uma grande precisão nos resultados e testar a eficácia do processamento das funções utilizando bibliotecas desta linguagem. Para OLIVEIRA (2008) C é uma linguagem com a vantagem de ser portátil para vários compiladores e de ter características de baixo nível, facilitando a implementação de projetos científicos.

Esse projeto de pesquisa propõe a implementação dessas funções matemáticas em um único programa em C, visando mensurar e analisar os perfis de tensão e corrente, através da simulação de casos reais de carregamento das Linhas de Transmissão, para a obtenção dos seus parâmetros longitudinais e transversais.

2. Materiais e Métodos

Este trabalho de pesquisa aplicar o processamento em linguagem de programação C um ambiente real para determinação dos parâmetros elétricos em linha transmissão de energia elétrica. Foi feito um levantamento dos algoritmos utilizados nas redes de transmissão de energia elétrica para determinação dos parâmetros elétricos a serem utilizados no programa. Foi realizado o estudo da viabilidade da utilização da linguagem C para a modelagem matemática e determinação dos parâmetros elétricos em Linhas de Transmissão. A implementação dos algoritmos neste ambiente de desenvolvimento de propósito geral, com uso de bibliotecas, incluindo complex.h e suas funções encontradas em CPLUSPLUS.COM (2013).

Após a implementação foi feito a análise e o tratamento dos resultados encontrados possibilitando a geração de gráficos que mostram os resultados esperados a partir do uso dos modelos matemáticos complexos.

3. Resultados e Discussão

O desenvolvimento das equações que representam as linhas de transmissão permite a avaliação e estudo dos parâmetros das linhas através da simulação computacional. A implementação do modelo matemático foi realizada com base na linguagem de programação C, sendo assim possível visualizar e analisar de forma objetiva o comportamento da linha de transmissão frente as mudanças da bitola do condutor, do comprimento da linha e o perfil de tensão da linha em relação as mudanças das condições de carga, ou seja, a linha a vazio, em curto circuito, com carga nominal, com carga leve e com carga pesada.

Os dados utilizados para a simulação do comportamento da linha de transmissão frente a mudanças no condutor estão nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Parâmetros Elétricos da Linha de Transmissão (condutor 1, linha com 200km)

<i>Módulo da Tensão na Geração [Vs] (V)</i>	220.000
Fase da Tensão na Geração [Vs] (Graus)	0
Módulo da Corrente na Geração [Is] (A)	100
Fase da Corrente na Geração [Is] (Graus)	-20
Valor do comprimento da linha (km)	200
Valor do raio do condutor (m)	0,02
Valor da distância entre os condutores (m)	10

Tabela 2 - Parâmetros Elétricos da Linha de Transmissão (condutor 2, linha com 300km)

<i>Módulo da Tensão na Geração [Vs] (V)</i>	220.000
Fase da Tensão na Geração [Vs] (Graus)	0
Módulo da Corrente na Geração [Is] (A)	100
Fase da Corrente na Geração [Is] (Graus)	-20
Valor do comprimento da linha (km)	300
Valor do raio do condutor (m)	0,01
Valor da distância entre os condutores (m)	20

As curvas a seguir (Figuras 2 e 3) mostram os perfis de tensão e corrente respectivamente, para o condutor 1 e a linha de transmissão com comprimento de 200 km.

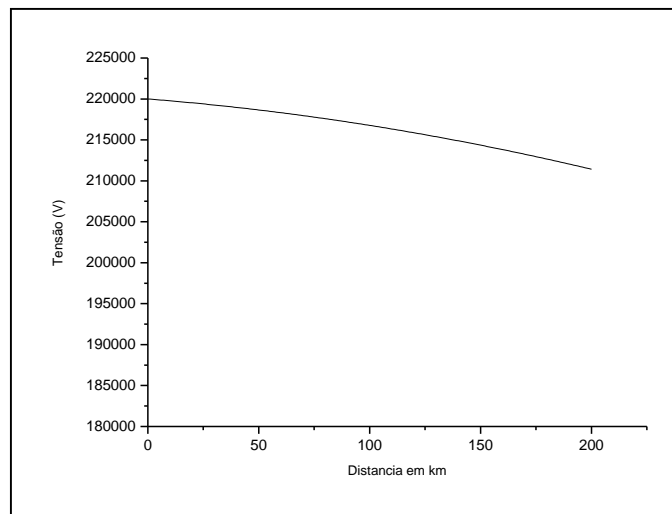


Figura 2: Perfil de Tensão (condutor 1, linha com 200 km de comprimento)

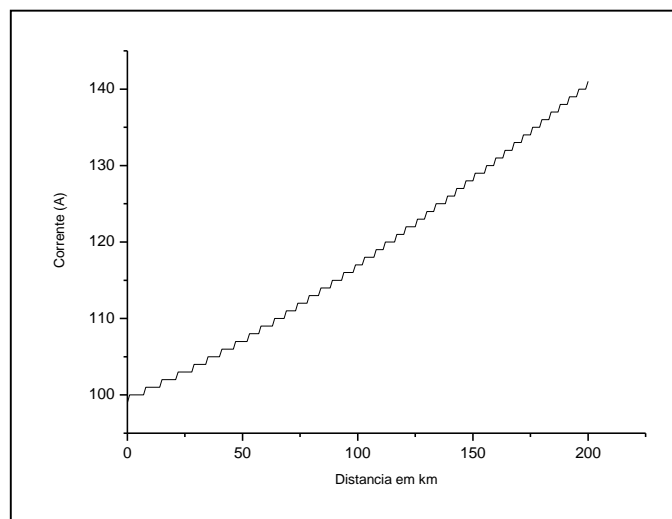


Figura 3: Perfil de Corrente (condutor 1, linha com 200 km de comprimento)

As curvas a seguir (Figuras 4 e 5) mostram os perfis de tensão e corrente respectivamente, para o condutor 2 e a linha de transmissão com comprimento de 300 km.

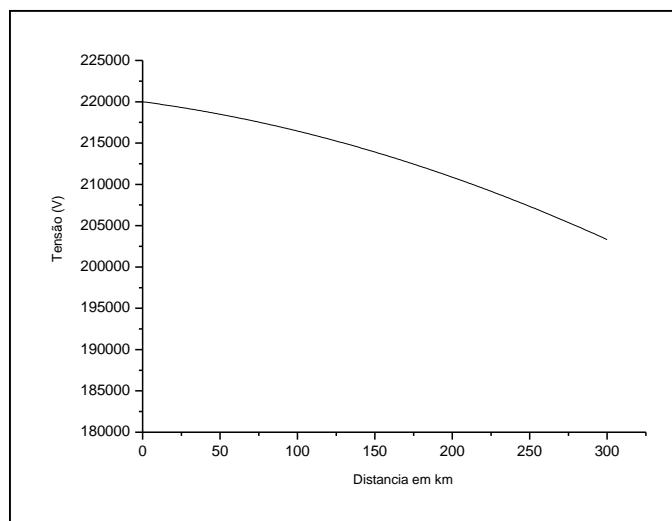


Figura 4: Perfil de Tensão (condutor 2, linha com 300 km de comprimento)

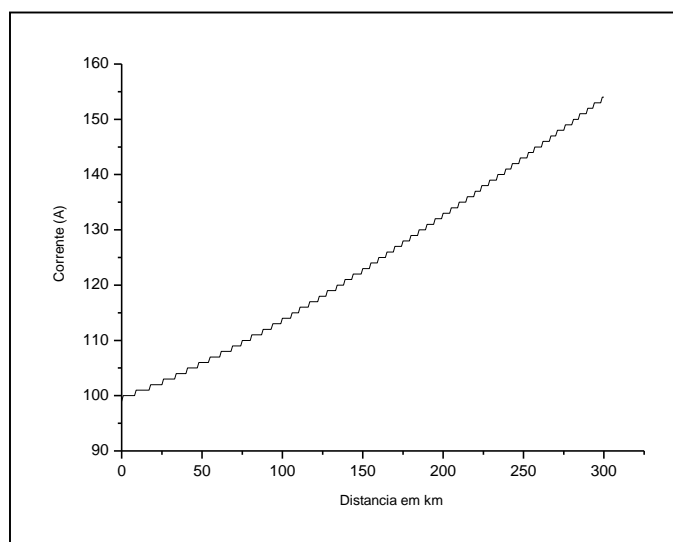


Figura 5: Perfil de corrente (condutor 2, linha com 300 km de comprimento)

Analisando os perfis de tensão e corrente das Figuras 2, 3, 4 e 5 é possível observar os efeitos magnéticos (indutância série), bem como o efeito do campo elétrico shunt (capacitância). Esses dois efeitos em conjunto provocam queda de tensão e variação da corrente ao longo de toda extensão da linhas de transmissão. Variações mais acentuadas nos perfis de tensão e corrente ao longo da linha são diretamente dependentes das mudanças nos parâmetros do condutor e comprimento da linha, bem como o espaçamento entre os condutores. O desempenho da linha de transmissão para a condição apresentada pode ser avaliado calculando-se a regulação de tensão. A regulação de tensão de uma linha de transmissão é o aumento de tensão na barra, dado em percentagem da tensão a plena carga, quando toda a carga, a um determinado fator de potência, é retirada da linha, mantendo constante a tensão na barra receptora, Isto é:

$$R\% = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100\% \quad \text{Equação (9)}$$

onde $|V_{R,NL}|$ é a amplitude da tensão em vazio na barra receptora e $|V_{R,FL}|$, é a tensão de plena carga na mesma barra, com tensão constante na barra de saída. Para o condutor 1 a tensão no início da linha é de 220 kV e no final da linha é de aproximadamente 211,4 kV, apresentando uma regulação de:

$$R_1\% = \frac{220-211,4}{211,4} \times 100\% = 4\% \quad \text{Equação (10)}$$

Para o condutor 2 a tensão no início da linha é de 220 kV e no final da linha é de aproximadamente 203,5 kV, apresentando uma regulação de:

$$R_2\% = \frac{220-203,5}{203,5} \times 100\% = 8,1\% \quad \text{Equação (11)}$$

Os valores encontrados para R_1 e R_2 mostram claramente a influência da bitola do condutor e o comprimento da linha em seus parâmetros elétricos. Quanto maior a bitola do condutor e menor o comprimento linear da linha a queda de tensão tende a reduzir consideravelmente e a variação da corrente também tendência à redução mediante a minimização da capacitância *shunt* da linha de transmissão.

A Figura 6 abaixo mostra o efeito da mudança das condições de carregamento de uma linha de transmissão para uma dada configuração e tipo de condutor, mas especificamente o condutor Waxwing. As condições de carga consideradas na simulação são: linha a vazio, em curto circuito, com carga nominal, com carga leve e com carga pesada. A configuração da linha apresenta quatro condutores por fase espaçados entre si de 45 cm, e a distância entre as fases é de 15m, configuração idêntica àquela utilizada nas linhas de transmissão da Usina Hidrelétrica de Itaipu. A tabela 3 fornece os dados de entrada utilizados na simulação.

Tabela 3 - Parâmetros Elétricos da Linha de Transmissão (condutor Waxwing)

Módulo da Tensão na Geração [Vs] (V)	750.000
Fase da Tensão na Geração [Vs] (Graus)	0
Potência na Carga [Pr] (W)	125.000
Fator de potência na Carga [fp]	0,8
Valor do comprimento da linha (km)	400
Valor da distância entre os condutores de mesma fase (m)	0,45
Valor da distância entre os condutores (m)	15

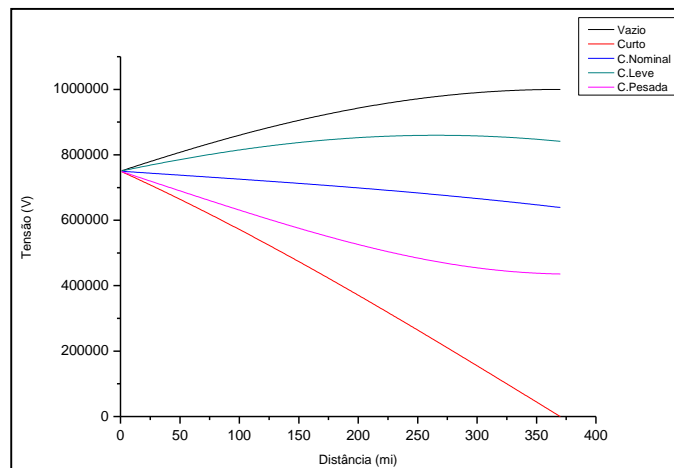


Figura 6: Perfis de tensão para várias condições de carga aplicadas ao condutor Waxwing

Podemos observar que as tensões no final da linha de transmissão, 370mi distante da barra de geração, para as varias condições de carregamento foram as seguintes:

- ✓ Linha em vazio – 1,01MV
- ✓ Linha em curto – 0V
- ✓ Linha com carga leve – 859,3kV
- ✓ Linha com carga nominal – 751,4kV
- ✓ Linha com carga pesada – 437,3kV

Tais resultados mostram a eficácia do modelo matemático adotado, bem como a vantagem da aplicação da linguagem de programação C na implementação do modelo proposto, pois, pode-se verificar a eficiência do algoritmo e do uso das funções pré-definidas da própria linguagem.

Tabela 3 - Parâmetros Elétricos da Linha de Transmissão (condutor Waxwing)

<i>Módulo da Tensão na Geração [Vs] (V)</i>	750.000
Fase da Tensão na Geração [Vs] (Graus)	0
Potência na Carga [Pr] (W)	125.000
Fator de potência na Carga [fpr]	0,8
Valor do comprimento da linha (km)	400
Valor da distância entre os condutores de mesma fase (m)	0,45
Valor da distância entre os condutores (m)	15

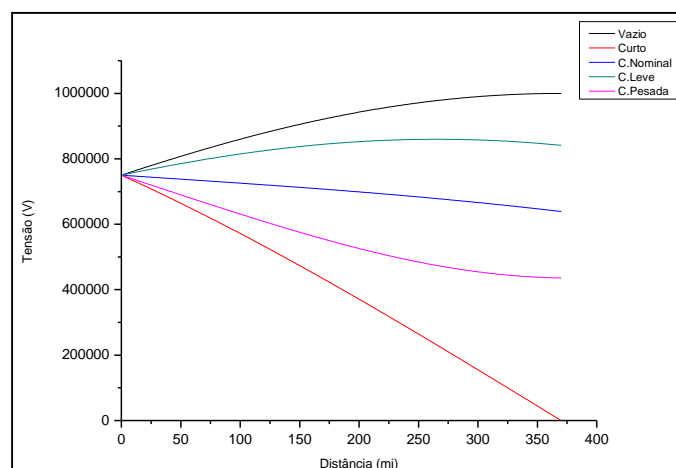


Figura 6: Perfis de tensão para várias condições de carga aplicadas ao condutor Waxwing

Podemos observar que as tensões no final da linha de transmissão, 370mi distante da barra de geração, para as varias condições de carregamento foram as seguintes:

- ✓ Linha em vazio – 1,01MV
- ✓ Linha em curto – 0V
- ✓ Linha com carga leve – 859,3kV
- ✓ Linha com carga nominal – 751,4kV
- ✓ Linha com carga pesada – 437,3kV

Tais resultados mostram a eficácia do modelo matemático adotado, bem como a vantagem da aplicação da linguagem de programação C na implementação do modelo proposto, pois, pode-se verificar a eficiência do algoritmo e do uso das funções pré-definidas da própria linguagem.

4. Conclusão

A grade contribuição deste trabalho é fazer uso dos recursos de programação avançada em um ambiente próprio de desenvolvimento em C, aplicado em uma situação real de linhas de transmissão de energia elétrica, que necessitam de um acompanhamento de tensão e corrente em todo o seu trajeto. Fica comprovado que eficácia do processamento desse dado vem contribuir para resultados rápidos e confiáveis para este setor. Nos trabalhos futuros pretende-se estudar a viabilidade de aplicação desse ambiente de processamento em outras aplicações na Engenharia Elétrica mediante a determinação das vantagens e desvantagens relacionadas à implementação da metodologia proposto nesta pesquisa, bem como, medir os tempos de processamento em várias condições de carregamento das Linhas de Transmissão de Energia e compará-los.

Referências

ABDEL-SALAM, M.; ABDALLAH, H.; EL-MOHANDES, M. T.; EL-KISHKY, H. Calculation of magnetic fields from electric power transmission lines. Electric Power Systems Research, v. 49, n. 2, p. 99-105, mar 1999.

CPLUSPLUS.COM. C Plus Plus Reference. Disponível em:
<http://www.cplusplus.com/reference/library>. Acesso em: 06 de maio de 2013.

JOHN J. GRAINGER; WILLIAM D. STEVENSON JR.: Power System Analysis.
McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering.

OLIVEIRA, Ulysses. Programando em C: Fundamentos. Rio de janeiro: Ciência Moderna. Vol 1. 2008.

MICHEL GONÇALVES PINHEIRO; MARIA CRISTINA TAVARES: Análise de Sensibilidade de Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão Dependentes na Frequência. Revista Controle & Automação/Vol.20 nº.3.