



MODELAGEM DE CAMPOS ELÉTRICOS NO ENTORNO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPACTAS ATRAVÉS DE COMSOL MULTIPHYSICS

Hélio Alexandre Cossa*, Joan Sebastian Chaves Huertas[†], Maria Cristina Dias Tavares[‡]

*Aluno, FEEC/UNICAMP

[†]Co-orientador, FEEC/UNICAMP

[‡]Orientadora, FEEC/UNICAMP

Resumo—Este estudo avalia os campos elétricos gerados por uma linha coletora em uma linha de transmissão hospedeira, considerando os limites regulatórios estabelecidos pela ANEEL, ICNIRP e OMS. Utilizando o software COMSOL Multiphysics, são realizados cálculos dos campos elétricos próximos à linha, visando garantir a conformidade com as normas de segurança. Além disso, é analisada a redução de dióxido de carbono proporcionada pela linha coletora em comparação com estruturas convencionais de torres. O estudo contribui para a viabilidade e sustentabilidade de sistemas de geração distribuída.

Palavras-Chave—Linhas de Transmissão, Campos Elétricos, COMSOL Multiphysics

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão de energia elétrica tem a função principal de transportar blocos de energia dos centros de geração aos centros de carga, levando-se em consideração aspectos técnicos, socioambientais e econômicos. Ademais, durante o funcionamento desses sistemas, campos elétricos são gerados, cujos mesmos produzem cargas elétricas livres em seu entorno. A quantidade de carga depende do nível de voltagem nos condutores de fase [1] [2]. Se um condutor flutuante estiver localizado dentro do campo elétrico, um potencial elétrico será gerado, promovendo a geração de energia sem nenhuma conexão elétrica [1]. Portanto, diante do efeito de indução acima descrito, [3] apresenta um sistema de geração de acoplamento capacitivo não convencional composto por uma linha coletora (LC) e uma inovadora subestação de distribuição (subestação de acoplamento). Ainda de acordo com [3], o uso dessa fonte de suprimento acoplada, com base em um divisor capacitivo natural, fornece continuamente a capacidade instalada, ao contrário das usinas eólicas ou solares, não é intermitente, possui o mesmo nível de qualidade e confiabilidade da linha hospedeira, e na substância, é uma alternativa promissora de baixo custo para fornecer energia firme na faixa de dezenas de quilowatts a comunidades rurais sem acesso a energia elétrica ou com acesso de baixa qualidade.

No entanto, a proposta de um sistema de geração distribuída não convencional sugerido por [3][1][2] apresenta “limitações” no que diz respeito à avaliação dos campos eletromagnéticos no entorno da linha e nos limites das faixas de servidão. Portanto, é imprescindível realizar estudos para determinar se

esses campos estão dentro dos limites das normas e regulamentos estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), agência reguladora do setor elétrico a nível nacional bem como pelos estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP) junto com a Organização Mundial da Saúde (OMS), e assim, garantir a segurança e a conformidade com as diretrizes regulatórias. A Tabela I abaixo ilustra os limites de campos elétricos e magnéticos estabelecidos e recomendados pela ANEEL, ICNIRP e pela OMS, respectivamente [4] [5] com o objetivo de assegurar a preservação da saúde e do meio ambiente [6].

Tabela I: Níveis de Referência para campos elétricos e magnéticos variantes no tempo nas frequências de 50 e 60 Hz. Fonte: [4] [5]

Frequência	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μ T)
50 Hz	5,00	200,00
60 Hz	4,17	200,00

Além das preocupações regulatórias, a exposição a campos elétricos e magnéticos de baixa frequência têm sido objetos de estudos em relação aos possíveis efeitos prejudiciais à saúde humana [7][8] ou a ausência de riscos [9][10]. A compreensão desses efeitos e a avaliação dos níveis de exposição são de extrema importância para proteger a população que vive ou trabalha nas proximidades das linhas de transmissão (LT's). Outrossim, outro fator a ser considerado são as restrições ambientais relacionadas a faixa de servidão das LT's. A instalação de uma LC conforme a proposta de [3] pode implicar em intervenções nessa faixa, o que requer uma análise cuidadosa dos potenciais impactos ambientais.

Diante desses desafios, este trabalho tem como objetivo realizar estudos utilizando os módulos eletrostáticos da ferramenta computacional COMSOL MULTIPHYSICS para calcular os campos elétricos gerados nas proximidades da linha coletora. Através dessa pesquisa, busca-se avaliar se esses campos estão em conformidade com as normas nacionais estabelecidos pela ANEEL e internacionais estabelecidos pela ICNIRP e OMS respectivamente para prover um melhor entendimento, assim como as possíveis

vantagens e limitações da linha proposta por [1]. Na substância, esses resultados serão fundamentais para garantir a viabilidade e a sustentabilidade desse sistema de geração distribuída, conciliando a necessidade de eletrificação de comunidades rurais com a proteção da saúde humana e do meio ambiente.

II. ANÁLISE DAS LT'S ATRAVÉS MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

A. Características dos modelos da LT's estudadas

A linha de transmissão em estudo é uma linha de 230 kV conforme ilustra a Figura 2 adotada por dispor do nível de tensão mais elevado nos países em desenvolvimento, onde se localiza um número significativo de comunidades rurais sem acesso a energia elétrica ou com acesso de baixa qualidade [1].

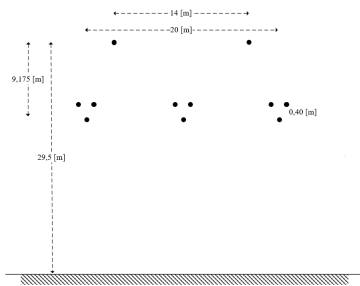


Figura 1: Geometria do modelo de LT hospedeira 230 kV em estudo. Fonte: Adaptado de [1].

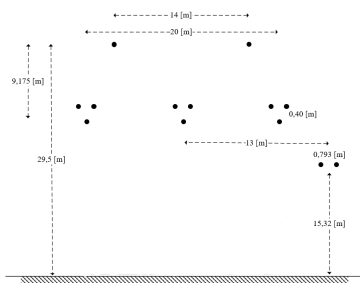


Figura 2: Geometria do modelo de LT hospedeira 230 kV com a linha coletora próxima. Fonte: Adaptado de [1].

Tabela II: Parâmetros do Sistema das LT's dos dois modelos

Parâmetro	Valor
Raio do condutor de fase	0.0153 m
T/D	0.2497
Resistência DC para condutores de fase	0.0701 Ω/m
Raios dos CPR	0.0048 m
Resistência DC dos CPR	3.51 Ω/m
Flecha de vão meio (condutores)	10.62 m
Flecha de vão meio (cabos para-raios)	6.40 m
Flecha de vão meio (linha coletora)	8.75 m

B. Características do campo elétrico gerado por Linhas de Transmissão em 2D

A cada tipo de de LT, i.e., DC (*corrente contínua*) ou AC (*corrente alternada*), o campo elétrico possui diferentes características [11]. Em uma LT (AC) trifásica, o campo elétrico apresenta uma rotação em quase todo o espaço, com exceção das superfícies de condições de contorno [12]. Ademais, de acordo com [11], o campo resultante se divide em duas partes, quer dizer, uma parte real e uma parte imaginária, com componentes nos eixos horizontal (x) e vertical (y), como consequência da representação senoidal da tensão para números complexos.

C. Análise Fasorial em Linhas de Transmissão Trifásicas

Em sistemas trifásicos, as tensões em cada fase são representadas por funções senoidais no tempo, devido à natureza da geração e transmissão de energia elétrica [13]. Cada fase tem uma defasagem de 120 graus em relação à outra.

As fórmulas gerais para as tensões em cada fase são dadas por [14]:

$$V_A(t) = \frac{V_{\text{linha}}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$V_B(t) = \frac{V_{\text{linha}}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2)$$

$$V_C(t) = \frac{V_{\text{linha}}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (3)$$

Onde: V_{linha} é a tensão de linha (ou tensão entre fases) eficaz, $V_A(t)$, $V_B(t)$ e $V_C(t)$ são as tensões de fase em função do tempo t , ω é a frequência angular (rad/s).

As tabelas II e IV respectivamente, ilustram os parâmetros das fases A, B, e C, bem como, dos parâmetros dos dois modelos (3a, 3b) definidos para efeitos de estudo no Comsol.

Tabela III: Parâmetros das Fases A, B e C

Fase	Fórmula	Valor (kV)
A	$V_A(0) = \frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \cdot \cos(377 \times (-\frac{1}{180}))$	132,54
B	$V_B(0) = \frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \cdot \cos(377 \times (-\frac{1}{180}) - \frac{2\pi}{3})$	-66,27
C	$V_C(0) = \frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \cdot \cos(377 \times (-\frac{1}{180}) + \frac{2\pi}{3})$	-66,27

D. Formulação Matemática para a Análise de Potencial e Campos Elétricos no COMSOL Multiphysics

As equações no COMSOL Multiphysics que descrevem o comportamento do campo elétrico em materiais dielétricos sob condições estáticas são [15]:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (4)$$

onde \mathbf{E} é o campo elétrico e ∇ é o operador gradiente.

$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla V) = \rho \quad (5)$$

Tabela IV: Parâmetros dos modelos (3a, 3b)

Linha hospedeira	Tensão (kV)
Fase A	132.54∠0°
Fase B	-66.27∠(-120°)
Fase C	-66.27∠(120°)
Para raios	0
Linha coletora	Tensão (kV)
Fase A	132.54∠0°
Fase B	-66.27∠(-120°)
Fase C	-66.27∠(120°)
Linha coletora	Flutuantes
Para raios	0
Fio-terra	Tensão (kV)
Fio-terra	0

onde, a constante física ϵ_0 (unidade SI: F/m) é a permissividade do vácuo, \mathbf{P} (unidade SI: C/m²) é o vetor de polarização elétrica, e ρ (unidade SI: C/m³) é a densidade de carga elétrica espacial.

III. MODELAGEM DO CAMPO ELÉTRICO ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

As simulações numéricas foram realizadas pela ferramenta computacional COMSOL Multiphysics, módulos eletrostáticos 2D. Os passos para o cálculo são descritos abaixo:

- I. Criação do modelo usando o assistente de modelo "Model Wizard" para definir a geometria do problema.
- II. Definição da dimensão da geometria como bidimensional (2D).
- III. Atribuição do parâmetro físico, selecionando o Módulo AC/DC e a interface "Electrostatics".
- IV. Descrição do domínio de estudo como estacionário (não muda com o tempo).
- V. Criação da geometria da torre de transmissão usando as ferramentas do COMSOL.
- VI. Definição dos tipos de materiais, como alumínio, aço e ar.
- VII. Definição das condições de contorno e conexões dos elementos, como as fontes de tensão para as linhas de transmissão.
- VIII. Geração da malha que discretiza a geometria em elementos finitos. Ademais, para o caso *ad hoc* das geometrias 3a e 3b, ela foi refinada (extremely fine) com vista a determinar a precisão da solução e como corolário, garantir resultados precisos.
- IX. Pós-processamento dos resultados, utilizando a opção "Study 1" para obter os gráficos desejados.

O fluxograma da Figura 6 apresenta o resumo das etapas do processo de cálculo do campo elétrico apresentadas acima.

IV. RESULTADOS

Os dados referentes às distribuições do campo elétrico e potencial da linha coletora e da linha hospedeira, apresentados nas

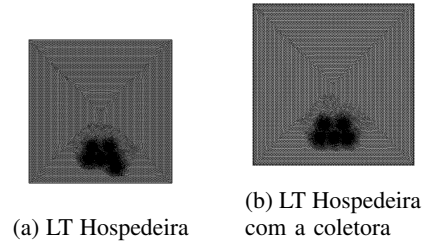


Figura 3: Malha de elementos finitos triangulares das geometrias em estudo no Comsol. Fonte: Adaptado pelo autor.

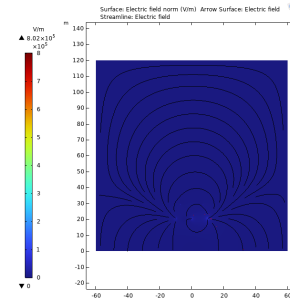


Figura 4: Distribuição do campo elétrico na LT hospedeira com a coletora próxima fornecida pelo Comsol. Fonte: Adaptado pelo autor.

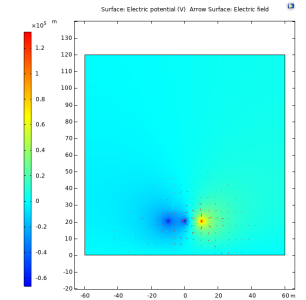


Figura 5: Distribuição do potencial na LT hospedeira com a coletora próxima fornecida pelo Comsol. Fonte: Adaptado pelo autor.

Figuras 4 e 5, respectivamente, foram exportados do COMSOL em um arquivo txt e posteriormente analisados no Python. Para a análise, foram recortadas as regiões de interesse das linhas, destacando os pontos entre $x=12,1616$ m a $x=12,7892$ m e de $y=13,4308$ m a $y=13,9590$ m. Essa faixa de interesse é relevante, posto que está no entorno da linha coletora.

Tabela V: Valores do Campo Elétrico no entorno da Linha Coletora

x [m]	y [m]	Campo Elétrico [kV/m]
12,1616	13,4308	3436,5391
12,2134	13,3030	3359,7871
12,2134	13,2322	3324,8579
12,7848	14,0315	2226,5922
12,7873	14,0319	1901,3414
12,7908	14,0053	3409,2297
12,7873	13,9898	3503,3390
12,7906	13,9737	3520,5061
12,7892	13,9590	3525,2780

Os resultados da análise revelaram que os campos elétricos nas regiões de interesse estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas da ANEEL. Isso significa que a linha coletora e a linha hospedeira estão em conformidade com as diretrizes regulatórias em relação à exposição humana a campos elétricos.

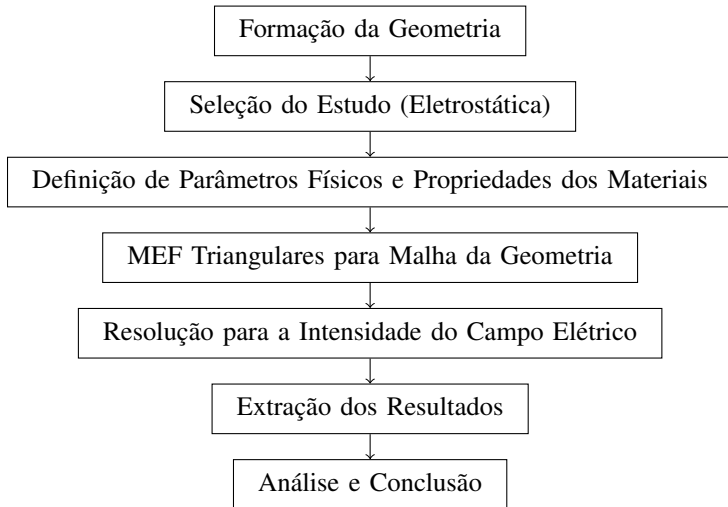


Figura 6: Etapas do processo de cálculo do campo elétrico no COMSOL. Fonte: Adaptado pelo autor.

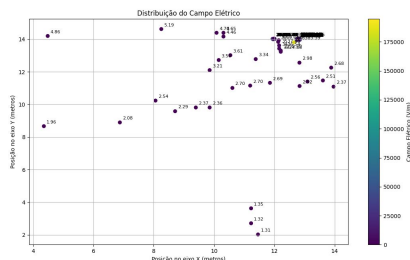


Figura 7: Distribuições do campo elétrico no entorno da linha coletora. Fonte: Adaptado pelo autor.

Apesar de serem promissores, os resultados até o momento são parciais, e ainda necessários serem aprofundados, bem como, a realização de análises no que tange a questões adicionais, como a redução de dióxido de carbono e a variação das perdas. Essas análises complementares são essenciais para uma compreensão mais completa dos impactos da linha coletora no campo elétrico original da linha de transmissão hospedeira.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho de iniciação científica teve como objetivo avaliar os campos elétricos gerados por uma linha coletora em uma LT hospedeira, levando em consideração os limites regulatórios estabelecidos pela ANEEL. Os resultados parciais indicaram que os campos elétricos nas regiões de interesse da LC e da LT hospedeira estão dentro dos limites regulatórios. Contudo, é importante ressaltar que esta pesquisa ainda está em andamento, e portanto, análises adicionais são necessários para melhor avaliação. De forma resumida os resultados preliminares são promissoras e fornecem uma base sólida para a continuação da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente à Sra. Profa. Dra. Maria Cristina D. Tavares, ao Dr. Joan Sebastian C. Huertas e ao LTRANSP/FEEC por seu nevrálgico auxílio, motivação e inspiração em minha jornada acadêmica. Outrossim, sou grato à FUNCAMP/UNICAMP e ao SAE/UNICAMP pelo incentivo à pesquisa durante a vigência da Bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

- [1] J. S. Chaves, J. S. Acosta, M. C. Tavares, Optimal transmission line coupling generation system design for rural electrification, *IEEE Transactions on Power Delivery* 36 (4) (2021) 1964–1973. doi:10.1109/TPWRD.2020.3017376.
- [2] J. S. Chaves Huertas, M. C. Tavares, Rural electrification using capacitive induced voltage on transmission lines' shield wires, in: 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2016, pp. 89–93. doi:10.1109/APPEEC.2016.7779476.
- [3] J. S. C. Huertas, Rural electrification method based on induced voltage using a collector line (2020).
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 915, DE 23 DE FEVEREIRO DE 2021, <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021915.pdf>, acesso em: 12/07/2023 (2021).
- [5] Gov.br, Agência nacional de energia elétrica (março 2022). URL <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/seguranca/campos-eletricos-e-magneticos>
- [6] T. S. Guedes, Modelagem e medições de campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão, Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (2011).
- [7] P. S. Maruvada, Characterization of power frequency magnetic fields in different environments, *IEEE Transactions on Power Delivery* 8 (2) (1993) 598–606.
- [8] J. Schulz, A. Ahlbom, Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukemia: a review, *Radiation Protection Dosimetry* 132 (2) (2008) 202–211.
- [9] Swanson, First results from the ukccs, *Journal of Radiological Protection* 20 (0) (2000) 72–73.
- [10] M. Linet, et al., Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children, *New England Journal of Medicine* 337 (1) (1997) 1–8.
- [11] D. Deno, Transmission line fields, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 95 (5) (1976) 1600–1611. doi:10.1109/T-PAS.1976.32259.
- [12] A. C. Pinho, O cálculo do campo elétrico em 2d gerado por linhas de transmissão e o efeito em seres vivos, Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (setembro 1994).
- [13] C. K. Alexander, M. O. Sadiku, Fundamentos De Circuitos Elétricos, 5th Edition, McGraw-Hill, São Paulo, 2013.
- [14] Y. Yang, J. Lu, Y. Lei, A calculation method for the hybrid electric field under uhvac and uhvdc transmission lines

in the same corridor, IEEE Transactions on Power Delivery 25 (2) (2010) 1146–1153. doi:10.1109/TPWRD.2009.2036359.

- [15] COMSOL, COMSOL Multiphysics Reference Manual, version 5.5 Edition, pp. 785 (2019).