

LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ESCALA REDUZIDA PARA APLICAÇÕES DIDÁTICAS

Poliana Caldeira dos Santos¹

Marcelo Escobar de Oliveira¹

¹Instituto Federal de Goiás – Câmpus Itumbiara
NuPSE – Núcleo de Pesquisas em Sistemas de Energia

1 INTRODUÇÃO

A partir da inauguração da central elétrica de Pearl em 1882 e a comercialização de eletricidade em vários países, surgiram desafios relacionados ao transporte e distribuição de energia elétrica. No Brasil, a primeira linha de transmissão registrada foi construída em torno de 1883 na cidade de Diamantina, Minas Gerais. Essa linha de transmissão transportava energia gerada por uma usina hidrelétrica composta por duas rodas d'água e dois dínamos Gramme, percorrendo uma distância de aproximadamente dois quilômetros. Essa energia era utilizada para acionar bombas hidráulicas em uma mina de diamantes.

Atualmente, com a crescente demanda por energia elétrica estável e de qualidade, as linhas de transmissão estão sendo cada vez mais solicitadas. Elas desempenham um papel fundamental no sistema de geração e transporte de energia elétrica brasileiro, uma vez que a maior parte da energia é gerada em hidrelétricas, que geralmente estão localizadas distantes dos grandes centros consumidores. Em 2022, o Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil possuía aproximadamente 180 mil km de extensão, e a previsão para 2027 é de que ultrapasse os 215 mil km (ONS, 2023).

No entanto, diante da importância estratégica das linhas de transmissão no fornecimento de energia elétrica, torna-se essencial realizar análises e estudos detalhados nesse campo. Através dessas análises, é possível identificar pontos de melhoria, antecipar possíveis problemas e otimizar a eficiência do sistema como um todo. Além disso, o desenvolvimento de estudos nessa área contribui para o avanço tecnológico, aprimorando as técnicas de construção e manutenção das linhas de transmissão, bem como a implementação de novas tecnologias, como linhas de transmissão de alta tensão e sistemas de monitoramento em tempo real. Dessa forma, investir em análises e estudos nesse setor é fundamental para garantir a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica, bem como impulsionar o desenvolvimento contínuo do sistema de transmissão no Brasil.

Nesse contexto, é crucial explorar diferentes abordagens e ferramentas para a construção de linhas de transmissão, tanto em escala reduzida para fins didáticos, como também em trabalhos acadêmicos que fornecem bases sólidas para o desenvolvimento de projetos nessa área. Alguns exemplos relevantes são os trabalhos de Silva (2017) e Damasceno (2019), que oferecem boas referências para a criação de uma bancada didática destinada à simulação de linhas de transmissão. Além disso, é importante ressaltar o valor dos experimentos práticos na consolidação do conhecimento e no desenvolvimento do processo de aprendizagem dos alunos.

Dessa forma, o presente trabalho se dedica à construção de uma bancada para simulação de linha de transmissão, com o objetivo de ser utilizada em aulas práticas. Através dessa bancada, será possível simular diversos fenômenos recorrentes nas linhas

de transmissão, conforme estudados em diversas fontes bibliográficas. Com essa abordagem prática, busca-se proporcionar uma experiência de aprendizagem enriquecedora, complementando a teoria com aplicações concretas e estimulando a compreensão dos alunos sobre o tema.

2 REPRESENTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

A Linha de Transmissão (LT) é responsável por transportar a energia gerada a partir da fonte transmissora até a fonte consumidora. Simplificadamente, pode-se dizer que a LT é o "caminho" pelo qual a energia percorre. Para representar a LT em um circuito elétrico, é necessário definir quatro parâmetros que reproduzem suas características elétricas: indutância (L), capacitância (C), condutância (G) e resistência (R).

A resistência total do condutor é composta por três parcelas de resistência: a resistência do condutor à passagem de corrente contínua, a resistência aparente causada pelos fluxos magnéticos no interior dos condutores e a resistência aparente adicional. Determinar com precisão essas resistências é uma tarefa complexa, portanto, são utilizados valores catalogados que oferecem boa aproximação.

A condutância está relacionada às perdas proporcionais à tensão da linha e é influenciada pelo efeito corona, que é a ionização do ar ao redor do condutor elétrico, e pelas perdas nos isoladores. Essas perdas são consideradas distribuídas ao longo da linha, uma vez que, embora as perdas nos isoladores se concentrem neles, a distância entre as estruturas de suporte é pequena em comparação com o comprimento total da linha. Devido ao fato de que essas perdas têm valores muito baixos em comparação com a corrente que circula na LT, geralmente esse parâmetro é desconsiderado na modelagem matemática.

A indutância (L) e a capacitância (C) são os principais parâmetros utilizados para modelar a LT, e são originados pelos efeitos dos campos magnéticos e elétricos ao redor do condutor, respectivamente. Esses parâmetros dependem da geometria da LT e do meio em que os condutores estão inseridos, conforme pode ser verificado nas equações 1 e 2.

$$L_x = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \ln \frac{DMG_{3\phi}}{RMG_x} \quad [H/m] \quad (1)$$

$$C_x = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln (DMG_{3\phi}/RMG_x)} \quad [F/m] \quad (2)$$

Em que:

- x : uma das fases da LT;
 μ_r, μ_0 : permeabilidade do meio e do vácuo, respectivamente,
 ϵ_r, ϵ_0 : permissividade do meio e do vácuo, respectivamente,
RMG : raio médio geométrico da fase;
DMG : distância média geométrica entre as fases.

Portanto, compreender e analisar os parâmetros da LT é fundamental para o correto dimensionamento e operação eficiente do sistema de transmissão de energia elétrica. O conhecimento dessas características elétricas permite otimizar o projeto, minimizar perdas e garantir a transmissão confiável e estável da energia ao longo da linha.

A linha de transmissão trifásica é composta por múltiplos condutores em cada fase, visando reduzir o gradiente de potencial na superfície do condutor. Os cabos de alumínio são amplamente utilizados devido às suas propriedades adequadas e menor custo em comparação aos cabos de cobre. Tanto os cabos de liga de cobre quanto os de alumínio seguem as seções padronizadas pela ABNT, que se baseiam no sistema norte-americano AWG (American Wire Gauge) para padronização.

A geometria da linha de transmissão está relacionada à disposição dos condutores em cada fase, e essa disposição determina o tipo de estrutura de sustentação a ser utilizado e também os valores de RMG e DMG. Existem diversos modelos de estruturas disponíveis, como ilustrado na Figura 1, que apresenta três exemplos.

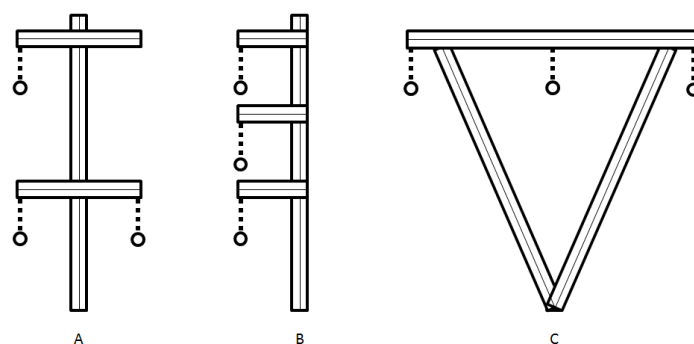


Figura 1 – Exemplos de estruturas de linhas de transmissão: A - triangular, B - vertical, C – horizontal

Essa variedade de modelos permite adaptar a linha de transmissão às características do ambiente e às necessidades específicas do projeto. A escolha adequada da geometria e da estrutura de sustentação é essencial para garantir a segurança, a eficiência e a confiabilidade do sistema de transmissão de energia elétrica. Além disso, a correta disposição dos condutores nas fases minimiza a interferência eletromagnética e a corrente parasita, contribuindo para um desempenho otimizado da linha.

A partir da definição dos valores de indutância e capacitância são calculados, respectivamente, os valores de reatância indutiva (X) e de susceptância (B) e, assim, definidas a impedância série da linha de transmissão (Z) equação 3 e a admitância em derivação (Y) equação 4.

$$Z_{LT} = R + jX \quad (3)$$

$$Y_{LT} = G + jB \quad (4)$$

Neste trabalho foram consideradas análises monofásicas, buscando simplificar o modelo e também a implementação da bancada proposta. Assim, a LT pode ser representada por um circuito equivalente de um elemento Δx da linha com seus parâmetros elétricos uniformemente distribuídos, conforme figura 2, de onde podem ser deduzidas as equações gerais da linha de transmissão através de equações diferenciais, 5 e 6.

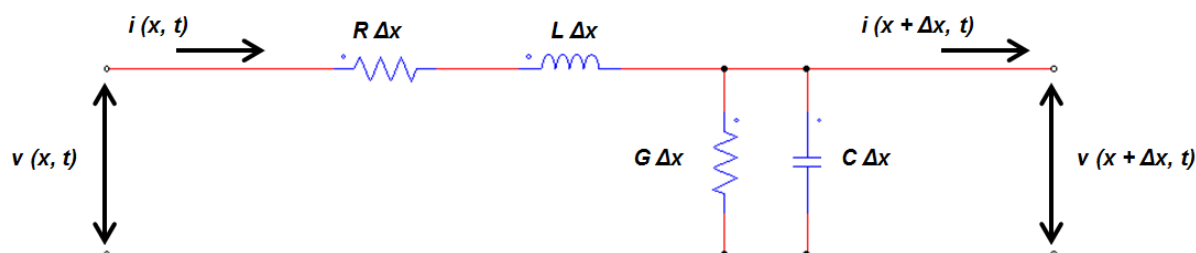


Figura 2 – Circuito equivalente de um elemento Δx de uma linha real

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} e^{x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} e^{-x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} \quad [V] \quad (5)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} e^{x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} - \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} e^{-x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} \quad [A] \quad (6)$$

Em que U_x e I_x são, respectivamente, a tensão e a corrente em qualquer ponto da linha, U_2 e I_2 são a tensão e a corrente no receptor, z e y são a impedância e a admitância por unidade de comprimento da LT, e x o comprimento de linha onde se deseja calcular a tensão e a corrente.

Nas equações 5 e 6 tem-se o termo destacado na equação 7 de onde calcula-se a impedância característica (Z_c) da linha de transmissão.

$$\sqrt{\dot{z}/\dot{y}} = \frac{\sqrt{r + j\omega L}}{\sqrt{g + j\omega C}} = \dot{Z}_c \quad [\Omega] \quad (7)$$

Como nas linhas reais geralmente os valores de r e g são pequenos quando comparados aos valores de L e C , o valor absoluto da impedância característica não é muito diferente do valor da impedância natural. A impedância natural da linha (Z_0) é dada de acordo com a equação 8.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega] \quad (8)$$

O valor de Z_0 é específico para cada LT e o seu valor indica a carga ideal de funcionamento da linha em termos de quantidade de reativos gerados e consumidos.

Usualmente para a representação da linha de transmissão a parâmetros concentrados é utilizado o circuito pi, conforme figura 3.

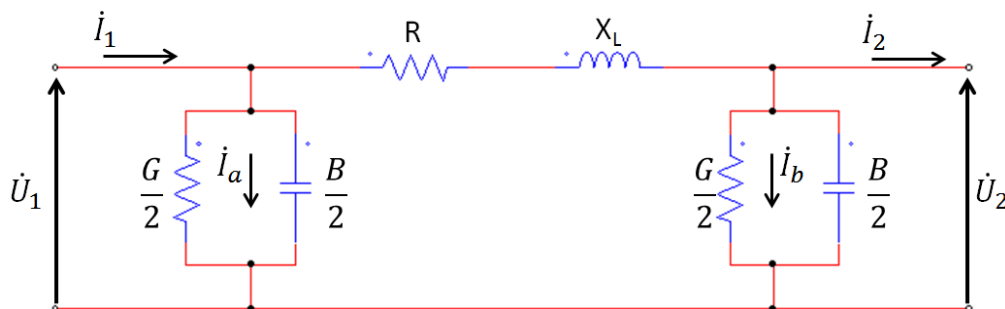


Figura 3 – Circuito pi representativo de uma LT

Quando se deseja representar a LT através de circuitos com parâmetros concentrados são utilizadas as linhas artificiais. Nesse caso, a linha é dividida em trechos de 20 a 25km de extensão e cada trecho é representado por um circuito pi, conhecidos como células pi, para que possam ser observados os efeitos elétricos e magnéticos em pequenos trechos da linha.

De acordo com Fuchs (1977), quando se deseja analisar fenômenos relacionados com o desequilíbrio elétrico e magnético existente ao longo da linha são utilizados os modelos matemáticos de linhas trifásicas. Os parâmetros elétricos e magnéticos das linhas de um sistema de vários condutores podem ser representados por matrizes de ordem 3x3. Dessa forma, a linha trifásica pode ser representada pelo circuito simplificado mostrado na figura 4.

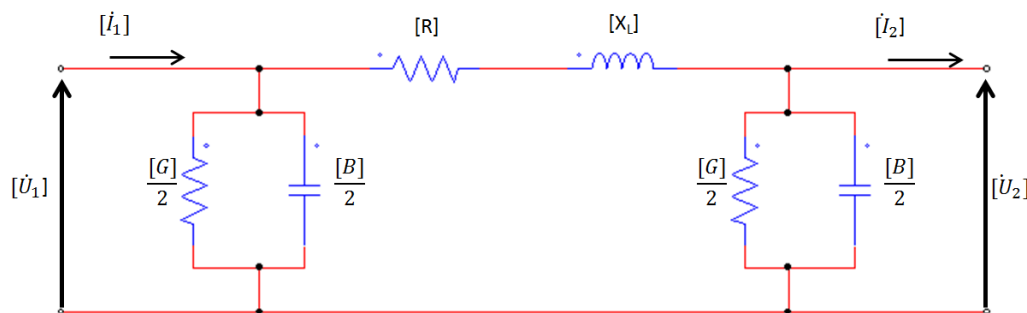


Figura 4 – Circuito simplificado da linha trifásica

Nos casos de modelagem matemática de linhas longas as dificuldades matemáticas para determinar as matrizes das constantes generalizadas tornariam os cálculos muito extensos. Nessas condições o uso do modelo de linha artificial monofásico se mostra mais prático com elementos de 20 a 25km de comprimento.

3 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA LT

Para representar a linha de transmissão em escala reduzida em um laboratório, é necessário definir os componentes que possam representar os parâmetros elétricos do modelo de LT a parâmetros concentrados. A primeira etapa é determinar o número de células pi a serem utilizadas para a representação da linha, e com base nisso, são calculados os valores dos capacitores e indutores a serem utilizados em cada célula.

Os capacitores são elementos passivos projetados para armazenar energia em seu campo elétrico. Eles possuem valores comerciais que variam desde picofarads (pF) até microfarads (μF) e são caracterizados pelo material utilizado em seu dielétrico e pela tensão que podem suportar. A maioria dos capacitores é linear e pode ser facilmente adquirida de acordo com as especificações do projeto.

Os indutores, por sua vez, são elementos que armazenam energia em seu campo magnético. São compostos por uma bobina de fio condutor e são classificados de acordo com o material que compõe o seu núcleo. No caso da modelagem utilizada nesse trabalho, os indutores lineares com núcleo de ar são os mais adequados. Eles são modelados com uma indutância em série com uma resistência. Devido às suas dimensões específicas, esses indutores não são encontrados comercialmente e precisaram ser construídos conforme a finalidade do trabalho.

O cálculo dos indutores com núcleo de ar foi realizado com base nas equações desenvolvidas por Sette (2015). Essas equações permitem calcular as dimensões das bobinas com base nos valores de indutância e resistência necessários para o projeto.

Para a construção da linha em escala reduzida, foi selecionada uma linha de transmissão de referência, que interliga as subestações de Bauru e Cabreúva, localizadas em São Paulo. Essa linha possui 235 km de extensão e opera em um nível de tensão de 440 kV. Os dados consolidados dessa linha de referência foram obtidos do trabalho de Souza (2015).

O fluxograma mostrado na Figura 5 apresenta as etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho, desde a modelagem da linha em células pi até a montagem da bancada e a realização de testes para comparar os resultados obtidos com as equações gerais da linha.

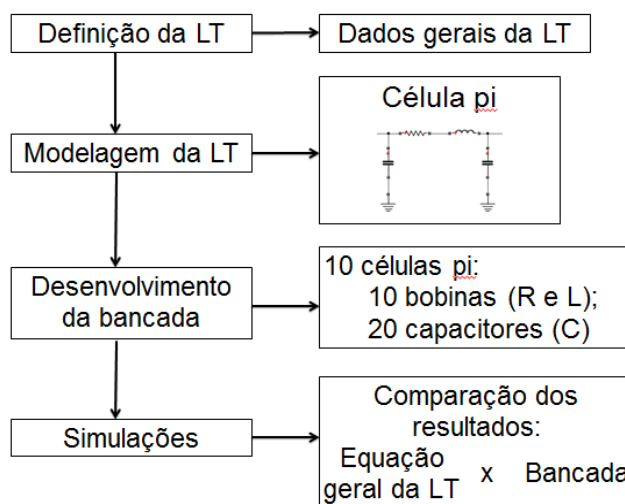


Figura 5 – Fluxograma

Na figura 6 é mostrada a localização no mapa da ONS (2022) da linha de transmissão utilizada como referência para a realização desse trabalho.

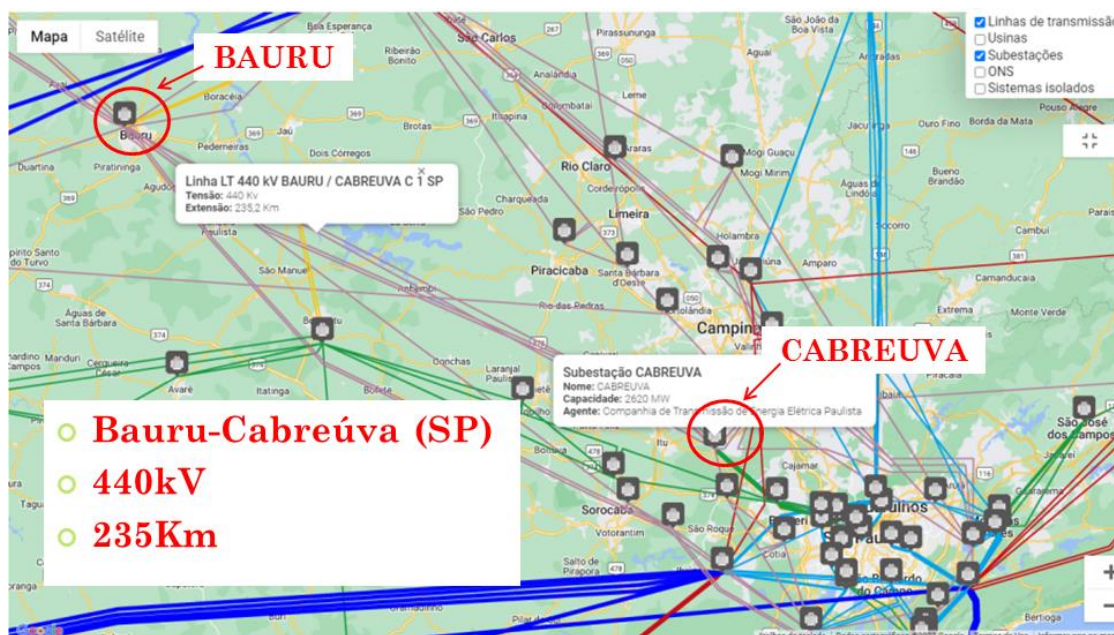


Figura 6 – Localização da LT Bauru-Cabreúva. Fonte: ONS (2023)

Na tabela 1 estão apresentados os parâmetros elétricos da LT utilizada como referência.

Tabela 1. Parâmetros elétricos LT Bauru-Cabreúva

R (Ω)	X (Ω)	B (S)
28,7648	75,8856	0,0013

A representação da linha real foi feita em 10 elementos que representam 23,5km de extensão da LT. Cada elemento é composto por 1 indutor de 20mH com resistência interna de $2,3\Omega$ e 2 capacitores de $0,2\mu\text{F}$ de cerâmica para 250V. Os indutores precisaram ser construído devido as necessidades do projeto e as suas dimensões.

3.1 Construção dos indutores

No primeiro teste para construção dos indutores, a bobina foi enrolada com fio de cobre esmaltado AWG 20 em um carretel de 50 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento. Com 609 espiras, obteve-se uma indutância de 20 mH e uma resistência interna de 6Ω .

Em seguida, foi construída outra bobina utilizando fio de cobre esmaltado AWG 18 em um carretel de 60 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. Essa bobina apresentou 472 espiras, uma indutância de 20 mH e aproximadamente 4Ω de resistência interna.

Por fim, os indutores foram enrolados em carretéis de mdf com 32 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento, utilizando fio de cobre esmaltado AWG 14 e AWG 15, ambos com uma indutância de 20 mH. Para o fio AWG 14, a resistência interna do indutor ficou em $1,8\Omega$, enquanto para o fio AWG 15, a resistência interna foi de $2,3\Omega$.

Essas medidas e construções das bobinas permitem obter diferentes valores de indutância e resistência interna, adequados para o estudo e a simulação de linhas de transmissão em escala reduzida. A escolha dos materiais e dimensões dos carretéis e fios é fundamental para alcançar os parâmetros desejados e garantir a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos nos experimentos.

Na figura 7 são mostradas as bobinas utilizadas no projeto.



Figura 7 – Bobinas utilizadas no projeto

Para a construção das bobinas, optou-se pelo uso de 9 bobinas de fio de cobre esmaltado AWG 15 e apenas 1 bobina de fio AWG 14. Essa escolha foi baseada no menor custo.

3.2 Construção e montagem da bancada

Todas as peças da bancada onde foram montadas as células pi foram desenhadas em AutoCad para serem impressas em mdf. Na figura 8 é mostrada a bancada finalizada.



Figura 8 – Montagem da bancada finalizada

Optou-se por individualizar os bornes de célula para facilitar a realização de testes com elementos ao longo da linha como, por exemplo, simulação de bancos de capacitores e indutores em diferentes pontos da linha de transmissão.

4 MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES

Com o objetivo de avaliar o comportamento da linha foram realizados diversos experimentos: linha de transmissão a vazio, com carga resistiva, capacitiva e indutiva. Os valores obtidos dos testes de tensão e corrente na linha de transmissão com as diversas cargas foram comparados aos valores de tensão e corrente para as mesmas condições de carga em simulações.

As análises foram realizadas modificando a carga no final da linha de transmissão de acordo com os seguintes casos:

- Caso 1: sem carga (linha a vazio);
- Caso 2: carga puramente resistiva - 154,86 Ω ;
- Caso 3: carga puramente resistiva - 463,94 Ω ;
- Caso 4: carga indutiva ($L = 282,5\text{mH} + R = 8,38 \Omega$);
- Caso 5: carga indutiva ($L = 20,55\text{mH} + R = 5,5 \Omega$), com núcleo de ar.

Na figura 9 é mostrado o esquema de montagem dos testes na bancada da linha de transmissão.

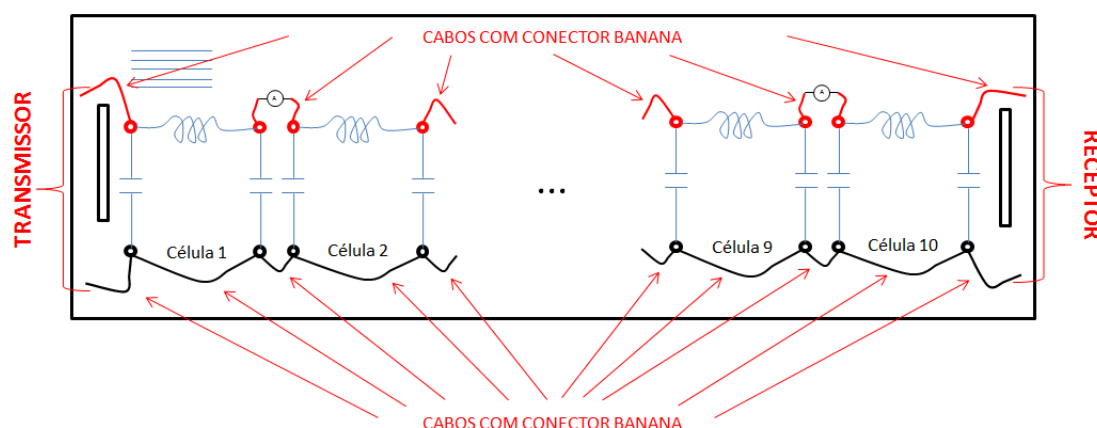


Figura 9 – Esquema de montagem dos testes na bancada

Os valores de cada componente das células da bancada estão disponíveis na tabela 2.

Tabela 2. Valores dos componentes de cada célula

Célula	Indutor (mH)	Resist. (Ohm)	Cap. 1 (nF)	Cap. 2 (nF)
Célula 1	20,10	1,89	215,00	219,30
Célula 2	19,88	1,87	214,50	216,60
Célula 3	20,36	1,89	218,30	215,50
Célula 4	20,24	1,88	214,70	217,20
Célula 5	20,20	1,75	226,60	217,40
Célula 6	20,10	1,87	219,50	224,00
Célula 7	20,82	1,88	214,90	218,10
Célula 8	20,53	1,62	227,70	217,70
Célula 9	20,01	1,57	217,30	218,60
Célula 10	20,18	1,88	220,10	222,80

Na figura 10 é apresentada a bancada durante os testes.

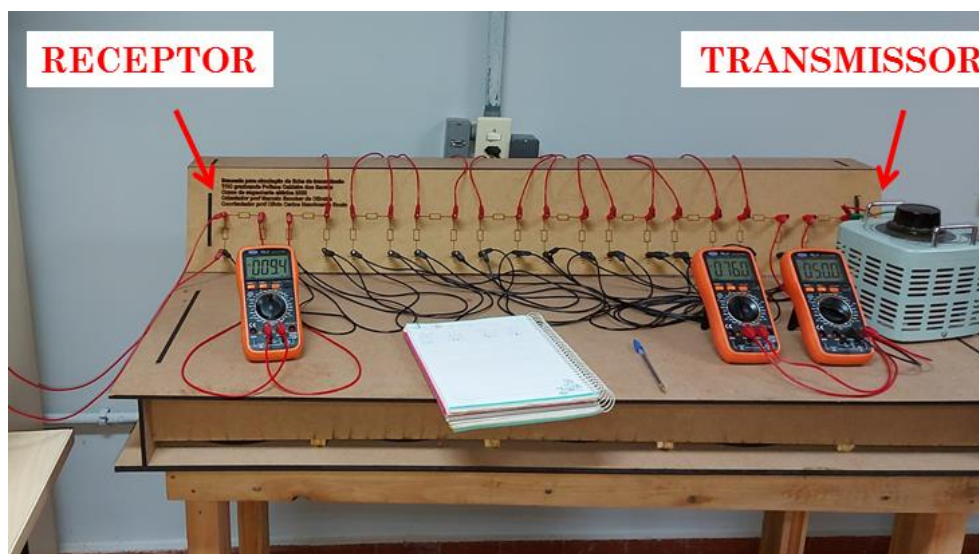


Figura 10 – Montagem dos testes

Os valores de tensão e corrente foram calculados através das equações gerais da LT e comparados com os valores medidos na bancada, sendo apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Valores de tensão medidos x calculados

Caso	Tensão (receptor)	Tensão (transmissor)		
	Medido (V)	Medido (V)	Calculado (V)	Erro
1	26,90	25,20	25,23	-0,11%
	53,70	50,40	50,36	0,08%
2	21,50	25,07	24,53	2,20%
	42,90	49,16	49,06	0,21%
3	25,00	25,22	24,93	1,19%
	50,40	50,25	50,20	0,09%
4	68,00	96,54	83,24	15,98%
	84,40	121,16	99,17	22,17%
	100,90	145,59	119,03	22,32%
	117,10	169,72	139,06	22,05%
	133,00	194,05	158,40	22,51%
5	1,60	13,53	12,52	8,05%

Tabela 4. Valores de corrente medidos x calculados

Carga	Corrente (receptor)	Corrente (transmissor)		
	Medido (A)	Medido (A)	Calculado (A)	Erro
1	0,00	0,04	0,04	-2,54%
	0,00	0,08	0,08	-2,55%
2	0,14	0,14	0,14	0,81%
	0,28	0,26	0,27	-4,34%
3	0,05	0,06	0,06	-2,50%
	0,11	0,12	0,13	-2,75%

4	0,57	0,38	0,55	-30,67%
	0,71	0,49	0,59	-17,40%
	0,85	0,59	0,72	-17,95%
	1,00	0,70	0,85	-18,06%
	1,14	0,81	0,98	-17,36%
5	0,17	0,17	0,17	0,06%

Os maiores erros encontrados entre os valores de tensão medidos e calculados para o teste a vazio, com carga resistiva e com carga indutiva com núcleo de ar ficaram em torno de 8% conforme tabela 3. Para as comparações de corrente para esses mesmos testes os erros ficaram em torno de 4%, como pode ser observado na tabela 4.

Estão disponíveis também nas tabelas 3 e 4 os erros calculados para os testes com carga indutiva com núcleo de material ferromagnético. Nesses casos, os erros encontrados nas comparações dos valores de tensão ficaram em torno de 22% e na comparação entre os valores medidos na bancada e calculados com a equação geral da LT para as correntes, os erros ficaram em torno de 18%, o que pode ser justificado pela não linearidade da carga.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do projeto e a construção da linha de transmissão em escala reduzida permitem diversos aprendizados sobre linhas de transmissão e sobre construção de indutores, além de ser um tema pouco explorado na academia nos cursos de engenharia elétrica. Além disso, a bancada se mostrou muito útil para estudos de linha de transmissão já que seu funcionamento pode ser consolidado através da comparação dos resultados obtidos com os valores calculados com as equações gerais da linha e com a observação da variação da distribuição da energia entre os campos elétricos e magnéticos ao longo dos testes.

Os resultados obtidos nas análises realizadas foram, em sua maioria, robustos e consistentes. A bancada, concebida como uma ferramenta didática para a disciplina de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica no curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Goiás - Câmpus Itumbiara, tem proporcionado uma demonstração prática dos conceitos estudados em sala de aula, bem como contribuído para o aprimoramento contínuo do equipamento.

Essa abordagem de construção e análise da linha de transmissão em escala reduzida permite um estudo mais detalhado dos fenômenos elétricos e magnéticos que ocorrem nas LTs, além de proporcionar uma plataforma prática para experimentos e validação dos modelos teóricos. Este trabalho contribui para a melhoria do ensino e da pesquisa na área de sistemas de transmissão de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

DAMASCENO, Adryelle Faccio. Aprimoramento de Bancada Didática para Estudo de uma Linha de Transmissão. Monografia, Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília, DF, Brasil, 2019.

FUCHS, Rubens Dario. *Transmissão de energia elétrica: linha aéreas*; Teoria das linhas em regime permanente, volume 1. Livros Técnicos e Científicos. Escola Federal de engenharia de Itajubá, RJ, 1977.

ONS. Operador nacional do sistema. 2023.

Disponível em: <https://www.ons.org.br/>. Acesso em 13 de janeiro de 2023.

SETTE, Homero. Cálculo de indutores com núcleo de ar, com base no Trabalho de Neville Thiele *Air - Cored Inductors for Audio*. Relatório técnico, 2015.

SILVA, Alex Gomes da. Bancada para simulação de linha de transmissão. Monografia, Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília, DF, Brasil, 2017.

SOUZA, Luis Felipe Soares de. Estimção de parâmetros de linhas de transmissão – estudo de caso. Trabalho de conclusão de curso, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2015.

REDUCED-SCALE ELECTRIC POWER TRANSMISSION LINE FOR TEACHING APPLICATIONS

Abstract: *Transmission Lines (TL) play a fundamental role in the National Interconnected System (NIS) and should be studied with great care by those dedicated to the energy field. There are several studies focused on transmission line modeling and software that allows for the development of computer simulations, contributing to the construction of a transmission line. However, there are few available works for laboratory testing. In this study, a reduced-scale transmission line was developed based on the electrical parameters of a real TL, and several tests were conducted to observe its theoretically studied effects. The setup has been utilized at the Federal Institute of Goiás, Campus Itumbiara, in the power transmission systems area. This document presents detailed instructions...*

Keywords: *Transmission line, bench, laboratory tests, reduced-scale transmission line.*