

Desenvolvimento e Validação de um Objeto de Aprendizagem para Ensino de Modelagem de Linhas de Transmissão Empregando Quadripolos

*Development and Validation of a Learning Object for Teaching Transmission
Line Modeling Using Quadripoles*

*Desarrollo y Validación de un Objeto de Aprendizaje para la Enseñanza del
Modelado de Líneas de Transmisión Empleando Cuadripolos*

Edisio Alves de Aguiar Junior (eajunior@inmetro.gov.br)

Universidade Veiga de Almeida – UVA, Brasil.

Alex Felipe Monteiro Barzan (alexbarzan@outlook.com)

Universidade Veiga de Almeida – UVA, Brasil.

Luiz Fernando Pereira Marques Ramos (lui_pmr@hotmail.com)

Universidade Veiga de Almeida – UVA, Brasil.

Mariana Ferreira Gomes (mari.ffgomes2@gmail.com)

Universidade Veiga de Almeida – UVA, Brasil.

Paulo Felipe Goes Faria (pf.gf@hotmail.com)

Universidade Veiga de Almeida – UVA, Brasil.

Wesley Lucas da Silva Oliveira (wesleyl.oliveira@outlook.com)

Universidade Veiga de Almeida – UVA, Brasil.

Resumo:

Este artigo apresenta o desenvolvimento e validação de uma ferramenta que auxilia na compreensão da teoria de quadripolos aplicada a cálculos de transmissão de energia elétrica. Foi elaborada uma pasta de trabalho em Microsoft Excel com diversas planilhas capazes de resolver cálculos relacionados a quadripolos aplicados à transmissão de energia elétrica, para ajudar alunos de engenharia elétrica a sedimentar os conhecimentos adquiridos. O uso de ferramentas computacionais e planilhas é uma importante ferramenta considerando o aumento do ensino em modalidade remota, inclusive incentivando os alunos a desenvolverem suas próprias soluções, já que as fórmulas são abertas e a planilha é um recurso comum e familiar. A metodologia consistiu em reunir as teorias relacionadas a quadripolos e, juntamente com os conhecimentos de Microsoft Excel, elaborar uma ferramenta computacional. Foram utilizados exercícios presentes em livros empregados em cursos de transmissão de energia elétrica, para validar o funcionamento do trabalho desenvolvido, cujos resultados foram satisfatórios na solução de 3 exercícios.

Palavras-chave: Objetos de aprendizagem; Quadripolos; Linhas de transmissão; Engenharia elétrica; Planilha eletrônica; Transmissão de energia.

Abstract:

This article presents the development and validation of a tool that helps in the understanding of the quadripole theory applied to electrical energy transmission calculations. A workbook

was prepared in Microsoft Excel with several spreadsheets capable of solving calculations related to quadripoles applied to the transmission of electrical energy, to help electrical engineering students to consolidate the acquired knowledge. The use of computational tools and spreadsheets is an important tool considering the increase in remote teaching, including encouraging students to develop their own solutions, since the formulas are open and the spreadsheet is a common and familiar resource. The methodology consisted of gathering theories related to quadripoles and, together with knowledge of Microsoft Excel, creating a computational tool. Exercises present in books used in electric power transmission courses were used to validate the functioning of the developed work, whose results were satisfactory in the solution of 3 exercises.

Keywords: Learning Objects; Quadripoles; Transmission Lines; Electrical Engineering; Electronics Worksheet; Power Transmission.

Resumen:

Este artículo presenta el desarrollo y validación de una herramienta que ayuda en la comprensión de la teoría del cuadripolo aplicada a los cálculos de transmisión de energía eléctrica. Se elaboró un cuaderno de trabajo en Microsoft Excel con varias hojas de cálculo capaces de resolver cálculos relacionados con cuadripolos aplicados a la transmisión de energía eléctrica, para ayudar a los estudiantes de ingeniería eléctrica a consolidar los conocimientos adquiridos. El uso de herramientas computacionales y hojas de cálculo es una herramienta importante considerando el aumento de la enseñanza remota, incluso incentivando a los estudiantes a desarrollar sus propias soluciones, ya que las fórmulas son abiertas y la hoja de cálculo es un recurso común y familiar. La metodología consistió en recopilar teorías relacionadas con los cuadripolos y, junto con el conocimiento de Microsoft Excel, crear una herramienta computacional. Se utilizaron ejercicios presentes en libros utilizados en cursos de transmisión de energía eléctrica para validar el funcionamiento del trabajo desarrollado, cuyos resultados fueron satisfactorios en la solución de 3 ejercicios.

Palabras-clave: Objetos de aprendizaje; cuadripolos; Líneas de transmisión; Ingeniería Eléctrica; Hoja de cálculo electrónica; Transmisión de energía.

INTRODUÇÃO

O atual contexto do ensino, nos mais diferentes níveis, envolve cada vez mais o uso de recursos computacionais e de simulação, potencializados pela sua flexibilidade, alcance e capacidade de trazer uma abordagem diferenciada ao ensino tradicional de determinados assuntos. Para Ramiro (2014), no caso do ensino superior, na área das ciências exatas, em especial, “[...] os softwares e as ferramentas computacionais de cálculo e modelagem têm sido utilizados com o objetivo de dinamizar e simplificar a matemática e muitas outras situações, onde se torna necessária uma maior compreensão por parte dos alunos.” (RAMIRO; DA COSTA; BERNARDES, 2014, p. 3). Lucca (2021) reforça que “objetos de aprendizagem podem colaborar com a aprendizagem significativa de conceitos, tanto de física como de matemática, o que se enquadra no propósito de um ensino científico e tecnológico”.

Dentre as diversas áreas de estudo da engenharia elétrica, no ramo de sistemas de potência, tem-se a transmissão de energia. Segundo Moura (2019), “As linhas de transmissão são essenciais para o transporte de grandes blocos de energia, por grandes distâncias, de forma técnica e economicamente viável.” (Moura e Rocha, 2019, p. 77). O Brasil, por suas dimensões continentais, ocupa uma posição relevante na área de transmissão de energia elétrica, com uma rede de transmissão que atinge aproximadamente 175.013 km de linha com tensão maior ou igual a 230 kV (ONS, 2022).

Considerando-se então a possibilidade de aplicar ferramentas computacionais no contexto do ensino de transmissão de energia elétrica, diferentes ferramentas computacionais como ATPDraw (MOURA; MOURA; ROCHA, 2019) podem ser empregadas, bem como a metodologia empregando LabView sugerida por Franca e Gomes (2008).

Todavia, uma possibilidade pouco explorada nesta área de conhecimento, e mesmo em algumas outras, da engenharia elétrica, é o uso de planilhas eletrônicas, abordagem semelhante àquela realizada por Bezerra e Gouveia (2013) na área de resistência dos materiais, por Ferreira e Vieira (2016) na área de engenharia química, Oliveira et al. (2019) no cálculo de treliças planas através do método de elementos finitos e Gonçalves et al. (2021) para a determinação do fluxo de calor em um telhado.

Os estudos citados apresentam relatos positivos na aplicação de planilhas eletrônicas, em geral do ponto de vista qualitativo, sempre reforçando que o uso da ferramenta computacional prepara o estudante para o contexto profissional. Todavia, aspectos quantitativos também são discutidos em outros estudos, como por exemplo Bichon (2019), que demonstra que o uso de ferramentas computacionais permite otimizar o tempo de estudo e reduzir o estresse dos discentes e Rehfeldt et al. (2015), que através de entrevistas, detectou que engenheiros fazem uso de planilhas, visto que elas facilitam cálculos matemáticos, reduzindo o tempo de elaboração e criação de projetos, bem como auxiliando no gerenciamento de atividades no âmbito da gestão.

Ainda, como mais um ponto forte nesta abordagem, observa-se que as planilhas eletrônicas são amplamente difundidas, de disponibilidade simples e muito presentes no cotidiano profissional dos futuros engenheiros, além de possuir inúmeros recursos matemáticos (NOGUEIRA; BEZERRA, 2017). Planilhas podem também ser construídas com fórmulas “abertas”, facilitando alterações e mudanças, servindo inclusive como estímulo para desenvolvimento e inclusão de novas funcionalidades e possibilidades pelos usuários. O relato

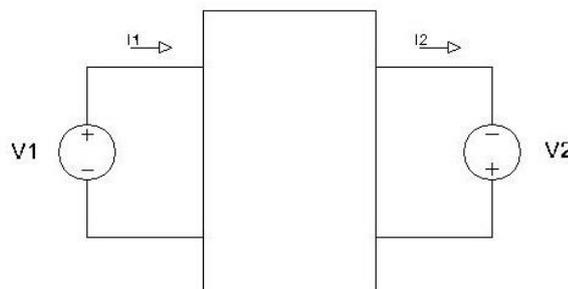
de Velasco et al. (2021) apresenta mais um dado bastante relevante: uma boa adesão dos alunos na utilização deste tipo de recurso, o que motiva mais o seu uso.

Destaca-se também a premissa estabelecida na diretriz curricular nacional de engenharia (DCN), que preconiza que engenheiros devem ser capazes de “modelar os fenômenos, os sistemas físicos e químicos, utilizando as ferramentas matemáticas, estatísticas, computacionais e de simulação, entre outras” (BRASIL, 2019).

QUADRIPOLOS NA MODELAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Segundo Viana, Farias e Souza (2017), a modelagem matemática de um sistema permite explicar o funcionamento dos mais variados fenômenos associados a ele. Não é diferente ao aplicar-se a teoria de circuitos elétricos ao estudo de linhas de transmissão. O objetivo é compreender o seu funcionamento, estabelecendo uma relação entre seu comportamento físico e as equações matemáticas.

Os quadripolos, ilustrados na Figura 1, são circuitos constituídos de dois pares de terminais. Esses pares são denominados de portas do sistema, pois representam os pontos em que sinais são fornecidos ou extraídos, sem levar em consideração sua estrutura interna. Quase todos os circuitos têm pelo menos duas portas e uma linha de transmissão é um exemplo. A partir dos parâmetros de um quadripolo é possível prever o comportamento do circuito em termos de tensão e corrente em cada porta. Sendo assim, com os parâmetros podemos antever o funcionamento do circuito ao ser ligado em um sistema maior (DORF, RICHARD C.; SVOBODA, JAMES A, 2012).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 1 - Representação de um quadripolo.

Ao aplicar-se a teoria de circuitos em linha de transmissão, é possível observar que elas possuem características resistivas, indutivas e capacitivas. Denominamos como a entrada do

quadripolo sendo o transmissor que são as entradas V_1 e I_1 , e a sua saída como receptor V_2 e I_2 . A partir dessa teoria aplicada definimos seis pares equações lineares, que são influenciadas simultaneamente, são elas:

$$V_1 = Z_1(I_1, I_2) \quad I_1 = y_1(V_1, V_2) \quad (1)$$

$$V_2 = Z_2(I_1, I_2) \quad I_2 = y_2(V_1, V_2) \quad (2)$$

$$V_1 = a_1(V_2, I_2) \quad V_2 = b_1(V_1, I_1) \quad (3)$$

$$I_1 = a_2(V_2, I_2) \quad I_2 = b_2(V_1, I_1) \quad (4)$$

$$I_1 = g_1(V_1, I_2) \quad V_1 = h_1(V_2, I_1) \quad (5)$$

$$V_2 = g_2(V_1, I_2) \quad I_2 = h_2(V_2, I_1) \quad (6)$$

Essas equações possuem, cada qual, duas variáveis independentes e duas variáveis dependentes relacionadas entre si pelos parâmetros dos respectivos circuitos. Ou seja, se V_2 e I_2 de um quadripolo, conforme a figura 1, forem consideradas variáveis independentes, então V_1 e I_1 serão suas variáveis dependentes, relacionadas com as primeiras através da impedância Z e a admitâncias Y do circuito.

O que corresponde de uma forma matricial,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ou

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Podemos entender que V_1 , I_1 , V_2 e I_2 são as tensões e correntes do transmissor e receptor respectivamente, e, temos Z em ohms (Ω) e Y em Siemens (S) que são respectivamente a impedância e a admitância da linha.

Sendo necessário considerar que esses circuitos são simétricos, logo temos sempre que $A = D$. As características das linhas nos estudos de quadripolos são definidas pelas constantes

A, B, C, D que são conhecidas como Constantes generalizadas das linhas de transmissão. De acordo com (FUCHS, 1977), são três os tipos de linhas.

a) Linhas Curtas – cujas características incluem:

- Linhas até 150 kV, comprimentos máximos de 60 a 80 km.
- Linhas com tensões maiores ou iguais a 150 kV, porém menores do que 400 kV, comprimentos máximos de 40 km.
- Linhas em tensões em iguais ou maiores do que 40 kV, comprimento máximos de 20 km.

Nas linhas curtas considera-se que as constantes são $A=1$, $B=Z$, $C=0$, $D=1$. Isto leva à forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

b) Linhas médias – cujas características incluem:

- Linhas entre 150 kV e 400 kV e comprimentos até 200 km.
- Linhas acima de 400 kV e comprimentos inferiores a 100 km.

No caso das linhas medias, podem ser aplicados dois conjuntos distintos de constantes generalizadas, uma para o circuito T nominal,

$$A = 1 + \frac{Z*Y}{2} \quad (10)$$

$$B = Z * \left(1 + \frac{Z*Y}{4}\right) \quad (11)$$

$$C = Y \quad (12)$$

$$D = 1 + \frac{Z*Y}{4} \quad (13)$$

Que leva à equação matricial correspondente,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z*Y}{2} & Z * \left(1 + \frac{Z*Y}{4}\right) \\ Y & 1 + \frac{Z*Y}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

E outra para o Circuito Pi nominal,

$$A = 1 + \frac{Z*Y}{2} \quad (15)$$

$$B = Z \quad (16)$$

$$C = Y * \left(1 + \frac{Z*Y}{4}\right) \quad (17)$$

$$D = 1 + \frac{Z*Y}{2} \quad (18)$$

Que leva a equação matricial correspondente,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z*Y}{2} & Z \\ Y * \left(1 + \frac{Z*Y}{4}\right) & 1 + \frac{Z*Y}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

c) Linhas longas – cujas características incluem:

- Quaisquer tipos de linhas em que os processos de cálculo de linhas curtas e médias são insuficientemente precisos para os fins desejados

No caso das linhas longas, as constantes generalizadas ficam definidas como

$$A = \cosh(\gamma * l) \quad (20)$$

$$B = Z_c * \sinh(\gamma * l) \quad (21)$$

$$C = \frac{\sinh(\gamma * l)}{Z_c} \quad (22)$$

$$D = \cosh \gamma l \quad (23)$$

Que levam a uma equação matricial correspondente

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma * l) & Z_c * \sinh(\gamma * l) \\ \frac{\sinh(\gamma * l)}{Z_c} & \frac{\sinh(\gamma * l)}{Z_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Sendo,

$$\gamma * l = \sqrt{Y * Z} \quad (25)$$

Onde, l = Comprimento da linha (km) e γ = Constante de atenuação

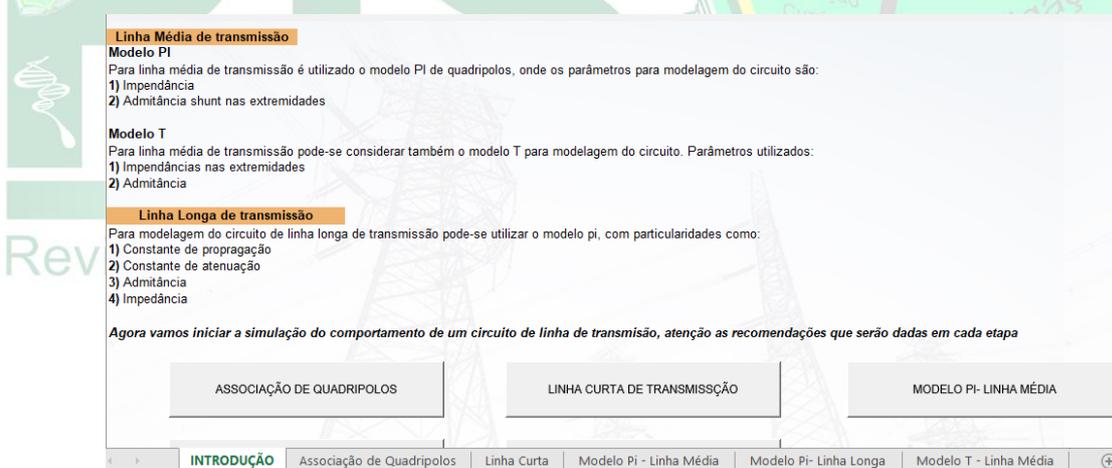
A partir dos conjuntos de parâmetros apresentados para os casos de linhas curtas, médias e longas, é possível utilizar a teoria de quadripolos na modelagem e representação de linhas de transmissão. Conforme FUCHS (1977), o método de cálculo utilizando quadripolos não possui a precisão dos modelos matemáticos completos, mas são compatíveis com um grau de precisão suficiente para os cálculos na maior parte das vezes.

DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA

O desenvolvimento foi realizado em uma pasta de trabalho única, como ilustra a Figura 2, distribuindo os cálculos em diferentes planilhas, de modo que os usuários podem ter a

disposição toda a informação necessária sem a necessidade de abrir pastas de trabalho diferentes.

As diferentes planilhas foram definidas respeitando-se a modelagem matemática e os cálculos necessários para cada modelo de linha e respectivo conjunto de constantes generalizadas. Esta modelagem, composta pelo conjunto de equações e constantes generalizadas, foi compilada com base em FUCHS (1977) e MOURA (2019). Considerando a natureza didática da ferramenta, os autores incluíram primeiramente uma planilha de “introdução”, ilustrada na Figura 3, onde são apresentados os principais aspectos teóricos do uso de quadripolos na modelagem de linhas de transmissão, e ainda uma planilha chamada “associação de quadripolos”, onde a teoria básica sobre a associação de quadripolos é trazida do livro de circuitos elétricos (DORF, RICHARD C.; SVOBODA, JAMES A, 2012), permitindo inclusive entrar com valores de parâmetros de quadripolos e calcular o resultado de sua associação. O conteúdo nesta planilha é resumido, e a recomendação é de que seja empregado como material introdutório, não devendo ser empregado em substituição aos livros texto.



Fonte:

Elaborado pelos autores.

Figura 2 – Inauguração das planilhas na pasta de trabalho única.

Considerando-se os diferentes modelos disponíveis para cálculo, foram desenvolvidas uma planilha para linha curta, outra para modelo pi de linha média, uma para o modelo T de linha média e outra para linha longa. A Figura 4 apresenta a planilha de linha curta, para ilustração. As demais seguem o mesmo formato.

Todas as planilhas adotam como padrão a cor laranja para entrada de dados, detalhamento das constantes de transmissão e indicação dos resultados. Esta organização visa facilitar o uso da ferramenta.

ESTUDO SOBRE MODELOS

Trabalho referente ao Projeto de Iniciação Científica na Universidade Veiga de Almeida

Curso: Engenharia Elétrica

Palavra Chave: Transmissão de Energia Elétrica e Quadripolos

Professor orientador: Edisio

Criadores: Mariana Ferreira Gomes, Paulo Felipe Goes Faria, Wesley Lucas da Silva Oliveira e Luiz Fernando Pereira Marques Ramo

- Leia atentamente a explicação sobre os quadripolos aplicados nas linhas de transmissão
- Atenção para as instruções que serão dadas durante as etapas da planilha

Você deve está se perguntando, o que são modelos de quadripolos aplicados em linha de transmissão e disposto em uma planilha de excel ?



Para iniciarmos, você sabe o que Linha de transmissão ?

PROJETOS MECÂNICOS E ELÉTRICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE E

Transmissão de Energia Elétrica é o processo de transportar energia entre dois pontos, a usina geradora e o consumidor. Essa transmissões são realizadas atrav em um projeto de linha de transmissão existem tipos de cabos distintos para o projeto, na qual sua diferença são as ligas e suas anti-ligas (por exemplo, um cat composição de no mínimo 99%, as ligas são compostas pela 1350, 6201, 1120 essas três ligas são as mais utilizados nas linhas de transmissão atualmente, exp em um projeto de linha de transmissão cada uma das ligas tem sua melhor performance, na qual suas variáveis mais relevantes para o projeto é sua resistividade estiver instalada, acrescentando que alguns projetos que se utilizam fios de aço, estes fios de aço são para aumentar sua resistência mecânica, pois os cabos de lin atenção a carga de ruptura. em um projeto por norma a carga no cabo calculado não deve ser superior a 20% de sua carga de ruptura.

ambas normas sua resistividade representa 61,5%IACS (IACS é uma porcentagem comparativa muito utilizada nos cálculos de linha de transmissão que demons embora sua carga de ruptura seja inferior as outras ligas, então por isso que se utiliza uma alma de aço em alguns projetos, mas usando uma alma de aço perde- era a mais utilizada nas LTs.

A liga 6201, que esta especificada pela norma ABNT NBR 10298, na qual não se preve fios de aço nestes projeto, embora possa ser usado, o maior diferença na suas anti-ligas, esse cabo pode -ser chamado também de cabo de aluminio-magnésio, pois apresenta uma concentração alta de magnésio em sua composição c resistividade elétrica de 52,5% IACS, fazendo com que em alguns casos precisa-se utilizar seção maiores para suportar a corrente, na qual a liga 1350 precisaria carga de ruptura alta e como consequência precisa-se de menos torres , ou seja, o vão entre uma torre e outra podendo ser maior.

por fim a liga 1120, que esta especificada pela norma ABNT NBT 16686, na qual é a mais nova entre as ligas e esta sendo a mais requisitadas pelos projetistas, | de ruptura acima da liga 1350, entretanto a baixo da liga 6201..

Existem outros tipos de cabos de linha de transmissão, entretanto suas condições são bem especificas, como por exemplo os cabos areo-z , termoressistentes, Um fator importante é a temperatura média anual e a velocidade do vento média anual, pois a temperatura e o vento influenciam no comprimento do cabo de uma

Como por exemplo uma das condições mais critica de uma torre para outra é a temperatura mais baixa, e ventos laminantes., neste caso conforme na figura ao l influenciara na vibração dos fios, na qual se houve algum erro de cálculo durante o projetos os fios podem quebrar, por isso as normas de cabos de aluminio exige

Linhas curtas de transmissão: de 0 a 80km
Linha média de transmissão: de 80km a 240km
Linha longa de transmissão: Acima de 240km

INTRODUÇÃO

Associação de Quadripolos

Linha Curta

Modelo Pi - Linha Média

Modelo Pi- Linha Longa

Modelo T - Linha

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Layout da planilha “INTRODUÇÃO”.

Os cálculos aqui apresentados se referem a representação do circuito demonstrando os dados de saída no emissor e receptor através dos dados de entrada inseridos.

- Linha curta até 80km

➔ Atenção: Preencha os campos em laranja

Dados de Entrada		Unidades
R	0,219	Ω/km
L	0,001233	H/km
f	60	Hz
d	40	km
ω	376,9911184	rad/s
$j\omega l$	0,464830049025146j	Ω
Z	8,76+18,5932019610058j	Ω
Fator de potência indutivo	0,8	-
Fator de potência capacitivo	0,8-0,6j	-
Tensão de Linha V2	69000	V
Potência da carga	5200000	VA

• Observe abaixo a definição das constantes para o modelo de linha curta, sabendo que os valores de A, C, D são definidos e apenas B sendo dependente de Z

Definição das constantes de transmissão para circuito de linha curta		
Parâmetros de Transmissão	Valores	Unidades
A	1	p.u
B	8,76+18,5932019610058j	Ω
C	0	S
D	1	p.u

DEFINIÇÃO DAS CONSTANTES DE TRANSMISSÃO

TABELA DE CÁLCULO E ARREDONDAMENTO				
Fórmula	Fórmula Original	Parte Real	Parte Imaginária	Complexo arredondado
POTÊNCIA S2	41600000+31200000j	41600000	31200000	41600000+31200000j
CORRENTE I2	348,083640554903-261,062730416178j	348,084	-261,063	348,084-261,063j
$j\omega l$	0,464830049025146j	0	0,465	0,465j
$j\omega c$	0	0	0	0
IMPEDÂNCIA (Y)	0	0	0	0
ADMITÂNCIA (Z)	8,76+18,5932019610058j	8,76	18,593	8,76+18,593j
ZY	0	0	0	0
ZY/2	0	0	0	0
ZY/4	0	0	0,000	0
TENSÃO EMISSOR	47740,3733364648+4185,07990971374j	47740,373	4185,08	47740,373+4185,08j

INTRODUÇÃO Associação de Quadripolos **Linha Curta** Modelo Pi - Linha Média Modelo Pi- Linha Longa Modelo T - Linha

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 – Layout da planilha “Linha Curta”

VALIDAÇÃO

Para validação dos cálculos realizados pela planilha, optou-se por utilizar exemplos resolvidos apresentados por FUCHS (1977), por tratar-se de uma referência utilizada em cursos de transmissão de energia elétrica.

Desta forma, exercícios resolvidos disponíveis no livro foram solucionados a partir dos cálculos realizados com a ferramenta, para cada uma das planilhas.

Planilha sobre linha curta:

De acordo com o exercício resolvido no exemplo 4.2 do capítulo 4, página 245 (Moura, 2019), são dados:

Uma linha de transmissão trifásica com, 60 Hz, 40 km e 69 kV tem uma resistência por fase de 0,219 ohm/km e uma indutância por fase de 1,233 mH/km. A capacitância é desprezível. A linha está suprindo uma carga trifásica de 52 MVA com $f_p = 0.8$ indutivo em 69 kV.

Use o modelo de linha curta para calcular:

a) A tensão e a potência no início da linha.

A resolução abaixo foi retirada diretamente do livro, enquanto a solução obtida com o uso da planilha está ilustrada nas Figuras 5 e 6.

Solução do livro:

A impedância série por fase é:

$$Z = (R + j\omega * L) * l = (0,219 + j(2\pi * 60) * 1,233 * 10^{-2}) * 40$$

$$Z = 8,76 + j18,5932 \Omega$$

A tensão na barra receptora por fase é dada por:

$$V_{2\phi} = \frac{69}{\sqrt{3}} < 0^\circ = 39,8372 < 0^\circ \text{ kV}$$

A potência complexa trifásica no receptor é calculada como:

$$S_2 = 52 < \arccos(0,8^\circ) = 52 < 36,8699^\circ = 41,6 + j * 31,2 \text{ MVA}$$

A corrente por fase no receptor será:

$$I_2 = \frac{S_2^*}{3 * V_{2\phi}^*} = \frac{52 * 10^3 < -36,8699^\circ}{3 * 39,8372 < 0^\circ} = 435,1042 < -36,8699^\circ \text{ A}$$

A tensão de fase na barra emissora:

$$V_{1\phi} = V_{2\phi} + Z * I_2$$

$$V_{1\phi} = 39,8372 < 0^\circ + (8,76 + j18,5932) * 435,1042 * 10^{-3} < -36,8699^\circ$$

$$V_{1\phi} = 47,7404 + j4,1851 = 47,9235 < 5,0077^\circ \text{ kV}$$

A potência complexa na barra emissora:

$$S_1 = 3 * V_{1\phi} * I_1^*$$

$$S_1 = 3 * 47,9235 < 5,0077^\circ * 10^3 * 435,1042 < 36,8699^\circ$$

$$S_1 = 62,5551 < 41,8776^\circ = 46,5768 + j41,7581 \text{ MVA}$$

Esses cálculos foram realizados também com auxílio da ferramenta, como ilustram as figuras 5 e 6, e uma comparação é sintetizada na tabela 1.

➔ Atenção: Preencha os campos em laranja

Dados de Entrada		Unidades
R	0,219	Ω/km
L	0,001233	H/km
f	60	Hz
d	40	km
ω	376,9911184	rad/s
$j\omega l$	0,464830049025146j	Ω
Z	8,76+18,5932019610058j	Ω
Fator de potência indutivo	0,8	-
Fator de potência indutivo	0,8-0,6j	
Tensão de Linha V2	69000	V
Potência da carga	52000000	VA

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5 – Resultados obtidos na ferramenta

Dados de Saída - RECEPTOR						
	Cartesiano	REAL	IMAGINÁRIO	MÓDULO	FASE °	Unidades
V2 ϕ	39837,16857	39837,16857	0	39837,16857	0	V
I2	348,083640554903-261,062730416178j	348,0836406	-261,0627304	435,1045507	-36,869898	A
S2	41600000+31200000j	41600000	31200000	52000000	36,8698976	VA
Desprezando a condutância e a capacitância, temos: $I1^*$ (complexo conjugado)=I2 para potência complexa.						
Dados de saída - EMISSOR						
	Cartesiano	REAL	IMAGINÁRIO	MÓDULO	FASE °	Unidades
V1 ϕ	47740,3733364648+4185,07990971374j	47740,37334	4185,07991	47923,46127	5,00993125	V
I1	348,083640554903+261,062730416178j	348,0836406	261,0627304	435,1045507	36,8698976	A
S1	46575223,6925014+41759970,1958746j	46575223,69	41759970,2	62555148,25	41,8798289	VA

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6 – Resultados obtidos na ferramenta.

Tabela 1 – Comparação entre os resultados obtidos analiticamente e através da planilha eletrônica para linha curta.

Parâmetro	Cálculo Analítico	Cálculo da Planilha	Figura
Impedância série por fase (Z)	$8,760 + j18,5932 \Omega$	$8,76 + j18,593201 \Omega$	5
Tensão na barra receptora por fase ($V_{2\phi}$)	$39,8372 \angle 0^\circ \text{ kV}$	$39837,16857 \text{ V}$	6
Potência complexa trifásica no receptor (S_2)	$41,6 + j31,2 \text{ MVA}$	$41,6 + j31,2 \text{ MVA}$	6
Corrente no receptor por fase (I_2)	$435,1042 \angle -36,8699^\circ \text{ A}$	$435,10455 \angle -36,86989^\circ \text{ A}$	6
Tensão na barra emissora por fase ($V_{1\phi}$)	$47,9235 \angle 5,0077^\circ \text{ kV}$	$47923,46127 \angle 5,009931^\circ \text{ V}$	6
Potência complexa trifásica no emissor (S_1)	$62,5551 \angle 41,8776^\circ \text{ MVA}$	$62555148,25 \angle 41,8798289^\circ \text{ VA}$	6

Fonte: Elaboração própria.

Planilha sobre linhas médias (modelo T nominal):

De acordo com o exercício resolvido (adaptado) nº1 do capítulo 4.6, página 153 (FUCHS, 1977), são dados:

$$r = 0,107 \Omega/\text{km}$$

$$L = 1,355 \text{ mH}/\text{km}$$

$$C = 0,00845 \text{ mF}/\text{km}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$d = 100 \text{ km}$$

A solução desenvolvida pelo livro é:

Impedância total:

$$Z = 10,7 + j51,08 \Omega$$

Admitância total:

$$Y = j0,3186 * 10^{-3} S$$

Tensão na barra emissora por fase:

$$V_{1\phi} = 82858,47 + j9749 V$$

Tensão entre fases no barramento emissor:

$$V_{1l} = 144505 V$$

As figuras 7 e 8 ilustram este cálculo realizado com auxílio da planilha, e a comparação entre os dados é sintetizada na tabela 2.

➔ **Atenção: Preencha os campos em laranja**

DADOS DE ENTRADA		Unidades
R	0,107	Ω/ km
L	0,001355	H/km
C	8,45E-09	F/km
f	60	Hz
d	100	km
w	376,9911184	rad/s
jwl	0,5108229654737j	Ω
jwc	3,18557495074005E-06j	Ω
Y	0,000318557495074005j	S
Z	10,7+51,08229654737j	Ω
ZY	-0,0162726484307577+0,00340856519729185j	-
ZY/2	-0,00813632421537885+0,00170428259864593j	-
ZY/4	-0,00406816210768943+0,000852141299322963j	-
Tensão de Linha V2	135000	V
Potência da carga	50000000	VA
Fator de potência indutivo	0,95	n/a
Fator de potência indutivo	0,95-0,312j	n/a

Fonte:

Elaborado pelos autores.

Figura 7 – Resultados obtidos na planilha sobre linhas médias

TABELA DE CÁLCULO E ARRENDONDAMENTO				
Fórmula	Fórmula Original	Parte Real	Parte Imaginária	Complexo arredondado
Potência S2	15833333,33333334+5200000,00000001j	15833333,33	5200000	15833333,333+5200000j
Corrente I2	203,141761381535-66,7160311063567j	203,142	-66,716	203,142-66,716j
jwl	0,5108229654737j	0	0,511	0,511j
jwc	3,18557495074005E-06j	0	0,00000319	0,00000319j
Y	0,000318557495074005j	0	0,00031856	0,00031856j
Z	10,7+51,08229654737j	10,7	51,082	10,7+51,082j
ZY	-0,0162726484307577+0,00340856519729185j	-0,016	0,003	-0,016+0,003j
ZY/2	-0,00813632421537885+0,00170428259864593j	-0,008	0,002	-0,008+0,002j
ZY/4	-0,00406816210768943+0,000852141299322963j	-0,004	0,001	-0,004+0,0009j
Tensão no emissor	82889,7475610654+9795,92184551759j	82889,748	9795,922	82889,748+9795,922j
Corrente no emissor	201,581479219011-41,0989061826707j	201,581	-41,099	201,581-41,099j
Módulo emissor tensão	83466,5826	83466,583	0	83466,583
Módulo emissor corrente	205,7280422	205,728	0	205,728
Fase emissor tensão	6,739961254	6,74	0	6,74
Fase emissor corrente	-11,52371111	-11,524	0	-11,524
Valores de linha tensão	143569,254962581+16967,0346109817j	143569,255	16967,035	143569,255+16967,035j
Valores de linha corrente	201,581-41,099j	201,581	-41,099	201,581-41,099j
Potência S1	17111639,5983517+1432001,54258422j	17111639,6	1432001,543	17111639,598+1432001,543j
Tensão no receptor	77942,286	77942,286	0	77942,286
Módulo receptor tensão	77942,286	77942,286	0	77942,286
Fase receptor tensão	4,784	4,784	0	4,784
Valores de linha tensão	134999,9994	134999,999	0	134999,999
Corrente no receptor	203,141761381535-66,7160311063567j	203,142	-66,716	203,142-66,716j
Módulo receptor corrente	213,8169704	213,817	0	213,817
Fase emissor corrente	-18,18124111	-18,181	0	-18,181
Valores de linha corrente	203,142-66,716j	203,142	-66,716	203,142-66,716j

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8 – Resultados obtidos na planilha sobre linhas médias

Comparando os resultados analíticos e os resultados das planilhas:

Tabela 2 – Comparação entre os resultados obtidos analiticamente e através da planilha eletrônica para linha média.

Parâmetro	Cálculo Analítico	Cálculo da Planilha	Figura
Impedância série por fase (Z)	$10,7 + j51,08 \Omega$	$10,7 + j51,08229654737 \Omega$	7
Admitância por fase (Y)	$j0,3186 * 10^{-3} S$	$j0,000318557495074005 S$	8
Tensão na barra emissora por fase ($V_{1\phi}$)	$82858,47 + j9749 V$	$82889,748+j9795,922 V$	8
Tensão de linha (V_{1l})	144505 V	143569,255 V	8

Fonte: Elaboração própria.

Planilha sobre linha longa:

De acordo com o exercício resolvido exemplo 4.4 do capítulo 4, página 248 (Moura, 2019), “uma linha de transmissão trifásica com 320 km, em 60 Hz, supre uma carga de 621 MVA, $f_p = 0,85$ indutivo em 500 kV.”

As constantes da linha são $R=0,025 \Omega /\text{km}$, $L=0,8541 \text{ mH}/\text{km}$ e $C=13,95 \text{ nF}/\text{km}$.

Calcule:

- As constantes de atenuação e fase;
- As constantes A, B, C e D;
- Tensão, corrente e potência;

Impedância série por fase:

$$Z = 8 + j103,0386 \Omega = 103,3487 \angle 85,5604^\circ \Omega$$

Admitância paralela por fase:

$$Y = 0 + j5,51553 \times 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}} = 0,00165 \angle 90^\circ \text{ S}$$

Impedância característica:

$$Z_c = 250,0832 - j9,6938 \Omega$$

Constantes de propagação e atenuação da fase:

$$\gamma = 0,04998 \times 10^{-3} + j1,2892 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{km}}$$

$$\gamma l = 0,0159 + j0,4125 \text{ p. u.}$$

Tensão e corrente na barra receptora por fase:

$$V_{2\phi} = 288675,1346 \text{ V}$$

$$I_2 = 717,0690 \angle -31,7883^\circ \text{ A}$$

Valores das constantes A, B, C e D:

$$A = 0,9162 + j0,0064$$

$$B = 7,5297 + j100,13$$

$$C = -0,000003892294490 + j0,001603121792343$$

$$D = 0,9162 + j0,0064$$

Logo, a tensão e corrente na barra emissora é:



$$V_1 = 306896,6321 + j60033,3619 = 312713,2030 < 11,0681^\circ V$$

$$I_1 = 559,7258 + j120,5973 = 572,5702 < 12,1589^\circ A$$

A tensão de linha na barra emissora:

$$V_{1l} = 531,561 + j103980,738 kV$$

As figuras 9, 10 e 11 ilustram os resultados obtidos nas planilhas, que são comparados com os cálculos analíticos na tabela 3.

Dados de entrada		Unidades
R	0,025	Ω/km
L	0,0008541	H/km
C	1,395E-08	F/km
f	60	Hz
d	320	km
w	376,99	rad/s
jwL	0,321988114251725j	Ω
jwC	5,25902610210931E-06j	Ω
Y	0,00168288835267498j	S
Z	8+103,036196560552j	Ω
ZY	-0,173398415095683+0,0134631068213998j	-
ZY/2	-0,0866992075478415+0,0067315534106999j	-
ZY/4	-0,0433496037739207+0,00336577670534995j	-
Tensão de Linha V2	500000	V
Potência da carga	621000000	VA
Fator de potência indutivo	0,85	-
Fator de potência indutivo	0,85-0,526j	-
Cálculo da Impedância característica	247,624596620448-9,5986665650266j	Ω
Constante de propagação	0,0000504796380109188+0,00130226421715123j	1/km
Constante de atenuação	0,016153484163494+0,416724549488394j	pu
Constante de atenuação	-0,016153484163494-0,416724549488394j	pu

Parâmetros de Transmissão		Unidades
A	0,914538943702625+0,006538689648551j	p.u
B	7,5435727405724+100,101675704j	Ω
C	-3,71107646936634E-06+0,00163467073840183j	S
D	0,914538943702625+0,006538689648551j	p.u

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9 – Resultados obtidos na ferramenta

		Real	Imaginário	Módulo	Fase °	Unidades
Tensão de fase V2 a	288675,135	288675,135	0	288675,135	0	V
I2	609,508679183488-377,178312059429j	609,509	-377,178	716,774	-31,750	A
S2	175950000+108882000j	175950000	108882000	206914698	31,750	VA
		real	imaginário	módulo	fase°	unidades
Tensão de fase V1a	306358,706799339+60055,1252235815j	306358,707	60055,125	312189,486	11,091	V
I1	558,814380063484+130,92992841926j	558,814	130,930	573,948	13,187	A
S1	163334637,57039-73671191,1233051j	163334637,570	-73671191,123	179180490,656	-24,277	VA

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10 – Resultados obtidos na ferramenta

ARREDONDAMENTO				
Fórmula	Fórmula Original	Parte Real	Parte Imaginária	Complexo arredondado
Potência S2	175950000-108882000j	175950000	-108882000	175950000-108882000j
Corrente I2	609,508679183488+377,178312059429j	609,509	377,178	609,509+377,178j
jwI	0,321988114251725j	0	0,322	0,322j
jwc	0	0	0	0
Y	0,00168288835267498j	0	0,00168289	0,00168289j
Z	8+103,036196560552j	8	103,036	8+103,036j
ZY	-0,173398415095683+0,0134631068213998j	-0,173	0,013	-0,173+0,013j
ZY/2	-0,0866992075478415+0,0067315534106999j	-0,087	0,007	-0,087+0,007j
ZY/4	-0,0433496037739207+0,00336577670534995j	-0,043	0,003	-0,043+0,003j
tensão no emissor	306358,706799339+60055,1252235815j	306358,707	60055,125	306358,707+60055,125j
corrente no emissor	558,814380063484+130,92992841926j	558,814	130,93	558,814+130,93j
Módulo emissor tensão	312189,4864	312189,486	0	312189,486
Módulo emissor corrente	573,9475163	573,948	0	573,948
Fase emissor tensão	11,09098375	11,091	0	11,091
Fase emissor corrente	13,18652554	13,187	0	13,187
Valores de linha tensão	530628,845865107+104018,5277549j	530628,846	104018,528	530628,846+104018,528j
Valores de linha corrente	558,814+130,93j	558,814	130,93	558,814+130,93j
Potência S1	163334637,57039-73671191,1233051j	163334637,6	-73671191,12	163334637,57-73671191,123j
tensão no receptor	288675,135	288675,135	0	288675,135
Módulo receptor tensão	288675,135	288675,135	0	288675,135
Fase receptor tensão	0	0	0	0
Valores de linha tensão	500000,0007	500000,001	0	500000,001
corrente no receptor	609,508679183488-377,178312059429j	609,509	-377,178	609,509-377,178j
Módulo receptor corrente	716,7736496	716,774	0	716,774
Fase emissor corrente	-31,7501622	-31,75	0	-31,75
Valores de linha corrente	609,509-377,178j	609,509	-377,178	609,509-377,178j

Fonte:

Elaborado pelos autores.

Figura 11 – Resultados obtidos na ferramenta

Tabela 3 – Comparação entre os resultados obtidos analiticamente e através da planilha eletrônica para linha longa.

Parâmetro	Cálculo Analítico	Cálculo da Planilha	Figura
Impedância série por fase (Z)	$8 + j103,0386 \Omega$	$8 + j103,036196560552 \Omega$	9
Admitância por fase (Y)	$j0,00165 S$	$j0,00168288835267498 S$	9
Impedância característica (Z_c)	$250,0832 - j9,6938 \Omega$	$247,624596620448 - j9,598665650266 \Omega$	9
Constante de propagação (γ)	$0,04998 \cdot 10^{-3} + j1,2892 \cdot 10^{-3} 1/km$	$0,00005047963 + j0,00130226 1/km$	9
Constante de atenuação da fase (γl)	$0,0159 + j0,4125 pu$	$0,016153484 + j0,416724549488394 pu$	9
Tensão na barra receptora por fase ($V_{2\phi}$)	$288675,1346 V$	$288675,135 V$	10
Corrente no receptor por fase (I_2)	$717,0690 < -31,7883^\circ A$	$716,774 < -31,750^\circ A$	10
Constante A	$0,9162 + j0,0064$	$0,914538943702625 + j0,006538689648551$	9
Constante B	$7,5297 + j100,13$	$7,5435727405724 + j100,101675704$	9
Constante C	$-0,000003892294490 + j0,001603121792343$	$-3,7110764693663 \cdot 10^{-6} + j0,00163467073840183$	9
Constante D	$0,9162 + j0,0064$	$0,914538943702625 + j0,006538689648551$	9
Tensão na barra emissora por fase ($V_{1\phi}$)	$312713,2030 < 11,0681^\circ V$	$312189,486 < 11,091^\circ V$	10
Corrente no emissor por fase (I_1)	$572,5702 < 12,1589^\circ A$	$573,948 < 13,187^\circ A$	10
Tensão de linha (V_{1l})	$531,561 + j103980,738 kV$	$530628,845865107 + j104018,5277549 V$	11

Fonte: Elaboração própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação de um ambiente computacional didático, que pode ser utilizado como uma ferramenta de apoio nos estudos de engenharia de sistemas elétricos de potência, mais especificamente nas questões relacionadas às linhas de transmissão modeladas através de quadripolos, que constitui uma matéria cujo conteúdo possui exigência de conhecimentos matemáticos e circuitos elétricos.

A proposta, ao se partir para o desenvolvimento do ambiente didático, foi buscar a construção de uma ferramenta didática de fácil utilização, amigável e interativa, onde o aluno pudesse efetuar uma análise rápida e precisa de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando todas as opções possíveis dentre a grande variedade de parâmetros, optar por condições diferenciadas e realizar projetos para situações diversas fortalecendo seu aprendizado. Com base na revisão da literatura inicial, os autores entendem que o uso de objetos de aprendizagem deste tipo é uma tendência em diversas áreas do conhecimento, sendo uma solução adequada para o perfil atual dos estudantes.

A validação, realizada a partir de exemplos resolvidos de literatura tradicionalmente empregada em cursos de transmissão de energia, permitiu demonstrar o correto funcionamento da pasta de trabalho. Na avaliação dos autores, as diferenças numéricas ocorridas nos exemplos são provenientes de arredondamentos que são comumente feitos quando são realizados cálculos analíticos. A sequência usada na validação também pode ser empregada como uma possível sequência didática a ser empregada para o uso da ferramenta.

A proposta futura é de que o ambiente seja utilizado em um curso de linhas de transmissão e circuitos polifásicos, inclusive verificando através de entrevistas ou testes se o uso do material permitiria ao aluno melhorar sua compreensão do tema, que se constitui um tópico básico para uma adequada formação na área de sistemas elétricos de potência.

REFERÊNCIAS

- BARZAN, A. **Ferramentas Computacionais: Uma Abordagem para o Desenvolvimento de Estratégias de Apoio ao Ensino de Engenharia**. 2019. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, 2019.
- BEZERRA, P. H. A.; GOUVEIA, B. G. **Utilização do software excel e de outras ferramentas computacionais no ensino de resistência dos materiais**. XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Pirenópolis, 2013.
- BICHON, D. **Otimização do Tempo de Estudo e Redução de Estresse do Discente de Engenharia por Intermédio de Incentivo ao Uso e Aprendizado de Tecnologia**. 2019. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2019.
- MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Resolução nº 2**, de 24 de abril de 2019. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=112681-rces002-19&category_slug=abril-2019-pdf&Itemid=30192>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- DORF, R. C.; SVOBODA, J. A., **Introdução aos circuitos elétricos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- FRANCA, A. A.; GOMES, F. J. **Linhas de transmissão: cálculo, projeto e análise sem complicações**. Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia (COBENGE), São Paulo, 2008.
- FERREIRA, M. C.; VIEIRA, F. T. **Diagnóstico do uso de softwares computacionais no ensino de Engenharia Química**. V Semana de Engenharia Química UFES, Alegre, 2016.
- FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro, livros técnicos e científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1977.
- GONÇALVES, T. S.; ORO, C. E. D.; DALLAGO, R. M.; VENQUIARUTO, L. D. **Planilha de ensino-aprendizagem para a determinação do fluxo de calor em um telhado com a inclusão dos efeitos da radiação na superfície externa através do método numérico da bisseção**. Revista Insignare Scientia (RIS), Chapecó, v. 4, n. 6, p. 248-264, 2021.
- LUCCA, A.; SANTOS, A.; STRACKE, M.; FRANZIN, R. **Construção de um objeto de aprendizagem a partir da teoria da aprendizagem significativa moderna, usando linguagem de modelagem unificada**. Revista Insignare Scientia - RIS, Chapecó, v. 4, n. 5, p. 140-159, 20 ago. 2021.
- MORAIS, C. G. B.; ARAÚJO, P. H. **Utilização de planilhas eletrônicas no ensino de resistência dos materiais**. Nuevas Ideas en Informática Educativa (TISE), Porto Alegre, 2013.

MOURA, A. P.; MOURA, A. A. F.; ROCHA, E. P. **Transmissão de energia elétrica em corrente alternada**. 1. ed. Fortaleza: Edições UFC, 2019.

NEGREDO, A.; ULHOA, K. B.; MEDEIROS, G. C. **Utilização de Planilhas Excel na Engenharia Civil**. XIX Encontro Nacional de Grupos PET (ENAPET), Santa Maria, 2014.

NOGUEIRA, L. G. O.; BEZERRA, E. M. F. **Ferramenta em ambiente excel para análise estrutural de treliças espaciais pelo método dos elementos finitos**. Iberian Latin-American Congress on computational methods in engineering, Florianopolis, 2017.

PERISSÉ, J. C.; VALDMAN, A. **Aplicativo para ensino de engenharia química básica**. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQIC), Campinas, 2015.

REHFELDT, M. J. H.; HAUSCHILD, C. A.; QUARTIERI, M. T.; GIONGO, I. M. **O uso de softwares, tabelas e planilhas nas práticas laborais de engenheiros**. Revista Dynamis, [S.l.], v. 21, n. 1, p. 31-43, nov. 2015. ISSN 1982-4866. Disponível em: <<https://proxy.furb.br/ojs/index.php/dynamis/article/view/4511>>. Acesso em: 14 dez. 2022.

OLIVEIRA, C. J.; STEFFEN, L. O.; VOGEL, G. M.; NUNES, R. B.; SANTOS, G. M. **Aplicação do software Excel como ferramenta de ensino para resolução de treliças planas utilizando elementos finitos de barras**. Revista Tecnologia, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 1-13, 2019.

RAMIRO, F.S.; DA COSTA, L.A.; BERNARDES, J.A. **Softwares educacionais – seu uso e importância no ensino-aprendizagem dos alunos de engenharia civil**. Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia (COBENGE), Juiz de Fora, 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, **Evolução da capacidade instalada no SIN**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

VELASCO, D. C. R.; ALMEIDA, S. S.; ALMEIDA, T. M.; MACHADO, C. B. H. **Avaliação da utilização de planilhas eletrônicas como ferramenta de apoio ao ensino de engenharia**. Revista RENOTE – Novas Tecnologias na Educação, v. 19, n. 2, p. 486-495, 2021.

VIANA, M. M.; FARIAS, A. T. A.; SOUZA, F. A. A. MODULA – **Uma abordagem estruturada para a resolução de problemas, aplicada ao ensino de Matemática na Engenharia**. Revista Tecnologia, Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 1-10, 2017.

ZAMBONI, L.C.; CYMROT, R.; PAMBOUKIAN, S. V. D.; HU, O. R. T.; BARROS, E. A. R. **Planilhas excel e uso da linguagem vba em aplicações para as engenharias**. Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia (COBENGE), Blumenau, 2011.