

Análise de sensibilidade da precisão de modelos de linhas de transmissão com compensação série

Rayane Gomes de Lima ^[1] e Melinda Cesianara Silva da Cruz ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; rayane.lima@alunos.ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; melinda@ufersa.edu.br

Resumo: Um sistema de transmissão é responsável pelo transporte de energia elétrica entre a estação de geração até os centros consumidores, fornecendo-lhes, no instante desejado, a energia elétrica na quantidade demandada com a qualidade adequada. Quando um sistema de transmissão dispõe de excesso de reativos, pode ocorrer a necessidade de geração de reativo para o sistema alimentado, e eventualmente para a linha, bem como a absorção do excesso de energia reativa da linha. Nestes casos, é necessário que haja a compensação de energia reativa junto aos terminais das linhas. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de uma linha de transmissão de 500 kV considerando diversas configurações de compensação série e diferentes modelos de linhas a parâmetros concentrados. Foi adotada uma metodologia de natureza exploratória, obtendo dados gráficos e quantitativos sobre a influência das diferentes modelagens de linhas de transmissão a parâmetros concentrados de forma a verificar se a escolha do modelo representativo da linha pode influenciar de forma significativa na determinação dos seguintes dados de operação: regulação de tensão, perdas globais e potência máxima do sistema. Para a simulação do sistema de transmissão e para a obtenção dos dados foi utilizado o software *Matlab*.

Palavras-chave: linhas de transmissão; excesso de potência reativa; compensação série.

Abstract: A transmission system is responsible for transporting electrical energy between the generating station and the consumer centers, supplying them, at the desired time, with electrical energy in the quantity demanded and of the appropriate quality. When a transmission system has excess reactive power, there may be a need to generate reactive power for the system being fed, and possibly for the line, as well as absorbing excess reactive power from the line. In these cases, reactive power compensation is required at the line terminals. The aim of this work is to evaluate the performance of a 500 kV transmission line considering various series compensation configurations and different line models with concentrated parameters. An exploratory methodology was adopted, obtaining graphical and quantitative data on the influence of different models of transmission lines with concentrated parameters in order to verify whether the choice of the representative model of the line can significantly influence the determination of the following operating data: voltage regulation, global losses and maximum system power. Matlab software was used to simulate the transmission system and obtain the data.

Key-words: transmission lines; excess reactive power; series compensation.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com [1], existem restrições de ordem técnica, econômica e ambiental que tornam praticamente impossível, ao menos nos dias de hoje, gerar nos próprios locais de uso toda a energia elétrica necessária para alimentar os grandes centros consumidores. Além disso, dificilmente se encontram nos locais ou nas proximidades dos locais de consumo os recursos energéticos utilizados pelas centrais de geração de energia. Dessa forma, diante dos problemas citados, há a necessidade de se transferir a energia do local onde ela se encontra disponível para o local onde será consumida. Ao conjunto das instalações e equipamentos destinados à geração e transmissão de energia dá-se o nome de sistema elétrico de potência (SEP).

O SEP conta com três blocos básicos: sistema de geração, sistema de transmissão e sistema de distribuição. O sistema de geração engloba as fontes de transformação de alguma espécie de energia em energia elétrica, já o de transmissão é responsável pelo transporte da energia dos pontos de produção até os pontos de suprimento dos grandes centros de consumo, os quais estão localizados no sistema de distribuição.

As linhas de transmissão (LTs) fazem parte do sistema de transmissão, e, segundo [2], além da importância de transportar a energia entre os centros de produção até os centros de consumo, ajudam a dar uma maior confiabilidade ao sistema, visto que na ocorrência de contingências em algum ponto do sistema é possível redirecionar o fluxo de potência por caminhos alternativos, diminuindo o impacto e a extensão das falhas.

A depender da condição de operação, o sistema de transmissão pode apresentar excesso de reativos de natureza indutiva ou capacitiva [3]. Nesses casos, é necessário que haja a compensação de energia reativa junto aos terminais das linhas, que pode ser feita via associação de bancos de capacitores em série ou de bancos reatores em derivação [4]. Os reatores em derivação são utilizados quando o excesso de potência reativa no sistema é de natureza capacitiva, e os capacitores série quando esse excesso é de natureza indutiva.

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de uma LT de 500 kV compensada de forma série, utilizando diferentes modelos representativos a parâmetros concentrados da LT e diferentes configurações de banco de capacitores, para diversos graus de compensação. Dessa forma, será possível obter a sensibilidade de cada modelagem da linha compensada na determinação dos seguintes dados de operação: regulação de tensão, perdas globais e potência máxima do sistema.

1.1. Modelos de Linha de Transmissão

De acordo com [3], as LTs normalmente fazem parte de sistemas elétricos complexos e, como tal, devem ser representadas através de seus circuitos equivalentes ou modelos matemáticos, que serão compatíveis com o grau de precisão almejado. Este tópico irá abordar como as linhas de transmissão podem ser representadas através de circuitos elétricos equivalentes e os seus respectivos modelos matemáticos.

Normalmente, os modelos mais indicados para representar as LTs dependem de sua extensão. As linhas que possuem comprimento de até 80 km são chamadas de linhas curtas, as com extensão entre 80 km e 240 km são consideradas médias e geralmente são representadas pelo modelo π , enquanto as linhas que são maiores que 240 km são denominadas longas e representadas por modelos a parâmetros distribuídos [5].

As LTs podem ser representadas convenientemente por quadripolos, pois, tornam o modelo matemático bastante flexível. As características das linhas são definidas pelas constantes A, B, C e D, que recebem o nome de constantes generalizadas das linhas de transmissão. O quadripolo típico de uma LT é representado conforme a Equação (1).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A partir do subtópico 1.1.1, todo o equacionamento presente neste trabalho foi baseado em [3].

1.1.1. Modelo π (Pi)

No modelo Pi, Figura 1, a resistência e indutância séries da linha de transmissão estão concentradas na impedância total longitudinal da linha, ou seja, em Z_t . Já a capacitância *shunt* está concentrada em dois pontos da linha, e, ao serem somadas, resultam na admitância total transversal da linha, Y_t .

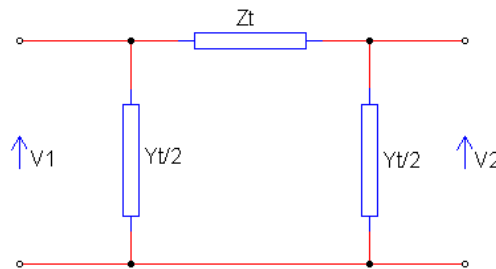


FIGURA 1. Representação do modelo Pi (autoria própria).

A partir da análise do circuito da Figura 1, obtém-se o quadripolo representativo do modelo Pi, conforme a Equação (2).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_t Y_t}{2} & Z_t \\ Y_t \left(1 + \frac{Z_t Y_t}{4} \right) & 1 + \frac{Z_t Y_t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Quando se analisa o modelo Pi a parâmetros distribuídos, a Equação 2 se torna:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + jx}{g + jb}} \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{(r + jx)(g + jb)} \quad (5)$$

Nas expressões (3) a (5), r , x , g e b representam, respectivamente, a resistência, reatância indutiva, condutância e susceptância shunt da linha de transmissão, por unidade de comprimento. Z_c , γ e l são a impedância característica, a constante de propagação e o comprimento da LT, respectivamente.

1.1.2. Modelo T (Tee)

O modelo T pode ser representado pela Figura 2, e, geralmente é utilizado para representação de transformadores. Neste trabalho, o modelo T será utilizado para representar o circuito elétrico a parâmetros concentrados de uma linha de transmissão.

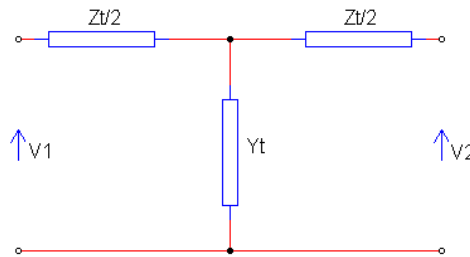


FIGURA 2. Representação do modelo T (autoria própria).

A partir da análise do circuito da Figura 2, obtém-se o quadripolo representativo do modelo T, conforme a Equação (6).

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{Z_t Y_t}{2}\right) & Z_t \left(1 + \frac{Z_t Y_t}{4}\right) \\ Y_t & \left(1 + \frac{Z_t Y_t}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.1.3. Modelo γ (Gama) ou L

Assim como o modelo T, o modelo L, ilustrado na Figura 3, também é usado tipicamente para representar transformadores, no entanto, pelo L contribuir para uma maior precisão do transformador, é mais comumente utilizado. Neste trabalho, o modelo L também será utilizado para representar o circuito elétrico a parâmetros concentrados de uma linha de transmissão.

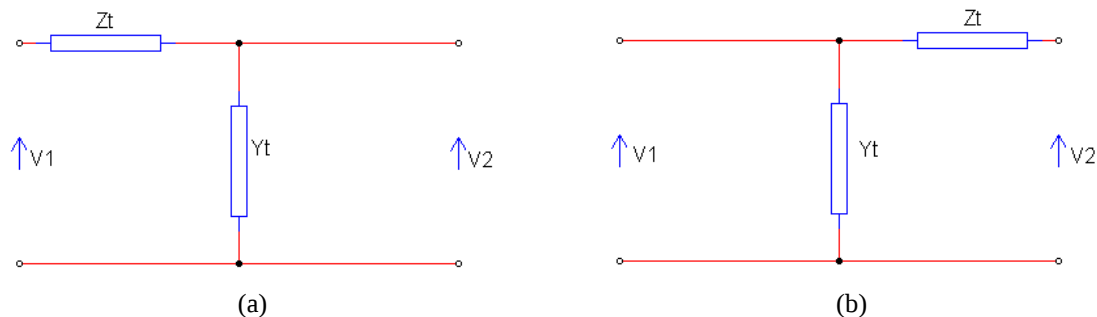


FIGURA 3. (a) Representação 1 do modelo L - L1; (b) Representação 2 do modelo L - L2 (autoria própria).

Analisando os circuitos da Figura 3, obtém-se o seguinte quadripolo equivalente para o modelo L1:

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & Z_t \\ Y_t & 1 + Z_t Y_t \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para o modelo L2, tem-se o quadripolo definido pela expressão (8).

$$[b] = \begin{bmatrix} 1 + Z_t Y_t & Z_t \\ Y_t & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.2. Linhas de Transmissão Compensadas

Segundo [3], ao analisar a operação das LTs, observa-se que dependendo do valor de potência ativa a ser entregue no receptor, a linha pode ou não dispor de reativos suficientes para não só atender à demanda desse tipo de energia pelo sistema alimentado, como também para consumo próprio, necessário para manter o valor de tensão desejada no receptor. Poderá, outrossim, dispor do excesso de reativo, obrigando a linha a manter altas tensões junto ao receptor.

Existem meios de neutralizar o efeito do excesso de reatância capacitiva, ou o excesso de reatância indutiva, ou mesmo ambos. O mais comum e conveniente de utilizar é a chamada compensação de linhas, a mesma é realizada com o emprego de condensadores síncronos, ou reatores indutivos e bancos de capacitores.

O assunto compensação de linhas de transmissão é abordado em [6] como a relação da propriedade natural das linhas de transmissão, que demandam energia reativa em maior ou menor quantidade, para realizarem o transporte da potência ativa. Quando se trata da condição ideal de transporte de energia através de uma LT, tem-se que ela se relaciona com a capacidade de transportar uma potência ativa de valor correspondente à sua Potência Natural (P_0).

Para satisfazer as necessidades de energia reativa das linhas são utilizados dois tipos de compensação: compensação em derivação e compensação série, que serão abordadas a seguir.

1.2.1. Compensação em Derivação

A compensação em derivação visa neutralizar o efeito das reatâncias em derivação das linhas de transmissão através de elementos que absorvam energia reativa de sinal oposto. Neste tipo de compensação são empregados reatores indutivos para compensar as reatâncias capacitivas naturais das linhas [3]. Desse modo, procura-se, principalmente, a neutralização do Efeito Ferranti, ligando-se os reatores indutivos a ambas as extremidades das linhas. Na Figura 4, representa-se uma linha de transmissão com compensação em derivação.

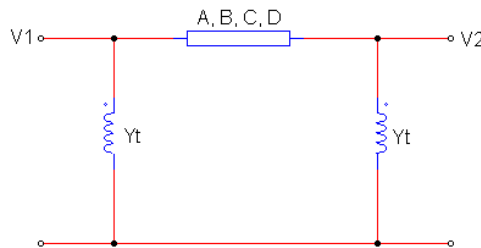


FIGURA 4. Representação de LT com compensação em derivação (autoria própria).

Para compensação total da LT utilizando os reatores em derivação, é necessário que a constante generalizada A do quadripolo equivalente seja igual a 1. Desse modo, analisando o circuito da Figura 4, obtém-se o quadripolo equivalente da linha compensada, conforme a expressão (9).

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 + \dot{B}_1 \dot{Y} & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 + \dot{A}_1 \dot{Y} + \dot{D}_1 \dot{Y} + \dot{B}_1 \dot{Y} \dot{Y} & \dot{D}_1 + \dot{B}_1 \dot{Y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Uma vez que $\dot{A}_1 + \dot{B}_1 \dot{Y}$ deve ser igual a 1 para compensação total, então:

$$\dot{Y} = \frac{1 - \dot{A}_1}{\dot{B}_1} \text{ [Siemens/fase]} \quad (10)$$

E para uma compensação parcial:

$$\dot{Y} = \frac{k - \dot{A}_1}{\dot{B}_1} \text{ [Siemens/fase]} \quad (11)$$

Onde $k = |\dot{V}_1|/|\dot{V}_2|$.

Assumindo que o elemento compensador é ideal, apenas a componente imaginária de $\dot{Y}$ será necessária para dimensionamento do banco de reatores. Portanto, da análise da expressão (11):

$$y' - jy'' = \frac{k - a'}{|B|} e^{-j\beta_B} + j \frac{a''}{|B|} e^{-j\beta_B} \quad (12)$$

$$y'' = \frac{k - a'}{|B|} \sin\beta_B - \frac{a''}{|B|} \cos\beta_B \text{ [Siemens/fase]} \quad (13)$$

Desse modo, a potência reativa trifásica do banco de reatores em derivação a serem instalados em cada extremidade da linha é dada conforme (14).

$$Q_C = U_{\Delta}^2 \cdot y'' [\text{MVar}] \quad (14)$$

Onde $U_{\Delta}^2 [kV]$ é a tensão nominal entre fases do sistema onde o banco será instalado.

Segundo [3], o emprego dos reatores em derivação não elimina a elevação das tensões no meio da linha, apenas nas extremidades. A conveniência da compensação total e do uso de reatores intermediários estão associados ao isolamento da linha e aos investimentos necessários, que, principalmente neste último caso, são bastante consideráveis.

1.2.2. Compensação Série

Os maiores responsáveis pelas grandes quedas de tensão nas LTs são os parâmetros série de reatância indutiva e resistência. A reatância indutiva é responsável pelo ângulo de potência θ da linha, portanto, pelo seu grau de estabilidade, tanto estática como dinâmica. Para reduzir e mesmo anular os efeitos da indutância da LT, pode-se fazer a compensação da linha de transmissão através de capacitores ligados em série.

O emprego de capacitores estáticos em série com as linhas de transmissão vem crescendo bastante, visto que as suas vantagens são diversas, por exemplo: representam, em geral, a solução mais econômica para melhorar os limites de estabilidade estática e transitória; melhoram a regulação das linhas; ajudam a manter o equilíbrio de energia reativa; melhoram a distribuição de cargas e as perdas globais no sistema e aumentam a capacidade de transporte das linhas [3].

Em [6], mostra-se que a compensação série está intrinsecamente relacionada com a constante generalizada B . Afinal, sua parte real não pode ser compensada. Desse modo, o critério matemático para determinação do compensador série partirá da consideração de se obter uma diminuição da parte imaginária de B . Para se obter uma compensação total, é necessário que a parte imaginária do parâmetro B seja igual a zero.

Este trabalho tem como foco a avaliação do desempenho de uma linha de transmissão de 500 kV com compensação série. Diversos pontos de instalação dos bancos de capacitores foram avaliados, de forma a obter a sensibilidade dos parâmetros de operação em relação ao local de instalação dos bancos. Os locais estudados para instalação dos bancos e seus respectivos equacionamentos matemáticos são detalhados a seguir.

- Caso 1: Capacitores série no Início da Linha

Ao multiplicar o quadripolo representativo do capacitor pelo quadripolo da linha de transmissão, podemos obter a Equação 15, que representa o quadripolo equivalente para o caso 1.

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{cap} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A + CX_{cap} & B + DX_{cap} \\ C & D \end{bmatrix} \quad (15)$$

Para a compensação total, a parte imaginária de B_{eq} na Equação 15 deve ser igual a zero, portanto:

$$\begin{aligned} B_{eq} &= B + DX_{cap} \\ b'_{eq} + jb''_{eq} &= (b' + jb'') + (d' + jd'')(jX_{cap}) \\ b''_{eq} &= b'' + d'X_{cap} = 0 \end{aligned}$$

Logo,

$$X_{cap} = \frac{-b''}{d'} \quad (16)$$

A Figura 5 ilustra o arranjo do quadripolo equivalente e o posicionamento do capacitor série no início da linha, junto ao transmissor.

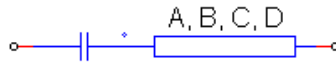


FIGURA 5. Posicionamento do capacitor série no início da linha (autoria própria).

▪ Caso 2: Capacitores série no Meio da Linha

O quadripolo equivalente para o caso 2 é representado pela Equação 17 [3].

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{50} & B_{50} \\ C_{50} & D_{50} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & X_{cap} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{50} & B_{50} \\ C_{50} & D_{50} \end{bmatrix}$$

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A_{50}^2 + A_{50}C_{50}X_{cap} + B_{50}C_{50} & A_{50}^2X_{cap} + 2A_{50}B_{50} \\ C_{50}^2X_{cap} + 2A_{50}C_{50} & A_{50}^2 + A_{50}C_{50}X_{cap} + B_{50}C_{50} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Onde:

$$X_{cap} = \frac{-2(a'_{50}b''_{50} + a''_{50}b'_{50})}{(a'_{50})^2 + a''_{50}{}^2} \quad (18)$$

A Figura 6 ilustra o arranjo do quadripolo equivalente e o posicionamento do capacitor série no meio da linha.

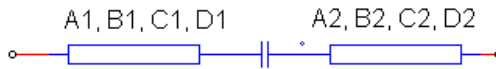


FIGURA 6. Posicionamento do capacitor série no meio da linha (autoria própria).

▪ Caso 3: Capacitores série nas Extremidades da Linha

O quadripolo equivalente para o caso 3 é representado pela Equação 19[3].

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{cap} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & X_{cap} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A + CX_{cap} & CX_{cap}^2 + 2AX_{cap} + B \\ C & A + CX_{cap} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Onde:

$$X_{cap} = \frac{2a' \pm \sqrt{(2a')^2 + 4c''b''}}{2c''} \quad (20)$$

Das duas raízes obtidas pela equação (20), deve-se utilizar a raiz negativa, que está associada a uma reatância de natureza capacitiva. A Figura 7 ilustra o arranjo do quadripolo equivalente e o posicionamento dos capacitores série nas extremidades da linha.

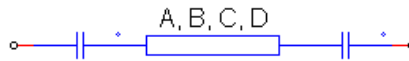


FIGURA 7. Posicionamento do capacitor série nas extremidades da linha (autoria própria).

▪ Caso 4: Capacitores série no Fim da Linha

Ao multiplicar o quadripolo da linha de transmissão pelo quadripolo representativo do capacitor, podemos obter a Equação 21, que representa o quadripolo equivalente para o caso 4.

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & X_{cap} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A & AX_{cap} + B \\ C & CX_{cap} + D \end{bmatrix} \quad (21)$$

Para a compensação total, a parte imaginária de B_{eq} na Equação 21 deve ser igual a zero, portanto:

$$\begin{aligned} B_{eq} &= AX_{cap} + B \\ b'_{eq} + jb''_{eq} &= (a' + ja'')(jX_{cap}) + (b' + jb'') \\ b''_{eq} &= a'X_{cap} + b'' = 0 \end{aligned}$$

Logo,

$$X_{cap} = \frac{-b''}{a'} \quad (22)$$

A Figura 8 ilustra o arranjo do quadripolo equivalente e o posicionamento do capacitor série no fim da linha, junto ao receptor.

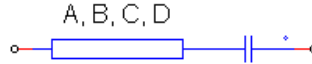


FIGURA 8. Posicionamento do capacitor série no fim da linha (autoria própria).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada no presente trabalho é de natureza exploratória, buscando obter dados quantitativos sobre a influência das diferentes modelagens de linhas de transmissão a parâmetros concentrados no cálculo dos parâmetros de operação de uma linha de transmissão com compensação série. Ou seja, objetiva-se avaliar a sensibilidade da precisão dos modelos concentrados de linhas de transmissão para as diferentes situações de compensação citadas no subtópico 1.2.2.

O sistema de transmissão analisado neste trabalho possui tensão nominal de 500 kV e os dados estabelecidos para análise do sistema simulado são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Parâmetros estabelecidos para o sistema de transmissão analisado (autoria própria).

f	l	r	x	c	$ V_2 $	S_2	FP
60 Hz	300 km	0,0221 Ω /km	0,3212 Ω /km	13,46 nF/km	500 kV	2000MVA	0,92

Após a determinação dos parâmetros que constam na Tabela 1, iniciou-se o estudo considerando que, para todos os locais de instalação, os bancos de capacitores série teriam uma variação do seu grau de compensação de 0% a 70%. Portanto, quatro casos de compensação série foram analisados, sendo eles: caso 1 – compensação série no início da linha; caso 2 – compensação série no meio da linha; caso 3 – compensação série nas extremidades da linha; caso 4 – compensação série no fim da linha.

Os dados de operação utilizados no estudo de sensibilidade proposto foram: regulação de tensão, perdas globais e potência máxima entregue pela LT à barra receptora. Vale salientar que esses dados de operação foram calculados conforme as equações (23) a (25), considerando as variações do modelo da linha e localização do banco de capacitores, com seus respectivos graus de compensação.

$$Regulação = \frac{\frac{|V_t|}{|A_{eq}|} - V_r}{V_r} \quad (23)$$

$$Perdas\ globais = |S_t - S_r| \quad (24)$$

$$P_{m\acute{a}x} = 3 \left(\frac{|\dot{V}_1||\dot{V}_2|}{|B_{eq}|} - \frac{|A_{eq}||\dot{V}_2|^2}{|B_{eq}|} \cos(\theta_{B_{eq}} - \theta_{A_{eq}}) \right) \quad (25)$$

Nas equações (23) e (25), $|A_{eq}|$ e $\theta_{A_{eq}}$ representam, respectivamente, o módulo e o ângulo da constante generalizada A da linha de transmissão compensada, enquanto $|B_{eq}|$ e $\theta_{B_{eq}}$ representam, respectivamente, o módulo e o ângulo da constante generalizada B da linha de transmissão compensada.

Os dados de operação Regulação de Tensão, Perdas Globais e Potência Máxima foram calculados preliminarmente considerando o modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos, de forma a estes serem os valores de referência para comparar os dados de operação obtidos utilizando os diferentes modelos a parâmetros concentrados adotados, que foram: modelo Pi , modelo T , modelo $L1$ e modelo $L2$. Para simular o sistema de transmissão e gerar os resultados obtidos utilizou-se o software *Matlab*.

Uma melhor representação das etapas que compõem o presente trabalho é ilustrada na Figura 9.

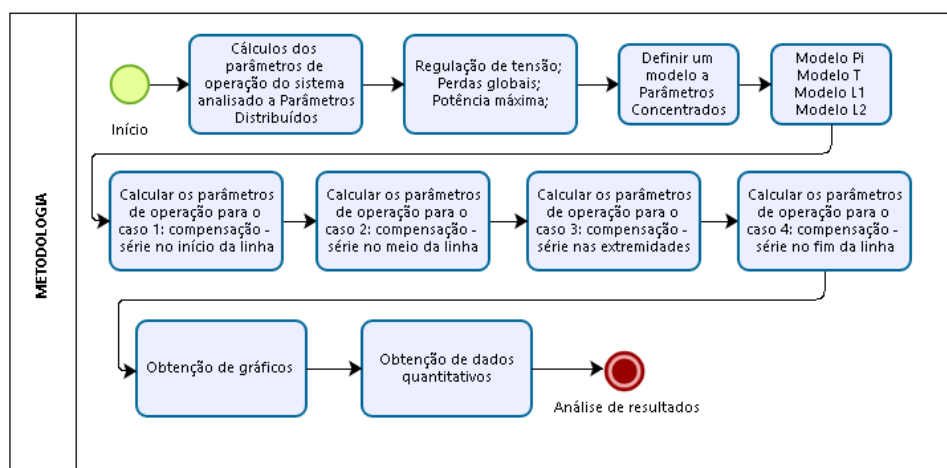


FIGURA 9. Fluxograma da metodologia proposta (autoria própria).

3. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os principais resultados obtidos neste trabalho, que compreendem a precisão na determinação dos dados de operação Regulação de Tensão, Perdas Globais e Potência Máxima utilizando diferentes modelos a parâmetros concentrados de linhas de transmissão compensadas.

Todas as figuras a seguir conterão os valores dos dados de operação, calculados a partir do modelo exato da LT (parâmetros distribuídos) e dos modelos a parâmetros concentrados da LT (Pi, T, L1 e L2). Para cada caso de compensação (início, meio, fim e extremidades da linha), além do modelo da linha, variou-se também o grau de compensação do banco de capacitores série.

Com isso, o propósito do estudo de caso é verificar se a escolha do modelo de linha pode ter ou não um impacto significativo nos dados de operação estabelecidos para a análise.

3.1. Caso 1 – Compensação Série no Início da Linha

Ao analisar o caso 1 para os diferentes modelos de LTs e graus de compensação, obteve-se os dados de operação que constam nas Figuras 10, 11 e 12.

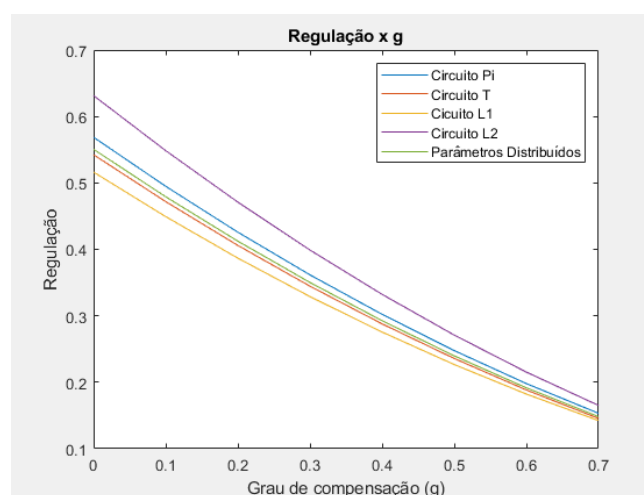


FIGURA 10. Variação da regulação de tensão com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

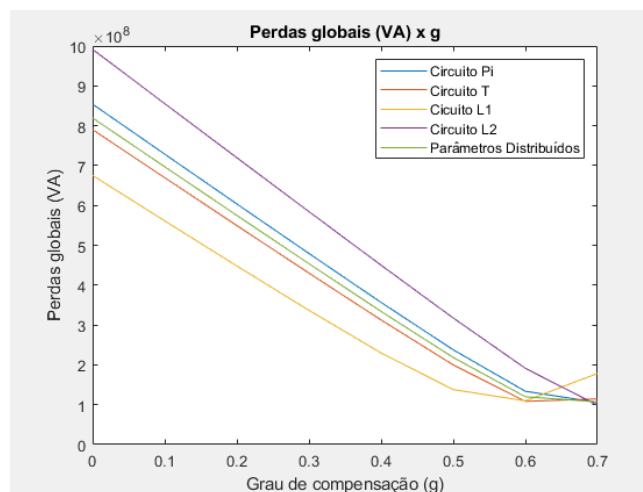


FIGURA 11. Variação das perdas globais com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

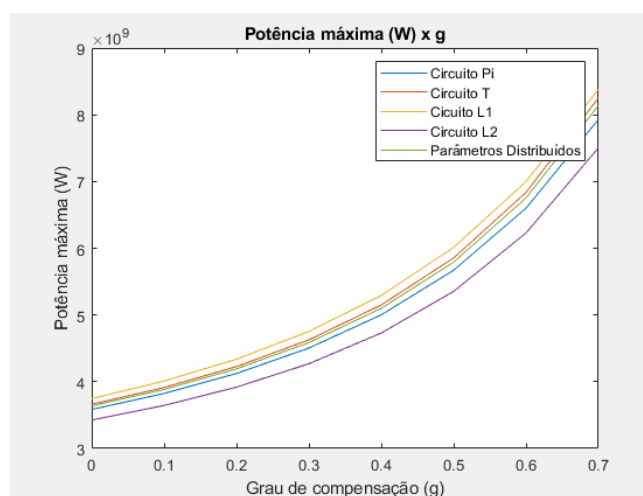


FIGURA 12. Variação da potência máxima com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

Ao obter os resultados presentes nas Figuras 10, 11 e 12, fez-se um levantamento quantitativo através do cálculo do *erro absoluto*, onde efetuou-se a diferença entre os dados de operação obtidos pelo modelo exato da linha de transmissão e os demais modelos, para todos os graus de compensação. Diante disso, foram analisados os casos em que se obteve uma taxa de erro máximo e mínimo para cada modelo, conforme a Tabela 2.

TABELA 2. Erro absoluto entre os parâmetros de operação calculados e exatos – caso 1 (autoria própria).

Modelo	Regulação de Tensão	Perdas Globais do Sistema (VA)	Potência Máxima (W)
Pi	$1,81291 \times 10^{-2}$	$3,46537 \times 10^7$	$2,09620 \times 10^8$
T	$8,1855 \times 10^{-3}$	$2,93052 \times 10^7$	$1,12974 \times 10^8$
L1	$3,43372 \times 10^{-2}$	$1,44232 \times 10^8$	$2,43800 \times 10^8$
L2	$8,08061 \times 10^{-2}$	$1,72054 \times 10^8$	$6,34940 \times 10^8$

3.2. Caso 2 – Compensação Série no Meio da Linha

Ao analisar o caso 2 para os diferentes modelos de LTs e graus de compensação, obteve-se os dados de operação que constam nas Figuras 13, 14 e 15.

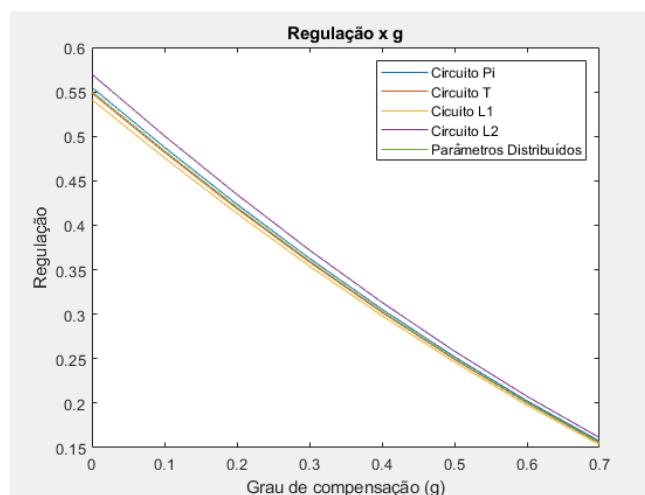


FIGURA 13. Variação da regulação de tensão com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

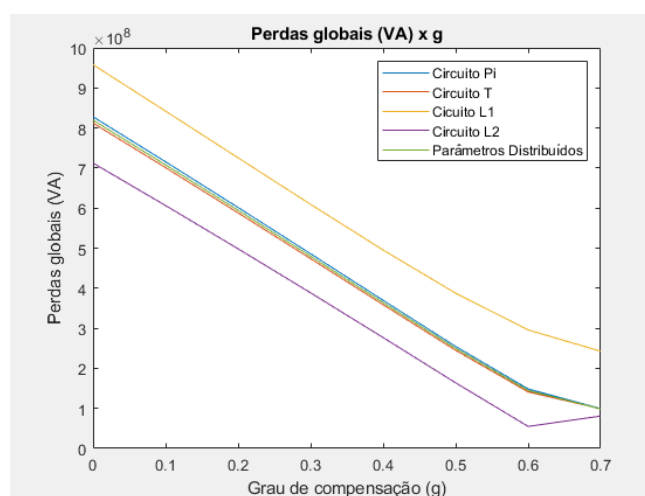


FIGURA 14. Variação das perdas globais com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

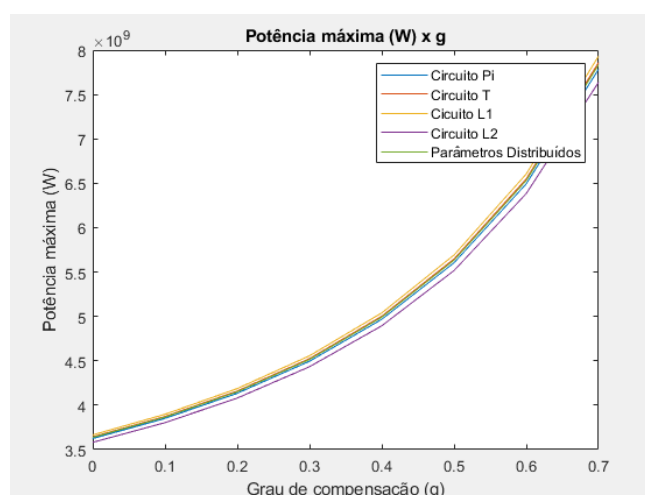


FIGURA 15. Variação da potência máxima com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

Para o caso 2, obteve-se a Tabela 3, que representa os respectivos erros entre os dados de operação calculados e exatos do caso 2.

TABELA 3. Erro absoluto entre os parâmetros de operação calculados e exatos – caso 2 (autoria própria).

Modelo	Regulação de Tensão	Perdas Globais do Sistema (VA)	Potência Máxima (W)
Pi	$4,4191 \times 10^{-3}$	$8,4865 \times 10^6$	$5,0361 \times 10^7$
T	$2,0235 \times 10^{-3}$	$7,2296 \times 10^6$	$2,5212 \times 10^7$
L1	$9,2271 \times 10^{-3}$	$1,38548 \times 10^8$	$9,8191 \times 10^7$
L2	$1,92639 \times 10^{-2}$	$1,071011 \times 10^8$	$1,97012 \times 10^8$

3.3. Caso 3 – Compensação Série nas Extremidades da Linha

Ao analisar o caso 3 para os diferentes modelos de LTs e graus de compensação, obteve-se os dados de operação que constam nas Figuras 16, 17 e 18.

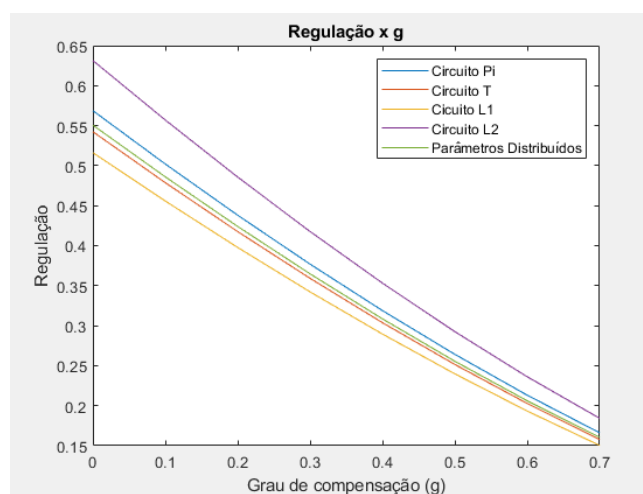


FIGURA 16. Variação da regulação de tensão com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

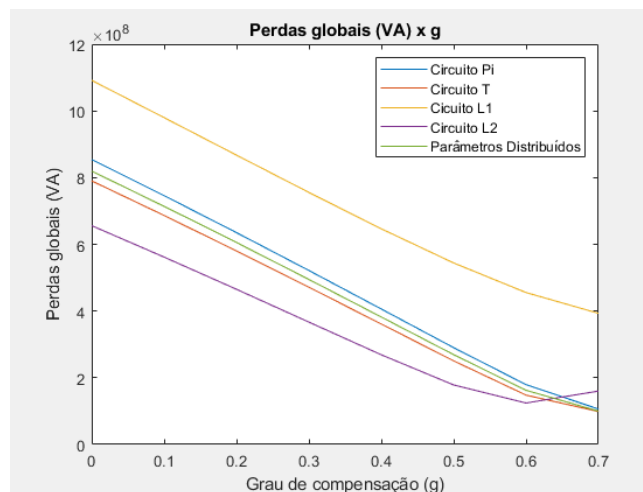


FIGURA 17. Variação das perdas globais com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

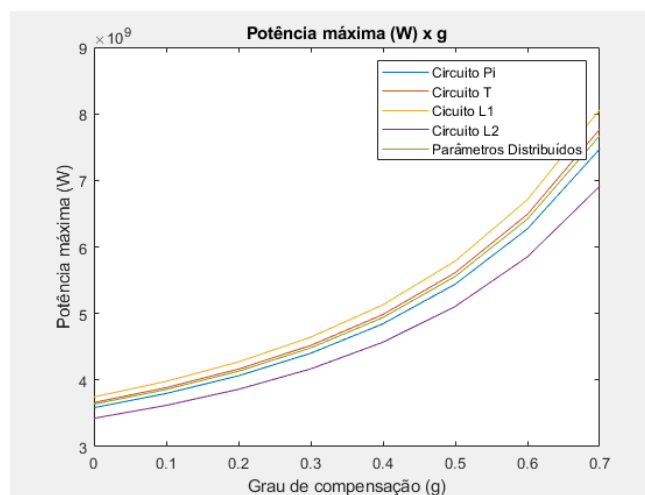


FIGURA 18. Variação da potência máxima com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

Para este caso, obteve-se a Tabela 4, que representa os respectivos erros entre os dados de operação calculados e exatos do caso 3.

TABELA 4. Erro absoluto entre os parâmetros de operação calculados e exatos – caso 3 (autoria própria).

Modelo	Regulação de Tensão	Perdas Globais do Sistema (VA)	Potência Máxima (W)
Pi	$1,81291 \times 10^{-2}$	$3,46537 \times 10^7$	$1,98464 \times 10^8$
T	$8,1855 \times 10^{-3}$	$2,93052 \times 10^7$	$9,8217 \times 10^7$
L1	$3,43372 \times 10^{-2}$	$2,720913 \times 10^8$	$3,8981 \times 10^8$
L2	$8,08061 \times 10^{-2}$	$1,636189 \times 10^8$	$7,58389 \times 10^8$

3.4. Caso 4 – Compensação Série no Fim da Linha

Ao analisar o caso 4 para os diferentes modelos de LTs e graus de compensação, obteve-se os dados de operação que constam nas Figuras 19, 20 e 21.

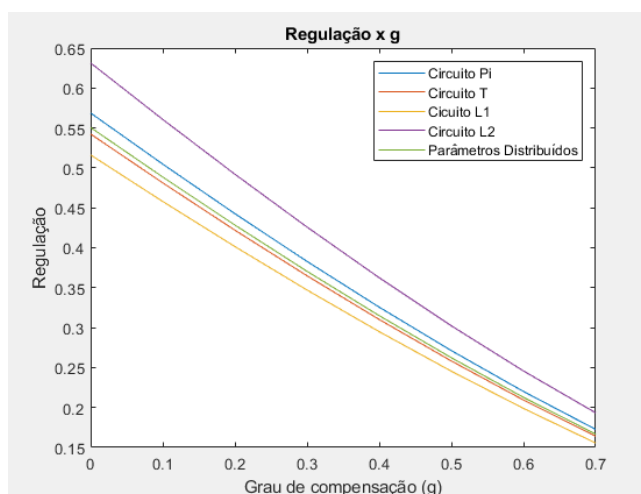


FIGURA 19. Variação da regulação de tensão com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

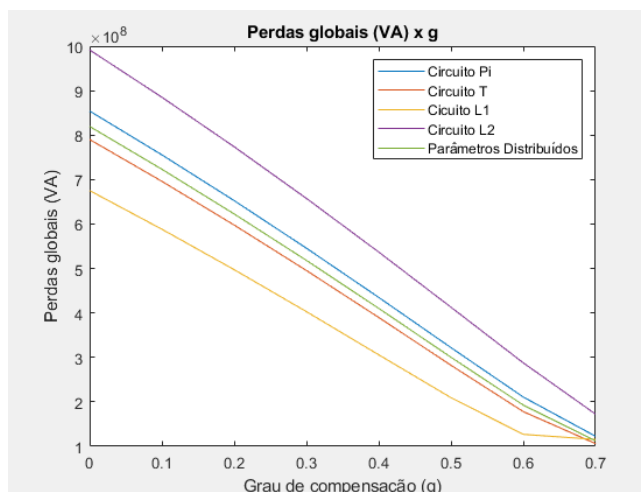


FIGURA 20. Variação das perdas globais com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

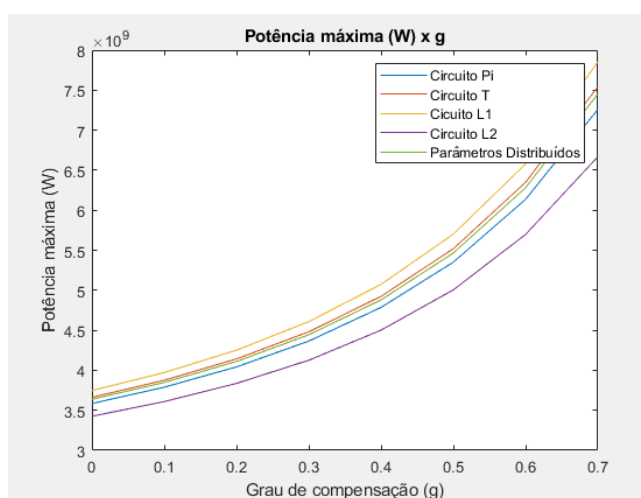


FIGURA 21. Variação da potência máxima com o aumento do grau de compensação (autoria própria).

Para o caso 4, após o levantamento quantitativo, obteve-se a Tabela 5 com os respectivos erros entre os dados de operação calculados e exatos do caso 4.

TABELA 5. Erro absoluto entre os parâmetros de operação calculados e exatos – caso 4 (autoria própria).

Modelo	Regulação de Tensão	Perdas Globais do Sistema (VA)	Potência Máxima (W)
Pi	$1,81291 \times 10^{-2}$	$3,46537 \times 10^7$	$1,94553 \times 10^8$
T	$8,1855 \times 10^{-3}$	$2,93052 \times 10^7$	$9,0928 \times 10^7$
L1	$3,43372 \times 10^{-2}$	$1,442319 \times 10^8$	$4,0151 \times 10^8$
L2	$8,08061 \times 10^{-2}$	$1,720537 \times 10^8$	$7,84874 \times 10^8$

4. CONCLUSÃO

A partir da análise comparativa dos casos estudados, verificou-se que dentre os modelos a parâmetros concentrados considerados, o modelo *T* contribuiu para a melhor performance dos parâmetros de operação, visto que atingiu os menores valores de erro absoluto, quando comparado ao modelo exato da linha de transmissão. O estudo de caso realizado, portanto, indicou que o melhor modelo a parâmetros concentrados para se representar uma linha de transmissão compensada é o *T*.

Para todos os modelos e casos, os dados de regulação de tensão e perdas globais mostraram-se elevados quando o grau de compensação foi de 0%, ou seja, quando a linha não estava compensada. Já a potência máxima foi obtida quando o grau de compensação foi máximo, 70%. Esses resultados confirmam que, à medida que o grau de compensação aumenta, a compensação série das linhas de transmissão traz as vantagens

de melhorar a regulação de tensão do sistema, reduzir as perdas globais e aumentar a capacidade de transporte da linha, para qualquer modelo a parâmetros concentrados utilizado.

REFERÊNCIAS

- [1] Â. VIAN, “AS DIMENSÕES DA OFERTA... - Sistemas de transmissão e a transmissão a longa distância: conceitos básicos”, *Rev. Serv. Público*, vol. 43, pp. 42–45, junho de 2017. Consult. 2023-09-30. Disponível: <https://doi.org/10.21874/rsp.v43i0.1949>
- [2] V. F. 1. Couto, S. H. L. 1. Cabral e U. R. d. B. P. d. P.-G. e. E. Elétrica, “Determinação de perfil longitudinal de tensão e corrente em linhas de transmissão de energia elétrica”, reponame:Biblioteca Digit. de Teses e Dissertações FURB, 2013. Consult. 2023-09-30. Disponível: http://www.bc.furb.br/docs/DS/2013/359372_1_1.pdf.
- [3] R. Dario Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas. Teoria das Linhas em Regime Permanente*. Rio de Janeiro: Livros Tec. Cient., 1977.
- [4] J. B. Ramos da Conceição, “Análise de transitórios em linhas de transmissão com compensação série”, Trabalho de Graduação, Univ. Bras., Brasília, 2015. Consult. 2023-10-01. Disponível: <https://bdm.unb.br/handle/10483/14712>
- [5] J. R. Ferreira Lemos, “Modelagem de linhas de transmissão para estudos de transitórios eletromecânicos”, Projeto de Engenharia Elétrica, Univ. Fed. Rio Jan., Rio de Janeiro, 2008. Consult. 2023-10-01. Disponível: <https://portalidea.com.br/cursos/4210801f9d0836fbf77d305cd5ec1650.pdf>
- [6] P. H. O. Rezende et al., "Compensação de reativos em linhas de transmissão utilizando compensadores estáticos fixos," in XI Conferência de Estudo em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Minas Gerais, 2013. Consult. 2023-10-01. Disponível: https://peteletricaufu.com.br/static/ceel/doc/artigos/artigos2013/ceel2013_065.pdf