

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

FERRAMENTA EM CÓDIGO ABERTO PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS

MATHEUS GARCIA RIBEIRO; CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA(1)
USP(1)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma ferramenta computacional desenvolvida em Python, cujos objetivos principais são 1) cálculo de parâmetros elétricos de fase e de sequência de Linhas de Transmissão Subterrâneas (LTS) e 2) fornecimento dos parâmetros de entrada (geometria e constantes elétricas e magnéticas dos condutores) para a rotina Cable Constant, levando em consideração aspectos construtivos do núcleo, blindagem metálica e as camadas semicondutoras dos cabos, cuja representação na rotina em questão não é diretamente realizada. A ferramenta está disponibilizada gratuitamente e os autores esperam angariar usuários dispostos a contribuir com a melhoria da mesma, fortalecendo a comunidade de engenheiros do país.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão subterrânea, cálculo de parâmetros, ferramenta em código aberto, Python.

1.0 INTRODUÇÃO

A utilização de cabos isolados na construção de linhas de transmissão subterrâneas e subaquáticas é uma prática consolidada no setor elétrico ao redor do mundo, entretanto, fatores como a conexão de geradores *offshore* e requisitos socioambientais em novos projetos de transmissão têm contribuído para o aumento do emprego deste tipo de linha.

No Brasil, especificamente, tem-se visto nos últimos leilões de transmissão diversos lotes contendo linhas subterrâneas de energia, motivados principalmente pela necessidade no reforço das redes de transmissão em áreas urbanas densamente povoadas. No Leilão ANEEL 01/2020 por exemplo, foram ofertados 126 km de LTs subterrâneas, divididos em três lotes, com conexão na malha de 345 kV da Região Metropolitana de São Paulo. Estas LTs, em conjunto com as novas subestações licitadas somam um custo estimado de R\$ 3 bi [1].

Um problema básico para qualquer engenheiro que lida com estudos elétricos está relacionado ao cálculo dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão. Durante cálculos de planejamento é necessário ter os parâmetros de sequência para realização de pelo menos as análises de fluxo de potência e curto-circuito, e durante cálculos necessários à especificação dos níveis de isolamento e transitórios eletromagnéticos, os modelos computacionais necessários para as simulações baseiam-se nos cálculos da impedância série e admitância shunt da LT.

Para linhas aéreas, os cálculos dos parâmetros de sequência podem ser obtidos diretamente por meio da rotina *Line Constants* do ATP [2] por exemplo, bastando ao usuário inserir dados de entrada comumente encontrado em catálogos ou referências especializadas sobre o tema.

Para LTs subterrâneas, entretanto, a rotina *Cable Constants* não calcula diretamente esses parâmetros, mas o usuário pode utilizar algumas funcionalidades da interface *ATPDraw* (rotina *Linecheck*), que realiza um “ensaio” no modelo da linha, calculado com base em parâmetros de entrada pré-definidos.

Importante comentar, porém, que em função de aspectos construtivos específicos de cabos isolados, como as configurações do núcleo, da blindagem metálica e as espessuras das camadas semicondutoras intermediárias, é interessante adequar os dados de entrada da rotina, que considera condutores puramente tubulares [2], para levar em conta essas características construtivas particulares.

Um programa disponível no mercado, que realiza o cálculo dos parâmetros sequência de LTs subterrâneas é o CYMCAP [3], porém, não é de uso livre. Este programa, quando equipado com módulo específico, utiliza uma abordagem matricial para o cálculo dos parâmetros de sequência.

Em referências conceituadas como a Brochura 531 do Cigré [4], a norma IEC 60909 [5] e a referência [6], também são apresentadas equações analíticas para estimativa dos parâmetros de sequência, porém, pode-se dizer que apresentam abordagem mais simplificada que aquela presente no CYMCAP.

Tendo em vista a crescente demanda por LTs dessa natureza e a ausência de uma ferramenta gratuita para engenheiros e analistas envolvidos no assunto, foi desenvolvida uma ferramenta em Python [7][8], de uso livre, que

tem os seguintes objetivos: 1) realizar o cálculo de parâmetros de sequência e de fase de LTs subterrâneas e 2) fornecer aos usuários do ATP os parâmetros de entrada mais adequados à modelagem de LTs dessa natureza na rotina *Cable Constants*, levando em conta aspectos construtivos particulares deste tipo de cabo.

No primeiro item do trabalho é feita a introdução sobre o tema. No segundo item é apresentado o arcabouço teórico por trás da ferramenta computacional desenvolvida em Python com as devidas citações das referências técnicas consideradas. No terceiro, são apresentados os seguintes testes para validação da ferramenta:

- 1) Comparações entre valores matriciais de fase calculados em Python e ATP;
- 2) Comparações entre valores de sequência calculados em Python e rotina *Linecheck* do ATP.

No quarto item, apresenta-se uma comparação global entre parâmetros de sequência calculados para configurações típicas de LTs subterrâneas propostas pela EPE em [9], cujos cálculos foram realizados com a ferramenta CYMCAP, e uma avaliação dos impactos que as diferenças entre programas distintos ocasionam em análises genéricas de fluxo de potência e curto-circuito, visando responder à pergunta clássica que muitas vezes nos deparamos: “O quão significativas são essas diferenças?”.

O item 5, finalmente, apresenta as conclusões e melhorias futuras a serem desenvolvidas na ferramenta computacional.

Lembrando que todos são convidados a colaborar, seja com opiniões, palpites ou com suas habilidades de programação.

2.0 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A Figura 1, em seu lado esquerdo, apresenta uma configuração construtiva bastante próxima à um cabo real. É possível notar algumas particularidades na seção apresentada, como por exemplo as diferentes formas construtivas do núcleo, a existência de camadas semicondutoras e diferentes formas construtivas das blindagens metálicas. Do lado direito da mesma Figura, apresenta-se uma seção considerada no modelo das rotinas *Cable Constants* de programas de transitórios eletromagnéticos, onde os condutores e camadas isolantes são definidos por seções tubulares com seus respectivos diâmetros e constantes elétricas e magnéticas.

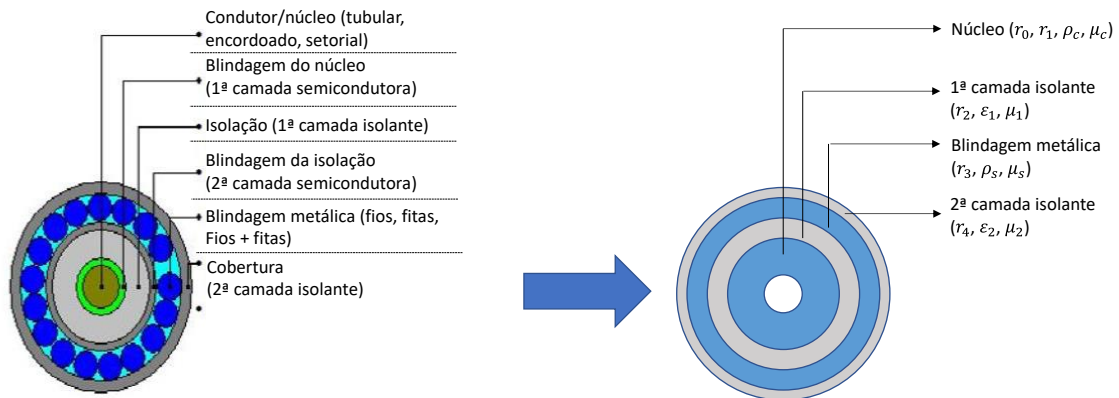


Figura 1 – Seção transversal de cabo de alta tensão (esquerda) [1] e seção transversal do modelo computacional utilizado nas rotinas *Cable Constants* [8]

De forma resumida, o programa proposto segue os seguintes passos:

- 1) Recebe entradas relativas à geometria dos cabos e suas posições no sistema (coordenadas (x, y));
- 2) Adequa as particularidades construtivas do cabo real para representar o modelo idealizado da Figura 1;
- 3) Realiza o cálculo matricial dos parâmetros (matrizes Z_{serie} e Y_{shunt}) [10][11][12], conforme Figura 2;
- 4) Realiza o cálculo dos parâmetros de sequência;
- 5) Fornece ao usuário as constantes elétricas e geométricas sugeridas para modelagem em programas de transitórios eletromagnéticos, como o ATP.



Figura 2 – Esquema básico para obtenção das matrizes Z_{serie} e Y_{shunt} de uma LT subterrânea. Comprimento elementar [2][10][11]

Os itens que seguem irão apresentar com maiores detalhes os cálculos. Quando não for possível o aprofundamento das relações e equações em questão, ficarão indicadas as referências. O manual da ferramenta contemplando todo o equacionamento pode ser encontrado em [8].

2.1 MATRIZ DE IMPEDÂNCIAS SÉRIE

A matriz de impedâncias série do sistema de transmissão subterrâneo pode ser escrita da seguinte forma:

$$Z_{serie} = Z_{int} + Z_{solo} \quad (1)$$

Em que:

Z_{int} : Matriz contendo as impedâncias internas dos condutores dos cabos;

Z_{solo} : Matriz contendo as impedâncias mútuas entre condutores, considerando os efeitos do solo (também é um condutor).

Para um sistema de transmissão composto por m cabos, suas matrizes possuem $2m$ linhas e $2m$ colunas. A matriz de impedâncias internas é:

$$[Z_{int}] = \begin{bmatrix} [Z_{núcleo-núcleo}] & [Z_{núcleo-blindagem}] \\ [Z_{blindagem-núcleo}] & [Z_{blindagem-blindagem}] \end{bmatrix}$$

Na forma completa, podemos escrever:

$$[Z_{int}] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{mm} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_{1(m+1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{2(m+2)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{m(m+m)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Z_{1(m+1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{2(m+2)} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2(m+2)} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{m(m+m)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_{(m+1)(m+1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{(m+1)(m+1)} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & Z_{(m+2)(m+2)} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{(m+m)(m+m)} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Seguindo os índices utilizados em [11], cada componente das submatrizes podem ser calculados:

$$\begin{aligned} Z_{núcleo-núcleo} &= Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_6 - 2Z_4 \\ Z_{núcleo-blindagem} &= Z_{blindagem-núcleo} = Z_5 + Z_6 - Z_4 \\ Z_{blindagem-blindagem} &= Z_5 + Z_6 \end{aligned}$$

Z_1 : Impedância interna do condutor interno (núcleo);

Z_2 : Impedância da 1ª camada isolante;

Z_3 : Impedância interna da superfície interna da blindagem metálica. Representa a queda de tensão nesta superfície em função de uma corrente percorrendo um condutor mais interno à blindagem (núcleo, no caso);

Z_4 : Impedância mútua da blindagem metálica. Representa a queda de tensão na superfície externa da blindagem (ou interna) quando há corrente na sua superfície interna (ou externa);

Z_5 : Impedância interna da parte externa da blindagem. Representa a queda de tensão nesta superfície em função de uma corrente percorrendo um condutor mais externo à blindagem (solo, no caso);

Z_6 : Impedância da 2ª camada isolante.

Para um condutor sólido, a impedância Z_1 pode ser calculada como (o cálculo tubular pode ser obtido em [8]):

$$Z_1 = \frac{\rho_c m_c I_0(m_c r_1)}{2\pi r_1 I_1(m_c r_1)} \quad (2)$$

Onde ρ_c é a resistividade do núcleo, r_1 é seu raio externo, I_0 e I_1 são funções de Bessel modificadas de primeira espécie e ordens 0 e 1 respectivamente e $m_c = \sqrt{\frac{j\omega\mu_c\mu_0}{\rho_c}}$.

De modo a atenuar os efeitos pelicular (concentração da corrente na periferia do condutor) e de proximidade (distorção da corrente em um condutor em função de um campo magnético de outro) [6], cabos isolados de alta tensão possuem formas alternativas de construção, como condutores do tipo *Miliken* (ou setorial).

Levando isso em consideração, a norma IEC 60287-1-1-2006 [13] propõe o seguinte cálculo da resistência em corrente alternada do núcleo:

$$R_{AC} = R_{DC} (1 + y_s + y_p) \quad (3)$$

Onde R_{DC} é a resistência em corrente contínua na temperatura de operação vislumbrada e os fatores y_s e y_p são fatores considerados para levar em conta os efeitos pelicular e de proximidade respectivamente. A norma IEC 60228 [14] apresenta alguns valores mínimos de resistência DC em Ω/km em função da bitola do condutor e material. A ferramenta apresenta alguns valores sugeridos para o usuário. A resistência DC pode ser corrigida em função da temperatura conforme equação (4):

$$R_{DC} = R_{DC@20^\circ C} (1 + \alpha_{20}(\theta_c - 20)) \quad (4)$$

Onde:

α_{20} : Fator de correção em 20°C da resistência em função da temperatura. Para o alumínio pode-se considerar o valor de 0,000403 °C⁻¹ e para o cobre o valor de 0,00393 °C⁻¹.

θ_c : Temperatura de operação em °C.

Os fatores γ_s e γ_p são calculados conforme equações da norma [13], que por questão de espaço, não serão apresentadas aqui, ficando apenas o passo a passo. Inicialmente, em função do condutor escolhido (sólido, encordado, *Miliken* ou tubular), são definidos os fatores k_s e k_p . Posteriormente, deve-se calcular as constantes x_s e x_p . Finalmente, pode-se obter γ_s e γ_p por meio de algumas regras [8].

Tendo em vista estas diferentes definições para o cálculo da resistência interna do núcleo, a primeira correção feita pelo programa desenvolvido em Python é alterar a resistividade do condutor (ρ_c), de modo que o valor calculado pela equação (2) seja muito parecido àquele calculado em (4). Detalhes da metodologia são encontrados em [8].

Sejam e_{sc-in} e e_{sc-out} as espessuras das camadas semicondutoras entre núcleo e isolamento (blindagem do núcleo) e entre isolamento e blindagem metálica (blindagem da isolamento) respectivamente, e sendo e_{isol} a espessura da 1ª camada isolante, temos:

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 + e_{sc-in} + e_{isol} + e_{sc-out} \\ a &= r_1 + e_{sc-in} \\ b &= a + e_{isol} \end{aligned}$$

Assim, a impedância Z_2 pode ser calculada:

$$Z_2 = \frac{j\omega\mu_{isol}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (5)$$

O cálculo das impedâncias Z_3 , Z_4 e Z_5 depende de aspectos construtivos da blindagem metálica do cabo, que geralmente pode ser de fios metálicos, fitas metálicas ou uma combinação dos casos anteriores, cabendo ao usuário da ferramenta indicar qual método construtivo do sistema em análise.

Quando a blindagem metálica é formada por fitas, o programa assume que o raio do condutor tubular equivalente (r_3) é dado pela soma: $r_2 + e_{fitas}$, onde e_{fitas} é a espessura das fitas metálicas.

No caso da blindagem formada apenas por fios metálicos, o usuário pode escolher as seguintes opções [15]:

- Alterar a resistividade do condutor tubular que representa a blindagem metálica, em função da espessura dos fios (e_{fios}) [15]. Neste caso, $r_3 = r_2 + e_{fios}$ e a resistividade p_s é corrigida em função da relação entre a área do condutor tubular equivalente e a área composta pelos fios metálicos;
- Calcular o raio r_3 para a mesma área formada pelos fios metálicos, mantendo a resistividade original informada pelo usuário [16]. Nesse caso:

$$r_3 = \sqrt{\frac{\pi n_{fios} \left(\frac{e_{fios}}{2}\right)^2}{\pi}} + r_2^2 \quad (6)$$

Finalmente, quando a blindagem metálica é composta por fios e fitas metálicas, a ferramenta considera um condutor equivalente nessa configuração, calculando os parâmetros p_s e r_3 como se fossem resistências em paralelo:

$$\rho_s = \text{Área}_s \cdot \frac{\frac{\rho_{fitas}}{\text{Área}_{fitas}} \cdot \frac{\rho_{fios}}{\text{Área}_{fios}}}{\frac{\rho_{fitas}}{\text{Área}_{fitas}} + \frac{\rho_{fios}}{\text{Área}_{fios}}} \quad (7)$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{\text{Área}}{\pi}} + r_2^2 \quad (8)$$

Dessa forma, as impedâncias podem ser calculadas:

$$Z_3 = \frac{\rho_s \cdot m_s}{2\pi \cdot r_2} \cdot \frac{I_0(m_s \cdot r_2) K_1(m_s \cdot r_3) + K_0(m_s \cdot r_2) I_1(m_s \cdot r_3)}{I_1(m_s \cdot r_3) K_1(m_s \cdot r_2) - I_1(m_s \cdot r_2) K_1(m_s \cdot r_3)} \quad (9)$$

$$Z_4 = \frac{\rho_s}{2\pi \cdot r_2 \cdot r_3} \cdot \frac{1}{I_1(m_s \cdot r_3) \cdot K_1(m_s \cdot r_2) - I_1(m_s \cdot r_2) \cdot K_1(m_s \cdot r_3)} \quad (10)$$

$$Z_5 = \frac{\rho_s \cdot m_s}{2\pi \cdot r_3} \cdot \frac{I_0(m_s \cdot r_3) \cdot K_1(m_s \cdot r_2) + K_0(m_s \cdot r_3) \cdot I_1(m_s \cdot r_2)}{I_1(m_s \cdot r_3) \cdot K_1(m_s \cdot r_2) - I_1(m_s \cdot r_2) \cdot K_1(m_s \cdot r_3)} \quad (11)$$

Onde m_s é calculado de forma análoga ao apresentado para m_c , mas considerando as características da blindagem metálica e K_0 e K_1 são as funções de Bessel modificadas de segunda espécie e ordem zero e um, respectivamente. Finalmente, a impedância Z_6 é calculada de forma muito parecida à Z_2 :

$$Z_6 = \frac{j\omega\mu_{capa}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \quad (12)$$

Com o raio r_4 calculado como $r_3 + e_{capa}$, onde e_{capa} é a espessura da capa protetora (2ª camada isolante do cabo).

O cálculo da matriz Z_{solo} utiliza equações apresentadas em [17]:

Elementos da diagonal:

$$Z_{ii}^{solo} = \frac{\rho_{solo} m_{solo}^2}{2\pi} \left(K_0(m_{solo} \cdot r_4) + \frac{2}{4+m_{solo}^2 r_4^2} e^{-2Y_i m_{solo}} \right) \quad (13)$$

Elementos fora da diagonal:

$$Z_{ij}^{solo} = \frac{\rho_{solo} m_{solo}^2}{2\pi} \left(K_0(m_{solo} \cdot D_{ij}) + \frac{2}{4+m_{solo}^2 x_{ij}^2} e^{-Y_{ij} m_{solo}} \right) \quad (14)$$

Onde x_{ij} e y_{ij} representam a distância entre abscissas e ordenadas dos condutores i e j respectivamente e D_{ij} é a distância entre o condutor i e o condutor j de cabos diferentes.

Importante comentar que as coordenadas do núcleo do cabo i e da blindagem do cabo i são as mesmas, portanto, as distâncias citadas acima devem considerar somente as disposições dos cabos no solo, não existindo diferença entre as impedâncias mútua entre o núcleo do cabo i e o núcleo do cabo j e a mútua entre o núcleo do cabo i e a blindagem do cabo j .

2.2 MATRIZ DE ADMITÂNCIAS SHUNT

Em um sistema de cabos unipolares subterrâneos, as capacitâncias existentes são apenas aquelas entre núcleo e blindagem de um mesmo cabo e blindagem e o solo. Como o solo funciona como uma blindagem externa ao cabo, não há capacitâncias mútuas entre cabos, o que implica diretamente que a capacitância de sequência zero é igual à capacitância de sequência positiva. Portanto, considerando somente um cabo, sua matriz de admitâncias nodais é dada por:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nb} \\ Y_{nb} & Y_{bb} \end{bmatrix}$$

Y_{nn} : Admitância própria do núcleo, que é dada somente pela capacitância entre núcleo e blindagem;

$Y_{nb} = -Y_{nn}$: Admitância entre núcleo e blindagem;

Y_{bb} : Admitância própria da blindagem, dada pela soma de Y_{nn} com a admitância dada pela capacitância entre blindagem metálica e o solo.

As camadas semicondutoras do cabo aumentam a sua capacitância, assim, o programa corrige (se solicitado pelo usuário) a permissividade elétrica da 1ª camada isolante (ϵ_1) para levar isso em consideração [16]. Conhecendo os valores de r_1 , r_2 , b e a , definidos no Item 2.1, temos:

$$\epsilon'_1 = \epsilon_1 \cdot \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{\ln(\frac{b}{a})} \quad (15)$$

Onde ϵ_1 é a permissividade elétrica do material isolante.

As admitâncias podem ser calculadas da seguinte forma:

$$Y_{nn} = \frac{j\omega\epsilon'_1}{\ln(\frac{r_2}{r_1})}, Y_{bb} = Y_{nn} + \frac{j\omega\epsilon_2}{\ln(\frac{r_4}{r_3})} \quad (16)$$

Para o sistema formado por mais cabos, a matriz Y_{shunt} completa é formada pela alocação da matriz Y para os demais cabos.

2.2 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA

De posse das matrizes Z_{serie} e Y_{shunt} , os passos que seguem são muito semelhantes àqueles utilizados no cálculo de parâmetros de sequência para LTs aéreas, dados por:

- Balanceamento das matrizes, considerando sistema de aterramento *cross-bonding*. Aqui, o usuário informa se os núcleos ou as blindagens metálicas são transpostas. A Figura 3 apresenta um caso ilustrativo onde os núcleos (C) trocam de posição e as blindagens (S) não, ao longo de um ciclo completo de transposição. A matriz $[R]$ representa de forma matemática a troca de posição dos condutores [18]. A matriz balanceada é calculada da seguinte forma:

$$[Z_{eq}] = \frac{1}{3} ([Z_{serie}] + [R][Z_{serie}][R]^{-1} + [R]^{-1}[Z_{serie}][R])$$

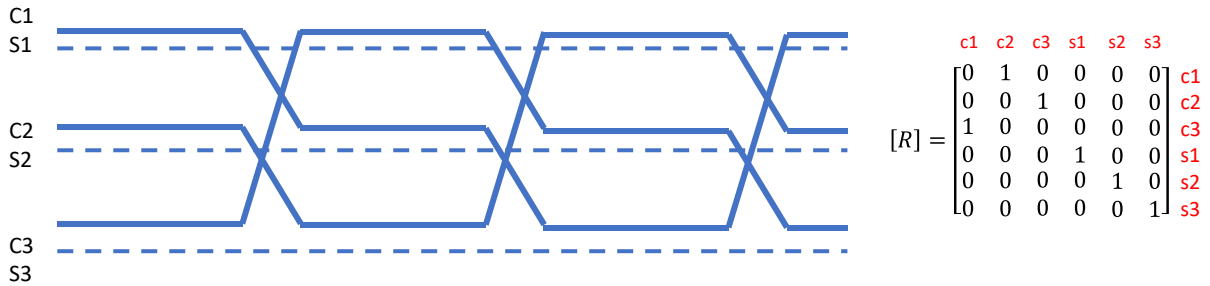


Figura 3 – Diagrama esquemático para transposição dos núcleos no esquema *cross-bonding*

- Eliminação das blindagens metálicas por Redução de Kron [19][20]. Essa hipótese é validada é função de as blindagens serem aterradas a cada ciclo completo de transposição no esquema *cross-bonding*,
- Cálculo da matriz de componentes simétricas, $[Z_{012}] = [T]^{-1}[Z_{eq}][T]$, onde $[Z_{eq}]$ é a matriz reduzida do passo anterior e $[T]$ é a matriz de transformação para componentes simétricas [8].

3.0 TESTES DE VALIDAÇÃO

Neste item serão apresentadas comparações para um sistema de cabos de alumínio com seção nominal de 1200 mm², circuito duplo, instalados em arranjo vertical. Todos os dados de entrada considerados podem ser encontrados no Exemplo de Cálculo 2 do Manual da Ferramenta [8].

Para o cálculo das diferenças, definiu-se a seguinte relação:

$$Diferença = \frac{Valor_{Python} - Valor_{ATP}}{Valor_{ATP}} \times 100\%$$

3.1 VALORES DE FASE: PYTHON VS. ATP

De modo a validar todos os passos intermediários da ferramenta, foram realizadas comparações entre as matrizes Z_{serie} e Y_{shunt} calculadas com a Ferramenta em Python e aquelas calculadas pela rotina *Cable Constants* do ATP. Um a um, cada elemento da matriz foi comparado. Em valor absoluto, as máximas diferenças verificadas foram:

- Termo real de Z_{serie} (resistência série): 1,24%
- Termo imaginário de Z_{serie} (reatância série): 0,13%
- Termos da matriz Y_{shunt} : 0,19%

Considerando os máximos erros obtidos, observa-se que há aderência entre os cálculos da ferramenta apresentada e a rotina *Cable Constants*.

3.2 VALORES DE SEQUÊNCIA: PYTHON VS LINECHECK

Conforme citado no Item 1 do presente trabalho, diferente da metodologia utilizada na rotina *Line Constants*, o ATP não fornece os parâmetros de sequência de linhas subterrâneas de forma direta, entretanto, a rotina *Linecheck* do ATPDraw permite o cálculo por meio de um “ensaio” do modelo.

Considerando os parâmetros de saída da Ferramenta em Python, que fornece ao usuário as constantes geométricas, elétricas e magnéticas (vide Figura 1), foi realizado o ensaio do sistema subterrâneo em questão. A Figura 4 apresenta a saída do programa já ajustada no ATPDraw e o esquema de ensaio da LT na rotina *Linecheck*.

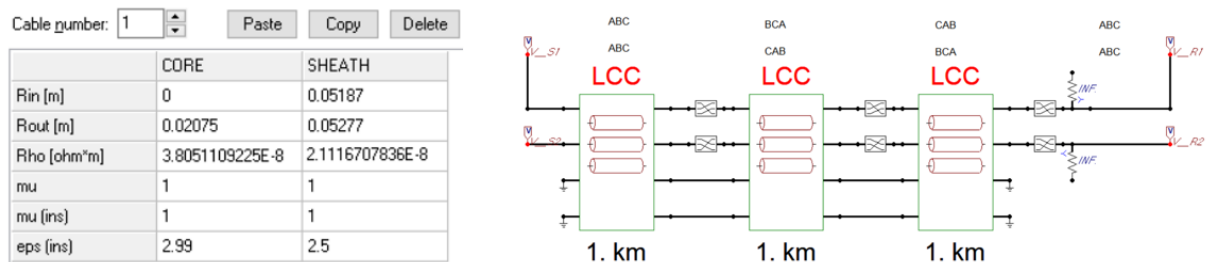


Figura 4 – Dados de entrada fornecido pela Ferramenta em Python (esquerda) para configuração de uma linha subterrânea no ATPDraw e esquema de ensaio na função *Linecheck* (direita)

A Tabela 1 apresenta as comparações entre resultados, apresentando desvios pouco significativos.

Tabela 1 – Comparações entre valores dos parâmetros de sequência calculados em Python e ATP (ensaio *Linecheck*) – Exemplo de Cálculo 2 apresentado em [8]

	r1 (Ω/km)	x1 (Ω/km)	b1 (μS/km)	r0 (Ω/km)	x0 (Ω/km)	b0 (Ω/km)
Linecheck	0.0319	0.2481	68.45	0.1012	0.0961	68.45
Python	0.0319	0.2481	68.3122	0.1009	0.096	68.3122
	r1 (%)	x1 (%)	b1 (%)	r0 (%)	x0 (%)	b0 (%)
	0	0	-0.19	-0.30	-0.10	-0.19

4.0 O QUÃO SIGNIFICATIVAS SÃO AS DIFERENÇAS?

No segundo semestre de 2021, a EPE publicou uma Nota Técnica contemplando, dentre outros tópicos, valores de parâmetros típicos de linhas de transmissão subterrâneas de 230, 345 e 500 kV [9], considerando diferentes métodos de instalação e seções nominais de diferentes materiais condutores (alumínio e cobre). Ao todo, foram apresentadas 71 configurações de linhas subterrâneas cujos parâmetros foram calculados com o programa CYMCAP.

Servindo como uma excelente fonte de validação, todas as condições apresentadas em [9] foram simuladas na Ferramenta desenvolvida em Python. Novamente, todas as configurações estudadas, inclusive as características construtivas dos condutores, que servem de entrada para a Ferramenta, são apresentadas integralmente em [8].

A Tabela 2 apresenta os maiores desvios obtidos ao compararmos o método proposto neste trabalho com os valores calculados no CYMCAP. A forma de cálculo das diferenças é a mesma daquela apresentada no Item 3.0, substituindo o índice ATP por CYMCAP.

Tabela 2 – Comparações entre valores dos parâmetros de sequência calculados em Python e CYMCAP [9]

kV	r1 (%)	x1 (%)	b1 (%)	r0 (%)	x0 (%)	b0 (%)
230	-4.0	-4.5	-4.8	5.2	-14.5	-4.8
345	-4.3	-4.5	0.0	-2.3	-15.3	0.0
500	-3.0	-4.5	0.0	-11.4	-14.9	0.0

Em função da facilidade dos cálculos das capacitâncias, observamos diferenças irrisórias verificadas para LTs de 345 kV e 500 kV. O valor de - 4,8% verificado para LTs de 230 kV cabe melhor investigação. Dentre os parâmetros de impedância série, observamos que as maiores diferenças se encontram nos de sequência zero, com destaque para a reatância.

De modo a buscar uma análise objetiva sobre o impacto destas diferenças em cálculos de engenharia, foram realizadas análises de fluxo de potência e curto-circuito em um sistema simplificado, porém, com uma metodologia que busca capturar múltiplas condições sistêmicas.

Para verificar o impacto das diferenças nos parâmetros de sequência positiva, foi considerado um modelo simples formado por duas barras conectadas pela LT proposta em [9] que apresentou maior discrepância entre resultados nos parâmetros:

- Caso 1 – LT de 345 kV, formação duplo horizontal, cabos de 1600 mm² de cobre: Maior diferença percentual para resistência de sequência positiva (4,3%);
- Caso 2 – LT de 345 kV, formação simples horizontal, cabos de 2500 mm² de cobre: Maior diferença percentual para reatância de sequência positiva (4,5%).

Foram realizadas múltiplas simulações variando as seguintes características do sistema:

- Comprimento da LT de 2,5 a 30 km, em passos de 2,5 km;
- Para cada comprimento da LT, foram feitas 20000 vezes:
 - Variação aleatória do módulo da tensão na barra de geração entre 0,95 e 1,05 pu;
 - Variação aleatória da potência aparente na barra de carga, respeitando o limite em MVA da LT em análise.

A Figura 5 apresenta o modelo simplificado e as premissas apresentadas acima. Cada configuração operativa obtida é simulada por meio de um algoritmo de fluxo de potência e as comparações são feitas com base no carregamento calculado na LT em análise, ou seja, compara-se o carregamento obtido com os parâmetros de [9] com o carregamento obtido com os parâmetros da Ferramenta em Python. O gráfico apresentado na Figura 7 (esquerda) apresenta a máxima diferença verificada, dentre as 20000 simulações, para cada comprimento avaliado. É possível notar que as diferenças verificadas são inferiores a 0,1%.

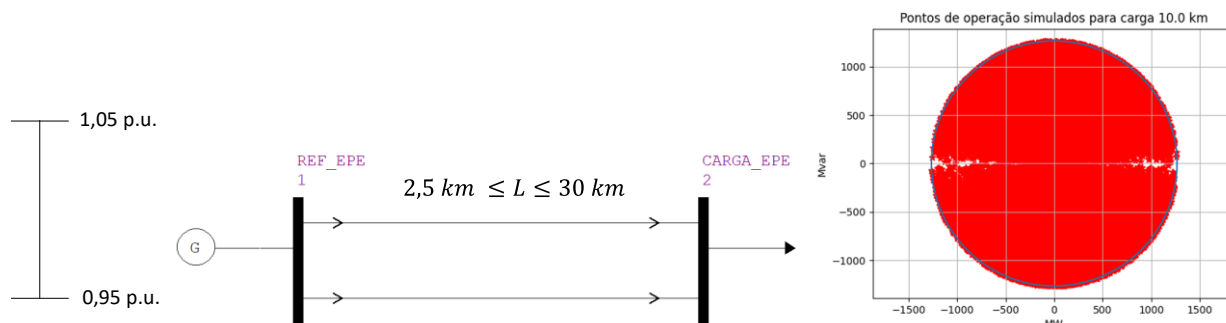


Figura 5 – Esquema elétrico para verificação no impacto nas simulações de fluxo de potência.

Para verificar o impacto das diferenças nos parâmetros de sequência zero em conjunto com os de sequência positiva, foi considerado modelo semelhante àquele utilizado na análise de fluxo de potência, composto por duas barras, uma representando a potência de curto-circuito e a outra, no terminal da LT, o ponto de defeito. Conectou-se entre as duas barras a LT que apresentou maior discrepância entre resultados nos parâmetros:

- Caso único – LT de 500 kV com cabos de 2500 mm² de cobre: Diferença de -11,4% no parâmetro r_0 e -14,8% no parâmetro x_0 .

Foram realizadas múltiplas simulações variando as seguintes características do sistema:

- Comprimento da LT de 2,5 km a 30 km, em passos de 2,5 km;
- Para cada comprimento da LT, foram feitas 20000 vezes:
 - Variação aleatória da amplitude e ângulo da potência de curto-circuito trifásica e fase-terra da fonte, entre 0 e 63 kA e entre 0 e -90°.

A Figura 5 apresenta o modelo simplificado e as premissas apresentadas acima. O processo de análise é feito com base na comparação entre amplitudes das correntes de falta na barra receptora da LT. O gráfico apresentado na Figura 7 (direita) apresenta a máxima diferença verificada, dentre as 20000 simulações, para cada comprimento avaliado. É possível notar que a máxima diferença na falta trifásica é limitada em 2,5% e para falta monofásica o

valor está próximo a 3,5%. Conforme esperado, este último é maior pois está relacionado às discrepâncias mais pronunciadas nos parâmetros de sequência zero.

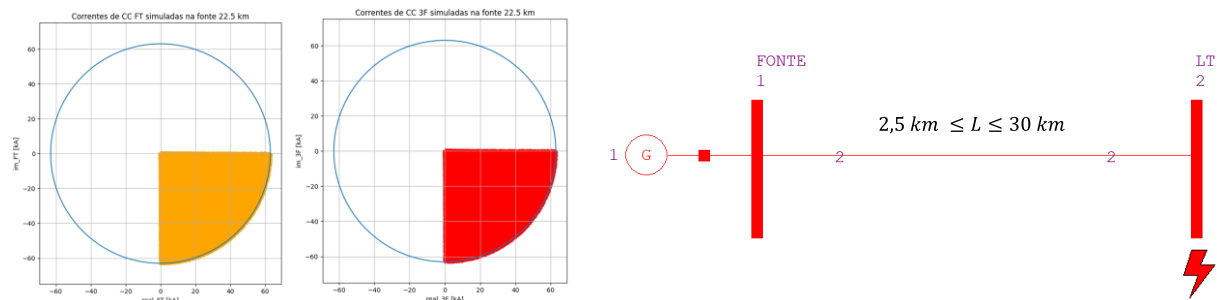


Figura 6 – Esquema elétrico para verificação no impacto nas simulações de curto-circuito.

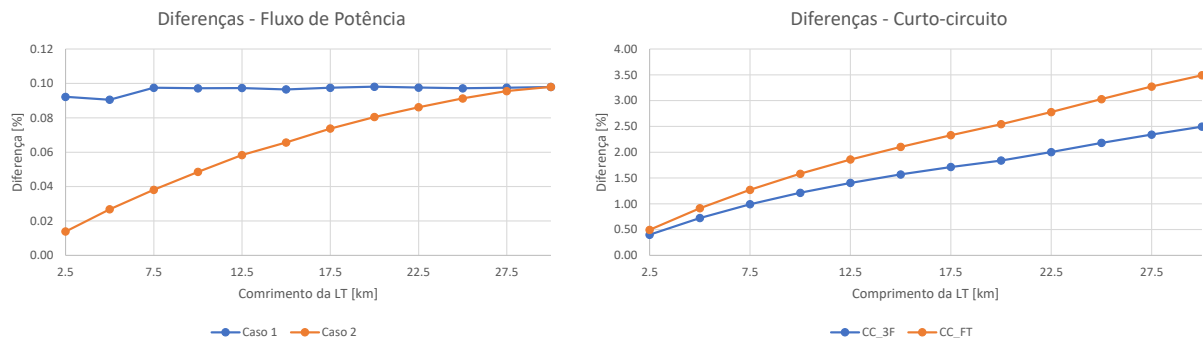


Figura 7 – Máximas diferenças verificadas nas 20000 simulações de fluxo de potência (esquerda) e curto-circuito (direita).

5.0 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma ferramenta desenvolvida em Python para cálculos de parâmetros elétricos de linhas de transmissão subterrâneas. De forma resumida foi possível apresentar os fundamentos teóricos que ditam o equacionamento proposto e as principais referências que embasam o trabalho, maiores informações podem ser encontradas em [8].

Além do cálculo matricial de Z_{serie} e Y_{shunt} e os parâmetros de sequência, a ferramenta também fornece ao usuário os parâmetros geométricos e as constantes magnéticas e elétricas a serem inseridas nas rotinas do tipo *Cable Constants*, típicas de programas de transientes eletromagnéticos, considerando aspectos construtivos particulares do cabo em análise.

No item 3.0 foram apresentados resultados de testes que mostram aderência aos valores calculados a partir do ATP, tanto em seus cálculos matriciais quanto no ensaio da LT por meio da rotina *Linechek*.

Já o item 4.0, buscou aprofundar uma investigação comum na vida do engenheiro, *o quão significativas são as diferenças entre cálculos?*

Levando em consideração a importante contribuição feita pela EPE sobre o assunto em [9], os parâmetros de sequência calculados em todas as configurações apresentadas nesta referência, que utilizou o programa CYMCAP, foram comparados com aqueles calculados na ferramenta desenvolvida em Python.

Em seguida, considerando as configurações que apresentaram as maiores discrepâncias, foram realizadas milhares de simulações de fluxo de potência e curto-circuito em um sistema simples, porém representativo, para verificar o impacto em carregamentos e níveis de falta levando em conta esta questão.

É possível notar que para LTs de até 30 km, distância adotada no trabalho como limite para ausência de compensação reativa (otimista, se considerarmos algumas referências no assunto), ao executar milhares de simulações únicas que varrem diversas variáveis importantes nos estudos de regime permanente (fluxo de potência e curto-circuito), as diferenças se mostram aceitáveis.

Sendo assim, a ferramenta apresentada mostra desempenho satisfatório nos testes realizados e também auxilia na modelagem de linhas subterrâneas para estudos de transientes eletromagnéticos, mostrando-se uma alternativa viável e gratuita a todos os interessados.

Como melhorias futuras, os autores esperam implementar as seguintes possibilidades:

- Calcular parâmetros com mais de dois circuitos em paralelo;
- Calcular configurações onde as características dos cabos são distintas. Atualmente, o usuário fornece os dados do cabo somente uma vez e esses valores são extrapolados para os demais;
- Calcular parâmetros para linhas subaquáticas;
- Possuir interface gráfica.

Tendo em vista a natureza própria do projeto, onde todos podem contribuir e melhorar o que já foi realizado, os autores novamente deixam o convite para todos ingressarem neste empreendimento.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Estudo de Atendimento à Região Metropolitana de São Paulo – Sub-regiões Norte, Leste e Sul. EPE, 2019.
- [2] ATP: Alternative Transients Program Rule Book. Leuven, K. U. Leuven EMTP Center, 1987.
- [3] Programa CYMCAP. Disponível em < <https://www.cyme.com/software/cymcap/> > Acesso em 08/11/2021.
- [4] CIGRE Technical Brochure 531, Cable Systems Electrical Characteristics, WG B1.30, April 2013.
- [5] IEC 60909 – Short-circuit currents in three-phase a.c. systems.
- [6] Clarke, E. (1950). Circuit Analysis of AC Power Systems – Volume II. New York: John Wiley & Sons
- [7] Programa para cálculo de parâmetros elétricos de linhas de transmissão subterrâneas. Disponível em < <https://github.com/mgarciaribeiro/Sisplot> > Arquivo com nome *parâmetros_LTS_revXX.py* (XX é o número da versão)
- [8] Programa para cálculo de parâmetros elétricos de linhas de transmissão subterrâneas, Manual. Disponível em < <https://github.com/mgarciaribeiro/Sisplot> > Arquivo com nome *Manual_Ferramenta_parametros_LTS_revXX* (XX é o número da versão)
- [9] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Definição de parâmetros indicativos para o planejamento de linhas de transmissão subterrâneas e subaquáticas em corrente alternada. EPE-DEE-NT-84/2021-rev0. EPE, 2021.
- [10] A. Ametani (1980). A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 3, pp. 902-910.
- [11] L. M. Wedepohl and D. J. Wilcox (1973). Transient analysis of underground power-transmission systems. System-model and wave-propagation characteristics. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 120, no. 2, pp. 253-260.
- [12] DOMMEL, H. (1986). Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book). Portland, OR: Bonneville Power Administration.
- [13] IEC 60287-1-1: Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General.
- [14] IEC 60228: Conductors of insulated cables.
- [15] A. Ametani, T. Ohno, N. Nagaoka. Cable System Transients: Theory, Modeling and Simulation. (Wiley – IEEE)
- [16] B. Gustavsen (2001). Panel session on data for modeling system transients insulated cables. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Columbus, OH, USA.
- [17] O. Saad, G. Gaba and Giroux (1996). A closed-form approximation for ground return impedance of underground cables. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1536-1545.
- [18] N. Nagaoka, A. Ametani (1983). Transient Calculations on Crossbonded Cables. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 4, pp. 779-787.
- [19] Fumitaka Nishimura (1973). Cálculo de Parâmetros Elétricos de Cabos Subterrâneos. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP.
- [20] F. de Leon, M. L. Marquez-Asensio and G. Alvarez-Cordero (2011). Effects of Conductor Counter-Transposition on the Positive-Sequence Impedance and Losses of Cross-Bonded Cables. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 3, pp. 2060-2063.

DADOS BIOGRÁFICOS



MATHEUS GARCIA RIBEIRO. Graduado em Engenharia de Energia e Automação Elétricas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2014) e pós-graduando na área de Sistemas de Potência na mesma Instituição com pesquisa relativa à modelagem de Linhas de Transmissão Subterrâneas para estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra. Possui experiência em estudos elétricos em regime permanente e transitórios eletromagnéticos para especificação de equipamentos e avaliação da performance de sistemas. Atualmente é consultor na área de estudos elétricos da Hitachi ABB Power Grids, com experiência prévia na FIGENER Engenheiros Associados (departamento de Engenharia Elétrica) e ISA CTEEP (departamento de Estudos e Planejamento da Expansão).



CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA. Possui graduação em engenharia de eletricidade pela Universidade de São Paulo (1996), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1999) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2003). Desde 2004 é Professor Doutor da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão da Energia Elétrica, Distribuição da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: linhas de transmissão, localização de faltas em linhas de transmissão, desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas, aplicação de pára-raios ZnO, estudos de redes em regime permanente e transitório e coordenação do isolamento.