

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA E FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS E AMPACIDADES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS

ARTHUR LINHARES ESTEVES DOS REIS (1); ANNY DE ALMEIDA SILVEIRA DOS SANTOS (1);
CARLOS KLEBER DA COSTA ARRUDA (1); JOÃO CLAVIO SALARI FILHO (1)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL (1)

RESUMO

A aplicação de Linhas de Transmissão Subterrâneas (LTS) é cada vez mais viável para empreendimentos de transmissão em alta tensão, proporcionando maior segurança e confiabilidade, especialmente em locais com restrições a linhas aéreas. Este trabalho apresenta a metodologia desenvolvida pelos autores no programa computacional CABOS, com interface gráfica prática e útil na elaboração e análise de projetos básicos. São calculados os parâmetros elétricos de LTS conforme os modelos de cabos propostos por Schelkunoff e Pollaczek, além da ampacidade segundo as IEC 60287-1-1 e 60853-2. A fim de validação, os resultados do programa são comparados com algumas referências selecionadas, incluindo análises paramétricas de sensibilidade.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de Transmissão Subterrânea, Cabos Isolados, Parâmetros Elétricos, Ampacidade, Ferramenta Computacional

1.0 – INTRODUÇÃO

Com a evolução da urbanização e das limitações relacionadas à construção de linhas de transmissão em alta tensão em áreas densamente povoadas, é cada vez mais comum avaliar as Linhas de Transmissão Subterrâneas (LTS) como alternativas viáveis para empreendimentos de transmissão, especialmente em 230 e 345 kV, níveis em que são interligadas subestações importantes nas grandes cidades brasileiras (1). Além disso, recentemente, o custo de instalação e aquisição dos materiais tem decrescido, aproximando-se do custo da opção por alternativas aéreas, sobretudo em locais de terrenos muito utilizados, onde o espaço disponível inviabiliza a instalação das estruturas de linhas aéreas (p.ex., em regiões de preservação ambiental, ou por inviabilidade devido ao cruzamento entre linhas). Outra vantagem das LTS é a maior confiabilidade e segurança, por estarem menos propícias a ameaças de atividades humanas e eventos climáticos.

Enquanto a experiência em linhas aéreas é bastante difundida e consistente, com milhares de quilômetros em operação no Brasil, as LTS ainda são consideradas um desafio de engenharia em sua implantação e operação. Por terem condutores necessariamente envoltos por blindagens e camadas isolantes (vide Figura 1), além de estarem inseridas em solo condutivo, as implicações das LTS no sistema elétrico diferem da solução por linhas aéreas. Sendo assim, o sistema de transmissão como um todo apresenta especificidades não encontradas nas linhas aéreas, como formas distintas de aterramento e conexão entre as fases e blindagens dos condutores ao longo da rota da LTS.

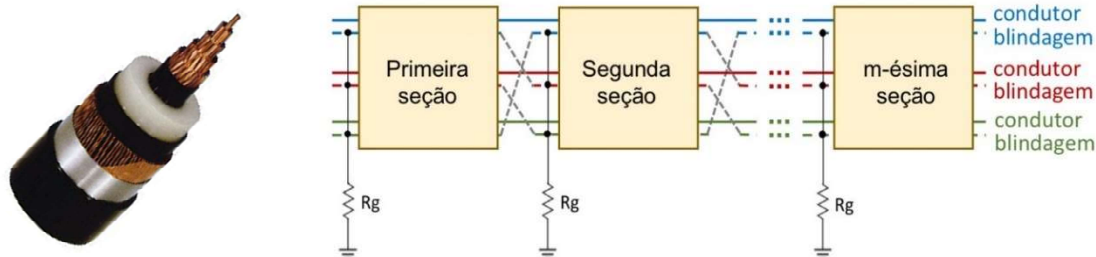


Figura 1 – À esquerda: constituição de um cabo isolado monopolar. À direita: esquema de um sistema trifásico, com configuração *cross-bonding*, sem transposição de fases.

Portanto, a crescente demanda por LTS traz a necessidade de um ferramental computacional prático para auxílio em estudos de planejamento da transmissão e na análise e execução de projetos básicos de LTS e de seus efeitos no sistema elétrico, sempre de acordo com as normas e diretrizes vigentes (2).

O objetivo deste informe é apresentar e exemplificar, em estudos de regime permanente, parte da metodologia computacional do programa CABOS (3), e que pode ser aplicada em estudos de dimensionamento de LTS. O programa possui uma interface gráfica de fácil utilização e traz resultados com muita praticidade, facilitando a análise de alternativas de transmissão e propiciando estudos aprofundados a partir de resultados obtidos por diferentes métodos à escolha do usuário e em função das características do caso. A finalidade do programa é, ao longo do tempo e de futuras implementações, abordar os diversos estudos necessários para o projeto básico de uma LTS, e, portanto, ser um facilitador para o planejamento do sistema elétrico.

O primeiro passo para a definição das características elétricas da LTS, e que consta entre as facilidades do programa CABOS, é o cálculo das impedâncias série (Z) e das admitâncias transversais (Y) por unidade de comprimento da linha. A parcela interna referente aos valores próprios dos cabos isolados é determinada de forma distinta dos condutores nus. Por serem cabos formados por múltiplas camadas tubulares, os parâmetros internos resultam em matrizes quadradas, de dimensão igual ao número de camadas condutoras, através do modelo de Schelkunoff (4). Já para a parcela externa, foram implementadas aproximações numéricas do método de Carson (5) e do método de Pollaczek (6), este considerando a condutividade não nula do meio no entorno da linha. A seção 2.1 ilustra de forma resumida as formulações matemáticas que caracterizam o cálculo destes parâmetros.

Ao se considerar toda a extensão da LTS, deve-se calcular adequadamente as impedâncias e admitâncias (Z_{eq} e Y_{eq}) equivalentes da linha, incluindo todas as conexões existentes, como a transposição de fases e de blindagens e suas formas de aterramento (p.ex. *cross-bonding*). Pois, Z_{eq} e Y_{eq} podem diferir substancialmente das obtidas da modelagem básica que considera apenas Z e Y multiplicadas pelo comprimento da linha, impactando nos resultados da distribuição de tensões e correntes ao longo da LTS e das perdas elétricas nos condutores.

Uma outra facilidade do programa CABOS é o cômputo da capacidade de corrente (ampacidade), tanto em regime permanente e cíclico, como em regime de emergência. O procedimento implementado foi o de aproximações analíticas, constantes nas normas IEC 60287-1-1 (7) e IEC 60853-2 (8), servindo-se das impedâncias equivalentes calculadas pelas metodologias descritas anteriormente.

2.0 – FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS

2.1 – Parâmetros Elétricos de Cabos Isolados por Unidade de Comprimento

Considera-se um sistema composto por n cabos coaxiais de camadas tubulares concêntricas, intercaladamente condutivas e isolantes, podendo haver camadas semicondutoras com efeito limitado à admitância, como ilustrado na Figura 2, à esquerda. À direita da Figura 2 é possível identificar o sistema de coordenadas utilizados para representar um sistema multifásico, contando com i, j cabos subterrâneos.

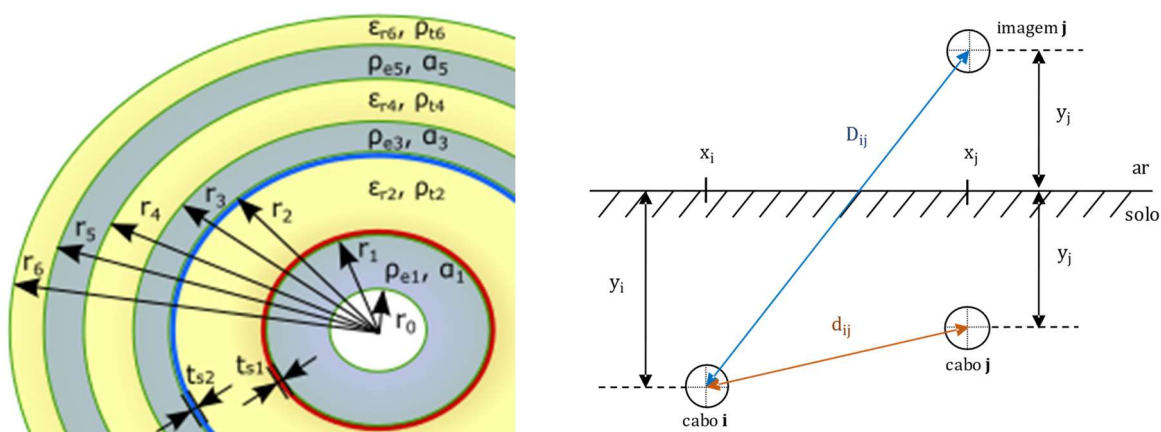


Figura 2 – À esquerda: geometria do cabo, com convenções para as variáveis de entrada para camadas condutoras (ímpares) e isolantes (pares) e espessuras t_{s1} e t_{s2} das camadas semicondutoras no CABOS (3). À direita: Posicionamento espacial de um sistema polifásico de cabos monopolares (*single-core*) subterrâneos.

Impedância interna – Método de Schelkunoff (4), (9) e (10)

A impedância do sistema é $[Z] = [Z_I] + [Z_E]$, uma matriz quadrada de ordem igual ao produto entre o número de fases (n) e o de elementos metálicos de cada cabo. $[Z_I]$ é uma matriz diagonal, formada por submatrizes $[Z_I^n]$, com dimensão igual ao número de elementos metálicos do cabo, calculada nesta seção.

A diagonal principal de $[Z_I^n]$ contém as impedâncias próprias de cada camada condutora e as mútuas entre elas compõem o restante da matriz. Por Schelkunoff, as impedâncias internas próprias e mútuas são dadas por (1) e (2),

$$Z_{cc}^n = Z_{c_{ext}} + Z_i + Z_{c+1_{int}} + Z_{c+1_{ext}} + Z_{i+1} + Z_{c+2_{int}} + Z_{c+2_{ext}} + Z_{i+2} - 2Z_{c+1_m} - 2Z_{c+2_m} \quad (1)$$

$$Z_{c-c'}^n = Z_{c_{ext}} + Z_{i'} + Z_{c'+1_{int}} + Z_{c'+1_{ext}} + Z_{i'+1} - Z_{c'_m} - 2Z_{c'+1_m} \quad (2)$$

sendo c (ou c') a camada condutora considerada, seguida pelas camadas condutoras "c + 1" e "c + 2", de modo que "i + 1" é a camada isolante imediatamente posterior a "c + 1". As impedâncias internas relativas às superfícies externas do condutor, blindagem e armação são calculadas por (3).

$$Z_{c_{ext}} = \frac{\rho_c m_c I_0(m_c r_c) \cdot K_1(m_c r_{i-1}) + K_0(m_c r_c) \cdot I_1(m_c r_{i-1})}{2\pi r_c I_1(m_c r_c) \cdot K_1(m_c r_{i-1}) - I_1(m_c r_{i-1}) \cdot K_1(m_c r_c)} \quad (3)$$

e as relativas às superfícies internas da blindagem e armação, por (4);

$$Z_{c_{int}} = \frac{\rho_c m_c I_0(m_c r_{i-1}) \cdot K_1(m_c r_c) + K_0(m_c r_{i-1}) \cdot I_1(m_c r_c)}{2\pi r_{i-1} I_1(m_c r_c) \cdot K_1(m_c r_{i-1}) - I_1(m_c r_{i-1}) \cdot K_1(m_c r_c)} \quad (4)$$

as impedâncias mútuas entre elementos concêntricos, são dadas conforme (5);

$$Z_{c_m} = \frac{\rho_c}{2\pi r_{i-1} r_c} \frac{1}{I_1(m_c r_c) \cdot K_1(m_c r_{i-1}) - I_1(m_c r_{i-1}) \cdot K_1(m_c r_c)} \quad (5)$$

e as impedâncias das camadas isolantes, por (6).

$$Z_i = j\omega \left(\frac{\mu_0 \mu_{r_i}}{2\pi} \right) \ln \left(\frac{r_i}{r_c} \right) \quad (6)$$

Nestas equações, $m_k = \sqrt{j\omega\mu_0\mu_{r_k}/\rho_k}$ é a constante de propagação da camada k e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade magnética do vácuo. Os símbolos I_0 , I_1 , K_0 e K_1 representam as funções modificadas de Bessel.

Comumente, é conhecida a resistência em corrente contínua por unidade de comprimento do condutor, para uma temperatura fixa (p.ex. 20°C). Para correta representação do cabo coaxial no modelo descrito neste trabalho, deve-se obter a resistividade do condutor à temperatura fixa e corrigi-la para a temperatura de operação (7).

Impedância externa – Método de Pollaczek (6)

A matriz de impedância externa, quadrada e cheia, é formada por submatrizes de ordem igual ao número de elementos metálicos de cada cabo. O método de Pollaczek calcula os elementos da submatriz ij para um sistema em solo suposto homogêneo, cuja interface solo-ar é plana e divide dois meios semi-infinitos, conforme (7),

$$Z_{eij} = \frac{\rho_s m_s^2}{2\pi} \left[K_0(m_s d_{ij}) - K_0(m_s D_{ij}) + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp \left[-(y_i + y_j) \sqrt{\lambda^2 + m_s^2} \right]}{|\lambda| + \sqrt{\lambda^2 + m_s^2}} \exp(j\lambda |x_i - x_j|) d\lambda \right] \quad (7)$$

em que y é a distância entre o cabo e a interface, m_s é a constante de propagação do solo e ρ_s sua resistividade. A variável d_{ij} é a distância entre i e j e D_{ij} , a distância entre i e a imagem de j em relação à interface. No cálculo de componentes próprias (i = j), substitui-se d_{ij} e $|x_i - x_j|$, a distância horizontal entre i e j, pelo raio externo de i.

Tal integral não é de simples resolução e, por isso, o programa conta com aproximações como as expostas a seguir.

Impedância externa – Aproximação de Wedepohl e Wilcox (11)

Além das considerações de Pollaczek, a aproximação de Wedepohl e Wilcox assume que o efeito do cabo sob o solo pode ser substituído pelo efeito de um condutor isolado fino e infinito. Assim, a partir da equação da onda eletromagnética, para cabos com profundidade de ≈ 1 m, distanciamento ≤ 1 m e $|m_s r_{ext}| < 0,25$, chega-se a (8),

$$Z_{eij} = \frac{j\omega\mu_s}{2\pi} \left[-\ln \left(\frac{\gamma m_s d_{ij}}{2} \right) + \frac{1}{2} - \frac{2 m_s (y_i + y_j)}{3} \right] \quad (8)$$

uma expressão correspondente a forma integral de Pollaczek, sendo $\gamma = 0,5772$ a constante de Euler.

Impedância externa – Aproximação de Saad, Gaba e Gironx (12)

Esta aproximação introduz uma variável de integração adimensional à integral de Pollaczek e utiliza a teoria de Cauchy. Com esta substituição, a impedância externa passa a ser calculada por (9).

$$Z_{eij} = \frac{j\omega\mu_s}{2\pi} \left[K_0(m_s d_{ij}) + \frac{2}{4 + m_s^2(x_i - x_j)^2} \exp[-(y_i + y_j) m_s] \right] \quad (9)$$

Admitância interna (10)

A admitância do sistema é $[Y] = j\omega[P]^{-1}$, sendo a matriz dos coeficientes de potencial $[P] = [P_i] + [P_E]$ uma matriz quadrada de ordem igual ao produto entre o número de fases (n) e o de elementos metálicos de cada cabo.

Cada elemento da diagonal principal de $[P_i]$ é uma submatriz $[P_i^n]$ quadrada e cheia, com a dimensão da matriz de impedância interna, e termos ij e ji iguais a soma dos coeficientes das camadas isolantes anteriores até a j-ésima, inclusive. O coeficiente de potencial relativo à camada isolante “i” que segue a camada metálica “c”, é dado por (10),

$$P_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ri}} \ln\left(\frac{r_i}{r_c}\right) \quad (10)$$

sendo ϵ_0 a permissividade do ar e ϵ_{ri} a permissividade relativa da camada isolante, que deve ser corrigida para consideração de camadas semicondutoras (13). Para a camada 2 (vide Figura 2), tem-se (11) ou (12),

$$\epsilon'_{r_2} = \frac{C \ln[(r_2 + t_{s_2})/r_1]}{2\pi\epsilon_0} \quad (11)$$

$$\epsilon'_{r_2} = \epsilon_{r_2} \frac{\ln(r_2/r_1)}{\ln[(r_2 - t_{s_2})/(r_1 + t_{s_1})]} \quad (12)$$

a depender da existência de dados do fabricante sobre a capacitância C do cabo.

Admitância externa

Em estudos de sistemas subterrâneos, a admitância externa é geralmente negligenciada, sendo $[P_E] = [0]$ de acordo com (9). Trabalhos mais recentes, como (14), mostram que há relevância em seus efeitos nos domínios do tempo e da frequência. Por ser extremamente dependente da condutividade do solo e influente apenas a partir de 1 kHz, este trabalho não inclui o cálculo da admitância externa.

2.2 – Capacidade de Corrente de Linhas de Transmissão Subterrâneas

O cálculo da ampacidade em um condutor isolado de resistência elétrica R_e (em Ω) consiste em relacionar a corrente elétrica I (em A) que circula no condutor à temperatura máxima suportada pela isolação, igualando-se as potências elétrica e térmica no condutor, de modo que a capacidade de corrente é obtida por (13).

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R_e T_{eq}}} \quad (13)$$

sendo $\Delta\theta$ a variação de temperatura em K, e T_{eq} a resistência térmica equivalente do sistema em K.m/W.

A variação de temperatura, para regime permanente, é igual a diferença entre a temperatura máxima do material isolante e a temperatura ambiente, considerando a geração de calor devido às perdas no material dielétrico. A resistência elétrica do condutor depende da temperatura e, por isso, a solução pode se tornar iterativa.

O cálculo da resistência térmica equivalente de um sistema subterrâneo depende do nível de tensão e frequência da alimentação, dados geométricos do sistema e do interior dos cabos, da resistividade térmica, capacitância e fator de perdas em cada camada isolante, além do nível de secagem e resistividade térmica do meio externo. As normas IEC (7) e (8) abordam o cálculo desses parâmetros, para determinação da ampacidade em regime permanente, cíclico ou de emergência.

3.0 – DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE

A interface gráfica de usuário, denominada CABOS, foi desenvolvida com o intuito de ser uma ferramenta de fácil utilização, ao mesmo tempo que entrega resultados expeditos, podendo ser utilizada por projetistas e analistas técnicos do setor, sendo útil nas etapas de planejamento e operação de transmissão com cabos isolados. Esta interface foi incorporada como um módulo adicional do Sistema ELEKTRA (15), desenvolvido no CEPEL, em conjunto com demais ferramentas que auxiliam no estudo e projeto de linhas de transmissão, sempre de acordo com as normas e procedimentos vigentes.

A Figura 3 apresenta a interface inicial do programa. A barra superior de Menu contém diversas ferramentas que auxiliam a inserção dos parâmetros construtivos do cabo e do respectivo sistema de transmissão, bem como a possibilidade de escolha dos métodos utilizados nos cálculos. Além disso, é possível salvar o caso atual e carregar estudos previamente realizados, além de encontrar os botões de execução do programa, para geração do relatório, para o acesso aos manuais de uso do programa, entre outras facilidades. Na parte à esquerda da janela, são encontrados os diversos campos onde são carregados os dados de entrada, e na parte à direita os resultados de saída do programa. Dentre os resultados, têm-se as matrizes Z e Y primitivas, os parâmetros de sequência (longitudinais e transversais) e os valores de capacidade de corrente e perdas (em regime permanente, cíclico ou emergência), cujos cálculos foram abordados na seção anterior.

A interface e os módulos de cálculo foram implementados em linguagem de programação Java, utilizando-se do formato XML para salvamento de arquivos e do formato HTML para geração de relatórios automáticos, com um descritivo geral do procedimento de cálculo. O tempo de execução para a determinação dos resultados e geração do relatório é de poucos segundos, utilizando-se microcomputadores de escritório.

Figura 3 – Interface principal do programa CABOS (3).

4.0 – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 – Caso LTS Dinamarca:

O trecho subterrâneo do sistema de transmissão em 150 kV, 50 Hz, construída na costa oeste da Dinamarca possui 57,7 km de extensão, divididos em 11 seções de transposição completa de blindagens (*cross-bonding*). Os cabos do sistema possuem duas camadas metálicas, constituídas de cobre e alumínio, duas camadas isolantes e 90 mm de diâmetro e são dispostos em trifólio à profundidade média de 1,26 m em um solo com resistividade de 100 $\Omega \cdot m$.

Em (2) as impedâncias das sequências positiva e zero foram obtidas por medição, já em (16), por modelagem no programa ATP, arbitrando o material da cobertura como polietileno de alta durabilidade. Além das componentes de sequência, (16) apresenta a seguinte matriz primitiva Z (em m Ω /km), obtida pelo ATP (17) e (18):

$$\begin{bmatrix} 75,8 + j688,7 & 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 & 49,4 + j630,2 & 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 \\ 49,2 + j577,1 & 75,8 + j688,7 & 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 & 49,4 + j630,2 & 49,2 + j577,1 \\ 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 & 75,8 + j688,7 & 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 & 49,4 + j630,2 \\ 49,4 + j630,2 & 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 & 188,0 + j628,7 & 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 \\ 49,2 + j577,1 & 49,4 + j630,2 & 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 & 188,0 + j628,7 & 49,2 + j577,1 \\ 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 & 49,4 + j630,2 & 49,2 + j577,1 & 49,2 + j577,1 & 188,0 + j628,7 \end{bmatrix}$$

Em comparação, a matriz Z obtida pelo CABOS (Figura 4) foi bastante próxima à referência. Observa-se uma diferenças máximas de 0,64 % e 0,17 % em resistências e indutâncias próprias e 0,40 % e 0,017 % em resistências e indutâncias mútuas.

A Tabela 1 mostra a comparação entre as impedâncias de sequência obtidas no CABOS, em detalhe na Figura 4, e os resultados das referências. Obtém-se uma boa concordância com os resultados de ambas as referências, especialmente a modelagem ATP. Observa-se que neste trabalho, para redução da matriz primitiva em componentes simétricas, o sistema é considerado com transposição ideal (trechos igualmente espaçados) e aterramento ideal das blindagens. Variações consideráveis poderiam ser obtidas, especialmente nas impedâncias de sequência zero, em caso de considerações mais detalhadas do sistema de aterramento, tema este de futuras investigações dos autores.

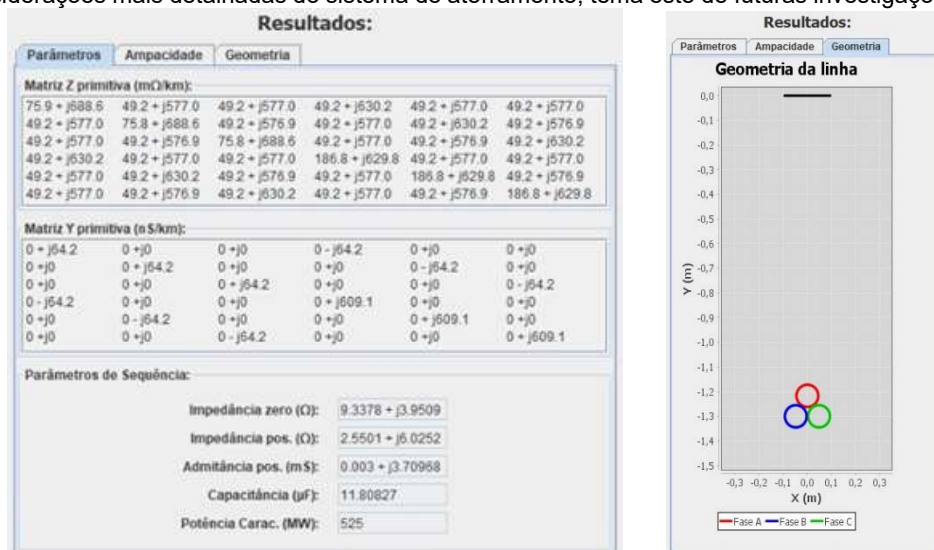


Figura 4 – Abas de Resultados da “LTS Dinamarca” na interface do programa CABOS: à esquerda os parâmetros (matrizes primitivas e componentes de sequência) e à direita um gráfico do posicionamento espacial dos cabos.

Tabela 1 – Impedâncias e Admitâncias de sequência, para o comprimento total da “LTS Dinamarca”.

	Valores Medidos, em (2)	Modelagem ATP, em (16)	Programa CABOS
Impedância de sequência zero (Ω)	9,271 + j3,884	9,439 + j3,806	9,338 + j3,951
Impedância de sequência positiva (Ω)	1,885 + j6,610	2,565 + j6,050	2,550 + j6,025
Admitância de sequência positiva (mS)		0,003 + j3,703	0,003 + j3,7097

4.2 – Caso LTS Curitiba 230kV:

A Linha de Transmissão Subterrânea 230 kV, 60 Hz, em Curitiba, é um circuito duplo, sendo os cabos isolados de cada circuito dispostos em dutos individuais de modo vertical espaçado. Os circuitos trifásicos são instalados em reaterro a uma profundidade média de 1,5 m da superfície do solo. A LTS possui comprimento total de 7,8 km, em 3 seções de transposição completa de blindagens (*cross-bonding*). Os cabos do sistema possuem três camadas metálicas, três isolantes e duas semicondutoras, com 1200 mm² de seção nominal.

Os resultados de (19) foram obtidos por formulações matemáticas aproximadas para as impedâncias próprias e mútuas, considerando a transposição de blindagens. A Tabela 2 permite a comparação das impedâncias e admitâncias de sequência obtidas no CABOS, a partir da modelagem de circuito simples com aqueles calculados em (19). A concordância entre os resultados é visível, sendo as diferenças percentuais de 0,56% e 8,91% para resistência e indutância de sequência zero, 0,03% e 1,62% para resistência e indutância de sequência positiva e de 0,04% para susceptância de sequência positiva, respectivamente. Esta maior discrepância na indutância de

sequência zero é explicada pelo efeito do acoplamento mútuo com o segundo circuito ter sido negligenciado, por simplificação realizada neste estudo em considerar apenas o sistema como circuito simples.

Tabela 2 – Impedâncias e Admitâncias de sequência, para o comprimento total da LTS Curitiba 230kV.

	Calculados em (19)	Programa CABOS
Impedância de sequência zero (Ω)	0,94418 + j0,72067	0,9389 + j0,6564
Impedância de sequência positiva (Ω)	0,24887 + j1,91685	0,2488 + j1,8858
Admitância de sequência positiva (μS)	j599,99	j600,25

5.0 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

5.1 – Influência da contra transposição de fases, da resistência do condutor e da distância entre cabos consecutivos sobre a resistência de potência positiva, considerando blindagens transpostas – Sistema de 220 kV

Uma instalação 220 kV, 60 Hz, instalada na Espanha, é avaliada por (20) e (21) com o objetivo de comparar os efeitos do *cross-bonding* envolvendo somente blindagens com a alternativa de incluir uma contra transposição de fases, isto é, a transposição dos condutores com sentido de rotação oposto ao das blindagens. O sistema de 1 km de extensão dividido em três seções de transposição completa é composto por três cabos dispostos horizontalmente e espaçados de 0,425 m, cada um com duas camadas metálicas, duas isolantes e duas semicondutoras, sendo o raio do condutor de 28 mm e o raio externo de 63 mm.

Tabela 3 – Impedâncias de sequência, para o comprimento total do Sistema de 220 kV

	Calculado em (20)	Programa CABOS
Impedância de sequência zero, fases não transpostas (Ω)	0,1022 + j0,0752	0,1028 + j0,0739
Impedância de sequência positiva, fases não transpostas (Ω)	0,0158 + j0,2412	0,0159 + j0,2385
Impedância de sequência zero, fases contra transpostas (Ω)	0,1022 + j0,0752	0,1028 + j0,0739
Impedância de sequência positiva, fases contra transpostas (Ω)	0,0187 + j0,2357	0,0188 + j0,2329

Os resultados da Tabela 3 permitem observar diferenças percentuais máximas da ordem de 0,6 % para as resistências e de 1,7 % para as indutâncias. Ademais, nota-se que apenas a impedância de sequência positiva sofre os efeitos da inclusão da transposição de fases, em especial a resistência de sequência positiva, que se eleva em 18 %, enquanto a indutância é reduzida em 2,3 %.

Isto posto, foi realizada uma análise da variação da resistência de sequência positiva para ambos os casos: com condutores transpostos e não transpostos, a fim de avaliar os efeitos decorrentes da variação da distância entre condutores consecutivos (0,126 m a 1 m) e da resistência dos condutores (0,01 Ω/km a 0,08 Ω/km). A Figura 5 mostra consenso entre os resultados de (21) e o programa CABOS. Quando incluída a contra transposição de fases, as diferenças percentuais máximas foram de 0,47 % para resistência do condutor igual a 0,04 Ω/km e de 0,8 % com os condutores distantes de 0,2 m. Para o caso com fases não transpostas, a resistência de sequência positiva não se alterou com a distância entre condutores, sendo mantida uma diferença percentual de 0,2 %.

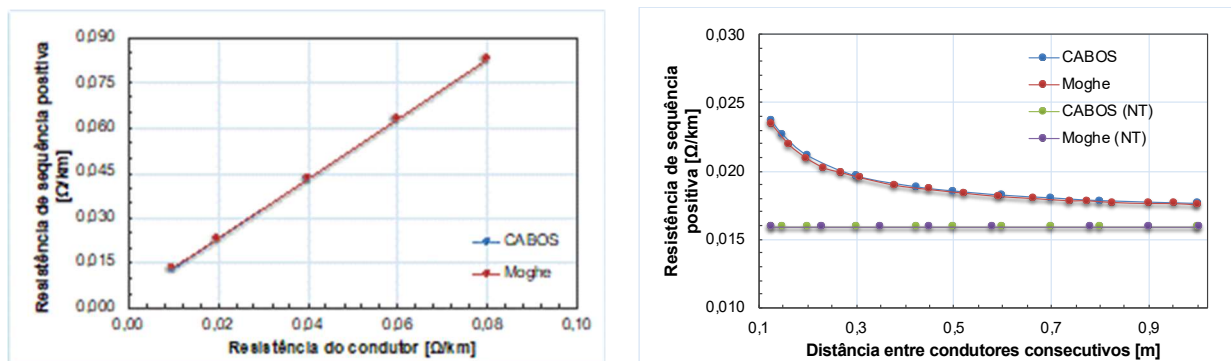


Figura 5 – Análise paramétrica da resistência de sequência positiva do sistema de 220 kV com *cross-bonding* e contra-transposição de fases: à esquerda considerando a resistência dos condutores entre 0,01 e 0,08 Ω/km e à direita com variação da distância entre condutores de 0,126 a 1 m, incluindo o caso com fases não transpostas.

5.2 – Influência da profundidade e da resistividade térmica do solo sobre a ampacidade: Sistema de 400 kV

O sistema subterrâneo trifásico de 400 kV e 60 Hz analisado em (20) tem cabos dispostos horizontalmente e espaçados de 50 cm entre si em solo homogêneo à 25°C. Inicialmente, a resistividade térmica do solo é de 1,0 K.m/W

e os cabos estão enterrados a 1,8 m da superfície. A análise realizada no CABOS considera, em cada cabo, o condutor central constituído de cobre com 2000 mm² e raio de 29 mm, seguido por uma isolamento em papel de resistividade térmica de 7,5 K.m/W e blindagem de alumínio, com raios de 47,3 mm e 57 mm, respectivamente, além de camadas semicondutoras de 0,3 mm e cobertura em polietileno, totalizando 63 mm de raio externo.

Considerando os efeitos pelicular e de proximidade, perdas resistivas e dielétricas e desprezando as perdas por correntes parasitas, calculou-se a ampacidade nas condições de instalação descritas restringindo-se a temperatura interior do cabo a 85 °C. A Tabela 4 indica os resultados do programa CABOS em comparação com os de (20), obtidos por simulação no programa computacional da ANSYS, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), e pelo padrão da IEC 60287, sendo observadas diferenças percentuais de 0,25% e 0,10%, respectivamente.

Tabela 4 – Ampacidade para as condições iniciais do sistema de 400 kV.

	MEF (20)	IEC (20)	Programa CABOS
Ampacidade (A)	1363	1365	1366,34

A partir do caso inicial foram analisados os efeitos da variação da profundidade do sistema entre 0,15 m e 5,0 m e da resistividade térmica do solo entre 0,5 K.m/W e 3,0 K.m/W. A Figura 6 mostra os resultados destas análises. As curvas permitem verificar a equivalência entre as análises paramétricas obtidas pelo CABOS e as obtidas em (20) por meio do MEF. A variação com a profundidade e análise com diferentes resistividades térmicas do solo levaram a diferenças percentuais máximas de aproximadamente 1 % e 4 %, respectivamente. A discrepância mostrou-se mais acentuada para maiores valores de resistividade térmica do solo, já que dados relevantes como resistividades térmicas dos materiais isolantes não foram especificados em (20), tendo sido arbitrados.

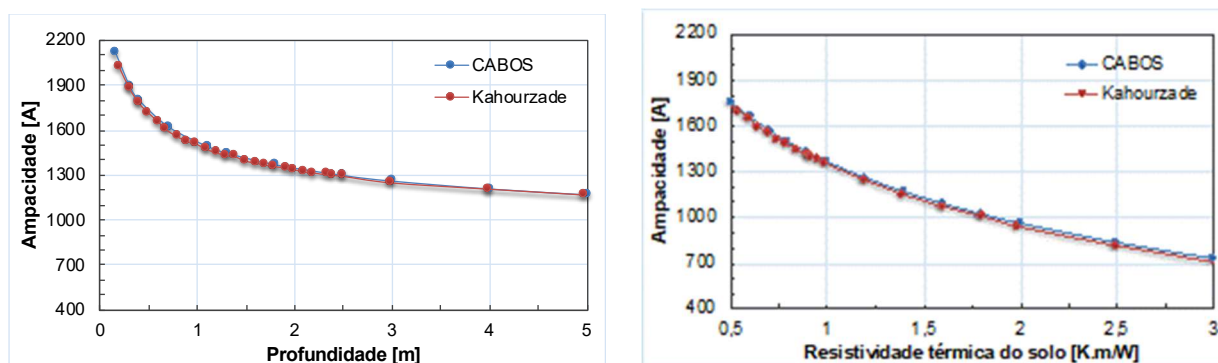


Figura 6 – Análise paramétrica da ampacidade do sistema de 400 kV: à esquerda com a variação da profundidade entre 0,15 m e 5 m e à direita considerando valores de resistividade térmica do solo entre 0,5 K.m/W e 3,0 K.m/W.

6.0 – CONCLUSÕES

Após a realização da validação dos resultados e das análises paramétricas, pode ser observado que o programa CABOS apresentou respostas aderentes às referências selecionadas. Todas as simulações foram praticamente instantâneas, ilustrando-se a praticidade do programa computacional desenvolvido, em comparação com a utilização de modelagem em programas como ATP ou por métodos numéricos, como MEF. Portanto, o ferramental aqui desenvolvido aborda uma grande parcela dos dados elétricos necessários para o projeto básico da LTS, e segue aberto para incorporação de outras metodologias e cálculo de demais parâmetros pertinentes.

Futuros desenvolvimentos, planejados para incorporação às funcionalidades do programa, incluem o cálculo de:

- Avaliação do efeito da diferença de temperaturas entre cada condutor nas matrizes de impedância;
- Parâmetros elétricos de sequência equivalentes a todo o comprimento da LTS, considerando automaticamente efeitos de transposição dos cabos e das blindagens, de aterramento das blindagens, e que podem ser utilizados diretamente em programas para cálculo em regime transitório (EMTP/ATP) ou em programas para cálculo em regime permanente, do tipo para análises de redes elétricas;
- Impacto da resistência de aterramento, da variação de temperatura, do material dos cabos, da transposição das blindagens etc, nos parâmetros de sequência e nas perdas elétricas;
- Campo eletromagnético no entorno da LTS, e correlação deste com valores limites recomendados e ajuste ótimo do posicionamento espacial da LTS;
- Estimativa do custo de instalação do empreendimento ao longo da vida econômica da LTS.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS (ORGANIZAR)

- (1) ALMEIDA, J.H.M., CARVALHO JR, D.S., LIMA, S.F.F., SCHMIDT, F., CARVALHO, C.B.C. Linhas de transmissão com cabos isolados de alta e extra alta tensão no Brasil: uma realidade com demanda crescente. XXV SNPTEE - Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica. Belo Horizonte, 2019.
- (2) ONS. Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – Estudos Elétricos, Especificações das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão.
- (3) CEPEL. Elektra-CABOS: Cálculo de Parâmetros e Ampacidade de Cabos Isolados. Versão 1.5.5, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, out. 2021.
- (4) SCHELKUNOFF, S. A., The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields, The Bell System Technical Journal, v. 13, n. 4, p. 532-579, out. 1934.
- (5) CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *The Bell System Technical Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 539-554, out. 1926.
- (6) POLLACZEK, F., "Über das Feld einer unendlich langen wechsel-stromdurchflossenen Einfachleitung", Elektrische Nachrichten-Technik, v. 3, n. 9, p. 339-360, jul. 1926.
- (7) IEC 60287-1-1:2006 – Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General. IEC, 2006.
- (8) IEC 60853-2:1989 / AMD1:2008 – Amendment 1 – Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables – Part 2: Cyclic Rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency rating for cables of all voltages. IEC, 1989.
- (9) CIGRE Working Group B1.30. Technical Brochure 531: Cable Systems Electrical Characteristics. ISBN: 978-2-85873-225-8. Cigré, abr. 2013.
- (10) AMETANI, A., A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-99, n. 3, p. 902-910, mai./jun. 1980.
- (11) WEDEPOHL, L.M. e WILCOX, D.J. Transient Analysis of Underground Power-Transmission Systems – System-Model and Wave Propagation Characteristics, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, fev. 1973.
- (12) SAAD, O., GABA, G., GIROUX, M. A Closed-Form Approximation for Ground Return Impedance of Underground Cables. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, julho 1996.
- (13) GUSTAVSEN, B. Panel Session on Data for Modeling System Transients Insulated Cables, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), fev. 2001.
- (14) MAGALHÃES, A. P. C.; CORREIA DE BARROS, M. T.; LIMA, A. C. S., Earth Return Admittance Effect on Underground Cable System Modeling, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 33, n. 2, p. 662-670, abr. 2018.
- (15) SALARI, J. C. The ELEKTRA computational system - Integration of mathematical models for the optimized design of transmission lines with conventional and unconventional bundled conductors methodologies. X SEPOPE, Florianópolis, Brasil, 2006.
- (16) SOUZA, G. M. Impacto da modelagem de cabos isolados com cruzamento de blindagens na avaliação de corrente de curto-circuito. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- (17) HOIDALEN, H. K. ATPDraw – The graphical preprocessor to ATP. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net>>. Acesso em setembro de 2021.
- (18) Leuven EMTP Center (LEC). Alternative Transients Program (ATP) Rule Book. Julho 1987.
- (19) ROSAS, G.B., MIGUEL, P.M., GONÇALVES, M.M., OLIVEIRA F.G., OLIVEIRA JR, H.P., OLIVEIRA, V.R., MIKILITA, M.A.S., SHIMOMURA, J. Desafios da modelagem no ATP dos parâmetros elétricos da LT 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo subterrâneo. XXV SNPTEE - Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica. Belo Horizonte, 2019.
- (20) LEÓN, F., MÁRQUZ-ASENSIO, M. L., ÁLVAREZ-CORDERO, G. Effects of Conductor Counter-Transposition on the Positive-Sequence Impedance and Losses of Cross-Bonded Cables, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, n. 3, p. 2060-2063, jul. 2011.
- (21) MOGHE, P., LEON, F. Parametric Study of Losses in Cross-Bonded Cables: Conductors Transposed Versus Conductors Nontransposed, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 28, n. 4, p. 2273-2281, out. 2013.
- (22) KAHOURZADE, S., MAHMOUDI A., NIM TAJ B., PALIZBAN O. Ampacity Calculation of the Underground Power Cables in Voluntary Conditions by Finite Element Method.

DADOS BIOGRÁFICOS



Arthur Linhares Esteves dos Reis é pesquisador do Departamento de Gestão de Ativos (DGA) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), desde 2014, trabalhando na área de otimização de projetos de linhas de transmissão. Possui mestrado em Sistemas de Energia pela Coppe/UFRJ (2018) e graduação em Engenharia Elétrica pela UFJF (2014). Participou de intercâmbio pelo Ciência sem Fronteiras na Universidade de Brunel, Reino Unido (2012/13). Foi bolsista de iniciação científica, dando continuação ao estágio na Universidade de Uppsala, Suécia (2012). Foi bolsista do Programa de Educação Tutorial - PET (2010/12).

(2) ANNY DE ALMEIDA SILVEIRA DOS SANTOS

Mestra em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ (2019), possui graduação em Engenharia Industrial Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (2015). Atualmente é bolsista do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica e cursa o doutorado no Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ.

(3) CARLOS KLEBER DA COSTA ARRUDA

Formado em Engenharia Industrial Elétrica pelo CEFET-RJ (1999), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFRJ (2003, 2012). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel). Tem experiência em pesquisa de modelos computacionais aplicados em linhas de transmissão e equipamentos, campos eletromagnéticos, aterramento, descargas atmosféricas e confiabilidade aplicada a subestações.

(4) JOÃO CLAVIO SALARI FILHO

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1988), e mestrado (1993) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), com experiência na área de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, especialmente em: cálculo bidimensional e tridimensional de campos e transitórios eletromagnéticos; linhas de transmissão em CA/CC convencionais e não convencionais (LPNE, LNC); subestações de energia elétrica; aterramento elétrico em regime de baixa e alta frequência; análise técnico-econômica de transmissão de energia; propagação de descargas atmosféricas; e ampacidade e efeito corona em condutores.