



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

DESAFIOS DA MODELAGEM NO ATP DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DA LT 230 KV CURITIBA CENTRO – UBERABA, CIRCUITO DUPLO SUBTERRÂNEO

**GRACITA BATISTA ROSAS(1); PABLO MOURENTE MIGUEL(2); MARCELO MENDONÇA GONÇALVES(3);
FABIO GABRIEL DE OLIVEIRA(4); HELIO PESSOA DE OLIVEIRA JUNIOR(5); VENILTON RODRIGUES DE
OLIVEIRA(3); MIGUEL ARMINDO SALDANHA MIKILITA(6); JEFERSON SHIMOMURA(7);
COPEL(1);TgDelta(2);JORDÃO ENG.(3);PRYSMIAN(4);ONS(5);COPEL(6);COPEL(7);**

RESUMO

Neste informe técnico são apresentados os desafios encontrados na reprodução na ferramenta computacional ATP dos parâmetros elétricos da linha de transmissão 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo subterrâneo determinados por formulação matemática. Entre estes desafios estão a correta modelagem de todas as camadas que compõem os cabos isolados e do sistema de aterramento, além da investigação dos modelos da rotina Cable Constants a fim de evitar oscilações numéricas no processo de convergência do ATP. As análises relacionadas a esses desafios foram realizadas na etapa de projeto básico deste novo ativo de transmissão do sistema interligado nacional.

PALAVRAS-CHAVE

Linha Subterrânea, Parâmetros Elétricos, Sistema de Aterramento

1.0 - INTRODUÇÃO

O planejamento da expansão de sistemas de transmissão em grandes centros urbanos tem considerado Linhas de Transmissão Subterrâneas (LTS) e subestações isoladas a gás SF₆, em função da necessidade de otimizar espaços físicos para construção desses ativos. Essa consideração foi seguida no empreendimento de transmissão que contempla a subestação Curitiba Centro 230 kV isolada a gás SF₆ e a LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, em circuito duplo, de aproximadamente 8 quilômetros, motivado pelo crescimento da demanda na cidade de Curitiba.

Conforme preconizam as Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão, definidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, foi elaborado o Projeto Básico deste empreendimento de transmissão. Esse projeto contempla entre outras análises, os estudos de transitórios eletromagnéticos, com o objetivo principal de identificar as solicitações de tensões e correntes impostas à nova linha de transmissão e à nova subestação, bem como à rede existente e aos equipamentos vizinhos e quando necessário, propor medidas mitigatórias para atenuar essas solicitações.

Dentro de um cenário com predomínio de linhas de transmissão aéreas e subestações convencionais, este artigo tem como objetivo apresentar os desafios encontrados na modelagem dos parâmetros elétricos da LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo, no programa Alternative Transients Program (ATP). Esta modelagem foi necessária para inserção desta linha e seus ativos associados ao equivalente do Sistema Interligado Nacional a fim de realizar os estudos de transitórios eletromagnéticos.

O primeiro passo na definição dos parâmetros elétricos da linha consistiu da utilização de formulação matemática, conduzida pela expertise do fabricante dos cabos isolados. O segundo passo, e de maior desafio, consistiu em reproduzir os valores alcançados por formulação matemática no programa computacional ATP.

Foi necessária uma série de avaliações e adaptações na rotina Cable Constants do ATP para reprodução dos referidos parâmetros. Primeiramente foi explorado o modelo JMarti desta rotina, que apresenta a variação dos parâmetros elétricos dos cabos isolados em função da variação da frequência, porém este modelo apresentou oscilações numéricas, motivadas pela representação dos condutores e das blindagens de seis cabos isolados, necessários para representar o circuito duplo da referida linha.

Para contornar essa dificuldade foi analisado o comportamento dos parâmetros elétricos da linha em função da frequência e a partir dessa análise identificou-se que na vizinhança de 5 kHz esses parâmetros apresentaram um comportamento linear. Com base na definição desta frequência, a utilização do modelo de Bergeron para a frequência de 5 kHz apresentou resultados satisfatórios na obtenção dos parâmetros da linha.

Ainda na rotina Cable Constants foram necessárias adaptações na representação da blindagem em função da formação helicoidal, além de adaptações na representação do condutor em função da formação segmentada, bem como a necessidade da representação das capacitâncias da camada semicondutora dos cabos isolados.

Os resultados alcançados para os parâmetros elétricos da linha de transmissão, objeto de estudo, com as adaptações anteriormente citadas, na rotina Cable Constants do ATP se aproximaram de forma satisfatória daqueles parâmetros alcançados por formulações matemáticas. As diferenças percentuais entre os valores alcançados por formulação matemática e pelo ATP foram inferiores a 1%. A exceção ficou por conta da resistência própria da blindagem que alcançou um valor menor e mais acentuado que o valor determinado por formulação matemática. Essa diferença percentual não preocupou devido ao fato da resistência se apresentar com valor menor em relação aquele alcançado por formulação matemática, evitando com isso possíveis atenuações de fenômenos importantes. Os valores alcançados no ATP também se aproximaram dos valores alcançados em ensaios realizados pelo fabricante dos cabos isolados. O sistema de aterramento cross-bonding também é considerado na modelagem da linha.

O sucesso da modelagem da LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo, foi atingido com o trabalho conjunto entre o fabricante dos cabos isolados, uma consultoria experiente no assunto, o operador nacional do sistema e a transmissora detentora do ativo de transmissão e pode servir de material de apoio para empreendimentos similares.

2.0 - PARÂMETROS ELÉTRICOS LTS – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O primeiro passo para determinar os parâmetros das LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, circuito duplo, é definir a disposição dos cabos isolados. A Figura 1 ilustra o corte típico da instalação das 3 fases de cada circuito no banco de dutos da linha.

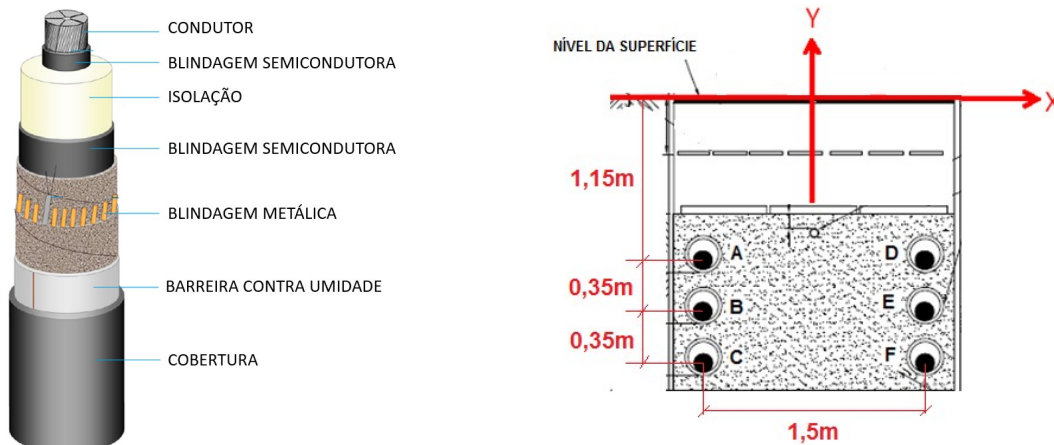


FIGURA 1 – Corte Típico do banco de dutos da LTS

Os cálculos das impedâncias baseiam-se nos modelos aproximados descritos em (1). A impedância própria do condutor do cabo i , com retorno pelo solo, pode ser calculada através da equação (1):

$$Z_{cc_i} = R_{ca} + \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \cdot Y_i \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_0}} + j \cdot \left(\ln \left(\frac{D_0}{RMG} \right) - \frac{4}{3} \cdot Y_i \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_0}} \right) \right] \cdot 10^3 (\Omega / km) \quad (1)$$

Nesta equação, o termo R_{ca} refere-se à resistência do condutor em corrente alternada à temperatura de 90°C, a qual é considerada constante e igual para todos os cabos com valor de 0,03191 Ω/km . O termo Y_i corresponde à distância do cabo i em relação ao nível da superfície. O termo RMG corresponde ao raio médio geométrico do condutor, o qual é considerado constante para todos os cabos com valor de 0,017m. Para os parâmetros elétricos do solo, foram adotados permeabilidade magnética μ_0 igual a 0,000001257 H/m, resistividade elétrica ρ_0 igual a 100 $\Omega \cdot m$ e distância equivalente de retorno D_0 igual a 852m.

Já a impedância própria da blindagem metálica do cabo i , com retorno pelo solo, é dada pela equação (2):

$$Z_{bb_i} = R_b + \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \left[\frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \cdot Y_i \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_0}} + j \cdot \left(\ln \left(\frac{D_o}{R_{mb}} \right) - \frac{4}{3} \cdot Y_i \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_0}} \right) \right] \cdot 10^3 (\Omega/km) \quad (2)$$

O termo R_b refere-se à resistência da blindagem metálica à temperatura de 80°C, a qual é considerada constante e igual para todos os cabos com valor de 0,0909 Ω/km . O termo R_{mb} corresponde ao raio médio da blindagem metálica, constante para todos os cabos com valor de 0,05027m.

A impedância mútua entre o condutor e a blindagem metálica do cabo i é determinada pela equação (3):

$$Z_{cb_i} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \left[\frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \cdot Y_i \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_0}} + j \cdot \left(\ln \left(\frac{D_o}{R_{mb}} \right) - \frac{4}{3} \cdot Y_i \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_0}} \right) \right] \cdot 10^3 (\Omega/km) \quad (3)$$

Por sua vez, as impedâncias mútuas entre cabos i e j , ou seja, impedâncias mútuas entre condutores, impedâncias mútuas entre blindagens e impedâncias mútuas entre condutores e blindagens, considerando o retorno pelo solo, são calculadas através da equação (4):

$$Z_{m_{i,j}} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \left[\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \cdot (Y_i + Y_j) \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_0}} + j \cdot \left(\ln \left(\frac{D_o}{D_{ij}} \right) - \frac{2}{3} \cdot (Y_i + Y_j) \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_0}} \right) \right] \cdot 10^3 (\Omega/km) \quad (4)$$

O termo D_{ij} refere-se a distância entre centros dos cabos i e j , dada em metros.

Uma vez determinadas as impedâncias da LTS circuito duplo, o próximo passo é montar as matrizes de impedâncias do sistema, conforme equação (5).

$$([\Delta V] \quad |c|[\Delta V_b]) = \left([Z] \quad |ccT| [Z_{cbT}] [Z_{bb}] \right) \cdot ([I] \quad |c|[I_b]) \quad (5)$$

Na equação (5), $[\Delta Vc]$ e $[\Delta Vb]$ referem-se às matrizes de queda de tensão nos condutores e blindagens metálicas respectivamente, dadas em Volts, sendo ambas compostas por 6 linhas e 1 coluna. Já as matrizes $[Ic]$ e $[Ib]$ referem-se às matrizes de corrente circulante nos condutores e blindagens metálicas respectivamente, dadas em Ampéres, sendo também compostas por 6 linhas e 1 coluna. Por sua vez, $[Z] \quad |ccT|, [Z_{cbT}]$ e $[Z_{bb}]$ correspondem respectivamente às matrizes das impedâncias dos condutores transpostos, impedâncias mútuas entre condutores transpostos e blindagens e impedâncias das blindagens, dadas em Ω/km , sendo todas compostas por 6 linhas e 6 colunas.

A Figura 2 representa o diagrama de aterramento cross-bonding dos circuitos da linha, onde as posições dos condutores se alteram devido as transposições dos cabos, enquanto as blindagens metálicas dos mesmos são mantidas na mesma posição geométrica ao longo de todo o circuito.

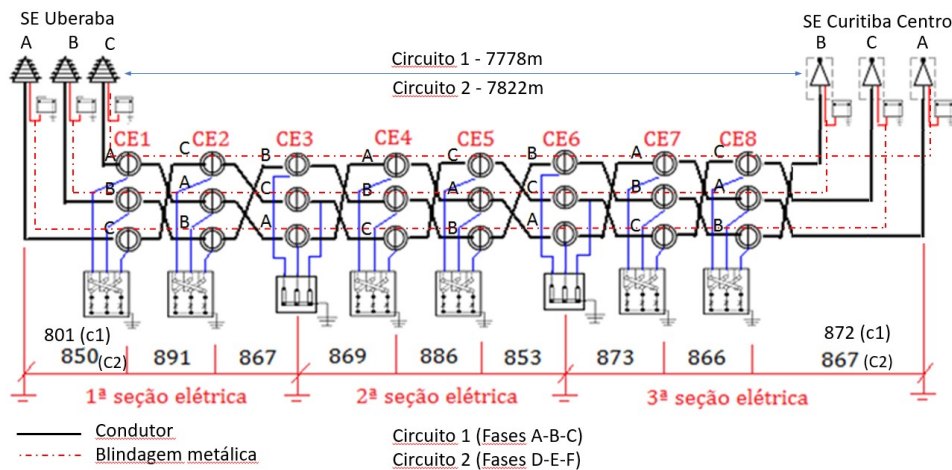


FIGURA 2 – Diagrama de aterramento cross-bonding

As matrizes das impedâncias $[Z] \quad |ccT|$ e $[Z_{cbT}]$ da linha podem ser determinadas pela equação 6. Nesta equação, o ponderamento das impedâncias é dado apenas pela transposição de uma seção elétrica e não considera o comprimento de cabos. Isso é devido ao fato das transposições se repetirem a cada seção elétrica e, também, pelo fato dos 3 comprimentos de cabos serem próximos dentro de cada seção elétrica.

$$[Z] \quad |xT] = \begin{pmatrix} Z_{xA} & Z_{mAB} & Z_{mAC}Z_{mAD} & Z_{mAE} & Z_{mAF} \\ Z_{mAB} & Z_{xB} & Z_{mBC}Z_{mBD} & Z_{mBE} & Z_{mBF} \\ Z_{mAC} & Z_{mBC} & Z_{xC} & Z_{mCD} & Z_{mCE} \\ Z_{mAD} & Z_{mBD} & Z_{mCD} & Z_{xD} & Z_{mDE} \\ Z_{mAE} & Z_{mBE} & Z_{mCE}Z_{mDE} & Z_{xE} & Z_{mEF} \\ Z_{mAF} & Z_{mBF} & Z_{mCF}Z_{mDF} & Z_{mEF} & Z_{xF} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{xC} & Z_{mAC} & Z_{mBC}Z_{mCF} & Z_{mCD} & Z_{mCE} \\ Z_{mAC} & Z_{xA} & Z_{mAB}Z_{mAF} & Z_{mAD} & Z_{mAE} \\ Z_{mBC} & Z_{mAB} & Z_{xB} & Z_{mBF} & Z_{mBD} \\ Z_{mCF} & Z_{mAF} & Z_{mBF} & Z_{xF} & Z_{mFD} \\ Z_{mCD} & Z_{mAD} & Z_{mBD}Z_{mDF} & Z_{xD} & Z_{mDE} \\ Z_{mCE} & Z_{mAE} & Z_{mBE}Z_{mEF} & Z_{mDE} & Z_{xE} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{xB} & Z_{mBC} & Z_{mAB}Z_{mBE} & Z_{mBF} & Z_{mBD} \\ Z_{mBC} & Z_{xC} & Z_{mAC}Z_{mCE} & Z_{mCF} & Z_{mCD} \\ Z_{mAB} & Z_{mAC} & Z_{xA} & Z_{mAE} & Z_{mAF} \\ Z_{mBE} & Z_{mCE} & Z_{mAE} & Z_{xE} & Z_{mEF} \\ Z_{mBF} & Z_{mCF} & Z_{mAF}Z_{mEF} & Z_{xF} & Z_{mDF} \\ Z_{mBD} & Z_{mCD} & Z_{mAD}Z_{mDE} & Z_{mDF} & Z_{xD} \end{pmatrix} \quad (\Omega/km) \quad (6)$$

Onde o índice x é substituído por cc e cb, respectivamente, na determinação das matrizes das impedâncias $[Z] \quad |ccT]$ e $[Z_{cbT}]$.

Por sua vez, a matriz de impedâncias das blindagens metálicas $[Z_{bb}]$ da linha é dada por (7):

$$[Z] \quad |bb] = \begin{pmatrix} Z_{bbA} & Z_{mAB} & Z_{mAC}Z_{mAD} & Z_{mAE} & Z_{mAF} \\ Z_{mAB} & Z_{bbB} & Z_{mBC}Z_{mBD} & Z_{mBE} & Z_{mBF} \\ Z_{mAC} & Z_{mBC} & Z_{bbC} & Z_{mCE} & Z_{mCF} \\ Z_{mAD} & Z_{mBD} & Z_{mCD} & Z_{mDE} & Z_{mDF} \\ Z_{mAE} & Z_{mBE} & Z_{mCE}Z_{mDE} & Z_{bbE} & Z_{mEF} \\ Z_{mAF} & Z_{mBF} & Z_{mCF}Z_{mDF} & Z_{mEF} & Z_{bbF} \end{pmatrix} \quad (\Omega/km) \quad (7)$$

Para o sistema com aterramento cross-bonding, as quedas de tensão nas blindagens são nulas, logo $\Delta V_b = 0$. Substituindo este valor na matriz de impedâncias do sistema (5), isolando I_b e isolando $\Delta V_c/I_c$, tem-se a matriz das impedâncias após a eliminação dos componentes aterrados Z , conforme equação (8).

$$Z = Z_{ccT} - Z_{cbT} \cdot Z_{bb}^{-1} \cdot Z_{cbT} \quad (\Omega/km) \quad (8)$$

Por fim, a matriz das impedâncias de sequência é determinada pela equação (9):

$$z = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} Z \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (\Omega/km) \quad (9)$$

Onde: $\alpha = -0.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}$

As impedâncias de sequência zero, sequência positiva e sequência negativa dos circuitos são obtidas da diagonal principal da matriz Z. A tabela 1 apresenta os valores destas impedâncias expressas em Ω e Ω/km da LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba, considerando 7,8 quilômetros de extensão.

TABELA 1 – Impedância da LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba – formulação matemática

Sequência	Circuito 1		Circuito 2		Circuito 1		Circuito 2	
	R (Ω)	X (Ω)	R (Ω)	X (Ω)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	R (Ω/km)	X (Ω/km)
Zero	0,94418	0,72067	0,94418	0,72067	0,12105	0,09239	0,12105	0,09239
Positiva	0,24887	1,91685	0,24887	1,91685	0,03191	0,24575	0,03191	0,24575
Negativa	0,24887	1,91685	0,24887	1,91685	0,03191	0,24575	0,03191	0,24575

A capacitância é definida através das propriedades elétricas da isolação XLPE do cabo isolado e corresponde ao valor de 0,20401 $\mu F/km$, que na frequência industrial corresponde a uma susceptância de 76,91 $\mu S/km$. Devido às boas propriedades do XLPE (perdas reduzidas), praticamente as condutâncias são desprezadas. Neste caso, as admitâncias se igualam às susceptâncias e são iguais para todos os cabos.

3.0 - PARÂMETROS ELÉTRICOS LTS – MODELAGEM ATP

Na elaboração dos estudos de transitórios eletromagnéticos, para etapa de projeto de empreendimentos de transmissão, faz-se necessário realizar a modelagem do sistema sob análise no (ATP) (2). Neste caso os parâmetros elétricos determinados por formulação matemática devem ser reproduzidos nesta ferramenta. A LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba foi modelada no ATP conforme ilustração a seguir.

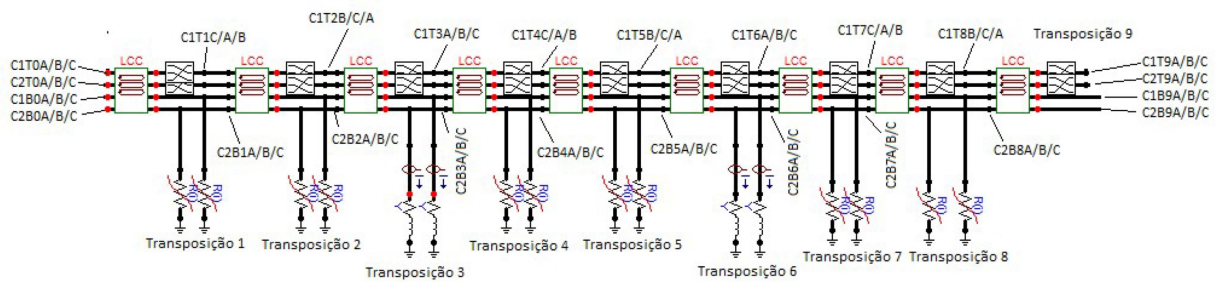


FIGURA 3 – Modelagem da LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba no ATP

Conforme Figura 3, cada circuito é transposto individualmente, sendo efetuada nove transposições no total. As transposições são realizadas nos condutores de fase e não nas blindagens. O aterramento das blindagens de cada circuito é realizado pelo método de cross-bonding. A cada três transposições e nas extremidades as blindagens de todos os condutores de cada circuito são conectadas entre si e aterradas.

Nas transposições em que as blindagens são aterradas, ou seja, a entrada, a saída, as transposições 3 e 6, esse aterramento é modelado através de associação série de uma resistência de 1Ω com uma indutância de $0,005\text{ mH}$. A resistência representa a resistência de aterramento propiciada pelos condutores e hastes que formam a malha de aterramento construída em cada uma das caixas de passagem onde são efetuadas as transposições. A indutância representa o efeito do cabo que conecta as blindagens até a malha de terra propriamente dita. O aterramento nas caixas de transposição é descrito em mais detalhes no item 4.

Nos demais pontos de transposição, nomeadamente as transposições 1, 2, 4, 5, 7 e 8, a blindagem de cada fase é mantida isolada das demais, sendo conectada à terra por meio de um limitador de surto, representado por resistências não-lineares modeladas através de pares de correntes e tensões, conforme elemento 92 do ATP.

Em cada trecho da transposição a modelagem dos dois circuitos da LTS é realizada na rotina Cable Constants do ATP. Na prática comum essa rotina tem sido bastante utilizada na determinação de parâmetros elétricos de cabos isolados, porém neste trabalho, visando reproduzir os parâmetros determinados por formulação matemática foram necessárias adaptações nos dados a serem aplicados na rotina Cable Constants, conforme apresentado nas seções a seguir.

3.1 Representação do Condutor – Raio Interno

Na LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba foram utilizados os cabos de seção nominal 1200 mm^2 , tipo Miliken com 5 segmentos, conforme apresentado na Figura 4.

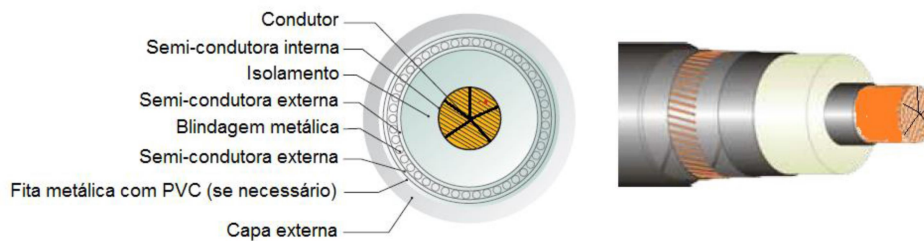


FIGURA 4 – Seção Transversal típica de um cabo com blindagem metálica por fios metálicos de cobre

O ATP considera que os condutores são sólidos, o que não é correto, principalmente para condutores trançados. No condutor central de cada cabo a seção condutora corresponde a apenas $80,74\%$ da área calculada a partir do diâmetro desse condutor. Se esse efeito não for considerado incorrerá em um erro de $23,8\%$ no valor da resistência. Para correção deste efeito foi acrescentado um raio interno ao condutor, determinado em função do diâmetro nominal e da seção nominal do condutor, conforme formulação a seguir.

$$S_{cond} = \pi \quad (7)$$

Ao considerar o condutor central com uma seção tubular não se está introduzindo uma alteração demasiadamente grande que possa vir a alterar o acoplamento entre os diversos condutores, posto que devido ao efeito pelicular essa região já apresentará baixa densidade de corrente.

3.2 Resistividade da Blindagem Metálica

A blindagem metálica do cabo isolado da LTS em estudo possui 48 fios com diâmetro de 2,62 mm, dispostos de forma helicoidal ao longo da camada semicondutora externa, conforme ilustrado na Figura 4. Essa forma construtiva garante ao cabo isolado uma certa flexibilidade para a execução de movimentos de curvatura. Ao fazer a curvatura do cabo os fios da blindagem externa são esticados e se faz necessário que exista material suficiente para permitir o deslocamento dos fios na parte externa da curva. A área da blindagem definida pelo fabricantes dos cabos isolados foi determinada por:

$$S_{blind_{fab}} = \frac{\pi \cdot df^2 \cdot nf}{4 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi \cdot dmb}{Pe}\right)^2}} = 234,39 mm^2 \quad (8)$$

Onde df é o diâmetro do fio (2,62 mm), nf é o número de fios, dmb diâmetro médio da blindagem (100,53 mm) e Pe é o passo de encordamento (675 mm).

Se fossem considerados os dados informados sobre o cabo, diâmetro externo da blindagem igual a 103,1 mm e espessura de aproximadamente 1,31 mm, em função do espaçamento entre os fios, o ATP consideraria essa blindagem sólida e a área seria igual a 418,9 mm², um valor 78,7 % maior do que o valor real.

$$S_{blind_{ATP}} = \pi \quad (9)$$

A fim de compensar o efeito dessa área maior foi considerado um aumento de 78,7 % na resistividade elétrica da blindagem. A resistividade elétrica da blindagem metálica a 20° C é de $1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$. Corrigindo esse valor para a temperatura de operação de 80°C e aplicando o fator de correção para a compensação de área da blindagem, tem-se:

$$\rho_{cu}(20C) = \rho_{cu}(20C)[1 + \alpha_{cu}\Delta\theta] = 1,7241 \cdot 10^{-8} \cdot [1 + 0,00393 \cdot (80 - 20)] = 2,1306 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \quad (10)$$

$$\rho_{blind}(80C) = \frac{418,91}{234,39} \times 2,1306 \cdot 10^{-8} = 3,8079 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \quad (11)$$

3.3 Capacitâncias das Camadas Semicondutoras

O valor informado pelo fabricante para a capacitância entre o condutor central e a blindagem do cabo foi de 0,20401 μF/km. Nos ensaios de aceitação, cujos resultados foram recebidos após a conclusão dos estudos do projeto básico, o valor medido foi de 0,192 μF/km. Essa diferença pode ser atribuída a desvios ocorridos durante a fabricação do cabo, tais como, variação na permissividade do material isolante ou excentricidade no posicionamento relativo do condutor central em relação à blindagem.

As camadas semicondutoras interna e externa do cabo isolado, ilustradas na Figura 4 não conduzem corrente ao longo do cabo, mas também não são um sistema isolante. A camada semicondutora não pode ser considerada no cálculo das impedâncias, porém se não for considerada no cálculo das admitâncias, resultará em uma capacitância inferior a capacitância real. O ATP considera como isolamento para o cálculo da capacitância todo o espaço preenchido pelo isolamento, entre o diâmetro externo do condutor ($d = 43,5$ mm) e o diâmetro interno da blindagem ($D = 100,48$ mm). Sendo a permissividade elétrica da isolação e do vácuo, ϵ e ϵ_0 , respectivamente, neste caso a capacitância entre dois condutores cilíndricos concêntricos seria dada por:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} = \frac{2\pi \cdot 2,5,8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln\left(\frac{100,48}{43,50}\right)} = 0,16605 \mu F / km \quad (12)$$

Porém, ocorre que entre o condutor central e a blindagem existem duas camadas semicondutoras que se comportam como superfícies equipotenciais, embora não conduzam corrente no sentido longitudinal da linha. A capacitância somente do isolamento é determinada considerando o diâmetro nominal do isolamento ($D = 93,10$ mm) e a espessura do isolamento ($d = 93,1 - 2 \times 23 = 47,10$ mm)

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} = \frac{2\pi \cdot 2,5,8,85 \cdot 10^{-12}}{\ln\left(\frac{93,10}{47,10}\right)} = 0,20401 \mu F / km \quad (13)$$

Logo, a diferença entre a capacitância determinada no ATP, que considera todo o espaço preenchido entre a blindagem e o condutor e a capacitância considerando somente o isolamento do cabo é de 37,96 pF/m. Como o ATP não permite a representação das camadas semicondutoras no modelo, esse valor de capacitância tem que ser adicionado ao modelo. Duas formas podem ser usadas para efetuar a correção da capacitância shunt:

- Aumentar o valor da permissividade dielétrica do material isolante, de forma que o valor calculado com a equação (12) seja igual ao valor informado pelo fabricante;
- Utilizar um recurso já previsto no ATP que permite que se informe um valor de capacitância adicional a ser considerado na montagem da matriz de admitâncias.

A primeira solução, o aumento da permissividade dielétrica, pode dificultar a verificação de dados em casos onde há cabos de diferentes bitolas, posto que nesse caso seriam informados valores de permissividade dielétrica diferentes para cabos que usam o mesmo isolamento.

A segunda solução tem a vantagem de usar um recurso que já foi previsto pelos autores do ATP quando da sua concepção. Assim, o uso da capacitância adicional foi a solução adotada.

3.4 Impedâncias dos Circuitos em Componentes Simétricas

Com o modelo da LTS, conforme ilustrado na Figura 3, foram realizadas simulações no ATP a fim de determinar a impedância da linha e então comparar com os valores alcançados com formulação matemática, conforme apresentado na seção 2.0.

Para a definição da impedância própria de sequência zero da linha as três fases do circuito 1 da linha são conectadas à mesma fase de uma fonte de tensão. Na outra extremidade as três fases são aterradas de modo a incluir o efeito do solo no retorno da corrente. O efeito do aterramento das blindagens nos pontos de transposição 3 e 6 e nas extremidades também são computados no efeito do retorno pelo solo.

Para a definição da impedância própria de sequência positiva as três fases do circuito 1 da linha são conectadas cada uma a uma das fases de uma fonte trifásica. Na outra extremidade as três fases são aterradas de modo a incluir o efeito do solo no retorno da corrente. O efeito do aterramento das blindagens nos pontos de transposição 3 e 6 e nas extremidades também são computados no efeito do retorno pelo solo.

Das simulações foram obtidas as impedâncias próprias de sequência da linha e comparadas com as impedâncias obtidas na seção 2, conforme ilustrado na Tabela 2, considerando inclusive as suscetâncias.

TABELA 2 – Impedância da LTS 230 kV Curitiba Centro - Uberaba

Sequencia	Formulação Matemática			ATP		
	R (Ω)	X (Ω)	B (μ S)	R (Ω)	X (Ω)	B (μ S)
Zero	0,94418	0,72067	599,9	1,12087	0,71958	615,6
Positiva	0,24887	1,91685	599,9	0,20598	1,94341	615,6
Negativa	0,24887	1,91685	599,9	0,20598	1,94341	615,6

Ainda considerando o comparativo dos resultados alcançados no ATP, com os resultados alcançados por formulação matemática, a Tabela 3 apresenta esses comparativos para as impedâncias próprias e mútuas dos condutores centrais e das blindagens metálicas.

TABELA 3 – Comparativo Impedância Próprias e Mutuas dos Condutores e Blindagens

Diferença percentual entre valores alcançados no ATP e por formulações matemáticas		
Condutores		
Resistência	Própria	0,7% menor
	Mútua	0,8% menor
Reatância	Própria	0,6% menor
	Mútua	0,07% maior
Acoplamento entre condutores centrais e blindagens		
Do próprio cabo	Resistência	0,8% menor
	Reatância	0,1% maior
Cabos Diferentes	Resistência	0,9% menor
	Reatância	0,1% maior
Blindagens Metálicas		
Resistência	Própria	47,6% menor
	Mútua	1% menor
Reatância	Própria	0,1% menor
	Mútua	0,09% maior

As diferenças percentuais entre os valores alcançados por formulação matemática e pelo ATP foram inferiores a 1%. A exceção ficou por conta da resistência própria da blindagem que alcançou um valor menor e mais pronunciado que o valor determinado por formulação matemática. Essa diferença percentual não preocupou devido ao fato da resistência se apresentar com valor menor em relação aquele alcançado por formulação matemática, evitando com isso possíveis atenuações de fenômenos importantes. Os valores alcançados no ATP também se aproximaram dos valores alcançados em ensaios realizados pelo fabricante dos cabos isolados.

3.5 Escolha dos Modelos do ATP

Nos estudos referidos à frequência industrial pode ser utilizado até mesmo o modelo π , sendo desnecessário gastar o tempo de ajuste da variação de parâmetros envolvida nos modelos JMarti e Semlyen. No entanto, recomenda-se o modelo de Bergeron calculando os parâmetros com a frequência de 60 Hz.

Nos estudos que envolvem transientes com espectro de frequência mais amplo, o modelo π não é conveniente. Esse modelo, mesmo quando se divide a linha em diversas seções mais curtas, introduz uma série de oscilações espúrias provocadas pelas reflexões nos pontos de conexão entre as seções. Para estudos de sobretensões de impulso e (Very Fast Transients Overvoltage) VFTO deve ser utilizado um modelo que considere a variação de parâmetros com a frequência, JMarti ou Semlyen. A rotina JMarti para esse número de condutores faz com que o problema seja muito grande e a quantidade de memória necessária impede que um modelo aceitável seja obtido, apesar de o ATP conseguir calcular as impedâncias. Optou-se então pelo modelo de Bergeron. Neste modelo foram realizadas simulações a fim de avaliar a variação da impedância característica e das velocidades dos modos de propagação com a frequência. Desta avaliação observou-se que essas variáveis de análise apresentavam um comportamento linear (ver figura 5). Em estudos de transitórios rápidos é usual que se procure determinar a frequência predominante do fenômeno e que os parâmetros sejam corrigidos para essa frequência. Neste caso específico, para os estudos de transitórios adotou-se a correção para 5 kHz por meio da rotina Bergeron. Conforme se pode ver na figura abaixo, os parâmetros não apresentam variação significativa até 1 MHz.

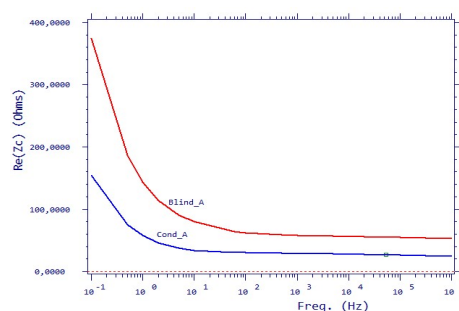


FIGURA 5 – Variação da impedância característica com a frequência. Sem alteração significativa entre 60 Hz e 1 MHz (Blindagem-Vermelha e Condutor-Azul)

4.0 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O ATERRAMENTO NAS CAIXAS DE TRANSPOSIÇÃO

Em cada caixa de transposição existirá uma malha de aterramento local, onde será feita a referência das blindagens à terra. Nas caixas das transposições 3 e 6 as blindagens serão conectadas a uma caixa de inspeção e daí para a malha de terra. Nas demais caixas de transposição as blindagens são conectadas a limitadores de surto e esse conectado à malha de terra. Ver figura 6.

Como a LTS atravessa locais com acesso ao público em geral, se faz necessário assegurar que os potenciais na superfície do solo não coloquem as pessoas em risco. Para isso a malha de terra em cada caixa de passagem deve ser instalada no fundo da caixa de passagem de modo a reduzir o gradiente de potencial na superfície do solo, durante uma possível ocorrência de faltas fase-blindagem em um dos cabos.

A malha de terra se apresenta como uma resistência pura, posto que é de pequenas dimensões. Porém, os cabos de conexão entre as blindagens e a malha de terra, apresentam uma indutância que precisa ser considerada no caso de fenômenos que envolvam um espectro de frequências mais largo.

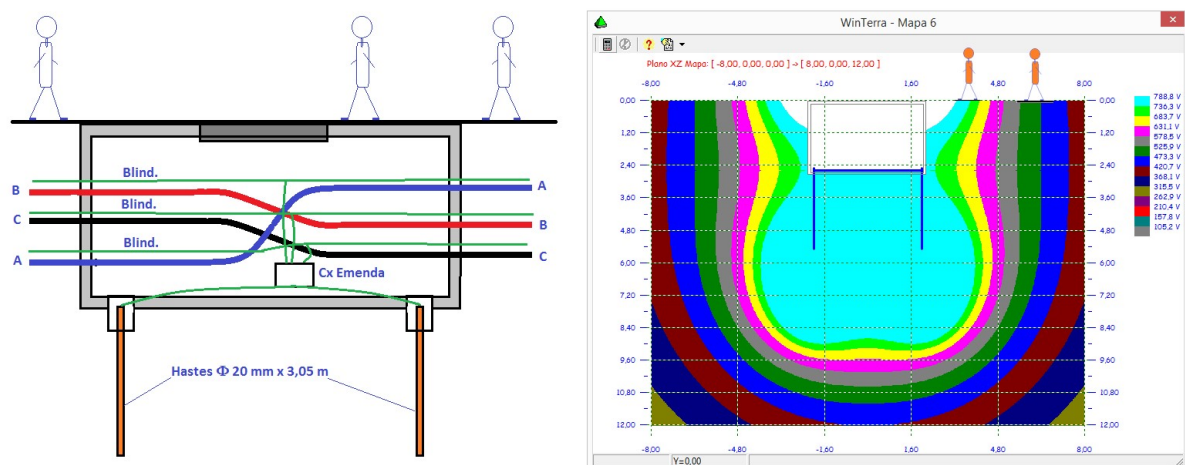


FIGURA 6 – Caixa de transposição e malha de terra

5.0 - CONCLUSÕES

Os parâmetros elétricos da LTS 230 kV Curitiba Centro – Uberaba obtidos por formulação matemática foram reproduzidos no ATP com boa aproximação. Foram necessárias algumas adaptações nos dados de entrada da rotina Cable Constants para alcançar a reprodução dos referidos parâmetros. Essas adaptações nos dados são necessárias em todos os casos que envolvem cabos isolados e estão descritas e justificadas no texto. Um resumo das adaptações é apresentado a seguir:

- O condutor central do cabo, quando envolve condutores trançados ou segmentados, apresenta uma área da seção reta menor do que a calculada a partir das dimensões do condutor, sendo então necessário definir um raio interno para o condutor central, ajustando a área do condutor central ao valor nominal do cabo;
- A blindagem metálica é formada por uma associação de condutores trançados dispostos helicoidalmente ao longo do condutor, assim o comprimento dos condutores da blindagem é maior do que o comprimento do cabo e esse efeito deve ser considerado para o cálculo dos parâmetros;
- As camadas semicondutoras não conduzem corrente no sentido longitudinal do cabo e também não são isolantes, no cálculo da admitância shunt do cabo se faz necessário efetuar as devidas correções para que o valor de capacitância não seja subestimado;

Embora o modelo JMarti represente a variação de parâmetros elétricos da linha com a frequência, necessários para estudos que envolvem sobretensões de impulso e VFTO, não foi possível utilizá-lo. Em função da representação dos condutores e das blindagens dos dois circuitos da linha, o modelo JMarti apresenta oscilações numéricas no processo de convergência, além de requerer elevado esforço computacional. Dentro deste contexto foi utilizado o modelo Bergeron com a frequência de 5 kHz definida através do comportamento dos parâmetros elétricos em função da variação das frequências.

Em complemento a este trabalho, serão investigados com mais detalhes os possíveis motivos que levaram a diferença mais acentuada encontrada para resistência própria da blindagem, considerando a formulação matemática e o programa ATP. Suspeita-se que essa diferença provenha da ondulação dos fios da blindagem. De qualquer forma serão investigados tanto o modelo computacional, quanto a constituição física do cabo.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Modelling of power transmission cables – Argaut P., Dorison E., Karimi C., Germain J., Achard J.C., Blanchet F., Thiebaut E. - Jicable 91.
- (2) Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – Estudos Elétricos, Especificações das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão – Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.
- (3) Alternative Transients Program Rule Book.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Gracita Batista Rosas é graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com Especialização em Proteção de Sistemas pela Universidade Federal de Itajubá, mestrado em Sistemas de Potência pela Universidade Federal do Paraná – UFPR e desde 2017 é aluna de Doutorado em Engenharia Elétrica da UFPR. Atualmente participa da Equipe de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Sistemas de Transmissão, da divisão de Planejamento e Estudos Elétricos da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.

Pablo Mourente Miguel é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, com mestrado e doutorado pela COPPE/UFRJ. Atualmente é engenheiro consultor na empresa TgDelta Engenharia e Consultoria Ltda – Rio de Janeiro.

Marcelo Gonçalves é Engenheiro Eletricista com formação em Sistema de Potência, graduado pela Universidade Federal Fluminense – UFF. Atualmente trabalha na Empresa Jordão Engenharia, sendo responsável pela área de estudos elétricos envolvendo fenômenos de transitórios eletromagnéticos. Tem conhecimento em Fluxo de Potência – ANAREDE, Curto-Circuito – ANAFAS, ATP-EMTP – Transitórios Eletromagnéticos.

Fábio Gabriel de Oliveira é graduado em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo (2003). Possui mestrado em Sistemas de Potência pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2010), com publicação da dissertação “Estudos de instalações de linhas subterrâneas de alta tensão com relação a campos magnéticos”. Entre 2002 e meados de 2005 trabalhou na Pirelli Cabos de Energia atuando em testes elétricos e projetos de instalação de cabos isolados de alta tensão. Desde 2005 até a presente data atua pela Prysmian na área de engenharia de projetos de sistemas e projetos de instalação de cabos isolados para alta e extra alta tensão.

Venilton Rodrigues de Oliveira Engenheiro Eletricista Sênior, com formação em Sistemas de Potência, com conhecimento do Sistema Elétrico Brasileiro. Com grande experiência em estudos regime permanente, transitório eletromecânico, comissionamento, modelagem e ajuste de equipamento de controle, tais como: Reguladores de Tensão (RT), Reguladores de Velocidade (RV), estabilizador de sistemas de potência (PSS), compensadores estáticos (SVC), capacitor série controlável (TCSC). Grande experiência com programas de simulação, entre eles: ANAREDE, ANATEM, ANAFAS, PACDYN, PSCAD/EMTDC e algum conhecimento nos seguintes programas ATP/EMTP e Eurostag. Hoje é sócio da empresa Jordão Engenharia, uma empresa reconhecida pela Aneel com uma das 10 empresas que mais se envolvem em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento.

Hélio Pessoa de Oliveira Júnior é graduado e pós-graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atualmente é engenheiro eletricista do Operador Nacional do Sistema – ONS, responsável pela avaliação de estudos de engenharia, dimensionamento e aquisição de equipamentos para incorporação e posterior operação na Rede Básica, além de participar da elaboração de Anexos Técnicos para Editais de Leilões de Transmissão CA e CC. Participou ativamente do projeto das transmissões em corrente contínua dos complexos do Madeira e Belo Monte, envolvendo-se na elaboração do Anexo Técnico e no acompanhamento dos estudos e especificações das instalações, nas etapas de concepção e de detalhamento do projeto.

Miguel Armino Saldanha Mikilita é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com Especialização em Sistemas de Potência pela Universidade Federal de Itajubá e mestrado em Sistemas de Potência pela Universidade Federal do Paraná – UFPR. Atualmente participa da Equipe de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Sistemas de Transmissão, da divisão de Planejamento e Estudos Elétricos da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.

Jeferson Shimomura é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Possui vasta experiência em projetos eletromecânicos, elétricos, civis e de subestações em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Possui experiência também em instruções técnicas operacionais relacionadas a implantação de subestações no âmbito destes sistemas. Atualmente gerencia o Departamento de Engenharia de Subestações da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.