



## **Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT**

### **Impacto do Seccionamento de LTs nas Interferências Eletromagnéticas em Dutos Próximos dos Trechos Existentes das LTs Seccionadas**

**ELILSON EUSTÁQUIO RIBEIRO(1); EDGAR JOSÉ OLIVEIRA RIBEIRO(2); SHEILLA CONCEIÇÃO GONÇALVES DA SILVA(3); RODOLFO CABRAL DA CUNHA(4); MAISA LAILA DE FÁTIMA OLIVEIRA(5); NSA(1);NSA(2);NSA(3);NSA(4);NSA(5);**

#### **RESUMO**

Este artigo tem por objetivo demonstrar o efeito do seccionamento de linhas de transmissão existentes no aumento dos níveis de curto-circuito fase-terra em suas estruturas e, conseqüentemente, das tensões induzidas em dutos metálicos que estejam localizados em suas proximidades, mesmo nas situações onde os dutos não cruzem ou tenham pontos de paralelismo e aproximação com os trechos de seccionamento a serem construídos.

Para corroborar tal afirmação, são apresentados os resultados de avaliações específicas de paralelismo e cruzamento de um duto com uma LT de 500 kV a ser seccionada.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Linhas de transmissão; Interferências eletromagnéticas; Dutos e tubulações; Paralelismos; Cruzamentos.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Dutos localizados nas proximidades de linhas de transmissão estão sujeitos às interferências eletromagnéticas geradas por elas.

Tensões e correntes são induzidas em dutos nas proximidades de LTs devido aos acoplamentos resistivo (também denominado de condutivo), magnético e capacitivo (também denominado de eletrostático) que existem entre eles, sendo este último significativo apenas durante a construção dos dutos. Tensões e correntes podem ser induzidas nos dutos tanto em regime normal de operação das LTs quanto durante a ocorrência de faltas nas mesmas.

As tensões e correntes induzidas em dutos devem ser avaliadas e controladas tendo em vista a necessidade de se garantir de segurança do pessoal, durante a construção, a manutenção e a operação dos dutos, a integridade do revestimento (que é utilizado na proteção catódica dos mesmos) e dos equipamentos a eles conectados, bem como limitar uma possível ocorrência de corrosão CA nos dutos.

As análises das interferências eletromagnéticas das LTs em dutos são normalmente realizadas quando do projeto/construção das LTs ou dos dutos. Em geral, a necessidade de se realizar tais análises é identificada quando se constata cruzamentos, aproximações ou paralelismos entre as LTs e os dutos. Inclusive, quando da solicitação de autorização para o cruzamento de uma instalação com a outra, é necessário apresentar os resultados de tais análises e as medidas de mitigação necessárias para controle das interferências eletromagnéticas a níveis admissíveis.

Entretanto, no caso do seccionamento de LTs existentes, na quase totalidade das vezes, as análises das interferências se atêm exclusivamente à análise de cruzamentos e paralelismos que existirão entre as LTs do trecho de seccionamento (trecho a ser construído) e os dutos. Se tais cruzamentos e paralelismos não existirem no trecho de seccionamento, as análises de interferências eletromagnéticas sequer são consideradas como necessárias.

A questão é que os níveis de curto-circuito ao longo das LTs que são seccionadas podem ser alterados de forma significativa, o que, por sua vez, pode implicar em alterações também significativas nas tensões e correntes induzidas nos dutos que estiverem nas proximidades dessas LTs. Dependendo do comprimento do trecho de seccionamento e do nível de curto-circuito na SE para a qual um dado o seccionamento é feito, as tensões induzidas nos dutos existentes podem ser amplificadas a níveis muito superiores aos admissíveis.

Para corroborar tal afirmação, a seguir, os resultados de alguns casos simulados são apresentados.

## 2.0 - DADOS DA LT E DO DUTO UTILIZADOS NAS ANÁLISES

A Figura 1 apresenta os dados de uma LT de 500 kV e de duto considerados nas análises cujos resultados são aqui apresentados.

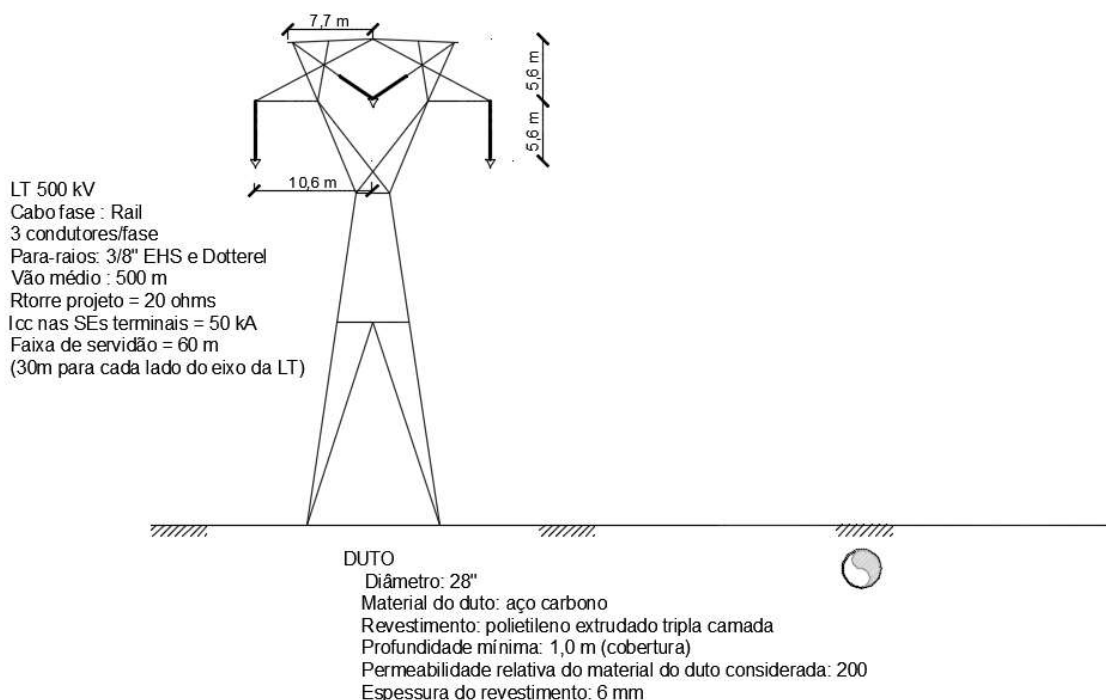


FIGURA 1 – Dados da LT 500 kV e do duto considerados nas análises.

Os sistemas de aterramento das torres da LT foram considerados como sendo compostos por 4 cabos contrapesos radiais de 90 m cada um. A resistividade do solo foi considerada de 2500  $\Omega \cdot m$ , uniforme. Com isto, a resistência de aterramento será de 20,4  $\Omega$  em cada estrutura.

### 2.1 Modelagem de cálculo da distribuição de correntes de falta na LT e das tensões induzidas no duto

A modelagem de cálculo da distribuição das correntes de curto-circuito nos cabos condutores, para-raios e estruturas da LT, bem como das tensões induzidas no duto é apresentada em detalhes nas referências (1) e (2).



Para efeito do cálculo da distribuição de corrente é importante salientar as características principais da metodologia:

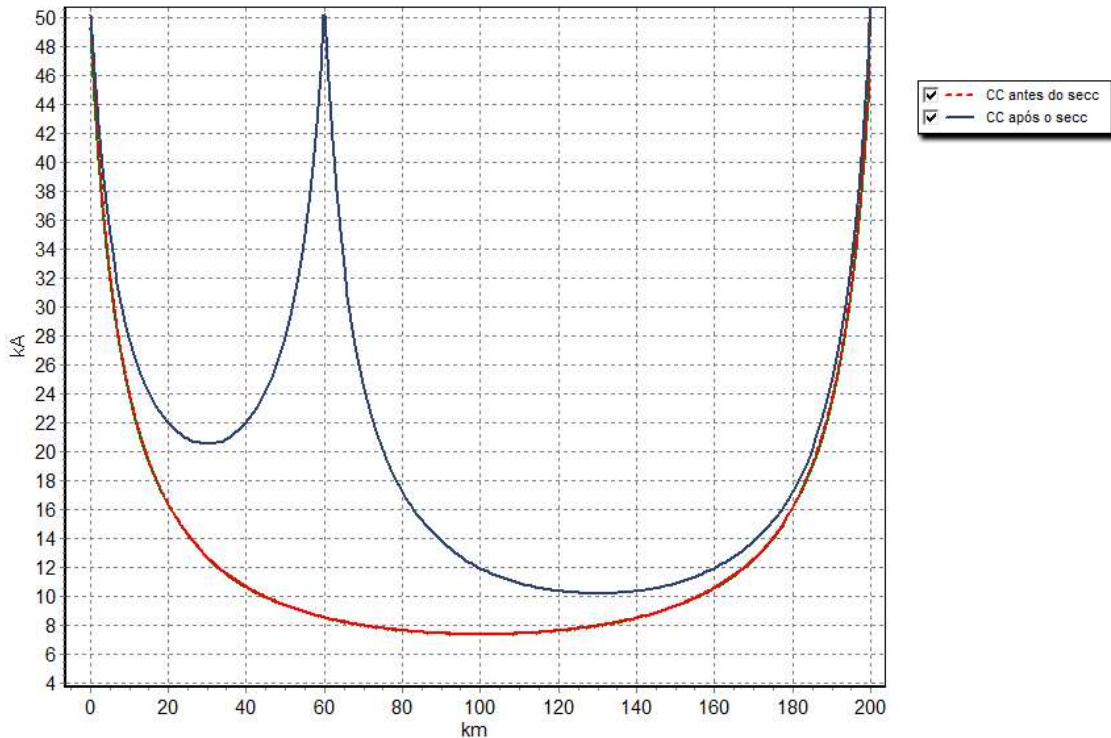
- a corrente de curto-circuito é calculada em função do ponto de falta (qual torre em que ela ocorre), das resistências dos aterramentos das torres e das SEs, dos comprimentos dos vãos, das impedâncias próprias e mútuas dos cabos fase e para-raios e dos equivalentes do sistema elétrico nas SEs terminais (a alimentação pode ser simultânea nas duas SEs terminais);
- os comprimentos dos vãos podem ser considerados com seus valores reais, ou seja, eles podem variar vão a vão;
- as resistências de aterramento são simuladas individualmente, com seus valores reais (quando disponíveis);
- no caso de linhas de circuito duplo, a corrente de falta nos dois circuitos é calculada.

As tensões induzidas no duto por acoplamento magnético (ou indutivo) e resistivo são avaliadas simultaneamente. Para o cálculo da resistência dos sistemas de aterramento das torres da LT que se encontram nas proximidades do duto, utilizou-se o software SEGround, desenvolvido pela NSA Consultoria e Informática Ltda. A metodologia de cálculo utilizada neste software é apresentada em (3) e (4).

### 3.0 - VARIAÇÃO DO NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO FASE-TERRA AO LONGO D UMA LT EXISTENTE EM FUNÇÃO DO SECCIONAMENTO DA MESMA

Os níveis de curto-circuito ao longo de LTs existentes são alterados em função do seccionamento das mesmas, caso a nova SE seja uma fonte de potência. Nos editais da ANEEL, uma das condições exigidas, quando do seccionamento de uma dada LT, é a verificação dos cabos para-raios existentes, em termos da capacidade de condução de corrente, em função dos novos níveis de curto-circuito fase-terra. Não é citada, no entanto, a obrigatoriedade da reavaliação das interferências eletromagnéticas entre a LT existente e dutos metálicos que a cruzem ou que estejam paralelos com a mesma.

A Figura 2 apresenta a variação do nível de curto-circuito fase-terra em uma LT de 500 kV antes e após seu seccionamento no km 60, considerando que todas as SEs possuam um nível de curto-circuito de 50kA (para efeito de simplificação da presente discussão, as LTs do trecho de seccionamento foram consideradas de comprimento desprezível em relação ao comprimento das LTs resultantes do seccionamento). No km 50, por exemplo, o nível de curto-circuito fase-terra passou de 9,4 kA para 27,9 kA. Como já era de se esperar, quanto mais próximo do ponto de seccionamento, maior é a variação no nível de curto-circuito ao longo da LT existente.



Notas:

- 1)  $I_{CCFT}$  nas SEs terminais existentes = 50 kA
- 2)  $I_{CCFT}$  na Nova SE = 50 kA

FIGURA 2 – Variação do nível de curto-circuito fase-terra ao longo da LT existente antes e após o seccionamento da mesma, no km 50.

#### 4.0 - ESTUDO DE CASOS

A seguir são apresentados os resultados do cálculo de tensões induzidas em um duto que cruza ou possui trecho de paralelismo com uma LT de 500 kV.

Conforme anteriormente citado, as análises de interferências eletromagnéticas de LTs em dutos são realizadas para analisar diversos aspectos:

- Risco à segurança de pessoal (que deve ser analisado para as LTs operando em regime permanente e também quando da ocorrência de faltas nas mesmas);
- Imposição de tensão no revestimento do duto (que, em geral, é significativa apenas quando da ocorrência de faltas fase-terra nas LTs);
- Corrosão CA (analisada apenas para a condição de operação da LT em regime permanente).

Tendo em vista o objetivo do presente artigo e o espaço reduzido para apresentação das informações, que impossibilita uma discussão mais ampla de todas as questões envolvidas, aqui não serão apresentados os resultados de simulações para todos estes aspectos. Serão apresentados os resultados relacionados apenas à imposição de tensões ao revestimento dos dutos, indicando que elas podem ser amplificadas de forma significativa ao se seccionar uma LT (observação: a tensão imposta ao revestimento de um duto é praticamente igual à tensão de toque no mesmo, em um afloramento, quando não for instalado um sistema de aterramento interligado do duto via um desacoplador CA).

Como objetivo de se avaliar a variação das tensões induzidas no duto antes e após o seccionamento, são apresentadas, nos itens a seguir, as tensões impostas ao revestimento do duto para faltas fase-terra na torre 156 que pertence o vão de travessia. Situação similar ocorre para uma falta fase-terra na torre 157.

#### 4.1 Caso 1

No Caso 1 foi simulada a LT com apenas um cruzamento com um duto com um ângulo de  $60^\circ$ . O cruzamento ocorre no km 15 do duto e no km 78 da LT, as torres do vão de travessia (T156 e T157) estão equidistantes do duto que se encontra centrado no vão de 500 m.

Para o Caso 1 foram analisadas três situações distintas:

Caso 1a: LT existente com 200 km de comprimento, sem seccionamento;

Caso 1b: LT existente seccionada no km 180;

Caso 1c: LT existente seccionada no km 60.

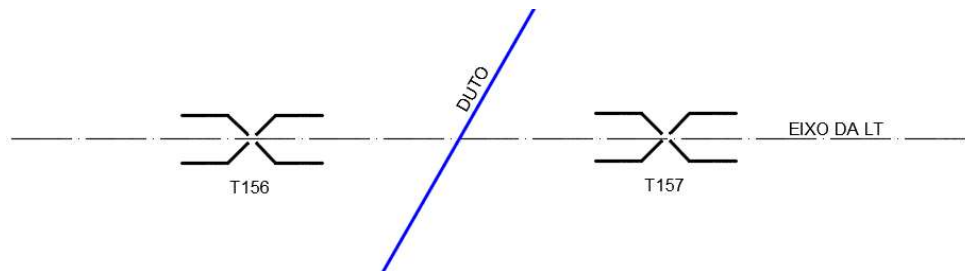


FIGURA 3 – Cruzamento entre a LT de 500 kV e o duto com um ângulo de  $60^\circ$ , no km 78 da LT.

Como objetivo de se avaliar a variação das tensões induzidas no duto antes e após o seccionamento, as figuras a seguir apresentam as tensões impostas ao revestimento do duto para faltas fase-terra na torre 156 que pertence ao vão de travessia, considerando os casos citados anteriormente.

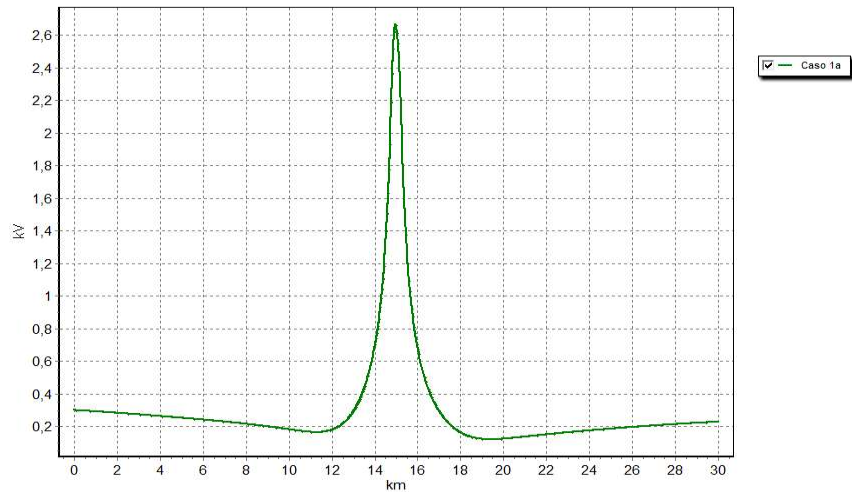


FIGURA 4 – Tensão no revestimento do duto para uma falta fase-terra na torre 156. Caso 1a: antes do seccionamento da LT existente.

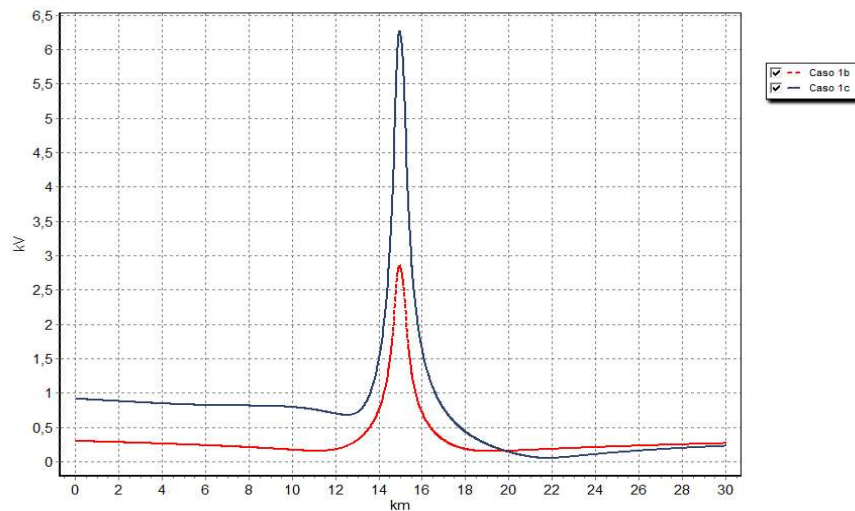


FIGURA 5 – Tensão no revestimento do duto para uma falta fase-terra na torre 156. Caso 1b: Seccionamento no km 180 da LT existente. Caso 1c: Seccionamento no km 60 da LT existente.

Como pode ser observado, para o seccionamento no km 60 da LT existente, as tensões induzidas no revestimento do duto foram superiores ao limite máximo admissível de 5 kV (5). O valor máximo das tensões induzidas aumentou de aproximadamente 2,6 kV (antes do seccionamento da LT existente) para 6,3 kV (após o seccionamento no km 60 da LT existente) .

Para o seccionamento no km 180 a alteração no perfil de tensão imposta ao revestimento do duto não foi significativa.

#### 4.2 Caso 2

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

No Caso 2 foi simulada a LT com um trecho de paralelismo de 2 km e um cruzamento com o duto, com um ângulo de 60°. O cruzamento ocorre no km 15 do duto e as torres do vão de travessia (T156 e T157) estão equidistantes do duto no vão de 500 m. O paralelismo se estende do km 13 ao km 15 do duto.

Para o Caso 2 também foram consideradas três situações distintas:

- Caso 2a: LT existente com 200 km de comprimento, sem seccionamento;
- Caso 2b: LT existente seccionada no km 180;
- Caso 2c: LT existente seccionada no km 60.

A figura a seguir apresenta os detalhes do vão de cruzamento e trecho de paralelismo.

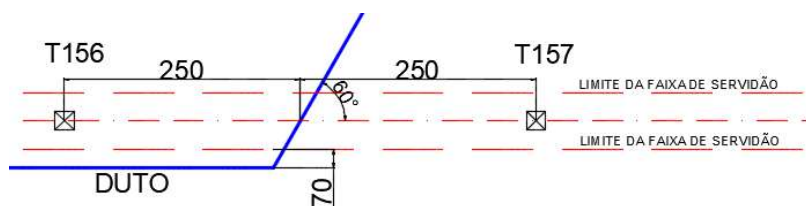


FIGURA 6 – Detalhes do vão de cruzamento. O trecho de paralelismo simulado se estende 2 km para a esquerda nesta figura. Cotas em metros.

As figuras a seguir apresentam as tensões impostas ao revestimento do duto para faltas fase-terra na torre 156 que compõe o vão de travessia, considerando os casos citados anteriormente.

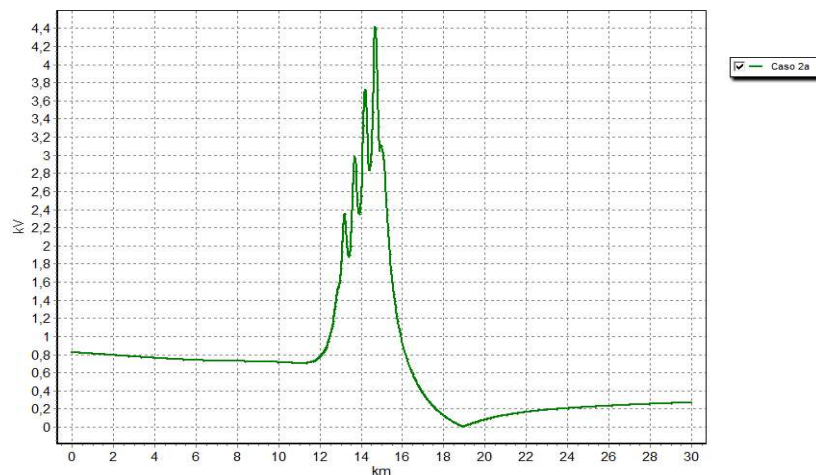


FIGURA 7 – Tensão no revestimento do duto para um falta na torre 156. Caso 2a: sem o seccionamento da LT existente.

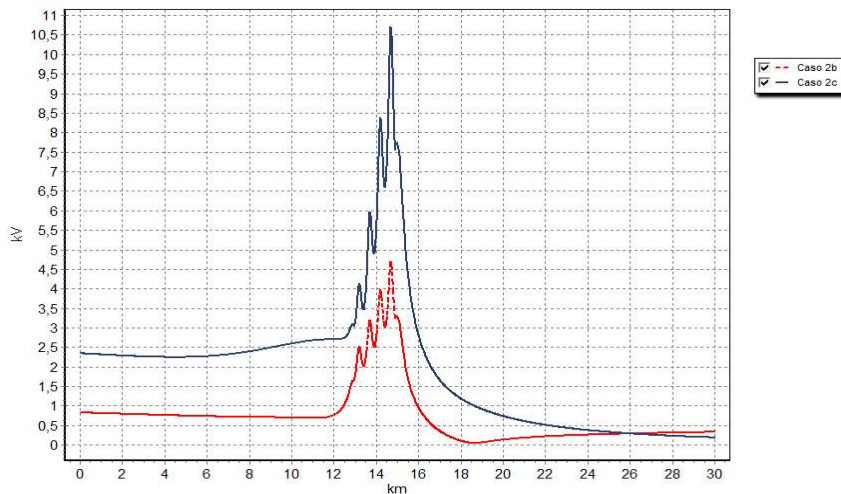


FIGURA 8 – Tensão no revestimento do duto para uma falta na torre 156. Caso 2b: Seccionamento no km 180 da LT existente. Caso 2c: Seccionamento no km 60 da LT existente.

Como pode ser observado, após o seccionamento no km 60 da LT existente, as tensões induzidas no revestimento do duto foram superiores ao limite máximo admissível de 5 kV (5). O valor máximo das tensões induzidas aumentaram de aproximadamente 4,4 kV (antes do seccionamento da LT existente) para 10,7 kV (após o seccionamento no km 60 da LT existente).

#### 4.3 Caso 3

No Caso 3 foi simulado um duto com um trecho de paralelismo de 2 km com a LT, com 100 m entre eixos da LT e do duto. O paralelismo se estende do km 13 ao km 15 do duto.

Para o caso 3 foram consideradas três situações distintas:

- Caso 3a: LT existente com 200 km de comprimento, sem seccionamento;
- Caso 3b: LT existente seccionada no km 180;
- Caso 3c: LT existente seccionada no km 60.

A figura a seguir apresenta os detalhes do trecho de paralelismo.

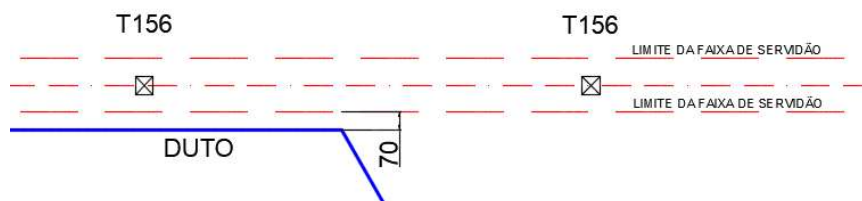


FIGURA 9 – Detalhes do trecho de paralelismo. O trecho de paralelismo simulado se estende 2 km para a esquerda nesta figura. Cotas em metros.

As figuras a seguir apresentam as tensões impostas ao revestimento do duto para falta fase-terra na torre 156 que compõe se localiza próximo do final do trecho de paralelismo.



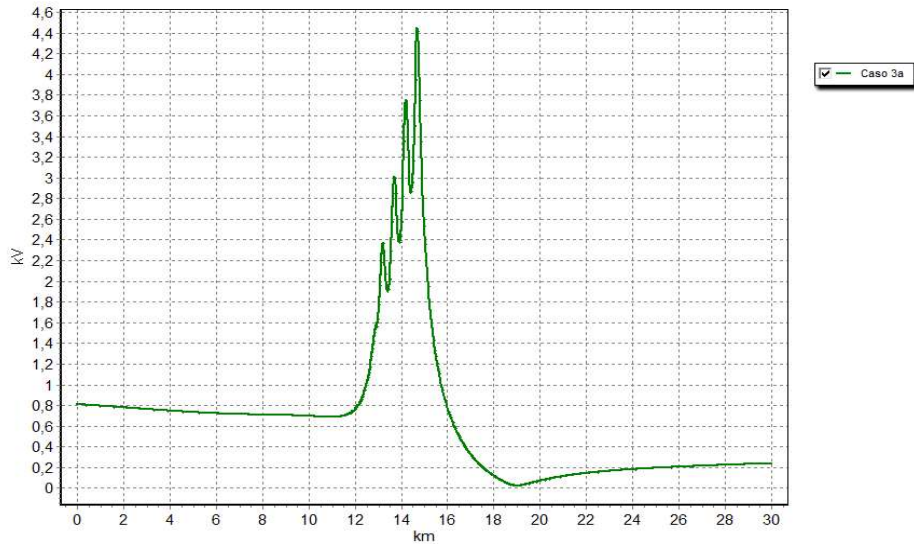


FIGURA 10 – Tensão no revestimento do duto para uma falta fase-terra na torre 156. Caso 3a : sem o seccionamento da LT existente.

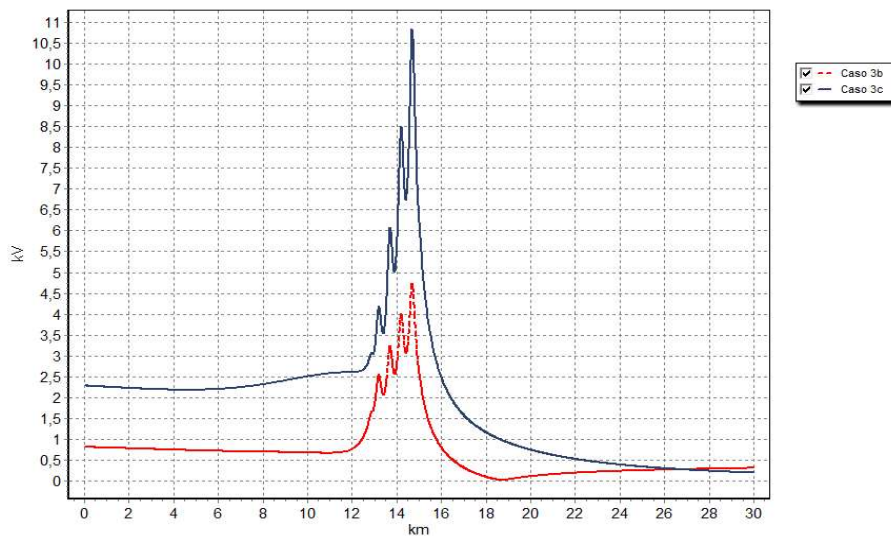


FIGURA 11 – Tensão no revestimento do duto para uma falta fase-terra na torre 156. Caso 3b: Seccionamento no km 180 da LT existente. Caso 3c: Seccionamento no km 60 da LT existente.

Como pode ser observado, após o seccionamento no km 60 da LT existente, as tensões induzidas no revestimento do duto foram superiores ao limite máximo admissível de 5 kV (5). O valor máximo das tensões induzidas aumentaram de aproximadamente 4,4 kV (antes do seccionamento da LT existente) para 10,7 kV (após o seccionamento no km 60 da LT existente). Como se pode constatar, ainda que não existam cruzamentos com o trecho de seccionamento, podem ser significativas as alterações nas tensões induzidas em dutos que possuam aproximações com a LT existente.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Conforme discutido no presente artigo, o seccionamento de uma LT pode aumentar o nível de curto-circuito ao longo do trecho existente da LT seccionada, podendo implicar alterações significativas nas tensões induzidas em dutos que cruzam ou se aproximam desta LT, dependendo do nível de curto-circuito na nova SE, de sua distância ao ponto de seccionamento, bem como de uma eventual alteração dos cabos para-raios da LT existente.

Quando da realização de seccionamentos de LTs, em geral, são realizadas análises das interferências eletromagnéticas em dutos que cruzam o trecho de seccionamento, mas não são reanalisadas as interferências em dutos que cruzam ou estejam nas proximidades apenas das LTs seccionadas.

Caso existam pontos de cruzamento, paralelismo ou aproximação entre a LT existente e dutos metálicos, as tensões induzidas podem ser extremamente aumentadas em relação à situação anterior ao seccionamento, o que pode comprometer a segurança de pessoal de operação e manutenção dos dutos e a integridade de seus revestimentos. Assim sendo, para estas situações, é necessário que seja feita uma reavaliação das interferências eletromagnéticas nos dutos para a situação após o seccionamento e implementadas as medidas de mitigação necessárias ao controle das mesmas.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Elilson E. Ribeiro; Manuel Losada y Gonzalez e Mário F. Alves. Interferências Eletromagnéticas entre LT's e Dutos - II Simpósio Franco-Brasileiro Sobre Cálculo de Campos Elétricos e Magnéticos - São Paulo, SP - Mar/1989.
- (2) Elilson E. Ribeiro; Leonardo S. Amaral; Manuel L. Gonzalez; Mário F. Alves e Paulo C. O. Teixeira - Um Pacote Computacional para o Cálculo de Interferências Eletromagnéticas Devidas às Linhas de Transmissão - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo Aplicado - Belo Horizonte, MG - Jun/1992 - pp. 253-264;
- (3) Heppe, R.J. - "Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution"- IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-98, Dec. 1979.
- (4) Dawalibi, F. and Mukhedkar, D. - "Optimum Design of Substation Grounding in Two Layer Earth Structure; Part I - Analytical Study", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-94, 1975.
- (5) ABNT NBR 16563-1:2016 – Mitigação de efeitos de interferências elétricas em sistemas dutoviários – Parte 1: Sistemas de corrente alternada.
- (6) ABNT NBR 15751:2013 – Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos.
- (7) NACE SP0177-2014. Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems.
- (8) NACE International Task Group 327 - Relatório NACE: AC Corrosion State-of-the-Art: Corrosion Rate, Mechanism, and Mitigation Requirements.

#### 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Elilson Eustáquio Ribeiro.** Nascido em 1961 em Morada Nova de Minas, MG. Engenheiro eletricitista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1984 e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 1987. É engenheiro consultor da NSA Consultoria e professor da PUC-MG.



**XXV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

4092  
GLT/34

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG



**Sheilla Conceição Gonçalves da Silva.** Nascida em 1978 em Belo Horizonte, MG. Engenheira eletricista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2003 e especialista Sistemas de Energia Elétrica – CESEE – com ênfase em Qualidade de Energia Elétrica pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, em 2009. É engenheira consultora da NSA Consultoria.



**Maisa Laila de F. Oliveira.** Nascida em 1988 em Divinópolis, MG. Possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), respectivamente em 2012 e 2016. É engenheira consultora da NSA Consultoria.



**Rodolfo Cabral da Cunha.** Nascido em 1986 em Sabará, MG. Engenheiro Eletricista pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) em 2010. Possui MBA em Gestão de Projetos pelo Instituto de Educação Tecnológica (IETEC) em 2017. É engenheiro consultor da NSA Consultoria.



**Edgar José Oliveira Ribeiro** nasceu em 1994 em Belo Horizonte, MG. Engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2017. É engenheiro da NSA Consultoria, onde atua nas áreas de interferências eletromagnéticas de LTs, dimensionamento de sistemas de aterramento de LTs e SEs e cálculo de campos elétrico e magnético, dentre outros.