



## SIMULAÇÃO DE CORRENTES E TENSÕES INDUZIDAS EM CABOS PARA-RAIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREA COM VISTAS A REDUÇÃO DE PERDAS

Márcio Severino da Silva<sup>1</sup>, José Maurício de Barros Bezerra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

**Resumo** - O objetivo deste trabalho é avaliar as correntes e tensões induzidas em linhas de transmissão, especificamente nos cabos para-raios. São adotadas duas tipologias para essa avaliação. A primeira é com os cabos multiaterrados (usualmente utilizada) e a segunda com cabos para-raios isolados. Para isso é primeiramente feita uma avaliação do grau de importância das perdas em cabos para-raios multiaterrados. Depois são realizadas duas simulações diferentes considerando uma linha de transmissão típica. Para as simulações são considerados os cabos para-raios multiaterrados, para avaliação da corrente induzida, depois com cabos isolados, para tensão induzida. Para a simulação da tensão induzida são consideradas duas situações: sem transposição e com transposição. Os resultados obtidos através da simulação da linha de transmissão no ATPDraw apontaram que os valores de perdas nos cabos podem ser relevantes.

**Palavras-Chave** – ATPDraw, Cabos para-raios, Correntes, Linhas de transmissão, Tensões.

### SIMULATION OF CURRENT AND VOLTAGE INDUCED IN GROUND WIRE IN AIR TRANSMISSION LINES WITH LOSS REDUCTION VIEWS

**Abstract** - The objective of this work is to evaluate the induced currents and voltages in transmission lines, specifically in ground wire. Two typologies are adopted for this assessment. The first is with multi-grounded cables (usually used) and the second with insulated wire ground. For this, an assessment is made first of the degree of importance of losses in multi-ground wire ground. Then two different simulations are performed considering a typical transmission line. For the simulations, multi-ground lightning conductor cables are considered for the evaluation of the induced current, then with insulated cables for the induced voltage. For the simulation of induced voltage two situations are considered: without

\*marcio.ssilva@gmail.com.br

transposition and with transposition. The results obtained through the simulation of the transmission line in ATPDraw showed that the values of cable losses may be relevant.

**Keywords** - ATPDraw, Currents, Ground wire, Transmission line, Voltages.

#### NOMENCLATURA

$Z_{sw}$  Impedâncias próprias dos cabos para-raios.

$I_{sw}$  Correntes nos cabos para-raios.

$Z_m$  Impedâncias mútuas entre os condutores da linha.

#### I. INTRODUÇÃO

Na nossa sociedade moderna, sem a energia elétrica, não seria possível desenvolver suas tarefas do cotidiano. A energia é utilizada para as mais diversas atividades tais como: transporte, aquecimento, refrigeração, iluminação artificial, tracionamento de cargas e muitas outras aplicações.

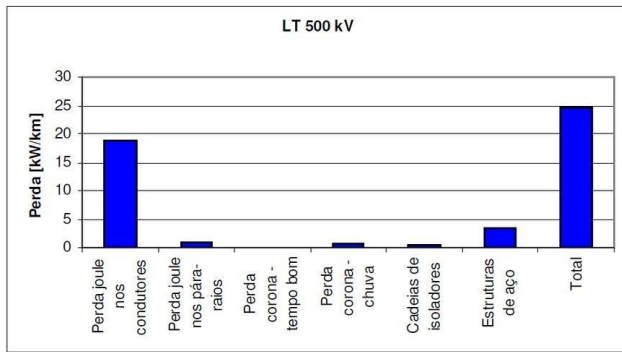
Uma parte importante do sistema elétrico são as linhas de transmissão. Esse componente é fundamental para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Dados fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), ao final de 2019, está prevista que essas instalações devam ter uma extensão total de 154.748 km de comprimento[1].

De acordo com a ANEEL, de todas as perdas que existem desde a geração de energia em grandes centrais até o consumidor, a rede básica do SIN é responsável por 4% das perdas totais do sistema [2].

As perdas de energia nas linhas de transmissão podem ser divididas, de uma forma geral, em perdas por dispersão, por efeito joule e por fuga nas cadeias de isoladores. As perdas por dispersão são aquelas causadas principalmente pelo efeito corona. As perdas por efeito joule, são causadas pela passagem de corrente elétrica nos condutores de fase e condutores de blindagem (cabos para-raios) [3].

As perdas típicas nas linhas de transmissão, no nível de 500 kV, podem chegar a 25 kW por quilômetro de comprimento da linha e apresentam uma distribuição tal qual como é mostrada na Figura 1 [4].

Figura 1: Valores típicos de perdas em uma linha de transmissão.



Fonte: Ministério de Minas e Energia - CEPEL

As perdas que existem nos cabos para-raios, em razão do efeito Joule devido ao surgimento de correntes induzidas nesses condutores, causadas pelo acoplamento eletromagnético desses cabos com os condutores fase, faz com que surjam perdas muitas vezes preocupantes.

As perdas por efeito joule nos cabos para-raios são consideráveis pois representam tipicamente 10% das perdas totais nas linhas de transmissão, devendo ser avaliadas e acompanhadas.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como um componente exposto ao ambiente, as linhas de transmissão aéreas estão sujeitas a serem atingidas por descargas atmosféricas. Elas representam uma das principais razões de desligamentos não programados nessas instalações, pois induzem tensões, quer seja por uma descarga direta ou indireta, sobre a linha de transmissão, tensões que podem atingir valores altos que podem romper a rigidez dielétrica do meio e provocar um curto-circuito no sistema [5].

Para fazer a proteção contra os efeitos das descargas diretas sobre as linhas de transmissão, condutores denominados de cabos para-raios são instalados com a função de interceptar as descargas atmosféricas e direcioná-las para o terra [6].

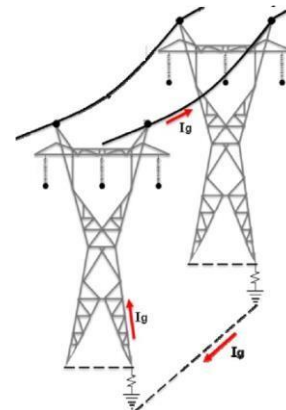
Os principais tipos de condutores que são utilizados para a função de cabos para-raios são as cordoalhas de fio de aço zincado tipo cabo EHS com resistência mecânica extra-forte, cabos de Alumínio com Alma de Aço (CAA) mas nos últimos anos ganhou espaço entre a utilização dos cabos do tipo *OPGW* (*Optical Ground Wire*) para transmissão de informação através de fibra óptica [3][7].

### A. Cabos para-raios multiaterrados

A maneira mais tradicional da instalação de cabos para-raios em linhas de transmissão é a qual os cabos são ligados ao solo em cada uma das estruturas ou utilizando a própria estrutura quando ela é metálica e todas as estruturas e/ou condutores de aterramento ficam conectadas ao solo através de elementos especialmente feitos para isso para que se possa garantir uma baixa resistência de aterramento [8]. No entanto há grande inconveniente nessa forma de instalação que é a criação de malhas que são compostas pelos cabos para-raios, estruturas e o solo [8].

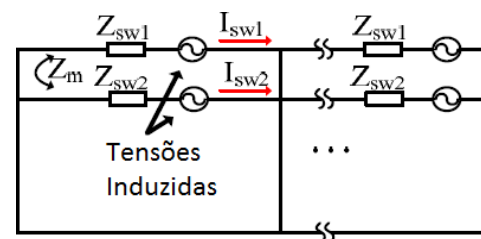
As Figuras 2 e 3 ilustram os laços formados pelos cabos para-raios e um circuito equivalente em uma instalação com dois cabos para-raios [9]:

Figura 2: Malha formada para circulação de corrente entre estruturas e o solo.



Fonte: WANG et al.,2015.

Figura 3: Malha formada para circulação de corrente entre estruturas e o solo.



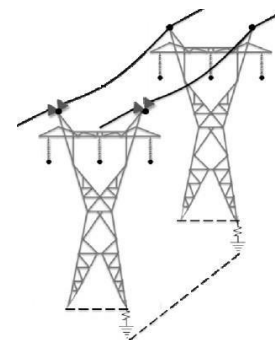
Fonte: WANG et al.,2015.

### B. Cabos para-raios isolados

Com a finalidade de evitar que possa haver circulação de correntes em malhas formadas por cabos para-raios multiaterrados, pode-se conseguir através de isoladores o isolamento dos cabos do solo desde que os isoladores possam ter uma tensão de ruptura suficientemente pequena e que sejam equipados com centelhadores [8].

A Figura 4 ilustra uma situação em que temos um esquema de cabos para-raios isolados.

Figura 4: Eliminação de malha para circulação de corrente em cabos para-raios com segmentação dos condutores solo.



Fonte: WANG et al.,2015.

Na situação em que os cabos para-raios estão instalados isolados na torre, ao serem atingidos por uma descarga atmosférica, aparecerá um arco voltaico no centelhador instalado em conjunto com o isolador. O centelhador será responsável pela descarga da corrente até o solo sem prejuízo portanto naquilo que é a sua função principal do isolador [8]. A Figura 5 [10] apresenta um dispositivo desse tipo.

Figura 5: Cadeia de isoladores com dispositivo centelhador.



Fonte: RAMOS, 2010.

Outra importante questão atrelada ao isolamento dos cabos para-raios é que os valores das tensões induzidas nesses condutores devem estar dentro de limites compatíveis com os isoladores e muito bem determinado pelo estudo de elevação de tensão [11] [12].

Existem duas formas comuns de se isolar os cabos para-raios: cabos para-raios isolados e transpostos e cabos para-raios isolados seccionados e aterrados.

No sistema de cabos para-raios isolados e transpostos o condutor é isolado em algumas torres, mas normalmente aterrado em suas extremidades. É então utilizada uma transposição em alguns pontos. Essa transposição reduz o valor da tensão induzida, porém permite ainda a circulação de corrente. Nesse caso deve ser feito o cálculo do número de transposições necessárias para que o valor da tensão induzida não ultrapasse a tensão de isolamento do isolador e a corrente induzida seja a menor possível. Essa técnica possui como vantagem o fato de uma vez que o cabo para-raios não é particionado, pode então ser utilizado para comunicação de dados sem mais problemas, todavia possui como desvantagem ainda a possibilidade de circulação de correntes induzidas.

O sistema de cabos para-raios isolados seccionados e aterrados usa como princípio que para se limitar o valor da tensão induzida nos cabos para-raios, este deve ser aterrado em alguns pontos, mas sem possibilidade de formação de laços. Para que não haja circulação de corrente, apenas um ponto, ao longo do seu comprimento, deverá ter o cabo para-raios aterrado. Para que o aterramento seja otimizado é normalmente feito o aterramento do cabo no ponto médio do comprimento do vão considerado. O sistema de aterramento no ponto médio é convencionalmente chamado de aterramento em “T”. Como vantagem, essa técnica elimina totalmente a possibilidade de circulação de correntes induzidas, no entanto é preciso adotar medidas para continuidade de comunicação de dados, bem como retorno das correntes de curto circuito que envolvam a terra.

### C. Simulação de linhas de transmissão utilizando do ATPDraw

O programa ATPDraw possui no seu pacote uma rotina que tem por finalidade realizar os cálculos necessários para se obter os parâmetros de linhas de transmissão: o bloco chamado de LCC [13]. Utilizando essa rotina, para se determinar os parâmetros da linha de transmissão, deverão ser informadas em uma primeira aba, dados gerais como o comprimento da linha, resistividade adotada do solo, número de fases, etc.

O modelo recomendado para ser adotado para as simulações é especialmente o modelo PI, sobretudo para linhas curtas, devido à simplicidade e velocidade dos cálculos [14].

Na segunda aba devem ser informadas as características físicas dos condutores que compõem a linha de transmissão parâmetros elétricos de uma linha de transmissão.

Uma vez inseridos os parâmetros que modelarão a linha de transmissão é possível simular uma linha real ou parte dela no programa.

## III. MATERIAL DE MÉTODOS

Para realização deste trabalho foi feito um estudo sobre correntes induzidas e tensões induzidas em cabos para-raios, optando-se por realizar uma análise sobre uma linha de transmissão real da CHESF, denominada “05V7” Messias - Suape II com tensão de 500 kV. A linha de transmissão em questão tem comprimento de 155,6 km, vão básico de 552,49 m, resistividade do solo adotada de 1000  $\Omega$ .m. As capacidades operativas são, conforme a Tabela 1:

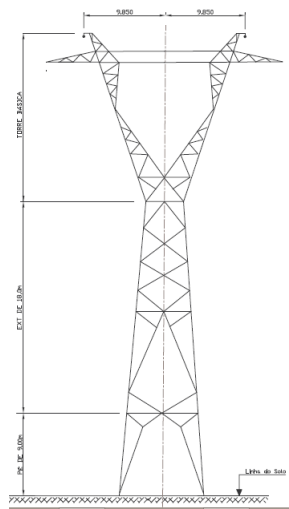
Tabela 1: Dados de capacidade operativa LT “05V7”

Condição operativa	Corrente
Corrente de longa duração diurna	2524 A
Corrente de longa duração noturna	3140 A
Corrente de curta duração diurna	3180 A
Corrente de curta duração noturna	3956 A

A linha é composta por cabos para-raios multiaterrados tipo Dotterel e OPGW, respectivamente nos primeiros 20 km. Após os primeiros 20 km troca-se um dos cabos para-raios, o Dotterel, por outro, sendo aço EHS 3/8” em diante. Permanece o cabo OPGW do lado oposto. Para toda a linha são instalados quatro cabos por fase tipo Grosbeak com uma distância entre os subcondutores no feixe de 45,7 cm.

A Figura 6 apresenta estrutura típica da LT Messias - Suape II:

Figura 6: Estrutura típica da LT Messias - Suape II.

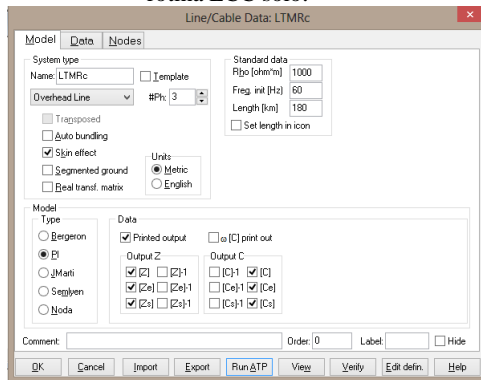


Fonte: CHESF.

Foram feitas duas simulações distintas uma vez que a linha de transmissão apresenta cabos para-raios diferentes ao longo do seu comprimento. Foram modelados dois trechos de um quilometro de linha cada para cada situação.

As Figuras 7 e 8 mostram a tela de inserção de dados na rotina LCC do ATPDraw para o trecho com cabos Dotterel e OPGW.

Figura 7: Primeira tela de inserção de dados para modelagem na rotina LCC solo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 8: Segunda tela de inserção de dados para modelagem na rotina LCC.

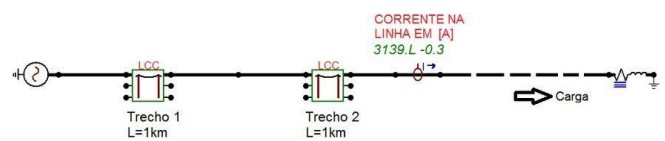
Ph.no	Rin	Rout	Rresis	Horiz	Vtower	Vsoid
#	[cm]	[cm]	[ohm/100 DC]	[m]	[m]	[m]
1	0.377	1.2573	0.095	-9.85	45	15
2	0.377	1.2573	0.095	0	45	15
3	0.377	1.2573	0.095	9.85	45	15
4	0	0	0.725	0.3568	-7.678	53.4
5	0	0	0.4572	0.225	7.222	53.4

Fonte: Próprio autor.

Na tela apresentada na Figura 7 são fornecidos parâmetros gerais do projeto com número de fases, resistividade do solo, frequência do sistema, modelo adotado para cálculo da impedância da linha entre outros. Na tela apresentada na Figura 8 são fornecidos parâmetros da geometria da linha como altura e distância entre os condutores entre si e o solo, bem como a resistência dos cabos e os raios internos e externos deles.

A Figura 9 mostra um trecho de dois vão de um quilometro cada da linha de transmissão para simulação. Primeiramente foi feita a simulação com cabos Dotterel e OPGW para se avaliar as correntes induzidas nos cabos para-raios, isolamento do cabo em situação seccionamento e de transposição.

Figura 9: Modelo no ATPDraw para a LT com cabos Dotterel e OPGW.



Fonte: Próprio autor.

A mesma figura é válida para a avaliação de um trecho de dois vãos de um quilometro da linha de transmissão, mas dessa vez para cabos EHS 3/8" e OPGW.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

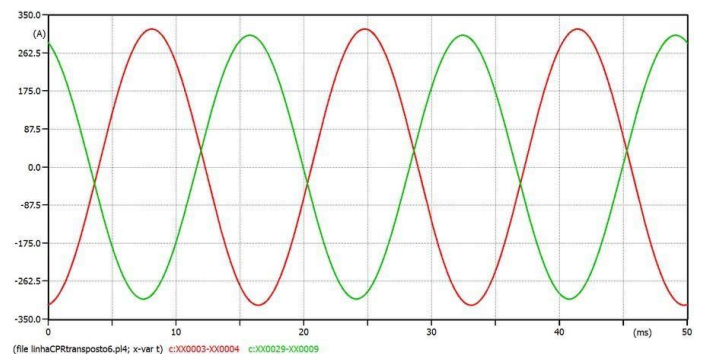
Para cada um dos trechos considerados foram feitas as simulações considerando as seguintes situações:

- Correntes induzidas nos cabos para-raios multiaterrados.
- Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados sem transposição.
- Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados e transpostos.

##### A. Considerando a parte da linha de transmissão com cabos Dotterel e OPGW

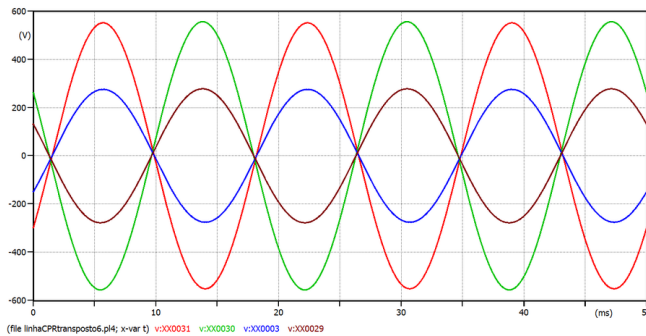
Os resultados para a simulação realizada para a parte da linha com cabos Dotterel e OPGW são apresentados nas Figuras 10, 11 e 12:

Figura 10: Correntes induzidas nos cabos para-raios multiaterrados com Dotterel (c:XX0003- XX0004) e OPGW(c:XX0029- XX0009).



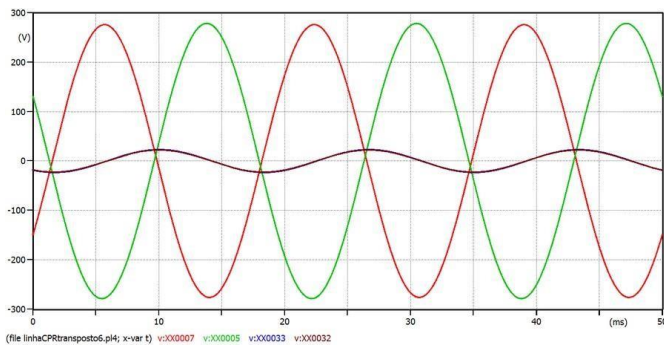
Fonte: Próprio autor.

Figura 11: Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados sem transposição com cabos Dotterel(v:XX0003 e v:XX0031) e OPGW (v:XX0029 e v:XX0030).



Fonte: Próprio autor.

Figura 12: Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados e transpostos com cabos Dotterel(v:XX0007 e v:XX0033) e OPGW(v:XX0005 e v:XX0032).



Fonte: Próprio autor.

Os resultados são apresentados resumidamente na Tabela 2 com os respectivos módulos e fases:

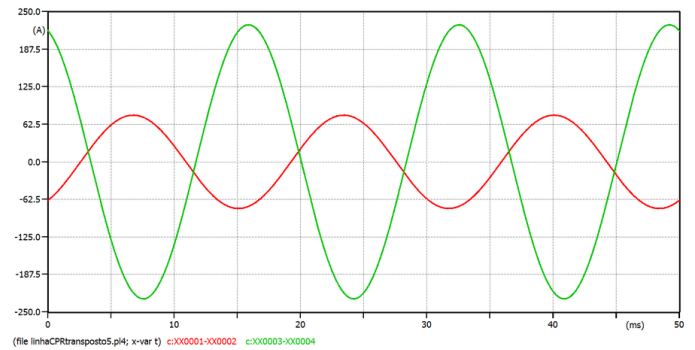
Tabela 2: Valores obtidos das simulações para cabos Dotterel e OPGW

Condição operativa	Cabo Dotterel Trecho 1	Cabo OPGW Trecho 1	Cabo Dotterel Trecho 2	Cabo OPGW Trecho 2
Correntes induzidas nos cabos para-raios multiterrados	317,7L- 175°A	303,7L- 19,49°A	317,7L- 175°A	303,7L- 19,49°A
Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados sem transposição	275,9L- 123°V	278,4L- 62,05°V	551,9L- 123°V	556,4L- 62,05°V
Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados e transpostos	276,1L- 123°V	278,6L- 62,09°V	22,44L- 144,1°V	23,21L- 143,4°V

### B. Considerando a parte da linha de transmissão com cabos EHS 3/8" e OPGW

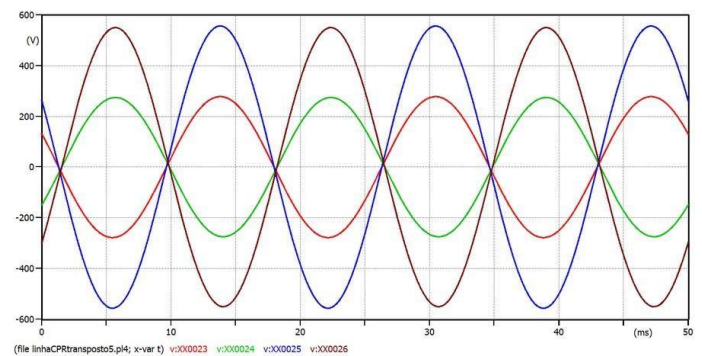
Os resultados para a simulação realizada para a parte da linha com cabos EHS 3/8" e OPGW são apresentados nas Figuras 13, 14 e 15:

Figura 13: Correntes induzidas nos cabos para-raios multiterrados com EHS 3/8" (c:XX0001- XX0002) e OPGW(c:XX0003- XX0004).



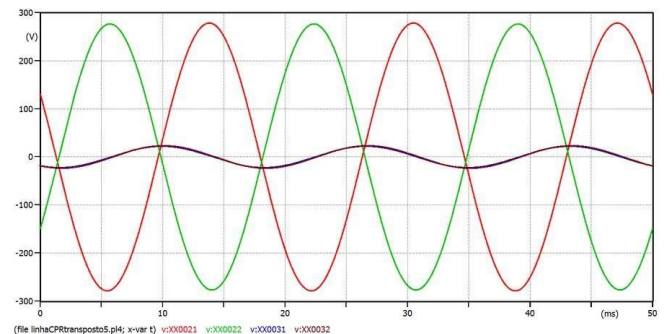
Fonte: Próprio autor.

Figura 14: Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados sem transposição com cabos EHS 3/8" (v:XX0024 e v:XX0026) e OPGW (v:XX0023 e v:XX0025).



Fonte: Próprio autor.

Figura 15: Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados e transpostos com cabos EHS 3/8" (v:XX0022 e v:XX0031) e OPGW(v:XX0022 e v:XX0032).



Fonte: Próprio autor.

Os resultados são apresentados resumidamente na Tabela 3 com os respectivos módulos e fases:

Tabela 3: Valores obtidos das simulações para cabos EHS 3/8” e *OPGW*

Condição operativa	Cabo EHS 3/8” Trecho 1	Cabo <i>OPGW</i> Trecho 1	Cabo EHS 3/8” Trecho 2	Cabo <i>OPGW</i> Trecho 2
Correntes induzidas nos cabos para-raios multiterrados	77,71L- 146°A	228,1L- 16,91°A	77,71L- 146°A	228,1L- 16,91°A
Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados sem transposição	274,6L- 123°V	278,4L- 62,02°V	550,2L- 123°V	556,4L- 62,02°V
Tensões induzidas nos cabos para-raios com os trechos interligados e transpostos	276,6L- 123°V	278,6L- 62,09°V	23,48L- 142,4°V	23,21L- 143,4°V

As perdas totais por efeito joule considerando o trecho de linha com cabos Dotterel e *OPGW* são de 126,74 kW/km. As perdas totais por efeito joule considerando o trecho de linha com cabos de aço e *OPGW* são de 66,10 kW/km.

## V. CONCLUSÕES

Este artigo foi abordado a problemática das correntes induzidas nos cabos para-raios em linhas de transmissão e alternativas para minimização deste problema.

Foram vistas duas formas de instalação de cabos para-raios: multiterrados e isolados.

Em seguida, foram realizados estudos usando o ATPDraw em uma linha de transmissão real com os cabos multiterrados e alternativamente com cabos isolados.

As análises feitas mostraram que a corrente induzida nos cabos para-raios multiterrados possuem valores elevados e implicam consequentemente em perdas elevadas.

Em alternativa, com os cabos para-raios isolados, obteve-se a tensão induzida por unidade de comprimento que é somada trecho a trecho, mas que pode ser perfeitamente controlada com a transposição dos cabos para-raios.

A alternativa de isolamento dos cabos para-raios deve ser avaliada em projetos e em linhas em operação que apresentam correntes induzidas elevadas nos cabos para-raios. Uma simulação como a apresentada neste projeto colabora para definir os trechos e comprimentos da transposição dos cabos para-raios.

## REFERÊNCIAS

[1] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. SOBRE O SIN. MAPAS.2016. Disponível em: [http://ons.org.br/PublishingImages/paginas/sobre\\_sin/mapas/SistemadeTransmissao\\_Horizonte2017.jpg](http://ons.org.br/PublishingImages/paginas/sobre_sin/mapas/SistemadeTransmissao_Horizonte2017.jpg). Acesso em: 03/04/2018.

[2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Perdas de Energia. 2018c. Disponível em:

<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>. Acesso em: 03/04/2018.

[3] FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica- Linhas Aéreas. [S.l.]: LTC/EFEI, 1977.v. 2.

[4] CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA-CEPEL. Estudo e monitoramento de perdas no sistema de transmissão. 2004.

[5] PINTO, R. L. F. Análise de métodos convencionais na avaliação do desempenho de cabos *OPGW* em linhas de transmissão. 2006. 107 p. Dissertação (Pós-graduação de Engenharia) — Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[6] FONSECA, J. R.; CARDOSO, R.; HAJDU, E. M. Linhas de transmissão sem cabos para-raios. Análise técnico-econômica. In: V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Recife: [s.n.], 1979.

[7] DUARTE, F. T. P. Redução de perdas por indução em cabos para-raios de linha de transmissão dotadas de um cabo para-raio *OPGW* e outro EHS. 2007. 81 p. Monografia (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro

[8] FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica. 3. ed. [S.l.]: EDUFU, 2015. v. 1.

[9] WANG, J. et al. Induced Voltage of Overhead Ground Wires in 500-kV Single-Circuit Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 29, n. 3, June 2014.

[10] HEVIA, O. P. Alternative transients program: comparison of transmission line models. Revista Latinoamericana del ATP, v. 1, p. 1 – 5, Março 1999.

[11] DOMINGUES, L. A. de M. C.; PINTO, R. L. F.; RÉGIS JÚNIOR, O. Desenvolvimento de Técnicas para Redução de Perdas em Cabos Para-raios *OPGW*. In: Congresso de inovação tecnológica em energia elétrica - CITENEL. Florianópolis: [s.n.], 2005

[12] NIGRI, A. I.; ASSUNÇÃO, L. A. R. Cabos para-raios isolados. Experiência de manutenção. In: IV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: [s.n.], 1977.

[13] RAMOS, J. E. Universalização da energia elétrica através da tecnologia cabos pára-raios energizados. 2010. 348 p. Tese (Ciências) — Universidade de São Paulo.

[14] PEREIRA FILHO, C. S.; PEREIRA FILHO, C. S. Análise de Redes Elétricas no Domínio do Tempo Cálculo de Parâmetros de Linhas - LCC. Belo Horizonte: [s.n.].