

Redução de perdas em cabos para-raios em linhas de transmissão aérea por aumento da resistência do laço indutivo

Márcio Severino da Silva*. José Maurício de Barros Bezerra. *

*Universidade Federal de Pernambuco, CEP 50670-901
BRASIL (Tel: 81-2126-8000; e-mail: marcio.ssilva@gmail.com e jmbb.ufpe@gmail.com).

Abstract: The objective of this work is to evaluate the losses in ground wire in overhead transmission lines. Two different situations are adopted: the first is to assess and quantify the losses in ground wire as they are normally installed and the second is to verify the effects on the losses when a measure of insertion of resistances is adopted in the loop that these conductors form with structure and soil. To determine the induced currents, and therefore the calculation of losses, simulations are carried out in the ATPDraw in the a real line. The case study is done on a 175.6 km line transmission at 500 kV with four conductor cables per phase and two ground wires. The results pointed to a substantial reduction in losses in the transmission lines with the adoption of resistances in series with ground wires.

Resumo: O objetivo deste trabalho é avaliar as perdas em cabos para-raios em linhas de transmissão aéreas. São adotadas duas situações distintas: a primeira é avaliar e quantificar as perdas nos cabos para-raios como são normalmente instalados e a segunda é verificar os efeitos sobre as perdas quando é adotada a medida de inserir resistências no laço que esses condutores formam com a estrutura e o solo. Para determinação das correntes induzidas, e por conseguinte o cálculo das perdas, são realizadas simulações no ATPDraw de uma linha real. O estudo de caso é feito sobre uma linha de transmissão de 175,6 km em 500 kV com quatro cabos condutores por fase e dois cabos para-raios. Os resultados apontaram para uma redução substancial das perdas nas linhas de transmissão com a adoção de resistências em série com os cabos para-raios.

Keywords: Transmission lines; ground wire; loss; resistance; reduction.

Palavras-chaves: Linhas de transmissão; cabos para-raios; perdas; resistência; redução.

1. INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão são um importante elemento da instalação do sistema elétrico de qualquer país. No Brasil, principalmente por possuir dimensões continentais, tal instalação se torna ainda mais importante. O Operador Nacional do Sistema (ONS) projeta que em 2023 o Brasil possua 185.484 km de comprimento de linhas de transmissão instalados (CBIE. 2019).

Contudo, linhas de transmissão em grande quantidade e de comprimentos longos, aumentam as perdas elétricas do sistema elétrico. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de todas as perdas que existem no sistema interligado brasileiro, 4% estão na transmissão (ANEEL. 2015).

Conforme apresentado no relatório do balanço energético nacional 2019 (Relatório Síntese / Ano Base 2018), feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), foram gerados 601,4 TWh de energia naquele ano (EPE. 2019). Então, considerando as perdas típicas da transmissão, isso representaria 24 TWh de energia perdida. O suficiente para

atender aproximadamente 20 mil consumidores residenciais com consumo de 100 kWh por mês durante um ano.

Além de tornar o sistema elétrico menos eficiente, as perdas oneram os produtores e consumidores de energia elétrica. Ainda de acordo com a ANEEL, as perdas são mensalmente contabilizadas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, de acordo com os dados obtidos da medição da geração e a energia entregue às redes de distribuição. A diferença entre a energia gerada e a entregue às distribuidoras são as perdas na transmissão e o custo dessas perdas é dividido em 50% para geração e 50% para o consumo (ANEEL. 2015).

Em se tratando de linhas de transmissão, as perdas são divididas, normalmente, em perdas por dispersão, por fuga nas cadeias de isoladores e por efeito joule (Fuchs. 1979a). As perdas por dispersão são atribuídas ao efeito corona. Já a passagem de corrente elétrica nos condutores de fase e condutores de blindagem (cabos para-raios) são responsáveis pelas perdas por efeito joule (Fuchs. 1979a).

Avaliação realizada em uma linha de transmissão de 500 kV, 300 km de comprimento, apontaram para perdas nos cabos

para-raios da ordem de alguns megawatts, conforme pode ser visto na Fig. 1, retirada de (Moreira. 2006).

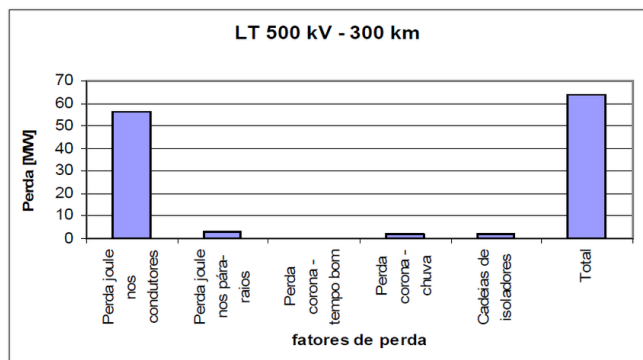


Fig. 1 Composição das perdas em uma linha de transmissão de 500 kV.

As perdas que surgem nos cabos para-raios das linhas de transmissão são provocadas pelo aparecimento de correntes induzidas nesses condutores, devido ao acoplamento eletromagnético desses cabos com os condutores fase do sistema. As perdas nos cabos para-raios podem atingir muitas vezes valores preocupantes. Desta forma as perdas não somente devem ser avaliadas e acompanhadas, mas também devem ser buscados meios de reduzi-las.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As linhas de transmissão aéreas estão expostas ao tempo e, portanto, suscetíveis a serem atingidas por descargas atmosféricas. O fenômeno das descargas atmosféricas é o principal responsável pelo desligamento não programados nas linhas de transmissão. As descargas atmosféricas induzem tensões, quer seja por uma descarga direta ou indireta, na linha de transmissão. As tensões oriundas do fenômeno da descarga atmosférica podem atingir valores relativamente altos. Estas tensões podem vir a romper a rigidez dielétrica do ar e provocar um curto-circuito.

Para fazer a interceptação das descargas diretas sobre as linhas de transmissão são instalados condutores denominados de cabos para-raios com a função de prover blindagem dos condutores fase (Fuchs. 1979b). As descargas atmosféricas podem assim ser direcionadas para a terra de forma mais segura.

2.1 Cabos para-raios multiterrados

A forma mais comum de instalação dos cabos para-raios em linhas de transmissão é na qual estes cabos são interligados ao solo através de uma ligação consistente em todas as estruturas (torres), no caso delas serem metálicas, ou com condutores de aterramento (Fuchs. 1979b). Normalmente a conexão ao solo é garantida por elementos especialmente feitos para isso com o objetivo de se conseguir uma baixa resistência de aterramento (Fuchs. 1979b). Este tipo de esquema, em que os cabos para-raios estão interligados ao solo em todas as estruturas é denominado de cabos multiterrados. Por sua vez, o aterramento dos pés das torres

é constituído por hastes e/ou cabos enterrados no solo que são denominados “contrapesos”.

Normalmente os condutores comerciais que são aplicados como cabos para-raios de linhas de transmissão são as cordoalhas de fio de aço zincado tipo cabo EHS (extra-alta resistência) ou cabos de Alumínio com Alma de Aço (CAA). Nas últimas décadas, entretanto, vem se tornando cada vez mais comum a utilização do cabo denominado OPGW (Optical Ground Wire). O cabo OPGW nestes casos, além de prover blindagem, é usado para transmissão de informação através de fibra óptica contida no núcleo deste condutor (Duarte. 2007).

2.2 O inconveniente dos laços formados nos cabos para-raios multiterrados

A instalação de cabos para-raios multiterrados cria malhas que são compostas pelos cabos para-raios, estruturas e o solo (Fuchs. 1979a). A Fig. 2 e Fig. 3, retiradas de (Wanget al. 2014), apresentam, respectivamente, os laços formados pelos cabos para-raios e o circuito equivalente da instalação com dois cabos para-raios multiterrados:

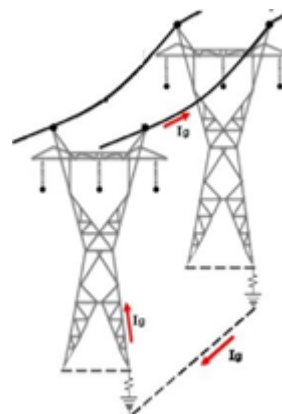


Fig. 2 Malha formada para circulação de corrente entre estruturas e o solo em cabos para-raios multiterrados.

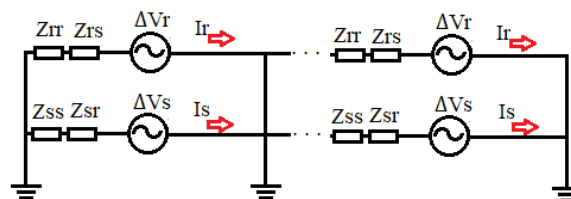


Fig. 3 Circuito formado pela circulação de corrente entre estruturas e o solo em cabos para-raios multiterrados.

As tensões e as correntes em uma linha de transmissão se relacionam pela seguinte equação matricial (1) (Fuchs. 1979b):

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \\ \Delta V_r \\ \Delta V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{Ar} & Z_{As} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{Br} & Z_{Bs} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{Cr} & Z_{Cs} \\ Z_{rA} & Z_{rB} & Z_{rC} & Z_{rr} & Z_{rs} \\ Z_{sA} & Z_{sB} & Z_{sC} & Z_{sr} & Z_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_r \\ I_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde:

- $\Delta V_A, \Delta V_B, \Delta V_C$ é a queda de tensão nos cabos condutores [V/km];
- $\Delta V_r, \Delta V_s$ é a queda de tensão nos cabos para-raios [V/km];
- Z_{AA}, Z_{BB}, Z_{CC} são as impedâncias próprias nos cabos condutores [Ω /km];
- Z_{rr}, Z_{ss} são as impedâncias próprias nos cabos para-raios [Ω /km];
- $Z_{AA}, Z_{AB}, Z_{AC}, Z_{Ar}, Z_{As}, Z_{BA}, Z_{BB}, Z_{BC}, Z_{Br}, Z_{Bs}, Z_{CA}, Z_{CB}, Z_{CC}, Z_{Cr}, Z_{Cs}$ são as impedâncias mútuas entre os cabos condutores e entre os cabos condutores e cabos para-raios [Ω /km];
- $Z_{rA}, Z_{rB}, Z_{rC}, Z_{rr}, Z_{rs}, Z_{sA}, Z_{sB}, Z_{sC}, Z_{sr}, Z_{ss}$ são as impedâncias mútuas entre os cabos para-raios e entre os cabos para-raios e os cabos condutores [Ω /km];
- I_A, I_B, I_C são as correntes nos cabos condutores [A];
- I_r, I_s são as correntes nos cabos para-raios [A].

Nota-se pela equação (1) que a corrente que circula nos cabos para-raios tem dependência direta com a impedância própria e mútua desses condutores, e por consequência, da resistência.

Para sistemas com cabos para-raios multiaterrados, pode-se admitir que a queda de tensão longitudinal em todas as torres é zero. Ao se analisar a equação (1) (Fuchs, 1979b), pode-se reescrevê-la no formato da equação (2) para se obter o valor das correntes induzidas nos cabos para-raios:

$$\begin{bmatrix} I_r \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{rr} & Z_{rs} \\ Z_{sr} & Z_{ss} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{rA} & Z_{rB} & Z_{rC} \\ Z_{sA} & Z_{sB} & Z_{sC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

A circulação de correntes induzidas nos cabos para-raios gera perdas por efeito joule que dependem do quadrado da corrente induzida nestes condutores e a resistência elétrica deles. As perdas nos cabos para-raios podem ser calculadas de acordo com a seguinte expressão, conforme a equação (3):

$$P = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (3)$$

Onde:

- P são as perdas nos cabos para-raios em [W/km]
- I_i é a corrente induzida no cabo para-raios i em [A]

- R_i é a resistência do cabo para-raios i em [Ω /km]

2.3 Simulação de linhas de transmissão no ATPDraw

O programa ATPDraw possui em seu pacote uma rotina que tem por objetivo fazer os cálculos necessários para se obter os parâmetros de linhas de transmissão: o bloco chamado de LCC (PEREIRA et al. 2010). Utilizando essa rotina é possível simular linhas de transmissão, ou trechos delas, em regime permanente, temporário ou transitório. Para tanto, é necessário informar, em uma primeira aba, dados gerais como o comprimento da linha, resistividade adotada do solo, número de fases etc. Em uma segunda tela são informados dados da geometria da linha e dos condutores dela.

O modelo PI é o mais recomendável para ser adotado em situações de simulações em regime permanente devido a forma simples e rápida com que realiza os cálculos (PEREIRA et al.2010).

3. ESTUDO DE CASO

Neste trabalho foi feito um estudo sobre as correntes induzidas em cabos para-raios e perdas e como elas se modificariam com o aumento da resistência deste com a inserção de um resistor em série. Optou-se por realizar um estudo 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 Ω .m. As capacidades operativas são, conforme a Tabela 1:

Tabela 1. Dados de capacidade operativa da 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 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.

As simulações realizadas foram de duas situações 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 a corrente transportada pela linha foi a corrente de longa duração diurna, 3140 A.

As Fig. 4 e Fig. 5 mostram a tela de inserção de dados na rotina LCC do ATPDraw para o trecho com cabos Dotterel e OPGW.

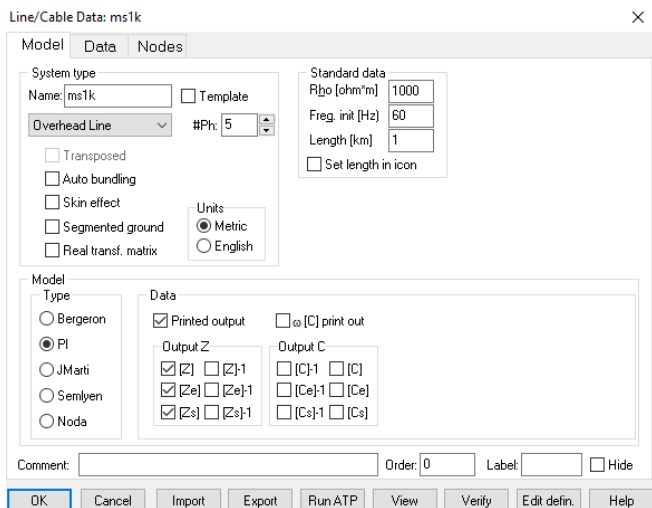


Fig. 4 Primeira tela de inserção de dados para modelagem na rotina LCC.

Fig. 5 Segunda tela de inserção de dados para modelagem na rotina.

Para cada uma das avaliações houve a circulação da corrente de 3140 A na linha. As situações, para cada uma das avaliações, foram realizadas com a situação atual da instalação dos cabos para-raios (instalação tradicional) e com a inserção de resistências em série com esses cabos fechando os laços. A Fig. 6 e Fig. 7 apresentam, respectivamente, o circuito modelado no ATPDraw.

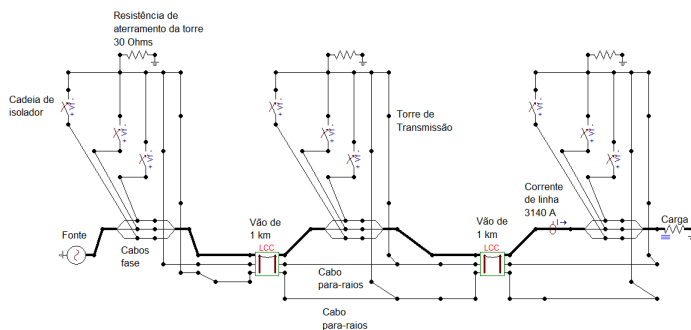


Fig. 6 Modelo no ATPDraw para a LT sem resistência adicional.

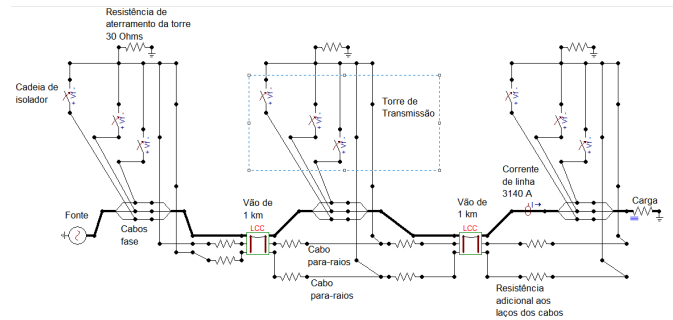


Fig. 7 Modelo no ATPDraw para a LT com resistência adicional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerando trecho com cabos para-raios Dotterel e OPGW

Os resultados obtidos para a simulação realizada com cabos Dotterel e OPGW são apresentados, resumidamente, na Tabela 2 e Tabela 3:

Tabela 2. Resistência dos cabos para-raios

Resistência do cabo para-raios (Ω/km)		Resistência adicional nas extremidades do trecho (Ω)		Resistência total (Ω/km)	
OPGW	Dotterel	OPGW	Dotterel	OPGW	Dotterel
0,777	0,497	-	-	0,777	0,497
0,777	0,497	10	10	20,777	20,497
0,777	0,497	50	50	100,777	100,497
0,777	0,497	100	100	200,777	200,497

Com a resistência total apresentada na Tabela 2, é possível calcular as perdas. A Tabela 3 mostra o resultado da multiplicação destas resistências pelo quadrado da corrente verificada:

Tabela 3. Correntes e perdas nos cabos para-raios

Correntes induzidas (A)		Perdas (kW/km)		Perdas totais (kW/km)
OPGW	Dotterel	OPGW	Dotterel	
316,3	317,5	77,736	50,101	127,836
13,55	13,62	3,815	3,802	7,617
2,89	2,91	0,842	0,851	1,693
1,52	1,53	0,464	0,469	0,933

As correntes induzidas no cabo para-raios OPGW podem ser analisadas no tempo, para ilustração do efeito redutor da corrente induzida. Na Fig. 8 é mostrado o resultado da corrente no cabo OPGW sem resistência adicional e para uma resistência adicionada aos terminais de conexão de 10 Ω.

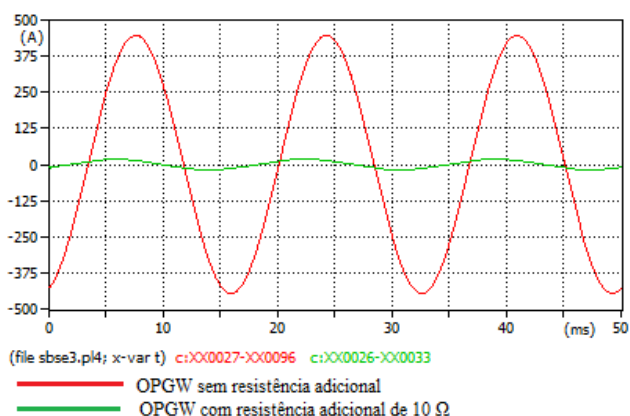


Fig. 8 Corrente induzida no cabo para-raios OPGW sem resistência adicional e com resistência adicional de 10 Ω.

A Tabela 2 e Tabela 3 mostram as novas resistências totais, correntes induzidas e as perdas. As tabelas revelam como a redução da corrente é significativa de acordo com a inserção das resistências.

Evidencia-se, graficamente, pela Fig.8 uma redução significativa da corrente. O valor máximo é reduzido de 447 A para 18,75 A.

4.2 Considerando trecho com cabos para-raios aço 3/8" EHS e OPGW

Os resultados obtidos para a simulação realizada com cabos de aço 3/8" e OPGW são apresentados, resumidamente, na Tabela 4 e Tabela 5:

Tabela 4. Resistência dos cabos para-raios

Resistência do cabo para-raios (Ω/km)		Resistência adicional nas extremidades do trecho(Ω)		Resistência total (Ω/km)	
OPGW	Aço 3/8"	OPGW	Aço 3/8"	OPGW	Aço 3/8"
0,777	3,728	-	-	0,777	3,728
0,777	3,728	10	10	20,777	23,728
0,777	3,728	50	50	100,777	103,728
0,777	3,728	100	100	200,777	203,728

Com a resistência total apresentada na Tabela 4 é possível calcular as perdas. A Tabela 5 mostra o resultado da multiplicação destas resistências pelo quadrado da corrente verificada:

Tabela 5. Correntes e perdas nos cabos para-raios

Correntes induzidas (A)		Perdas (kW/km)		Perdas totais (kW/km)
OPGW	Aço 3/8"	OPGW	Aço 3/8"	
110,7	105,4	9,522	41,415	50,937
12,76	12,44	3,383	3,672	7,055
2,87	2,83	0,830	0,831	1,661
0,83	0,83	0,138	0,140	0,279

As correntes induzidas no cabo para-raios OPGW podem ser analisadas no tempo, para ilustração do efeito reductor da corrente induzida. Na Fig. 9 é mostrado o resultado da corrente no cabo OPGW sem resistência adicional e uma resistência adicionada aos terminais de conexão de 10 Ω.

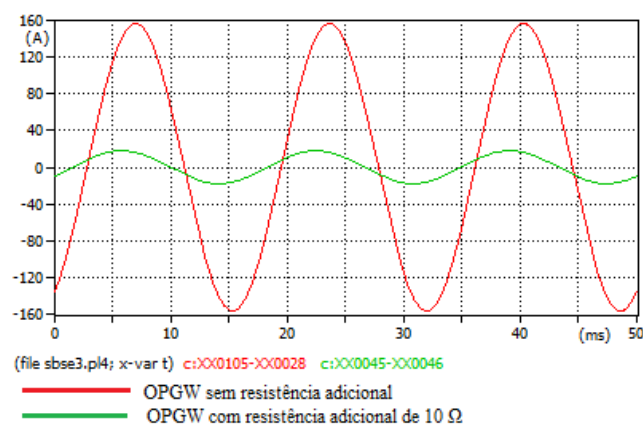


Fig. 9 Corrente induzida no cabo para-raios OPGW sem resistência adicional e com resistência adicional de 10 Ω.

A Tabela 4 e Tabela 5 mostram as novas resistências totais, correntes induzidas e as perdas. As tabelas revelam como a redução da corrente é significativa de acordo com a inserção das resistências.

Evidencia-se, graficamente, pela Fig.9 uma redução significativa da corrente. O valor máximo é reduzido de 156,6 A para 18,05 A.

4.3 Redução das perdas totais

Os resultados obtidos para a simulação realizada com cabos Dotterel e OPGW são apresentados, resumidamente, na Tabela 6 e 7:

Tabela 6. Perdas comparativas sem e com resistência adicional

Perdas comparativas para cabos para-raios Dotterel e OPGW		Redução comparativa das perdas	
Resistência adicional	Perdas (kW/km)	Representação em termos comparativos (%)	Redução (%)
-	127,836	100,00%	0,00%
10	7,617	5,96%	94,04%
50	1,693	1,32%	98,68%
100	0,933	0,73%	99,27%

Tabela 7. Perdas comparativas sem e com resistência adicional

Perdas comparativas para cabos para-raios aço 3/8” e OPGW		Redução comparativa das perdas	
Resistência adicional	Perdas (kW/km)	Representação em termos comparativos	Redução
-	50,937	100,00%	0,00%
10	7,055	13,85%	86,15%
50	1,661	3,26%	96,74%
100	0,279	0,55%	99,45%

A Tabela 6 mostra a redução das perdas para o primeiro trecho da linha. Verifica-se uma redução comparativa de 99,27%. Esse efeito praticamente anula as perdas para resistência adicional ao laço de 200 Ω .

Tabela 7 mostra a redução das perdas para o segundo trecho da linha. Verifica-se uma redução comparativa de 99,45%. Esse efeito praticamente anula as perdas para resistência adicional ao laço de 200 Ω .

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi abordada a problemática das correntes induzidas nos cabos para-raios em linhas de transmissão, as perdas causadas por essas correntes e alternativas para minimização destas perdas.

Foi avaliada uma forma de reduzir essas correntes aumentando o valor da resistência do laço que esses cabos formam.

A medida adotada foi acrescentar resistências nesses laços, verificar as novas correntes induzidas e calcular as novas perdas.

Em seguida, foram realizadas simulações utilizando o ATPDraw em uma linha de transmissão real com os cabos multiaterrados sem nenhuma medida ou cuidado adicional em relação as perdas nos cabos para-raios e os efeitos de uma medida para redução das correntes induzidas.

As análises feitas mostraram que a corrente induzida nos cabos para-raios multiaterrados, sem qualquer medida de preocupação das perdas, possuem valores elevados e implicam consequentemente em perdas elevadas.

Obteve-se um efeito muito eficaz na redução das perdas através da inserção de resistências. O potencial de economia calculado atingiu valores superiores a 99% para o último cenário analisado.

O aumento da resistência dos laços dos cabos para-raios poderia ser obtido, por exemplo, pela instalação de um resistor fixado entre a estrutura da torre e o cabo para-raios nas extremidades dos vãos. Essa solução, entretanto, deve levar em consideração o comportamento dos cabos e dos

resistores durante uma situação de descarga atmosférica ou curto circuito envolvendo a terra. É preciso considerar que o resistor possua um dispositivo, como centelhador em paralelo, para conduzir correntes elevadas como aquelas oriundas de uma descarga atmosférica ou curto-circuito.

As situações de operação sob situação de descarga atmosférica ou curto circuito não foram analisadas neste trabalho, mas podem ser objeto de trabalhos futuros. Todavia, não há evidências, até o momento, que a inserção do resistor poderia aumentar o valor das sobretensões transitórias, uma vez que estas dependem prioritariamente da impedância de surto da torre e da resistência de aterramento dela.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2020). ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. [online] Www2.aneel.gov.br. Available at: <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfi%20I=4> [Accessed 20 Jan. 2020].
- CBIE, Centro Brasileiro de Infraestrutura. (2020). *Quantos quilômetros de linha de transmissão de energia temos no Brasil?*. [online] CBIE. Available at: <https://cbie.com.br/artigos/quantos-quilometros-de-linha-de-transmissao-de-energia-temos-no-brasil/> [Accessed 20 Jan. 2020].
- Duarte, F. (2007). *Redução de perdas por indução em cabos pára-raios de linhas de transmissão dotadas de um cabo pára-raio OPGW e outro EHS*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. (2019). *Balço Energético Nacional 2019*. [online] Epe.gov.br. Available at: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf> [Accessed 20 Jan. 2020].
- Fuchs, R. (1979). *Transmissão de energia elétrica*. 1st ed. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos. p.V.1.
- Fuchs, R. (1979). *Transmissão de energia elétrica*. 1st ed. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos. p.V.2.
- Moreira, F. (2006). *Influência do cálculo da ampacidade no despacho da operação*. Doutorado. Unicamp.
- Pereira Filho, C., Almeida, F. and Conti, A. (2010). *Análise de Redes Elétricas no Domínio do Tempo Cálculo de Parâmetros de Linhas - LCC*. Belo Horizonte.
- Pinto, R. (2006). *Análise de métodos convencionais na avaliação do desempenho de cabos OPGW em linhas de transmissão*. Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Wang, J., Wang, Y., Peng, X., Li, X., Xu, X. and Mao, X. (2014). *Induced Voltage of Overhead Ground Wires in 500-kV Single-Circuit Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, 29(3), pp.1054-1062.