



## Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

### Uma experiência no uso de *underbuilt wires* e aplicação conjugada de dispositivos para-raios e impedâncias limites de pé-de-torre para melhoria de desempenho frente a descarga atmosféricas de linhas de transmissão instaladas em condições inóspitas

Silverio Visacro(1); Fernando Henrique Silveira(1); Maria Helena Murta Vale(1); Gabriel Dias Pomar(2); UFMG(1); Celeo Redes(2);

#### RESUMO

O trabalho descreve as avaliações relativas à instalação de cabos *underbuilt* na linha de transmissão de 230 kV Jauru-Vilhena, instalada em região de extrema incidência de descargas atmosféricas e elevadíssima resistividade do solo. Esta prática constitui medida de impacto para melhoria do desempenho da linha frente a descargas. Consideraram-se condições combinadas de instalação de cabos *underbuilt* e dispositivos para-raios na linha e de atuação no aterramento das torres. Demonstrou-se a alta qualidade da solução adotada, a partir da determinação dos limites de eficiência de aplicação das alternativas de melhoria, notadamente de uso de 2 e 4 dispositivos para-raios por torre.

#### PALAVRAS-CHAVE

Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas, *Underbuilt wires*, Para-raios, Impedância de Aterramento, Impedância de Pé de Torre

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

O backflashover constitui o principal mecanismo de desligamentos por descargas atmosféricas de linhas de transmissão (LTs) de tensão inferior a 500 kV instaladas em solos de resistividade moderada e elevada, condição típica das linhas brasileiras (1,2). Há um conjunto de alternativas para melhoria do desempenho destas linhas por meio da redução da taxa de backflashover. A definição da alternativa a adotar é influenciada por questões de ordem técnica e econômica, associadas às características da LT e ao ambiente de sua instalação.

Usualmente, a alternativa de menor custo consiste na redução da impedância de aterramento de pé de torre ZP (ou da resistência de aterramento correspondente) (3,4). No caso de linhas instaladas sobre solos de alta resistividade, pode-se alcançar tal redução por meio de longos cabos contrapeso (5). A redução desta impedância resulta na diminuição da amplitude das sobretensões nas cadeias de isoladores decorrentes da incidência direta de descargas na LT, com consequente diminuição da probabilidade de estabelecimento de arcos elétricos de contornamento dos isoladores, que poderiam levar ao backflashover. Tal tema é explorado em detalhes nas referências (4,6). A Figura 1 ilustra este aspecto.

Uma segunda alternativa consiste na instalação de dispositivos para-raios (DPRs) em paralelo com os isoladores da LT (7). Tais dispositivos têm uma curva característica  $V_{xl}$  que apresenta valor elevadíssimo de impedância para as tensões de regime permanente (funciona de forma similar a uma chave aberta para amplitudes de tensão inferiores a determinado limiar) e baixo valor de impedância para tensões que excedam tal limiar.

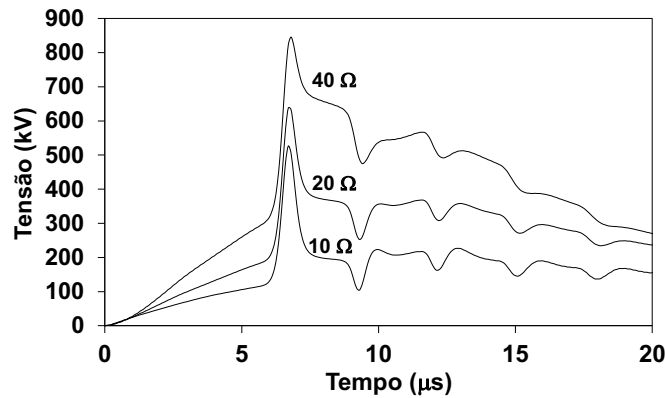


FIGURA 1 – Diminuição da amplitude da sobretensão na cadeia de isoladores superior de LT de 138 kV, cuja torre autoportante é submetida a uma típica corrente de retorno de primeira descarga nuvem solo, em função da redução da impedância de aterramento de pé de torre. Adaptado de (8).

A operação desses dispositivos limita a sobretensão entre a fase e a estrutura da torre, prevenindo que esta exceda a suportabilidade do isolamento, o que levaria à ocorrência de flashover no isolador (7,9). O uso de DPRs nas três fases é muito efetivo para prevenir a ocorrência de backflashover na torre. Entretanto, os custos desta alternativa são usualmente elevados, por envolverem não apenas o custo de aquisição dos dispositivos, como também da sua instalação e manutenção. Ademais, para assegurar a operação adequada dos dispositivos, ainda se faz necessário certo nível de investimento em eletrodos de aterramento. Em muitos casos, tais custos tornam inviável a aplicação em escala desta medida. Assim, é comum a prática de uso de DPRs apenas em algumas torres críticas ao longo da LT e/ou a instalação de dispositivos nas torres para proteger apenas uma ou duas das fases da linha. Dependendo da impedância de pé de torre e da amplitude da corrente de descarga, a instalação de para-raios protegendo apenas parte das fases deixa os isoladores das fases desprotegidas ainda susceptíveis à ocorrência de backflashover. É presumível que, mesmo na condição de DPRs protegendo todas as fases de uma torre, na ocorrência de uma incidência nesta, as sobretensões transferidas para as torres adjacentes pela operação dos dispositivos possa ali ocasionar flashover nos isoladores, casos esses não sejam também protegidos. Até recentemente, a literatura era relativamente pobre no tratamento da efetividade e das limitações desta alternativa, bem como acerca das recomendações e orientações de sua aplicação. Boa parte destas deficiências foram superadas com a publicação de um conjunto de trabalhos recentes (10-12), que desenvolvem avaliação elaborada sobre o desempenho de LTs de circuitos simples e duplo frente a descargas, considerando as diversas configurações possíveis de instalação de DPRs e diferentes condições de impedância de aterramento das torres. A Figura 2, adaptada da referência (10) ilustra o efeito do uso de DPRs na redução da sobretensão na cadeia de isoladores de uma LT.

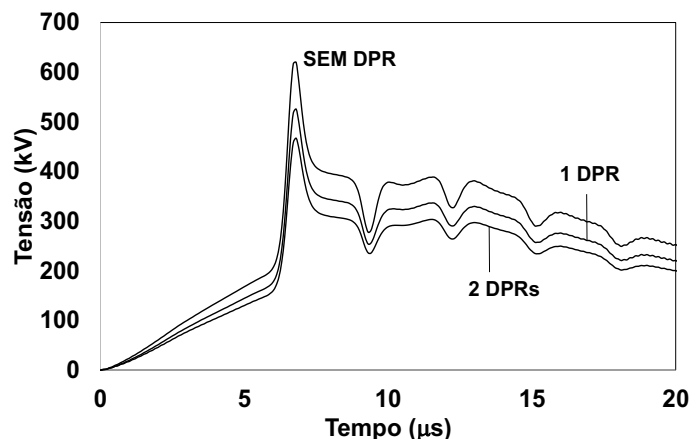


FIGURA 2 – Ilustração da redução da sobretensão na cadeia de isoladores por meio do uso de dispositivos para-raios em torre da LT de 138 kV (Impedância de pé de torre  $Z_p = 20 \Omega$ ). Adaptada de (10).

Uma alternativa intermediária às práticas de redução de impedância de aterramento e colocação de DPR's consiste na instalação dos chamados cabos *underbuilt* (*underbuilt wires*) ao longo dos vãos que flanqueiam torres que apresentam valores de impedância de aterramento muito elevadas, as quais excedem o valor de impedância que assegura número aceitável de desligamentos da LT. Esta alternativa é discutida em detalhes na referência (13). Dependendo do número de cabos *underbuilt* (2 ou 1) empregados e do valor de impedância de pé de torre, o uso desta alternativa pode gerar substancial redução da sobretensão nas cadeias de isoladores e, portanto, do número de desligamentos da LT. Em certos casos tal redução é comparável àquela resultante da redução à metade do valor

da impedância do aterramento da torre. A Figura 3 ilustra como esta prática pode ser efetiva para redução da sobretensão.

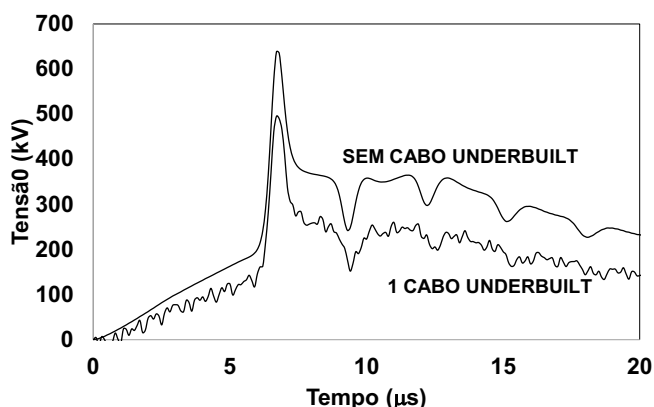


FIGURA 3 – Ilustração da redução de sobretensão nos isoladores da cadeia superior de uma LT 138 kV devido ao uso de cabos *underbuilt* para melhoria do desempenho frente a descargas.

Neste trabalho discutem-se as alternativas para melhoria de desempenho desenvolvidas no caso crítico de uma linha de transmissão instalada em região de muita alta taxa de incidência de descargas e de solos com elevadíssima resistividade (de 6000 a 60.000  $\Omega\text{m}$ ), na qual vultosos investimentos já realizados em melhoria de aterramento e em instalação de DRPs não foram suficientes para se alcançar o desempenho requerido. Notadamente, o trabalho foca na aplicação da técnica de instalação de cabos *underbuilt* num trecho de 100 km da LT. As correspondentes realizações foram desenvolvidas no contexto de projeto de P&D da ANEEL, envolvendo as equipes de pesquisa do LRC/UFMG e da Jauru Transmissora.

## 2.0 - A LINHA DE TRANSMISSÃO OBJETO DE MELHORIA DE DESEMPENHO

O trecho da linha de transmissão de circuito duplo de 230 kV da Jauru Transmissora S.A., objeto do projeto de P&D, está instalado entre Vilhena e Jauru. Seu trajeto, ilustrado na Figura 4, tem extensão de 345 km, com 20 km em Rondônia e os restantes 325 km no Mato Grosso. O trecho da linha é composto por 766 torres, com vão médio de 450 m e largura de faixa de servidão de 45 m. Aproximadamente 90% das torres são estaiadas e têm altura típica de 41 m.

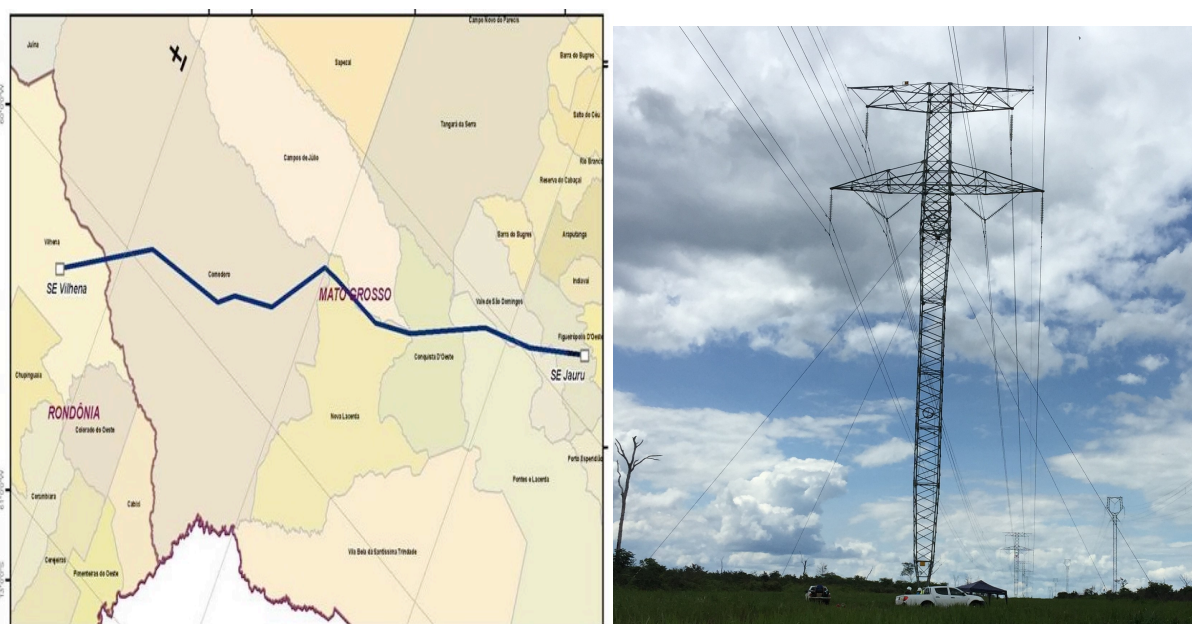


FIGURA 4 – Aspectos da LT de 230 kV circuito duplo Vilhena–Jauru: (a) Trajeto, (b) Ilustração de torre típica da LT.

Devido ao desempenho não satisfatório da LT frente a descargas, desde sua instalação a empresa tem realizado melhorias, buscando alcançar taxas aceitáveis de desligamento por descargas. Nesta perspectiva, foram realizados vultosos investimentos na melhoria da resistência de aterramento das torres e na instalação de DRPs nas torres em condições mais críticas e localizadas nas regiões onde a densidade desligamentos se mostrou mais elevada. Embora

o desempenho tenha sido melhorado, as condições extremamente desfavoráveis de resistividade do solo não permitiriam que fossem alcançado o limite recomendado pelo ONS de 2 desligamento/100-km/ano para linhas de 230 kV. A despeito da melhora de desempenho decorrente dessas medidas, a LT ainda mostra uma taxa média superior a este limite nos últimos 8 anos.

Considerando-se a importância da impedância de aterramento das torres na ocorrência de backflashover, uma primeira realização do projeto consistiu na constituição de uma base confiável de dados da resistência de aterramento das torres. Para tal, houve o treinamento de equipe para realização desta medição com metodologia consistente e de implementação viável, com uso de medidor de 25 kHz. Os dados atualizados decorrentes desta realização são apresentados na Figura 5. Na mesma figura são indicadas as torres que nas quais foram instalados 2 DPRs (fases na posição inferior) e 4 DPRs (fases nas posições inferior e intermediária) e a distribuição de desligamentos ao longo da LT.

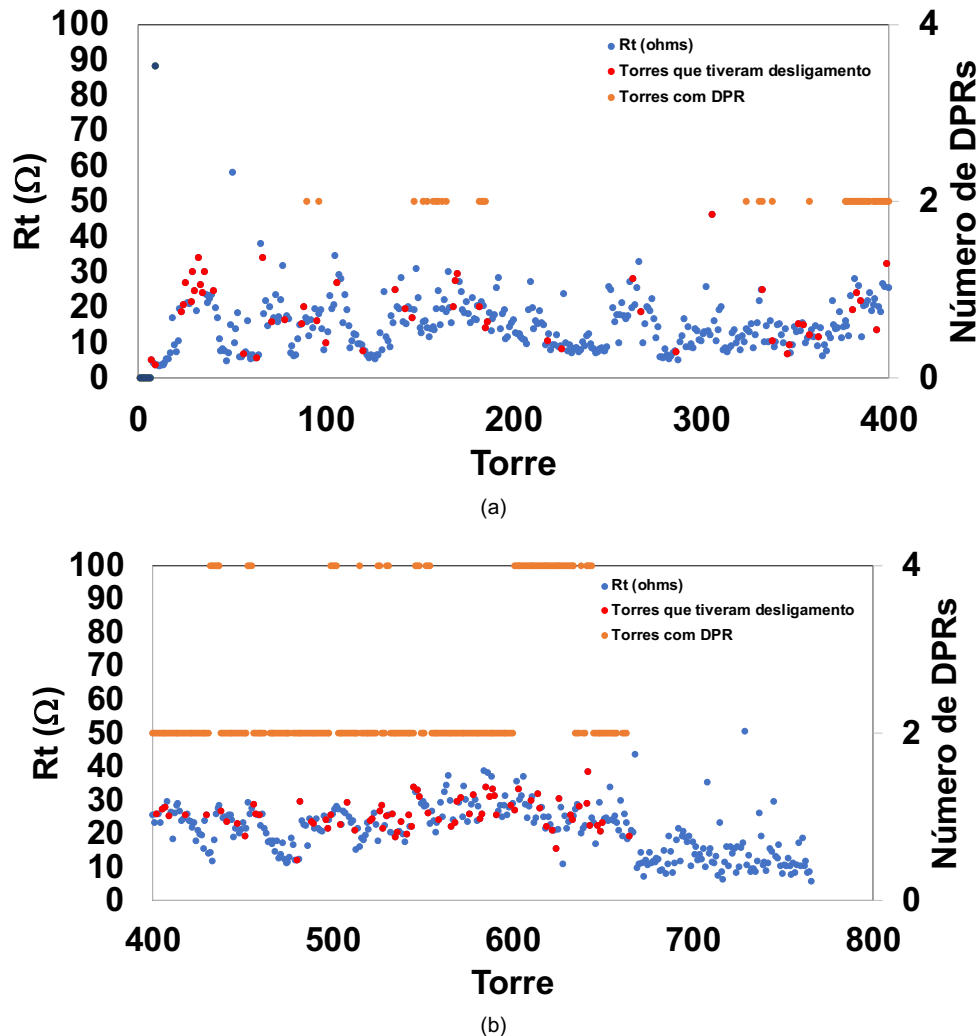


FIGURA 5 – Distribuição dos valores de resistência de aterramento, dos desligamentos e da instalação de DRPs ao longo da LT: (a) Torres de 1 a 400, (b) Torres de 401 a 760.

### 3.0 - METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

As avaliações relativas ao desempenho da LT e ao impacto das potenciais alternativas de melhoria nesse desempenho seguiram um procedimento padronizado pela equipe do projeto, baseado em simulações computacionais. Os resultados destas simulações subsidiaram as definições relativas às realizações em campo para implementação de alternativas, notadamente de instalação dos cabos *underbuilt*.

Nestas avaliações, simulou-se a sobretensão resultante nas cadeias de isoladores devido à incidência de descargas diretas no topo das torres da LT (Figura 6(a)), usando-se um elaborado modelo eletromagnético (HEM – *Hybrid Electromagnetic Model*) (14), amplamente aplicado em estudos relativos à proteção contra descargas.

Nas simulações adotou-se a forma de onda de duplo pico indicada na Figura 6(b), representativa da corrente da primeira descarga de retorno (15). Esta onda reproduz todos os parâmetros medianos de amplitude (primeiro e

segundo picos), de tempo (tempos de frente Td30/ Td10 e tempo de meia onda) das correntes das primeiras descargas medidas por Berger, além de sua derivada máxima (16).

As condições de aterramento foram simuladas por meio de impedâncias impulsivas de aterramento  $Z_P$  (para primeira corrente de retorno) na faixa de 10 a 80  $\Omega$ . Como demonstra a referência (4), o desempenho calculado com esta representação dos eletrodos de aterramento da torre é praticamente igual àquele obtido com a representação física dos eletrodos. Tal desempenho é, contudo, muito diferente daquele obtido a partir da representação do aterramento por sua resistência de baixa frequência. Foi simulada a presença de 2 e 4 dispositivos para-raios nas torres, de acordo com sua curva Vxl (10-12). Em todos estes casos, foram consideradas a ausência e a presença de 2 cabos *underbuilt*, instalados 30 m acima do solo.

Às ondas de sobretensão resultante nas cadeias de isoladores da torre em cada caso simulado aplicou-se um critério para verificação de ocorrência de flashover nos isoladores, consistindo no designado Método DE (*Disruptive Effect Model*) (17), para determinar-se a correspondente corrente crítica de descarga (valor limiar de pico de corrente de primeira descarga que leva o isolador ao flashover). O percentual de correntes de descargas com valor de pico excedendo tal limiar foi calculado a partir da curva do IEEE de distribuição de probabilidade acumulada de pico de primeiras correntes de retorno (18). Note que esse percentual corresponde à probabilidade de ocorrência de backflashover na torre submetida à incidência de descarga. O produto desta percentagem pelo número esperado de incidências de descargas na área de influência da torre permite calcular o número de desligamento esperados para tal torre, aplicando-se um fator multiplicativo 0,6, para se ter em conta o fato de que as incidências distribuídas ao longo do vão são menos severas que as incidências diretas na torre (18). A referência (6) apresenta uma abordagem detalhada da aplicação do método DE para determinação da corrente crítica, para cálculo da probabilidade de backflashover e do número esperado de desligamentos por torre e da LT. A Figura 6 mostra o evento simulado e a forma de onda representativa de primeira descarga utilizada nas simulações.

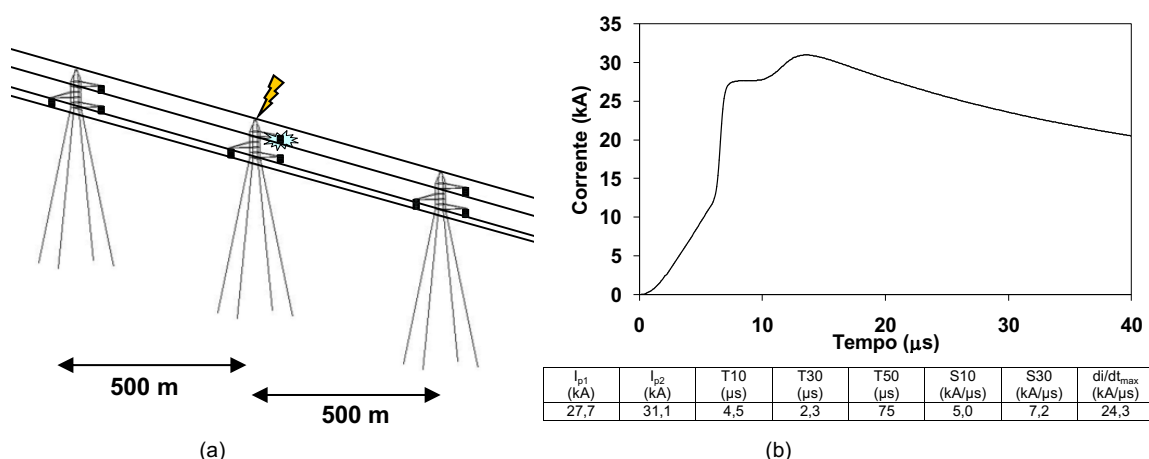


FIGURA 6 – Representação do evento simulado (a) e da forma de onda representativa da corrente de retorno da primeira descarga (b), utilizada nas avaliações.

#### 4.0 - RESULTADOS E ANÁLISES

Os desenvolvimentos do trabalho tinham por objetivo se alcançar condições que assegurassem desempenho da LT compatível com o preconizado pelo órgão regulador, de no máximo de 2 desligamentos/100-km/ano por descarga atmosférica para LTs de 230 kV.

Sabidamente esse desempenho é condicionado pelas características da LT, mas sobretudo pelo número de incidências na LT por unidade de comprimento. Por sua vez, tal número é basicamente proporcional ao índice de incidência de descargas nuvem-solo local  $N_g$ . Com base em informações de observações de satélite sobre atividade atmosférica disponíveis ao longo do trajeto da LT, estimou-se uma taxa de incidência da ordem de 5 a 12 descargas/km<sup>2</sup>/ano, com valor médio próximo a 8. Valendo-se de um estudo de engenharia reversa, a partir do número de desligamentos reais observados na linha e das suas características, determinou-se um valor esperado deste índice, igual a 8 descargas/km<sup>2</sup>/ano. Este valor foi adotado no desenvolvimento deste trabalho, levando a uma expectativa de incidência média de 220 descargas/100-km/ano na linha (18).

Adotando-se a metodologia indicada na seção 3, para cada condição considerada de aterramento de torre e de configuração de proteção (de uso de DPRs) da linha, simularam-se as sobretensões nas cadeias de isoladores resultantes de incidência direta de descarga na torre da LT. Para cada caso, foi determinada a corrente crítica de descarga que levaria os isoladores da torre ao flashover. Usando a curva de probabilidade acumulada de picos de primeiras correntes de descargas, determinou-se a percentagem de correntes cujos picos excederem o valor crítico em cada caso. A expectativa de desligamentos por unidade de comprimento da LT (100 km) pode ser determinada a

partir de tal percentagem e do número esperado de incidência na LT. Os resultados correspondentes foram organizados na forma do gráfico da Figura 7. No gráfico foi, também, indicado o índice máximo de desligamento admissível para a LT.

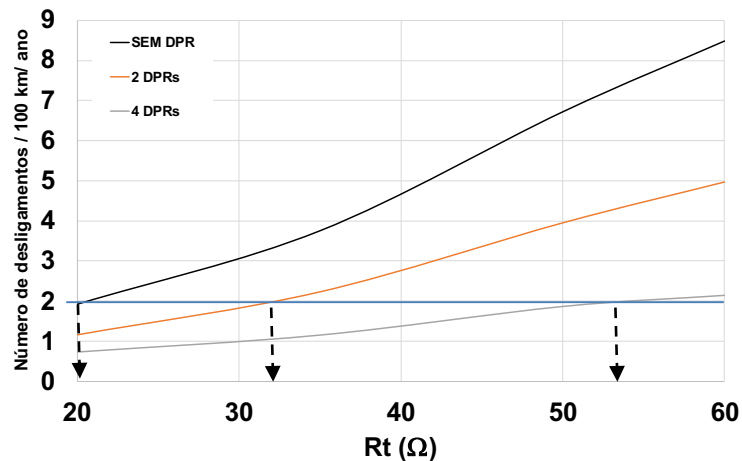


FIGURA 7 – Desempenho esperado da LT frente a descargas para as diferentes condições de arranjo de DPRs e aterramento.

Note que para cada condição da torre (relativa à configuração de DPRs) fica definido um limite aceitável de impedância (ou correspondente resistência) de aterramento. Tal valor define a faixa de eficiência do arranjo de para-raios para a LT, ou seja, o limite do emprego eficiente de tal arranjo. O uso do arranjo com valores superiores a esse limite resultaria em desempenho pior do que o almejado para a LT. Na realidade, tal gráfico corresponde à condição de distribuição homogênea dos valores de  $R_t$  da torre ao longo de 100 km da LT. Assim, como tal distribuição não é uniforme na realidade, o que o gráfico indica é qual seria a condição limite para que a contribuição de cada torre para o número de desligamento não violasse o limiar aceitável de contribuição individual das torres. Note os limites de resistências de aterramento determinados do gráfico da Figura 7 valem 21, 33 e 54  $\Omega$  para as condições de torre sem DRPs, com 2 DRPs e 4 DRPs, respectivamente. Estima-se que tais valores correspondam aproximadamente a impedâncias de pé de torre de 17, 24 e 35  $\Omega$  (3).

Na sequência do trabalho a aplicação da metodologia foi repetida para as mesmas condições de aterramento e de configuração de DPRs na torre, contudo na presença de dois cabos *underbuilt* instalados nas posições indicadas na Figura 8. Os resultados estão mostrados na Figura 9, sendo aqueles correspondentes à ausência dos cabos *underbuilt* indicados por linhas pontilhadas.



FIGURA 8 – Posição de instalação dos cabos *underbuilt* nas torres estaiadas da LT.

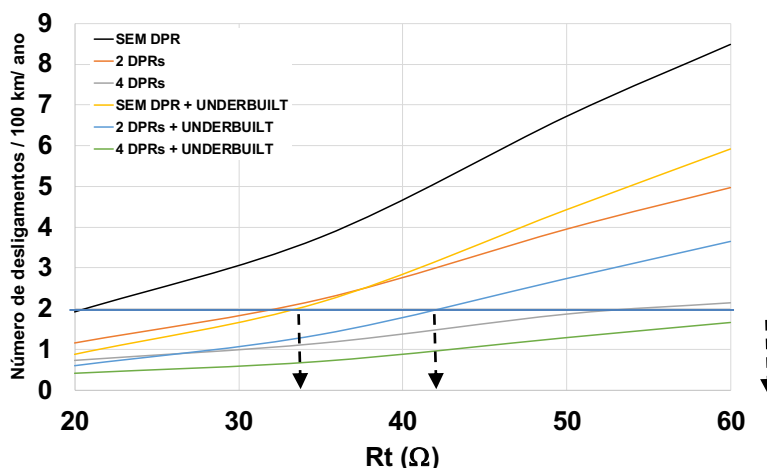


FIGURA 9 – Desempenho esperado da LT frente a descargas para as diferentes condições de arranjo de DRPs e aterramento, com a inclusão da instalação de cabos *underbuilt*.

Nitidamente, percebe-se que o efeito da instalação dos cabos *underbuilt* promove significativa melhoria de desempenho da LT. Os limites de 21, 33 e 54 Ω de resistência de pé de torre para se assegurar um desempenho de 2 desligamentos no máximo para a LT para as condições de torre sem DRPs, com 2 DRPs e 4 DRPs são deslocados para valores bem superiores, respectivamente de 33,5, 42 e 66 Ω.

A partir do gráfico da figura anterior, considerando-se a condição de aterramento de cada torre e as diversas possibilidades de arranjo de DRPs é possível se estimar o desempenho frente a descargas de trechos ou de toda a LT, pela contribuição de cada torre em sua respectiva condição de aterramento e de configuração de DRPs. No caso deste trabalho, por se tratar de um projeto piloto e tendo em conta a limitação de disponibilidade de recurso, definiu-se a instalação de cabos *underbuilt* em dois trechos da LT, respectivamente das torres 7 a 171 e das torres 401 a 464, totalizando 100 km de linha. Os dois trechos foram escolhidos pelas suas diferentes configurações e pela possibilidade de melhor verificar experimentalmente a eficiência do emprego de cabos *underbuilt* como medida para melhoria de desempenho da LT. No primeiro trecho, embora o desempenho não seja o pior e, tampouco os valores de resistência de aterramento das torres sejam os mais elevados, não há instalação de dispositivos para-raios. O segundo trecho tem desempenho pior e conta com instalação de DRPs, em número considerável de torres (53 torres com 2 DRPs e 9 torres com 4 DRPs num total de 62 torres).

Utilizando os dados da Figura 9 e integrando-se as correspondentes contribuições para o desempenho do trecho de 100 km, estimou-se uma melhoria de desempenho do trecho de 100 km da linha com a instalação dos cabos *underbuilt* de 53%, ou seja, uma redução do número de desligamentos de mesma ordem. Pelas características da LT, a extensão deste tipo de melhoria a toda a linha levaria a uma melhoria de mesma ordem, embora um pouco inferior.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Os desenvolvimentos deste trabalho resultaram na definição de implementação da instalação de dois cabos *underbuilt* em 100 km da LT 230 kV Jauru-Vilhena, como uma medida preliminar de impacto na melhoria do desempenho da LT frente a descargas atmosféricas.

Embora o uso de cabos *underbuilt* já tenha sido indicado em (13), como alternativa eficiente para melhoria de desempenho em trechos críticos de LTs, trata-se da primeira instalação contínua num longo trecho de linha (100 km) e esta aplicação só foi recomendada em função das condições críticas de resistividade de solo, que tornam ineficientes os investimentos adicionais em redução de impedância de aterramento das torres e de instalação de DRPs para se alcançar a melhoria de desempenho almejada.

Foram realizadas avaliações relativas às solicitações mecânicas decorrentes da instalação dos cabos *underbuilt* nas torres e suas fundações, inclusive as associadas a esforços resultantes de ventos, e estas mostraram a viabilidade da instalação dos cabos, indicando, em alguns casos, cuidados adicionais requeridos, como a instalação de estais adicionais em certas torres.

Após a instalação e um período de avaliação experimental dos resultados, pretende-se estender a alternativa a outros trechos da LT, prática a ser conjugada com as outras alternativas de melhoria de desempenho.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S. Visacro, "Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines," *J. Lightning Res.*, vol.1, pp. 60-68, 2007.
- (2) S. Visacro, "Lightning: An Engineering Approach" (in Portuguese), Ed. ArtLiber, São Paulo, Brazil, pp. 1-272, 2005.
- (3) S. Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386, Jan. 2007.
- (4) S. Visacro, "The Use of the Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 60, no.5, pp. 1602-1605, Oct. 2018.
- (5) S. Visacro, F.H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Methodology to Design Grounding Electrodes to Ensure an Expected Outage Rate", *IEEE Trans. Power Del.*, vol.30, pp.237-245, 2015.
- (6) S. Visacro, F.H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires", *IEEE Trans. Power Del.* v.31, pp.1524-1532, 2016.
- (7) Outline of Guide for Application of Transmission Line Surge Arresters—42 to 765 kV Extended Outline – 1012313, Oct.2006
- (8) S. Visacro, F.H. Silveira, A. Assini, G. Cardoso, A Study on Mitigation Techniques to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines, in *Proc. Int. Conf. on Grounding & Lightning Physics and Effects (GROUND & LPE 2016)*, Porto de Galinhas, 2016.
- (9) EPRI - Handbook for Improving Overhead Transmission Line Lightning Performance (technical report)
- (10) S. Visacro, F. H. Silveira, B. Pereira, R. m. Gomes "Concerns on surge-arrester application for improving the backflashover rate of transmission lines," in *Proc. Int. Conf. Lightning Protection (ICLP2018)*, Rzeszow, Poland 2018.
- (11) S. Visacro, F. H. Silveira, B. Pereira, R. m. Gomes "Concerns on surge-arrester application for improving the backflashover rate of transmission lines," in *Proc. Int. Conf. on Grounding & Lightning Physics and Effects (GROUND & LPE 2018)*, Pirenópolis, Brazil, 2018.
- (12) S. Visacro, F. H. Silveira, B. Pereira, R. m. Gomes "Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines," submitted to *EPSR*, April 2019.
- (13) S. Visacro, F.H. Silveira, A. De Conti, "The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, p.205-213, 2012.
- (14) S. Visacro, A. Soares Jr., "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems". *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, n. 2, pp. 1026-1028, April 2005.
- (15) A. De Conti and S. Visacro, "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 2, pp. 448–451, May 2007.
- (16) R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering application," *Electra*, vol.69, pp. 65-102, 1980.
- (17) H. Hileman, "Insulation coordination for power systems". Boca Raton, FL: CRC, 1999, pp. 627–640.
- (18) IEEE Std 1243, "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, 1997.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Silvério Visacro Filho nasceu em 1956 em Belo Horizonte. Obteve os títulos de engenheiro eletricista e mestre pela UFMG e doutor pela COPPE/UFRJ. É Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, onde atua na área de Eletromagnetismo Aplicado, com ênfase em Física e Proteção contra Descargas Atmosféricas, Aterramentos Elétricos e Linhas de Transmissão. É coordenador do LRC (Lightning Research Center – UFMG/CEMIG) e tem forte atuação como consultor especial em projetos relacionados a desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.