



**GRUPO III
GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**PRÁTICAS NÃO CONVENCIONAIS PARA A MELHORIA DO DESEMPENHO
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**Silvério Visacro* Amilton Soares Jr Vitor Tadeu Guedes Antônio Spalenza Eugênio
Pacelli Antunes
Universidade Federal de Minas Gerais Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. –
Eletronorte
LRC - Lightning Research Center**

RESUMO

Este artigo descreve a avaliação de práticas não convencionais para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Os resultados foram obtidos por meio de simulação computacional, empregando-se um modelo eletromagnético híbrido para se determinar a amplitude das sobretensões resultantes na cadeia de isoladores em decorrência da incidência de descargas diretas na linha. As práticas que apresentaram resultados mais promissores foram implementadas numa linha real de 230 kV, para fins de avaliação de sua eficiência. Decorridas duas estações chuvosas, após a implementação destas práticas, com tempestade severas, o número de desligamentos da linha associados a descargas, anteriormente da ordem de 7 desligamentos/ano, foi reduzido a zero.

PALAVRAS-CHAVE: Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas; Práticas não convencionais para melhoria de desempenho de linhas; Comportamento de aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas.

1.0 - INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são responsáveis pela maior parte dos desligamentos não programados das linhas de transmissão. As práticas convencionais para melhoria de desempenho das linhas de alta tensão frente a descargas compreende um conjunto limitado de ações. Como essas linhas já são usualmente providas de cabos de blindagem, tradicionalmente tais ações se resumem basicamente em: (i) redução da resistência de pé de torre e (ii) instalação de dispositivos pára-raios para prevenir a ocorrência de arcos elétricos de contornamento sobre a cadeia de isoladores da linha.

A maioria das empresas concessionárias concentra suas práticas de proteção no primeiro tipo de ação, devido aos custos elevados de instalação e manutenção de dispositivos pára-raios. Entretanto, a aplicação dos dispositivos é usual em condições desfavoráveis de solo, que impossibilitam a obtenção de baixos valores para a impedância de aterramento das torres da linha. Também, algumas concessionárias empregam extensivamente tais dispositivos nas aplicações em que a continuidade de suprimento de energia é considerada essencial.

Além das práticas tradicionais, existe um arsenal de práticas não convencionais, capazes de complementar as ações citadas. Tais práticas exploram os efeitos dos parâmetros que influenciam na amplitude da sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores devido à incidência de descargas na linha, para reduzir tal amplitude. Esses

parâmetros consistem na impedância de surto e altura das torres e no acoplamento eletromagnético entre os condutores energizados e partes metálicas da linha (cabos de blindagem e estruturas da torre).

A literatura técnica refere-se a algumas dessas práticas e sugere o emprego de (i) cabos estais (1), (ii) de cabos contrapeso contínuos e, ainda, (iii) de cabos metálicos conectando as torres posicionados abaixo dos cabos energizados (falsos cabos de blindagem), como soluções alternativas para melhoria da resposta da linha a descargas diretas. A despeito dessas indicações, a literatura não trata em profundidade dos problemas práticos envolvidos na implementação dessas práticas, sobretudo quanto à avaliação quantitativa da eficiência das mesmas.

2.0 - MOTIVAÇÃO DESTE TRABALHO

Atualmente, os autores estão muito envolvidos com a questão do desempenho insatisfatório de linhas de transmissão, que atravessam regiões distantes, na área Amazônica (1,2). Tal região possui índices muito elevados de incidência de raios e altas taxas de desligamentos são verificadas para as linhas locais.

Muitas destas linhas têm vãos muito extensos e, freqüentemente, têm suas torres posicionadas no alto de colinas, algumas delas constituídas por rochas. A camada de terra que originalmente cobriam tais colinas foram inteiramente removidas pelo efeito da erosão ao longo dos anos. Assim, muitas vezes, as torres são posicionadas diretamente sobre rochas. Assim, valores extremamente elevados são encontrados para a resistência de aterramentos destas torres, mesmo quando cabos contrapesos muito longos são empregados. Neste cenário, a despeito da grande extensão dessas linhas, um número limitado de torres (correspondentes às torres posicionadas nestes pontos elevados e de alta resistência de aterramento: pontos críticos), determina todo o desempenho da linha frente a descargas atmosféricas.

Devido às usuais dificuldades de acesso a tais torres para fins de manutenção, sobretudo no período chuvoso, o uso de pára-raios nas linhas foi descartado pela concessionária envolvida. Por conseguinte, os autores têm concentrado seus esforços a gerar soluções para melhoria de desempenho dessas linhas a partir de práticas não convencionais.

Neste trabalho, os autores descrevem os desenvolvimentos para alcançar soluções eficientes para uma linha de 230 kV (~ 400 km de extensão). As soluções providas foram recentemente implementadas pela uma concessionária de energia e a eficiência das práticas recomendadas foi avaliada, após duas estações de chuva.

3.0 - DESENVOLVIMENTOS

3.1 Introdução

As avaliações desenvolvidas neste trabalho consistiram na simulação de casos com aplicação de um elaborado modelo computacional, designado HEM - *Hybrid Electromagnetic Model* (3). O modelo, derivado diretamente da aplicação das equações de campo e da teoria de circuitos, é muito adequado para cálculo de transientes eletromagnéticos em configurações que envolvem estruturas metálicas (posicionadas no ar ou solo). A base teórica do modelo, detalhes de sua implementação e explicações correspondentes, incluindo a comparação entre resultados experimentais e simulados, podem ser encontrados em outras publicações dos autores (3,4,5).

A sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores devido a descargas diretas foi avaliada. Considerando a configuração básica para as torres típicas, condutores aéreos e eletrodos de aterramentos (da linha estudada), tais sobretensões foram simuladas, empregando o modelo computacional.

Nas simulações, uma onda de corrente (2/70 μ s tipo rampa) foi injetada no topo da torre, na presença de todos os condutores (cabos de blindagem e de energia), como indicado na Figura 1. Parâmetros reais foram adotados para a geometria e configuração da torre, dos condutores da linha e dos eletrodos de aterramento. Também, valores representativos das constantes dos meios envolvidos (solo, condutores e ar) foram assumidos.

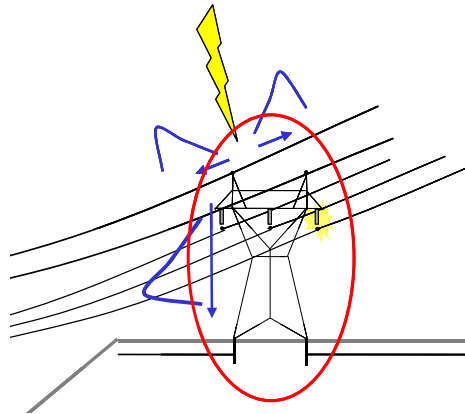


FIGURA 1 – Incidência direta de uma descarga atmosférica numa torre

Os resultados gerados pelo processo de simulação sistemática consistiram na sobretensão resultante na cadeia de isoladores devido à injeção de tal onda de corrente no topo da torre. A forma de onda do tipo rampa foi adotada simplesmente por possuir uma inclinação e tempo de frente muito bem definidos.

3.2 Caso Estudo

O caso estudo consiste numa linha de 230 kV que possui aproximadamente 900 torres e pouco mais de 400 km de extensão, com vãos médio da ordem de 500 m. Sua rota atravessa uma região de alta atividade atmosférica. As indicações de um equipamento *localizador de falta* e a análise dos valores de resistência de aterramento medidas para as torres permitiram identificar 26 torres que aparentemente eram responsáveis pela maioria dos desligamentos associados a descargas. Todas essas torres estavam posicionadas sobre o alto de colinas sem cobertura de solo. Suas bases eram colocadas diretamente sobre rochas.

3.3 Avaliações para melhoria do desempenho de linhas

O primeiro desenvolvimento foi a avaliação do valor de sobretensão desenvolvida para uma condição crítica de incidência. Esta foi assumida como uma corrente de valor de pico 50 kA (6), considerando os parâmetros reais da torre. Os valores da impedância de aterramento dessas torres variavam numa faixa entre 100 e 500 Ω . Como o nível de isolamento dessas linhas ao impulso é estimado em 1,2 MV, verificou-se que, em todos os casos, essa ocorrência desenvolveria sobretensões cujos valores ultrapassavam o nível de isolamento da linha. Para fins de avaliar a eficiência de práticas não convencionais, algumas melhorias foram simuladas e as sobretensões associadas foram quantificadas, assumindo-se que a torre fosse atingida pela mesma corrente. As seguintes condições foram simuladas:

- (i) configuração de torres sem nenhuma melhoria (impedância de pé de torre de 100 Ω);
- (ii) colocação de cabos adicionais abaixo dos cabos energizados (falsos cabos de blindagem) a distâncias pouco superiores ao comprimento da cadeia de isoladores;
- (iii) instalação de 4 cabos estais, conectados em seu ponto de ancoragem a cabos contrapeso posicionados sobre o solo (rocha) e terminados por eletrodos horizontais enterrados. A resistência de aterramento total dos cabos enterrados em paralelo valia 100 Ω ;
- (iv) cabos estais associados a condutores muito longos colocados diretamente sobre a superfície do solo (cabos contrapeso aéreos).

3.4 Resultados e análises

A Figura 2 mostra as ondas de sobretensão resultantes na cadeia de isoladores para uma torre típica da linha de 230 kV (torre autoportante e de 30 m de altura), devido à incidência direta de descarga no topo da torre para as condições citadas. As tensões são apresentadas na unidade "kV por kA injetado".

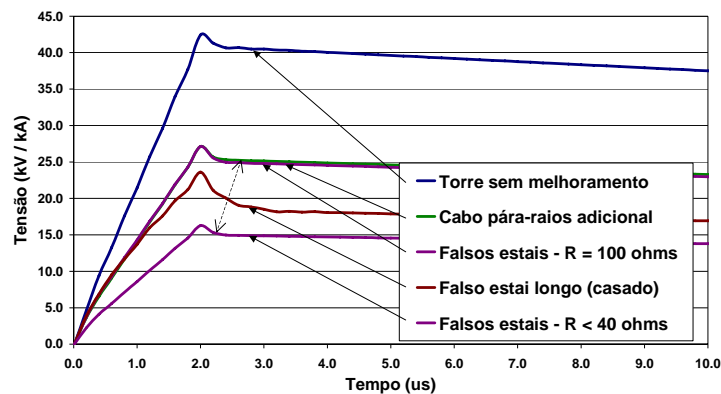


FIGURA 2 - Sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores

Assumindo um valor de 50 kA para a corrente de pico, na curva corresponde às condições originais da torre, a tensão é superior a 2,1 MV. Torres, cuja resistência de aterramento excede o valor de 100 Ω , têm uma amplitude de sobretensão superior a este valor.

Para a condição de colocação de falsos cabos de blindagem posicionados abaixo das fases, o valor de sobretensão é significativamente reduzido (para aproximadamente 1,35 MV). Esta redução é explicada pelo efeito de acoplamento capacitivo entre cabos de energia e de blindagem.

O mesmo valor de sobretensão é obtido se falsos estais são instalados, conectando a torre a pontos de ancoragem posicionados no solo (como indicado na Figura 3). No caso apresentado nessa figura, cada perna do contrapeso tem uma resistência de aterramento de 400 Ω em sua terminação.

Finalmente, o valor máximo da sobretensão é reduzido para cerca de 1,2 MV, através da conexão de cabos contrapesos contínuos às bases da torre. Dois aspectos explicam essa redução. Primeiramente, a proximidade dos condutores da superfície do solo (mesmo para rochas) aumenta significativamente a capacitância do cabo e, conseqüentemente, reduz sua impedância de surto. Isto promove reflexão negativa da onda de tensão incidente, que contribui para reduzir a sobretensão nos isoladores. Por outro lado, o comprimento do cabo contrapeso tem que ser suficiente para evitar que reflexões positivas da onda de tensão na sua extremidade influenciem no valor de pico da sobretensão nos isoladores. Na realidade, o comprimento do contrapeso não precisa ser extremamente longo mas tem que ser suficiente para assegurar que a onda de reflexão positiva retorne ao topo da torre apenas após o instante em que o valor de pico da sobretensão já foi ultrapassado. Na prática, esse comprimento é determinado simplesmente pela conexão dos eletrodos aos cabos contrapeso das torres adjacentes.

Os resultados sugerem que, em caso da obtenção de baixos valores de resistência nas terminações dos cabos contrapeso, reduções adicionais das sobretensões resultantes podem ser obtidas. Por conseguinte, novas simulações foram desenvolvidas, considerando valores diferentes para tais resistências. A configuração comentada é apresentada na Figura 3 e os resultados para uma torre, cuja resistência de aterramento original era de 500 Ω , são mostrados na Tabela 1.

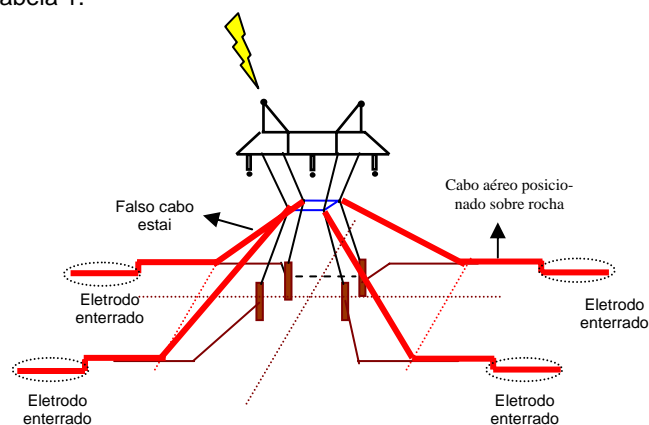


FIGURA 3 - Configuração com falsos cabos estais

TABELA 1 - Efeito da redução da resistência de aterramento da terminação do contrapeso

Configuração	Sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores (kV)
Original ($R_g = 500\Omega$) contrapesos	2 225
Cabos estais falsos	
$R_1=R_2=R_3=R_4 = 200\Omega$	1 280
$R_1=R_2=R_3=R_4 = 150\Omega$	1 180
$R_1=R_2=R_3=R_4 = 100\Omega$	960
$R_1=R_2=R_3=R_4 = 50\Omega$	870

R_i : Resistência de aterramento da terminação i

R_g : Resistência de aterramento da torre

Os resultados da Tabela 1 denotam a alta eficiência dessa prática. Eles também permitem determinar os valores limites de resistência de aterramento capazes de manter a amplitude de sobretensão inferior ao nível de isolamento da linha, para as condições assumidas, incluindo a forma de onda e intensidade. Como indicado, o valor resultante da resistência da torre deve ser limitado a $37,5 \Omega$ (paralelo das resistências de aterramento correspondentes aos 4 condutores enterrados).

Adicionalmente, verificou-se que, mesmo com as terminações enterradas a longas distâncias, esta prática é muito efetiva para a redução de sobretensão nos isoladores, caso o valor da resistência seja baixo. Parece que os cabos estais contribuem também nesse aspecto já que eles reduzem a distância e, por conseguinte, o tempo de trânsito da onda de corrente que atinge a terminação enterrada. Esta verificação permitiu que fosse estabelecido um critério capaz de assegurar a redução da sobretensão, como explicado a seguir.

4.0 - PRÁTICA PROPOSTA

O critério prático proposto é estruturado em três passos:

- (i) Para cada torre em foco, através de uma inspeção local, é verificada a existência de quatro regiões no entorno da torre, onde os eletrodos enterrados possam prover resistências de aterramento de valores estimados em torno de 150Ω ;
- (ii) Se tais regiões existem, os eletrodos (quatro eletrodos, como indicado na Figura 3) são enterrados e as resistências são medidas individualmente para cada um dos eletrodos. Se o paralelo dessas resistências medidas corresponde a valor inferior a 38Ω , então os eletrodos enterrados são conectados a cabos posicionados sobre a rocha, que os conectam às âncoras, onde os falsos cabos estais (conectados à torre) chegam. Caso contrário, comprimentos adicionais de eletrodo são enterrados, até que o valor desejado de resistência de aterramento seja alcançado. A distância máxima da base da torre deve ser limitada a 400 m. Quando possível, as quatro regiões onde são enterradas as terminações devem ser posicionadas simetricamente como indicado na Figura 3.
- (iii) Se não existe tal possibilidade, os cabos contrapeso são estendidos dos pontos de ancoragem e conectados aos contrapesos das duas torres adjacentes, os quais provavelmente têm eletrodos enterrados com baixos valores de resistência, o que irá contribuir para a redução da sobretensão na torre central.

Como se percebe, neste critério, a implementação do projeto de aterramento não parte da torre, sendo determinada pelas condições ambientais das regiões no entorno da torre. A implementação se inicia pelo posicionamento de cabos enterrados distantes da torre, os quais serão posteriormente conectados à mesma por condutores aéreos e falsos estais.

5.0 - IMPLEMENTAÇÃO DA PRÁTICA PROPOSTA

A idéia desenvolvida foi implementada para as 26 torres distribuídas ao longo da linha estudo. Decorridas duas estações de chuvas consideradas bastante severas, na perspectiva de ocorrência de descargas, houve uma drástica redução dos desligamentos da linha associados a descargas. O usual número de 7 desligamentos

verificado anualmente foi reduzido a zero, não ocorrendo nenhuma saída de operação da linha nos últimos dois anos.

Um aspecto que realça a eficiência da prática consiste no fato de que as linhas próximas, de mesmo nível de tensão e instaladas na mesma região, continuaram mantendo a sua taxa de desligamento usual.

6.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho, os autores quantificaram a eficiência de algumas práticas não convencionais destinadas à redução das sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores devido à incidência direta de descargas.

Os resultados permitiram estabelecer uma análise comparativa da eficiência das diferentes práticas.

Particularmente, para as condições analisadas, o emprego de cabos adicionais conectados às torres e posicionados abaixo dos condutores energizados era capaz de prover uma redução da sobretensão para 70% do valor original.

O uso de cabos contrapeso contínuos possibilitava a redução dessa sobretensão para aproximadamente 60% do valor original.

Os resultados mais promissores foram alcançados ao se suprir resistências de baixo valor nas terminações de longos cabos contrapesos posicionados sobre o solo e conectados à falsos cabos estais. Essa prática mostrou-se capaz de promover a diminuição da sobretensão para aproximadamente 40% do seu valor original.

As técnicas alternativas foram avaliadas separadamente. Assim, embora não tenha sido avaliada, para uma condição crítica, seria ainda possível a adoção simultânea de mais de uma dessas práticas para se alcançar reduções adicionais na sobretensão na cadeia de isoladores.

A última prática mencionada (Figura 3) foi avaliada em detalhes. Considerando o nível de isolamento da linha, foi possível determinar-se o limite aceitável para o valor da resistência equivalente das resistências distribuídas da torre, capaz de assegurar uma boa expectativa de desempenho da linha frente a incidência direta.

Adicionalmente, naquelas condições nas quais não é possível alcançar localmente esses valores limites, verificou-se que uma prática alternativa pode ser eficientemente adotada, consistindo na conexão dos cabos contrapeso da torre (posicionados sobre o solo) aos eletrodos ou cabos contrapeso de torres adjacentes. Esta prática é muito efetiva se as torres adjacentes satisfazem os valores limite de resistência indicados.

Os resultados experimentais observados para alinha de 230 kV comprovam a eficiência do critério proposto para melhoria de desempenho da linha frente a descargas atmosféricas.

7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) VISACRO S., FELIPE M. A., OLIVEIRA R. Z., "Non-Conventional Methodology To Improve the Lightning Performance Of Transmission Lines" , Proceedings of GROUND'2002 – International Conference on Grounding and Earthing & Workshop on Atmospheric Electricity, pp. 267-270, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 2002.
- (2) VISACRO S., DIAS R. N., MESQUITA C. R., "Novel Approach for Determining Spots of Critical Lightning Performance along Transmission Lines", Accepted for publication, IEEE Power Delivery, Feb. 2004.
- (3) VISACRO S., SOARES JR. A., SCHROEDER M. A. O., "An interactive computational code for simulation of transient behavior of electric system components for lightning currents", in Proc. 2002 International Conference on Lightning Protection, Crakow, Poland, 2002.
- (4) SOARES JR. A., SCHROEDER, VISACRO S., "Application of an electromagnetic model for calculation of transient voltages in transmission M. A. O. towers", in Proc. 2002 International Conference on Lightning Protection, Crakow, Poland, 2002.
- (5) SOARES JR. A., SCHROEDER M. A., VISACRO S., "Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes", Accepted for publication, IEEE Power Delivery, Feb. 2004.

(6) VISACRO S., SCHROEDER, M. A. O., SOARES A. J., CHERCHIGLIA L. C. L., SOUSA V. J., "Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station", Journal on Geophysical Research, v. 109, NO. D01105, 1-11, 2004.

(7) VISACRO S., SOARES JR. A., OLIVEIRA R. Z., FELIPE M. A., SILVA A. P., VALE M. H. M., "Non-Conventional Measures for Improvement of Lightning Performance of Transmission Lines", Proceedings of the 27th ICLP – International Conference on Lightning Protection, pp. 684-687, Avignon, France, Sept. 2004.

(8) VISACRO S., SOARES JR. A., SPALENZA A., GUEDES, V. T., "Enhancement of Lightning Performance of Transmission Lines through Non-Conventional Grounding Practices", Proceedings of the Ground ' 2004 – International Conference on Grounding and Earthing & 1st LPE – International Conference on Lightning Physics and Effects, pp. 257-261, Brazil, November 2004.