



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**EXPLORAÇÃO DE TÉCNICA NÃO CONVENCIONAL PARA A MELHORIA DO DESEMPENHO
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Silvério Visacro(*) Fernando H. Silveira Alberto De Conti
LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

Este trabalho apresenta uma técnica não convencional para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, aplicada a uma linha real de 230 kV. A técnica consiste na adição de condutores conectados à torre, abaixo das fases inferiores. Sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores devido à incidência direta da descarga na torre foram simuladas através de um modelo computacional. Reduções da ordem de 20 e 40% foram alcançadas nas sobretensões desenvolvidas em torres com resistência de aterramento de 20 a 40 Ω respectivamente para o uso de um e dois condutores adicionais.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramentos elétricos, Descargas atmosféricas, Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, Técnicas não convencionais para melhoria de desempenho, Resistividade do solo, Resistência de aterramento.

1.0 – INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas se constituem na principal fonte dos desligamentos não programados das linhas de transmissão. Basicamente, três mecanismos são responsáveis por tais desligamentos: a descarga disruptiva no isolamento (*Flashover*), a descarga disruptiva de retorno (*Backflashover*) e a ruptura a meio de vão (1). Uma descrição detalhada desses mecanismos pode ser encontrada em (2).

Nas condições típicas do ambiente no Brasil, para linhas de nível de tensão inferior a 500 kV, o mecanismo de *Backflashover*, associado à incidência de descargas nos cabos de blindagem próximos à torre, prevalece amplamente (2). A análise desse mecanismo revela que sua ocorrência depende fundamentalmente do valor da impedância de aterramento de pé de torre. É tal impedância que define a ocorrência ou não de arco elétrico de contornamento nos isoladores da linha quando há incidência direta de descarga na torre ou em suas proximidades.

As práticas convencionais para melhoria do desempenho de linhas frente ao mecanismo de *backflashover* compreendem basicamente duas ações: (i) a redução da resistência de aterramento da torre e (ii) a instalação de dispositivos pára-raios na linha de transmissão. Diversas empresas concessionárias de transmissão concentram seus esforços no primeiro tipo de ação em decorrência dos custos elevados associados à instalação e manutenção dos dispositivos pára-raios. Vale observar que a prática de minimizar a resistência de aterramento objetiva, na realidade, reduzir a impedância de aterramento. Entretanto, a dificuldade de medir tal impedância em condições de campo determina que a resistência seja o parâmetro de qualificação do aterramento no lugar da impedância, como é explicado em (3).

Recentemente, algumas práticas não convencionais têm sido exploradas pelos autores para redução das sobretensões entre os cabos de blindagem e os condutores fases (4-11), mostrando grau considerável de eficiência. Tais práticas exploram os efeitos dos parâmetros que influenciam a amplitude destas sobretensões, como a impedância de surto da torre e o acoplamento entre os cabos de blindagem e fases. É nesta perspectiva que se insere o presente trabalho que tem por objetivo descrever a técnica não convencional de adição de cabos conectados à torre abaixo das fases e quantificar a melhoria resultante de sua aplicação no desempenho frente às descargas atmosféricas, usando como referência o caso estudo de uma linha real de 230 kV.

2.0 - DESENVOLVIMENTOS

2.1 Descrição da técnica

A técnica não convencional aplicada neste trabalho consiste na adição à linha de cabo(s) metálicos não energizado(s) conectado(s) à estrutura metálica da torre objeto da melhoria de desempenho, como ilustrado na Figura 1. A prática tem uso localizado apenas nos vãos adjacentes à torre com desempenho crítico.

A definição do posicionamento dos condutores de forma a obter eficiência da prática foi efetuada por simulação computacional através da aplicação do modelo computacional HEM - *Hybrid Electromagnetic Model* (12-14). Este procedimento permitiu duas situações de interesse para aplicação, correspondendo ao posicionamento de 1 ou 2 cabos abaixo dos condutores fase, observando-se uma distância mínima (d) em relação às fases para não comprometer o isolamento elétrico da linha, como mostra a Figura 1.



FIGURA 1 – Representação dos cabos aéreos designados “condutores inferiores aterrados” (*underbuilt cables*) posicionados abaixo dos condutores fase: (a) 1 cabo aéreo, (b) 2 cabos aéreos.

2.2 Metodologia

A verificação da eficiência da técnica em função do posicionamento do(s) condutor(es) inferior(es) aterrado(s) foi realizada por meio da aplicação sistemática do modelo computacional HEM (12) para simulação das sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores das torres de uma linha real em decorrência da incidência direta de descargas. A Figura 2 ilustra a condição de simulação, indicando a incidência de uma descarga no topo da torre. Avaliou-se a redução promovida nesta sobretensão no caso da adição de condutores inferiores à configuração original de condutores da linha e quantificou-se essa redução em função do posicionamento dos condutores. Esta técnica já vinha sendo explorada pelos autores, dentre outras práticas não convencionais, em diversas publicações desde 2002 (4, 8-11).

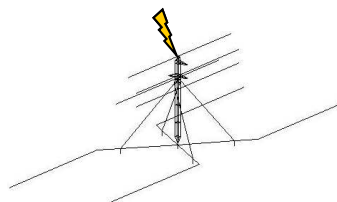


FIGURA 2 – Indicação da condição simulada.

Considerou-se a corrente de descarga representada por onda de formato triangular com valor de pico de 50 kA, tempo de frente de 2 μ s e tempo de meia-onda de 50 μ s. A forma triangular foi usada para facilitar as análises de sensibilidade. A amplitude e o tempo de frente foram escolhidos para representar uma condição severa de solicitação por uma primeira corrente de retorno de descarga.

Os resultados das sobretensões apresentados ao longo deste trabalho foram ajustados para a unidade kV/kA de forma a permitir a sua pronta extrapolação para condições específicas de amplitude de corrente de descarga pela simples multiplicação dos valores instantâneos de tensão indicados nos gráficos e o valor de pico da corrente em kA. A linearidade entre a tensão na cadeia de isoladores e a amplitude da corrente possibilita tal procedimento.

Na parte final do trabalho são apresentados resultados de avaliações complementares quanto à influência da variação da forma de onda e do tempo de frente da corrente de descarga.

2.3 Características da linha de transmissão utilizada para avaliação da técnica

Para conferir realismo às avaliações da técnica não convencional optou-se por sua aplicação a uma linha de transmissão real de nível de tensão de 230 kV. Em sua configuração original, as torres da linha, do tipo estaiada, sustentam quatro condutores aéreos (um cabo de blindagem superior e três condutores fase em disposição triangular), como ilustra a Figura 3 - (a). O arranjo típico dos eletrodos de aterramento da linha estão indicados na Figura 3 - (b).

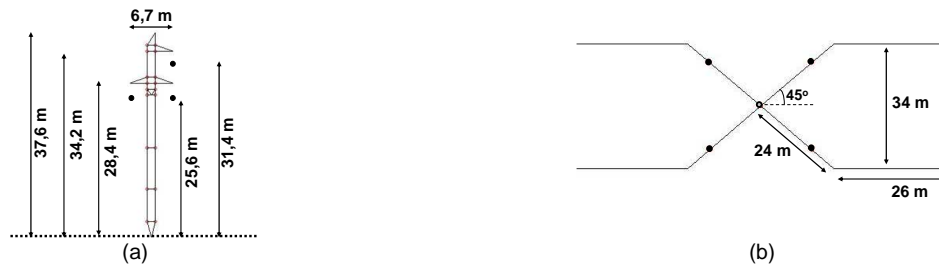


FIGURA 3 - Configuração da linha de transmissão simulada: (a) Representação das dimensões do mastro e mísula da torre estaiada, (b) Configuração do sistema de aterramento.

A altura média das torres, cujo mastro tem a estrutura interna em formato quadrado de lado 1,25 m, é 40 m. Nas simulações adotou-se tal altura para a torre e 37,6 m, 31,4 m e 25,6 m para as alturas do cabo pára-raios e dos condutores fase superior e inferior, respectivamente. Como pode ser observado na Figura 3 - (a), as estruturas responsáveis por sustentar as cadeias de isoladores superior e inferior têm altura de 34,2 m e 28,4 m, respectivamente.

A configuração do aterramento constitui-se de quatro ramais de cabos contrapeso conectados ao mastro e aos estais das estruturas nos pontos de ancoragem. Estes ramais se afastam dos pontos de fixação às estruturas em direções radialmente opostas, formando ângulos de 45° com o eixo da linha de transmissão. Ao atingir 0,5 m do limite da faixa de servidão, os cabos tornam-se paralelos à faixa de 35 m de largura. Na Figura 3 - (b) indicam-se os pontos de conexão dos estais com a ancoragem e com os cabos contrapeso.

Nas simulações, nos pontos de ancoragem foram consideradas hastes de 2,4 m de comprimento e 5 cm de raio enterradas no solo para representar as ferragens da estrutura de ancoragem. Também no ponto central de aterramento considerou-se uma haste de 2,4 m de comprimento e 10 cm de raio para representar as ferragens da fundação do suporte de concreto do mastro. Além disso, as simulações assumiram inicialmente a representação de 2 torres adjacentes para análise do comportamento da sobretensão na torre central quando esta era atingida pelo raio, sendo promovido o casamento da impedância dos cabos condutores 30 m adiante das torres externas. Posteriormente, após se verificar que tais torres ou mesmo a presença dos cabos até as torres externas não influenciava o valor de pico da sobretensão resultante na torre central, os quatro cabos aéreos passaram a ser representados por condutores de 30 m de comprimento para cada lado da torre, seguidos do casamento de impedâncias em suas extremidades, de modo a eliminar reflexões das ondas de corrente e tensão.

3.0 – RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Resultados de referência: melhoria de desempenho associada à redução da resistência de aterramento

Como já mencionado, o valor da impedância de aterramento da torre tem papel fundamental na definição da amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores da linha quando da incidência de descarga nesta, sendo a sobretensão tanto menor quanto mais reduzida for a impedância de aterramento (15). Isto justifica o fato da prática mais comum de melhoria de desempenho consistir na redução da impedância de aterramento, medida indiretamente através da redução da resistência de aterramento (R_{at}).

Para fins de se constituir referências objetivando quantificar a eficiência da técnica não convencional em análise, neste tópico é avaliado o efeito da redução da resistência de aterramento na diminuição da sobretensão na cadeia de isoladores da linha real. A Figura 4 mostra as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores superior e inferior devido à incidência de uma descarga no topo da torre descrita na seção 2.3, tendo a corrente as características indicadas na seção 2.2 e considerando o valor da resistência de aterramento variando entre 40 e 10 Ω . Os diferentes valores de resistência são obtidos variando-se a resistividade para a configuração típica de aterramento indicada na Figura 3 - (b). A redução percentual das sobretensões em função da diminuição da resistência de aterramento está indicada na Figura 5.

Os resultados indicados nas Figuras 4 e 5 denotam a efetividade da diminuição da resistência de aterramento como técnica de melhoria do desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas. Considerando-se a variação dessa resistência de 40 para 10 Ω , observam-se reduções da ordem de 45 e 50% nas sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores superior e inferior, respectivamente.

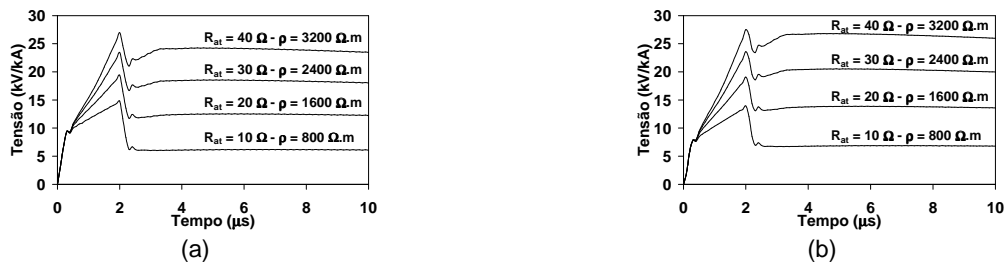


FIGURA 4 – Sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores superior (a) e inferior (b) considerando diversos valores de resistência de aterramento (corrente: forma de onda triangular e tempos 2/50 μs).

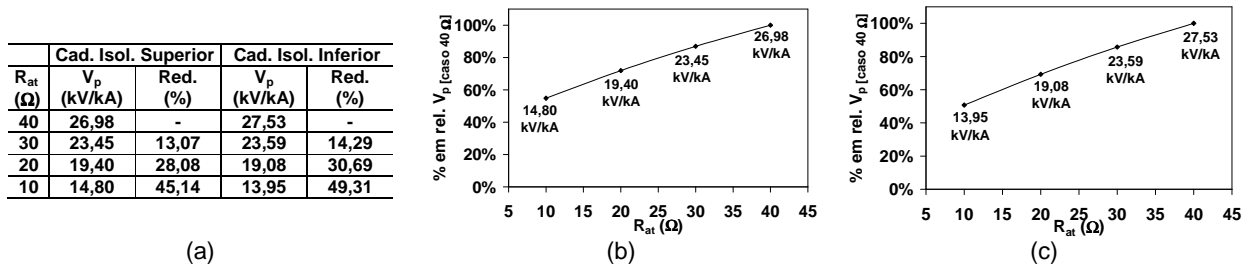


FIGURA 5 – Redução nas sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores devido à diminuição da resistência de aterramento. (a) Variação percentual. (b) Cadeia de isoladores superior. (c) Cadeia de isoladores inferior.

Nota-se que as sobretensões nas cadeias de isoladores variam de 28 a 14 kV/kA, respectivamente para resistências de 40 Ω a 10 Ω. Admitindo-se a incidência de uma descarga com 50 kA de valor de pico de corrente, as sobretensão nas cadeias de isoladores se reduziriam de 1,4 MV para 700 kV. Como a tensão de suportabilidade ao impulso (TSI) da linha de 230 kV vale 1,2 MV, verifica-se que, em princípio, essa ocorrência seria capaz de levar ao *backflashover* na condição de resistências de aterramento de 40 Ω. Essa condição se manteria para R_{at} de 30 Ω.

3.2 Aplicação da técnica não convencional: o efeito da colocação de 1 e 2 cabos inferiores

A realização de simulações sistemáticas com o uso do HEM permitiu selecionar as configurações de interesse prático no que concerne à adição de cabos inferiores aterrados na linha em estudo, indicadas na Figura 1. A Figura 6 mostra as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores superior e inferior devido à incidência de descarga no topo da torre com a corrente de forma triangular já referida, considerando a adição de um e dois condutores inferiores conectados à estrutura da torre, segundo o esquema da Figura 1. Nestes casos, a distância 'd' considerada foi igual a 4 m. Nas simulações adotou-se resistividade do solo de 1600 Ω.m, que corresponde a uma resistência de 20 Ω para o arranjo de aterramento da Figura 3 - (b).

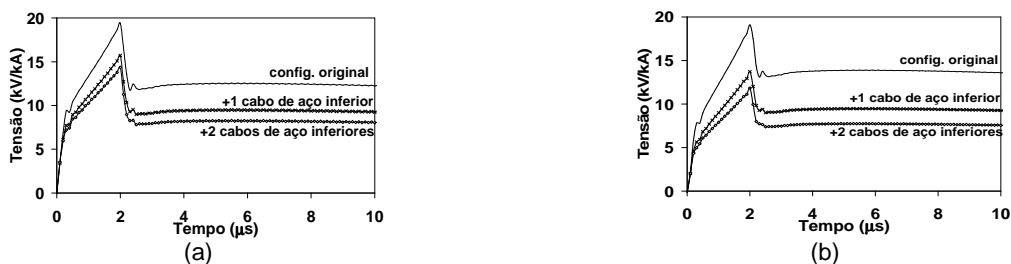


FIGURA 6 – Sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores superior (a) e inferior (b) considerando o efeito dos cabos inferiores aterrados conectados à estrutura metálica da torre para $R_{at} = 20$ Ω. Distância 'd' = 4 m.

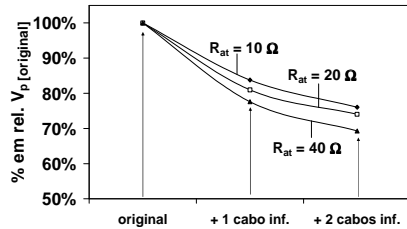
Conforme pode ser observado, a adição dos condutores inferiores promove significativa redução das sobretensões desenvolvidas ao longo das cadeias de isoladores, sendo maior a redução na cadeia inferior. A colocação de um cabo inferior proporciona reduções de sobretensão entre 19 e 28% respectivamente nas cadeias superior e inferior. Estas reduções são significativamente maiores para a adição de dois cabos inferiores, entre 26 e 38%.

3.3 Aplicação da técnica não convencional: intensidade do efeito para diferentes resistências de aterramento

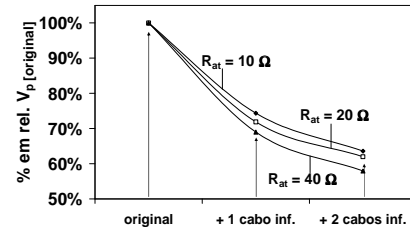
Para se verificar a sensibilidade da redução da sobretensão ao valor da resistência de aterramento da torre foram realizadas simulações considerando valores de R_{at} entre 10 e 40 Ω. A Tabela 1 apresenta os resultados correspondentes às sobretensões nas cadeias de isoladores e as respectivas reduções nesses casos. A Figura 7 compara tais reduções para cada um dos casos avaliados.

Tabela 1 – Variação percentual das sobretensões pela aplicação da técnica não convencional para diferentes valores de resistências de aterramento.

Configuração	$R_{at} = 10 \Omega$				$R_{at} = 20 \Omega$				$R_{at} = 40 \Omega$			
	Cad. Isol. Superior		Cad. Isol. Inferior		Cad. Isol. Superior		Cad. Isol. Inferior		Cad. Isol. Superior		Cad. Isol. Inferior	
	V_p (kV/kA)	Red. (%)	V_p (kV/kA)	Red. (%)	V_p (kV/kA)	Red. (%)	V_p (kV/kA)	Red. (%)	V_p (kV/kA)	Red. (%)	V_p (kV/kA)	Red. (%)
Original	14,8	-	13,95	-	19,4	-	19,08	-	26,98	-	27,53	-
+ 1 cabo inferior	12,4	16,21	10,38	25,63	15,71	19,02	13,72	28,10	20,93	22,4	18,99	31,0
+ 2 cabos inferiores	11,25	23,96	8,87	36,42	14,37	25,96	11,83	38,0	18,69	30,7	15,95	42,05



(a)



(b)

FIGURA 7 – Redução proporcionada pela técnica não convencional para distintos valores de resistência de aterramento. (a) Cadeia de isoladores superior. (b) Cadeia de isoladores inferior.

Nota-se que as reduções proporcionadas pela adição dos cabos inferiores se tornam mais significativas para valores mais elevados da resistência de aterramento da torre. Enquanto para o caso de torres com $R_{at} = 10 \Omega$, a colocação de 1 e 2 cabos inferiores resulta em reduções da ordem de 16 e 24% respectivamente nas sobretensões da cadeia de isoladores superior, para resistências de aterramento de 40Ω , esta redução se situa na faixa de 22 e 31%.

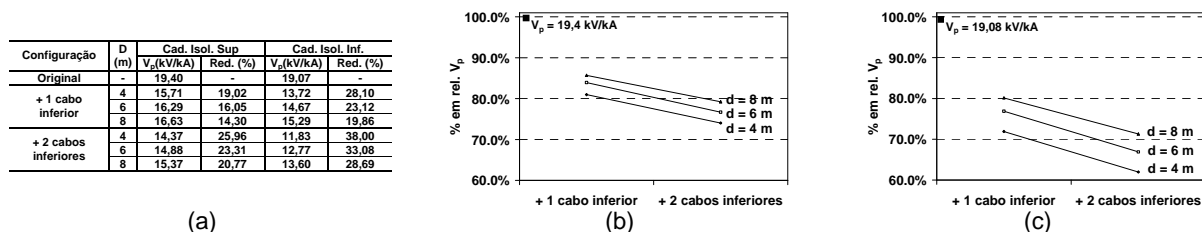
A comparação dos resultados da Tabela 1 e da Figura 5 - (a) revela a potencialidade da técnica. Para $R_{at} = 40 \Omega$, a colocação de 1 cabo inferior reduz as sobretensões nas cadeias de isoladores superior e inferior para 77 e 69% do seu valor original, respectivamente. Este efeito equivale à redução proporcionada pela diminuição da resistência de aterramento para valores inferiores a 30Ω . De modo semelhante, a colocação de 2 cabos inferiores proporciona reduções para 69 e 58% dos valores originais nas cadeias superior e inferior, respectivamente, comportamente superior ao de torres com resistência de aterramento de 20Ω . Em outras palavras, o efeito da adição de dois cabos inferiores corresponde aproximadamente àquele de reduzir a resistência de aterramento à metade.

Este aspecto denota a possibilidade de uso da técnica de forma complementar em condições críticas, muito desfavoráveis de solo, nas quais não se alcançam soluções suficientes de aterramento para assegurar desempenho satisfatório da linha frente à incidência de descargas.

3.4 Análises de sensibilidade: investigando a natureza do efeito de redução da sobretensão nos isoladores da linha

3.4.1 A influência da distância entre cabos inferiores e fases na intensidade da redução da sobretensão

Foi avaliada a influência da distância entre os cabos inferiores e fases na amplitude da sobretensão desenvolvida nas cadeias de isoladores. Dois outros valores para distância (d) indicada na Figura 1 foram considerados: $d = 6$ e 8 m. Os resultados obtidos estão compilados na Figura 8 para o caso de resistência de aterramento da torre igual a 20Ω . Observa-se que quanto maior for a distância entre os condutores fase e os cabos inferiores adicionais, menor é a redução observada na sobretensão da cadeia de isoladores.



(a)

(b)

(c)

FIGURA 8 – Sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores considerando o efeito da distância entre os cabos inferiores e as fases para $R_{at} = 20 \Omega$. (a) Variação percentual. (b) Cadeia de isoladores superior. (c) Cadeia de isoladores inferior.

3.4.2 Influência das torres adjacentes e acoplamento entre cabos

Os resultados apresentados até este ponto não consideram a presença das torres adjacentes e dos cabos de ligação destas, mas apenas uma extensão de 30 m de cabos seguida do casamento de sua impedância de surto. Foram realizadas simulações para se avaliar a influência das torres e desses cabos, admitindo duas condições: (i)

cabos inferiores conectados às torres adjacentes distantes 300 m da torre central e com terminação nestas torres e (ii) mesma configuração, mas com os cabos tendo uma extensão adicional de 30 m além das torres adjacentes seguidos de casamento de impedância nas suas extremidades. Em ambos os casos as torres adjacentes possuem o mesmo valor de resistência de aterramento da torre central ($R_{at} = 20 \Omega$). As sobretensões resultantes na cadeia de isoladores superior da torre central diante da incidência de descarga estão destacadas na Figura 9, considerando a adição de 1 e 2 cabos inferiores.

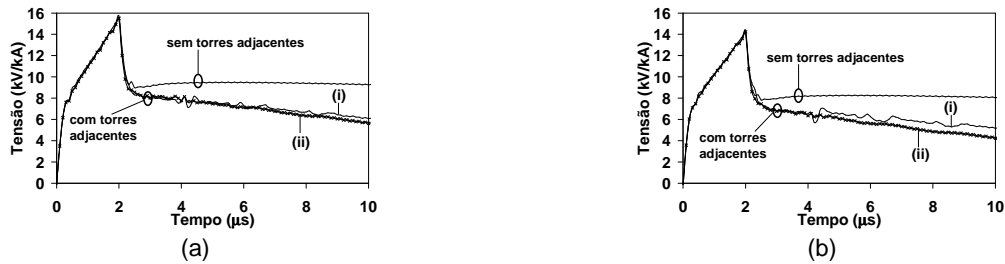


FIGURA 9 – Sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores superior da torre central considerando o efeito de duas torres adjacentes (vãos de 300 m entre torres) e dos cabos inferiores aterrados conectados à estrutura metálica das torres para $R_{at} = 20 \Omega$. (a) 1 cabo inferior. (b) 2 cabos inferiores.

Para a condição de $R_{at} = 20 \Omega$, os resultados obtidos indicam que a presença das torres adjacentes e cabos não afeta a amplitude da sobretensão desenvolvida na torre central, tanto para os cabos com terminação nas torres adjacentes quanto com a extensão adicional de 30 m. A explicação deste comportamento decorre do tempo gasto para a onda de reflexão negativa de tensão das torres adjacentes retornar à torre atingida. Isto só ocorre após $2 \mu s$, não interferindo no valor de pico da sobretensão resultante nas cadeias de isoladores. O efeito da reflexão é notado apenas na cauda das ondas de sobretensão. Os resultados indicam que é suficiente a aplicação da técnica não convencional apenas para os dois vãos adjacentes para se alcançar a melhoria de desempenho.

3.4.3 Influência do valor da resistência de aterramento das torres adjacentes

Verificou-se, também, o efeito do valor da resistência de aterramento das torres adjacentes, considerando-se valores correspondentes à metade e ao dobro daquele da resistência da torre central, respectivamente 10 e 40Ω , além do valor de 20Ω já analisado. A Figura 10 mostra os resultados de simulação correspondentes às sobretensões na cadeia de isoladores da torre central, considerando 1 e 2 cabos inferiores conectados às 3 torres.



FIGURA 10 – Efeito da resistência de aterramento das torres adjacentes nas sobretensões da cadeia de isoladores superior da torre central. Torre central ($R_{at} = 20 \Omega$), Torres adjacentes ($R_{at} = 10, 20$ e 40Ω). (a) 1 cabo inferior. (b) 2 cabos inferiores.

Os resultados indicam que, para resistência da torre central igual a 20Ω , o valor da resistência de aterramento das torres adjacentes não influencia o valor de pico das sobretensões desenvolvidas, ou seja, a melhoria não depende do valor da resistência das torres adjacentes.

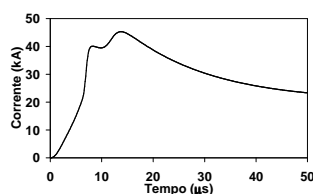
3.4.4 Discussão sobre a origem do efeito de redução das sobretensões promovido pela técnica

A semelhança dos resultados, em termos de redução de sobretensões, na presença e ausência de cabos após os 30 m a partir da torre central denota que o efeito de redução da sobretensão não se deve ao acoplamento eletromagnético entre os cabos, mas sim à diminuição da impedância de surto vista pela parcela da corrente de descarga que desce a torre. Por outro lado, a proximidade do ponto de derivação dos cabos inferiores adicionados em relação às fases faz com que o efeito da reflexão negativa da onda de sobretensão nesta derivação atue reduzindo a sobretensão logo no início do seu crescimento. Aliás, isto explica os valores superiores de sobretensões na cadeia de isoladores superior (mais distante dos cabos adicionados) em relação à cadeia inferior.

3.5 Considerações sobre a representatividade das avaliações realizadas

Considerando-se as aproximações adotadas para facilitar as análises de sensibilidade desenvolvidas, notadamente com relação à forma de onda da corrente de descarga e seu tempo de frente, julgou-se oportuno verificar-se o impacto de uma representação desses parâmetros mais próxima da realidade na qualidade dos resultados obtidos.

A forma das ondas de correntes individuais relativas às primeiras descargas de retorno negativas descendentes apresentam características bastante peculiares como uma concavidade inicial pronunciada na frente da onda, um crescimento abrupto a partir da metade do valor de amplitude do pico de corrente e a presença de picos subsidiários, sendo o segundo pico usualmente maior do que o primeiro pico (16). A Figura 11 mostra a forma típica de uma onda individual de corrente de primeira descarga considerando parâmetros medianos de corrente medidos na estação do Morro do Cachimbo (17). Tal forma de onda é similar àquela das medições de K. Berger (18).



(a)

Ip1 (kA)	Ip2 (kA)	T10 (μs)	T30 (μs)	T50 (μs)	dI/dt (kA/μs)
40.3	45.3	5.6	2.9	53.5	19.4

Ip1: primeiro pico de corrente, Ip2: segundo pico de corrente

T10: tempo entre 0,1 Ip1 e 0,9 Ip1, T30: tempo entre 0,3 Ip1 e 0,9 Ip1

T50: tempo necessário para amplitude de corrente decair a 0,5 Ip2

dI/dt max: inclinação máxima da onda de corrente na frente

(b)

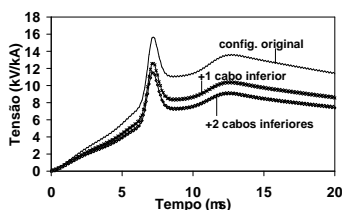
FIGURA 11 – Representação de ondas de corrente de primeira descarga considerando parâmetros medianos de corrente medidos na estação do Morro do Cachimbo. (a) Forma de onda. (b) Parâmetros contemplados.

Para se avaliar a representatividade dos resultados desenvolvidos ao longo deste trabalho, simulou-se a injeção no topo da torre da corrente indicada na Figura 11, em substituição à onda triangular 2/50 μs, para determinação das sobretensões nos isoladores da linha considerando o efeito da aplicação da técnica não convencional e $R_{at} = 20 \Omega$. Os resultados obtidos estão destacados na Figura 12. Para manter a coerência com os resultados destacados ao longo do trabalho, as sobretensões associadas à forma de onda de corrente realista foram divididas por 45,3 kA que é o valor de pico desta onda de corrente. Assim, os resultados de sobretensão da Figura 12 estão descritos em kV/kA. Observa-se que as reduções nas sobretensões em decorrência da aplicação da técnica não convencional têm a mesma ordem de grandeza das indicadas na Tabela 1 para corrente triangular com $t_f = 2 \mu s$, corroborando assim a qualidade dos resultados obtidos.

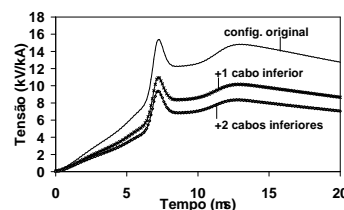
Configuração	Cad. Isol. Superior V_p (kV/kA)	Red. (%)	Cad. Isol. Inferior V_p (kV/kA)	Red. (%)
Original	15,64	-	15,35	-
+ 1 cabo inferior	12,58	19,56(19,02)	10,93	28,80(28,1)
+ 2 cabos inferiores	11,51	26,38(25,96)	9,37	38,97(38)

OBS: Os valores entre parênteses se referem às reduções relativas à corrente triangular com $t_f = 2 \mu s$ apresentadas na Tabela 1.

(a)



(b)



(c)

FIGURA 12 – Sobretensões nas cadeias de isoladores para onda de corrente representativa de primeira descarga de retorno. (a) Variação percentual. (b) Cadeia de isoladores superior. (c) Cadeia de isoladores inferior.

4.0 – CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta resultados relativos à aplicação de uma técnica não convencional para redução da sobretensão desenvolvida nas cadeias de isoladores da torre quando da incidência de descargas atmosféricas. A técnica consiste na adição de cabos metálicos inferiores às fases, conectados às estruturas metálicas da torre. As avaliações da melhoria de desempenho da torre frente a descargas foram realizadas usando-se para caso estudo uma linha real de 230 kV.

A técnica envolve a instalação dos cabos apenas entre as torres dos vãos adjacentes à torre objeto de melhoria. As avaliações desenvolvidas indicam a eficácia da técnica nesta condição, pois a contribuição das torres adjacentes e das resistências de aterramentos destas não influenciam a redução da sobretensão na torre central, exceto para ondas de corrente com tempo de frente muito longo, superiores ao dobro do tempo de trânsito da onda que se propaga nos vãos. De qualquer forma, o cômputo do efeito das torres seria na direção de reduzir ainda mais a sobretensão, sendo os resultados apresentados, portanto, conservativos.

Com base em simulações sistemáticas realizadas com o modelo HEM, foi possível quantificar a significativa redução promovida pela aplicação da técnica na sobretensão desenvolvida nas cadeias de isoladores na condição de incidência. Os resultados obtidos indicam reduções em torno de 19% a 38% nas sobretensões nas cadeias de isoladores para torres com $R_{at} = 20 \Omega$, respectivamente para o arranjo de um e dois condutores inferiores. Verificou-se que a eficiência da técnica é ainda maior para torres com resistências de aterramento mais elevadas.

Considerando torres com $R_{at} = 40 \, \Omega$, são observadas diminuições de sobretensões de 23 a 42% dos seus valores originais. O efeito de redução da sobretensão nesse caso chega a ser superior ao proporcionado pela redução a metade do valor da sua resistência de aterramento.

Tais aspectos denotam o valor e o potencial desta técnica para aplicação nas condições ambientais específicas do Brasil, caracterizado por solos de muito alta resistividade, sendo sua aplicação de especial interesse como ação complementar nos trechos de linha de transmissão nos quais as técnicas convencionais de redução da resistência de aterramento não são aplicáveis ou têm difícil implementação.

Deve se observar a necessidade de se avaliar de forma integral o impacto do uso da técnica em linhas já existentes, tendo em conta, por exemplo, os esforços mecânicos adicionais proporcionados pela ação do vento nos cabos inferiores. No caso de linhas estaiadas, esta questão associada à aplicação da técnica pode ser facilmente contornada com o uso de estais adicionais, respeitando-se as distâncias elétricas de modo a não modificar o isolamento elétrico da linha.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VISACRO, S., "Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines," J. Lightning, vol.1, pp. 60-68, 2007.
- (2) VISACRO, S., "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia", Ed. ArtLiber, São Paulo, 2005.
- (3) VISACRO, S., HERMOSO, B., ALMEIDA, M.T., TORRES, H., LOBODA, M., SEKIOKA, S., "Final Report of CIGRE WG C4.406: The response of grounding electrodes to lightning currents", *Electra*, no. 246, p. 18–21, Outubro, 2009.
- (4) VISACRO, S., FELIPE, M.A., OLIVEIRA, R.Z., "Non-conventional methodology to improve lightning performance of transmission lines", Proceedings of GROUND'2002 - International Conference on Grounding and Earthing & Workshop on Atmospheric Electricity, p. 267-270, Rio de Janeiro, Novembro, 2002.
- (5) VISACRO, S., SOARES J., A., OLIVEIRA, R., FELIPE, M., SILVA, A., VALE, M.H., "Non-Conventional Measures for Improvement of Lightning Performance of Transmission Lines", Proceedings of 27th ICLP – International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, p. 684-687, Setembro, 2004.
- (6) VISACRO, S., SOARES J., A., SPALENZA, A., GUEDES, V.T., "Enhancement of Lightning Performance of Transmission Lines through Non-Conventional Grounding Practices", Proceedings of GROUND'2004 and 1st LPE - International Conference on Grounding and Earthing and International Conference on Lightning Physics and Effects, Belo Horizonte, Brazil, p.257-261, Novembro, 2004.
- (7) VISACRO, S., SOARES J., A., GUEDES, V.T., SPALENZA, A., ANTUNES, E.P., "Práticas Não Convencionais para a Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas", Anais do Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Curitiba, Paraná, Outubro, 2005.
- (8) VISACRO, S., SOARES J., A., SILVA, A.P., ANTUNES, E.P., GUEDES, V.T., "Investigation of the transient response of transmission line towers to lightning strikes", Proceedings of VIII SIPDA - International Symposium on Lightning Protection, p. 255-258, São Paulo, Novembro, 2005.
- (9) SILVA, A.P., "Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento de Sistema de In-formações e Análise de Casos", Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Dezembro, 2005.
- (10) VISACRO, S., ANTUNES, E.P., MACHADO, V.G., GUEDES, V.T., "Improving the Lightning Performance of 69 KV to 230 KV Transmission Lines", Proceedings of GROUND'2006 and 2nd LPE - International Conference on Grounding and Earthing and International Conference on Lightning Physics and Effects, Maceió, p.329-332, Novembro, 2006.
- (11) VISACRO, S., SILVEIRA, F.H., BATISTA, M., RODRIGUES, B.D., "Exploring a non-conventional technique to improve the lightning performance of transmission lines, Proceedings of GROUND 2010 & 4th LPE - International Conference on Grounding and Earthing and International Conference on Lightning Physics and Effects, Salvador, p. 188-191, Novembro, 2010.
- (12) VISACRO, S., SOARES J., A., "HEM: A model for simulation of lightning related engineering problems," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, p. 1206-1208, Abril, 2005.
- (13) SOARES J., A., SCHROEDER, M.A.O., VISACRO, S. "Transient voltages in transmission lines caused by direct lightning strikes", IEEE Trans. Power Del., vol. 20, pp. 1447-1452, Apr. 2005.
- (14) SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., HERRERA, J., TORRES, H., "Evaluation of Lightning-Induced Voltages over Lossy Ground by the Hybrid Electromagnetic Model", IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.51, no.1, p.156 – 160, Fevereiro, 2009.
- (15) VISACRO, S. "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, p. 381-386, Janeiro, 2007.
- (16) VISACRO, S., "A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke," Geophys. Res. Lett., vol.31, L07112, Abril, 2004.
- (17) VISACRO, S., SCHROEDER, M.A.O., SOARES J., A., CHERCHIGLIA, L.C.L., SOUZA, V.J., "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station," J. Geophys. Res., vol. 109, No. D01105, 1-11, 2004.
- (18) BERGER, K., ANDERSON, R.B, KRONINGER, H., "Parameters of lightning flashes", *Electra*, no.80, p.223-237, 1975.

6.0 – DADOS BIOGRÁFICOS



Silvério Visacro nasceu em Belo Horizonte em 1956. Graduiu-se (1979) e obteve o mestrado (1983) em Eng. Elétrica pela UFMG e doutorou-se na COPPE/UFRJ (1992). É Professor Titular da UFMG na área de Eng. Elétrica em Eletromagnetismo Aplicado, com ênfase nas aplicações associadas às Descargas Atmosféricas e aos Aterramentos Elétricos. Em 2001, com o suporte da CEMIG constituiu o LRC - Lightning Research Center, avançado centro de pesquisa dos raios e seus efeitos, onde lidera equipe de 50 membros, dentre docentes, pós-doutorandos e alunos (doutorandos, mestrandos e de Iniciação Científica) na realização de pesquisas de alto nível. É autor de dois livros, respectivamente nos temas Aterramentos Elétricos e Descargas Atmosféricas, e de mais de 300 artigos (52 em periódicos). É um dos editores do Journal of Lightning Research e preside o GROUND & LPE: Intern. Conference on Grounding and Earthing & Lightning Physics and Effects. Atua no Comitê Científico de outros eventos internacionais da área: SICEL e SIPDA. Coordena a Rede Brasileira de Sobreensões Atmosféricas.