



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

BR/GDS/05
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS:
AVANÇOS RECENTES NAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE E PROJETO**

Silvério Visacro(*) Fernando H. Silveira
LRC – Lightning Research Center
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

O impacto de avanços recentes nas metodologias de cálculo de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas foi avaliado. Verificou-se, que o uso de ondas representativas da corrente de descarga, de elaborado modelo computacional para cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores e de critério consistente para verificação da condição de backflashover contribuem para a significativa melhoria da qualidade dos resultados. Particularmente, constatou-se que a dependência da frequência dos parâmetros do solo é responsável por significativa redução na taxa de desligamentos da linha. Constatou-se também que as descargas subseqüentes contribuem para significativo aumento do número de desligamentos da linha.

PALAVRAS-CHAVE

Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, Metodologias de cálculo de desempenho, Correntes de Descargas Atmosféricas, Aterramentos elétricos.

1.0 - INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas se constituem na principal fonte de desligamentos das linhas de transmissão (LT's), os quais se precessam basicamente por três diferentes mecanismos, o *Flashover*, o *Backflashover* e a descarga a meio de vão. Nas condições de solo brasileiras, prevalece amplamente o mecanismo de backflashover, o qual é fundamentalmente governado pela impedância de aterramento de pé de torre. A dinâmica destes mecanismos é discutida em detalhes em (1,2).

A literatura apresenta metodologias tradicionais de cálculo de desempenho da linha transmissão frente a descargas traduzidas por meio de estimativas das taxas de desligamento da linha, como indicado em (3-5). Devido à complexidade do tema, tais metodologias adotam simplificações, que, em muitos casos, fragilizam a qualidade das avaliações, distanciando as estimativas da condição de desempenho verificada na prática. Frequentemente, verifica-se que tal distância é muito significativa na condição dos sistemas elétricos brasileiros, instalados num ambiente de alta densidade de incidência de descargas e solos de elevada resistividade.

Nos últimos anos, importantes avanços têm se verificado nesta área com potencial de impacto na qualidade dos resultados providos pelas metodologias de cálculo de desempenho. Em particular, o grupo de pesquisa dos autores desenvolveu contribuições diferenciadas para aprimoramento destas metodologias, as quais constituem o objeto deste trabalho.

Notadamente, destas contribuições destacam-se: a adoção de ondas representativas da corrente de descarga, a inclusão do efeito da dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo na impedância de aterramento das torres, o uso de modelo elaborado para cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores baseado

(*) Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha – CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
Tel: (+55 31) 3409-4872 – Fax: (+55 31) 3409-5455 – Email: LRC@cpdee.ufmg.br

em teoria de campo em substituição aos procedimentos aproximados analíticos ou de aplicação do EMTP, uso de critério mais consistente para verificação da condição de backflashover baseado nos métodos DE ou LPM em substituição às curvas v_{xt} e ruptura do paradigma que desprezava o efeito das descargas subsequentes nos desligamentos das linhas. Tais contribuições são objeto de publicações específicas dos autores referidas no texto.

Neste trabalho, inicialmente são considerados os aspectos fundamentais de tais contribuições, realçando-se os seus impactos práticos nos resultados das avaliações de desempenho. Em seguida, um caso estudo é desenvolvido para denotar a aplicação destas contribuições, considerando uma linha de transmissão real.

2.0 - CONTRIBUIÇÕES PARA MELHORIA DAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE DESEMPENHO DE LT'S

2.1 Representação das ondas de corrente de descarga

Como discutido em (6), tradicionalmente nos estudos de desempenho das LT's frente a descargas são utilizadas representações simplificadas das ondas de corrente de descargas. Alguns estudos empregam ondas triangulares ou duplas exponenciais e, mais modernamente, ondas obtidas a partir de funções de Heidler têm sido aplicadas.

Entretanto, todas estas ondas têm forma muito diferente das ondas individuais de corrente de descarga, como explicado em (2). Infelizmente tais representações implicam em ondas de sobretensão nos isoladores da linha muito diferente (em forma e amplitude) daquela desenvolvida em resposta a correntes reais de descarga, fragilizando os resultados das metodologias de cálculo de desempenho. Neste contexto, a equipe dos autores desenvolveu na referência (6) uma caracterização da forma típica das corrente de descargas reais e propôs em (7) uma fórmula analítica de representação destas ondas, que inclui os parâmetros quantitativos que descrevem sua amplitude e tempos. Como indicado na Figura 1, tais ondas, além de representarem formas típicas de ondas individuais de corrente de primeira descarga e descarga subsequente, reproduzem os valores medianos de pico de corrente e tempos (T_{10} , T_{30} e T_{50}) associados desses eventos medidos na estação de Monte San Salvatore (8).

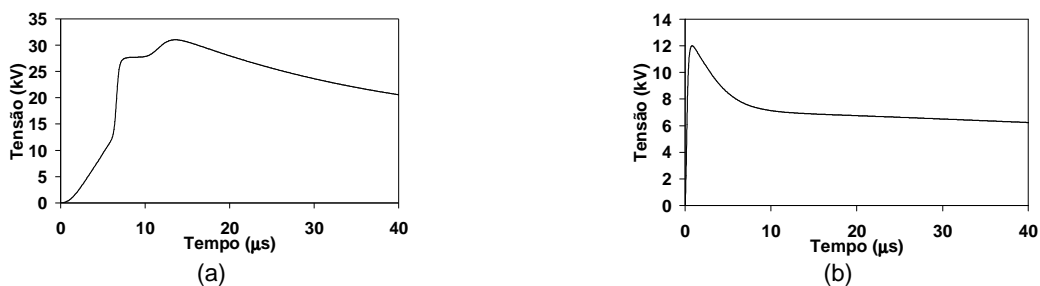


FIGURA 1 – Representação de ondas de corrente de primeira descarga (a) e descarga subsequente (b) com parâmetros medianos de corrente medidos na estação do Monte San Salvatore (8). Adaptado de (6,7).

Curvas semelhantes, mas com outros parâmetros medianos foram desenvolvidas a partir das medições da Estação do Morro do Cachimbo (MCS). O uso destas ondas nas simulações assegura resultados muito mais realistas em termos das sobretensões desenvolvidas.

2.2. Comportamento dos parâmetros do solo com a frequência

Nas avaliações do comportamento transitório de aterramentos elétricos, em estudos associados à proteção contra descargas atmosféricas tradicionalmente se admite valor constante para sua resistividade e permissividade do solo, a despeito das inúmeras evidências experimentais de uma forte dependência da frequência destes parâmetros. O valor adotado para a resistividade do solo é usualmente aquele obtido com instrumentos comerciais, que aplicam sinais de baixa frequência (~100 Hz), e assume-se que a permissividade relativa do solo varia entre 4 e 81, de acordo com a umidade do solo (9). Esse quadro decorria da dificuldade prática de se determinar experimentalmente a variação dos parâmetros do solo na frequência e à inexistência de formulações genéricas capazes de prever tal comportamento a partir dos dados usualmente disponíveis, basicamente a resistividade do solo medida em baixa frequência.

Recentemente, tendo em conta esse quadro, a equipe dos autores desenvolveu uma nova metodologia para determinação da resistividade e da permissividade do solo a partir de medições realizadas em condições de campo, como descrito na referência (10). A notável qualidade dos resultados providos pela metodologia foi aferida a partir da comparação da resposta experimental de eletrodos de aterramentos submetidos a correntes impulsivas com formas similares às de descargas com o resultado de simulações desenvolvidas nas hipóteses de solo de parâmetros constantes e variáveis na frequência (segundo determinado pela metodologia). A Figura 2 denota tal aspecto para um solo de resistividade 1400 $\Omega \cdot m$ (ρ_0 : baixa frequência) em condições naturais. Nota-se na Figura 2(a) a significativa redução da resistividade relativa (ρ/ρ_0) e da permissividade relativa com aumento da frequência. Na Figura 2(b) verifica-se que a elevação de potencial referida ao terra remoto (GPR) simulada com hipótese de parâmetros constantes do solo tem amplitude muito superior àquela medida (quase duas vezes maior). Adotando-

se a variação com a frequência desses parâmetros obtida da aplicação da metodologia obtém-se a coincidência entre o GPR simulado e o medido.

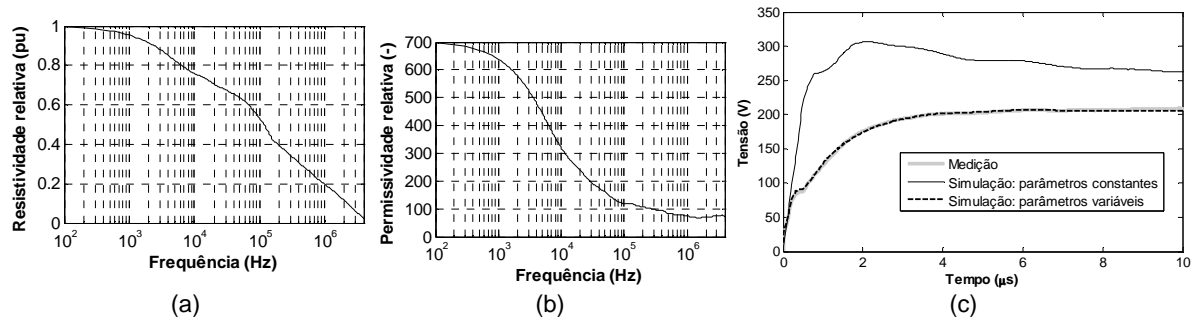


FIGURA 2 – Dependência da frequência dos parâmetros do solo de 1400 Ω.m: (a) Variação relativa da resistividade e da permissividade elétricas na faixa 100 Hz – 4 MHz e (b) GPR-elevação de potencial do eletrodo-experimental e simulado nas hipóteses de solo de parâmetros constantes e variáveis na frequência segundo determinado pela metodologia, em resposta a injeção de uma corrente impulsiva num eletrodo horizontal de 9,6 m enterrado a 0,5m de profundidade. Adaptada de (10).

Após a aferição da metodologia, esta foi aplicada sistematicamente a um grande número de solos diferentes de localidades diversas (aproximadamente 60 solos). Dos resultados obtidos foi possível derivar as expressões de Visacro-Alípio, indicadas a seguir, para estimar a variação da resistividade e permissividade do solo na faixa típica de frequências de correntes de descargas atmosféricas, como descrito em (11):

$$\rho = \rho_0 \{1 + [1.2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_0^{0.73}] \cdot [(f - 100)^{0.65}]^{-1}\}^{-1} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = 7.6 \cdot 10^3 f^{-0.4} + 1.3 \quad (2)$$

onde ρ é a resistividade do solo na frequência f em Hz, ρ_0 é a resistividade do solo em 100 Hz e ϵ_r é permissividade relativa do solo na frequência f . A expressão (1) é válida na faixa de 100 Hz a 4 MHz e a expressão (2) pode ser utilizada nessa mesma faixa. Embora abaixo de 5 kHz a precisão da estimativa da permissividade não seja muito pronunciada, o efeito das correntes capacitivas associadas é desprezível, permitindo o uso da expressão.

Nos trabalhos descritos (11), (12) estas formulações foram aplicadas sistematicamente para verificar-se como a dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo afeta a resposta do aterramento sujeito a corrente de descargas, por meio da redução da impedância de aterramento.

Em (13) verificou-se como esta dependência influencia a resposta de aterramentos típicos de LT's e constatou-se o seu significativo impacto nas sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores de linhas de transmissão atingidas por raios e a consequente diminuição da taxa de desgastamentos da linha.

2.3 Uso de elaborado modelo computacional para cálculo da onda de sobretensão na cadeia de isoladores

A verificação da condição de ocorrência de flashover na cadeia de isoladores da LT para uma dada corrente de descarga é feita a partir de dois elementos: a onda de sobretensão resultante nos isoladores e a suportabilidade do isolamento à onda impulsiva. A qualidade desta avaliação está diretamente condicionada à exatidão da representação desta sobretensão.

Tradicionalmente, o cálculo da sobretensão é feito por aproximação analítica ou pelo uso de programas baseados em circuitos a parâmetros distribuídos do tipo EMTP/ATP. Infelizmente, em ambos os casos, considera-se as estimativas das ondas de sobretensão relativamente grosseiras, em decorrência da dificuldade destas abordagens em representar de forma apurada os elementos físicos envolvidos no problema e, notadamente, os acoplamentos eletromagnéticos existentes na condição de descargas.

O uso de modelos eletromagnéticos possibilita realizar o cálculo preciso destas sobretensões, apesar de implicar longos tempos de processamento. A vantagem destes modelos é que, por decorrerem diretamente de equações básicas do eletromagnetismo, são capazes de gerar soluções de validade generalizada, sem a necessidade de verificação de validade a cada aplicação, como requerido em modelagens que usam abordagens do tipo analítico ou de parâmetros de circuitos distribuídos, tal qual o EMTP. Nos modelos eletromagnéticos pode-se representar o sistema físico diretamente a partir da geometria dos condutores envolvidos e das constantes destes e dos meios onde estes estão imersos, sendo que a solução já contempla automaticamente os complexos acoplamentos eletromagnéticos e os efeitos de propagação. Os autores consideram que o enorme ganho em exatidão compensa o maior tempo de processamento e têm utilizado um avançado modelo computacional denominado HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) para simular as sobretensões resultantes na cadeia de isoladores devido à incidência de descargas nas LT's. O HEM constitui um modelo eletromagnético de onda completa, cujos detalhes são considerados em (14-16). Este é designado híbrido porque, a despeito de ser formulado por meio de equações

integrais do campo elétrico, o modelo provê resultados diretamente na forma de grandezas circuitais, notadamente em termos da distribuição de correntes e potenciais ao longo do sistema simulado. Tais grandezas têm maior utilidade nas aplicações de engenharia.

Este modelo, desenvolvido no domínio da frequência, utiliza a Transformada Rápida de Fourier para gerar resultados no domínio do tempo e encontra aplicação em problemas diversos relacionados à solicitação de sistemas elétricos por correntes de descargas. Os detalhes da aplicação específica do modelo para cálculo da resposta de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas são apresentados em (14), que contempla, inclusive, a sua validação por comparação com resultados experimentais.

2.4 Adoção de critério mais rigoroso para verificação da condição de backflashover

Tradicionalmente a curva v_{xt} é usada como referência pelos métodos indicados na literatura para verificar a condição de flashover (3). Há, entretanto, métodos muito mais consistentes para a verificação desta condição, notadamente o modelo do efeito disruptivo, designado DE, e suas variações (17-18), e o modelo de progressão do *leader*, designado LPM (19). O uso destas duas abordagens confere maior qualidade ao critério de verificação de ocorrência de flashover nos isoladores.

As referências citadas acima discutem tais modelos. Os autores têm utilizado o método DE para verificação da condição de ruptura do isolamento considerando as sobretensões geradas por correntes representativas de descargas simuladas com o uso do HEM, para determinar as correntes de pico críticas para cada condição da linha analisada.

2.5 Cômputo dos desligamentos das linhas devido a descargas subsequentes

As avaliações de desempenho de LT's de alta tensão consideram apenas os desligamentos causados pela primeira corrente de retorno.

Isto decorre de uma expectativa de sobretensões deste tipo de corrente muito superiores àquelas devido descargas subseqüentes, pela maior amplitude da corrente da primeira descarga. A mediana do valor de pico desta corrente é aproximadamente 3 vezes maior que a mediana das correntes de descargas subseqüentes (aproximadamente 30 kA contra 12 kA, no caso dos dados de Berger). Tal expectativa ignora outro parâmetro da corrente de descarga de influência na amplitude da sobretensão, o tempo de frente. O seu valor mediano para descargas subseqüentes é aproximadamente cinco vezes menor que o da primeira corrente de retorno, e a redução deste tempo influencia o aumento da sobretensão, embora de forma discreta em relação ao efeito do pico de corrente. Em algumas condições, este parâmetro pode ter influência muito significativa.

Trabalhos recentes dos autores mostram que as descargas subsequentes podem ter contribuição significativa no número de desligamentos de LT's de 69 kV (20) e 138 kV (21). A explicação física para tal efeito consta da referência (21), que mostra que este tipo de desligamento ocorre com maior frequência no caso de incidência em torres mais altas e que torna-se relativamente mais importante nas torres com baixo valor de resistência de aterramento.

3.0 - DESENVOLVIMENTO: CASO EXEMPLO

3.1 Metodologia

Através de um caso exemplo aplicado a uma linha de transmissão real, ilustra-se a inclusão das contribuições desenvolvidas para melhoria das metodologias de cálculo de desempenho frente a descargas. O caso exemplo tem foco no impacto da dependência da frequência dos parâmetros do solo no desempenho da linha. As avaliações apresentadas se baseiam no resultado de simulações sistemáticas desenvolvidas pela aplicação do HEM.

Inicialmente determinou-se a elevação de potencial no solo (GPR – Grounding Potential Rise) de configurações típicas de aterramento de linhas (Figura 3(c)), considerando a injeção de correntes de descargas representativas dos fenômenos primeira descarga e descarga subsequente nos eletrodos de aterramento para as condições de parâmetros do solo constantes e variantes da frequência. Em seguida, simularam-se as sobretensões resultantes nos isoladores das torres da linha de 138 kV (configuração indicada na Figura 3(b)), em decorrência da incidência direta dessas mesmas correntes representativas de descarga no topo da torre, conforme ilustrado na Figura 3(a).

Nota-se que as torres autoportantes têm altura média de 30 m e o comprimento dos vãos é de 400 m. A tensão de suportabilidade ao impulso (TSI) da linha é de 650 kV. Os eletrodos de aterramento (contrapeso) enterrados 0,5 m no solo têm raio de 0,6 cm e estão conectados a quatro hastes verticais de 2,5 m de comprimento e 5 cm de raio que representam as partes metálicas da torre penetrando no solo, de resistividade em baixa frequência entre 100 e 4000 Ωm . Duas condições foram consideradas para o solo: parâmetros constantes ($\rho = \rho_0$; $\epsilon_r = 10$) e variação dos parâmetros do solo com a frequência determinada a partir das expressões (1) e (2).

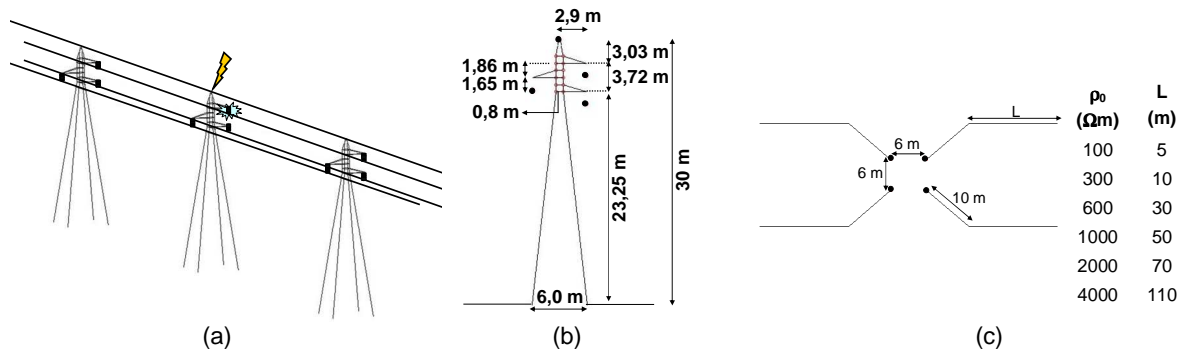


FIGURA 3 – Representação do evento (a) e das configurações da torre da linha de 138 kV (b) e do aterramento nas diferentes resistividades do solo de baixa frequência ρ_0 e respectivos comprimentos de eletrodos L.

Com base nessas sobretensões, o uso do método DE e a aplicação de uma distribuição de probabilidade cumulativa de correntes de descarga, foram determinadas as correntes críticas capazes de resultar em backflashover e a probabilidade de ocorrência dessas correntes. Finalmente, com base nas probabilidades obtidas para as condições simuladas e para determinadas distribuições de resistividade do solo ao longo da linha, avaliou-se o desempenho da linha considerando os parâmetros do solo constantes e variantes na frequência.

3.2 Resultados e análises relativos ao comportamento impulsivo do sistema de aterramento

A Figura 4 ilustra os resultados de elevação de potencial no solo em decorrência da injeção das correntes representativas de primeira descarga e descarga subsequente ilustradas na Figura 1 diretamente nos eletrodos de aterramento representados na Figura 3. Mostra, também, a impedância impulsiva Z_P ($Z_P = V_P / I_P$) calculada partir dos valores de pico da elevação de potencial no solo e da corrente injetada nos eletrodos de aterramento indicados na Figura 4. Os resultados consideram os parâmetros do solo constantes e variáveis na frequência e indicam a resistência de aterramento em baixa frequência R_g para cada condição de solo e eletrodo.

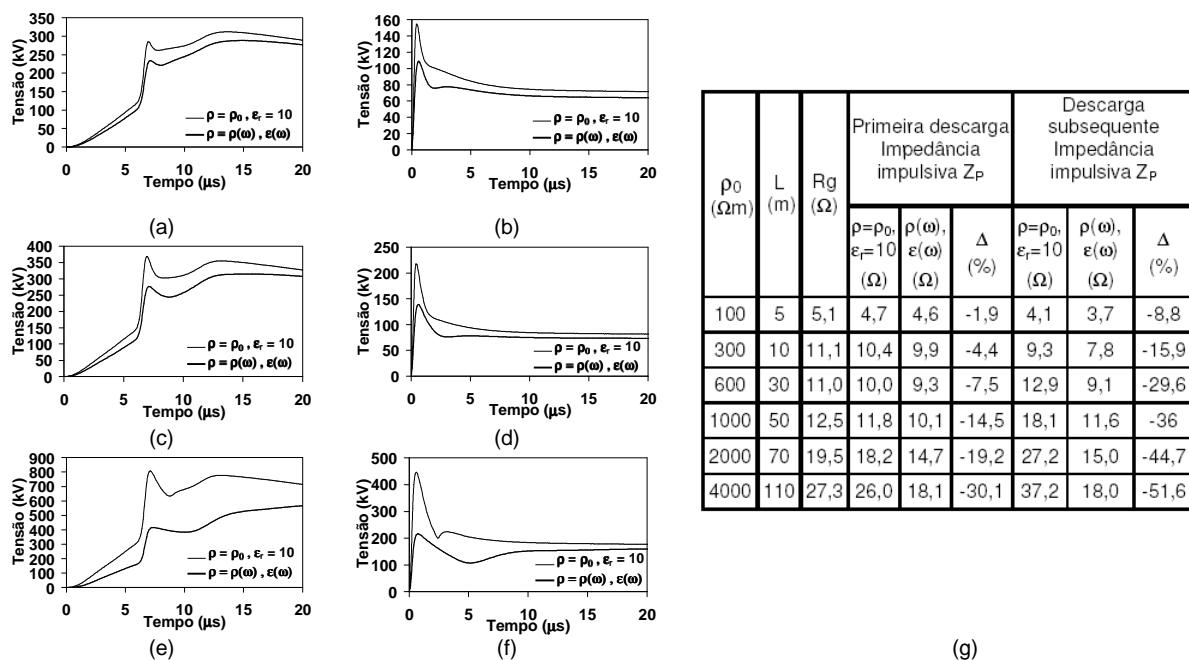


FIGURA 4 - Elevação de potencial do sistema de aterramento da LT 138 kV para parâmetros do solo constantes e variantes na frequência. ρ_0 = (a),(b) 600 Ω.m, (c),(d) 1000 Ω.m, (e),(f) 4000 Ω.m. Primeira coluna: primeira descarga; segunda coluna: descarga subsequente. Impedância impulsiva de aterramentos calculada (g).

Os resultados mostram que o efeito de dependência da frequência é menos significativo para baixas resistividades, tornando-se importante com o aumento desse parâmetro. Para solos com resistividades superiores a 1000 Ω.m, o efeito é muito importante. Indicam claramente que a dependência com a frequência dos parâmetros do solo causa importante redução da impedância impulsiva de aterramento, que se torna mais evidente para resistividades do solo mais elevadas. Tal redução é muito mais importante nos casos relativos à descargas subsequentes em decorrência do seu conteúdo de frequência que abrange componentes mais elevadas. Reduções da impedância impulsiva de 16% a 44% são observadas para resistividade de solo variando de 300 a 2000 Ωm para descargas subsequentes. Considerando as primeiras descargas, tais reduções são da ordem de 5% a 20%, respectivamente.

3.3 Resultados e análises relativos às sobretensões na cadeia de isoladores superior

A Figura 5 apresenta as sobretensões desenvolvidas ao longo da cadeia de isoladores superior em decorrência da incidência direta de descarga no topo da torre ilustrada na Figura 1 para quatro valores de resistividade do solo a baixa frequência ρ_0 , considerando as ondas de corrente típicas de primeira descarga e descarga subsequente da Figura 1. Os valores de pico dessas sobretensões são compilados na Figura 5(i).

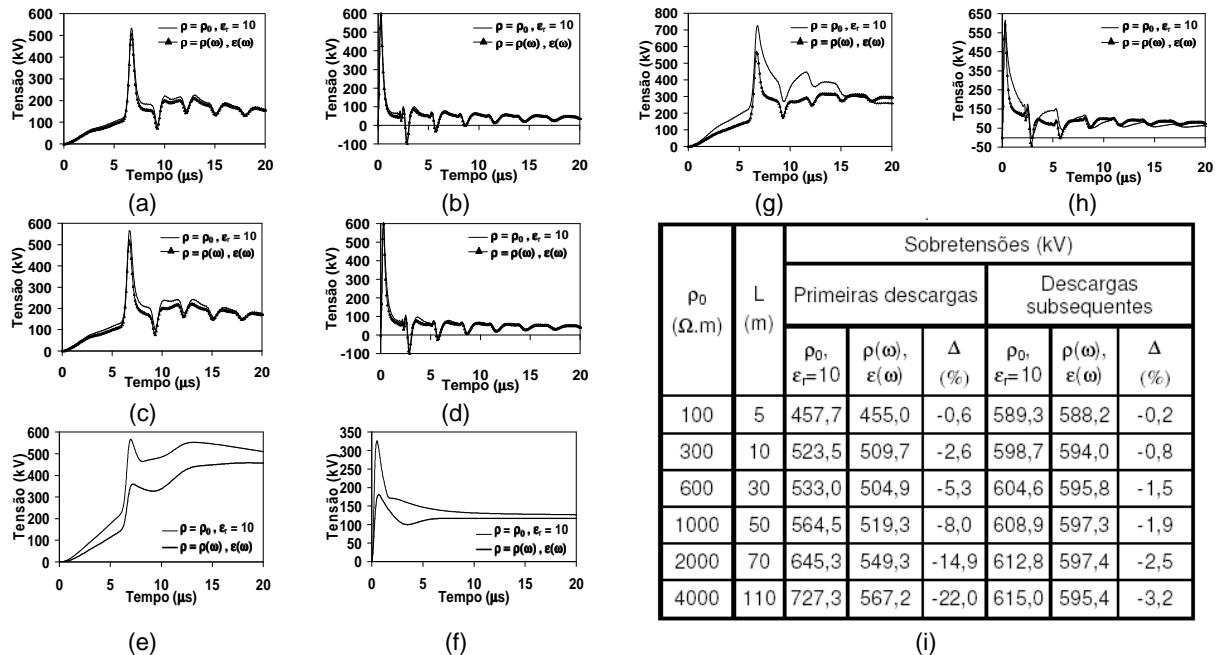


FIGURA 5 – Sobretensões nas cadeias de isoladores da LT de 138 kV para parâmetros do solo constantes e variantes na frequência para valores de ρ_0 : (a), (b) 600 $\Omega \cdot m$, (c), (d) 1000 $\Omega \cdot m$, (e), (f) 2000 $\Omega \cdot m$ e (g), (h) 4000 $\Omega \cdot m$. Primeira descarga: (a), (c), (e), (g); Descarga subsequente (b), (d), (f), (h). Valores de pico das sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores (i).

Os resultados indicam que o efeito da variação dos parâmetros do solo com a frequência não afeta significativamente a amplitude das sobretensões para valores de resistividade do solo inferiores a 600 Ωm , se tornando importante para valores acima desse valor. O impacto desse efeito no pico de sobretensão é indicado na tabela da Figura 5(i), que mostra a redução significativa do pico apenas para as sobretensões por primeira descarga (5% a 22% para ρ_0 variando de 600 a 4000 Ωm), a despeito da redução mais pronunciada da impedância impulsiva para as correntes de descargas subsequentes. Este resultado é consistente com as análises indicadas em (21) que mostram o efeito diminuto da impedância de aterramento para a redução das sobretensões associadas às descargas subsequentes.

Para resistividades do solo superiores a 1000 Ωm , o efeito da variação dos parâmetros do solo com a frequência contribui para a redução da amplitude da onda de sobretensão não somente no pico mas também na região de cauda. Este comportamento sugere que este efeito pode ser capaz de reduzir a possibilidade de ocorrência de backflashover nos isoladores da linha. A próxima seção é dedicada a esta análise.

3.4 Resultados e análises relativos ao efeito nas correntes críticas

Com o objetivo de determinar o valor crítico de corrente necessário para ocorrência de backflashover no isolador da linha de 138 kV, o método DE foi aplicado às curvas de sobretensão resultantes da primeira corrente de descarga, como as ilustradas anteriormente, para cada caso. Utilizando a distribuição de probabilidade acumulada referente aos picos de corrente de primeira descarga medidos na estação de Monte San Salvatore (8), determinou-se também a porcentagem das corrente pico que excedem o valor crítico de corrente requerido para ocorrência de flashover nos isoladores, segundo o método DE.

Os valores críticos de pico de corrente com e sem dependência da frequência dos parâmetros do solo são indicados na Tabela 1(a), juntamente com o percentual de correntes de descarga excedendo tal condição. Observa-se que tal dependência frequência resulta em redução significativa na taxa de backflashover, mesmo para valores baixos de resistividade do solo (diminuição de 15% na porcentagem de correntes que resultam em backflashover para $\rho_0 = 300 \Omega m$). Este decréscimo é mais pronunciado para solos de elevada resistividade: reduções da ordem de 24% a 43% para ρ_0 variando de 1000 a 4000 Ωm .

3.5 Ensaio para avaliação do impacto na taxa de desligamentos da linha

Para fins de se quantificar impacto do efeito de dependência da frequência dos parâmetros do solo sobre o desempenho da LT em análise desenvolveu-se um ensaio, que admitiu certas hipóteses quanto à distribuição da resistividade do solo ao longo da linha. Considerou-se uma taxa de incidência de 5 descargas/km²/ano na região na qual se localiza a linha, resultando a uma taxa esperada de 30 descargas por 100 km de linha ao ano para a condição de torres com altura média de 30 m.

Com base nas correntes críticas apresentadas na Tabela 1(a), foram calculadas as taxas de desligamentos considerando os parâmetros do solo constantes e variantes com a frequência, como indica a Tabela 1(b) para seis distribuições uniformes de resistividade do solo ao longo da linha, correspondendo aos valores de ρ_0 entre 100 e 4000 $\Omega\cdot\text{m}$. As taxas de desligamentos estimadas (por 100 km por ano) crescem acentuadamente com o aumento da resistividade do solo. Para o caso de parâmetros do solo constantes, esta taxa varia de 0,85 a 7,75. Ao se considerar o efeito da variação dos parâmetros do solo com a frequência, observa-se uma forte diminuição nessas taxas, exceto para a condição extrema de baixa resistividade ($\rho_0=100\ \Omega\cdot\text{m}$). Reduções de cerca de 15% a 43% são observados para os solos de 300 e 4000 $\Omega\cdot\text{m}$, respectivamente.

Tabela 1 – Efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no desempenho da LT de 138 kV.

(a) Correntes críticas (primeira descarga)

ρ_0 ($\Omega\cdot\text{m}$)	L(m)	$\rho_0, \epsilon_r = 10$		$\rho(\omega), \epsilon(\omega)$		δ (%)
		I_{PC} (kA)	$I_P > I_{PC}$ A (%)	I_{PC} (kA)	$I_P > I_{PC}$ B (%)	
100	5	120,9	2,8	122,1	2,8	2,5
300	10	84,6	6,8	90,5	5,8	15,1
600	30	86,2	6,6	92,7	5,5	16,3
1000	50	77,8	8,4	87,1	6,4	23,8
2000	70	58,3	16,2	69,4	10,9	32,7
4000	110	46,5	25,8	60,8	14,8	42,6

(b) Número de desligamentos (primeira descarga)

Hipóteses para distribuição de p_0 (%)						desligamentos/ 100 km/ano		Δ (%)
100 (Ω .m)	300 (Ω .m)	600 (Ω .m)	1000 (Ω .m)	2000 (Ω .m)	4000 (Ω .m)	$(p=p_0,$ $\epsilon_r=10)$	$(p=p(\omega),$ $\epsilon(\omega))$	
100	0	0	0	0	0	0,85	0,83	2,5
0	100	0	0	0	0	2,05	1,73	15,1
0	0	100	0	0	0	1,97	1,64	16,3
0	0	0	100	0	0	2,51	1,91	23,8
0	0	0	0	100	0	4,87	3,22	32,6
0	0	0	0	0	100	7,75	4,43	42,7
15	25	30	30	0	0	1,98	1,63	18
10	10	30	30	10	10	2,90	2,10	27,6
0	0	30	30	25	15	3,72	2,55	31,4

Desse modo, o efeito da variação dos parâmetros do solo com a frequência afeta significativamente a taxa de desligamentos de linhas de transmissão, resultando em melhora significativa no seu desempenho frente às descargas atmosféricas, excetuando-se o caso daquelas linhas instaladas em solos de muito baixa resistividade, que naturalmente já devem apresentar um bom desempenho. Nota-se que o efeito é também importante no caso de hipótese de distribuição não uniforme de resistividade, que indicam reduções da ordem de 18 a 31%.

3.5 O efeito do cômputo dos desligamentos devido a descargas subsequentes

Nesta seção verifica-se a contribuição das descargas subsequentes para o número de desligamentos da linha. Adotando-se os mesmos procedimentos usados para as primeiras descargas, foram determinadas as correntes críticas de descargas subsequentes indicadas na Tabela 2(a), que têm em conta a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Aplicou-se a mesma metodologia descrita em (20) e considerou-se que 80% das descargas são múltiplas e incluem em média 3 descargas subsequentes (22), para determinar-se as taxas de desligamento indicadas na Tabela 2(b).

Tabela 2 – Desempenho esperado da LT de 138 kV incluindo efeito das descargas subsequentes

(a) Correntes críticas (descargas subsequentes)

ρ_0 ($\Omega\cdot\text{m}$)	L(m)	$\rho = \rho(\omega), \epsilon(\omega)$	
		I_{PC} (kA)	$I_P > I_{PC}$ (%)
600	30	48,36	2,27
1000	50	47,40	2,39
2000	70	46,20	2,56
4000	110	45,12	2,72

(b) Número de desligamentos (total)

ρ_0 ($\Omega\cdot\text{m}$)	L(m)	Desligamentos/100 km/ano		Δ (%)
		Primeira descarga	Primeira + subsequente	
600	30	1,64	3,15	92,0
1000	50	1,91	3,49	82,7
2000	70	3,28	4,88	48,8
4000	110	4,44	6,07	36,7

Nota-se o substancial aumento na taxa de desligamento (entre 92% e 36,7%) em relação à condição de desligamentos devidos apenas às primeiras correntes de descargas. Note que a contribuição das descargas subsequentes para os desligamentos é relativamente mais importante para os menores valores de resistividade de aterramento. Esse resultado corrobora as análises descritas em (21 e 22) para linhas de transmissão de 69 kV e 138 kV, respectivamente. Esta contribuição é menos importante para linhas de maior nível de tensão (230 kV etc).

4.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho considera o impacto de avanços científicos recentes nas metodologias de cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Ilustrou-se a aplicação destes avanços numa linha real, notadamente o uso de ondas representativas da corrente de descarga para cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores por meio de elaborado modelo computacional e de critério mais consistente para verificação da condição de backflashover. Particularmente, avaliou-se o impacto do efeito da dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo na impedância de aterramento das torres e do cômputo das descargas subsequentes na taxa de desligamento da linha.

Concluiu-se que a aplicação destes avanços confere qualidade superior aos resultados das avaliações. Verificou-se que a dependência da frequência dos parâmetros do solo implica significativa redução na taxa de desligamentos da linha, efeito que é tão mais pronunciado quanto maior é o valor da resistividade do solo. Constatou-se a significativa contribuição das descargas subsequentes para o número de desligamentos da linha de 138 kV. Este efeito deve ser maior para linhas de 69 kV e menor com o aumento do nível de tensão 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) IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Standard 1243-1997, Dec. 1997.
- (4) CIGRE Guide to Procedures for estimating the lightning Performance of Transmission Lines, WG 01 (Lightning), Study Committee 33, 1991.
- (5) MARTINEZ, J.A., CASTRO-ARANDA, F., "Lightning Performance Analysis of Overhead Transmission Lines Using the EMTP", IEEE Trans. Power Del., vol. 20, No. 3, Julho, 2005.
- (6) VISACRO, S., "A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke," Geophys. Res. Lett., vol. 31, L07112, Apr. 2004.
- (7) DE CONTI A. and VISACRO S., "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.49, No.2, pp.448-451, May 2007.
- (8) ANDERSON, R.B, ERIKSSON, A.J., "Lightning parameters for engineering application," Electra, vol.69, pp. 65-102, 1980
- (9) VISACRO, S., "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 381–386, Jan. 2007.
- (10) VISACRO, S., ALIPIO, R., MURTA VALE, M.H., PEREIRA, C., "The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 53, no. 2, pp. 401–406, May 2011.
- (11) VISACRO, S., ALIPIO, R., "Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.
- (12) ALIPIO, R.; VISACRO, S., Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, DOI 10.1109/TEM.2012.2210227, v. 55, n. 1, p.132-139, Fev. 2013
- (13) VISACRO, S., SILVEIRA, F.H., XAVIER, S., FERREIRA, H.B. "Frequency Dependence of Soil Parameters: The Influence on the Lightning Performance of Transmission Lines," in Proc. of 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012.
- (14) VISACRO, S., SOARES JR, A., "HEM: a model for simulation of lightning-related engineering problems," IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 1026–1208, Apr. 2005.
- (15) VISACRO, S., SILVEIRA, F.H., "Evaluation of current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model," J.Electrostatics, vol.60/2-4, pp.111-120, 2004.
- (16) 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.
- (17) HILEMAN, H., Insulation coordination for power systems. Boca Raton, FL: CRC, 1999, pp. 627–640.
- (18) CALDWELL, R. O., DARVENIZA, M., "Experimental and analytical studies of the effect of non-standard waveshapes of the impulse strength of external insulations," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 92, no. 4, pp.1420–1428, Jul. 1973.
- (19) PIGINI, A., RIZZI, G., GARBAGNATI, E., PORRINO, A., BALDO, G., PESAVENTO, G., "Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods," IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 2, pp. 1379–1392, Apr. 1989.
- (20) SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., CONTI, A.R., MESQUITA, C.R., "Backflashovers of transmission lines due to subsequent lightning strokes", IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.54, no.2, pp. 316-322, Apr. 2012. doi:10.1109/TEM.2011.2181851.
- (21) SILVEIRA, F.H., VISACRO, S., DE CONTI, A., "Lightning Performance of 138-kV Transmission Lines: The Relevance of Subsequent Strokes," IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2013, DOI 10.1109/TEM.2013.2246168.
- (23) RAKOV, V., UMAN, M.A., "Lightning – Physics and Effects," Cambridge University Press, 2003.

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 Sobretensões Atmosféricas.



Fernando H. Silveira possui graduação (1999), mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atualmente é professor adjunto II, dedicação exclusiva, do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG e pesquisador associado ao LRC (Lightning Research Center) da UFMG. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, eletromagnetismo aplicado, descargas atmosféricas (modelagem física do fenômeno), tensões induzidas por descargas atmosféricas, efeitos causados em redes de energia elétrica e unidades consumidoras pela incidência de descargas atmosféricas em estruturas elevadas e proteção de sistemas elétricos contra os efeitos associados às descargas. É autor ou co-autor de mais de 20 artigos em periódicos e 60 artigos em conferências. É revisor regular do IEEE Transactions on Power Delivery e IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.