

Aterramento temporário para linhas de transmissão: análise da segurança humana

Wagner Eustáquio Diniz / RITZ
Mário Fabiano Alves / PUC Minas
BRASIL
wagnered@ritzbrasil.com.br

IV Congreso Internacional: Trabajos con Tensión y Seguridad en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica - IV CITTES 2009
21 al 24 de abril de 2009
Buenos Aires, Argentina

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO

II. METODOLOGIA PROPOSTA

III. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

IV. CONCLUSÕES

V. REFERÊNCIAS

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo para determinação do melhor local para instalação do aterramento temporário utilizado nas intervenções nas linhas de transmissão desenergizadas, bem como um estudo da viabilidade do uso da chave de aterramento nas subestações juntamente com o aterramento temporário. Foram avaliadas diversas configurações de instalação do aterramento temporário e determinada qual é a mais eficaz no cumprimento do principal objetivo deste equipamento, que é garantir a segurança do pessoal envolvido nas atividades de manutenção ou construção de instalações elétricas desenergizadas. Os procedimentos tradicionais de aterramento temporário em linhas de transmissão têm se mostrado inadequados quando os níveis de indução são muito elevados, além disso, foi evidenciado que não existe padronização destes procedimentos nas concessionárias de energia elétrica.

I. Introdução

O aterramento temporário das instalações elétricas desenergizadas e liberadas para a realização de manutenção ou construção, têm recebido uma considerável atenção, devido ao crescente aumento da potência instalada e à existência de um sistema interligado através de linhas de alta e extra-alta tensão.

As intervenções em instalações elétricas desenergizadas apresentam, à primeira vista, uma

condição aparentemente segura para a execução de trabalhos. Entretanto, elas podem ser indevidamente energizadas por diversos fatores, tais como: erros de manobra, contato acidental com outros circuitos energizados, tensões induzidas por linhas adjacentes, fonte de alimentação de terceiros, descargas atmosféricas, mesmo que distante dos locais de trabalho, dentre outros.

O aterramento temporário possui outra importante função, a de minimizar os efeitos das induções eletromagnéticas provocadas por circuitos energizados que se localizam próximos ao circuito

onde será realizada a manutenção. Atualmente são comuns grandes extensões de linhas de transmissão, com longos trechos de paralelismo, estruturas com circuito duplo, etc., estes são alguns fatores que contribuem para o agravamento desse fenômeno.

A importância e necessidade do aterramento temporário fizeram com que o Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil, na última revisão da norma NR-10 [1], tornasse obrigatório o seu uso em qualquer instalação elétrica sob intervenção, com o intuito de reduzir o número de acidentes no setor elétrico.

II. Metodologia proposta

O problema é analisado em duas etapas. Primeiro, é analisada a questão do acoplamento eletromagnético entre duas linhas com certo comprimento de paralelismo, utilizando-se os recursos computacionais do programa ATP - Alternative Transients Program [2]. Isto permite obter-se uma série de informações importantes, tais como: corrente e tensão a que o eletricitista estará sujeito quando trabalhando na estrutura e ainda a elevação de potencial da estrutura. Numa segunda etapa, são calculados os potenciais de toque que estarão submetidos os eletricitistas no solo, em contato com a estrutura.

As correntes e tensões a que o eletricitista estará submetido são então confrontadas com os limites admissíveis pelas normas IEEE Std 80 [3], IEEE Std 1048 [4], NR-10 [1] e NBR-5410 [5] (ver tabela 1).

Tabela 1. Valores de Queda de Tensão e Corrente Máximas Permitidas

Tempo (s)	Corrente (mA)	Resistência do homem (Ω)		Queda de tensão máxima no homem (V)	
		na torre	no solo	na torre	no solo
0,1	496,5	500	1.000	248,3	496,5
0,25	314,0			157,0	314,0
0,5	222,0			111,0	222,0
1,0	157,0			78,5	157,0
2,0	111,0			55,5	111,0
3,0	90,6			45,3	90,6
Regime Permanente ¹	16,0			8,0	16,0
Regime Permanente ²	50,0			25,0	50,0

¹ referente aos limites de let-go.

² referente aos limites sem que haja fibrilação ventricular.

Serão apresentados resultados de simulações envolvendo diversas configurações de aterramento temporário, sendo: aterramento local (instalado apenas no local de trabalho), aterramento das estruturas adjacentes (instalado apenas nas estruturas laterais ao local de trabalho) e aterramento combinado (é a junção das duas configurações anteriores). As simulações computacionais foram realizadas, juntamente com a inclusão ou não do uso das chaves de aterramento instaladas nas subestações das extremidades da linha de transmissão sob intervenção.

II.1. Configurações das Linhas de Transmissão

Para a realização das simulações computacionais foram escolhidos dois modelos típicos de estruturas para linhas de transmissão com classes de tensões utilizadas em diversas concessionárias brasileiras. O trabalho foi desenvolvido utilizando-se um caso exemplo com uma LT 500 kV (sistema interferente) e uma LT 138 kV (sistema interferido; local de trabalho) paralela à primeira, em um mesmo corredor de transmissão.

Na linha de transmissão de 138 kV foi utilizada a estrutura L6 [6] e na linha de transmissão de 500 kV foi utilizada a estrutura SX [7], ambas com circuito simples, cujos dados utilizados nas simulações computacionais foram obtidos da concessionária local. A figura 7 apresenta a seção transversal do corredor de transmissão, com indicação da geometria das LT's utilizadas.

II.2. Configuração do Conjunto de Aterramento

Para o conjunto de aterramento foram consideradas informações fornecidas por um fabricante [8].

II.3. Modelo Computacional

Serão consideradas apenas linhas de transmissão com comprimento curto e médio, podendo ser representadas com precisão suficiente por parâmetros concentrados [9].

O comprimento da maior linha de transmissão simulada foi de 100 km, por ser suficientemente elevado, representativo e por possibilitar a análise e conclusões sobre os problemas considerados.

Foi considerada a resistividade do solo típica do Estado de Minas Gerais, cujos valores médios são de 2.400 Ω .m, mas que podem atingir até 20.000 Ω .m em algumas regiões [10].

Todas as distâncias entre os condutores tiveram como referência o centro da estrutura de 500 kV, conforme figura.

As linhas de transmissão foram modeladas considerando um circuito π à cada vão, sempre com comprimento de 500 metros. A rotina suporte do pacote de programas do ATP utilizada é a Line Constants, Cable Constants and Cable Parameters (LCC) específica para cálculo de parâmetros de linhas de transmissão, através da entrada dos dados da geometria das estruturas e dos cabos condutores e pára-raios utilizados.

Para determinação do valor da impedância interna da fonte foi considerado um nível de curto circuito de 25.980 MVA em 500 kV.

Foi considerada uma carga tipo RL para a circulação de um valor de corrente nominal de aproximadamente 1.000 A.

Em todas as estruturas da LT 138 kV os cabos pára-raios foram aterrados e foram considerados valores típicos de resistência de pé de torre igual a 30 Ω e de resistência equivalente da subestação igual 2 Ω .

A LT 500 kV foi modelada com cinco condutores, sendo dois cabos pára-raios e três fases. A LT 138 kV foi modelada com quatro condutores, sendo um cabo pára-raios e três fases. Em ambas as LT's foram considerados os acoplamentos capacitivo e indutivo, entre os condutores de cada LT e

entre cada condutor de uma LT com os condutores da outra LT. O modelo considera ainda a influência do solo nos acoplamentos.

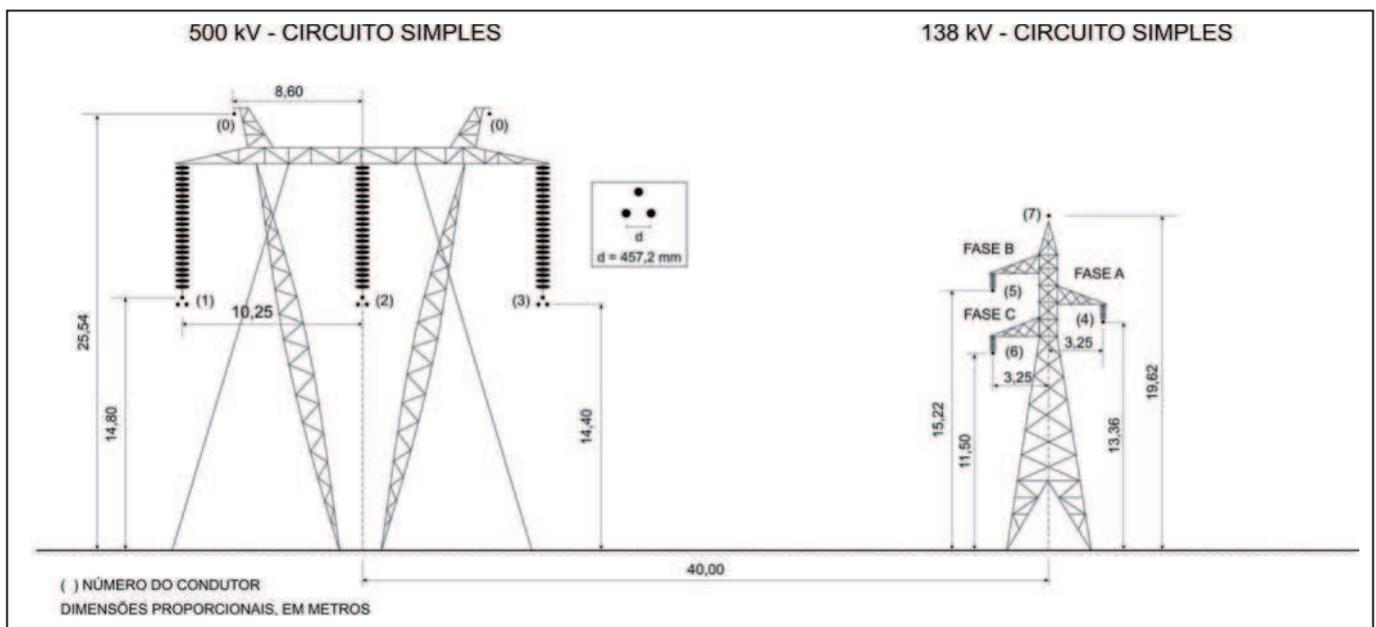
III. Aplicação da metodologia proposta

Os procedimentos de instalação do aterramento temporário se divergem entre as concessionárias e empresas usuárias, não existindo assim um procedimento padrão [11], [12], [13] e [14].

Essa divergência fica ainda mais evidente quando se trata de aterramento temporário para linhas de transmissão, devido a diversos fatores tais como: grande variedade de modelos de estruturas, diferentes experiências práticas das empresas, falta de atualização dos procedimentos de trabalho, falta de troca de experiências entre as empresas, poucas pesquisas sobre o assunto, dentre outros.

III.1. Simulações Computacionais

Os aterramentos temporários foram classificados quanto ao local de sua instalação, sendo: Aterramento Local (instalado apenas no local de trabalho), Aterramento das Estruturas Adjacentes (instalado apenas nas estruturas laterais ao local de trabalho) e Aterramento Combinado (é a junção das duas configurações anteriores). As simulações computacionais foram feitas seguindo esta classificação, juntamente com a inclusão ou não do uso das chaves de aterramento instaladas nas subestações das extremidades da linha de transmissão de 138 kV.



Configuração das LT's

Os principais resultados apresentados pelas simulações são:

- corrente no homem: corrente circulando no corpo do homem;
- tensão no homem: diferença de potencial que o homem está submetido;
- corrente na estrutura: parte da corrente que circula nos três cabos de aterramento, na estrutura e dissipa no solo através da resistência de pé de torre;
- elevação de potencial na estrutura: tensão devida a circulação da corrente na estrutura e resistência de pé de torre;
- tensão de toque: diferença entre a elevação de potencial na estrutura e o potencial no solo imediatamente abaixo dos pés do homem.

Todos os resultados estão apresentados em função da distância do local onde o aterramento temporário foi instalado, sendo a referência a fonte. Estes valores serão apresentados a seguir através de gráficos, a fim de facilitar a visualização e realizar a comparação entre as configurações de aterramento simuladas.

Os gráficos de corrente e tensão no homem são de grande interesse, pois, demonstram os valores que o electricista estará submetido quando estiver trabalhando na estrutura da linha de transmissão desenergizada. Estes valores serão comparados com os valores apresentados na tabela 1, sendo

as quedas de tensão e correntes máximas permitidas de 8 V na torre, 16 V no solo e 16 mA, todos referentes aos limites de let-go; 25 V na torre, 50 V no solo e 50 mA, todos referentes aos limites para que não que haja fibrilação ventricular.

Foram medidas também as correntes que circularam nos três cabos do aterramento temporário que, quando somadas, chegaram a atingir valores superiores a 56 A. Entretanto, foi observado que a maior parte desta corrente circula pelo cabo pára-raios, pois, esse possui menor impedância que a resistência de pé de torre, por onde circula a corrente na estrutura, mostrada nos gráficos. Esta é a corrente que é injetada no solo através da resistência de pé de torre, provocando a elevação de potencial da estrutura e, conseqüentemente, o surgimento das tensões de passo e toque no solo.

Nos gráficos que se seguem, todos os valores apresentados são valores eficazes.

Foram realizadas mais de 150 simulações computacionais, as quais estão resumidamente relacionadas na tabela 2, divididas em casos, que representam possíveis procedimentos utilizados pelas concessionárias para a realização do aterramento temporário. O objetivo é apresentar a melhor maneira de se realizar o aterramento temporário, proporcionando assim, maior segurança aos electricistas envolvidos nas intervenções.

Tabela 2. Simulações Computacionais Realizadas

Configuração	Caso	Sem chaves de aterramento	Com 02 chaves aterramento fechadas	Com chave próxima fonte fechada	Com chave próxima carga fechada
ATR Local ¹	1	X			
	2		X		
	3			X	
	4				X
ATR Estruturas Adjacentes	5	X			
	6		X		
	7			X	
	8				X
ATR Combinado	9	X			
	10		X		
	11			X	
	12				X

¹ Foram realizadas outras simulações com esta configuração que serão também discutidas neste trabalho.

III.1.1. Simulações com Aterramento Local

A figura 1 mostra gráficos com os valores encontrados nas simulações com Aterramento Local sem o uso de Chaves de Aterramento, utilizando duas Chaves de Aterramento fechadas em ambas as extremidades da linha de transmissão, nas subestações e utilizando apenas uma Chave de Aterramento, ora próximo à fonte, ora próximo à carga.

Nas análises da figura 1, observa-se que tanto os valores de tensão quanto de corrente no homem estão muito inferiores aos valores permitidos, de acordo com a tabela 1, independente da utilização ou não das chaves de aterramento.

Entretanto, nos Casos 1 e 2, na maioria dos pontos onde foram instalados os aterramentos temporários, estes valores são maiores quando estas chaves estão fechadas. Além disso, observa-se que há uma variação muito pequena destes valores ao longo da linha de transmissão quando as chaves de aterramento não são utilizadas, comprovando que os níveis de indução eletrostática encontrados independem da localização do aterramento temporário ao longo da linha, como [15]. Porém, a corrente que circula na estrutura apresenta valores suficientemente altos, pois, a elevação de potencial na estrutura é grande, com valores bastante superiores aos limites de segurança na própria estrutura, chegando a 40 V, sendo este valor próximo também do limite de segurança no solo, que é 50 V sem que haja fibrilação ventricular, concordando também com [15] e [16].

Figura 1. Valores encontrados nas Simulações com Aterramento Local

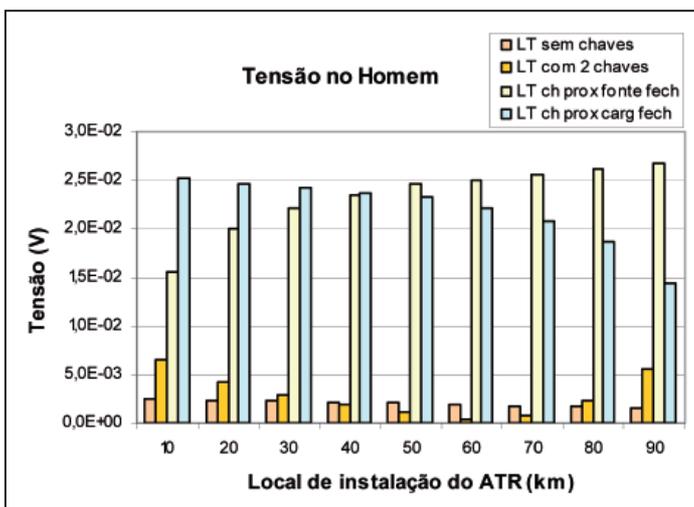


Fig. 1 - Caso 1

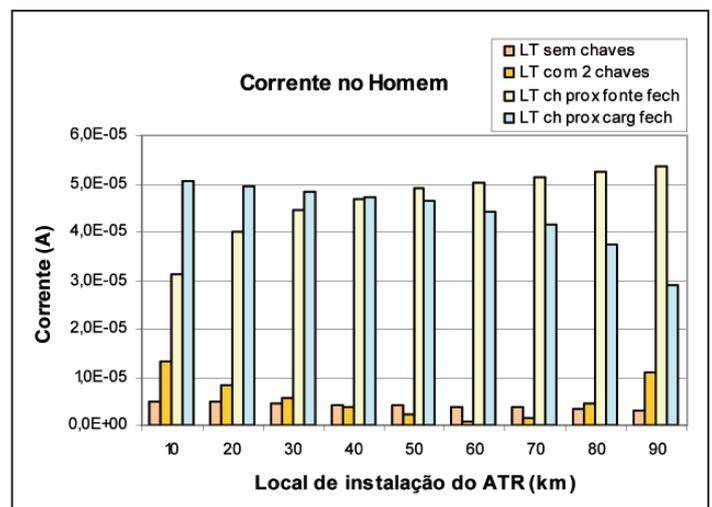


Fig. 1 - Caso 2

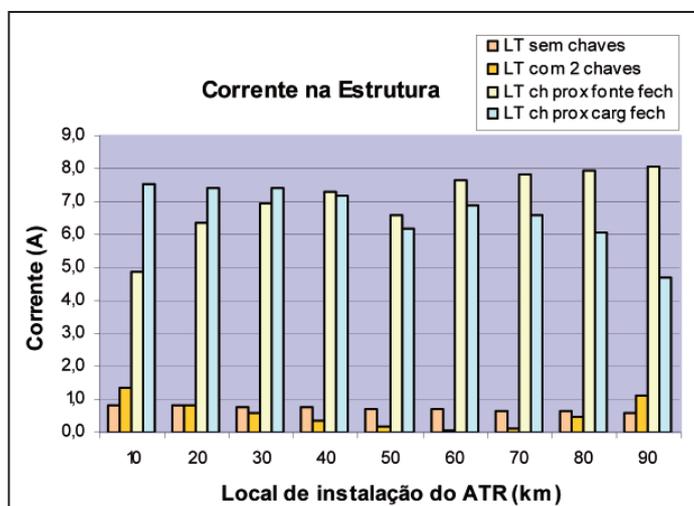


Fig. 1 - Caso 3

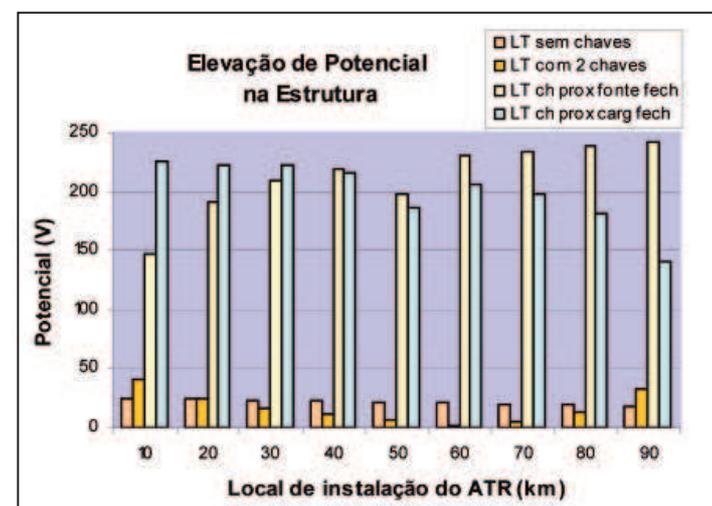


Fig. 1 - Caso 4

Nos Casos 3 e 4, observa-se que há um aumento progressivo da corrente na estrutura e, conseqüentemente na elevação de potencial na estrutura, à medida que o local onde o aterramento temporário está instalado se distancia da chave de aterramento fechada, tanto na fonte quando na carga. O maior valor é alcançado quando o aterramento está instalado próximo da chave de aterramento que está aberta, comprovando que os níveis de indução eletromagnética são máximos nesta configuração, assim como [15].

Isso acontece devido ao aumento do circuito fechado, formado pela chave de aterramento, linha de transmissão, aterramento temporário e retorno pela terra. Este circuito fechado ou laço é comumente conhecido como loop indutivo. Devido a este loop, observa-se que foram encontrados os valores mais elevados de corrente na estrutura e elevação de potencial na estrutura, das três configurações, chegando a 8 A e 242 V, respectivamente.

Assim, os resultados indicam que o uso de apenas uma Chave de Aterramento não é recomendado nesta configuração de instalação do aterramento temporário.

III.1.2. Simulações com Aterramento das Estruturas Adjacentes

A figura 2 mostra gráficos com os valores encontrados nas simulações com Aterramento das Estruturas Adjacentes ao local onde será realizada a intervenção sem o uso de Chaves de Aterramento, utilizando duas Chaves de Aterramento fechadas em ambas as extremidades da linha de

transmissão, nas subestações e utilizando apenas uma Chave de Aterramento, ora próximo à fonte, ora próximo à carga.

Nas análises da figura 2, observa-se que houve uma elevação, tanto dos valores de tensão quanto corrente no homem, comparando os Casos 1 e 2 com os Casos 5 e 6, porém, estes valores ainda estão muito inferiores aos valores permitidos, independente da utilização ou não das chaves de aterramento. Entretanto, nos casos 5 e 6, na maioria dos pontos onde foram instalados os aterramentos temporários, estes valores são maiores quando as chaves de aterramento não são usadas, tendo o comportamento contrário à configuração com o aterramento local, Casos 1 e 2. Porém, a variação dos valores nos Casos 5 e 6 apresenta o mesmo perfil dos Casos 1 e 2, coincidindo com [15]. Já as elevações de potenciais na estrutura nos Casos 5 e 6 são mais elevadas do que as tensões dos Casos 1 e 2, chegando a valores superiores a 50 V, concordando também com [15] e [16].

Nos Casos 7 e 8, houve um aumento elevado tanto dos valores de tensão quanto corrente no homem, ficando muito próximo ou excedendo aos valores permitidos (let-go), de acordo com a tabela 1, independente de qual Chave de Aterramento esteja fechada, a mais próxima ou a mais distante do aterramento temporário. Além disso, os valores da elevação de potencial na estrutura ficaram superiores a 195 V.

Assim como na configuração com o Aterramento Local, os resultados indicam que o uso de apenas uma Chave de Aterramento não é recomendado nesta configuração de instalação do aterramento temporário.

Figura 2. Valores encontrados nas Simulações com Aterramento das Estruturas Adjacentes

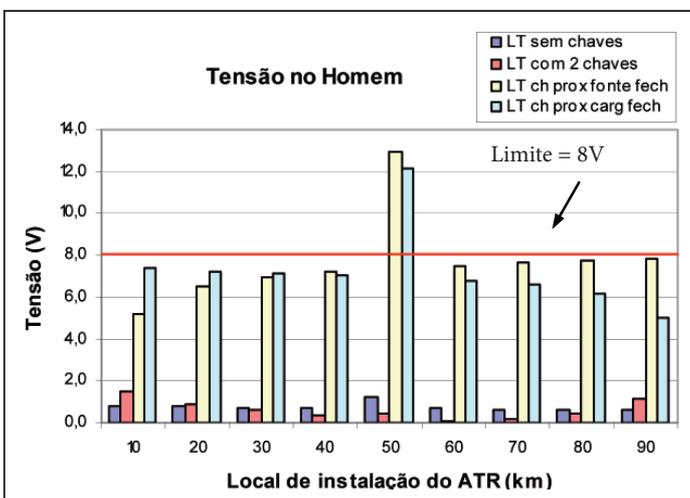


Fig. 2 - Caso 5

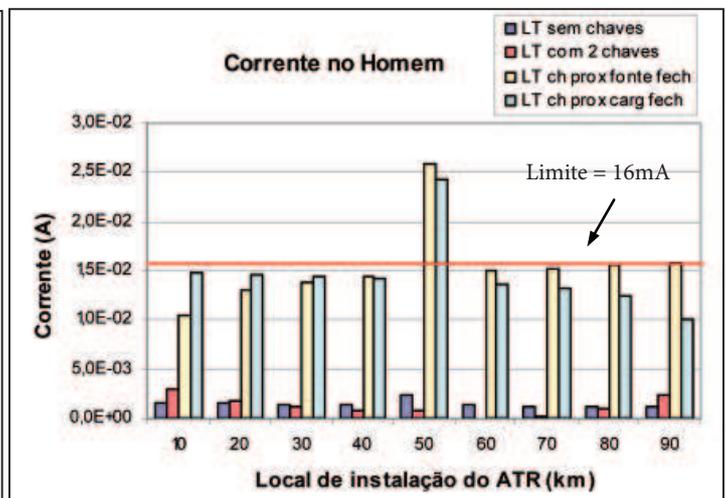


Fig. 2 - Caso 6

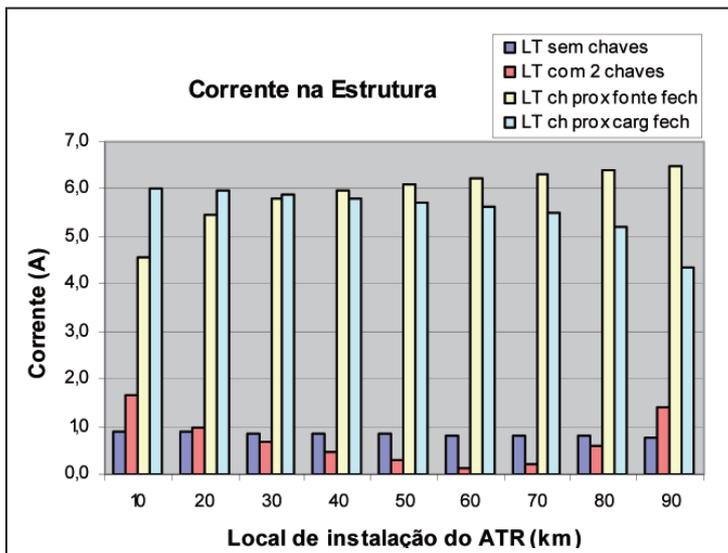


Fig 2 - Caso 7

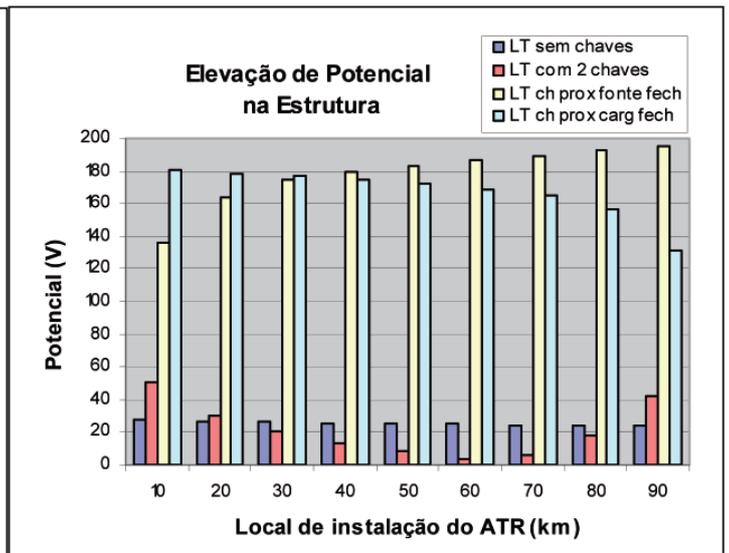


Fig. 2 - Caso 8

III.1.3. Simulações com Aterramento Combinado

A figura 3 mostra gráficos com os valores encontrados nas simulações com Aterramento Combinado sem o uso de Chaves de Aterramento, utilizando duas Chaves de Aterramento fechadas em

ambas as extremidades da linha de transmissão, nas subestações e utilizando apenas uma Chave de Aterramento, ora próximo à fonte, ora próximo à carga.

Figura 3. Valores encontrados nas Simulações com Aterramento Combinado

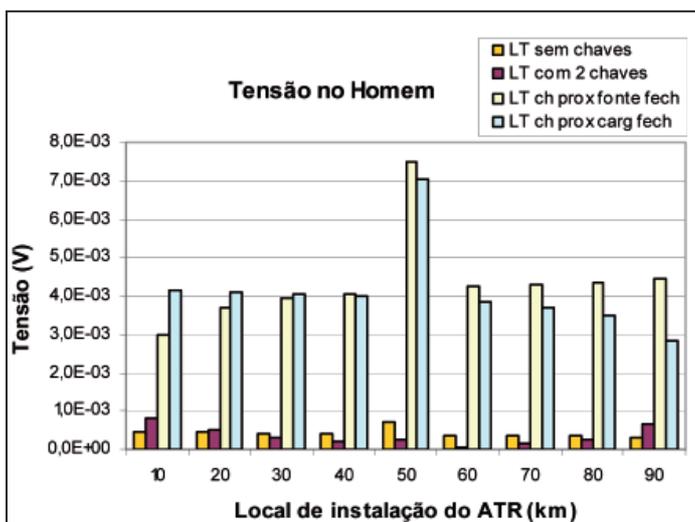


Fig. 3 - Caso 9

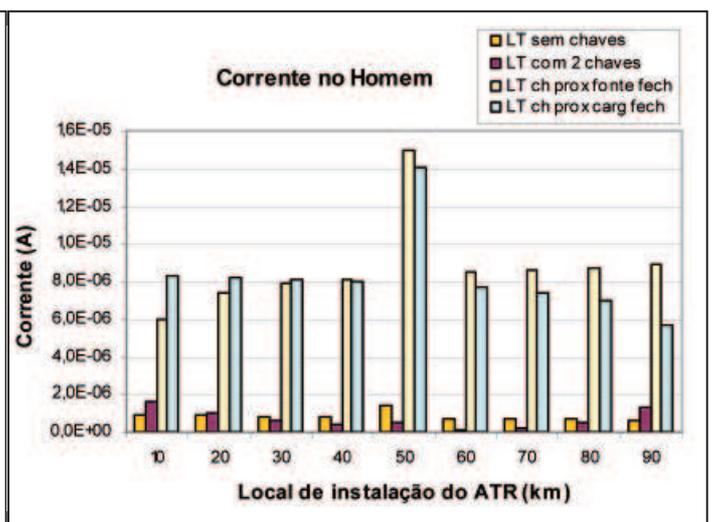


Fig. 3 - Caso 10

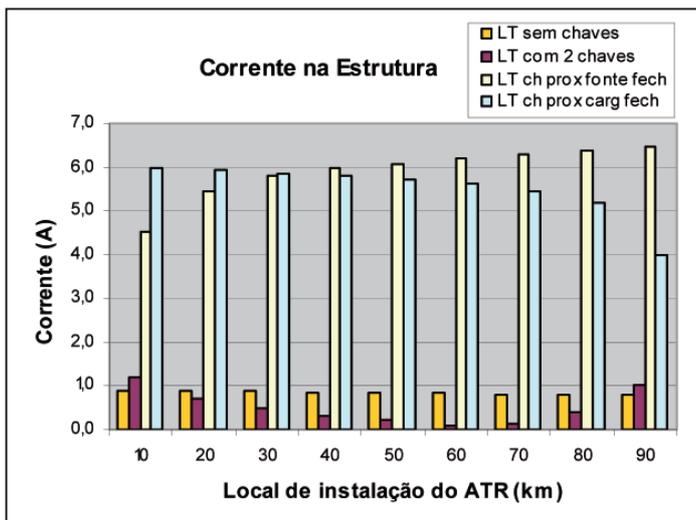


Fig. 3 - Caso 11

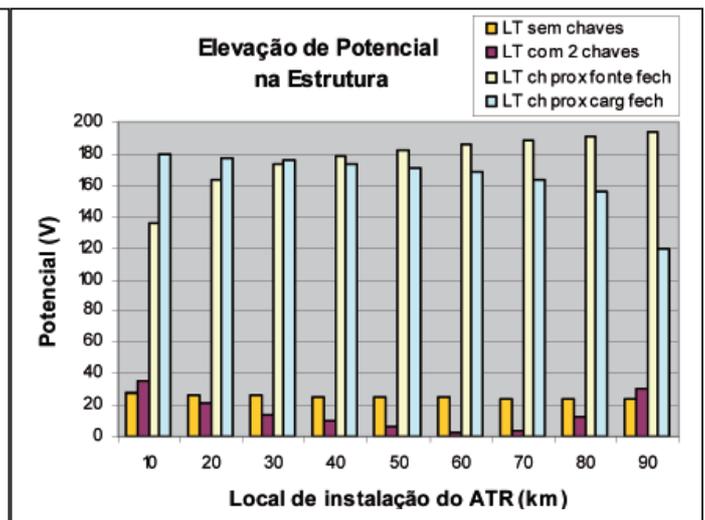


Fig. 3 - Caso 12

Nas análises da figura 3, observa-se que tanto os valores de tensão quanto corrente no homem estão muito inferiores aos valores permitidos, de acordo com a tabela 1, independente da utilização ou não das chaves de aterramento, assim como na configuração com Aterramento Local.

Entretanto, os Casos 9 e 10 tiveram o mesmo comportamento dos Casos 5 e 6, ou seja, na maioria dos pontos onde foram instalados os aterramentos temporários, os valores de tensão e corrente no homem são maiores quando as chaves de aterramento não são usadas, tendo o comportamento contrário à configuração com o aterramento local, Casos 1 e 2. As tensões medidas na estrutura também têm valores muito próximos dos valores encontrados nos Casos 5 e 6.

Quanto aos valores de elevação de potencial na estrutura, os Casos 11 e 12 foram semelhantes aos Casos 7 e 8, chegando a mais de 190 V.

Assim como nas configurações anteriores, os resultados indicam que o uso de apenas uma Chave de Aterramento não é recomendado nesta configuração de instalação do aterramento temporário.

III.2. Cálculo do Potenciais de Toque

III.2.1. Sistema de Aterramento Permanente

O comportamento do sistema de aterramento permanente (sistema de aterramento das estruturas das LT's) em frequência industrial é um assunto conhecido e existem diversas ferramentas computacionais para cálculos e análises, além de farta bibliografia que trata deste assunto.

Este trabalho não tem o estudo do sistema de aterramento permanente como objetivo. Entretanto, a fim de determinar o risco que os eletricitistas que estão no solo estarão submetidos durante todo o tempo gasto na intervenção, o cálculo da distribuição de potenciais no solo nas proximidades da estrutura (local de trabalho), envolvendo, portanto, a topologia do sistema de aterramento permanente, torna-se importante. O eletricitista estará sujeito à diferença de potencial entre a estrutura e o solo onde ele estiver, que é a Tensão de Toque. O valor do potencial de toque será sempre um pouco inferior ao valor da elevação de potencial na estrutura.

A elevação de potencial no sistema de aterramento permanente, em baixas frequências, é basicamente função da resistência de aterramento e da corrente que circula no mesmo [17]. Para o cálculo da tensão de toque (local de trabalho), será usada uma configuração de sistema de aterramento permanente típica utilizado nas estruturas das linhas de transmissão.

A figura 4 ilustra um arranjo típico de um sistema de aterramento permanente para estruturas metálicas de linhas de transmissão de 138 kV, utilizado pela concessionária local, com fios contrapesos dispostos radialmente e interligados à estrutura. Os contrapesos L2 e L3 são instalados apenas em estruturas localizadas em áreas urbanas [18], sendo a minoria quando comparada com toda a extensão da linha. Assim, esses não serão utilizados, já que isto corresponde a uma situação de maior risco no que concerne à questão dos potenciais de toque resultantes.

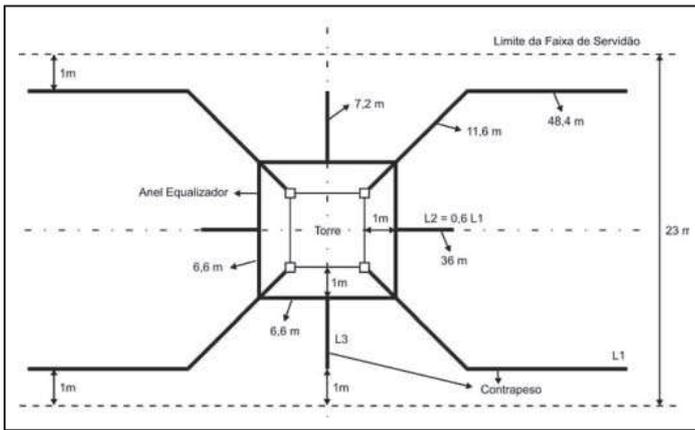


Figura 4. Arranjo típico de um sistema de aterramento permanente de estruturas metálicas de 138 kV

Será levado em consideração apenas o valor da corrente injetada na estrutura no local de trabalho, devida à indução na LT de 138 kV provocada pela LT de 500 kV, na configuração com Aterramento Local sem o uso de Chaves de Aterramento, onde foi obtido o maior valor. Isto corresponde ao Caso 1, sendo a corrente injetada no aterramento igual a 0,83 A. A média dos valores desta corrente é de 0,72 A e o desvio padrão é de 0,074.

Além disso, serão desprezadas as contribuições dos trechos de contrapeso que estejam suficientemente distantes do ponto onde se situa o trabalhador. A simplificação do arranjo é mostrada na figura 5.

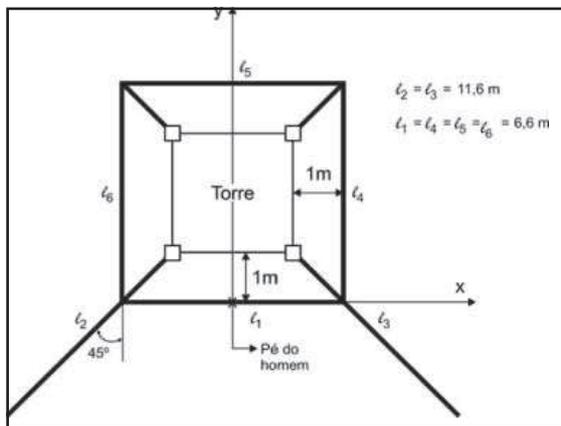


Figura 5. Arranjo simplificado de um sistema de aterramento permanente utilizado para cálculo da distribuição de potenciais no solo

III.2.2. Contrapeso

Os contrapesos são cabos enterrados no solo a uma profundidade variável de 20 centímetros a 1 metro, conectados aos pés ou base das estruturas das linhas de transmissão [17].

A profundidade média da primeira camada de resistividade do solo no Estado de Minas Gerais é

de 6,4 metros [17]. Em situações com esta é razoável considerar-se a resistividade do solo constante para o cálculo da distribuição de potenciais no solo nas proximidades da estrutura (local de trabalho), desprezando-se a influência da segunda camada do solo. O valor da resistividade do solo será o mesmo utilizado nas demais simulações, 2.400 Ωm.

III.2.3. Tensão de Toque

A Tensão de Toque será a diferença entre elevação de potencial na estrutura e o potencial no solo imediatamente abaixo dos pés do homem. O potencial no solo devido a um condutor de comprimento l , transportando uma corrente I , num solo de resistividade r , é dado pela equação 1 [19]. Esta equação se aplica a cada trecho do contrapeso, sendo o resultado final no ponto de interesse (figuras 5 e 6) obtido por superposição de efeitos.

$$U_{(x,y)} = \frac{I_{l(n)}\rho}{2\pi d} \log \frac{\left[\left(\frac{x+l_{(n)}}{2} \right)^2 + y^2 + d^2 \right]^{1/2} + x + l_{(n)}/2}{\left[\left(\frac{x-l_{(n)}}{2} \right)^2 + y^2 + d^2 \right]^{1/2} + x - l_{(n)}/2} \quad (1)$$

Onde:

$U_{(x,y)}$ = tensão no pé do electricista devido a cada trecho /
 $I_{l(n)}$ = corrente no trecho de contrapeso dada conforme equação 2

ρ = resistividade do solo,

$l_{(n)}$ = comprimento do trecho do contrapeso enterrado,

x = distância longitudinal do centro do contrapeso ao pé do homem

y = distância horizontal do centro do contrapeso ao pé do homem

d = profundidade do contrapeso, 0,5 m

Foi considerado que a corrente injetada na estrutura se distribui uniformemente no anel equalizador e contrapeso, e proporcionalmente ao comprimento deste, conforme equação 2.

$$I_{l(n)} = \frac{I_{torre} \times l_{(n)}}{l} \quad (2)$$

Onde:

I_{torre} = corrente na estrutura

$I_{l(n)}$ = corrente proporcional a cada trecho de contrapeso considerado

$l_{(n)}$ = comprimento do trecho do contrapeso enterrado

n = número do contrapeso conforme figura 5, sendo 1 a 6

l = comprimento total do contrapeso

A Tensão de Toque é dada pela equação (3):

$$V_{toque} = V_{torre} - \sum U_{(x,y)} \quad (3)$$

Onde:

V_{torre} = elevação de potencial na estrutura

$U_{(x,y)}$ = tensão no pé do electricista devido a cada trecho $l_{(n)}$

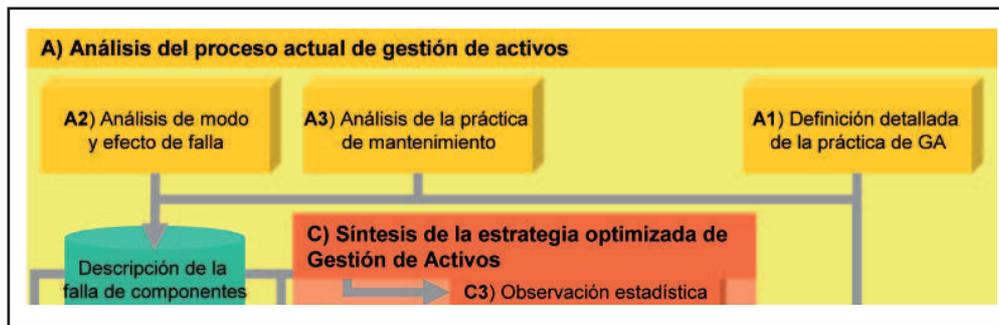


Figura 6. Arranjo de cada contrapeso para cálculo da distribuição de potenciais no solo

A tabela 3 apresenta os valores calculados de tensão de toque em regiões normais e durante um curto-circuito na LT 500 kV, e permite uma comparação dos valores referentes aos limites de let-go e aos limites sem que haja fibrilação ventricular.

O valor encontrado para Tensão de Toque, devido à indução em regiões normais, é considerado muito perigoso, por ser maior que o dobro do valor permitido, visto que a diferença máxima de potencial que o homem pode ser submetido é de 16 V, em regime permanente, utilizando o limite de let-go. Por outro lado, utilizando o limite de corrente sem que haja fibrilação ventricular, o valor encontrado não é perigoso, pois está abaixo do valor permitido de 50 V.

Quanto ao valor encontrado para a Tensão de Toque devido ao curto-circuito, não é considerado perigoso, quando o tempo de atuação da proteção for 0,1 s. Entretanto, para tempos maiores de atuação da proteção, os valores encontrados para a Tensão de Toque tornam-se perigosos por serem maiores que os limites permitidos, conforme tabela 1.

Comparando os valores encontrados, utilizando como referência o limite de let-go, as Tensões de Toque provocadas pela indução, em regime permanente, em regiões normais são mais perigosas que as tensões provocadas por um curto-cir-

cuito, pois apresentaram valores muito superiores ao permitido. Por outro lado, utilizando como referência o limite sem que haja fibrilação ventricular, tanto as Tensões de Toque provocadas pela indução em regime permanente quanto as Tensões de Toque provocadas por um curto-circuito não são perigosas.

IV. Conclusões

Através das análises realizadas, ficou comprovada a importância e a necessidade do uso do aterramento temporário nas intervenções em linhas de transmissão desenergizadas.

Através das simulações computacionais das configurações dos aterramentos temporários de acordo com o local de sua instalação, pôde-se verificar qual é o procedimento mais adequado e que proporciona maior proteção aos eletricitistas, tanto os que estão no solo, quanto os que estão na estrutura sob intervenção.

Pôde-se concluir que as chaves de aterramento nos terminais da linha são desnecessárias para o aterramento temporário para linhas de transmissão de alta indução (longos trechos de paralelismo), sendo que seu uso reduz a segurança dos eletricitistas no local de trabalho.

Tabela 3. Valores Calculados de Tensão de Toque

Condição Operativa	Corrente na Estrutura (A)	Elevação de Potencial na Estrutura (V)	Tensão de Toque (V)	Queda de tensão máxima permitida no homem no solo (V)
Normal	0,83 ³	40,2	33,0	16,0 ¹ / 50,0 ²
Curto-circuito	16,6	496,9	361,0	496,5 (0,1 s) / 314,0 (0,25 s)

¹ referente ao limite de let-go.

² referente ao limite sem que haja fibrilação ventricular.

Entretanto, para linhas com pequenos comprimentos de paralelismo, o uso das chaves de aterramento deve ser analisado, pois neste caso, seu uso não reduz segurança e, no caso de uma energização acidental, garantirá a proteção ao eletricitista.

Os resultados permitem concluir que a utilização do aterramento temporário somente na estrutura em manutenção apresenta as condições de maior segurança para o eletricitista. Os potenciais e correntes resultantes quando do uso deste procedimento estão dentro dos limites de normas quando o critério for o risco de fibrilação ventricular, ultrapassando, no entanto, o limite de let-go.

Dependendo dos critérios adotados pela concessionária, haverá a necessidade de utilização de medidas de segurança adicionais na região próxima à estrutura em manutenção. A utilização de um piso isolante evitará a exposição do eletricitista a uma situação que ultrapasse o nível de corrente let-go.

Conforme discutido, as concessionárias brasileiras não possuem critérios e práticas uniformes em relação ao aterramento temporário de linhas de transmissão, e de forma ainda mais negativa, algumas práticas aumentam o risco a que se expõe o eletricitista.

Assim, há necessidade de se concentrarem esforços no sentido de uniformizar essas práticas e eventualmente normalizá-las.

V. Referências

[1] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria n. 598, de 7 de Dezembro de 2004. NR-10 - Norma Regulamentadora n. 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília: [S.n.], 2004.

[2] MEYER, W. Scott; LIU, Tsu-huei . Theory Book - Electromagnetic Transients Program (EMTP). Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, USA. Jul. 1995.

[3] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 80-2000: IEEE Guide for Safety in Substation Grounding. [S.l.], 2000.

[4] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 1048-2003. IEEE Guide for Protective Grounding of Power Lines. [S.l.], 2003.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 1997.

[6] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. 30.000 - OT/PL3-2462 - Características das Estruturas L6, H6L7, L3A, H3L4A. Minas Gerais: CEMIG, 1986.

[7] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. 30.000 - ER/LT-007 - Estruturas SX, SY, MX, LX, LY, AS1, BS1, BT1 500 kV Características. Minas Gerais: CEMIG, 1998.

[8] RITZ DO BRASIL S.A. Catálogo de Produtos. Dez. 2007.

[9] STEVENSON, William D. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. 2. ed. São Paulo: Editora Mc Graw-Hill, 1986. 458 p.

[10] CARVALHO, André M. et al. Tecnologias para Diminuir Desligamentos de Linhas de Transmissão. Eletricidade Moderna, p.340-351, Abr. 2000.

[11] FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., - DLTR.O - Divisão de Linhas de Transmissão. Aterramento para Manutenção em Linhas de Transmissão e Barramentos de Subestações. Rio de Janeiro: FURNAS, 2008.

[12] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. 30.000 - TR/MN - 168a - Recomendação para Aterramento Temporário em Linhas de 230 a 500 kV. Minas Gerais: CEMIG, 2003b.

[13] COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA. TRL - Divisão de Linhas Aéreas e Subterrâneas. Aterramento Temporário de Linhas de Transmissão e Barramentos Aéreos de Subestações. São Paulo: CTEEP, 2002.

[14] MOUSA, Abdul M. New Grounding Procedures for Work on De-Energized Lines Eliminate the Need for Ground Switches. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, [S.l.], v. PAS-101, n.8, p.2668-2680, Aug. 1982.

[15] MOUSA, Abdul M. New Grounding Procedures for Work on De-Energized Lines Eliminate the Need for Ground Switches. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, [S.l.], v. PAS-101, n.8, p.2668-2680, Aug. 1982.

[16] ATWATER, P. L.; DEHAAN, J. M.; ROMERO, L. Utilities Field Test Safety Grounds. Transmission & Distribution World, [S.l.], p.44-56, Nov. 2000.

[17] NOGUEIRA, Paulo José Clebicar. Influência da Estratificação do Solo na Impedância Impulsiva de Aterramentos de Linhas de Transmissão. 2002. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

[18] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. 30.000 - COPDEN-306 Revisão "e" - Instrução de Aterramento para Suportes de Linhas de Transmissão. Minas Gerais: CEMIG, 2002.

[19] SUNDE, Erling Ditle. Earth Conduction Effects in Transmission Systems. 1. ed. New York: Dover Publications, Inc., 1968. 370 p.