



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO - III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT**

**AValiação DA EXPOSIÇÃO DE TRABALHADORES DE LINHA VIVA A CAMPOS ELÉTRICOS E  
MAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500 KV DA CHESF – MODELAGEM COMPUTACIONAL E  
MEDIÇÕES DE CAMPO**

<b>Luis Adriano M. C. Domingues (*)</b> CEPEL	<b>Carlos Ruy Nunez Barbosa</b> CEPEL	<b>Athanasio Mpalantinos Neto</b> CEPEL
<b>Rafael M. da Cruz Silva</b> CEPEL	<b>Bartolomeu Neves Cordeiro</b> CHESF	<b>Alexandre Manoel de Medeiros</b> CHESF
<b>Ubiratan José de Assis Fonseca</b> CHESF		<b>José Carlos Souza Lins</b> CHESF

**RESUMO**

A prática de manutenção de linha viva em de linhas de transmissão (LT) com torres de concreto requer cuidados e detalhes especiais, uma vez que os procedimentos usuais foram desenvolvidos, na sua maioria, em estruturas de aço, nas quais as condições mecânicas e elétricas são significativamente diferentes daquelas existentes em torres de concreto. A necessidade de colocar elementos de apoio aos profissionais de manutenção para garantir condições de segurança na subida e permanência nas torres, como escadas e pedaleiras metálicas, exige a verificação de condições de exposição ao campo elétrico e potenciais induzidos, de forma a garantir a segurança operacional das equipes. No caso particular das torres de concreto devido a sua geometria (silhueta) e a posição dos eletricitistas nestas, faz com que estes fiquem mais expostos ao campo elétrico do que nas torres metálicas.

Baseadas numa análise da distribuição de campos eletromagnéticos nas estruturas foram estabelecidas algumas soluções e procedimentos de manutenção visando eliminar situações de risco. Estas soluções foram testadas em campo em condições reais de trabalho, quando toda a rotina de manutenção foi efetuada em boas condições, demonstrando a sua eficácia.

Neste informe técnico são apresentadas as medições realizadas, as análises desenvolvidas e são descritas as soluções técnicas e os procedimentos de manutenção desenvolvidos pelo CEPEL e CHESF para LT de 500 kV de concreto da CHESF.

**PALAVRAS-CHAVE**

Campos elétricos e magnéticos, linhas de transmissão, manutenção, exposição

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O Sistema Elétrico Brasileiro utiliza principalmente a geração hidrelétrica, tendo como característica distintiva ter grandes unidades de geração de energia localizadas a distâncias consideráveis dos centros de carga principais. Isto exige um sistema de transmissão extenso, com linhas de transmissão muito longas, conectando a geração aos centros de carga principais (grandes cidades e regiões industriais).

Os problemas associados com a expansão do sistema de transmissão (questões ambientais e econômicas) levaram a uma operação do sistema perto das condições de carga máxima a maior parte do tempo. Neste cenário e operação a manutenção das LT se torna crítica, e o desligamento de linhas é reduzido ao mínimo, requerendo que técnicas da manutenção de linha viva sejam aplicadas.

A manutenção em linha viva implica o deslocamento de eletricitistas ao longo da estrutura, e o seu posicionamento em pontos específicos para execução de suas tarefas, como a substituição de isoladores, monitoramento de atividades, etc. Na grande maioria dos casos, as estruturas das LT são feitas de aço, o que, para o trabalho em linha viva, resulta em uma considerável blindagem do campo eletrostático, já que a estrutura de aço é perfeitamente aterrada (1).

A utilização de estruturas de concreto em LT de 500 kV cria uma nova situação, com vários aspectos diferentes, implicando tanto em risco de choque elétrico como a situações de exposição a campos eletromagnéticos (2), necessitando uma avaliação minuciosa do problema, para desenvolver procedimentos adequados da manutenção em linha viva.

## 2.0 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A estrutura de concreto da LT tem dois mastros principais, e uma viga transversal e outra auxiliar, como mostrado na Figura 1. O acesso de eletricitistas à vizinhança dos condutores, isoladores e ferragens, onde é realizado o trabalho de manutenção, é feito pelos mastros até a viga transversal. Devido ao pequeno efeito protetor fornecido pela estrutura de concreto, quando em comparação com estruturas de aço convencionais, há regiões de campo elétrico intenso em especial próximo aos condutores de fase, necessitando a realização de alguns estudos especiais.

Adicionalmente, devido à considerável dificuldade neste procedimento de ascensão existem, aparafusados ao mastro, pedaleiras de aço, que tem a função de degraus, assim como escadas de aço instaladas perto do topo do mastro, a Figura 2. Contudo, a introdução de elementos metálicos na estrutura, criou alguns novos problemas, relacionados a riscos de choque elétricos.



Figura 1 – Estrutura de Concreto da LT

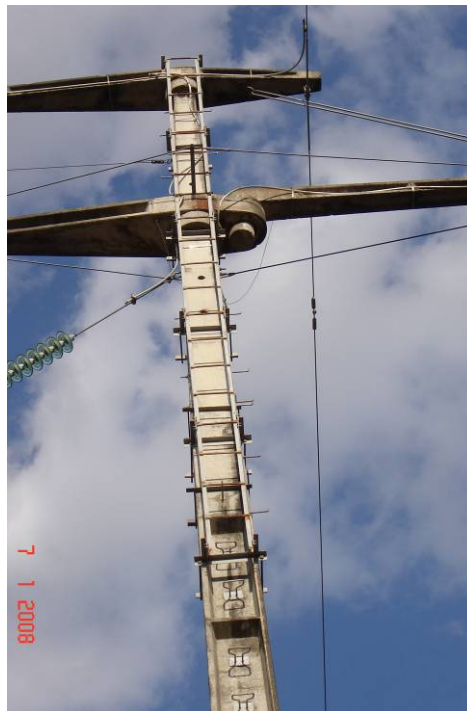


Figura 2 – Escada de aço e pedaleiras

Inicialmente, quando essas escadas foram instaladas, algumas foram pintadas com uma cobertura protetora, para resistir melhor à exposição às condições de tempo adversas. Contudo isto criou uma multiplicidade indesejada de configurações elétricas, cada uma com os seus problemas específicos:

- as pedaleiras usadas como degraus, colocadas ao longo dos mastros não são aterradas e também não são interligadas; se comportando como eletrodos flutuantes, mas como são de pequenas dimensões, não apresentam problemas de risco de choque importantes;
- as escadas de aço, quando pintadas, são isoladas ao contato com os eletricitistas; contudo a experiência de campo mostrou que esta situação produziu os piores choques elétricos, gerando alguns acidentes. A

razão disto será discutida na seqüência. Além disso, com o envelhecimento que resulta da exposição a condições de tempo adversas, chuva, sol, variações de temperatura, etc., a pintura pode ser danificada permitindo contato com a estrutura metálica, modificando as características do problema elétrico, que é indesejável para o controle da segurança;

- as escadas de aço galvanizado, sem pintura, podem ser aterradas ou não; a situação onde a escada não é aterrada é especialmente perigosa, já que o eletricitista pode entrar em contato com algum cabo de serviço aterrado, e a capacitância da escada (estrutura metálica de 8 m por 1 m) descarregará pelo eletricitista, uma corrente que pode alcançar intensidades muito perigosas, podendo causar acidentes graves. Quando as escadas são solidamente aterradas, a corrente máxima possível é a descarga do corpo humano para a terra, que pode gerar uma corrente na faixa de desconforto, mas não usualmente perigosa.

Na Figura 3 é apresentado o modelo geral de corrente de descarga elétrica quando o eletricitista está em situação de trabalho perto dos condutores das fases (1). Como regra geral, a descarga de uma pessoa a um objeto aterrado é limitada pela capacitância da pessoa, mas a descarga de um objeto pelo corpo humano pode ser muito perigosa desde que, dependendo do tamanho de objeto, a sua capacitância pode ser expressiva. No problema em estudo as escadas têm uma dimensão aproximada de 8 m por 1 m, que é o suficiente para produzir correntes de contato muito perigosas.

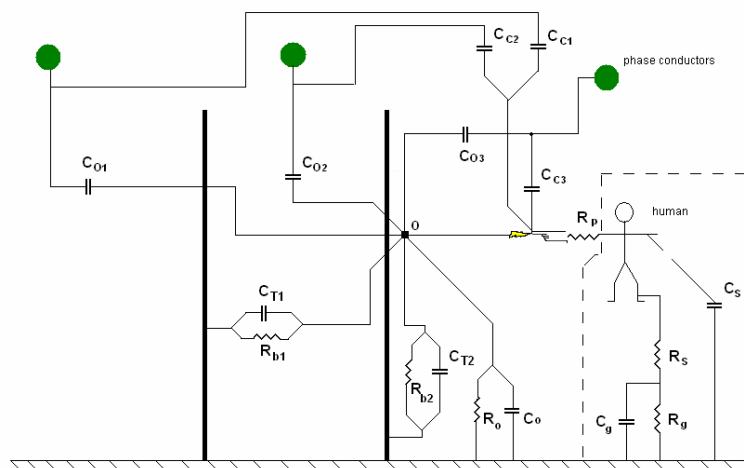


Figura 3 - Modelo geral para corrente de contato

### 3.0 - ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO NA TORRE DE CONCRETO

Inicialmente uma análise geral do problema foi executada, onde os problemas de indução devido ao campo magnético foram descartados, desde que não há nenhuma situação real onde a indução magnética possa ser relevante. Portanto a análise subsequente foi concentrada na indução de campo elétrico.

A simulação da distribuição de campo elétrico na estrutura de concreto foi executada usando uma versão de alta precisão do programa de computador baseado no método de simulação de cargas desenvolvido pelo CEPEL (3-4). Este método é uma variação de método dos elementos de contorno (5-10), que substitui a verdadeira distribuição de carga superficial em eletrodos metálicos por uma distribuição de carga discreta, dentro destes eletrodos, e atribui valores de potenciais elétricos fixos em pontos convenientemente escolhidos na sua superfície (condições de contorno).

Na simulação todos os elementos relevantes foram representados com o detalhe necessário para assegurar a precisão da simulação: condutores das fases e pára-raios, armação de concreto, ferragens, escadas de aço, pedaleiras, etc.

A avaliação da exatidão da simulação foi executada comparando-se os valores de campo elétrico calculados e medidos. Alguns pontos especiais foram selecionados na estrutura e na sua vizinhança, e a intensidade de campo elétrico naqueles pontos foi medida durante uma campanha de medição – Figura 4. Então os correspondentes valores calculados, obtidos com o modelo computacional, foram comparados, e a exatidão da simulação foi assim

avaliada – Figura 5. Adicionalmente o potencial induzido, em vários pontos onde os eletricitistas circulam, foi medido com uma ponta de prova de alta impedância e um voltímetro blindado, e estes valores também foram comparados com valores calculados.



Figura 4 - Medição de campo elétrico em pontos especiais usados para calibrar o modelo computacional.

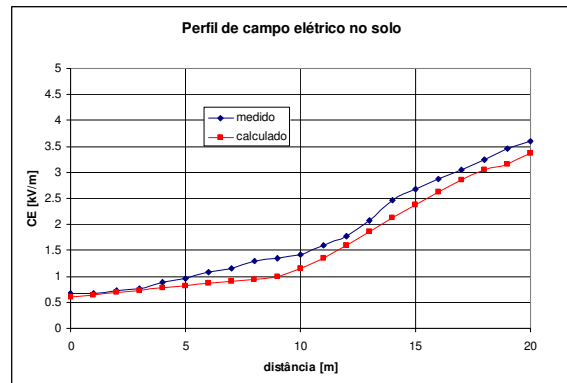
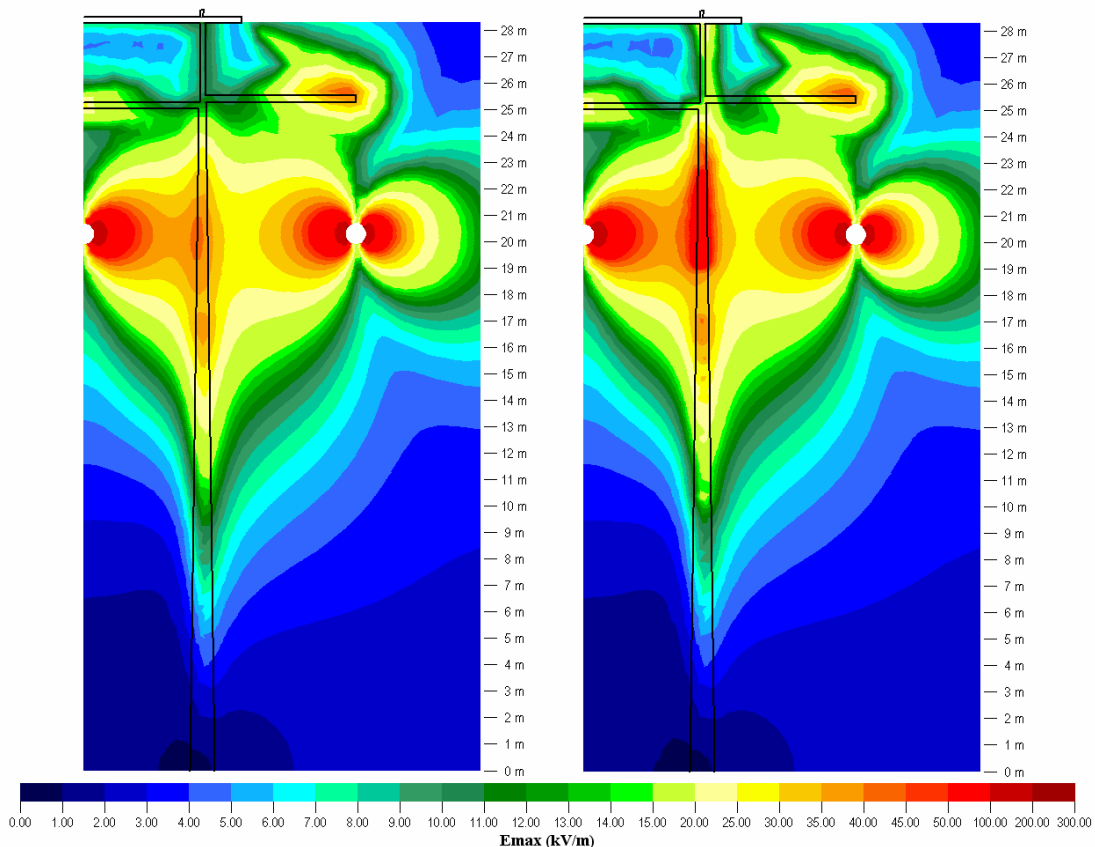


Figura 5 – Comparação dos valores de campo elétrico calculado e medido ao longo de um perfil ao nível do solo.

Como a precisão da simulação nestas posições de referência foi considerada bastante boa, especialmente na região de campo elétrico elevado (erro máximo menor que 5 %), onde o trabalho de manutenção é principalmente realizado, o modelo computacional foi considerado adequado para o objetivo deste trabalho.

A distribuição de campo elétrico na estrutura pode ser visualizada na Figura 6. A figura 6a mostra a distribuição de campo no caso onde a escada não está aterrada (eletrodo flutuante). A figura 6b mostra o caso onde a escada está aterrada. Pode ser observado que os valores de campo são mais altos quando a escada está aterrada, contudo, por razões de segurança, é essencial que a escada seja solidamente aterrada. Pode-se observar que os altos valores de campo perto do topo da torre e condutores de fase estão acima das recomendações para exposição (2,11), assim como constituem uma fonte importante de correntes de contato induzidas.



(a) (b)  
 Figura 6 – Intensidade de Campo. Elétrico na estrutura de concreto da LT de 500 kV, diferença entre a escada pintada, Figura 6a e a escada galvanizada aterrada Figura 6b.

Baseado nos níveis de intensidade de campo medidos e calculados, uma análise completa dos procedimentos de manutenção de linha vivos foi executada, como detalhado a seguir.

### 3.1 Problemas de segurança

Em regiões de campo intenso é necessário muita atenção para o fato de que o contato entre as pessoas e objetos metálicos pode ser uma fonte de risco de choque elétrico. Quando a pessoa e o objeto estão em potenciais diferentes, há uma descarga capacitiva no momento do contato. Depois daquela corrente de descarga inicial, se ambos os corpos estiverem no mesmo potencial, não há nenhuma corrente de contato permanente. Se houver uma diferença potencial, em consequência de um dos corpos estar isolado, uma corrente elétrica permanente flui pela pessoa. Neste último caso, há dois tipos de situações extremas:

- Se o objeto for perfeitamente aterrado, e a pessoa está perfeitamente isolada, a corrente de contato é governada pela capacitância da pessoa, descarregando para terra. Embaixo de uma LT, com campos variando de 5 kV/m a 10 kV/m, esta corrente pode chegar a valores na zona de desconforto (1mA a 5mA). Entretanto na região de campo intenso, perto do topo da estrutura, os valores de corrente podem ser bastante perigosos – maiores que 5mA (50 % do nível de “let-go”).
- Se o objeto for isolado, e a pessoa está aterrada, a corrente de contato é governada pela capacitância do objeto, descarregando para terra. Como o objeto pode ter grandes dimensões e assim, uma alta capacitância, os valores daquelas correntes podem ser extremamente altos, alcançando os níveis de desconforto, dor e risco de morte. Por essa razão grandes objetos metálicos sempre devem ser solidamente aterrados.

O caso em que a escada é pintada apresenta uma peculiaridade, desde que o revestimento protetor impede a equalização do potencial elétrico entre o corpo humano e a estrutura metálica. Sob uma diferença potencial induzida, a mão e a escada constituem um capacitor com um dielétrico fino (a pintura). Em regiões de campo intenso, esta situação origina uma corrente alta, muito dolorosa, que pode levar a acidentes graves.

### 3.2 Situações de Exposição

A execução do trabalho de manutenção em linha viva demanda o deslocamento e o posicionamento de eletricitas ao longo e no topo de torre. Em várias destes posicionamentos o campo elétrico está muito acima dos níveis recomendados para exposição ocupacional. Por isso, uma análise da distribuição de campo foi desenvolvida para identificar caminhos preferenciais e posicionamentos dos eletricitas para evitar a exposição acima de níveis recomendados.

Na Figura 7 são identificadas algumas trajetórias alternativas para o deslocamento dos eletricitas, e na Figura 8 o correspondente cálculo dos valores é apresentado em comparação ao campo máximo proposto para exposição ocupacional, segundo a Norma Brasileira (11) baseada nas orientações da OMS que utiliza as os limites e restrições definidas pela ICNIRP (2).

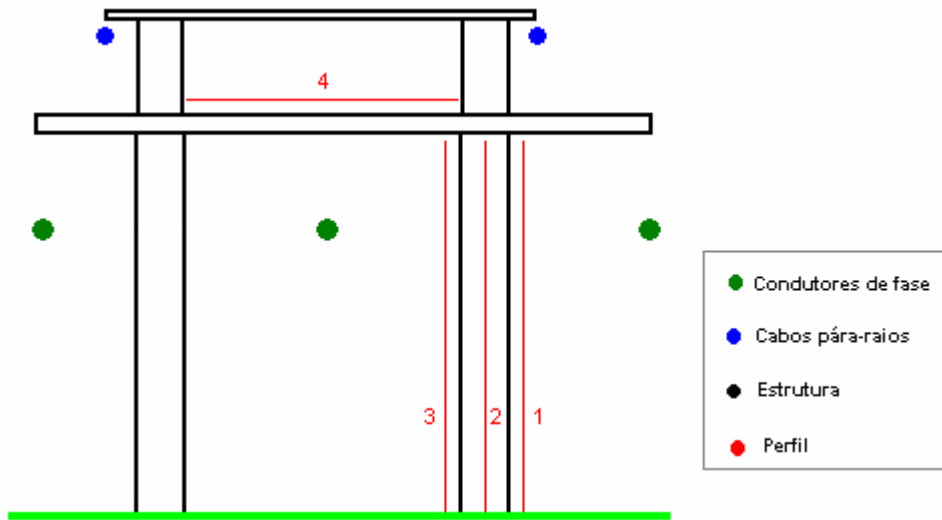


Figura 7 – Identificação de trajetórias para o deslocamento dos eletricitistas.

A análise da intensidade de campo ao longo dos perfis selecionados é útil para determinar as melhores trajetórias para o deslocamento dos eletricitistas, bem como o seu posicionamento ideal na torre para desenvolver o trabalho de manutenção.

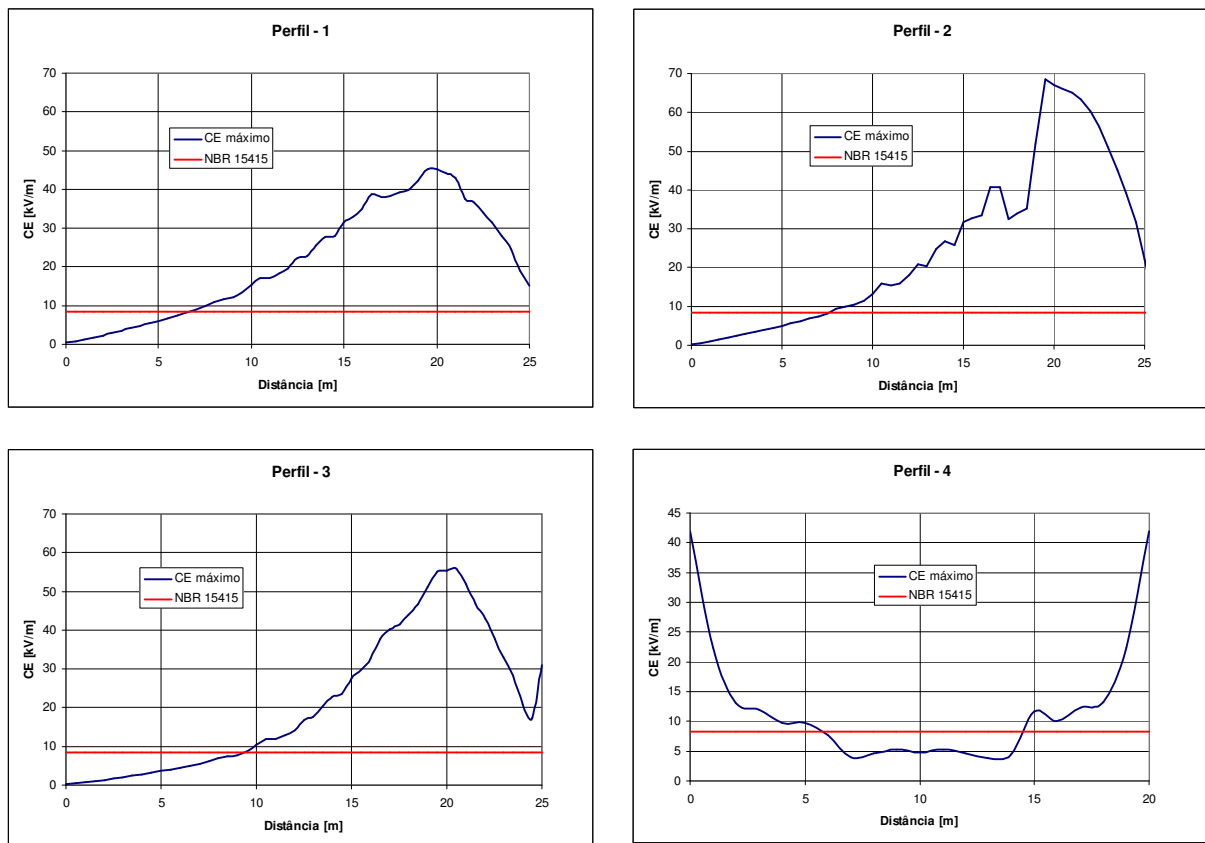


Figura 8 – Intensidade do campo elétrico ao longo dos perfis estudados. Nos gráficos também é apresentado o campo máximo proposto para exposição ocupacional, segundo a Norma Brasileira.

#### 4.0 - SOLUÇÕES PROPOSTAS

A seguir são apresentadas as medidas empreendidas para minimizar tanto os choques elétricos quanto a exposição a campos elétricos intensos.

##### 4.1 PROBLEMAS ELÉTRICOS DE SEGURANÇA

Todas as escadas pintadas foram substituídas por escadas galvanizadas, e estas foram todas solidamente aterradas. Nesta situação as condições de choque mais adversas foram eliminadas, contudo o primeiro contato entre o eletricitista e a escada, durante o processo de subida na torre, é feito em uma região de campo intenso, ver Figura 6, onde o potencial induzido no eletricitista é muito alto, cerca de 10 kV, e o choque elétrico muito intenso. Para eliminar este problema uma solução foi estudada e implementada, unindo a base da escada a várias pedaleiras metálicas, até alcançar uma região de campo mais baixo (geralmente 10 m acima do nível do solo), para que o primeiro contato entre o eletricitista e o sistema aterrado seja feito com um valor reduzido de corrente de contato.

##### 4.2 PROBLEMAS DE EXPOSIÇÃO

Como foi apresentado nas Figuras 6 e 8 há regiões do campo elétrico muito intenso, onde os eletricitistas podem ser expostos acima de níveis recomendados. Analisando o mapa de campo, as regiões onde a exposição é aceitável foram determinadas, e os caminhos preferenciais para circulação ao longo da estrutura foram estabelecidos para manter a exposição a níveis aceitáveis. Isto é aplicado em particular aos momentos onde o eletricitista deixa a escada para aproximar-se aos condutores de fase e no caminho de volta à escada, ver Figura 9. Para executar essas ações foi recomendado seguir um caminho de saída do campo mais intenso (na escada ao nível de condutor), até o alcance de uma região de campo mais baixo (no alto da torre), partindo da escada aterrada para a escada isolada onde o eletricitista se aproxima a fase, e só então descer ao nível do condutor.

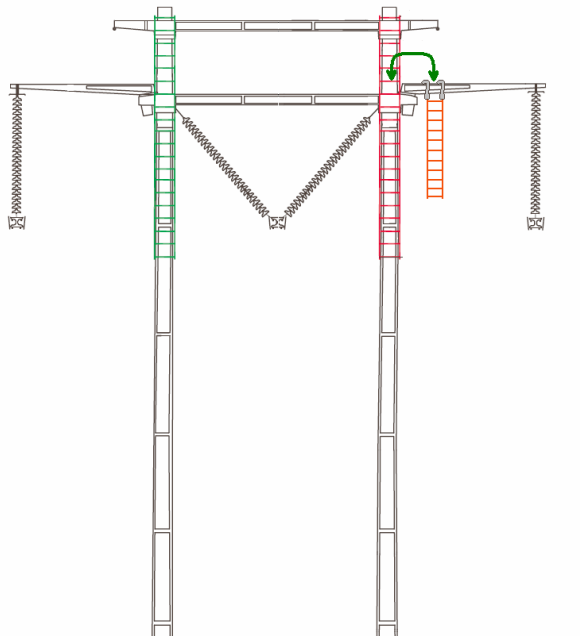


Figura 9 – A determinação de trajetórias preferenciais de circulação durante o procedimento de manutenção para evitar regiões de campo intenso.

#### 5.0 - CONCLUSÃO

Neste informe técnico o procedimento de manutenção de linha viva em uma LT de 500 kV com estruturas de concreto foi analisado com o objetivo de identificar a causa de choques elétricos nos eletricitistas e eliminá-los. Durante o processo de análise do problema, este passou a ser encarado como um problema mais complexo, onde não só as condições de segurança, causadas por choques elétricos são diversas e de origens muito diferentes, mas também se identificou a exposição a campos elétricos intensos.

A análise foi executada de forma que tanto segurança quanto as situações de exposição fossem levadas em consideração, utilizando-se de uma análise computacional completa da distribuição de campo elétrico na estrutura e na vizinhança da LT. O modelo computacional foi totalmente validado com medições de campo elétrico e de potencial induzido realizadas na LT.

Finalmente as soluções definidas foram testadas e aprovadas por testes de campo, onde diferentes procedimentos foram aplicados, e a eliminação de todas as situações de choque elétrico foi verificada.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Transmission Line Reference Book, 345kV and Above, Second Edition, EPRI TL-2500, EPRI, Palo Alto, CA, chapter 8, pp. 330-331, 1982.

(2) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Technical Report, ICNIRP, 2001.

(3) DOMINGUES, L. A. M. C., FERNANDES, C., DART, F. C., BARBOSA, C. R. N., MPALANTINOS NETO, A., 1989, "Aplicação do Método de Simulação de Cargas ao Cálculo de Campos Eletrostáticos tridimensionais", Em: "Segundo Simpósio Franco-Brasileiro sobre Cálculo de Campos Elétricos e Magnéticos", pp. 112-121, São Paulo, Março.

(4) PHENIX-MEF / TRICAMP PROGRAMS, CEPEL, Technical Report, DOMINGUES, L. A. M. C., FERNANDES, C., DART, F. C., BARBOSA, C. R. N., 1995, "Cálculo de Campo Elétrico pelo Método de Simulação de Cargas", Relatório Técnico 923/95 – DTI/ACET, CEPEL, Rio de Janeiro.

(5) SINGER, H., STEINBIGLER, H., WEISS, P., 1974, "A charge simulation method for the computation of high voltage fields", In: IEEE Power Apparatus and Systems", vol. PAS-93, pp. 1660-1668, Sept/Oct.

(6) BREBBIA, C. A., TELLES, J. C. F., WROBEL, L. C., 1984, "Boundary Elements Techniques", Berlin, Springer-Verlag.

(7) GUTFLEISCH, F., SINGER, H., FÖGER, K., GOMOLLON, J. A., 1994, "Calculation of high-voltage fields by means of the boundary element method", In: "IEEE Transactions on Power Delivery", vol. 2, p.p 743-749, April.

(8) MALIK, N. H., 1989, "A Review of the Charge Simulation Method and its Applications", In: "IEEE Transactions on Electrical Insulation", vol. 24, No. 1, p.p 1-20, February.

(9) STEINBIGLER, H., HALLER, D., 1991, "Comparative Analysis for Computing 2-D and 3-D Electric Fields", In: IEEE Transactions on Electrical Insulation", vol. 26, No. 3, p.p 529-536, June.

(10) ZIENKIEWICZ, O. C., MORGAN, K., 1989, "Finite Elements and Approximation", NY, USA, John Wiley and Sons, Inc.

(11) NBR 15415 - Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz, ABNT, 2006.

(12) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Technical Report, ICNIRP, 2001.