



**GRUPO - 10**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**Redução de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas na Cadeia de Isoladores de Torres de Transmissão Através de Melhorias no Sistema Aterramento e do uso de Falsos-Estais**

**Júlio A. S. do Nascimento (\*)**  
ELETRONORTE

**Daiyuki M. Fujiyoshi**  
UFPA

**Rodrigo M. S. de Oliveira**  
UFPA

**Manuel J. S. de Oliveira**  
ELETRONORTE

**RESUMO**

Através de trabalhos de campo, verificou-se uma redução significativa na taxa de desligamento em um trecho crítico de uma linha de transmissão por meio da inclusão do conjunto falso-estai e cabo-contrapeso no sistema de aterramento. Realizaram-se simulações numéricas através do método FDTD para analisar a influência eletrodinâmica desta modificação sobre o comportamento transitório de uma torre de linha de transmissão submetida a uma descarga atmosférica. Através destas simulações, quantificou-se a redução da sobretensão nos isoladores, que foi amortizada a valores abaixo da tensão de ruptura do isolamento. Ainda, foram estudadas diversas configurações geométricas para melhorar a eficiência do aterramento.

**PALAVRAS-CHAVE**

Isoladores de linha de transmissão, transitórios eletromagnéticos, redução de tensões induzidas, sistemas de aterramento elétrico, Método FDTD.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

No Brasil, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição são provocados pela incidência de descargas atmosféricas (1), seja por efeito direto causado pela circulação de altas correntes de surto pelos circuitos de alta ou baixa potência ou por efeitos indiretos, relacionados à indução de correntes em circuitos eletrônicos de controle devido à propagação de campos eletromagnéticos intensos, cuja fonte é a própria descarga atmosférica. Para reduzir os desligamentos provocados por descargas, diversas técnicas têm sido desenvolvidas, destacando-se entre elas o aperfeiçoamento dos sistemas de aterramento, de modo a reduzir a impedância de aterramento (2). Conforme consta na literatura (3)-(5), o aperfeiçoamento dos sistemas de aterramento se torna mais relevante quando a torre está localizada em terrenos que apresentam alta resistividade, os quais propiciam o surgimento de sobretensões elevadas.

Através de dados obtidos nos trabalhos de campo da Eletrobrás/Eletronorte, observou-se que a conexão do conjunto falso-estai e cabo-contrapeso na torre promove uma redução significativa da sobretensão nos isoladores. Esta modificação foi implementada em 20 torres de um trecho de linha de transmissão que possuía taxa média de 7 desligamentos por ano. Após a realização deste serviço a taxa média passou para 2 de desligamentos ao ano.

Neste trabalho, são realizadas simulações numéricas para estudar o transitório eletromagnético decorrente da incidência de descargas atmosféricas em torres de linhas de transmissão. Através destas simulações, é quantificada a influência da inclusão do falso-estai no sistema de aterramento de uma torre de transmissão. O caso estudado modela o solo com alta resistividade ( $5000 \Omega \cdot m$ ) para representar a condição crítica de desligamentos verificada em campo. Para o caso sem o falso-estai conectado à torre, as simulações numéricas indicam indução de tensão no isolador até níveis superiores ao Nível Básico de Isolamento (NBI), o que na prática acarreta a ruptura

de isolamento e, conseqüentemente, provoca o desligamento da linha de transmissão, conforme verificado em campo. Quando se realiza a simulação incluindo o falso-estai, o valor da tensão de pico nos isoladores de linha é reduzido significativamente. Ainda, é apresentado um estudo para selecionar o ponto de conexão do falso-estai na torre. Desta forma, é possível criar um caminho adicional pelo qual a corrente de surto possa escoar para o solo com maior eficiência.

As simulações numéricas implementadas neste trabalho foram realizadas por meio do *software* SAGS (*Synthesis and Analysis of Grounding Systems*) (6) que resolve numericamente as equações de Maxwell através do método FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) (7) para um ambiente 3-D em conjunto com a técnica de truncagem do domínio computacional CPML (*Convolutional Perfectly Matched Layer*) (8). Além disso, o SAGS utiliza a formulação de fio-fino (9) para representar os eletrodos, hastes e cabos elétricos presentes no problema estudado. O *software* SAGS foi validado para diversas aplicações experimentais, conforme pode ser observado em (10),(11). Deve-se ressaltar a importância da análise do problema através de simulações numéricas, nas quais é possível testar diversas configurações geométricas, condições do solo e outros parâmetros.

## 2.0 - SISTEMAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO PARA TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A incidência de uma descarga atmosférica na linha de transmissão (ou nas proximidades) produz sobretensões elevadas que podem ultrapassar o Nível Básico de Isolamento (NBI) nos isoladores de linha. No caso das sobretensões ultrapassarem o NBI, ocorre a ruptura da cadeia de isoladores de linha, nos quais formam-se arcos elétricos que causam curtos-circuitos entre as fases ou entre fase e terra. Quando ocorre a incidência direta da descarga sobre a linha de fase, este fenômeno é chamado de descarga disruptiva no isolamento (*flashover*) (3). Se a incidência do pulso atmosférico ocorre no cabo-guarda ou na torre, este fenômeno é conhecido por descarga disruptiva de retorno (*backflashover*) (1),(3). A fim de reduzir a ocorrência de desligamentos, utilizam-se diversos elementos de proteção, como os sistemas de aterramento que atuam para reduzir a impedância de aterramento e reduzir o nível de sobretensões nos isoladores.

A principal finalidade de um sistema de aterramento é transferir da forma mais eficiente possível a corrente transitória para a terra durante a ocorrência de uma descarga atmosférica ou outro surto (regime transitório). Em condições normais de operação (regime de 50 ou 60 Hz) o sistema de aterramento deve equalizar o potencial entre os diversos instrumentos a ele conectados, de forma a criar uma referência única de voltagem. Por isso, o sistema de aterramento deve ser projetado para ter uma impedância muito menor do que a impedância do circuito ao qual está conectado. Porém, em transitórios rápidos, conexões especiais entre a torre e o aterramento devem ser incluídas e otimizadas para que a corrente seja transferida para o solo no momento adequado, dividindo a corrente transitória que circula na torre para que haja a conseqüente redução das tensões transitórias nos isoladores de linha.

Os principais fatores que afetam a eficácia dos sistemas de aterramento elétrico são: condições do solo (parâmetros eletromagnéticos e composição química, umidade e temperatura); a configuração geométrica do aterramento e a forma de onda (amplitude e tempos de subida e cauda) do pulso incidente (12).

Dentre os elementos que compõem o sistema de aterramento elétrico de uma torre de transmissão, podem ser destacados os cabos-guarda, eletrodos enterrados verticalmente e os cabos-contrapeso. Além disso, a própria estrutura metálica da torre afeta o desempenho transitório do sistema de aterramento, a qual serve como caminho para a corrente de surto fluir para o solo. A disposição geométrica e as dimensões dos sistemas de aterramento são determinadas em função da resistência de aterramento  $R$ . Em solos com baixa resistividade ( $\rho \leq 500 \Omega.m$ ), a resistência de aterramento é proporcionalmente baixa e, com isso, os aterramentos elétricos são normalmente compostos por eletrodos horizontais curtos (por volta de 5 m de comprimento) conectados a hastes enterradas verticalmente. Solos que apresentam resistividades elevadas ( $\rho \geq 2000 \Omega.m$ ) requerem aterramentos mais complexos, tais como cabos-contrapesos e malhas complexas para facilitar o escoamento da corrente para o solo. Normalmente, utilizam-se cabos-contrapesos longos (acima de 50 m de comprimento) enterrados no solo a uma profundidade de 0,6 m (3). Cabos-guarda estão presentes no topo das torres de transmissão e são usualmente conectados eletricamente aos eletrodos de aterramento através da própria estrutura metálica da torre. Os cabos-guarda têm a função de blindar os cabos de fase e promovem a divisão do pulso de corrente incidente para outras torres e seus respectivos aterramentos elétricos, reduzindo os níveis de sobretensões nos isoladores de linha.

Nota-se que, em geral, os projetos de sistemas de aterramento são elaborados com base em parâmetros de baixa frequência, como a resistência de aterramento. Contudo, diversos trabalhos recentes (3)-(6) indicam a relevância da análise dos transitórios eletromagnéticos para obter uma visão completa do desempenho dos sistemas de aterramento, visto que as descargas atmosféricas e outros surtos são eventos transitórios. Neste trabalho, a análise do transitório eletromagnético do problema é feita através da avaliação dos sinais de tensão e corrente calculados através do método FDTD (6)-(9).

### 3.0 - SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1 Descrição do problema

Neste trabalho, fizeram-se diversas simulações numéricas para analisar o transitório eletromagnético em decorrência de um pulso atmosférico incidindo em uma torre de linha de transmissão conectada ao seu respectivo sistema de aterramento. A torre analisada possui 42 m de altura e é referente a uma linha de transmissão de 230 kV, a qual possui 300 km de extensão. O NBI adotado para este trabalho é 1345 kV, extraído de uma torre real da Eletrobrás/Eletronorte. O sistema de aterramento presente nesta torre é formado por quatro cabos-contrapesos de 80 m de comprimento e 5 mm de diâmetro. A conexão entre a torre e o aterramento é feita conforme ilustrado na Figura 1.

Observou-se que a região na qual a torre transmissão analisada está presente é formada por um solo rochoso cuja resistividade medida é  $\rho = 5000 \Omega.m$ , que implica em altos valores de impedância de aterramento e propicia o surgimento de sobretensões elevadas. Nesta região, que compreende 6 km da linha e abrange apenas 20 torres, é verificada a taxa média de 7 desligamentos provocados por descargas atmosféricas no intervalo de um ano. Ressalta-se que, para uma linha com tensão superior a 100 kV, uma taxa entre 0,1 e 1 desligamento/100 km por ano é considerada boa, enquanto que uma taxa entre 1 e 5 desligamentos/100 km por ano seria considerada média. Logo, a torre de transmissão analisada neste trabalho requer melhorias no sistema de aterramento, visando reduzir a sua taxa de desligamento.

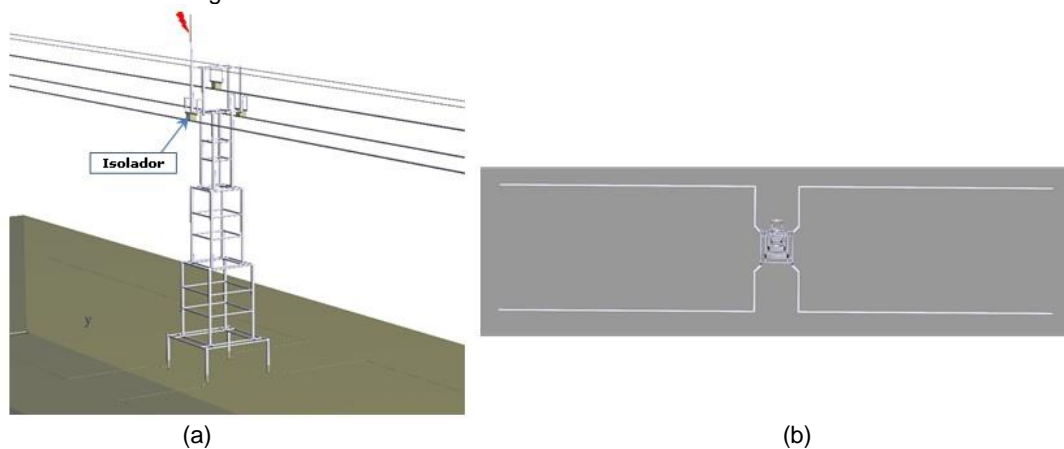


FIGURA 1 – Representação da estrutura no ambiente do *software* SAGS (6). (a) Torre de transmissão, (b) Cabo-contrapeso.

#### 3.2 Representação no ambiente do *software* SAGS

Na Figura 1, é ilustrada a representação no ambiente do *software* SAGS (6) para os casos analisados neste trabalho. A região de análise considerada contém  $500 \times 140 \times 200$  células cúbicas de Yee com arestas medindo  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5$  m. A resistividade  $\rho = 5000 \Omega.m$  do solo foi avaliada a partir de medições realizadas em campo. Para o solo, a permissividade elétrica relativa inserida nas simulações foi  $\epsilon_r = 5$ , que foi obtida através de valores usuais encontrados na literatura (13), (14). Nas simulações, os isoladores foram representados como materiais dielétricos com os seguintes parâmetros:  $\sigma = 1 \times 10^{-11}$  S/m,  $\epsilon_r = 7,5$  e  $\mu_r = 1$ . A descarga atmosférica foi representada como um pulso de corrente com a forma de onda ilustrada na Figura 2-(b). Na Figura 2-(a), é indicado o ponto no qual o pulso de corrente é injetado através de um canal de descarga. Conforme ilustra a Figura 1-(a), o canal de descarga penetra na região absorvente CPML, tendo portanto comprimento efetivo infinito.

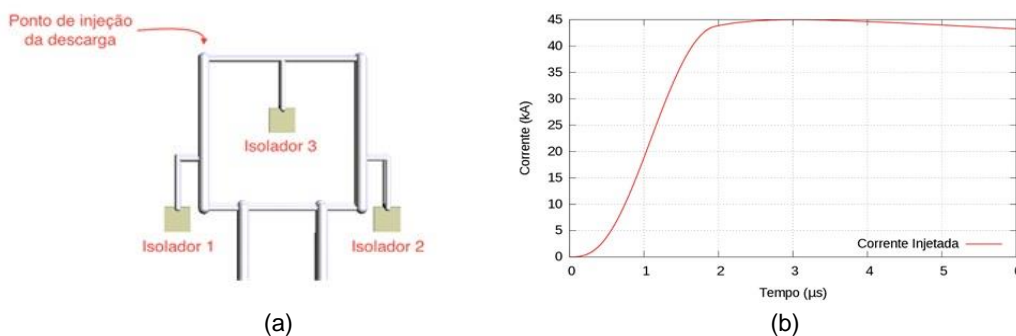


FIGURA 2 – Modelagem no ambiente do *software* SAGS: (a) representação do ponto de injeção da descarga (parte superior da torre) e os isoladores, (b) corrente injetada em função do tempo.

### 3.3 Estudos preliminares para definir a proposta de melhoria ao aterramento

Nas simulações numéricas, são analisados os sinais de tensão avaliados nos isoladores de linha ilustrados pela Figura 2-(a). Na Figura 3-(a), são mostrados os sinais de tensão nos isoladores obtidos por meio de uma simulação numérica na qual é aplicado o pulso atmosférico da Figura 2-(b). Nota-se que o sinal de tensão avaliado entre os terminais do Isolador 1 apresenta o maior valor de pico. Logo, os próximos resultados serão analisados com base na tensão deste isolador, pois este é o caso mais crítico do problema. Cabe ressaltar que o valor de pico da tensão nos terminais dos três isoladores ultrapassa o valor do NBI da linha de transmissão estudada neste trabalho.

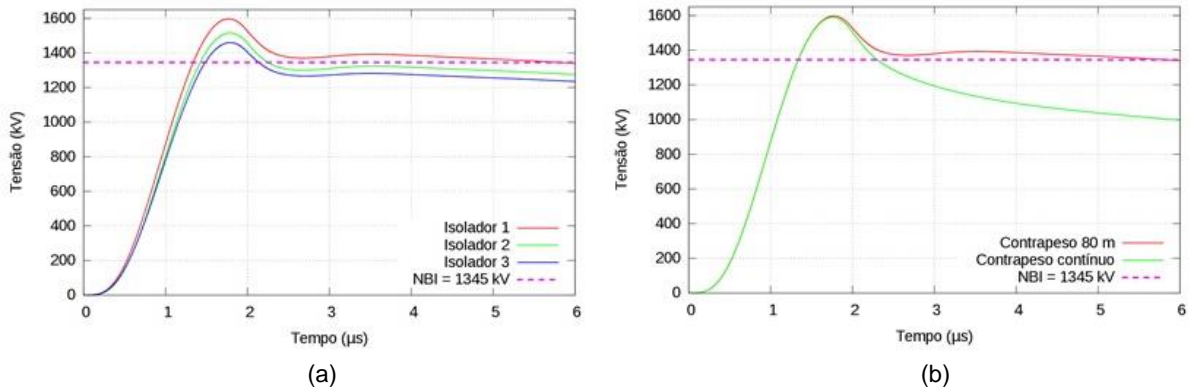


FIGURA 3 – Sinais obtidos por simulação numérica: (a) Tensões induzidas nos três isoladores (cabo-contrapeso de 80 m), (b) Tensões induzidas no Isolador 1 para os casos com cabo-contrapeso de 80 m e contínuo.

Na Figura 3-(b), comparam-se os sinais de tensão obtidos no Isolador 1 para o caso no qual o contrapeso possui 80 m e o caso com contrapeso contínuo (interligado com o cabo-contrapeso da torre adjacente). Observa-se que a tensão de pico nos terminais da cadeia de isoladores é aproximadamente igual nas duas simulações. Através do resultado apresentado na Figura 3-(b), verifica-se a importância do conceito de comprimento efetivo  $L_{ef}$ , que corresponde a um comprimento limite para o qual eletrodos (tais como os cabos-contrapeso) com comprimento superior a  $L_{ef}$  não promovem a redução do valor de pico do transitório de tensão e corrente ((13). Analisando os pontos mais distantes dos eletrodos com comprimento maior do que  $L_{ef}$ , as componentes de alta frequência das correntes, que ocorrem apenas até aproximadamente  $2,5 \mu s$ , estão bastante atenuadas, de tal forma que, a despeito da disponibilidade de comprimento adicional do eletrodo, praticamente não mais contribuem para o escoamento de corrente transitória para o solo. Ou seja, o contrapeso de 80 m é maior ou igual ao comprimento efetivo para este cenário. Portanto, o aumento no comprimento do cabo-contrapeso não resulta na redução do valor de pico da tensão induzida, mas diminui o nível de tensão na porção associada às baixas frequências do sinal. Desta forma, é necessário tomar outras medidas para reduzir o transitório de tensão nos isoladores de linha.

Na Figura 4-(a), são mostrados os sinais de tensão para resistividade de  $10^{-3}$ , 1, 500 e 5000  $\Omega.m$ . Observa-se que, ainda que hipoteticamente o solo apresentasse uma resistividade extremamente baixa ( $\rho = 10^{-3}$  ou 1  $\Omega.m$ ), a tensão induzida obtida apresenta um valor de pico elevado ( $\cong 1190$  kV). Logo, pode ser concluído que o conjunto torre de transmissão e aterramento possui uma impedância de aterramento elevada. Ainda, observa-se também que reduzindo a resistividade de 1 para  $10^{-3}$   $\Omega.m$ , não há redução significativa na tensão induzida no isolador.

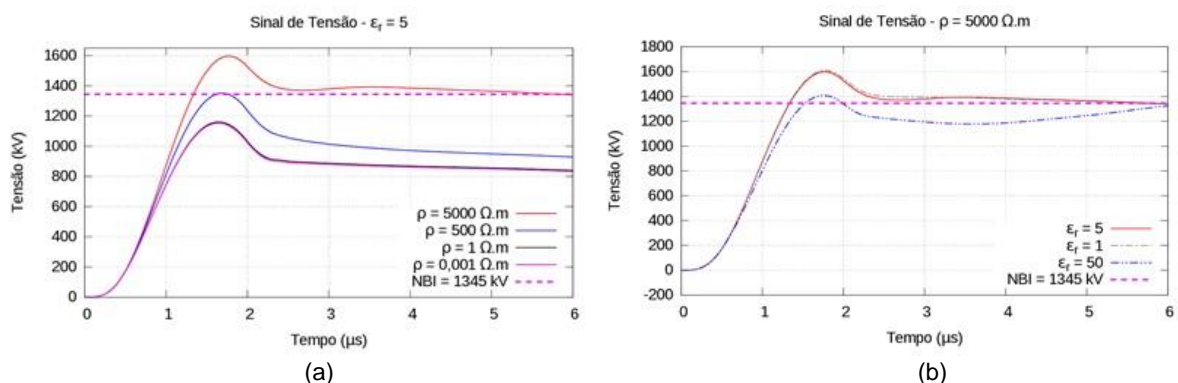


FIGURA 4 – Sinais de tensão obtidos por simulação numérica. (a) Mantendo o valor de  $\epsilon_r = 5$  e alterando o valor de  $\rho$ , (b) Mantendo o valor de  $\rho = 5000 \Omega.m$  e alterando o valor de  $\epsilon_r$ .

A partir da Figura 4-(b), nota-se que para o solo com  $\rho = 5000 \Omega.m$ , a elevação da permissividade relativa do solo de  $\epsilon_r = 5$  para 50 provoca uma redução de aproximadamente 12,5% no pico da tensão induzida na cadeia de isoladores. Isto indica que uma possível solução para reduzir as sobretensões nos isoladores seria modificar

quimicamente a porção do solo próxima dos cabos-contrapesos para aumentar o desempenho do sistema de aterramento através do incremento de  $\epsilon_r$ . Não obstante, o presente trabalho adota  $\epsilon_r = 5$ , que é um valor padrão para este tipo de solo (13), (14) e também representa a condição mais crítica.

Com base no que foi exposto acima, verifica-se a necessidade implementar novas medidas para reduzir a tensão nos isoladores para valores abaixo do NBI. Tendo como base os trabalhos realizados pela Eletrobrás/Eletronorte em campo, é estudada a inserção do conjunto falso-estai e cabo-contrapeso nos quatro cantos da torre. A ideia é que seja adicionado um novo e mais eficiente caminho para que a corrente de surto escoe para o solo no momento certo e na quantidade adequada, a fim de reduzir o pico transitório da tensão induzida nos isoladores.

### 3.4 Proposta de melhoria no aterramento elétrico para torres de transmissão

A ideia principal é conectar o conjunto falso-estai e cabo-contrapeso ao trecho da torre que flui a maior parte da corrente e, a partir desse ponto, criar um caminho com menor impedância pelo qual a corrente possa fluir de forma mais eficiente para o solo, reduzindo as correntes na estrutura da torre e, conseqüentemente, minimizando as tensões induzidas nos isoladores. Dessa forma, foi realizada uma simulação na qual a corrente em diversos ramos da torre foi avaliada, conforme ilustra a Figura 5-(a). Na Figura 6-(a), são apresentados os sinais de corrente avaliados nos pontos indicados na Figura 5-(a). Ainda, na Figura 5-(b) é representado a distribuição do campo elétrico no espaço, para o instante  $t = 2 \mu\text{s}$ , em decorrência do pulso atmosférico incidindo na torre. Observe que a região próxima do canal de descarga (presente no topo da torre) apresenta o campo de maior intensidade.

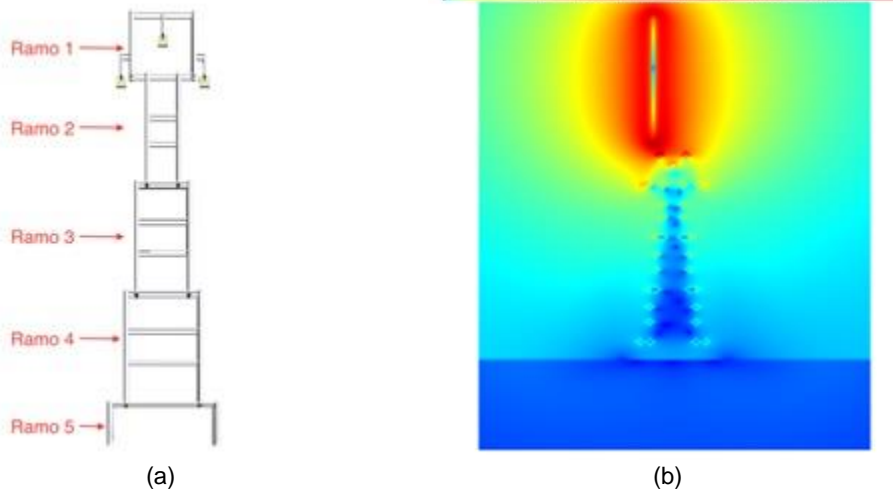


FIGURA 5 – (a) Indicação dos Ramos, (b) Distribuição do campo elétrico no espaço ( $t = 2 \mu\text{s}$ ).

Através das Figuras 5-(b) e 6-(a), constata-se que o Ramo 1 apresenta uma corrente com amplitude maior do que os demais ramos. Isto é observado devido a proximidade desse ramo com a incidência da descarga atmosférica e, também, é devido a menor quantidade de caminhos disponíveis para a corrente surto ser dividida no Ramo 1, enquanto que nos demais ramos a corrente foi dividida em diversos caminhos presentes na estrutura metálica da torre, implicando em uma corrente de menor amplitude.

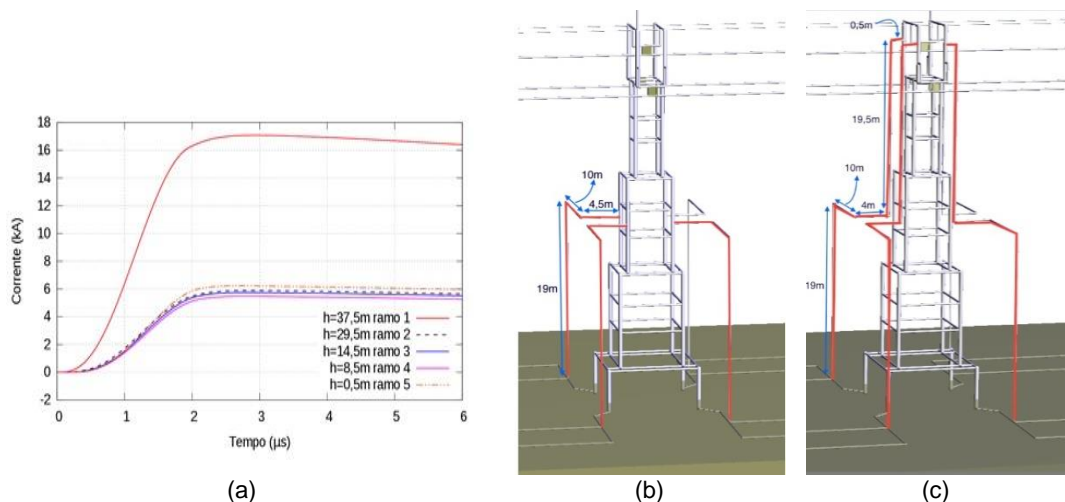


FIGURA 6 – Correntes na torre e instalação dos estais: (a) Correntes nos ramos, (b) Falso-estai Ramo 3, (c) Falso-estai Ramo 1.

Portanto, o ponto selecionado para instalação do falso-estai é localizado no Ramo 1. Através disso, é possível reduzir significativamente a tensão induzida nos isoladores e minimizar a ocorrência de desligamentos da linha. Ainda, o presente trabalho realiza um estudo considerando a inserção do falso-estai no Ramo 3, no qual é possível realizar a instalação de forma mais segura e sem que haja a necessidade de desligamento da linha para realizar este procedimento.

Nas Figuras 6-(b) e 6-(c), são apresentadas as estruturas modeladas no *software* SAGS após a inclusão do conjunto falso-estai e contrapeso. Observe que os falsos-estais partem do Ramo 1 (ou Ramo 3) e são conectados diretamente no cabo de contrapeso. Os resultados obtidos através das simulações para os arranjos propostos e para a torre com apenas os quatros contrapesos originais são mostrados na Figura 7 e na Tabela 1.

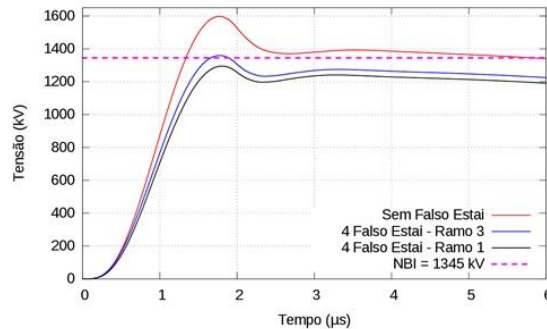


FIGURA 7 – Sinais de tensão induzida obtidos por simulação numérica para  $\rho = 5000 \Omega.m$ .

Tabela 1 – Tensões de pico nos isoladores para  $\rho = 5000 \Omega.m$  e contrapeso de 80 m.

Tipo de aterramento	Tensão Pico (kV)	Diferença percentual em relação ao NBI de 1345 kV
Sem falso-estai	1593	18,44%
Falso-estai no Ramo 3	1359	1,04%
Falso-estai no Ramo 1	1296	-3,64%

Observa-se que a tensão de pico na configuração sem falso-estai ultrapassa em 18,44% o NBI da linha de transmissão. A configuração com a adição do falso-estai no Ramo 3 ultrapassa o NBI da linha de transmissão em 1,04%. Por fim, para o caso da inserção do falso-estai no Ramo 1, o valor de pico da tensão induzida é 3,64% abaixo do NBI da linha de transmissão.

Para verificar o desempenho destes novos arranjos de aterramento em solos com resistividades mais elevadas, foram realizadas simulações numéricas que analisam solos com resistividade  $\rho = 10 \text{ k}\Omega.m$ , mantendo-se os demais parâmetros.

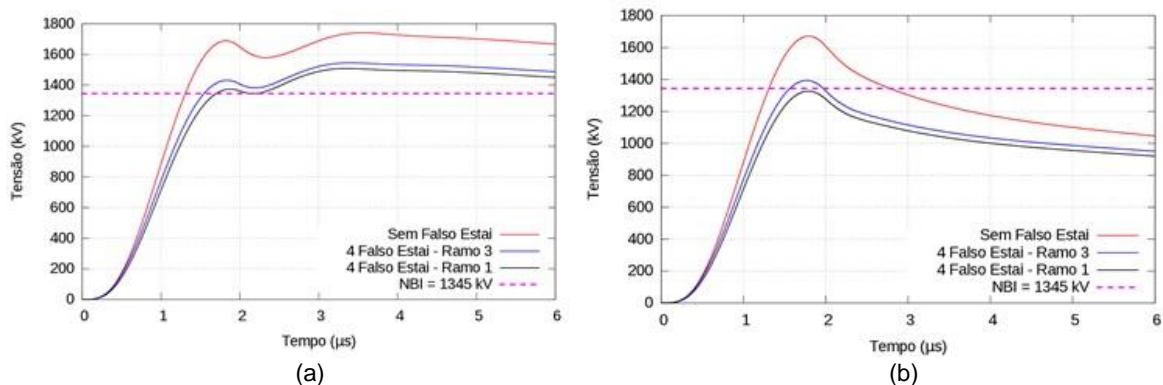


FIGURA 8 – Sinais de tensão obtidos por meio de simulações numéricas para um solo com  $\rho = 10 \text{ k}\Omega.m$ : (a) com contrapeso de 80 m, (b) com contrapeso contínuo.

Na Figura 8-(a), apresentam-se os resultados das simulações para estes casos. Observa-se que os valores de pico da tensão foram superiores ao NBI da linha para os três casos. Para solucionar tal problema, o comprimento dos cabos-contrapesos é aumentado até torná-los contínuos com a torre adjacente. Conforme mostrado na Figura

8-(b), houve uma redução no valor de pico da tensão em todos os casos analisados. Analisando este último resultado, verifica-se que o comprimento de 80 m utilizado inicialmente para o cabo-contrapeso era menor do que o comprimento efetivo para  $\rho = 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ . Nota-se que, a influência da estrutura enterrada no solo torna-se predominante sobre o valor de pico da tensão, diferentemente dos solos com  $\rho \leq 5000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$  (Figura 4-(a)) nos quais a influência da impedância da torre predominava no pico da tensão.

Na Tabela 2, apresentam-se os resultados obtidos nos casos com  $\rho = 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ . Observa-se que a tensão de pico na configuração original com contrapeso contínuo ultrapassa em 24,46% o NBI da linha de transmissão, a configuração com o falso-estai e contrapeso contínuo no Ramo 3 ultrapassa o NBI da linha de transmissão em 3,72%, e o valor de pico da tensão induzida fica 1,30% abaixo do NBI na utilização do falso-estai e contrapeso contínuo conectado ao Ramo 1.

Tabela 2 – Tensão de pico nos isoladores para  $\rho = 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ .

Tipo de aterramento	Tensão Pico (kV)	Diferença percentual em relação ao NBI de 1345 kV
Contrapeso de 80 m	1744	29,65%
Estai no Ramo 3 80 m	1544	14,76%
Estai no Ramo 1 80 m	1508	12,08%
Contrapeso contínuo	1674	24,46%
Estai no Ramo 3 contínuo	1395	3,72%
Estai no Ramo 1 contínuo	1328	-1,30%

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Durante os trabalhos pela Eletrobrás/Eletronorte em campo, a inclusão do conjunto falso-estai e cabo-contrapeso foi implementada em torres de linhas de transmissão instaladas em solos com alta resistividade (5000  $\Omega\cdot\text{m}$ ), trecho da linha na qual apresentava elevada taxa média de desligamento. A partir desta modificação, observou-se a redução significativa do valor de pico do sinal de tensão nos isoladores de linha.

Através de simulações numéricas, neste trabalho foram analisados transitórios eletromagnéticos observados quando ocorre a incidência de uma descarga atmosférica em uma torre de linha de transmissão conectada ao seu respectivo sistema de aterramento. Verificou-se qual isolador de linha que apresentava o maior pico de tensão devido a descarga, ou seja, que apresenta maior probabilidade de ocorrer a ruptura de isolamento. Após isso, foi analisada a influência dos parâmetros elétricos (resistividade e permissividade) do solo sobre a resposta transitória da tensão nos isoladores. A partir dessa análise, observou-se que quanto maior for a resistividade do solo, maior será o valor da tensão de pico nos isoladores, conforme já verificado em outros trabalhos. Sobre a permissividade relativa do solo, o aumento do seu valor provoca uma redução no pico da tensão induzida na cadeia de isoladores. Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de um estudo de viabilidade técnica para aumentar a permissividade do solo através do tratamento químico do solo para reduzir o nível de sobretensão nos isoladores. Ainda, foi verificada a importância de avaliar o comprimento efetivo dos cabos-contrapesos presentes no sistema de aterramento. Constatou-se que, para o solo com  $\rho = 5000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ , o comprimento original de 80 m do cabo-contrapeso é igual ou superior ao comprimento efetivo. Dessa forma, o aumento do comprimento do contrapeso não reduz o valor de pico da tensão.

Por fim, foi verificado através de simulações numéricas que o sistema de aterramento original da torre de transmissão não é capaz de evitar o desligamento da linha quando ocorre a incidência de uma descarga atmosférica. Utilizando o aterramento original, o nível de sobretensão ultrapassa o NBI projetado para os isoladores de linha. A fim de reduzir a impedância do sistema de aterramento e, conseqüentemente, o nível de sobretensões nos isoladores, estudou os efeitos da inclusão do conjunto falso-estai e cabo-contrapeso conectado à torre através dos Ramos 1 ou 3. Com esta modificação na topologia do aterramento, foi possível reduzir o pico de tensão de 18,44% (caso original) acima do NBI para apenas 1,04% acima do NBI para o falso-estai conectado ao Ramo 3. Para o caso do falso-estai conectado ao Ramo 1, a tensão de pico obtida foi de 3,64% *abaixo* do estabelecido pelo NBI. Ainda, foi estudado um caso no qual a resistividade do solo é 10  $\text{k}\Omega\cdot\text{m}$  e mantendo os demais parâmetros e estrutura da simulação. Nessas condições, além de inserir o falso-estai, foi necessário aumentar o comprimento dos cabos-contrapesos até se tornarem contínuos, ou seja, na prática estes seriam conectados aos cabos-contrapesos das torres adjacentes. Com o aumento do comprimento do contrapeso, a tensão de pico do caso sem estai foi de 24,46% acima do NBI. No caso do falso-estai conectado no Ramo 3 foi possível reduzir a tensão de pico para apenas 3,72% acima do NBI. Para o caso do falso-estai conectado ao Ramo 1, reduziu-se a tensão de pico para 1,30% *abaixo* do NBI da linha estudada. Dessa forma, estudos podem ser realizados no futuro para

umentar o estabilidade de operação do sistema através da redução das correntes provenientes das descargas atmosféricas no Ramo 1 através de conexões elétricas adequadas (seguras).

Por meio de simulações numéricas, confirmou-se que implantação do conjunto falso-estai e cabo-contrapeso reduz consideravelmente a tensão de pico nos isoladores de linha. No projeto de instalação de novas linhas, propõe-se que seja incluso o conjunto do falso-estai para aumentar a eficiência do sistema de aterramento da torre. Contudo, em solos de alta resistividade, deve-se atentar ao comprimento adequado para o cabo-contrapeso para garantir que o nível das sobretensões seja abaixo do NBI da linha.

Ressalta-se a importância da análise do problema através de simulações numéricas, nas quais é possível testar diversas configurações geométricas, condições do solo e alterar outros parâmetros. Além disso, não há a necessidade de realizar desligamentos nem promover outras interferências nas linhas de transmissão.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S. V. Filho, *Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. Artliber, 2005.
- (2) O. Pinto, K. Naccarato, and I. Pinto, "The new brazilian lightning detection network: First results," in *Lightning Protection (XI SIPDA), 2011 International Symposium on*, Oct 2011, pp. 152–153.
- (3) S. Visacro and F. H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 4, pp. 1524–1532, Aug 2016.
- (4) J. He, R. Zeng, Y. Tu, J. Zou, S. Chen, and Z. Guan, "Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 994–1001, July 2003.
- (5) S. Visacro and F. H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Methodology to Design Grounding Electrodes to Ensure an Expected Outage Rate," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 237–245, Feb 2015.
- (6) R. M. S. Oliveira, "Nova Metodologia para Análise e Síntese de Sistemas de Aterramento Complexos Utilizando o Método LN-FDTD, Computação Paralela Automática e Redes Neurais Artificiais," Tese de doutorado em engenharia elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto de Tecnologia (ITEC), Universidade Federal do Pará (UFPA), 2008.
- (7) K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302–307, 1966.
- (8) J. A. Roden and S. D. Gedney, "Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 27, pp. 334–339, 2000.
- (9) N. N. Y. Taniguchi, Y. Baba and A. Ametani, "An Improved Thin Wire Representation for FDTD Computations," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, No.10, 2008.
- (10) R. H. T. C. Filho, R. M. S. de Oliveira, C. Sobrinho, and A. M. de Almeida, "Parallel-FDTD and experimental results of SAR for flat and head phantoms 900MHz," in *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International*, pp. 373–378, Nov. 2009.
- (11) R. M. S. de Oliveira, J. F. M. Modesto, M. R. V. Maia, D. M. Fujiyoshi, and A. Raizer, "Impulse coefficient for square grounding grids in low resistivity soils: Influence of injection electrode," *Journal of Electrostatics*, vol. 72, no. 5, pp. 372 – 380, 2014.
- (12) L. Grcev, "Impulse efficiency of ground electrodes," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 441–451, Jan. 2009.
- (13) S. Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386, January, 2007.
- (14) M. A. F. Mattos, *Técnicas de aterramento*, Eletromagnetismo Aplicado Ltda., Campinas, 2004.



## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



JÚLIO ANTÔNIO SALHEB DO NASCIMENTO nasceu em Belém-Pará, Brasil, em 1973. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (1998), especialização em Qualidade e Eficiência Energética pela Universidade Federal do Pará (2004) e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2016). Trabalhou Como Engenheiro das Centrais Elétricas do Pará S/A (2000 a 2003) como Engenheiro do Grupo Técnico de Energia da Agência Estadual de Regulação e Controle de Serviços Públicos do estado do Pará (2003-2007), e atualmente é Engenheiro de Manutenção Elétrica da Eletronorte desde 2007.



RODRIGO MELO E SILVA DE OLIVEIRA nasceu em Brasília-DF em abril de 1980. Possui graduação (Dez/2002), mestrado (Out/2004) e Doutorado (Fev/2008), títulos obtidos em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Telecomunicações, atuando principalmente nos seguintes tópicos: Métodos FDTD e RPIM, Processamento Paralelo Distribuído, Propagação, Espalhamento Eletromagnético, Aterramento Elétrico e antenas de Grafeno. Atualmente, faz parte do quadro de Professores da UFPA e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE). É autor/co-autor de aproximadamente 90 publicações, dentre artigos em periódicos, capítulos de livro e conferências. É coordenador do Laboratório de Eletromagnetismo (LEMag/UFPA).

DAIYUKI MAIA FUJIYOSHI nasceu em Belém - Pará, Brasil, em 1991. Possui graduação (2014) e mestrado (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente, cursa Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) na UFPA e é integrante do Laboratório de Eletromagnetismo (LEMag). Suas áreas de interesse são compatibilidade eletromagnética, análise numérica, sistemas de aterramento e análise de materiais dispersivos.

MANUEL JOAQUIM DA SILVA OLIVEIRA nasceu em Braga, Portugal, em 1959. Atua como técnico de manutenção elétrica da Eletronorte desde 1979. Suas demais áreas de interesse são compatibilidade eletromagnética, qualidade de energia elétrica, sistemas de aterramento elétrico e termografia.