



**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**DESENVOLVIMENTO DE MODELAGEM PARA O DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Carlos Kleber da Costa Arruda*

CEPEL

RESUMO

O estudo dos efeitos das descargas atmosféricas em linhas de transmissão (LTs) é de grande importância, aonde é necessário otimizar a proteção e minimizar os efeitos decorrentes. Para isso é necessário compreender o fenômeno, sabendo como ele atua na estrutura.

Este trabalho descreve um método de modelagem de estruturas para o estudo de transitórios, na ordem de frequência das descargas atmosféricas, a sua implementação em linguagem C++ e sua validação através de modelos reduzidos.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas Atmosféricas, Linhas de Transmissão, Modelos Reduzidos, Transformada Rápida de Fourier (FFT).

1.0 - INTRODUÇÃO

O objetivo desta modelagem é a observação da influência das estruturas de LTs nos transitórios rápidos. É muito utilizado o "formato" de torre baseado em uma impedância, o que pode ser muito prático, mas que pode estar muito longe da realidade do sistema. Sabendo que as torres são o ponto principal de escape da energia da descarga, a estimação do modelo torna-se muito importante.

Para uma simulação mais rigorosa, será necessário entender a influência das estruturas, perceber o efeito de cada elemento. Estudos anteriores [3][5][6] já procuram estipular modelos mais precisos, tanto de forma analítica quanto experimental. Outros estudos [8][9][10] também procuram a modelagem do solo e aterramento, outro fator de grande influência no fenômeno.

2.0 - MODELAGEM DE UMA ESTRUTURA PARA TRANSITÓRIOS RÁPIDOS

2.1 Considerações Básicas

Para esta modelagem, leva-se em conta a simplificação das estruturas em forma de segmentos cilíndricos interligados; um solo plano com características homogêneas, porém possivelmente variáveis na frequência; a limitação da estrutura em um trecho (como alguns vãos de uma LT) no qual os efeitos das extremidades sejam desprezíveis; e no presente estado do modelo, a consideração de elementos lineares, como por exemplo, a presença de efeito corona.

2.2 Elementos Componentes

Com a estipulação da estrutura como uma rede de condutores cilíndricos, pode-se utilizar um número reduzido de equações. Procura-se nesta etapa as impedâncias longitudinais e transversais, tanto as próprias quanto as

* Av. Um, s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão - CEP 21941-598 - Rio de Janeiro - RJ - BRASIL.
Tel.: (21) 2598-6462 - Fax: (21) 2270-4189 - E-MAIL: carloska@cepel.br

mútuas [3]. A impedância própria inclui os efeitos internos e a influência de outros meios (incluindo, com restrições, a presença do solo [4]). As impedâncias mútuas são definidas pelas Equações 1 e 2:

$$Z_i = \frac{1}{4\pi l_A l_B (\sigma - i\omega \varepsilon)} \int_{B_1}^{B_2} \int_{A_1}^{A_2} \frac{dl_A dl_B}{r_{AB}} e^{ik\bar{r}_{AB}} \quad (1)$$

$$Z_i = \frac{i\omega\mu}{4\pi l_A l_B} \int_{B_1}^{B_2} \int_{A_1}^{A_2} \frac{dl_A dl_B}{r_{AB}} e^{ik\bar{r}_{AB}} (\vec{u}_A \cdot \vec{u}_B) \quad (2)$$

Observando as equações básicas de impedância, percebe-se uma parcela comum, referente à integral dupla, chamado fator de geometria. Esta parcela é influenciada somente pela posição dos segmentos, no qual a princípio estão definidos no mesmo meio. Outra parcela presente em ambas às equações é o fator de propagação, de grande relevância em altas frequências.

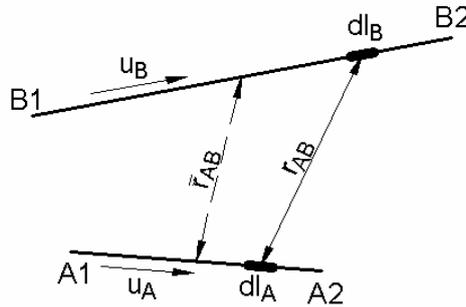


FIGURA 1 – Impedância mútua entre segmentos

A FIGURA 1 ilustra a consideração de impedância mútua, transversal ou longitudinal, aonde é definido o fator de geometria entre segmentos. O segmento A é definido pelos nós A1 e A2, o segmento B definido pelos nós B1 e B2. Define-se a distância entre cada elemento diferencial como r_{AB} . A distância média entre os segmentos é definido como \bar{r}_{AB} , usado em partes simplificadas do algoritmo. \vec{u}_A e \vec{u}_B são vetores unitários, indicativos da orientação dos segmentos.

Aceitando certas aproximações, pode-se considerar o efeito de segmentos-imagem decorrente à fronteira entre meios (neste caso, ar e solo). A rigor deve ser considerada também a influência entre segmentos em meios diferentes, aonde o efeito da mútua seria "refratado" na fronteira entre meios. Seu cálculo seria demasiado extenso e no momento não foi implementado no modelo atual.

2.3 Canal de Descarga

Sendo modelado como um elemento à parte, o canal de descarga é definido como um segmento condutor reto, ligado à estrutura em seu ponto provável de incidência. Os sinais de descarga serão injetados na outra extremidade, a partir de uma altitude e um ângulo de incidência pré-definidos.

A rigor é necessário buscar uma modelagem correta do canal de descarga, e suas interações com a estrutura, o que no momento encontra-se fora do âmbito do presente trabalho.

2.4 Aterramento

Elemento importante no conjunto da estrutura, o modelo permite a inclusão de solo homogêneos com suas constantes eletromagnéticas constantes ou variáveis na frequência [8]. Desta forma o programa é aberto a várias opções de modelagem de solos.

2.5 Resolução das equações de malha

Com a determinação das matrizes de impedâncias, é possível solucionar o sistema de equações [9], encontrando-se as tensões e correntes transversais e longitudinais na malha.

Considerando-se o sistema modelado pelas Equações 3, 4 e 5:

$$A \cdot U + \frac{1}{2} Z_i \cdot I_1 - \frac{1}{2} Z_i \cdot I_2 = 0 \quad (3)$$

$$B \cdot U + Z_l \cdot I_1 + Z_t \cdot I_2 = 0 \quad (4)$$

$$C \cdot I_1 - D \cdot I_2 = I_e \quad (5)$$

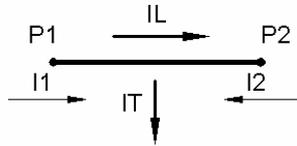


FIGURA 2 – definição das correntes I_1 , I_2 , I_T e I_L em um segmento.

Sendo Z_l e Z_t as matrizes de impedâncias longitudinais e transversais, respectivamente; A, B, C e D matrizes de topologia, definindo as ligações entre nós e segmentos; I_1 e I_2 os vetores de correntes de entrada de cada nó do segmento; U o vetor de tensão dos nós; e I_e o vetor de correntes injetadas, havendo neste caso somente uma injeção em um nó.

A relação entre as correntes transversal, longitudinal, I_1 e I_2 é dada pelas Equações 6 e 7, e ilustrado pela FIGURA 2:

$$I_l = \frac{I_1 - I_2}{2} \quad (6)$$

$$I_t = I_1 + I_2 \quad (7)$$

Os detalhes e a solução do sistema podem ser vistos na referências [3][9].

2.6 Tensões induzidas

Para determinar as tensões sobre as cadeias de isoladores, entre outros, será usada a definição formal de tensão:

$$u = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (8)$$

O uso do cálculo da tensão entre dois pontos através da diferença de potenciais acarreta em um erro, que é desprezível em baixas frequências, devido à falta do potencial vetor \vec{A} .

3.0 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

A estrutura é simulada ao longo de um alcance de frequências, aonde teoricamente são injetadas ondas senoidais para estimar o comportamento do sistema. Desta forma é realizado um levantamento da resposta da estrutura sob qualquer sinal, em condições puramente lineares.

Através da Transformada de Fourier é possível estudar um sinal no domínio da frequência, aonde é possível utilizar o teorema de convolução. A transformada inversa permite obter os efeitos no domínio do tempo. A implementação é realizada com a Transformada Rápida de Fourier (FFT), aonde são usados entre 1024 a 8192 pontos nas simulações, sendo suficiente na maioria dos casos.

4.0 - PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS

4.1 Desempenho de Linhas de Transmissão

O objetivo principal é de estudar a resposta de LTs frente a uma descarga conhecida. Em uma aproximação linear, sujeito à verificação posterior, são injetados sinais normalizados, de onde se calcula a sobretensão na cadeia de isoladores.

A forma de onda da corrente injetada, conforme FIGURA 3, foi escolhida partindo do princípio de simular a descarga atmosférica, procurando uma derivada máxima no momento de amplitude máxima [10].

A partir das sobretensões, estima-se o limite de corrente injetada no qual ocorre à falha de isolamento do *gap*. De posse do valor estatístico de ocorrência deste nível de descarga ou superior, obtém-se a probabilidade de falha.

Pode-se calcular uma probabilidade composta, partindo da probabilidade de cada elemento da descarga, como amplitude, tempo de frente de onda, ponto de incidência (torre, meio do vão, solo) e ângulo de incidência. No caso do ângulo e local de incidência, seria necessária uma nova simulação para determinar as novas interações entre os segmentos do canal de descarga e da estrutura.

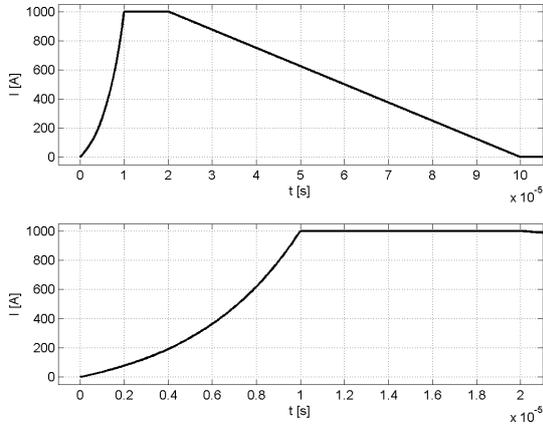


FIGURA 3 – Exemplo de forma de onda injetada e detalhe, tempo de frente de onda de 10 μ s [10].

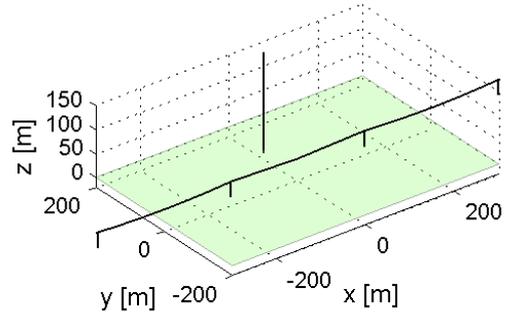


FIGURA 4 – Exemplo de uma montagem para simulação de descarga indireta.

A FIGURA 4 mostra uma configuração simples, para ensaio de descarga indireta. A saída das tensões no topo das torres são ilustrados nas Figuras 5 a 8. A descarga encontra-se próxima ao centro do vão 0, com as torres 1, 2 e 3 definindo a LT seguindo no eixo X positivo. As torres -1, -2 e -3 definem a LT no sentido contrário, e seus resultados são claramente simétricos.

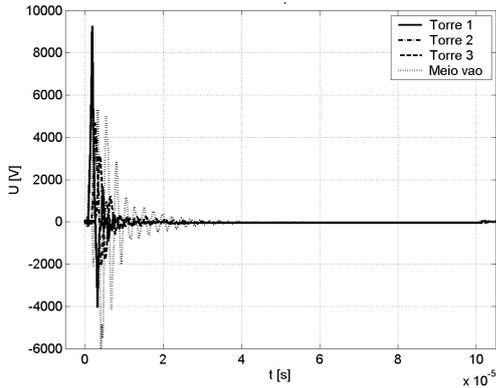


FIGURA 5 – Tensões nas torres, frente de onda 1 μ s

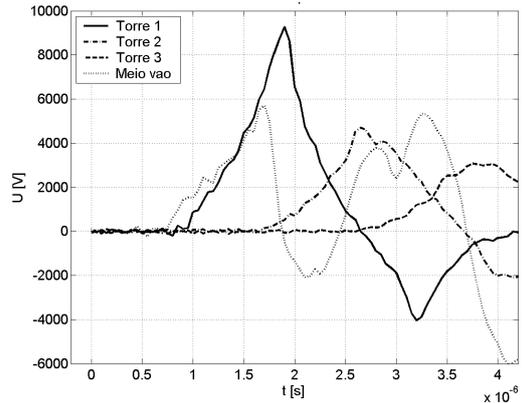


FIGURA 6 – Detalhe da FIGURA 5

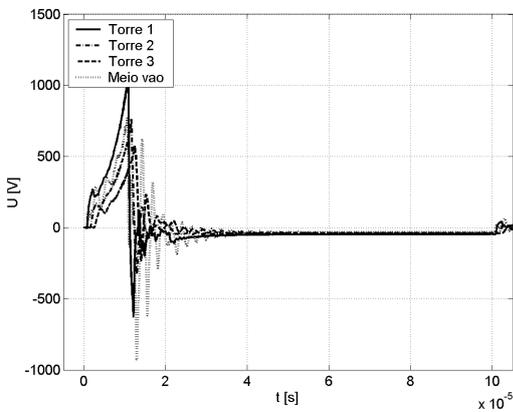


FIGURA 7 – Tensões nas torre, frente de onda 10 μ s

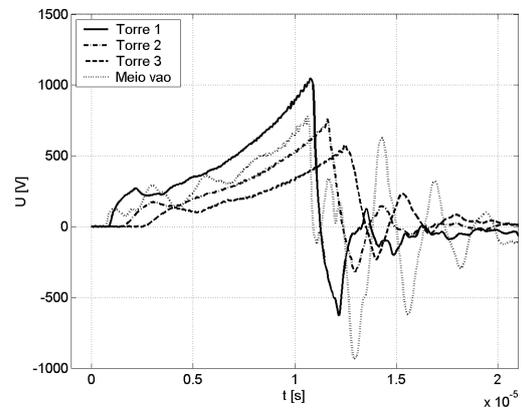


FIGURA 8 – Detalhe da FIGURA 7

Observa-se com clareza neste exemplo a redução da tensão no topo das torres conforme se afasta do ponto da descarga. Observa-se também o efeito com retardo, reflexões devido aos vários pontos de conexão, e a influência da frente de onda. Obtêm-se grandes variações nos resultados com o uso de diferentes tipos de solo, justificando mais uma vez o cuidado em sua modelagem.

4.2 Desempenho de Aterramentos

O estudo de aterramento passa automaticamente como um subconjunto da estrutura, com a adição de objetos de saída de relevância, por exemplo: tensão de toque, de passo e de transferência.

É possível avaliar o efeito no solo em cada frequência, por meio de curvas de nível, ou escolher pontos específicos e estudá-lo em um alcance de frequências. A FIGURA 9 ilustra o efeito no solo de uma malha de terra, com dimensões de 200 x 200 m, profundidade 0,5 m, corrente injetada de 1 A, senoidal de 60 Hz, no nó (-100, -100). A FIGURA 10 mostra o efeito na mesma malha de terra com uma corrente injetada senoidal de 1 MHz.

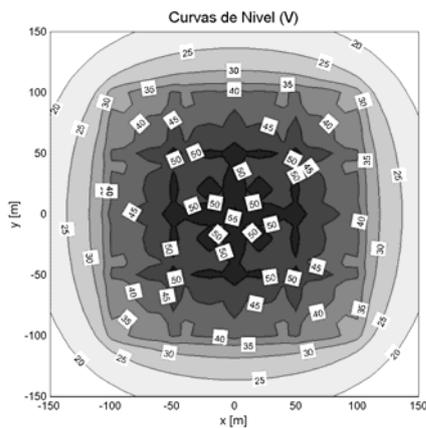


FIGURA 9 – Elevação de tensão no solo (módulo), frequência 60 Hz

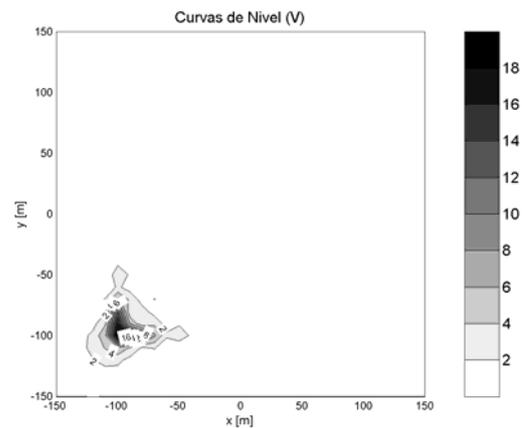


FIGURA 10 – Elevação de tensão no solo (módulo), frequência 1 MHz

Observa-se neste exemplo a distribuição de tensão ao longo da malha, que por sua vez é refletido na superfície do solo. Em altas frequências, a variação de tensão é brusca e concentrada no ponto de injeção. Neste exemplo em particular utilizou-se a modelagem de solo pela frequência [8], com parâmetros $k_0 = 50 \mu\text{S}/\text{m}$, $k_1 = 0,0021 \mu\text{S}/\text{m} \cdot \text{s}^\alpha$, $s^\alpha = 0,82$; configurando um exemplo de solo com má condutividade.

A variação do modelo de solo, tanto para parâmetros constantes quanto para parâmetros variáveis na frequência, altera significativamente o resultado. Porém, sempre se observa uma concentração de tensões no ponto de injeção de corrente, devido às constantes de propagação do meio.

4.3 Análise em Modelos Reduzidos

A validação inicial foi realizada através de ensaios em modelos reduzidos, realizadas no Cepel [1] [2]. Procurou-se nestes modelos respeitar a escala das grandezas físicas, aonde é necessário compatibilizar não só as dimensões da estrutura como o espectro de tempo e frequência.

TABELA 1– Exemplos de fator de escala em modelos reduzidos [5]

Comprimento	S
Tempo	S
Comprimento de Onda	S
Condutância	1 / S
Frequência	1 / S
Velocidade de Fase	1
Impedância	1

A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** demonstra o fator de escala em modelos reduzidos, compatibilizando as grandezas físicas, aceitando as aproximações para meios lineares. Certas grandezas não são

possíveis de serem transportadas para o ensaio, por exemplo, fenômenos no solo, mas os experimentos mostraram-se uma primeira opção na aferição do modelo.

Os modelos foram simulados buscando as condições usadas no ensaio: número de vãos, materiais utilizados, forma de ensaio da corrente de descarga, terminação da linha em seus extremos, entre outros detalhes. Foi utilizado um alcance de frequência de até 2 GHz, 16384 pontos de resolução para a FFT, de forma que o intervalo no tempo seja de 0,25 ns.

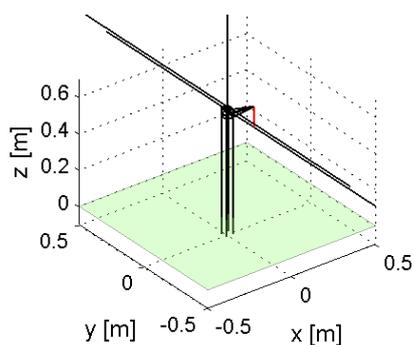


FIGURA 11 – Esboço do ensaio em uma torre treliçada simples.

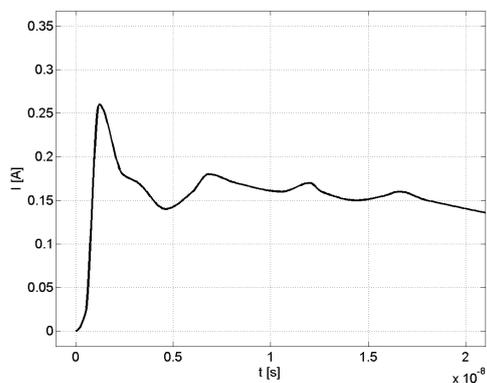


FIGURA 12 – Corrente injetada no ensaio e na simulação.

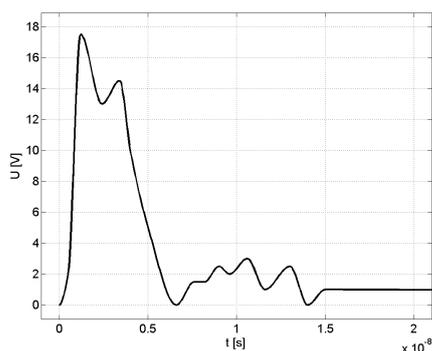


FIGURA 13 – tensão na cadeia de isoladores obtida no ensaio.

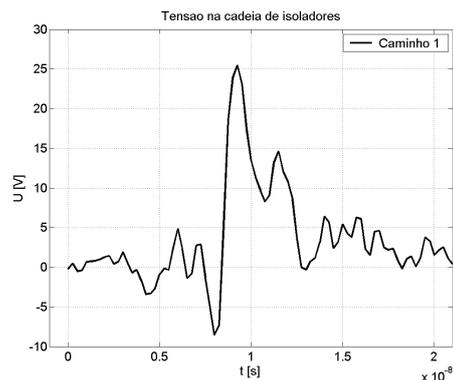


FIGURA 14 – tensão na cadeia de isoladores obtida na simulação.

As Figuras 11 a 14 ilustram o ensaio e a simulação de uma estrutura treliçada simples, com um cabo de fase e um pára-raios. A descarga é injetada na torre, com a forma de onda obtida no laboratório conforme FIGURA 12. A FIGURA 13 mostra o resultado do ensaio, e a FIGURA 14 o resultado da simulação.

Observa-se na simulação um atraso em relação à propagação do ponto de injeção, fato que não foi considerado no ensaio; e uma distorção inicial, aonde idealmente neste tempo de retardo da propagação não deveria haver tensão. Porém observam-se resultados compatíveis com o ensaio.

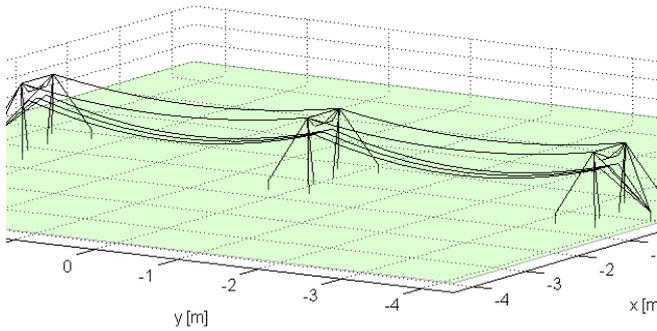


FIGURA 15 – Esboço de três torres estaiadas, referentes ao modelo reduzido de uma LT de 765 kV. Os condutores estão terminados nas extremidades por impedâncias, ligados no solo. Escala 1:75, medidas em metros.

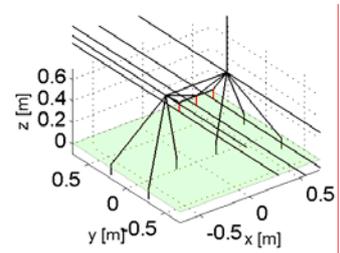


FIGURA 16 – Detalhe da torre trapézio 765 kV em modelo reduzido

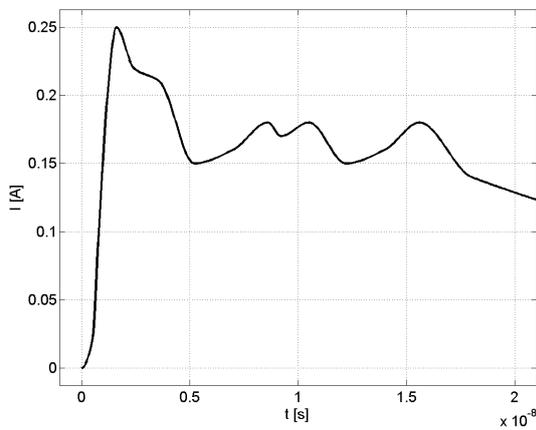


FIGURA 17 – Corrente injetada no ensaio

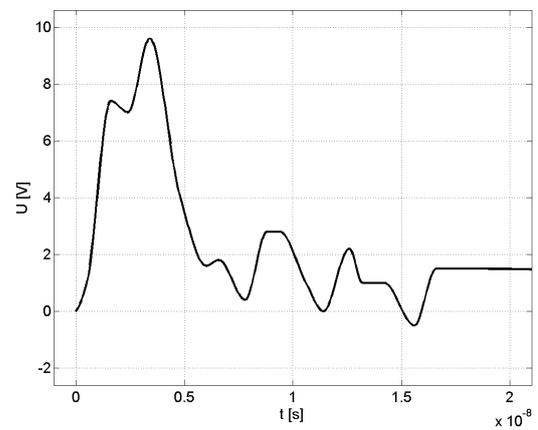


FIGURA 18 – Tensão medida no ensaio, fase lateral próxima à descarga

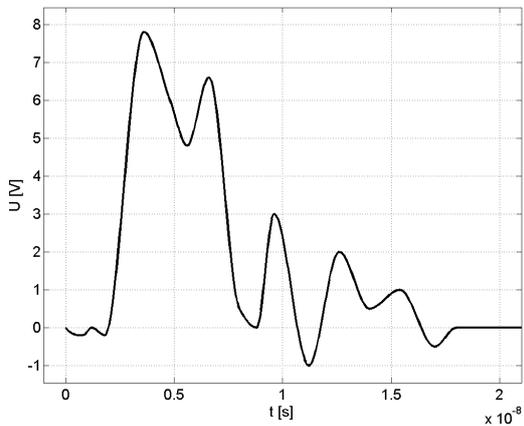


FIGURA 19 – Tensão medida no ensaio, fase central

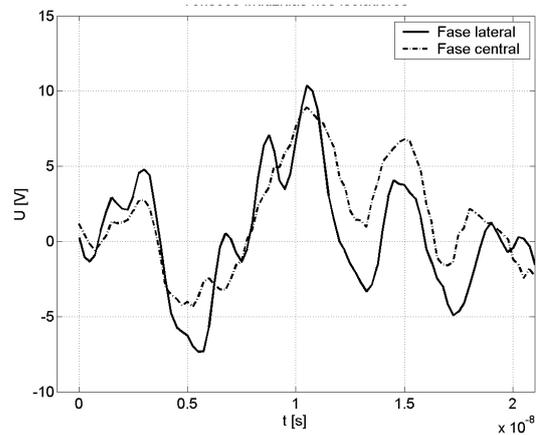


FIGURA 20 – Tensões calculadas na simulação

Como outro exemplo, temos o ensaio de um modelo reduzido de uma torre trapézio 765 kV (Figuras 15 e 16), com uma injeção de corrente na torre. A simulação foi realizada com uma modelagem de 309 segmentos, representando uma torre e dois vãos com cabos de fase e pára-raios, terminados nas extremidades com um aterramento. O “solo” da simulação é uma placa metálica.

As medições do ensaio e saídas da simulação, Figuras 17 a 20, são as tensões nas cadeias de isoladores. Neste exemplo também ocorrem oscilações no início da onda, no qual teoricamente deveria haver um tempo de propagação entre a injeção no canal e os pontos de medição.

A simulação mostra ondas de forma e amplitude compatíveis com os resultados do ensaio. Espera-se que um refinamento nos cálculos e configurações mais completas minimizem tais oscilações.

5.0 - IMPLEMENTAÇÃO

O modelo foi implementado em um ambiente de linguagem C++, utilizando recursos matemáticos de bibliotecas como IMSL [11], sendo essas implementadas a partir de códigos em Fortran. Fora das rotinas principais de cálculo, todo o sistema encontra-se em um ambiente de classes e objetos.

A linguagem C++ segue a filosofia de programação orientada a objetos, vantagem que foi aproveitada desde o início da implementação. Foram definidos objetos que descrevem cada parte do modelo:

- Elementos estruturais: cilindro, catenária, canal de descarga, impedância, equivalentes.
- Aquisição de saídas: tensão, corrente longitudinal, corrente transversal, impedância.
- Sinais: formas de onda que serão utilizadas na simulação, emulando as descargas atmosféricas.
- Configurações do caso: engloba todos os elementos e suas interconexões
- Estrutura: objeto interno de onde os elementos são desmembrados em nós e segmentos.
- Malha: objeto no qual interpreta os nós e segmentos e determina as matrizes de impedâncias. Inclui as rotinas principais de cálculo, de onde corre boa parte do tempo de execução.
- Coletor: objeto de reúne todas as saídas requisitadas, irá interpretar os resultados da malha e repassar para cada saída.
- Tempo e Freqüência: reúne informações sobre o espectro de freqüência ser considerado nas simulações, seu *dual* no domínio do tempo, o intervalo de discretização e a forma da transformada.

A modularidade do sistema permite a rápida implementação de novos modelos e a revisão dos existentes, com pouca interferência no conjunto.

6.0 - CONCLUSÕES

O sistema presente inicia um projeto, aonde passa por um processo contínuo de validação e refinamento do modelo. Encontra-se a dificuldade da falta de medições reais de descargas em linhas de transmissão, motivo no qual o trabalho iniciou-se com comparações de modelos reduzidos.

A implementação permite simulações até o limite computacional possível. Também é necessário determinar pontos em que o modelo possa ser simplificado, como por exemplo, a discretização de elementos, o que varia muito entre os casos possíveis. É necessário que o usuário conheça seu problema para otimizar a simulação, sem comprometer os resultados com simplificações excessivas ou extrapolar o tempo de processamento.

Uma solução para aumentar a capacidade computacional seria adaptar o sistema para um ambiente de computação paralela. Atualmente existem diversas bibliotecas matemáticas adaptadas para processamento paralelo, a maioria implementadas em Fortran e C [11].

6.1 Estudos futuros

O sistema permite uma grande abertura de aplicações e de expansão, agregando novos modelos. A expansão do algoritmo com outros estudos permitirá seu amplo uso na compreensão do fenômeno de descargas atmosféricas em linhas de transmissão.

É prevista a inclusão no sistema das seguintes características:

- Modelagem do canal de descarga, incluindo seus efeitos não-lineares;
- Modelagem do efeito corona nas estruturas;
- Implementação do modelo eletrogeométrico 3D à estrutura, integrando o estudo e fornecendo automaticamente a probabilidade de incidência de descargas;
- Consideração de diferentes tipos de solo (estratificação em camadas);
- Consideração de torres em desnível (diferença entre altitudes).

7.0 - AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Carlos Portela (COPPE/ UFRJ) pela orientação na tese de mestrado, de onde parte a base deste trabalho. Também agradeço aos amigos no CEPEL pelo apoio contínuo neste projeto.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Andrade, V. H. G., Fonseca, J. R., Neves, M. J. Resposta de LT's a Impulsos Atmosféricos Através da Utilização de Modelos Reduzidos - Parte I; Relatório Técnico 943/83, CEPEL, setembro, 1983.
- [2] Andrade, V. H. G., Fonseca, J. R., Neves, M. J. Resposta de LT's a Impulsos Atmosféricos Através da Utilização de Modelos Reduzidos - Parte II, Relatório Técnico 147/84, CEPEL, fevereiro 1984.
- [3] Arruda, C. Modelagem de Linhas de Transmissão para Análise de Comportamento quanto a Descargas Atmosféricas; Tese de Mestrado, COPPE/ UFRJ, 2003.
- [4] Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A., Castanheira, A. The Complex Ground Return Plane – A Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return; IEEE Trans. PAS, vol. 100, no. 8, agosto, 1981.

- [5] Garbagnati, E., Lo Piparo, G. B. "Modelli Geometrici Per La Determinazione Della Risposta Al Fulmine Di Un Sostegno Di Linea Aerea", L'Elettrotecnica, v. LVII, n. 8, Agosto 1970.
- [6] Grcev, L.; Rachidi, F. "On Tower Impedances for Transient Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, n. 3, Julho 2004.
- [7] Guidice, E., Lo Piparo, G. B. Calcolo Delle Sovratensioni Sulle Catene Di Isolatori Di Linee Aeree Nel Caso Di Fulminazione Del Sostegno; L'Elettrotecnica, vol. LVII, no. 4, abril, 1970.
- [8] Portela, C. "Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior", Proceedings IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 1004–1009, IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers - EMC Society, Seattle, Estados Unidos, agosto 1999.
- [9] Portela, C. Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems, I - Physical and Methodological Aspects; Proceedings IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Austin, Estados Unidos, agosto, 1997.
- [10] Portela, C. Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems, II - Practical Application Examples; Proceedings IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Austin, Estados Unidos, agosto, 1997.
- [11] Visual Numerics Inc. IMSL C Numerical Library version 5.5 - User's Guide, 4 volumes, <http://www.vni.com>, 2003.