



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

GSC 11  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO X**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC**

#### **DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA AMIGÁVEL PARA PROGRAMAS DE CÁLCULO DE CAMPOS E TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS**

**João Clavio Salari \***  
**CEPEL**

**Clayton Guimarães da Mata**  
**CEPEL**

**Carlos Portela**  
**COPPE/UFRJ**

## **RESUMO**

Apresenta-se neste artigo as características básicas de uma Interface Gráfica com o Usuário desenvolvida para a criação e edição de dados de entrada e visualização de resultados de programas de cálculo de campos e transitórios eletromagnéticos. Esta interface é estável e de processamento rápido, pelo fato de suas rotinas serem otimizadas através de funções da OpenGL (*Open Graphics Library*). Para facilidade de uso, a interface desenvolvida possui características de entrada e saída de dados similares àquelas disponíveis em tradicionais programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos, e, como um importante aspecto, suporta o emprego simultâneo de vários elementos lineares e não-lineares tipicamente empregados em cálculos de circuitos e de redes elétricas (elementos RLC lineares e não-lineares, linhas de transmissão, quadripolos, transformadores, chaves, diodos, pára-raios etc) e elementos tridimensionais formados por eletrodos cilíndricos, usualmente empregados nos cálculos de campos eletromagnéticos. Essas capacidades da interface são exemplificadas neste artigo aplicando-as para a geração de dados para o programa computacional FDETP (*Frequency Domain Electromagnetic Transients Program*), elaborado anteriormente pelos autores para o cálculo de transitórios e campos eletromagnéticos.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Campo Eletromagnético, Domínio da Frequência, Interface Gráfica com o Usuário, Transitórios Eletromagnéticos

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Modelos de cálculo fundamentados no domínio da frequência são particularmente robustos para o cálculo de transitórios eletromagnéticos. Entre várias características desses modelos, a consideração da dependência de parâmetros com a frequência é direta, e é clara a facilidade para o cálculo de campos eletromagnéticos. É também evidente a habilidade para se considerar no domínio da frequência a interação entre os modelos de cálculo de campos eletromagnéticos tridimensionais e modelos típicos de cálculo de redes elétricas, permitindo-se assim, eficazmente, a elaboração de modelagens versáteis.

Contudo, os processos de cálculo no domínio da frequência têm algumas dificuldades de implementação, e.g. aquelas associadas à modelagem de não-linearidades e ao processo de conversão frequência-tempo. Além disso, dependendo do estudo a ser feito, tais métodos podem demandar elevado tempo computacional, sobretudo para computadores antigos.

Conseqüentemente, há uma tendência clara ao uso de metodologias mais simples e mais rápidas, tipicamente no domínio do tempo, e, basicamente, empregando-se alguns modelos disponíveis em tradicionais programas para cálculo de transitórios eletromagnéticos (e.g., EMTP, EMTP-RV, ATP, PSCAD/EMTDC, MICROTRAN, NETOMAC e SPICE). Esses programas apresentam atualmente várias facilidades para introdução de dados e visualização de resultados [1-3].

Por outro lado, a despeito desses procedimentos expeditos serem razoavelmente satisfatórios para muitos estudos, existem algumas estratégias típicas de modelagem, usualmente em função de algumas limitações intrínsecas, que podem infringir bastante o comportamento físico real. Um exemplo é a modelagem de linhas de

transmissão para estudos de propagação de surtos, incluindo cabos aéreos, torres e sistemas de aterramento, desconsiderando-se importantes acoplamentos eletromagnéticos entre estes elementos, desconsiderando-se a dependência dos parâmetros do solo com a frequência e aplicando-se indiscriminadamente modelagens desenvolvidas para o regime estacionário ou quase estacionário.

Ultimamente, esse tipo de problema tem sido superado por intermédio da modelagem da respectiva parte do circuito elétrico no domínio da frequência, e.g., uma torre ou um sistema de aterramento, e criando-se uma interface de comunicação com o programa de cálculo no domínio do tempo em uso para a inclusão de tal elemento no circuito elétrico principal. Esse processo pode ser feito diretamente usando-se associações específicas de elementos RLC, ou, indiretamente, por intermédio de funções racionais de variáveis complexas, e.g., expressas através de seus zeros e pólos. Contudo, essas últimas estratégias demandam a execução de um programa computacional externo com base no domínio da frequência (e.g., TRANSMATER [4] ou NEC e 4-NEC [5]), e, se tal modelagem for feita inadequadamente, pode-se eliminar importantes efeitos de acoplamento entre diferentes elementos do circuito elétrico.

Portanto, com a intenção de minimizar tais simplificações e dificuldades de cálculo, e considerando-se a atual evolução do tempo de processamento dos computadores, os autores desenvolveram recentemente uma metodologia robusta de cálculo de transitórios eletromagnéticos no domínio da frequência, a qual foi empregada para a criação da primeira versão do programa computacional FDETP – *Frequency Domain Electromagnetic Transients Program* [6-9].

Esse trabalho inicial foi continuado, e desenvolveu-se uma Interface Gráfica com o Usuário (IGU) para o programa FDETP. Apesar de estar em seu estágio inicial, essa nova facilidade tem contribuído consideravelmente para a facilidade de uso do programa FDETP. Além dessa grande vantagem, ressalta-se que os aspectos fundamentais deste trabalho recaem no fato da IGU desenvolvida incorporar vários modelos de elementos típicos de análises de transitórios e de campos eletromagnéticos, e, ainda, possuir concepção básica que permite com um impacto mínimo a inclusão de novas classes na base computacional já implementada. Portanto, a migração para outras aplicações da Engenharia torna-se uma tarefa fácil. Por exemplo, no CEPEL, a base de programação desta IGU foi empregada recentemente para a geração de dados para um programa de cálculo de confiabilidade em subestações de energia elétrica.

O objetivo deste artigo é portanto o de introduzir esta IGU e apresentar a sua aplicação para dois exemplos práticos e reais, analisados pelo programa FDETP, nomeadamente um circuito típico de medição de sistemas de aterramento e um trecho de uma linha de transmissão aérea trifásica de circuito duplo de 500 kV submetida à injeção de surtos.

## 2.0 – CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

Diferentemente de vários dos programas computacionais existentes, o programa FDETP é uma ferramenta computacional para a simulação de campos e transitórios eletromagnéticos no domínio da frequência em “circuitos elétricos” que podem ser compostos simultaneamente por dois grupos básicos de elementos lineares e não-lineares (Figura 1), quais sejam:

- (i) Elementos do tipo “*Circuito*”: elementos tipicamente empregados em análises de circuitos e de redes elétricas, tais como elementos RLC lineares e não-lineares, quadripolos representativos de cabos de linhas de transmissão, quadripolos genéricos, transformadores, chaves, diodos, pára-raios etc.
- (ii) Elementos do tipo “*Campo*”: elementos tridimensionais do tipo “fonte de campo eletromagnético”, com o formato de eletrodos cilíndricos, tipicamente empregados em análises de campos eletromagnéticos. Esses elementos podem ser usados isoladamente ou em grupos previamente estabelecidos no programa FDETP, estes para a fácil modelagem de torres de linhas de transmissão, sistemas de aterramento típicos, cabos com posicionamento arbitrário (no ar ou no solo; com ou sem efeitos de catenárias), canal da descarga atmosférica, toróides, grandes esferas etc.

O programa FDETP também possui interligações com módulos especiais, e.g. módulos que modelam o efeito de ionização do solo junto a eletrodos de aterramento e o efeito coroa em cabos de linhas áreas de transmissão. O processo de conversão frequência-tempo é executado através da Série de Fourier, Integral de Fourier ou transformada de Laplace; o primeiro método é útil para a análise de soluções periódicas no tempo, e os dois últimos são aplicáveis a soluções periódicas e não periódicas. Com algumas precauções, o primeiro método também pode ser usado para a análise de soluções não periódicas, e.g., aplicando-se algoritmos rápidos baseados na FFT (*Fast Fourier Transform*).

O programa FDETP foi desenvolvido na linguagem de programação Fortran 90. Entretanto, apesar da grande vantagem associada à sua robustez numérica, para a introdução dos dados é necessário editar um arquivo texto, e, similarmente, todos os resultados são também armazenados em arquivos texto.

Portanto, considerando-se o fato de que tão mais complexo é o circuito elétrico a ser modelado tão mais complexo será o arquivo de dados de entrada, tornou-se necessário desenvolver uma IGU para acelerar esta fase de edição de dados, visualizar facilmente o circuito elétrico em análise, e, naturalmente, evitar erros de digitação típicos.

Esta IGU foi construída empregando-se uma modelagem orientada a objetos (MOO) usando-se o ambiente Microsoft Windows, a linguagem de programação C++ e a ferramenta Borland C++ Builder como Ambiente de

Desenvolvimento Integrado (ADI). A interface entre o software e o processo de formação de imagens gráficas vetoriais 2D e 3D é feita por funções da OpenGL (*Open Graphics Library*). Essas funções garantem ao aplicativo um alto desempenho computacional devido a serem estáveis, otimizadas e rápidas, pois são de acesso a baixo nível para o hardware (placa de vídeo). A OpenGL consiste em um código aberto, poderoso, bastante difundido mundialmente e muito utilizado por empresas de jogos virtuais [10].

A linguagem C++ é uma extensão da linguagem C, onde se incluiu a Programação Orientada a Objetos (POO). A linguagem de programação C é estruturada e de relativo baixo nível, o que garante a portabilidade do código fonte e um programa objeto muito eficiente, rápido e compacto. O compilador C++ é, portanto, responsável pela intercomunicação entre o usuário e o software, enquanto que a OpenGL é responsável pela intercomunicação entre softwares e hardwares, encerrando a inferência homem-máquina [11].

Baseando-se na POO, o sistema computacional é modelado usando-se classes. O conceito de classe proporciona ao programador uma ferramenta para a criação de tipos novos que podem ser usados convenientemente como tipos pré-definidos. No presente caso de modelagem de circuitos elétricos, uma classe representa um resistor, uma torre da linha de transmissão, etc.

Em síntese, a IGU desenvolvida possui as seguintes características principais:

- Facilidades para introdução e edição de dados de entrada semelhantes àquelas encontradas em vários simuladores de transitórios eletromagnéticos.
- Possibilidade de uso de vários modelos de elementos lineares e não-lineares pré-definidos, dos tipos encontrados em simuladores típicos de transitórios eletromagnéticos, como, e.g., elementos RLC lineares e não-lineares, cabos de linhas de transmissão, quadripolos, transformadores, chaves, diodos, pára-raios etc.
- Permite o uso generalizado de modelos de eletrodos cilíndricos tridimensionais, isoladamente ou em alguns grupos adequadamente pré-definidos, estes para a fácil simulação de, e.g., sistemas de aterramento típicos, torres de linhas de transmissão, cabos de linhas de transmissão (incluindo o efeito das catenárias dos cabos e pontos de suspensão diferentes), grandes esferas, toróides etc.
- Alto desempenho, associado à confiabilidade e robustez numérica.
- Visualização de resultados através de gráficos bidimensionais.

Esses aspectos estão detalhados nos itens a seguir.

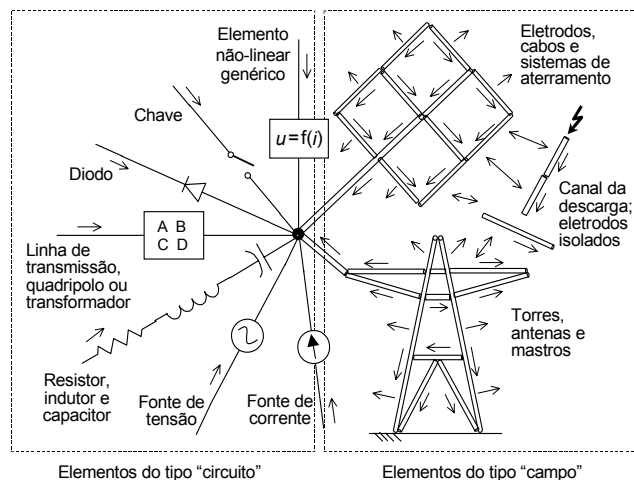


FIGURA 1 – Exemplo estilizado de diferentes componentes conectados em um nó do circuito elétrico

### 3.0 – A IGU DESENVOLVIDA

De acordo com os conceitos da Engenharia de Software, para assegurar que um sistema computacional seja de boa qualidade e confiável, independentemente das suas condições de operação, três passos básicos necessitam ser atendidos [12]. Estes passos estão apresentados na Figura 2.

As análises do sistema e de requisitos do sistema caracterizam a etapa de definição do software, e, para a presente aplicação, advêm das características do programa FDETP. A etapa de construção, exemplificada adiante, corresponde à metodologia empregada na interface. O passo final, a manutenção, fecha o ciclo de vida da engenharia de software e consolida a confiabilidade e a aplicabilidade do sistema.

Na interface desenvolvida, a interação com o usuário é feita por intermédio de blocos gráficos (dados de entrada). Como a solução empregada no programa FDETP é baseada em uma formulação do tipo nodal (Figura 1), é necessário conhecer a posição espacial e os nomes de todos os nós no contexto global, i.e., na tela do computador. Nesse sentido, considerou-se inicialmente duas possibilidades para construção e visualização do

circuito elétrico em análise, quais sejam:

- Introduzindo-se os elementos do circuito tridimensionalmente.
- Introduzindo-se os elementos do circuito através de uma representação esquemática bidimensional.

A primeira forma pode ser encontrada em alguns programas computacionais tipicamente voltados para o cálculo de campos eletromagnéticos tridimensionais. Esse é o caso, e.g., do programa 4-NEC, o qual incorpora tridimensionalmente eletrodos cilíndricos e elementos lineares do tipo RLC. Além disso, nota-se que muitos programas permitem a entrada de dados através de tabelas, e somente um pequeno grupo de programas oferece uma entrada de dados mais flexível valendo-se de aplicativos CAD (*Computer Aided Design*).

A segunda forma, a qual é de programação mais simples, pode ser encontrada, e.g., nos programas computacionais da Série EMTP, listados anteriormente. Entretanto, esses programas somente disponibilizam em sua base computacional elementos do tipo “circuito”, apesar de, para análises especiais, envolvendo cálculos de campos eletromagnéticos tridimensionais, que deverão ser feitos “externamente”, ser possível agregar uma interface de comunicação com tal processo.

Deve-se citar ainda que, em muitos casos, como o projeto de estruturas, o ambiente tridimensional é inevitável, especialmente se tal estudo requerer modificações ou otimização interativa com o sistema de cálculo. Nesses casos, a segunda forma anterior torna-se inadequada.

Portanto, considerando-se as vantagens e desvantagens das duas formas anteriores de introdução de dados, decidiu-se elaborar a IGU baseando-se na segunda forma anterior e considerando-se os elementos do tipo “campo” como elementos do tipo “circuito” que possuem informações adicionais, a serem fornecidas pelo usuário. Tais informações adicionais permitem a representação tridimensional do elemento, e são, basicamente, a designação dos seus nós de comunicação com outros elementos (que podem ser do tipo “campo” ou do tipo “circuito”), as coordenadas tridimensionais de todos os nós do elemento, e alguns dados referentes ao raio, ao tipo de material e a forma de subdivisão dos seus eletrodos constituintes. Na presente versão da interface elaborada, todos os dados tridimensionais são introduzidos através de tabelas.

Como exemplo, mostra-se na Figura 3 dois blocos gráficos (modelos) disponíveis na IGU desenvolvida, nomeadamente um resistor (a) e uma torre de uma linha de transmissão aérea (b). Para cada bloco, as linhas tracejadas delimitam o elemento e os pontos pretos representam os nós de comunicação do elemento com outros elementos. No processo criado, quando dois nós de diferentes elementos estão para serem conectados pelo usuário, na região delimitada por estes dois nós, ambos os nós atuam “atraindo” um ao outro (similarmente a uma força gravitacional), facilitando o processo de conexão. Cumpre notar que, no caso de grupos de eletrodos pré-estabelecidos pelo programa FDETP para a formação de elementos conhecidos, como o exemplo desta torre, é suficiente informar apenas alguns dados básicos e as coordenadas de alguns pontos principais do elemento, sendo os demais dados de todos os eletrodos que o constituem gerados automaticamente.

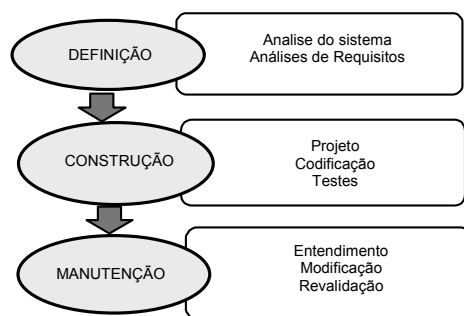


FIGURA 2 – Passos básicos para o processo de qualificação do software

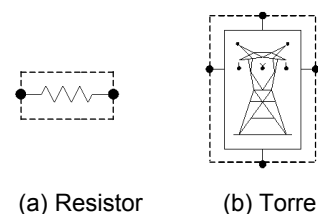


FIGURA 3 – Blocos gráficos

Para cada bloco gráfico há uma referência relativa na sua margem superior esquerda. A partir deste ponto são definidas todas as primitivas gráficas (linhas, quadrados, pontos, triângulos etc) que definem a figura. Esses pontos são agrupados e armazenados em uma matriz alocada dinamicamente e contendo todas as informações gráficas de cada objeto. Dentro de uma mesma matriz é possível especificar diferentes identificadores para cada parte do bloco gráfico. Esse conceito é crucial para determinar, caracterizar e diferenciar os nós do elemento.

Finalmente, presentemente, esforços estão sendo envidados para a implementação de visualização tridimensional de elementos na interface gráfica, além de melhorias para a entrada de dados de eletrodos cilíndricos.

#### 4.0 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

A seguir são apresentados dois exemplos de aplicação, cujos dados foram introduzidos através da IGU desenvolvida e cujo cálculo foi feito empregando-se o programa FDETP, designadamente um circuito elétrico para a medição da impedância equivalente de um sistema de aterramento e um trecho de linha de transmissão trifásica de circuito duplo de 500 kV. Ambos os exemplos representam sistemas reais.

#### 4.1 Medição de Um Sistema de Aterramento

Considera-se neste exemplo um circuito de medição envolvendo um sistema de aterramento, conforme se ilustra na Figura 4, adaptada de [13]. Um gerador de impulso, que pode ser tratado como uma fonte de tensão, está localizado no topo do sistema de aterramento a ser medido, sendo que tal gerador é instalado em série com um resistor de  $800 \Omega$ . Os tempos de frente e de meia onda da forma de onda da tensão injetada são iguais a  $0,063 \mu\text{s}$  e  $500 \mu\text{s}$ , respectivamente. O pico da tensão é da ordem de  $410 \text{ V}$ . Informa-se em [13] que o solo possui condutividade elétrica e permissividade dielétrica relativa iguais a  $2,28 \text{ mS/m}$  e  $50$ , respectivamente.

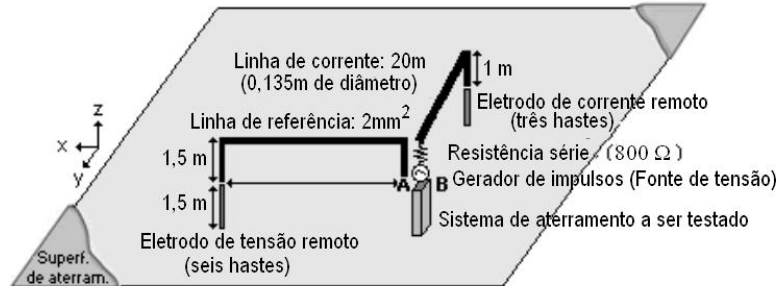


FIGURA 4 – Circuito elétrico para a medição da impedância equivalente de um sistema de aterramento

Descreve-se em [13] que o sistema de aterramento em teste ocupa uma área transversal de  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$  e tem o comprimento de  $3 \text{ m}$ , além de ser formado por hastes de ferro com o raio de  $10 \text{ mm}$  e cabos condutores com o raio de  $2,5 \text{ mm}$ . Como [13] não informa maiores detalhes sobre as conexões entre tais hastes e cabos, para a execução da simulação através do programa FDETP, assumiu-se que o sistema de aterramento é composto por quatro hastes paralelas interligadas por cabos horizontais, sendo que cada haste situa-se nos vértices de um quadrado com  $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ , e o topo das hastes está localizado a  $0,5 \text{ m}$  abaixo da superfície do solo.

Na Figura 5 mostra-se a modelagem deste exemplo por intermédio da IGU desenvolvida. Na Figura 6 mostra-se a tensão entre os nós A e B calculada pelo programa FDETP, incluindo os valores medidos apresentados em [13]. Como uma informação adicional, cita-se que esta representação expedita demandou o cálculo de um “circuito elétrico” com cerca de 90 nós e o emprego de cerca de 100 frequências para a obtenção de resultados com precisão satisfatória para o intervalo de tempo analisado. O processo de conversão frequência-tempo foi efetuado através de uma solução numérica da Transformada de Laplace.

Pode-se concluir destes resultados que, a despeito da modelagem aproximada adotada para a representação do circuito de medição, especialmente para a modelagem do sistema de aterramento em medição, observou-se um ótimo ajuste entre valores calculados e medidos.

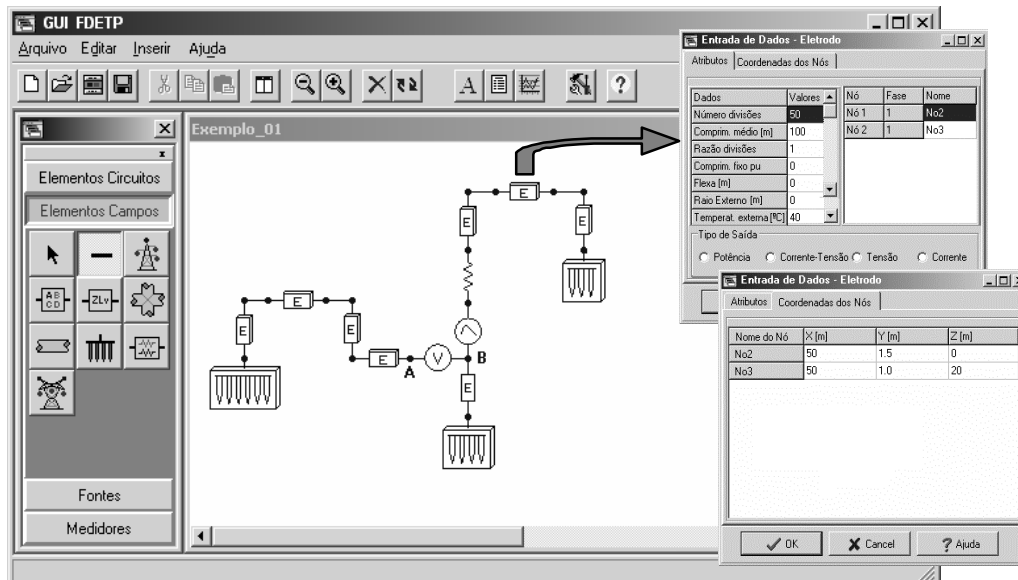


FIGURA 5 – Modelagem do circuito de medição do sistema de aterramento pela IGU desenvolvida

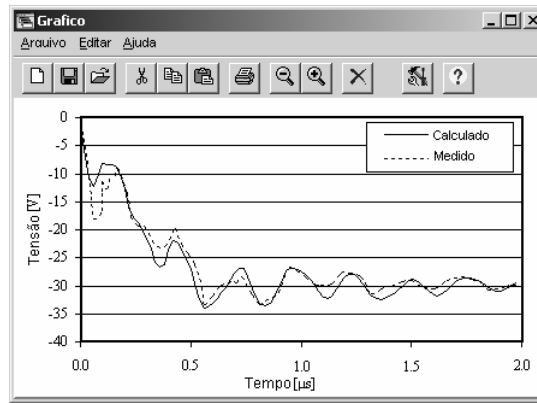


FIGURA 6 – Tensões medidas e calculadas entre os nós A e B

#### 4.2 Trecho de Linha de Transmissão de 500 kV

Considera-se neste exemplo uma linha de transmissão trifásica de circuito duplo de 500 kV e com dois cabos pára-raios, conforme se ilustra nas Figuras 7 e 8. Este exemplo de linha foi descrito originalmente em [14] e, desde então, tem sido usado para a validação de vários modelos computacionais de linhas de transmissão.

De acordo com [14], injetando-se no cabo pára-raios de índice P uma corrente cuja forma de onda é caracterizada por um tempo de frente de  $3 \mu\text{s}$  e amplitude em torno de  $3,4 \text{ A}$ , mediu-se as conseqüentes tensões induzidas nas cadeias de isoladores das fases situadas no mesmo lado deste cabo pára-raios (A, B e C). Informa-se também em [14] que a impedância de aterramento equivalente das torres é igual a  $17 \Omega$ .

Na Figura 9 mostra-se a modelagem dos três vãos e das quatro torres apresentadas na Figura 7 pela IGU que foi desenvolvida. Cumpre observar que, para simplicidade de modelagem e para aceleração do processo de cálculo, utilizou-se as facilidades de modelagem híbrida proporcionadas pelo programa FDETP; i.e., empregou-se eletrodos cilíndricos tridimensionais somente para representar os vários componentes metálicos das torres, e o conhecido modelo de quadripolo no domínio da frequência para a representação dos cabos da linha, além de um grupo de quatro resistores de  $64 \Omega$  (tal que o resultado da combinação em paralelo resulte o valor  $17 \Omega$ ) conectados nas quatro pernas de cada torre. Como um interessante e eficiente resultado, esta representação expedita demandou o uso de apenas 200 nós no "circuito elétrico" em estudo e 40 frequências de cálculo para proporcionar resultados satisfatórios para o intervalo de tempo analisado. O processo de conversão frequência-tempo foi também efetuado através de uma solução numérica da Transformada de Laplace.

As tensões calculadas pelo programa FDETP para as fases B e C estão apresentadas nas Figuras 10 e 11. Novamente, nota-se o excelente ajuste ocorrido entre valores medidos e calculados. Conclusões semelhantes foram também estabelecidas para os resultados obtidos para a fase A.

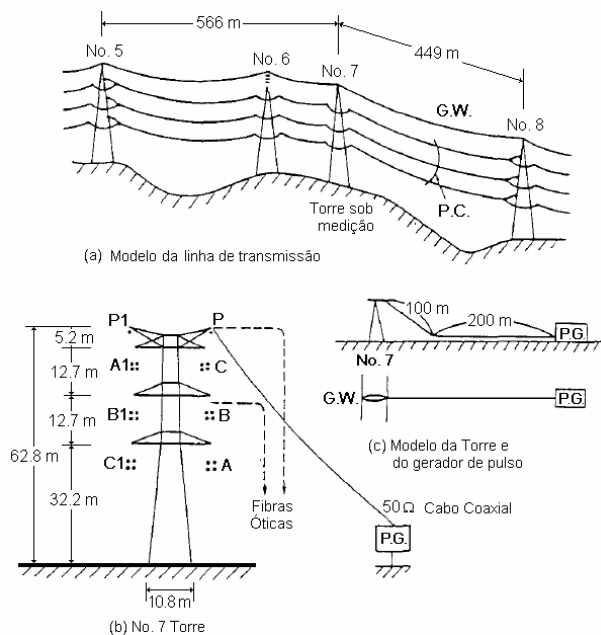


FIGURA 7 – Características básicas do trecho de linha de transmissão de circuito duplo de 500 kV

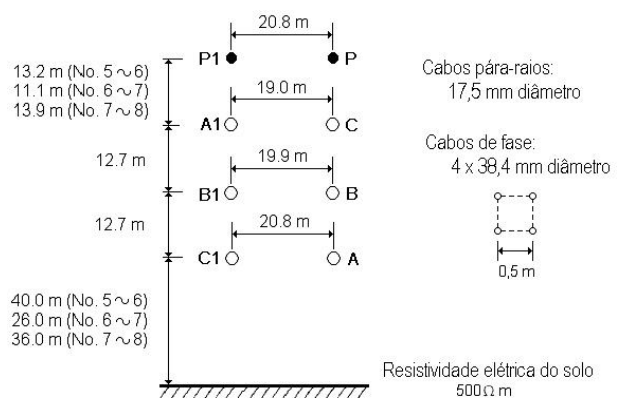


FIGURA 8 – Distância entre cabos e alturas médias entre cabos e entre cabos e solo

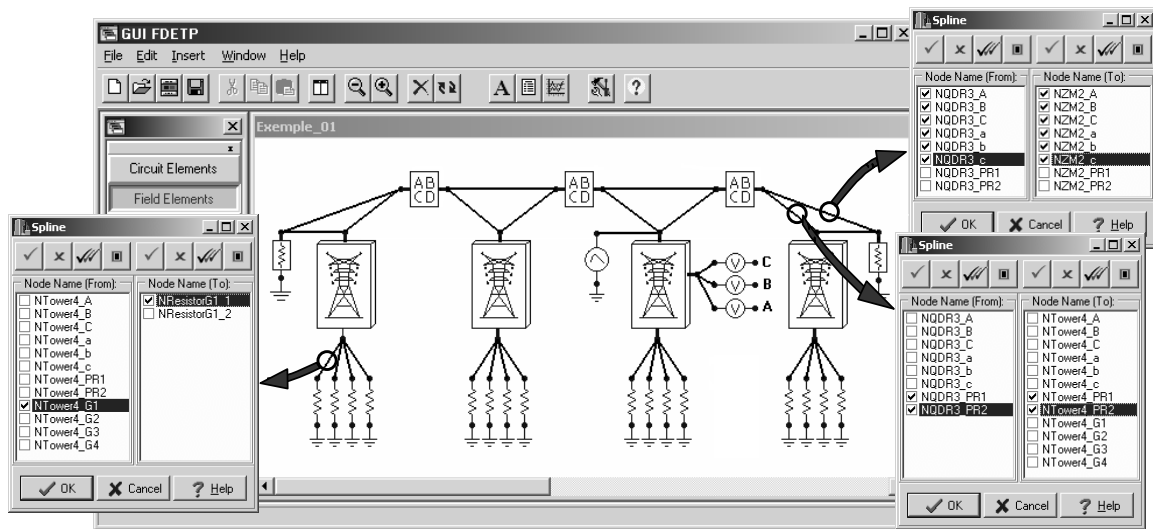


FIGURA 9 – Modelagem do trecho de linha de transmissão pela IGU

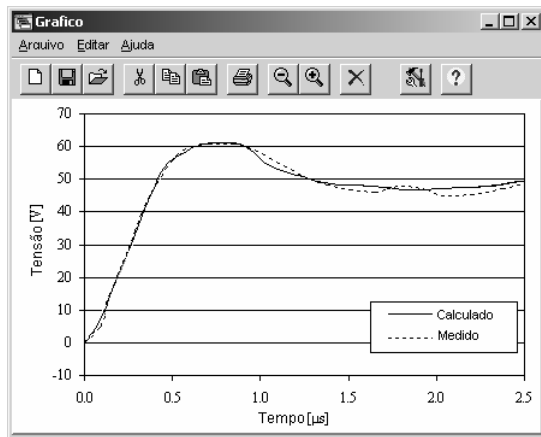


FIGURA 10 – Tensões medidas e calculadas na cadeia de isoladores da fase C

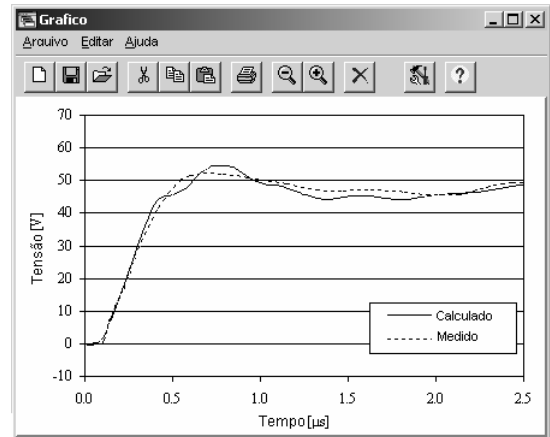


FIGURA 11 – Tensões medidas e calculadas na cadeia de isoladores da fase B

## 6.0 - CONCLUSÕES

A Interface Gráfica com o Usuário (IGU) apresentada neste artigo mostrou-se uma ferramenta útil para a criação e edição dos dados de entrada e para a visualização de resultados de programas de cálculo de campos e transitórios eletromagnéticos. Esta interface é estável e de processamento rápido, pelo fato de suas rotinas internas serem otimizadas por funções da OpenGL.

Além de possuir facilidades de introdução e visualização de dados similares àquelas disponíveis em vários programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos, esta IGU tem a grande vantagem de permitir o uso simultâneo de vários elementos lineares e não-lineares do tipo encontrados em usuais programas computacionais de análises de circuitos e redes elétricas (e.g., elementos RLC lineares e não-lineares, linhas de transmissão, quadripolos, transformadores, chaves, diodos, pára-raios etc) com elementos do tipo eletrodos cilíndricos tridimensionais, tipicamente disponíveis em programas de cálculo de campos eletromagnéticos.

Essas características proporcionam à IGU desenvolvida uma potencialidade de emprego para vários programas computacionais existentes no Setor. Neste artigo, exemplificou-se esta facilidade por intermédio da integração da IGU com o programa computacional FDETP [7-9], e, desta forma, simulando-se facilmente dois exemplos de aplicação.

Estão previstas futuras implementações no sentido de serem pré-estabelecidos outros componentes de circuitos elétricos e melhores facilidades de edição, introdução e visualização tridimensional de dados.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PRIKLER, L., HØIDALEN, ATPDraw for Windows 3.1x/95/NT version 1.0 – Manual do Usuário, Novembro, 1998

- [2] WOODFORD, D., Introduction to PSCAD V3, Manitoba HVDC Research Centre, Janeiro, 2001
- [3] LEHN, P., RITTIGER, J., KULICKE, B., "Comparison of the ATP Version of the EMTP and the NETOMAC Program for Simulation of HVDC Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 4, pp. 2048-2053, Outubro, 1995
- [4] PORTELA, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems; I Physical and Methodological Aspects; II Practical Application Examples", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, pp. 379-390, Austin, E.U.A., 1997
- [5] BURKE, G. J., POGGIO, A. J., Numerical Electromagnetic Code (NEC) - Method of Moments, Part I: Program Description – Theory, Lawrence Livermore Laboratory, January 1981 (Disponível para cópia em: <http://www.nec2.org/> )
- [6] SALARI F., J. C., PORTELA, C., "Frequency Dependent Behaviour of Grounding Systems", VII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA) Proceedings, pp. 75-81, Curitiba, Brasil, Novembro, 2003
- [7] SALARI F., J. C., PORTELA, C., "Development of a Frequency Domain Electromagnetic Transients Program", VIII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA) Proceedings, pp. 243-248, São Paulo, Brasil, Novembro, 2005
- [8] SALARI, J. C., PORTELA, C., "Uma Metodologia para o Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos – Aplicação ao Cálculo da Propagação de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão". In: *Anais do XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Curitiba, Brasil, 2005
- [9] SALARI, J. C., "Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Freqüência", Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006 (Disponível para cópia em: <http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2006120601.pdf> )
- [10] SHREINER, D., OpenGL Reference Manual: The Official Reference Document to OpenGL, Addison-Wesley, 4th Edition, Março, 2004
- [11] STROUSTRUP, B., C++ Programming Language, Addison-Wesley, 3a. edição, 1997
- [12] PRESSMAN, R., Software Engineering: A Practitioner's Approach, McGraw-Hill, 6a. edição, Nova York, E.U.A., 2005
- [13] TANABE, K., "Novel Method for Analyzing Dynamic Behavior of Grounding Systems Based on the Finite-Difference Time-Domain Method", IEEE Power Engineering Review, pp. 55-57, Setembro, 2001
- [14] ISHII, M., KAWAMURA, T., KOUNO, T., et al., "Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, n. 3, pp. 1327-1335, Julho, 1991