



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

GLT 20
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Athanasio Mpalantinos Neto Carlos Ruy Nunez Barbosa (*) Luís Adriano de Melo Cabral Domingues

João Ignácio da Silva Filho Victor Hugo Gomes de Andrade Hélio de Paiva Amorim Júnior

Paulo Roberto Gonçalves de Oliveira

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Jorge Amon Filho Denesmar Gomes Pimenta

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

RESUMO

Este informe técnico apresenta os desenvolvimentos técnicos efetuados no Projeto P&D desenvolvido por CEPEL e FURNAS com o objetivo de pesquisar o atual estágio de desenvolvimento dos métodos de cálculo e identificar as limitações e simplificações das técnicas atualmente utilizadas, visando o desenvolvimento de modelos e programas de computador para avaliação do desempenho de linhas de transmissão.

Durante a realização do projeto foram desenvolvidas atividades de identificação e descrição dos diversos modelos de cálculo, implementações computacionais destes modelos com suas respectivas documentações e realizadas medições em linhas de transmissão do Sistema FURNAS com o objetivo de validar os resultados obtidos pelos programas computacionais implementados.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão, campo elétrico, campo magnético, risco de falha, surto de manobra, perda joule, perda corona, radiointerferência, ruído audível.

1.0 - INTRODUÇÃO

O projeto de uma linha de transmissão (LT) envolve o dimensionamento e cálculo de diversas grandezas como: escolha dos condutores, distâncias entre condutores de fases distintas e entre condutores e estrutura / solo, altura e posicionamento relativo dos cabos, etc. Essas grandezas por seu lado afetam outros itens de desempenho como valores de campos eletromagnéticos e interferências na vizinhança da linha e no limite da faixa, induções em objetos metálicos, perdas de energia, desligamentos por surtos de manobra, etc.

Os métodos e técnicas atualmente utilizados nos projetos de linhas de transmissão foram desenvolvidos há cerca de 30 anos e por muito tempo foram utilizados nos seus projetos. Porém, à dificuldade cada vez maior de obter

faixas de terreno para passagem linhas associada à necessidade atual de redução de custos, conjugados com a atuação mais efetiva dos órgãos de fiscalização e a atuação de órgãos públicos e representantes da sociedade, impõem à necessidade de maior segurança, critérios mais rígidos e confiança nos valores de projeto.

A atuação das empresas transmissoras no projeto e construção de novas Linhas de Transmissão exige que se atenda a dois requisitos fundamentais:

- Projetos otimizados, de modo a garantir um custo competitivo para as soluções estudadas;
- Projetos confiáveis, de modo a atender às exigências de segurança e continuidade do serviço, evitando situações de indisponibilidade.

Como muitas das técnicas e metodologias que vêm sendo utilizadas foram desenvolvidas num contexto diferente, onde se priorizava, na maior parte dos casos, apenas a segurança – obtida meramente através de coeficientes de segurança conservativos, originando folgas de projeto – tornou-se necessário evoluir esse ferramental tecnológico, de modo a atender às novas demandas.

Para atender esta exigência é necessário desenvolver e aperfeiçoar os modelos de cálculo, de modo a aumentar sua precisão e potencial de aplicação, aproveitando a maior capacidade computacional existente atualmente e as modernas técnicas de simulação numérica. Com esta finalidade FURNAS iniciou dois projetos de P&D plurianuais, em parceria com o CEPTEL.

O primeiro projeto – desenvolvimento de modelos eletrogeométricos para linhas de transmissão – teve por objetivo desenvolver uma modelagem para linhas de transmissão aéreas, que permita calcular os valores de campo elétrico e magnético nos vãos destas e a implementação de um programa digital que permita adaptar esta modelagem para as linhas e torres do Sistema Furnas, de forma automática – mínima interferência do usuário na forma de modelar as torres e condutores. Assim obtem-se, desta forma, níveis, perfis e mapas de campo elétrico e magnético para qualquer trecho dessas linhas. Os modelos são inteiramente tridimensionais para efetuar uma modelagem precisa das linhas reais.

O sistema computacional está associado a um banco de dados de modelos dos principais tipos de torres de Furnas, desta forma a modelagem das torres do vão em estudo pode ser obtida através deste banco e adaptada automaticamente, diminuindo consideravelmente o tempo e esforço na análise do trecho da linha.

A partir dos estudos desenvolvidos nas áreas de métodos numéricos e desempenho de linhas de transmissão, o projeto consistiu nas seguintes etapas:

- verificação dos métodos de modelagem a serem utilizados (elementos finitos, elementos de contorno, simulação de cargas, volumes finitos, etc.);
- desenvolvimento de uma modelagem eletrogeométrica geral para linhas de transmissão aéreas;
- implementação de um sistema adaptativo, baseado na modelagem de linhas de transmissão desenvolvida.

O segundo projeto – avaliação do desempenho de linhas de transmissão – teve incluído no escopo do seu desenvolvimento os cálculos de campo elétrico e magnético, tanto nos condutores quanto na vizinhança das LT, estudos de perdas, interferências, suportabilidade do isolamento e cálculo do risco de falha. Estabeleceu-se como objetivo, também, que as técnicas a serem desenvolvidas fossem aplicáveis a configurações compactas e não convencionais.

Ainda no escopo do projeto, foram desenvolvidas interfaces gráficas de entrada e saída de dados para os programas computacionais no sentido de agilizar a implementação dos dados realizando uma verificação imediata dos erros e facilitando a análise dos resultados.

Finalmente para ambos os projetos foram realizadas medições de campo para aperfeiçoar e validar os modelos implementados.

Neste informe técnico apresentam-se os desenvolvimentos realizados, comparando-se alguns resultados obtidos com a utilização das novas ferramentas computacionais com as medições realizadas nas linhas de transmissão de FURNAS.

2.0 - DESENVOLVIMENTO DE MODELOS ELETROGEOMÉTRICOS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste primeiro projeto foram consideradas as alternativas para escolha do método numérico adequado para aplicação no projeto e desenvolvida uma interface gráfica para aplicação do método e ainda um banco de dados dos modelos de LT existentes.

2.1 Método de Simulação de Cargas

O cálculo dos valores de campo e potencial em qualquer ponto do espaço, dado um arranjo arbitrário de eletrodos com potenciais especificados ou potenciais flutuantes, pode ser remetido à solução do problema central da eletrostática, que é formulada por meio de uma equação diferencial linear de segunda ordem. Como se sabe,

dado um arranjo arbitrário de eletrodos com potenciais quaisquer, a situação de equilíbrio (caso estático) consiste numa distribuição de cargas na superfície dos mesmos, de modo que estas últimas resultem perfeitamente equipotenciais (condições de contorno). Em termos de solução é indiferente determinar a função potencial em todos os pontos do espaço ou as referidas distribuições de carga nos eletrodos, pois com esta última, é possível determinar o potencial (e, conseqüentemente, o campo elétrico) em qualquer ponto do espaço.

Os métodos de elementos finitos (1) e diferenças finitas (2) enquadram-se no primeiro tipo (determinação da função potencial em vários pontos do espaço), e o método da simulação de cargas (3) no segundo tipo (determinação da distribuição de cargas nos condutores).

Para cumprir o objetivo deste trabalho é preciso determinar o campo elétrico e magnético em um vão de uma de linha de transmissão com a representação de torres e condutores. Este é um problema tridimensional de fronteira aberta e desta forma o método escolhido foi o de simulação de cargas.

O método de simulação de cargas, permite elevada precisão de cálculo porém de acordo com a experiência, de muitos anos na utilização deste método no Cepel, o processo de colocação das cargas para uma simulação otimizada, depende muito da experiência do usuário. Desta forma é necessária a criação de um procedimento automatizado para entrada e saída de dados (interface gráfica) com o objetivo de munir o usuário com uma ferramenta que, além de proporcionar uma visão tridimensional do problema, facilitará a observação da sua solução.

2.2 Interface Gráfica Desenvolvida

A modelagem dos elementos envolvidos no estudo de um vão de uma linha nem sempre é trivial, e requer conhecimentos específicos do usuário, além de envolver uma grande quantidade de dados, que mudam de uma linha para outra e de vão para vão. Assim, para facilitar o estudo de vãos de linhas de transmissão, buscou-se automatizar estes estudos através de um programa gráfico interativo – MEGTRAN – Modelo Eletrogeométrico de Linhas de Transmissão (4), que se utiliza de uma base de dados de torres pré-modeladas, de modelagem adaptativa. Isto é, conforme o usuário faz ajustes nas dimensões e formas da torre, os eletrodos que a representam se ajustam automaticamente a nova geometria, Figura 1.

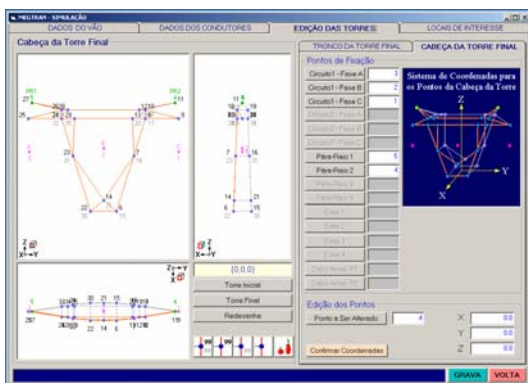


FIGURA 1 – Ajustes na geometria da torre pré-modelada

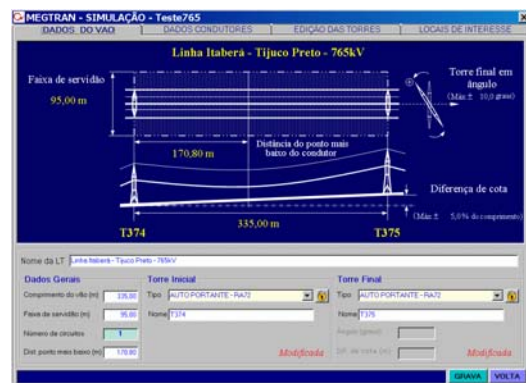


FIGURA 2 – Dados gerais do vão

Desta forma o programa dispõe de duas etapas dependendo do tipo de usuário do programa. Na primeira, um usuário com conhecimentos de modelagem define a modelagem das torres básicas, uma vez para cada tipo diferente de família de torres, em uma segunda etapa são realizados os estudos dos vãos das linhas utilizando o banco de dados de torres – pré-modeladas – fornecendo-se apenas os dados elétricos e geométricos destes vãos. Este segundo usuário não necessita, obrigatoriamente, de conhecimentos de modelagem. Esta divisão em duas etapas torna a avaliação dos níveis de campo elétrico e magnético nos vãos das linhas de transmissão mais simples e rápida.

Os dados do vão necessários para a modelagem são basicamente: o comprimento do vão, a largura da faixa de servidão, a posição e altura do ponto mais baixo dos condutores (fases e pára-raios), a escolha da torre inicial e final do vão, a bitola dos condutores e a tensão e corrente nas fases, Figura 2.

Os condutores são modelados através de cilindros, de forma automática, cujo número de linhas de carga e subdivisão destas linhas varia ao longo do vão e com a altura dos condutores. A geração da posição geométrica dos condutores de feixes circulares é facilitada através da interface e escolha das bitolas dos condutores é feita através de um banco de dados de condutores, Figura 3.

Pode-se ressaltar ainda que o programa permite a entrada de valores medidos para efeito de comparação com os perfis calculados, Figura 4.

A interface gráfica baseada nos dados fornecidos pelo usuário e nos obtidos da base de torres gera os dados necessários para o módulo de cálculo que calcula os campos elétricos e magnéticos embaixo da linha.

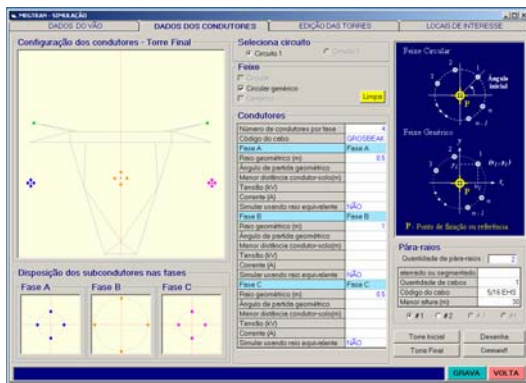


FIGURA 3 – Entrada de dados dos condutores

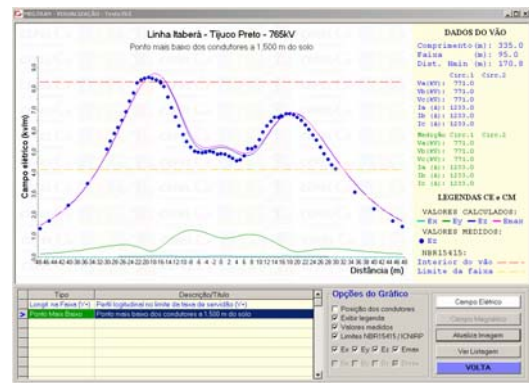


FIGURA 4 – Valores medidos e calculados

A associação do programa desenvolvido a um banco de dados de modelos dos principais tipos de torres de Furnas, permite uma rápida modelagem das torres e do vão em estudo, diminuindo consideravelmente o tempo e esforço na análise do trecho da linha.

3.0 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para a realização deste projeto foram desenvolvidos estudos para, se for o caso, atualização dos modelos de cálculo de campo elétrico e magnético, tanto nos condutores quanto na vizinhança das LT, estudos de perdas, interferências, suportabilidade do isolamento e cálculo do risco de falha da LT. Estabeleceu-se também que as técnicas a serem desenvolvidas fossem aplicáveis a configurações compactas e não convencionais. Ainda foram desenvolvidas interfaces gráficas de entrada e saída de dados para os programas computacionais no sentido de agilizar a implementação dos dados realizando uma verificação imediata dos erros e facilitando a análise dos resultados.

3.1 Modelos, Programas e Interfaces desenvolvidas

3.1.1 Cálculo do campo elétrico superficial em condutores

Para efeito de cálculo de campo elétrico na superfície dos condutores foram utilizados, por muitos anos, variantes dos métodos de cargas centradas, com refinamentos e correções para melhorar sua precisão. Os métodos mais conhecidos desta categoria são os de Mangolt e Markt e Mengele (5), que estão implementados na maioria dos antigos programa.

O trabalho comparativo (5) realizado pelo IEEE, identificou três metodologias como de elevada precisão:

- Método das Imagens Sucessivas;
- Método da Simulação de Cargas;
- Método dos Momentos.

O método das imagens sucessivas (6) introduz correções seqüenciais na colocação das linhas de carga, melhorando a precisão da solução. Contudo, testes realizados no curso do desenvolvimento deste projeto, indicaram que, no caso de condutores muito próximos, há necessidade de muitas linhas de carga, o processo de convergência é difícil e a solução nem sempre alcança a precisão desejada. Por este motivo foi descartado este método.

O método de simulação de cargas (3) permite elevada precisão de cálculo, porém, de acordo com a experiência de muitos anos na utilização deste método no Cepel, o processo de colocação das cargas para uma simulação otimizada, depende muito da experiência do usuário, não se adequando bem a um procedimento automatizado em programa de cálculo. Desta forma não foi escolhido este método para implementação no programa de cálculo.

O método dos momentos, ou da série harmônica (7,8), é um método de elevada precisão, tem uma base física consistente, por simular diretamente a distribuição real de carga, ao invés, de tentar utilizar uma distribuição fictícia que forneça o mesmo resultado da distribuição real. Os testes realizados mostraram que o método é muito robusto e apresenta boa convergência e precisão mesmo em condições complexas, como condutores muito próximos uns dos outros, onde o efeito de proximidade é pronunciado. Este foi o método escolhido para implementação no programa de cálculo CAMPO (9), desenvolvido neste projeto.

3.1.2 Cálculo do campo elétrico, magnético e induções na vizinhança da LT

Com o aparecimento de linhas de extra alta tensão (EAT) e ultra alta tensão (UAT) os efeitos eletrostáticos tornaram-se um fator importante nos projetos de linhas de transmissão, assim como o carregamento excessivo de corrente, principalmente em linhas com tensões inferiores, que provocam altos valores de campo magnético. Os projetos de linhas de transmissão devem impor considerações quanto ao valor desses campos na proximidade da mesma. A largura da faixa de passagem e a altura mínima dos cabos ao solo são exemplos de decisões tomadas observando os limites aceitáveis dos campos elétricos e magnéticos nas proximidades das LT e do carregamento das mesmas.

Como aproximação numérica a representação de um condutor por carga centrada é aceitável para cálculo de campos em pontos distantes do condutor. Uma aplicação típica é o cálculo de campos elétricos e magnéticos na vizinhança do solo, onde a modelagem precisa da carga na superfície dos cabos não é essencial para se obter uma precisão aceitável em cálculos ao nível do solo (10,11).

Com a passagem de uma linha de transmissão perto de áreas habitadas surgem outros problemas, um deles é a indução em objetos metálicos de correntes e tensões devido aos campos elétrico e magnético (12). Um campo elétrico ou magnético de baixa frequência pode afetar sistemas vivos devido à interação direta e também à indução de correntes nos mesmos.

A partir da escolha destas metodologias foi desenvolvido o programa CAMPEM (13) para o cálculo de campo elétrico e magnético e indução em objetos na vizinhança da LT.

3.1.3 Cálculo do risco de falha em LT por surtos de manobra

A confiabilidade de uma LT está relacionada à sua capacidade de fornecimento de energia continuamente, sem interrupções, mantendo sua operação normal e sem falhas. O isolamento é fundamental na determinação da confiabilidade das linhas de transmissão, evitando descargas das fases para a estrutura e para as outras fases. As sobretensões podem ser causadas durante rejeição de carga, perda de compensação reativa em LT longas, etc., e geralmente são resultantes de condições operativas anormais do sistema (12,14).

A análise técnica dos riscos de falha devido a surtos de manobra numa linha de transmissão levando-se em conta a forma e as posições ocupadas pelos cabos de uma torre, bem como a influência do ambiente (15) onde a mesma será construída, é o objetivo do programa desenvolvido – RISFAM (16).

O programa utiliza uma análise da probabilidade das distribuições estatísticas de sobretensões, de suportabilidade e variáveis meteorológicas, usando o método de simulação de Monte Carlo que, partindo do princípio do sorteio de amostras, verifica quantas são as falhas. A probabilidade de ocorrer uma falha será a diferença entre o número de vezes que ocorreu a falha pelo número total de sorteios (17). O programa auxilia nos estudos de projetos de torres de transmissão determinando os espaçamentos necessários entre fase-fase e fase-terra de modo que a probabilidade de rompimento da isolação seja minimizada como também, nos estudos de elevação de tensão de uma linha já existente.

3.1.4 Cálculo de perdas de energia e distribuição de correntes e temperatura do condutor em LT

No programa de perdas – PLT - são calculadas as perdas ôhmicas nos condutores de fase e pára-raios e as perdas por efeito corona. No caso das perdas ôhmicas é inicialmente calculada, de forma precisa, utilizando-se a matriz completa de parâmetros longitudinais, a distribuição de correntes nos diversos sub-condutores de cada fase, ao invés de supor uma distribuição uniforme entre estes sub-condutores, o que introduz erros indesejáveis. A partir da distribuição de correntes é calculada a temperatura de cada condutor pelo modelo do CIGRÉ (18-21). Com esta temperatura é recalculada a resistência de cada condutor e atualizada a matriz de parâmetros longitudinais. Este processo iterativo converge rapidamente e, para a resistência final, é calculada a parcela de perda ôhmica de cada cabo condutor.

A perda corona é calculada utilizando um modelo físico de elevada precisão para a emissão e movimentação da carga espacial, baseada na formulação da EDF (22).

3.1.5 Cálculo da radiointerferência e do ruído audível em LT produzidos pelo efeito corona

Existem duas linhas principais de métodos para cálculo dos efeitos do corona (radiointerferência e ruído audível).

Os métodos empíricos são baseados em medições em uma ou mais linhas em operação, agregados a fatores de correção para variações dos parâmetros mais importantes (distância entre fases, diâmetro dos cabos, altura, etc.).

Os métodos semi-analíticos utilizam uma formulação analítica para cálculo dos parâmetros eletromagnéticos, campo elétrico nos condutores, propagação dos pulsos e composição dos campos. A isto se agrega uma função geração determinada em laboratório.

Os métodos empíricos são limitados a condições ambientais e geométricas de linhas próximas das utilizadas para estabelecer a fórmula empírica. São de aplicação bastante limitada. Por este motivo são usualmente preferidos os métodos semi-analíticos que são mais versáteis, robustos e de maior precisão.

O método implementado, programa RUIDO_LT (23), utilizou uma função geração desenvolvida no CEPEL, a partir da formulação GE-EPRI (12,24), porém generalizada para permitir o cálculo em LT não convencionais, com feixes irregulares ou assimétricos.

3.2 Interfaces Gráficas

Foram desenvolvidas interfaces gráficas de entrada e saída de dados, desenvolvidas em C++, para os programas computacionais implementados no sentido de agilizar a entrada dos dados realizando uma verificação imediata dos erros e facilitando a análise dos resultados. Desenvolvidas para rodar sob Windows, estas interfaces são compostas por telas de entrada de dados interativas com recursos de abertura, criação e edição de arquivos, execução de módulos de cálculo e saída de resultados do tipo tabela, gráfico ou relatório. Nas Figuras 5 e 6 são apresentados exemplos de entrada de dados e saída de resultados da interface do programa CAMPO.

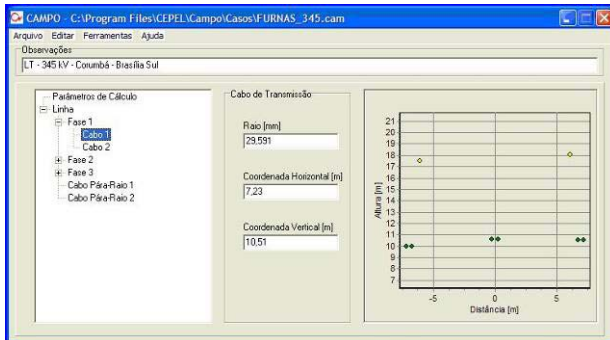


FIGURA 5 – Entrada de dados

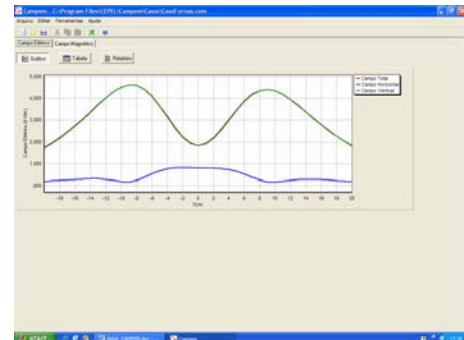


FIGURA 6 – Saída de resultados

4.0 - MEDIÇÃO DE CAMPOS E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Durante o desenvolvimento dos projetos foram realizadas medições de campo com o objetivo de subsidiar o desenvolvimento e teste das ferramentas computacionais de cálculo. Foram realizadas medições de radiointerferência, ruído audível e campos elétrico e magnético, em linhas de transmissão de 230, 345, 500 e 750 kV do sistema de FURNAS (25,26), Figuras 7 e 8.



FIGURA 7 – Radiointerferência



FIGURA 8 – Ruído Audível

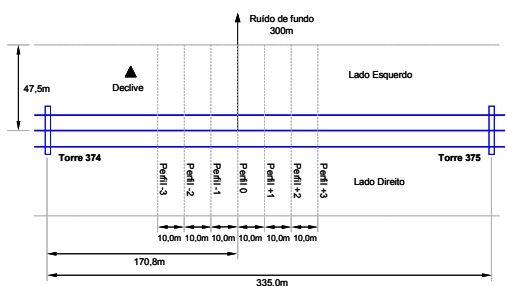


Figura 9. Croqui do vão de medição

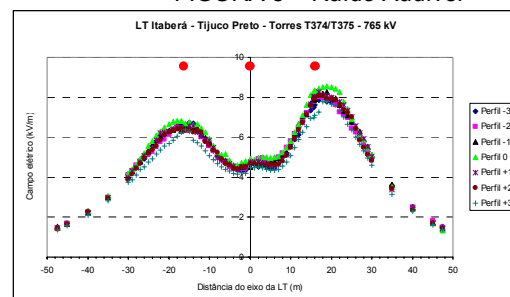


Figura 10. Perfis medidos de campo elétrico

As medições foram realizadas em sete perfis transversais à LT, a 1 m do solo, dentro da faixa de passagem, como apresentado no croqui de um vão de medição apresentado na Figura 9. O perfil 0, que está localizado no ponto de menor altura dos condutores foi utilizado para comparação com os resultados medidos. Os dados coletados dos outros perfis foram utilizados para aferição e consistência da própria medição, Figura 10.

Como exemplo, nas Figuras 11 e 12 são apresentadas comparações dos valores medidos e calculados de campo elétrico e magnético realizados com os programas desenvolvidos. Pode-se observar que os resultados calculados mostram boa aderência aos valores medidos.

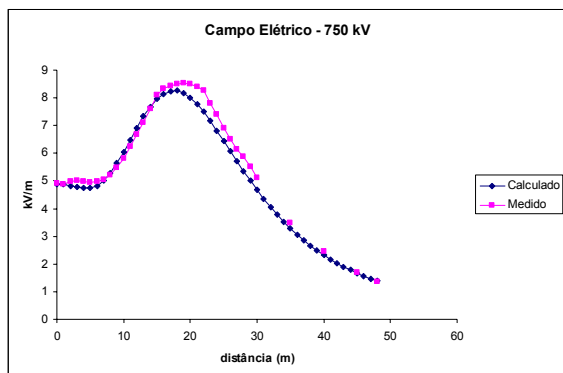


Figura 11. Perfil de campo elétrico

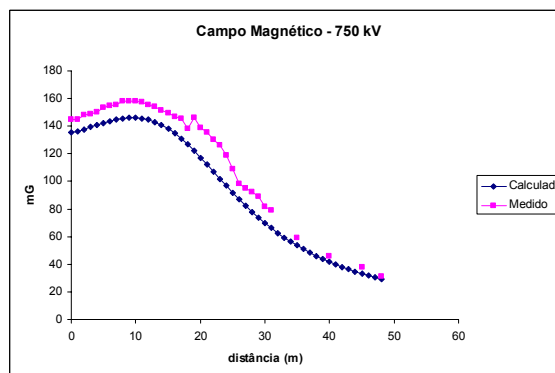


Figura 12 Perfil de campo magnético

5.0 - CONCLUSÃO

Este informe técnico apresenta a consolidação dos trabalhos efetuados por CEPEL e FURNAS em dois projetos de P&D para o desenvolvimento de modelos, programas computacionais e interfaces gráficas, com o objetivo geral de avaliar o desempenho de linhas de transmissão.

Cabe ressaltar que os programas e relatórios desenvolvidos durante a pesquisa são ferramentas de utilização imediata e fundamental em novos projetos e na capacitação de LT do Sistema FURNAS.

No primeiro projeto, a criação de um procedimento automatizado para entrada e saída de dados (interface gráfica) mune o usuário de uma ferramenta que, além de proporcionar uma visão tridimensional do problema, facilita a observação do problema e a sua solução.

A associação do programa desenvolvido a um banco de dados de modelos dos principais tipos de torres de FURNAS, permite uma rápida modelagem das torres e do vão em estudo, diminuindo consideravelmente o tempo e esforço na análise do trecho da linha.

No segundo projeto, com o objetivo de facilitar a incorporação das ferramentas desenvolvidas e sua utilização nos trabalhos de FURNAS, o desenvolvimento dos modelos seguiu a abordagem tradicional de considerar os fenômenos isoladamente:

- campo elétrico superficial;
- campo elétrico, magnético e indução na vizinhança da LT;
- risco de falha frente a surtos de manobra;
- distribuição de corrente e temperatura nos condutores, perdas joule e corona;
- radiointerferência e ruído audível gerado pela LT.

Contudo, os modelos físicos apresentados e a estrutura das programações desenvolvidas visaram a uma futura integração dos programas de modo a possibilitar uma otimização integrada dos projetos de LT.

Finalmente podem-se ressaltar os bons resultados das comparações dos resultados dos modelos de cálculo com medições realizadas no Sistema FURNAS.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Mpalantinos Neto, A., Domingues, L. A. M. C., Dart, F. C., Barbosa, C. R. N.; "Algumas aplicações de elementos finitos em campos eletrostáticos.", II Simpósio. Franco-Brasileiro de Campos Elétricos e Magnéticos, Março 1989.
- (2) Zienkiewicz, O. C, Morgan, K., "Finite Elements and Approximation", John Wiley and Sons, 1983.

- (3) Domingues, L. A. M. C., Fernandes, C., Barbosa, C. R. N., Dart, F. C., "Cálculo de Campo Elétrico pelo Método de Simulação de Cargas", Relatório Técnico CEPEL, 1995.
- (4) Mpalantinos Neto, A., "Modelo Eletrogeométrico de Linhas de Transmissão – Manual do Usuário do Programa MEGTRAN", Relatório Técnico CEPEL, 2007.
- (5) IEEE Corona and field effects subcommittee Report Radio Noise Working Group, "A Survey of methods for calculating transmission line conductor surface voltage gradients", IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, February 4-9, 1979.
- (6) Sarma, M. P., Janischewskyj, W., "Electrostatic Fields System of Parallel Cylindrical Conductors", IEEE transactions on power apparatus and systems, vol. PAS-88, n° 7, July 1969.
- (7) Harrington, R. F., "Field Computation by Moment Methods", The Macmillan Company, New York, 1968.
- (8) Sarma, M. P., "Application of moment methods to the computation of electrostatic fields – Part I – Parallel cylindrical conductor systems", Conference paper IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, July 9-14, 1972.
- (9) Domingues, L.A.M.C., Camargo, G., Barbosa, C.R.N., "Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão – Cálculo do Campo Elétrico Superficial em Condutores – Programa CAMPO", Relatório Técnico CEPEL, 2005.
- (10) França, A. M., Yamaguti K., Domingues, L. A. M. C., "Estudo Sobre Efeitos dos Campos Eletrostáticos", Relatório Técnico CEPEL, 1980.
- (11) Domingues, L.A.M.C., "Influência do solo no cálculo do campo magnético de condutores.", Relatório Técnico CEPEL, 1982.
- (12) Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above/ Second Edition, EPRI, 1982.
- (13) Pinto, R.L.F., Domingues, L.A.M.C., Barbosa, C.R.N., "Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão – Cálculo de Campos Elétricos, Magnéticos e Induções – Programa CAMPEM", Relatório Técnico CEPEL, 2005.
- (14) "Coletânea de Normas de Linhas de Transmissão", NBR – 5422/1985.
- (15) Andrade, V.H.G., Da Silva Filho, J. I., Da Costa, E.M., "Dados Meteorológicos e Parâmetros Correlatos que influenciam os Isolamentos em Ar – Estatística de Valores", VIII SNTPEE, 1983.
- (16) Pinto, R.L.F., Domingues, L.A.M.C., Barbosa, C.R.N., "Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão – Cálculo do Risco de Falha em Linhas de Transmissão por Surtos de Manobra – Programa RISFAM", Relatório Técnico CEPEL, 2005.
- (17) Vaisman, R., "Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Surtos de Manobra", Relatório Técnico CEPEL, 1987.
- (18) Domingues, L.A.M.C., Pinto, R.L.F., Barbosa, C.R.N., "Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão – Cálculo de Perdas de Energia, Distribuição de Correntes e Temperatura dos Condutores de Linhas de Transmissão – Programa PLT", Relatório Técnico CEPEL, 2005.
- (19) CIGRÉ, "Le comportement thermique des conducteurs de lignes aériennes. Section 1 et 2: evaluation de la température des conducteurs en régime permanent: modèle mathématique et application", ELECTRA n° 144, Octobre, 1992.
- (20) Domingues, L. A. M. C., "Modelo para previsão da temperatura de condutores de linhas de transmissão", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, PUC, junho, 2002
- (21) Morgan, V. T. 1991, "Thermal behavior of electrical conductors". Research Studies Press Ltd. Somerset, UK.
- (22) Gary, C., Moreau, M., "Léffect de Couronne em Tension Alternative, Editeur Paris, 1978.
- (23) Domingues, L.A.M.C., Barbosa, C.R.N., "Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão – Cálculo da Radiointerferência e do Ruído audível – Programa RÚIDO_LT.", Relatório Técnico CEPEL, 2005.
- (24) Moureau, M. R., Gary, C., "Predetermination of the RI Level of High-Voltage Line Transmission Lines – PARTII: Field calculation Method", IEEE Trans. PAS 91- n° 1, pp.292-304, Jan-Feb, 1972.
- (25) Andrade, V. H. G., Barbosa, C. R. N., Mpalantinos Neto, A., Amorim Júnior, H. P., Oliveira, P. R. G., Domingues, L. A. M. C., "Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão – Medições nas LT's de 230 kV e 345 kV de FURNAS", Relatório Técnico CEPEL, 2005.
- (26) Andrade, V. H. G., Mpalantinos Neto, A., Barbosa, C. R. N., Amorim Júnior, H. P., Oliveira, P. R. G., Gomes, F. S., Domingues, L. A. M. C., "Modelo Eletrogeométrico de Linhas de Transmissão de FURNAS – Medições nas LT's de 500 kV e 750 kV", Relatório Técnico CEPEL, 2006.