



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

**UMA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS – APLICAÇÃO AO
CÁLCULO DA PROPAGAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

João Clavio Salari Filho *

Carlos Portela

**CEPEL
COPPE/UFRJ**

COPPE/UFRJ

RESUMO

Apresenta-se neste artigo as características básicas de uma metodologia desenvolvida no domínio da frequência para o cálculo de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão, na qual se implementou o uso simultâneo de vários elementos lineares e não lineares usualmente empregados nas análises de redes elétricas, do tipo RLC, chaves, pára-raios, transformadores, etc, com elementos fonte de campos eletromagnéticos, do tipo eletrodos cilíndricos, permitindo-se eficazmente a simulação conjunta de torres, sistemas de aterramento e cabos aéreos. Aplica-se esta metodologia para o cálculo da propagação de descargas atmosféricas em duas linhas de transmissão de 138 e 500 kV .

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios Eletromagnéticos, Domínio da Frequência, Descargas Atmosféricas, Sobretensões.

1.0 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de modelos de cálculo de campos eletromagnéticos já é secular, e ferramentas computacionais para o seu emprego têm sido vastamente pesquisadas na Engenharia Elétrica. Enquanto que aplicações a fenômenos estacionários ou quase-estacionários (no sentido de fenômenos lentos, no sentido de serem eventualmente aceitáveis aproximações diversas, como, por exemplo, supor propagação instantânea de grandezas eletromagnéticas, desprezar radiação eletromagnética, etc.) são bastante difundidas (embora com erros importantes de metodologias usuais, mesmo para fenômenos quase-estacionários), as ferramentas para o cálculo de campos eletromagnéticos associados a fenômenos rápidos ainda se encontram em fase de desenvolvimento no Setor e parte das metodologias de uso mais freqüente têm erros importantes e são inadequadas.

Um exemplo é a análise dos efeitos de descargas atmosféricas incidentes em linhas de transmissão, instalações e equipamentos (incluindo estruturas, cabos pára-raios, cabos de fase ou de pólos, solo próximo da linha, estruturas metálicas, edifícios, sistemas de aterramento, subestações, usinas, vizinhança de cabos subterrâneos, instalações industriais, antenas, sistemas de telecomunicações). Trata-se de estudos de extrema importância para o projeto e verificação de desempenho desses elementos, cuja abordagem completa requer uma forte interação entre os modelos de cálculo de campos eletromagnéticos com os modelos de cálculo de transitórios eletromagnéticos, apesar desta interação ser costumeiramente considerada de modo excessivamente simplista e que pode originar erros grosseiros.

A incidência de uma descarga atmosférica em um cabo ou torre de uma linha de distribuição ou transmissão, ou num ponto do solo próximo, origina sobretensões na linha que podem levar a ocorrência de um curto-circuito. Para o cálculo dessas sobretensões, ou mesmo outras advindas de demais fenômenos rápidos ou moderados, considerando-se o "circuito elétrico da linha" como um todo, recai-se no emprego de vários elementos que podem ser enquadrados nos seguintes grupos:

- (i) Elementos típicos de cálculo de campos eletromagnéticos: cabos aéreos de linhas, elementos metálicos das torres, cabos de estais, componentes de sistemas de aterramento, elementos representativos do canal da descarga atmosférica, transformadores, etc.;
- (ii) Elementos típicos de análises de redes elétricas: Lineares - cabos aéreos (modelos de linhas de transmissão), elementos RLC invariantes no tempo, transformadores e reatores não saturados, etc.; Não-lineares - pára-raios, chaves, elementos RLC variando no tempo, transformadores e reatores saturados, etc.

* Av. Hum, s/n^o, Cidade Universitária - CEP 21941-590 - Rio de Janeiro - RJ - BRASIL
Tel.: (021) 2598-6223 - Fax: (021) 2270-4189 - e-mail: jclavio@cepel.br

Nesse sentido, desenvolveram-se ao longo das últimas décadas metodologias com base no domínio do tempo, metodologias com base no domínio da frequência e metodologias híbridas tempo-frequência, que consideram intrinsecamente a natural dualidade entre estes dois domínios.

A análise isolada de circuitos com elementos lineares do tipo (i) é usualmente feita no domínio da frequência, principalmente por este domínio ser propício para simulações desta natureza. Para tal, atualmente já existem alguns programas computacionais que empregam modelagens dos elementos por eletrodos, geralmente cilíndricos, que permitem o cálculo das correntes, potenciais e campos eletromagnéticos nos eletrodos e no meio externo, sendo de ótima precisão a metodologia apresentada em (1). Por vezes, a análise isolada de somente os elementos lineares do tipo (ii) é também feita no domínio da frequência.

A análise isolada de circuitos com os elementos lineares e não-lineares do tipo (ii) é geralmente feita no domínio do tempo, sendo usados, tradicionalmente, os programas computacionais da Série EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), com fundamentos nos trabalhos iniciais de H. W. Dommel (2). Em relação às metodologias no domínio da frequência, as metodologias no tempo normalmente requerem menor tempo computacional, mas são menos precisas, principalmente pelo fato de ser difícil a implementação da variação de qualquer parâmetro com a frequência, o que é importante, por exemplo, para a análise de fenômenos transitórios envolvendo linhas aéreas, cabos subterrâneos, sistemas de aterramento e transformadores. A modelagem de alguns elementos não lineares simples do tipo (ii), tais como as chaves, também é possível no domínio da frequência; entretanto, para a abordagem de não linearidades genéricas ou mais complexas, como a modelagem de cabos aéreos sob o efeito corona, torna-se fundamental recorrer a metodologias híbridas tempo-frequência, que fazem uso de processos iterativos, assim como a análise tensorial (3).

Em função desses aspectos, as análises envolvendo simultaneamente os elementos dos tipos (i) e (ii), apesar de necessárias para um estudo completo de propagação de descargas atmosféricas em linhas, são menos frequentes, principalmente pela dificuldade de simulação simultânea de elementos com bases físicas um tanto diferentes. No entanto, às custas de perda de precisão nos resultados, restringindo-se a simulação do comportamento físico real, podendo estas questões em vários casos serem significativas, costuma-se adotar algumas estratégias de cálculo para que também nestas análises possa ser empregado diretamente um programa computacional que opere no domínio do tempo, e neste caso também é comum o uso dos programas da Série EMTP, quais sejam:

1. Modela-se os elementos do tipo (i) sem grande rigor físico, por exemplo, por associações simples de elementos RLC e/ou por modelos simplificados de linhas de transmissão (por exemplo, desprezando as perdas, considerando condutores ideais, solo ideal, supondo propagação transversal instantânea, etc., e considerando-se somente o "modo" de propagação transversal elétrico e magnético), e recai-se, assim, nos elementos lineares do tipo (ii).
2. Modela-se adequadamente na frequência os elementos do tipo (i) (e/ou os elementos lineares do tipo (ii)), e utilizam-se funções analíticas de variável complexa (expressas, por exemplo, em função dos respectivos zeros e pólos) obtidas a partir da resposta em frequência ou da determinação direta de zeros e pólos para representar o elemento visto dos seus terminais. Neste caso, pode-se empregar interfaces de comunicação existentes em alguns programas da Série EMTP ou aproximar as funções de zeros e pólos por circuitos RLC com resposta em frequência semelhante.
3. Modela-se aproximadamente no tempo os elementos do tipo (i) por meio de linearizações das equações eletromagnéticas utilizando diferenças finitas ou elementos finitos, e empregam-se os parâmetros do meio onde se dá a propagação calculados para uma determinada pulsação.

Contudo, para todos esses três procedimentos surgem alguns inconvenientes, designadamente:

- Nas estratégias 1 e 2 o cálculo de campos eletromagnéticos em pontos do meio externo ao circuito fica descaracterizado, assim como o cálculo da tensão entre dois pontos, associado à integração do campo elétrico total num caminho entre estes pontos, considerando a presença de cargas e de correntes nos elementos do circuito. Em princípio, esses parâmetros podem ser obtidos empregando-se a estratégia 3, mas numa fase posterior do cálculo principal; exigindo, portanto, um processo de cálculo adicional, além de também se incorrer na inerente imprecisão já comentada para os cálculos unicamente no domínio do tempo. Tal processo também demanda o emprego de interfaces de comunicação dos programas da Série EMTP.
- O uso da estratégia 2 para um determinado elemento ou grupo de elementos, que é a melhor estratégia entre as três, deixa de ser viável quando se necessita representar um número muito grande de zeros e pólos. Além disso, requer-se um cálculo na frequência para a sua elaboração. Conclui-se o mesmo se a estratégia for empregada para uma quantidade elevada de elementos no circuito em estudo.
- O emprego de interfaces de comunicação nos programas da Série EMTP, por exemplo, os blocos especiais MODELS e TACS ou a rotina de comunicação CONNEX, ou ainda a integração com programas matemáticos como, por exemplo, o programa MATLAB, oneram o processo.
- Pode-se deixar de modelar adequadamente partes diferentes do circuito que possuam forte acoplamento eletromagnético. Por exemplo, modelando-se isoladamente uma torre no domínio da frequência conforme a estratégia 2, ao se estudar a propagação de uma descarga atmosférica pela torre, passa-se a não representar apropriadamente a interação entre a descarga e torre, ou a interação entre estes e um transformador conectado, ou entre a torre e o seu sistema de aterramento.

Portanto, em função de tais dificuldades de análise no tempo e da robustez oferecida pelas metodologias no domínio da frequência, constatou-se que uma metodologia com base de cálculo no domínio da frequência seria oportuna para a análise de circuitos elétricos generalizados, permitindo-se assim combinar quaisquer elementos de ambos os tipos (i) e (ii) definidos anteriormente; por exemplo, poder-se-ia simular simultaneamente modelos de eletrodos com modelos de linhas de transmissão, ou modelos de eletrodos com modelos de pára-raios, entre várias outras combinações. Outra grande vantagem do processo é o fato de permitir naturalmente o cálculo de campos eletromagnéticos no meio

em que se encontra o circuito. Assim sendo, desenvolveu-se e implementou-se tal processo sob a forma de um sistema computacional, nomeadamente a versão inicial do sistema computacional FDETP, cujas características básicas e dois exemplos de aplicação estão apresentados a seguir.

2.0 - O SISTEMA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO

2.1 Modelos implementados

Considerando os elementos principais que podem compor uma linha de distribuição ou transmissão para o estudo dos transitórios eletromagnéticos em questão, implementou-se nesta versão inicial do programa FDETP dois grupos de modelos de componentes diretamente no domínio da frequência, quais sejam:

- (i) Modelos de eletrodos cilíndricos, utilizados para a representação de elementos metálicos situados no ar e sob o solo, ou seja:
 - Cabos aéreos de linhas de distribuição e transmissão.
 - Torres de transmissão e torres de comunicação e medição.
 - Estais e sistemas de aterramento (cabos e hastes).
 - Canal da descarga atmosférica (modelo simplificado).
- (ii) Modelos de elementos principais de redes elétricas:
 - Linha de transmissão multifásica, considerando as perdas nos cabos e no solo, representada por um quadripolo equivalente visto dos seus terminais.
 - Linha de transmissão monofásica ideal, ou seja, sem a consideração das perdas no cabo e no solo, função basicamente de uma impedância de onda e da velocidade de propagação (a ser empregado apenas em cálculos aproximados ou em estudos comparativos dos efeitos das perdas na propagação de surtos em linhas).
 - Transformador monofásico ideal, com relação de transformação de tensão fixa ou variável com a frequência.
 - Elementos lineares típicos: resistores, capacitores e indutores com parâmetros invariantes no tempo.
 - Elementos não lineares de circuitos elétricos: resistores com parâmetros variando no tempo, chaves controladas por tensão, chaves controladas por corrente, diodos, pára-raios, etc.
 - Fontes de corrente e de tensão, genéricas e padronizadas.
 - Medidores de corrente, tensão, potência e campos eletromagnéticos.

2.2 Formulação do sistema de equações

Buscando-se a generalização do cálculo e a eventual necessidade de simulações sequenciais de diferentes fontes de corrente injetadas num determinado circuito em análise, o que é típico, por exemplo, em análises de desempenho de linhas a descargas atmosféricas, desenvolveu-se uma formulação do tipo nodal modificada relacionando as correntes e tensões nos vários nós do circuito. Em cada nó é possível conectar os elementos dos mais variados tipos definidos no item 2.1, tal como se exemplifica de forma estilizada na Figura 1.

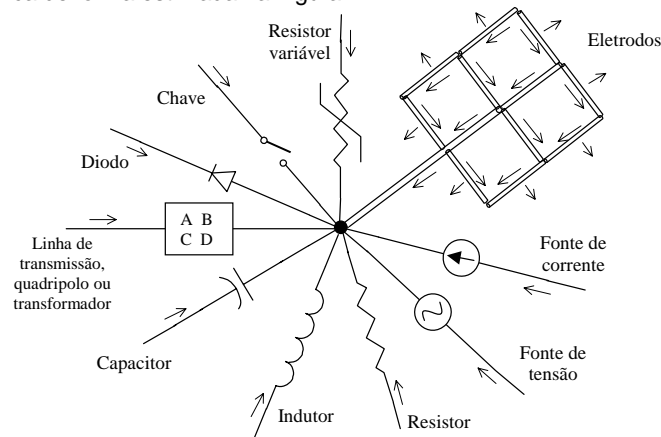


FIGURA 1 – Exemplo estilizado de interconexão de diferentes componentes em um nó do circuito

Considerando-se sinais genéricos no tempo decompostos em pulsações sinusoidais do tipo do tipo $e^{\pm i \omega t}$, para cada pulsação ω , aplicando-se a cada nó do circuito em estudo a equação clássica do somatório das correntes igual a zero no nó, definindo-se a tensão de referência de cada nó considerando o percurso para medição desta tensão (por exemplo, medida entre o nó e um ponto infinitamente afastado, segundo determinado percurso de medida) e definindo-se a tensão entre um par genérico de nós também considerando o percurso para medição desta tensão, e relacionando-a coerentemente com as tensões de referência de cada nó, tem-se equações do tipo:

$$\begin{cases} \sum_m I_{ep} + \sum_m I_{ft} + \sum_m I_{fc} = 0 \\ U_j - U_k + \Delta_{jk} = U_{jk} \end{cases} \quad (1)$$

Nas equações (1), os elementos I_{ep} , I_{ft} e I_{fc} significam as correntes nos elementos passivos, nas fontes de tensão e nas fontes de corrente, respectivamente. Os elementos U_j e U_k significam as tensões de referência dos nós de índices "j" e

“k”, respectivamente, e U_{jk} é a tensão entre estes nós “j” e “k”, conforme os condicionamentos de medição descritos anteriormente. A parcela Δ_{jk} depende dos percursos de medida de tensão selecionados e em diversas condições de interesse, mas nem sempre, é possível escolher os percursos por forma que tal parcela seja nula. Nota-se que o conceito de tensão entre dois pontos está associado a um percurso de medida, e que a tensão depende, em geral, do percurso, e é, em geral, diferente da diferença entre os potenciais escalares de Lorentz desses dois pontos, em relação a um mesmo referencial. Em algumas condições particulares, e, por vezes, para algumas hipóteses de percurso, a tensão entre dois pontos coincide com a diferença entre potenciais escalares. A cultura usual do setor elétrico cria, freqüentemente, uma confusão sobre o assunto, conduzindo por vezes a interpretações e metodologias errôneas.

Portanto, considerando todos os nós do circuito, monta-se um sistema matricial relacionando uma matriz de imitâncias globais, simétrica, com elementos complexos, $[W]$, com dimensão $n \times n$, que relaciona duas matrizes $[A]$ e $[B]$, com dimensão $n \times 1$ cada, na forma

$$[W] \cdot [B] = [A] \quad , \quad (2)$$

onde cada um dos elementos tanto da matriz $[A]$ quanto da matriz $[B]$ pode significar a tensão U entre um nó e um “ponto” de referência (medida ao longo de determinado percurso) ou uma corrente I que seja injetada no nó, de valor conhecido ou a ser calculado.

Os elementos da matriz $[W]$ do sistema matricial (2) referentes aos modelos do tipo (i) definidos no item 2.1 são calculados de acordo com a metodologia apresentada em (1,4,5), considerando os parâmetros do solo variáveis com a freqüência e modelados conforme apresentado em (6). Os elementos de $[W]$ referentes aos modelos do tipo (ii) definidos no item 2.1 são calculados a partir de relações básicas entre correntes e tensões nos terminais de cada modelo, bastante divulgadas na literatura técnica referente à análise de redes elétricas. Elaborou-se uma metodologia específica para o tratamento dos elementos não lineares.

Ao final do cálculo para todas as pulsações, determinando-se as tensões nos nós de todos os elementos do tipo eletrodo por meio de equações adicionais obtidas quando da elaboração do sistema matricial (2), calculam-se as correntes longitudinais e transversais nos elementos do tipo eletrodo e, por conseguinte, obtêm-se o campo eletromagnético e tensões no meio externo ao circuito, permitindo-se o cálculo de tensões em cadeias de isoladores, tensões de passo no solo, tensões de toque no solo, campos em pontos críticos no solo e no ar, etc. A resposta no tempo de cada parâmetro de interesse é obtida empregando-se a transformada inversa de Fourier.

Para dar um enfoque mais prático à análise da propagação de descargas atmosféricas em linhas de distribuição e transmissão, elaborou-se também um processo adicional no programa FDETP para o cálculo do desempenho das linhas a descargas atmosféricas. Considera-se no processo toda uma gama de variação dos parâmetros principais da corrente de descarga atmosférica, e, para cada combinação de parâmetros e simulando-se incidências de descargas na linha a meio do vão ou junto à torre, calculam-se as sobretensões induzidas nas cadeias de isoladores e entre cabos de fase e cabos pára-raios a meio do vão. Quando alguma dessas sobretensões excede a tensão suportável do isolamento em questão, caracteriza-se um curto-circuito. A quantidade de curtos-circuitos por unidade de comprimento de linha e por período de tempo, em termos estatísticos, é o parâmetro usual para caracterizar o desempenho da linha a descargas atmosféricas. Apesar deste item estar fora do escopo deste informe técnico, maiores informações podem ser obtidas nas referências (7,8).

3.0 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

3.1 Linha de transmissão de 500 kV

Faz-se neste exemplo uma comparação entre as tensões medidas nas cadeias de isoladores de uma torre da linha de transmissão com circuito duplo de 500 kV apresentada em (9) e as mesmas tensões calculadas pelo programa FDETP, dada a injeção no ponto de fixação de um dos cabos pára-raios da torre de uma corrente com frente de onda do tipo rampa, com tempo de frente de $3 \mu\text{s}$ e valor máximo em torno de 3,4 A, como consta na Figura 2.

Conforme os demais dados de (9), a silhueta da torre em questão é a dada na Figura 3, as fases são compostas por quatro subcondutores por fase com raio igual a 1,92 cm cada e espaçados simetricamente de 50 cm, os cabos pára-raios têm raio igual a 0,875 cm, a resistência do sistema de aterramento das torres é igual a 17Ω e a condutividade elétrica do solo é igual a 2 mS/m . Para a adequada simulação deste exemplo no programa FDETP, no entanto, seriam necessários dados adicionais que não constam na referência (9), incluindo detalhamento do modelo do solo, do sistema de aterramento da torre, da geometria da torre, do posicionamento e localização dos cabos para medição das tensões e injeção da corrente, e ainda melhor resolução das curvas obtidas do osciloscópio. Portanto, foi necessário assumir algumas simplificações, designadamente:

- Modelou-se apenas a torre com corrente injetada e os vãos adjacentes com 300 m de comprimento. A torre foi modelada por eletrodos cilíndricos de aço e com raio igual a 10 cm; os cabos pára-raios por eletrodos cilíndricos de aço com o raio de 0,875 cm; e as fases por eletrodos cilíndricos de alumínio com o raio equivalente de 24 cm. Isso permitiu a análise até o tempo de $2 \mu\text{s}$, que é o tempo para que as ondas refletidas no final de cada vão retornem ao ponto de injeção da corrente.
- Para o cálculo dos parâmetros associados a estes eletrodos, modelou-se o solo com parâmetros variáveis com a freqüência conforme apresentado em (6), com os valores médios dos parâmetros α e Δ_i iguais a 0,82 e $11,71 \text{ mS/m}$, respectivamente, e a condutividade elétrica em baixa freqüência σ_0 igual ao valor de 2 mS/m . Para a representação do efeito do sistema de aterramento, conectou-se no final de cada uma das quatro pernas da torre um resistor com valor igual a quatro vezes o valor de 17Ω dado e não se considerou as resistências mútuas entre os quatro elementos.

- A tensão induzida em cada cadeia de isoladores foi calculada integrando-se o campo elétrico total num caminho vertical ao longo da cadeia, dada a injeção direta da corrente no ponto de fixação do cabo pára-raios na torre através de uma fonte de corrente sem perdas. Em função da dispersão existente na “curva” da corrente medida apresentada na Figura 2(a), fez-se o cálculo para duas curvas, nomeadamente curvas “superior” e “inferior”, obtidas considerando os pontos “superiores” e “inferiores” da espessura da “curva” para cada tempo.

As tensões calculadas nas cadeias de isoladores das três fases estão apresentados nas Figuras 4 a 6. Conforme comentado anteriormente, mesmo com a dificuldade para a modelagem precisa da linha real, em síntese, observa-se destes resultados a boa adequação dos valores calculados em relação àqueles medidos apresentados na Figura 2, corroborando a eficiência da metodologia de cálculo apresentada neste trabalho.

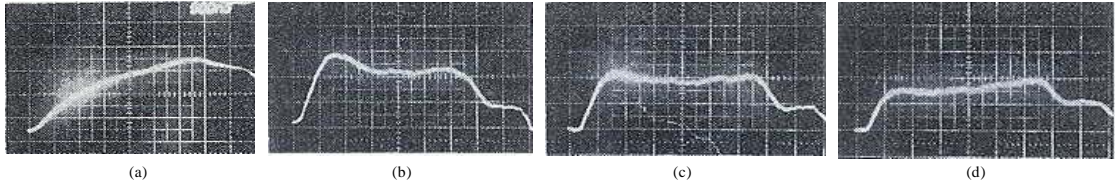


FIGURA 2 – (a) Corrente injetada (escala 1,13 A/div); (b) tensão medida na fase “A” (escala 23 V/div); (c) tensão medida na fase “B” (escala 23 V/div); (d) tensão medida na fase “C” (escala 30 V/div) ; escala de tempo:

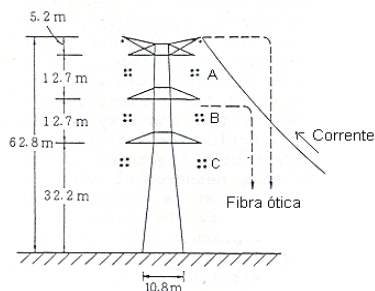


FIGURA 3 – Distâncias básicas da torre de 500

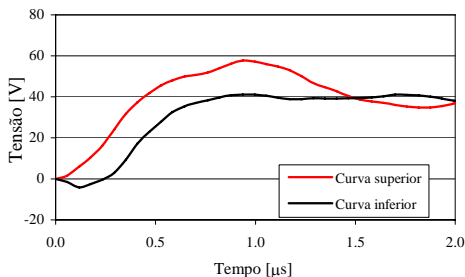


FIGURA 5 – Tensões na fase “B”

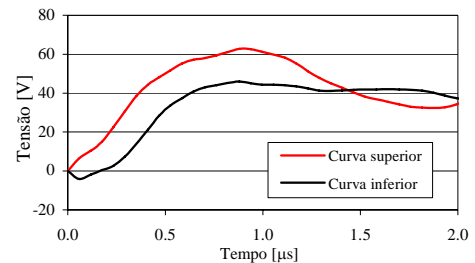


FIGURA 4 – Tensões na fase “A”

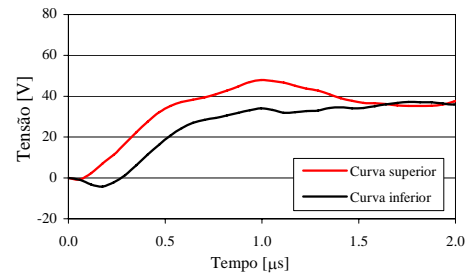


FIGURA 6 – Tensões na fase “C”

3.2 Linha de transmissão de 138 kV

Neste exemplo faz-se uma análise puramente computacional, entretanto mais abrangente do que à anterior, verificando-se os efeitos da correta modelagem do solo, da consideração do canal da descarga atmosférica e do emprego de pára-raios de linha no cálculo de sobretensões em pontos principais da linha. Emprega-se a modelagem estilizada da torre de transmissão de 138 kV apresentada na Figura 7, com um cabo pára-raios código 3/8” EHS e um cabo ACSR código linnet por fase. Portanto, faz-se três tipos de cálculo, em função da incidência na linha de uma descarga atmosférica com a forma de onda da corrente dada na Figura 8, quais sejam:

- Cálculo “TO-TO”: Tensões induzidas nas cadeias de isoladores das três fases para a incidência da descarga no ponto de fixação do cabo pára-raios na torre na qual se situam tais cadeias.
- Cálculo “MV-TO”: Tensões induzidas nas cadeias de isoladores das três fases da torre adjacente para a incidência da descarga no cabo pára-raios exatamente a meio do vão.
- Cálculo “MV-MV”: Tensões induzidas entre cabos de fase e cabo pára-raios exatamente a meio do vão para a incidência da descarga no cabo pára-raios neste mesmo ponto.

Com o intuito de apenas analisar os efeitos básicos do canal da descarga, este foi simulado, em primeira aproximação, por um cabo de cobre, retilíneo, com 10 cm de raio e com comprimentos de 100 e 1000 m, considerando-se as cinco variações apresentadas na Figura 9. Foi também investigado o posicionamento do canal em relação a um plano transversal à direção da linha, nomeadamente vertical, inclinado a 45° , ou horizontal. Para o cálculo “TO-TO”, fez-se a simulação conforme a Figura 10; para os cálculos “MV-TO” e “MV-MV”, fez-se a simulação conforme a Figura 11. As torres e os sistemas de aterramento foram modelados por eletrodos cilíndricos de aço, com raios iguais a 10 cm e 0,5 cm, respectivamente. Note-se que para economia de esforço computacional, no entanto com pouco prejuízo da precisão pretendida nos resultados, fez-se uma modelagem híbrida da linha, sendo o vão onde ocorre a descarga ou

os vãos imediatamente adjacentes à torre onde incide a descarga modelados por eletrodos cilíndricos, e os demais vãos modelados por quadripolos de linhas de transmissão. Considerou-se cada vão da linha com 300 m de comprimento e modelou-se as catenárias dos cabos, sendo as flechas dos cabos de fase e do pára-raio iguais a 7 m e 4 m, respectivamente. Nos três casos considerou-se, nas extremidades mais afastadas dos vãos expressamente simulados, uma terminação por impedâncias “casadas”, reduzindo-se o efeito das diversas reflexões e refrações nos demais vãos.

Os pára-raios de linha que foram utilizados têm tensão nominal de 120 kVrms e corrente nominal de 10 kA, sendo que, no caso da incidência da descarga junto à torre, empregou-se os pára-raios somente nesta torre, e, no caso da incidência a meio do vão, empregou-se os pára-raios nas duas torres imediatamente adjacentes. Utilizou-se duas modelagens para o solo: “Solo 1” - solo representado por somente sua condutividade elétrica em baixa frequência σ_0 (desprezando a permissividade dielétrica), igual a 0,5 mS/m, e considerando-a independente da frequência, como é feito, inadequadamente, em alguns procedimentos usuais; “Solo 2” - solo com a correta variação dos parâmetros com a frequência conforme apresentado em (6), com os valores médios dos parâmetros α e Δ_i iguais a 0,82 e 11,71 mS/m, respectivamente, e a condutividade elétrica em baixa frequência σ_0 igual à do modelo “Solo 1”.

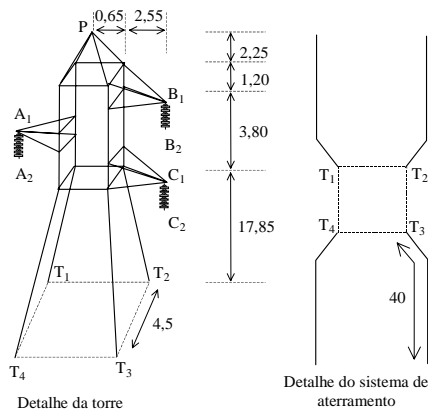


FIGURA 7 - Distâncias na torre e no sistema de

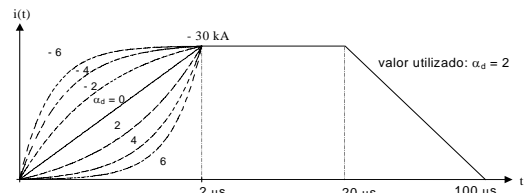


FIGURA 8 - Representação da onda da corrente de descarga atmosférica (sem escala)

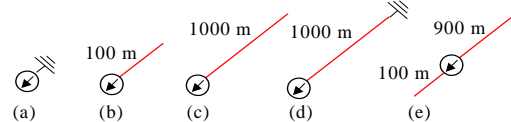


FIGURA 9 - Modelagens do canal de descarga

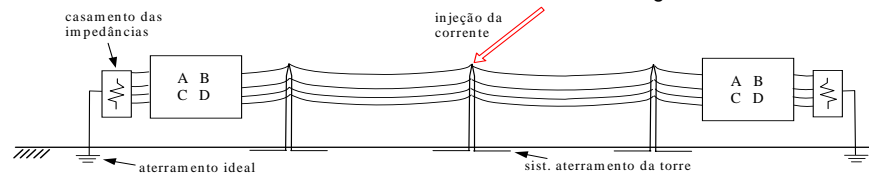


FIGURA 10 – Modelagem do trecho da linha para descarga junto à torre

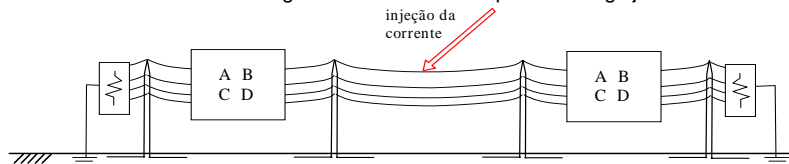


FIGURA 11 – Modelagem do trecho da linha para descarga a meio do vão

• Análise da modelagem do canal da descarga e da modelagem do solo

Comenta-se neste item somente os resultados obtidos para o cálculo “TO-TO” e para a fase “A”, pelo fato dos resultados para as demais fases proporcionarem interpretação semelhante.

Assim sendo, nas Figuras 12 (Solo 1) e 13 (Solo 2) constam as tensões na cadeia de isoladores da fase “A” considerando as cinco hipóteses do canal da descarga apresentadas na Figura 9 e posicionando o canal verticalmente. Percebe-se claramente destes resultados que, independente do modelo do canal adotado ou sem o canal, o emprego do modelo de solo mais preciso, “Solo 2”, proporcionou amplitudes das tensões bem menores, o que indica a necessidade da correta modelagem do solo nos estudos de transitórios rápidos, como o aqui investigado. Já com relação à presença do canal da descarga, foram verificadas amplitudes das tensões superiores àquelas calculadas sem o canal. Quanto aos quatro modelos do canal utilizados, considerando alguns dados de medições reais existentes na literatura, o modelo (b), canal curto, o modelo (d), canal longo aterrado na extremidade, e o modelo (e), originando correntes que, inicialmente, se propagam em sentidos opostos a partir do “ponto” a 100 m, não proporcionaram correlações esperadas, sobretudo os modelos (b) e (e), sendo, portanto, o modelo (c), com canal longo aberto na extremidade, o que levou aos melhores resultados. O efeito da inclinação do canal do modelo (c) com o “Solo 2” foi então investigado, e, da Figura 14, percebe-se que, para os primeiros picos das oscilações, é modesta a influência do ângulo de inclinação do canal, sendo um pouco maiores os valores associados ao emprego do canal com as disposições vertical e inclinado; para os picos subseqüentes, esta diferença se torna mínima.

Deve-se entretanto comentar que tais resultados foram obtidos considerando uma modelagem muito simplificada para

o canal da descarga, e a mesma se destinou, essencialmente, a mostrar a importância e a necessidade de uma modelagem adequada do canal. Além disso, vários aspectos não representados no modelo, se corretamente representados, reduziram, provavelmente, a diferença entre os resultados considerando e não considerando o canal de descarga. O assunto está sendo estudado presentemente e será objeto de trabalhos a apresentar ulteriormente.

- **Análise do efeito do emprego de pára-raios de linha para a redução das sobretensões**

Nas Figuras 15 a 20 têm-se as tensões nas cadeias de isoladores das fases “A”, “B” e “C” para os cálculos “TO-TO” e “MV-TO”. Em todos estes casos utilizou-se o modelo “Solo 2” e, como complemento, nos casos “TO-TO”, também foram incluídos os resultados para o modelo (c) do canal. Confrontando-se os resultados das Figuras 15 a 17 percebe-se que o emprego do pára-raios de linha na fase de altura inferior, fase “C”, como sugerido em algumas referências técnicas sobre o tema, somente foi efetiva para a redução da tensão na cadeia de isoladores desta fase. No entanto, quando da instalação de pára-raios nas três fases, houve uma sensível redução dos valores máximos das tensões das três fases, além de um amortecimento das oscilações. A análise das Figuras 18 a 20 denota conclusões semelhantes.

Na Figura 21 têm-se as tensões entre os cabos de fase de índices “A”, “B” e “C” e o cabo pára-raios a meio do vão para o cálculo “MV-MV” e sem o emprego de pára-raios de linha. Apesar de não terem sido apresentados, resultados bastante semelhantes ao desta figura foram obtidos ao se usar pára-raios apenas na fase “C” ou nas três fases, donde se percebeu que praticamente não houve influência da instalação dos pára-raios nas estruturas adjacentes para a redução das tensões induzidas entre cabos de fase e cabo pára-raios a meio do vão. Este resultado mostra que o uso de pára-raios de linha não é eficaz para reduzir o número de curtos-circuitos resultantes de sobretensões a meio do vão originadas por descargas a meio do vão, e que, para reduzir esse número, há que adotar outra alternativa de procedimento, por exemplo aumentar a diferença entre a flecha dos cabos de fase e dos cabos pára-raios, e ou subir os pontos de fixação dos cabos pára-raios, nas estruturas.

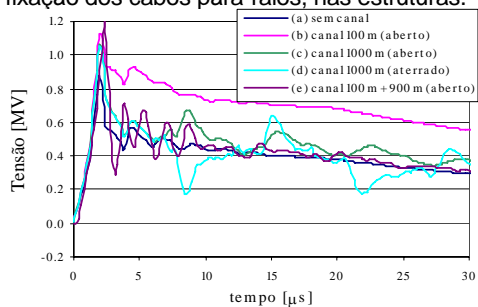


FIGURA 12 – Tensões na fase “A” para o cálculo “TO-TO” e para algumas variações do canal de descarga -

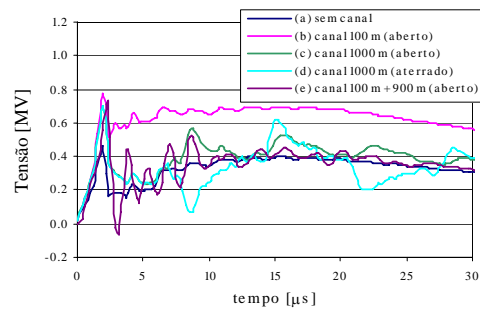


FIGURA 13 – Tensões na fase “A” para o cálculo “TO-TO” e para algumas variações do canal de descarga -

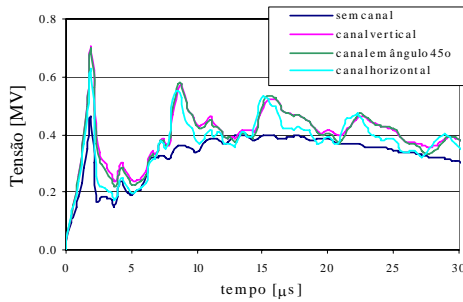


FIGURA 14 – Tensões na fase “A” para o cálculo “TO-TO” e para algumas inclinações do canal da descarga (mod. (c)) -

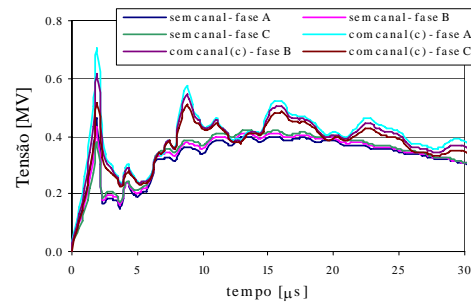


FIGURA 15 – Tensões nas três fases para o cálculo “TO-TO” - sem pára-raios de linha

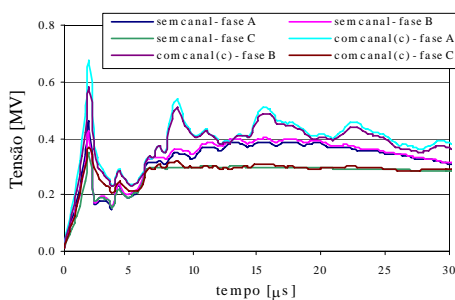


FIGURA 16 – Tensões nas três fases para o cálculo “TO-TO” - pára-raios na fase “C”

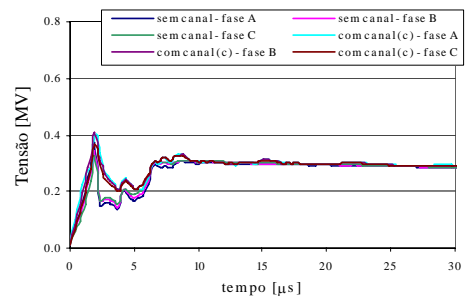


FIGURA 17 – Tensões nas três fases para o cálculo “TO-TO” - pára-raios nas três fases

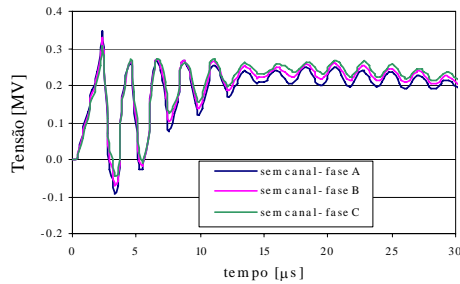


FIGURA 18 – Tensões nas três fases para o cálculo “MV-TO” - sem pára-raios

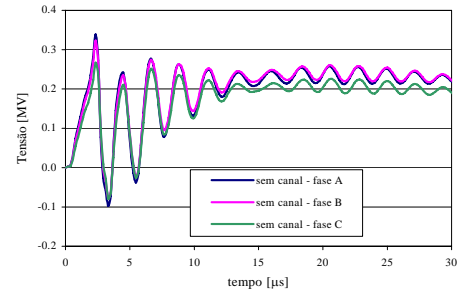


FIGURA 19 – Tensões nas três fases para o cálculo “MV-TO” - pára-raios na fase “C”

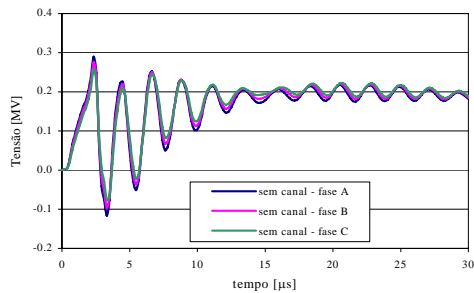


FIGURA 20 – Tensões nas três fases para o cálculo “MV-TO” - pára-raios nas três fases

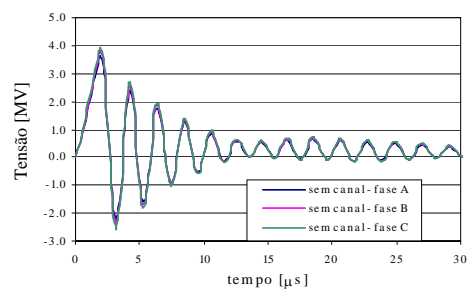


FIGURA 21 – Tensões entre cada fase e o cabo pára-raios para o cálculo “MV-MV” - sem pára-raios

4.0 – CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho uma metodologia desenvolvida no domínio da frequência para o cálculo de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão, onde se implementou o uso simultâneo de vários elementos lineares e não lineares típicos de análises de redes elétricas com elementos fonte de campos eletromagnéticos, do tipo eletrodos cilíndricos, permitindo-se a simulação conjunta de torres, sistemas de aterramento e cabos aéreos, sem algumas simplificações de cálculo costumeiramente empregadas em programas computacionais que operam unicamente no domínio do tempo.

Das análises que foram apresentadas para dois exemplos típicos de linhas de transmissão de 138 e 500 kV, calculando-se sobretensões induzidas em pontos principais da linha em virtude da propagação de uma descarga atmosférica pela linha, pôde-se observar a eficiência da metodologia proposta, investigando-se a influência do canal da descarga atmosférica (apesar deste ter sido modelado de modo aproximado), o efeito da modelagem adequada para o solo, e o emprego de pára-raios de linha para a redução das sobretensões na linha. Esses aspectos apontam a metodologia como também viável para o cálculo de transitórios eletromagnéticos de outra natureza, dando-se uma maior dimensão às análises no domínio da frequência.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PORTELA, C. M. J. C. M. Frequency and transient behavior of grounding systems; I Physical and methodological aspects; II Practical Application Examples. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility pp. 379-390, Austin, United States, 1997.
- (2) DOMMEL, H. W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multi-Phase Networks”, IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems, v. 88, n. 4 (April), 1969, pp. 388-399.
- (3) PORTELA, C. M. J. C. M. Análise de Redes Elétricas – Algumas Aplicações. Edição subsidiada pelo Instituto de Alta Cultura, Lisboa, Portugal, 1970, 1046 p.
- (4) SALARI FILHO, J. C., PORTELA, C. M. J. C. M. Frequency Dependent Behaviour of Grounding Systems. Proceedings of the VII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Curitiba, November, 2003, pp. 75-81.
- (5) SALARI FILHO, J. C., PORTELA, C. M. J. C. M. Evaluation of Touch and Step Voltages Distributions at Vicinity of Grounding Systems Using a Frequency Domain Methodology. Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Avignon, France, September, 2004, pp. 578-583.
- (6) PORTELA, C. M. J. C. M. Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, United States, 1999, pp. 1004-1009.
- (7) SALARI FILHO, J. C., PORTELA, C. M. J. C. M. A New Approach to the Calculation of Distribution and Transmission Lines Performance for Direct Lightning Flash Incidence. Proceedings of the VII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Curitiba, November, 2003, pp. 433-438.
- (8) SALARI FILHO, J. C., PORTELA, C. M. J. C. M. A Methodology to the Calculation of Lightning Performance of Conventional and Non-Conventional Transmission Lines. Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Avignon, France, September, 2004, pp. 650-655.
- (9) 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 (July), 1991, pp. 1327-1335.