

# Metodologias Aplicadas para a Modelagem e Análise de Sistemas de Aterramento Impulsivo – Revisão do Estado da Arte

Daniel S. Gazzana<sup>1</sup>, Arturo S. Bretas<sup>1</sup>, Guilherme A. D. Dias<sup>1</sup> e Marcos Telló<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Elétrica  
UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Osvaldo Aranha, 103, CEP: 90035-190, Porto Alegre, RS (Brazil)  
Telef: +55 51 3308-4291, fax: +55 51 3308-3129, e-mail: [dgazzana@ece.ufrgs.br](mailto:dgazzana@ece.ufrgs.br),  
[abretas@ece.ufrgs.br](mailto:abretas@ece.ufrgs.br), [gaddias@terra.com.br](mailto:gaddias@terra.com.br)

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Elétrica  
PUCRS, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30, CEP: 90619-900, Porto Alegre, RS (Brazil)  
Telef: +55 51 3320-3594, fax: +55 51 3320.3540, e-mail: [tello@ee.pucrs.br](mailto:tello@ee.pucrs.br)

**Resumo.** Este artigo apresenta um estudo de revisão do estado da arte das principais técnicas utilizadas para solucionar problemas relativos a análise de transientes em sistemas de aterramento impulsivo e em alta frequência. Inicialmente, uma introdução sobre o assunto é realizada, enfatizando a importância do aterramento na proteção de pessoas e equipamentos. Na sequência a modelagem por circuitos, linha de transmissão, modelo eletromagnético e híbrido é apresentada. Os métodos numéricos com grande aplicabilidade para a solução de problemas de compatibilidade eletromagnética, como o método das diferenças finitas do domínio de tempo (FDTD), o método de momentos (MoM), o método de elementos finitos (FEM) e o método de modelagem por linhas de transmissão (TLM) são discutidos com o foco em suas características, vantagens e desvantagens.

## Palavras-chave

Sistema de aterramento impulsivo, análise transiente, métodos numéricos, descargas atmosféricas.

## 1. Introdução

Sistemas de aterramento são um dos principais recursos capazes de manter a integridade física de uma instalação no caso de uma sobrecarga elétrica. Tais esquemas são também importantes para a segurança da população [1]-[2]. Esses esquemas são constituídos desde simples hastes horizontais ou verticais até grandes malhas de terra. Além disso, eles constituem o principal sistema de proteção à descargas atmosféricas em plantas industriais.

Os potenciais de passo e toque toleráveis pelos seres humanos usualmente são considerados como parâmetros de referência na análise de malhas de terra em regime permanente (baixas frequências), entretanto, tais potenciais podem ser excedidos no período transitório de um impulso elétrico como na ocorrência de um raio. Desta maneira, a análise impulsiva durante o período transitório deve ser avaliada [3].

Diante de uma descarga atmosférica, o aterramento exerce papel fundamental na condução da corrente elétrica para o solo. Neste fenômeno, a impedância de surto da malha de terra deve ser menor que a impedância equivalente do restante do sistema elétrico envolvido, caso contrário à descarga fluirá para o sistema podendo causar inúmeros danos físicos e materiais. Descargas atmosféricas induzem altas tensões transientes antes que elas sejam dissipadas para o solo. Estas tensões e correntes induzidas podem prejudicar dispositivos conectados ao sistema, causando erros da operação e até mesmo destruição de equipamentos [4].

Modelos apropriados que simulem o comportamento de um esquema de aterramento frente a uma descarga atmosférica podem prover o embasamento necessário para a construção de malhas de terra mais eficientes, permitindo por sua vez um aumento na confiabilidade e segurança da operação do sistema elétrico envolvido [5].

A análise impulsiva e em altas frequências do aterramento tradicionalmente é feita pela solução das equações de Maxwell. Tal equacionamento, já conhecido e consolidado baseia-se na resolução de um conjunto de equações diferenciais que representam o acoplamento entre solo e eletrodo. Sabe-se que a representação de problemas físicos com conseqüente solução matemática deste tipo de equação não é uma tarefa trivial [6]-[7]. Problemas relacionados a modelagem e análise de sistemas de aterramento são não-lineares, inseparáveis e complexos, onde nem sempre uma solução analítica é possível.

Nos últimos anos, métodos analíticos e numéricos foram desenvolvidos e ajustados para a avaliação de aterramento procurando solucionar as limitações até então existentes. O método dos elementos finitos (FEM) [8], o método dos momentos (MoM) [9]-[10], as aproximações por linhas de transmissão integrada ao software EMTP [11] e o método da modelagem por linhas de transmissão (TLM) [12]-[14] são as principais

metodologias utilizadas atualmente. Dentre tais métodos o TLM provavelmente é o mais estudado e aprimorado nos últimos anos. Geometrias complexas, meios não homogêneos e com perdas, materiais com parâmetros variáveis (não lineares, dispersivos e anisotrópicos) podem ser modelados com TLM.

Neste contexto, o objetivo desse artigo é apresentar um estudo de revisão sobre as principais metodologias utilizadas para a análise impulsiva de sistemas de aterramento enfatizando suas características, vantagens e desvantagens. Um objetivo secundário, mas não menos importante é de prover ao leitor um melhor embasamento ao escolher um método que possa ser aplicada ao projeto e avaliação de metodologias de análise e modelagem de sistemas de aterramento impulsivos. Adicionalmente, um estudo abrangente relacionado ao comportamento de eletrodo de terra quando submetido a descarga atmosférica incluindo, ionização e estudo de parâmetros do solo dependentes da frequência pode ser encontrado em [15].

## 2. Modelos Analíticos

Problemas envolvendo análise de aterramento podem ser solucionados utilizando abordagens empíricas [16], numéricas e analíticas. Os principais métodos analíticos de modelagem são: circuitos elétricos [8]; linhas de transmissão [11]; campos eletromagnéticos e modelagem híbrida [17].

Considerando uma modelagem analítica, os fenômenos transientes em sistemas de aterramento podem ser caracterizados por meio de duas abordagens: aquelas baseadas no domínio da frequência (FD) com consequente transformação para o domínio do tempo usando a Transformada Inversa de Fourier (IFFT); aquelas baseadas no cálculo da solução diretamente no domínio tempo (TD). A modelagem por campos eletromagnéticos [18]-[19] utilize a abordagem FD enquanto a modelagem por circuitos [20] e por linhas de transmissão [21] utilizam a abordagem TD para o cálculo da resposta do sistema de aterramento frente a uma banda larga de frequências. Nas próximas seções, estas técnicas serão apresentadas e analisadas.

### A. Modelagem por Circuitos

A modelagem por circuitos, também chamada de modelagem de rede considera o eletrodo de aterramento como um circuito elétrico equivalente composto por uma associação de elementos resistivos (R), capacitivos (C) e indutivos (L). Neste modelo, o acoplamento dos condutores pode ser feito por indutâncias mútuas [20].

Meliopoulos et.al. [21] usou a modelagem por circuitos elétricos para analisar transitórios em sistemas de aterramento. Este modelo é compatível com a solução provada pelo programa de análise de transientes eletromagnéticos (EMTP) [22]. Posteriormente, diversas melhorias nesta teoria foram feitas por Meliopoulos [23], Ramamoorthy [24], Geri [25] e Otero [26]-[27]. A

metodologia de Otero foi provavelmente a primeira solução de análise transitória em sistemas de aterramento no domínio da frequência usando modelagem por circuitos. As principais características deste modelo são:

- segmentação dos eletrodos de aterramento;
- obtenção de um circuito equivalente para cada segmento e cálculo dos parâmetros próprios e mútuos;
- solução de equações nodais do circuito equivalente utilizando as leis de Kirchoff.

A modelagem por circuitos é fácil de ser compreendida, sendo o comportamento transiente do sistema de aterramento simulado pela solução de circuitos equivalentes. A ionização não-linear do solo pode ser incorporada ao modelo, mas esta técnica tem a inconveniência que não pode prever o atraso de propagação do impulso [8].

### B. Modelagem por Linhas de Transmissão

A teoria de linhas de transmissão para modelagem de sistemas de aterramento foi introduzida por Sunde [28]. Neste modelo os condutores interconectados de aterramento são tratados por técnicas de ondas viajantes [23]. Este método propõe resolver diretamente a *telegrapher's equation*. O modelo de J. Marti [29] aprimorou este método e pode ser encontrado em [11],[30]-[31]. As tensões e correntes ao longo do eletrodo são calculados usando modelos do EMTP.

A modelagem por linhas de transmissão pode ser usada para analisar o comportamento transiente de aterramento no domínio de frequência, mas é mais fácil incluir o efeito da ionização do solo para uma abordagem TD. Tal modelagem possibilita incluir o acoplamento mútuo entre eletrodos e pode prever o atraso de propagação do impulso. Este método permite a avaliação de altas frequências o que é bastante apropriado para estudos de descargas atmosféricas. O tempo computacional exigido é menor que o requerido pela modelo de campos eletromagnéticos [8],[32].

### C. Modelagem por Campos Eletromagnéticos

A modelagem por campos eletromagnéticos ou simplesmente modelo eletromagnético é caracterizada pela sua elevada precisão, pois é estritamente baseada nos princípios do eletromagnetismo. Este método é o mais rigoroso para modelar o comportamento transiente em sistemas de aterramento. Baseia-se na resolução das equações de Maxwell com mínimas aproximações. Pode ser implementado usando o método dos elementos finitos (FEM) ou o método dos momentos (MoM) [8].

Grech [18],[33]-[35] desenvolveu um modelo baseado no MoM para analisar o comportamento transiente de sistemas de aterramento. A principal vantagem deste método é sua exatidão, propiciada por mínimas aproximações em sua modelagem, porém é complexo de ser programado. Outra desvantagem, é que devido ao fato do modelo basear-se em uma solução no FD, a inclusão

de não-linearidades devido à ionização do solo não é uma tarefa trivial [8].

Uma implementação baseada no FEM pode ser encontrada em [36]-[37], desenvolvida por Nekhoul et.al. A dificuldade neste modelo é transformar as condições de contorno abertas do ar e do solo em condições de contorno fechadas, de modo a reduzir o tamanho do problema a ser analisado [38]. Uma importante conveniência do FEM associado a modelagem eletromagnética é a elevada flexibilidade de discretização da geometria e do meio. Com isto, a ionização do solo pode ser incluída no modelo. O FEM não resolve diretamente as equações de Maxwell, razão pela qual sua compreensão torna-se mais complicada do que o MoM [8].

A solução de sistema de equações para uma única frequência aumenta consideravelmente o tempo de simulação, uma vez que os fenômenos transitórios envolvem um grande número de frequências.

#### D. Modelagem Híbrida

Esta técnica resulta da combinação da modelagem por circuitos elétricos e eletromagnética, tendo sido desenvolvida por Dawalibi [39]-[40] e posteriormente modificada por Andolfato et.al. [41]. A vantagem deste modelo aos demais é que ele é mais preciso que a modelagem por circuitos quando a fonte de excitação possui valores elevados, além da exatidão conferida pelo modelo eletromagnético [8]. A tabela 1 e a tabela 2 apresentam alguns critérios importantes relacionados aos modelos analíticos apresentados para a análise transiente de sistemas de aterramento [8].

Tabela 1: Comparação de diferentes modelos– Parte 1 [8]

Modelo	Expressão Matemática	Compreensão	Precisão
<b>Eletromagnético</b>	Complicado	Difícil	Mais preciso
<b>Circuitos</b>	Simple	Fácil	Preciso
<b>Híbrido</b>	Complicado	Difícil	Preciso
<b>Linha de transmissão</b>	O mais simples	Fácil	Preciso

Tabela 2 Comparação de diferentes modelos– Parte 2 [8]

Modelo	Procedimento de solução	Performance computacional
<b>Eletromagnético</b>	Complicado	Grande
<b>Circuitos</b>	Simple	Pequena
<b>Híbrido</b>	Complicado	Grande
<b>Linha de transmissão</b>	Simple	Pequena

### 3. Métodos Numéricos

Em problemas complexos, onde a determinação de uma solução analítica é de difícil desenvolvimento, como é o caso de malhas de terra, o uso de métodos numéricos para a análise e modelagem de sistemas de aterramento é uma alternativa poderosa. Boa parte dos métodos numérica de análise e modelagem de sistemas de

aterramento soluciona numericamente as Equações de Maxwell, sujeitas a determinadas condições de contorno. De maneira geral, estas metodologias são classificadas em duas categorias: a primeira delas baseia-se em modelos de equações diferenciais (DE) e a segunda em modelos de equações integrais (IE). Do ponto de vista computacional, assim como as técnicas analíticas, estas técnicas podem ser aplicadas para a solução de problemas no domínio tempo (TD) ou no domínio da frequência (FD).

Técnicas de modelagem no domínio do tempo mostram ser mais apropriadas para a solução de problemas envolvendo uma banda larga de frequências, entretanto dependendo da complexidade do problema a ser modelado o tempo de processamento pode ser bastante elevado [42]. Metodologias baseadas no domínio frequência possuem melhor eficiência quando aplicadas a solução de problemas envolvendo um pequeno número de frequências, como é o caso de aterramento em baixa frequência (50 Hz e 60 Hz) considerando a avaliação em regime permanente. Por outro lado, a análise de transitórios em sistemas de aterramento vem sendo realizada com sucesso utilizando métodos baseados no FD [34],[43]. Neste contexto, diversas metodologias foram desenvolvidas e vem recebendo constantes aprimoramentos ao longo dos últimos anos. O método dos momentos (MoM), o método dos elementos finitos (FEM), o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) e a modelagem por linhas de transmissão (TLM) podem ser consideradas as principais metodologias aplicadas para a solução de problemas de compatibilidade eletromagnética [44].

Nesta seção, serão brevemente descritos e analisados os principais métodos numéricos utilizados para a modelagem e análise de transientes em aterramento (impulsivo e em altas frequências). Informações adicionais sobre tais técnicas podem ser encontrados em [42].

#### A. Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)

A forma mais usual de utilização do método da diferenças finitas é no domínio tempo (FDTD). O método baseia-se na discretização das equações de Maxwell diretamente no tempo e espaço, dividindo o volume de interesse em células unitárias. Usualmente a malha gerada por tais células necessita ser uniforme, sendo assim a densidade da malha é determinada pelo menor detalhe de interesse do modelo. A idéia principal do algoritmo é aplicar o conceito de diferenças finitas na forma diferencial das equações de Maxwell [44].

FDTD foi introduzido por Yee em 1966 [45]. Tal metodologia é numericamente estável, contanto que o passo de tempo não seja maior que certo limite chamado critério de Courant-Friedrichs-Lewy. FDTD é um método bastante apropriado para a análise da resposta de sistemas de aterramento frente a uma descarga atmosférica possibilitando a avaliação de geometrias de malhas de terra irregulares, meios não lineares e com perdas.

A malha de elementos do FDTD é composta por células retangulares onde cada aresta é associada a um campo elétrico. É possível especificar materiais diferentes para cada aresta da malha, conferindo ao método propriedade de anisotropia para a análise de conjunto solo / eletrodo. FDTD é um método iterativo, onde os campos elétrico e magnético são calculados a cada passo de tempo. Estes campos são posteriormente propagados através da malha de elementos, representando desta forma o fenômeno transitório [46]. O uso típico do FDTD para a simulação de problemas de aterramento impulsivo envolve a excitação do sistema modelado por um pulso de corrente sendo gravadas as totalidades dos campos ao longo das células da malha durante todo o período de transitório. Na sequência, algoritmos da Transformada de Fourier permitem a extração do domínio da frequência e de parâmetros de dispersão.

FDTD é um método explícito onde todo o domínio computacional é discretizado, não sendo necessário resolver um conjunto de equações lineares. Devido a isto, é matematicamente menos denso e mais intuitivo que outros métodos numéricos como o método dos momentos [44]. Um dos problemas presentes no método das diferenças finitas é a dificuldade de solução de problemas envolvendo campos distantes [46].

### B. Método dos Momentos (MoM)

MoM é uma técnica no domínio da frequência (FD) baseado na método dos pesos residuais sendo introduzido originalmente por Harrington [47], onde uma equação integral é obtida através do uso de funções de Green no espaço livre. Esta equação integral é solucionada pela sua redução em um sistema de equações lineares. Desta forma o MoM mostra ser apropriado para resolver as integrais presentes no equacionamento de Maxwell. Posteriormente, o uso de diferentes funções de base e procedimentos de discretização conferiram ao MoM novas versões, sendo introduzido também o uso da teoria das imagens modificadas para consideração da interface solo-ar [42].

No caso de estruturas compostas por hastes e contrapesos, como em malhas de terra, a chamada *thin-wire approach* é usualmente aplicada sendo baseada na distribuição de corrente elétrica ao longo do eletrodo. Outra formulação do método utiliza equações de integrais de volume. O uso mais comum do MoM baseia-se na formulação de superfície de corrente onde a discretização da superfície é feita através de elementos triangulares e retangulares. No caso de altas frequências provenientes do período transitório de descargas atmosféricas a relação entre o tamanho do elemento e comprimento de onda deve ser considerada. Um tamanho máximo do elemento igual a  $\lambda/10$  é desejável para se obter uma boa precisão, onde  $\lambda$  é o comprimento de onda [44]. O procedimento para a programação do método dos momentos usualmente envolve quatro passos [42]:

- derivação da equação integral apropriada (IE);
- discretização da equação integral em uma matriz de equações usando bases ou funções de expansão e funções de ponderação;

- estimação dos elementos da matriz;
- resolução da matriz de equações e obtenção dos parâmetros de interesse.

O método pode ser aplicado para a análise de eletrodos e geometrias homogêneas dielétricas. Por se tratar de um método no domínio da frequência é melhor aplicável a solução de problemas envolvendo uma única frequência ou banda estreita de frequências, tornado a análise de sinais impulsivos como descargas atmosféricas um pouco mais exaustiva. O método também não é apropriado para a análise de malhas de terra complexas. Entretanto, MoM pode ser considerado o melhor método para a modelagem de condutores finos, longos e ressonantes. O tempo computacional e a memória requerida aumentam drasticamente se o número de segmentos é elevado [46]. Adicionalmente, para a análise de estruturas contendo materiais não homogêneos, um método híbrido composto por MoM e FEM pode ser apropriado [48].

### C. Método dos Elementos Finitos (FEM)

O método dos elementos finitos é uma técnica no domínio da frequência (FD) usada para solucionar equações diferenciais parciais (PDE). Embora possua uma formulação do domínio do tempo chamado método dos elementos finitos do domínio do tempo (FETD) sua aplicação no FD é mais usual. FEM foi concebido originalmente para análise estrutural [49], passando a ser utilizado para a solução de problemas de eletromagnetismo no final dos anos 60.

O FEM assim como o MoM converte uma equação diferencial ou integral em uma matriz de equações, entretanto, o FEM diferentemente do MoM utiliza o princípio da minimização de energia do sistema. O sistema de equações a ser solucionado é esparso e tipicamente simétrico. O problema de integração de uma PDE é substituído pela busca de uma função que retorna o valor mínimo de uma integral em particular. Este tipo de problema é chamado problema variacional [44]. Modelos baseados no FEM contem informações sobre a geometria do objeto de estudo (forma da malha de terra), excitação (impulso de corrente) e condições de contorno (potencial no ponto de injeção do impulso “1 pu” e no terra remoto “0 pu”). A análise utilizando FEM envolve basicamente quatro passos: [46]:

- discretização da região de solução em sub-regiões ou elementos tipicamente triangulares ou tetraédricos;
- obtenção das equações de campo nas superfícies de cada elemento em termos dos coeficientes não conhecidos nos nós entre as arestas dos elementos ou na superfície dos elementos utilizando polinômios;
- junção de todos os elementos na região de solução utilizando uma matriz de equações;
- solução do sistema de equações obtido.

A malha de elementos gerada pode ter diferentes refinamentos conforme a dimensão da sub-região envolvida, onde o campo elétrico e magnético é calculado nas arestas dos elementos. FEM pode ser aplicado nas equações do vetor de onda de Helmholtz

que é derivada diretamente das equações de Maxwell, ou pode ser aplicado a um conjunto de equações derivadas para a formulação do potencial de vetor escalar de campo.

FEM é uma boa alternativa para modelar meios não homogêneos e dielétricos. As propriedades dos materiais dos elementos da malha podem ser definidas de forma independente conferindo ao método propriedades de anisotropia. Além disso, mostra ser uma metodologia apropriada para a solução de problemas de dispersão, como é o caso de análise transitória de aterramento impulsivo. Embora o MoM possua uma programação mais simples se comparado ao FEM, o método dos elementos finitos é uma técnica numérica mais versátil para manipular problemas envolvendo geometrias complexas e não homogêneas. Contudo, por se tratar de uma técnica no FD a análise de uma banda larga de componentes de frequências provenientes de impulso, como uma descarga atmosférica, pode demandar um elevado processamento computacional. Outra desvantagem desse método é que ele requer a consideração de uma grande região de análise (consideravelmente maior que a malha de terra a ser avaliada) de modo a supor que o terra remoto (condição de contorno) possa ser estimado como zero Volt. Conseqüentemente, o domínio da solução precisa ser truncado [46].

#### D. Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM)

O método da modelagem por linhas de transmissão (TLM) também chamado de método das matrizes de linhas de transmissão é um método numérico diferencial possuindo implementações no domínio do tempo (TD) e no domínio da frequência (FD). Neste método a solução do equacionamento de Maxwell é realizada por analogia com a teoria de linhas de transmissão. No caso de problemas eletromagnéticos envolvendo fenômenos transitórios, as tensões e correntes que se propagam ao longo de uma estrutura de aterramento baseiam-se no Princípio de Huygens. Segundo este princípio, cada ponto de frente de onda produz ondas secundárias que se espalham em todas as direções. TLM permite a modelagem de problemas tridimensionais com estruturas de geometrias complexas, materiais com propriedades não lineares e não homogêneas, com perdas, dispersivos (dependente da frequência) e anisotrópicos, como é o caso do solo atuando como dielétrico em um sistema de aterramento [50].

Para a análise de transitórios eletromagnéticos, como os provenientes de descargas atmosféricas a formulação do domínio tempo TLM-TD mostra ser mais adequada tendo similaridades com o método de FDTD [42]. A diferença básica entre tais metodologias é que a analogia utilizada pelo TLM é feita com circuitos elétricos e não com conceitos puramente matemáticos como é o caso do método FDTD. Sua formulação inicial foi desenvolvida por P. B. Johns no início dos anos 70. Entretanto, seu desenvolvimento aprofundou-se a partir dos anos 80

favorecido pelos constantes avanços na performance computacional [12],[51].

Esta técnica envolve a divisão da região de solução em um conjunto de linhas de transmissão (segmentos), Junções são formadas onde as linhas se cruzam formando descontinuidades de impedância. A comparação entre as equações de linhas de transmissão e as equações de Maxwell permite realizar uma equivalência entre as tensões e correntes nas linhas e os campos eletromagnéticos na região de solução [46]. O algoritmo TLM pode ser descrito pelos seguintes passos [52]:

- determinação das tensões incidentes em cada segmento considerando a excitação presente;
- cálculo dos campos associados aos segmentos de interesse;
- cálculo das tensões refletidas por cada segmento;
- aplicação das condições de contorno para os segmentos ou nós que se localizam nas extremidades do domínio de cálculo;
- determinação das novas tensões incidentes para a próxima iteração.

Entre as diversas vantagens do TLM pode-se citar: o cálculo de correntes, tensões, campo elétrico e magnético podem ser feitos simultaneamente na mesma simulação; a formulação para casos de materiais não homogêneos e não lineares é simples; a formulação das versões em duas e três dimensões apresentam facilidade de programação quando a versão unidimensional é conhecida [53]. A resposta impulsiva e o comportamento no tempo de um sistema podem ser determinados explicitamente. Praticamente não existem problemas com estabilidade, convergência ou soluções espúrias. Algumas vantagens e desvantagens do TLM são similares as do FDTD, entretanto o tempo de simulação e a memória requerida dependem da complexidade da geometria a ser analisada. Em alguns casos a simulação pode se tornar mais pesada que a do FDTD [46]. Importantes critérios relacionados aos métodos numéricos apresentados anteriormente para a modelagem e análise de transientes em sistemas de aterramento podem ser encontrados na tabela 3 e na tabela 4.

Tabela 3: Comparação dos Métodos Numéricos - Parte 1

Método	Expressão Matemática	Compreensão	Precisão
FDTD	Simple	Fácil	Preciso
MoM	Complicado	Difícil	Preciso
FEM	Complicado	Difícil	Preciso
TLM	Mais simples	Fácil	Preciso

Tabela 4: Comparação dos Métodos Numéricos - Parte 2

Método	Procedimento de solução	Performance computacional
FDTD	Simple	Pequena
MoM	Complicado	Muito grande
FEM	Complicado	Muito grande
TLM	Simple	Grande

## 4. Conclusões

Este trabalho apresentou uma revisão e análise sobre as principais metodologias usadas para a modelagem de sistemas de aterramento considerando o período transitório. O objetivo do estudo é auxiliar no processo de escolha de uma técnica apropriada, a ser incorporada a solução computacional para simular e analisar o comportamento de sistemas de aterramento em altas frequências, excitado por um sinal impulsivo, como uma descarga atmosférica.

Os modelos analíticos mais importantes como modelagem por circuitos, linhas de transmissão, campo eletromagnético e modelo híbrido são apresentados. Embora o modelo eletromagnético tenha a melhor solução porque resolve as equações de Maxwell com mínimas aproximações, o fato de ser uma técnica de domínio da frequência exige a solução para cada frequência individualmente. A exigência de performance computacional e o tempo requerido de simulação podem ser bastante elevados se comparados com outras técnicas do domínio de tempo como as baseadas em circuitos ou linhas de transmissão. Estes métodos são menos precisos, mas podem fornecer uma solução com boa confiabilidade. Adicionalmente, em alguns casos o modelo é compatível com a solução provada pelo programa de análise transiente eletromagnética (EMTP). O modelo híbrido associa as vantagens dos modelos eletromagnético e circuitos, mas sua construção pode ser considerada bastante complicada, devido ao profundo conhecimento exigido.

Técnicas numéricas no domínio da frequência como o FEM e MoM e no domínio do tempo como FDTD e TLM também foram discutidas. Novamente, as técnicas no TD mostram ser mais apropriadas para resolver problemas com uma banda larga de frequências, como é o caso de excitações impulsivas. Por outro lado, o atual desempenho computacional não torna impraticável o uso de técnicas no FD.

Entre os métodos numéricos, TLM mostra ser a técnica mais promissora para avaliar transitórios em sistemas de aterramento. Sua facilidade de programação aliada a não necessidade de aprofundados conhecimentos matemáticos e da teoria eletromagnética são importantes atrativos para o uso deste método.

Questões como ionização do solo, materiais não homogêneos, não lineares e com perdas e a dependência da frequência dos parâmetros do solo, devem ser avaliados de modo a escolher um método mais confiável e preciso possível para a solução de problemas relacionados ao aterramento impulsivo. Finalmente, uma extensiva revisão bibliográfica é apresentada com publicações relevantes relacionada ao assunto.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Coordenação

de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) vinculada ao Ministério da Educação do Brasil pelo auxílio financeiro.

## Referências

- [1] C. Portela, "Grounding Systems Behavior for Atmospheric Discharges - Determination of Relative Effect related to People and Equipments Security and the Interference in the Protection and Control Systems," XIV SNPTEE, Belem-PA, Brazil, 1997.
- [2] W. Jaroslaw, "Distribution of Step and Touch Voltages at Typical HV/MV Substation During Lightning," XIII International Conference on Electromagnetics Disturbances, EMD 2003, Bialystok, Poland, 24-26 September 2003.
- [3] M. A. Mattos, "(Transients in Grounding Meshes)," XVII SNPTEE, GES-16, Uberlândia-MG, Brazil, October 2003.
- [4] Yaqing Liu, Mihael Zitnik, and Rajeev Thottappillil, "An Improved Transmission-Line Model of Grounding System," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, No. 3, August 2001.
- [5] Marcos Telló, Guilherme A. D. Dias, Adroaldo Raizer, Hugo D. Almager, Thair I. Mustafá, Vilson L. Coelho, (Grounding Systems in Low Frequency, High Frequencies and impulsive with Case Studies) EDIPUCRS, 2007.
- [6] K. Q. da Costa, V. Dmitriev, "Software Based on Mom Model to Analyze Electromagnetic Transients in Grounding Systems," International Conference on Grounding and Earthing (GROUND 2006) & 2nd International Conference on Lightning Physics and Effects, Maceió, Brazil, November, 2006.
- [7] C. Portela, "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems. I Physical and Methodological Aspects. II Practical Application Examples," Proceedings IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, p. 379-390, 1997.
- [8] Yaqing Liu, Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments, Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1015, 2004.
- [9] F. Dawalibi, A. Selbi, "Electromagnetic Fields of Energized Conductors," IEEE PES 1992 Summer Meeting Paper 92 SM 456-4 PWRD, 1992.
- [10] S. Fortin, Y. Yang, J. Ma, and F. P. Dawalibi, "Electromagnetic Fields of Energized Conductors in Multilayer Soils", CEEM'2006/Dalian, 2006.
- [11] F. E. Menter, L. Grcev, "EMTP-Based Model for Grounding System Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994.
- [12] P. B. Johns, R. L. Beurle, "Numerical Solution of 2-Dimensional Scattering Problems Using a Transmission-Line Matrix," Proc. IEEE, v. 118, n. 9, p.1203 – 1208, September 1971.
- [13] C. Christopoulos, The Transmission-Line Modeling Method – TLM. 1<sup>st</sup> ed. New York: IEEE PRESS, 1995.
- [14] C. Christopoulos, The Transmission-Line Modeling Method in Electromagnetics. Morgan & Claypool Publishers, August 2006.
- [15] S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, January 2007.
- [16] Protection of Structures Against Lightning, Part 1: General Principles, IEC 1024-1-1:1993, 1993.
- [17] M. A. Mattos, "Grounding Grids Transient Simulation," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.

- [18] L. Grcev and F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 5, pp. 1773–1781, October 1990.
- [19] L. Grcev and V. Arnaudovski, "Frequency dependent and transient impedance of grounding systems: Comparison between simulation and measurement," in *Lightning & Mountains Chamonix, France*, 1997.
- [20] R. Velasquez and D. Mukhedkar, "Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, pp. 1314–1322, June 1984.
- [21] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, "Transient analysis of grounding systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-102, pp. 389–397, February 1983.
- [22] R. Adapa, "EMTP - A powerful tool for analyzing power system transients," *IEEE Trans. Computer Application in Power*, pp. 36-41, July 1990.
- [23] A. P. Meliopoulos, A. D. Papalexopoulos, "Frequency dependent characteristics of grounding systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 2, pp. 1073-1081, October 1987.
- [24] M. Ramamoorthy, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran, "Transient performance of grounding grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, pp. 2053-2059, October 1989.
- [25] A. Geri, "Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, July 1999.
- [26] A. F. Otero, J. Cidras, and J. L. del Alamo, "Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, July 1999.
- [27] J. Cidras, A. F. Otero and C. Garrido, "Nodal frequency analysis of grounding systems considering the soil ionization effect," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, January 2000.
- [28] E. D. Sunde *Earth conduction effects in transmission systems*, Second ed., New York: Dover Publications, 1968.
- [29] J. Marti, "Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. PAS-101, pp. 135–147, January 1982.
- [30] F. Menter, "Accurate modeling of conductors imbedded in earth with frequency dependent distributed parameter lines," in *Proc. 1st EMTP User Group Meeting*, 1992.
- [31] N. D. Hatziaargyriou and M. Lorentzou, "Grounding systems design using EMTP," in *Proc. 23rd European EMTP Users Group Meeting, Barcelona, Spain*, November 9–11, 1997.
- [32] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziaargyriou, and B. C. Papadias, "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 2, April 2003.
- [33] L. Grcev, "Computation of transient voltages near complex grounding systems caused by lightning currents," *Proceedings of IEEE 1992 International Symposium on EMC*, p 392-399, 1992.
- [34] L. Grcev and F. Menter, "Transient electromagnetic fields near large earthing systems," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 32, No. 3, May 1996.
- [35] L. Grcev, "Computer analysis of transient voltages in large grounding systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, April 1996.
- [36] B. Nekhoul, C. Cuerin, P. Labie, G. Meunier and R. Feuillet, "A finite element method to calculating the electromagnetics fields generated by substation grounding systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 3, May 1995.
- [37] B. Nekhoul, P. Labie, F. X. Zgainski and G. Meunier, "Calculating the impedance of grounding systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 3, May 1996.
- [38] X. Brunotte, G. Meunier, J. F. Imhoff, "Finite element solution of unbounded problems using transformation: a rigorous powerful and easy solution," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, No. 2, March 1992.
- [39] F. Dawalibi, "Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part I – single conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-1, No. 4, 1986.
- [40] F. Dawalibi, "Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part II – ground networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-1, No. 4, 1986.
- [41] R. ANDolfato, L. Bernardi, L. Fellin, "Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.15, No. 3, 2000.
- [42] Matthew N. O. Sadiku, *Numerical techniques in electromagnetics*, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press, 2000.
- [43] J. Montaña, A. Sarmiento, A. Marín, O. Duarte, B. Torres, "UN\_PAT: software for computing transients voltage in grounding systems," *Grounding 2006 International Conference on Grounding and Earthing & 2nd International Conference on Lightning Physics and Effect*, Brazil, September 2006.
- [44] Heinz-Dietrich Brüns, Christian Schuster and Hermann Singer, "Numerical electromagnetic field analysis for EMC problems," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 49, No. 2, MAY 2007.
- [45] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-14, no. 5, pp. 302–307, May 1966.
- [46] V. Jithesh, D. C. Pande, "A Review on computational EM1 modeling techniques," *Proceedings of INCEMIC*, 2003.
- [47] Hanington, Roger. 'F, "Field Computation by Moment Methods", 1<sup>st</sup> edition. New York The Macmillan Company, 1968.
- [48] X. Yuan, "Three-dimensional electromagnetic scattering from inhomogeneous objects by the hybrid moment and finite element method," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 38, No. 8, pp. 1053–1058, August 1990.
- [49] R. Courant, "Variational methods for a solution of problems of equilibrium and vibrations," *Bull. Amer. Math. Soc.*, pp. 1–23, 1943.
- [50] H. A. D. Almaguer, "Contribution to the transmission line modeling method (TLM) and its application to the bio-electromagnetism study," "Ph.D. thesis, Dept. Elec. Eng., UFSC, Brazil, 2003.
- [51] P. B. Johns, "Application of the transmission-line matrix method to homogeneous waveguides of arbitrary cross-section," *Proc. IEE*, Vol. 119, No 8, pp. 1086-1091, August, 1972.
- [52] J. B. J. Pereira, "Uncertainty modeling in electric grounding systems," Ph.D. thesis, Dept. Elec. Eng., UNB, Brazil, 2008.
- [53] G. S. Ferreira, "Numerical modeling of electromagnetic compatibility problems using TLM (transmission line modeling method)," Ph.D. thesis, Dept. Elec. Eng., UFSC, Brazil, 1999.