UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO





PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL

COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E PERMISSIVIDADE ELÉTRICAS DE SOLOS TÍPICOS COM A FREQUÊNCIA

Aluno: Adriana Generoso Pedrosa Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Matias Afonso

Belo Horizonte, julho de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO





PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL

COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE E PERMISSIVIDADE ELÉTRICAS DE SOLOS TÍPICOS COM A FREQUÊNCIA

por

Adriana Generoso Pedrosa

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos Linha de pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Matias Afonso

Belo Horizonte, julho de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEL

Adriana Generoso Pedrosa

Comportamento Transitório de Eletrodos de Aterramento Considerando a Variação da Condutividade e da Permissividade Elétricas de Solos Típicos com a Frequência

Belo Horizonte, julho, 2010.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Adriana Generoso Pedrosa

Comportamento Transitório de Eletrodos de Aterramento Considerando a Variação da Condutividade e Permissividade Elétricas de Solos Típicos com a Frequência.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 12 de julho 2010 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Universidade Federal de São João del-Rei - Orientador

Prof. Dr. Marcio Matias Afonso Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof^a. Dr^a. Úrsula do Carmo Resende Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Alexandre Piantini Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Silvério Visacro Filho Universidade Federal de Minas Gerais

Os desafios e conquistas deste trabalho são dedicados à Maria Izabel de Aguiar, minha avó e maior exemplo de vida.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu orientador Professor Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, não apenas pelos ensinamentos e empenho dedicados à concretização desta dissertação, mas, também, pelo incentivo, tranquilidade transmitida, confiança e amizade. Não há dúvidas sobre a importância de sua orientação tanto em minha formação técnico-científica quanto em minha vida pessoal.

Agradecimento especial também é dedicado à minha família: pais, irmãs, tios, primos e avós. Com certeza, sem seu apoio este trabalho não seria concretizado.

Não poderia deixar de expressar sinceros agradecimentos a uma das pessoas mais especiais, minha colega e amiga Clarissa Gomes Cosentino Alvarez. Agradeço pelos anos de trabalho em conjunto, discussões técnicas e apoio durante os períodos da graduação e mestrado. Sem sua presença e momentos de descontração essa caminhada seria muito mais difícil e muito menos agradável.

Agradeço aos professores Márcio Matias Afonso (co-orientador), Tarcísio Antônio Santos de Oliveira e Anísio Rogério Braga pelos valiosos ensinamentos, ajuda técnica e incentivo dados desde os tempos da graduação.

Um sincero agradecimento é feito ao colega Rafael Silva Alípio, pelas incansáveis discussões e apoio que contribuíram de forma decisiva para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores, colegas e funcionários do Programa de Pós-Gradução em Engenharia Elétrica que contribuíram, com sugestões, críticas e discussões. Quero também agradecer aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, em especial aos amigos Josemar Figueiredo Pereira, Maurício Pessoa e Edwar Saliba Júnior pelo apoio, companheirismo e discussões ao longo deste período.

Agradeço à coordenação do Centro de Computação Científica, em especial ao Sérgio Ricardo Guerra, pela disponibilidade de utilização do laboratório e cooperação.

Quero agradecer também à equipe da Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais), representada pelo engenheiro Sandro de Castro Assis, pela oportunidade de trabalho em conjunto.

Finalmente, agradeço ao apoio financeiro concedido pelo CEFET-MG, sem o qual não seria possível a realização desta dissertação.

"Um pouco de ciência nos afasta de Deus. Muito, nos aproxima" Louis Pasteur

SUMÁRIO

RESUMOI
ABSTRACTII
LISTA DE FIGURAS III
LISTA DE TABELASVI
PUBLICAÇÕES ORIGINADAS DA DISSERTAÇÃOVII
CAPÍTULO 1 –INTRODUÇÃO 1
1.1 – Relevância do tema sob investigação1
1.2 – Contextualização da dissertação2
1.3 – Objetivos Gerais e Específicos 3 1.3.1 – Objetivos gerais 3 1.3.2 – Objetivos específicos 3
1.4 – Metodologia 4
1.5 – Organização do texto 4
CAPÍTULO 2 –ESTUDO DO ESTADO DA ARTE6
2.1 – Introdução6
2.2 – Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos
 2.3 - Variação dos Parâmetros do Solo com a Frequência
2.4 – Conclusões
CAPÍTULO 3 –RESULTADOS
3.1 – Introdução
3.2 – Parâmetros das ondas de corrente adotadas
3.3 – Impedância na Frequência35

3.4 –	Sobretensão no Ponto de Injeção de Corrente 41				
3.5 –	Impedância Impulsiva45				
3.6 –	Comprimento Efetivo 49				
3.7 –	Coeficiente Impulsivo53				
3.8 –	Conclusões				
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 60					
4.1 –	Introdução60				
4.2 –	Principais Resultados60				
4.3 –	Propostas de Continuidade62				
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS63					
ANEXO A – INTERAÇÃO ENTRE CAMPO ELÉTRICO E MATERIAIS66					
A.1 -	Materiais Condutores				
A.2 -	Materiais Dielétricos67				
ANEXO B – GRÁFICOS DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE ELETRODOS HORIZONTAIS72					
B.1 -	Gráficos de Impedância Harmônica72				
B.2 – Gráficos de Sobretensão no ponto de injeção81					
B.3 -	Gráficos de Impedância Impulsiva94				
B.4 -	Gráficos de Coeficiente Impulsivo97				

RESUMO

Este trabalho apresenta, interpreta e discute uma série de análises de sensibilidade relativas ao desempenho transitório de eletrodos horizontais de aterramento, típicos de cabos contrapeso de linhas de transmissão. O desempenho é avaliado em função do comprimento dos eletrodos, resistividades representativas dos solos do ambiente brasileiro (medidas em baixa freguência), ondas de corrente injetadas (rápidas e lentas) e consideração dos parâmetros elétricos do solo (condutividade e permissividade) constantes e variáveis com a frequência. Para quantificar e qualificar o desempenho transitório os seguintes elementos são determinados: sobretensão no ponto de injeção de corrente, impedância impulsiva, comprimento efetivo e coeficiente impulsivo. As análises de sensibilidade são realizadas por meio da utilização de um modelo eletromagnético, fisicamente consistente, baseado diretamente nas Equações de Maxwell, validado mediante comparações com resultados experimentais (em trabalhos anteriores). Este modelo é desenvolvido no domínio da frequência, o que possibilita a inclusão direta de expressões matemáticas que traduzem a variação dos parâmetros do solo com a frequência. De um modo geral, os resultados expressam que os cabos contrapeso apresentam desempenho transitório mais satisfatório quando os parâmetros do solo são modelados considerando suas variações com a frequência, quando comparado com o desempenho de tais cabos no caso de parâmetros constantes ao longo do espectro de frequência. Desta forma, os níveis máximos de sobretensão, a impedância impulsiva e o coeficiente impulsivo são menores, enquanto o comprimento efetivo é maior, quando comparados com os resultados oriundos da desconsideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência. Estas reduções e este aumento são mais expressivos quando se considera a metodologia de medição de C. Portela e para solos com valores mais elevados de resistividade. Atribui-se tal fato ao acentuado efeito capacitivo, mais pronunciado em solos de menor condutividade. Estes resultados incitam o questionamento se, realmente, os sistemas de aterramento são os grandes "vilões" do sistema elétrico quando da ocorrência de desligamentos oriundos, por exemplo, da incidência de descargas atmosféricas. Aparentemente, os aterramentos apresentam desempenho melhor que o esperado e, na maioria das vezes, divulgado. Nesse sentido, convém investigar com maior rigor outros elementos do sistema elétrico que possam influenciar o desempenho do sistema elétrico frente a descargas atmosféricas. Para finalizar, é importante destacar que os resultados obtidos nesta dissertação destoam consideravelmente dos divulgados na literatura científica especializada, normalmente tidos como tradicionais. Por outro lado, concordam com resultados experimentais recentemente divulgados.

ABSTRACT

This work presents, explains and treats several sensitivity analysis of the transient performance of grounding horizontal electrode, typical counterpoise of transmission lines. The performance is evaluated according to the length of the electrode, representative soil resistivity of the Brazilian environment (measured at low frequency), current waves injected (fast and slow), and consideration of soil electrical parameters (conductivity and permittivity), constant and variable with frequency. The following are determined to quantify and qualify the transient performance: overvoltage at the point of injection current, impulsive impedance, effective length, and impulsive coefficient. The sensitivity analysis are done trough of an electromagnetic model, reliable, based on Maxwell's equations, validated through comparisons with experimental results (in earlier works). This model is developed in the frequency-domain, which enables the direct inclusion of mathematical expressions that compute the variations of soil parameters with frequency. In general, the results express that the counterpoise have more satisfactory transient performance when the soil parameters are modeled considering their variation with frequency than when compared with the performance of these cables in the case of constant parameters for the frequency spectrum. Thus, the maximum levels of voltage, the impulsive impedance and the impulsive coefficient are smaller while the effective length is greater when compared with results from the disregard of soil parameter with the frequency. These reductions and this increase are more significant when one considers the Portela' methodology and for soils with higher resistivity. This fact is attributed to the intense capacitive effect, more expressive in less conductive soil. These results encourage the questioning if the grounding systems are the great "villain" of the electrical system's performance against lightning. Apparently, the grounding has better performance than expected and, in most cases, publish. It is therefore important to investigate in greater detail other elements of the electrical systems that can influence the performance of the electrical systems against lightning. Finally, it is important to emphasize that the results obtained in this work are considerably different from those published in the scientific literature, generally regarded as traditional. On the other hand, agree with experimental results published recently.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema físico sob estudo [1]7
Figura 2.2 – Fontes de correntes no eletrodo [1]-[3]8
Figura 2.3 – Distâncias entre eletrodo emissor e eletrodo receptor [1]8
Figura 2.4 – Arranjo utilizado para medição da impedância das amostras de solo [2]. 16
Figura 2.5 – Representação esquemática de uma amostra de terra para medida de σ +
jωε no domínio de frequência [11]19
Figura 2.6 – Variação da condutividade do solo com a frequência para:
Figura 2.7 - Variação com a frequência da permissividade do solo x frequência
angular para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100\Omega$.m e, (b) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400\Omega$.m
Figura 2.8 – Variação de α considerando a variação de σ e ϵ com a frequência para :
(a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100\Omega$.m e, (b) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400\Omega$.m
Figura 2.9 – Relação entre valores de α considerando a variação de σ e ϵ com a
frequência e α considerando σ e ϵ constantes para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100\Omega$.m e, (b)
$1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400 \ \Omega.m.$
Figura 2.10 – Variação de β considerando a variação de σ e ϵ com a frequência para:
(a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100\Omega$.m e, (b) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400\Omega$.m
Figura 2.11 – Relação entre valores de β considerando a variação de σ e ϵ com a
frequência e β considerando σ e ϵ constantes para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100 \ \Omega$.m e, (b)
$1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400 \ \Omega.m$
Figura 3.1 – Formas de onda de corrente dupla exponencial
Figura 3.2 – Onda típica de descarga atmosférica representada pela função de Heidler
Figura 3.3 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 50 m
considerando os parâmetros do solo (a) Constantes, e dependentes da frequência
segundo (b) Scott [5], (c) Longmire [7], (d) Visacro [8] e (e) Portela [11]
Figura 3.4 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 10 m, enterrado a
0,5 m em solo com resistividade medida em baixa frequência de 500 Ω .m
Figura 3.5 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 90 m, enterrado a
0,5 m em solo com resistividade medida em baixa frequência de 500 Ω .m40
Figura 3.6 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 10 m, enterrado a
0,5 m em solo com resistividade medida em baixa frequência de 2.400 Ω .m40
Figura 3.7 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 90 m, enterrado a
0,5 m em solo com resistividade medida em baixa frequência de 2.400 Ω .m40

- Figura 3.11 Tensões resultantes da injeção de uma onda de corrente Heidler com tempo de frente 1 µs na extremidade de eletrodo horizontal de (a) 50 m e (b) 90 m para solo com valor de resistividade medida em baixa frequência de 2.400 Ω.m 45

- Figura 3.14 Impedância impulsiva em função do comprimento do eletrodo considerando a variação dos parâmetros do solo segundo Visacro e ondas de corrente dupla-exponencial (a) 1,2/50 µs e (b) 10/350 µs e (c) modelada pela função de Heidler com tempo de frente 1 µs......48

- Figura 3.17 Impedância impulsiva em função do comprimento de eletrodos horizontais, para injeção de uma onda de corrente impulsiva de 10/350 µs,

- Figura 3.19 Coeficiente impulsivo de eletrodos horizontais, solicitados por uma onda de corrente do tipo dupla exponencial 1,2/50 μs, imersos em solos de resistividades em baixas frequências de: (a) 500 Ω.m e (b) 2.400 Ω.m......55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficiente a _n para solo universal [7]	15
Tabela 3.1 – Valores de A, ϕ e λ para as ondas 1,2/50 μs e 10/350 μs	33
Tabela 3.2 – Valores dos termos da função de Heidler utilizada nas simulações	34

PUBLICAÇÕES ORIGINADAS DA DISSERTAÇÃO

As seguintes publicações têm origem neste trabalho de dissertação:

- R. S. Alipio, A. G. Pedrosa, M. A. O. Schroeder, R. K. Oliveira, Estudo comparativo entre formulações de medição de variação da condutividade e da permissividade de solos típicos com a frequência, XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XX SNPTEE), Recife, Brasil, Nov. 2009.
- A. G. Pedrosa, R. S. Alipio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, Simulation of Behavior Electrical Grounding – Comparative Analysis for Performance in Frequency-Domain, The International Workshop on Applied Modeling and Simulation (WAMS 2010), Búzios, Brasil, Maio 2010.
- A. G. Pedrosa, R. S. Alipio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, Influência dos parâmetros eletromagnéticos dependentes da frequência de solos típicos na resposta harmônica de aterramentos elétricos, XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA'2010), Bonito, Setembro, 12-16, 2010.
- A. G. Pedrosa, M. A. O. Schroeder, R. S. Alípio, S. Visacro, "Influence of Frequency-Dependent Soil Electrical Parameters on the Grounding Response to Lightning", 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP'2010), Cagliari, Italy – September, 13-17, 2010.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Relevância do tema sob investigação

Um elemento essencial para o bom desempenho de um sistema elétrico é o aterramento elétrico, uma vez que está presente em praticamente todas as partes deste sistema, desde a geração até o consumo da energia elétrica, desempenhando diversas funções ao longo do processo. O aterramento do sistema elétrico tem como objetivo manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança, para assim proteger pessoas contra choques elétricos devidos a tensões de passo e de toque, bem como proteger equipamentos interligados às instalações. Também é objetivo do aterramento fornecer um caminho seguro, controlado e de baixa impedância em direção a terra para correntes provenientes de descargas atmosféricas.

Um dos elementos fundamentais para quantificar razoavelmente a resposta do aterramento elétrico frente a uma solicitação é a correta caracterização do solo utilizado para tal. Para ocorrências em baixas frequências a caracterização dos parâmetros do solo, ou seja, sua condutividade e permissividade, já são satisfatoriamente abordadas na literatura. Normalmente, a permissividade é desconsiderada e a resistividade (1/condutividade) é medida na frequência próxima de 100 Hz. Tal consideração é fisicamente consistente, pois em baixas frequências a corrente de deslocamento pode ser desprezada e, assim, a composição de corrente no solo considera apenas a parcela da corrente de condução.

Por outro lado, quando o aterramento é submetido a fenômenos impulsivos, como no caso de ocorrências de descargas atmosféricas e manobras, principalmente para a faixa de altas frequências, a corrente de deslocamento não pode ser negligenciada. Ademais, os parâmetros eletromagnéticos do solo (permissividade e condutividade) variam significativamente com a frequência, fazendo com que as correntes de condução e de deslocamento também variem. Vale ressaltar ainda a dependência desses parâmetros, também, em relação ao tipo de solo, no que se refere à umidade, granulometria e quantidade de sais dissolvidos no mesmo.

Os fatores descritos acima garantem a relevância do tema sob investigação, que sugere um estudo sobre a modelagem eletromagnética de solos típicos que considere a variação da permissividade e da condutividade elétricas com a frequência, presentes na literatura técnica, e sua aplicação no cálculo do desempenho transitório de aterramentos elétricos, a fim de que se possam desenvolver práticas adequadas de proteção contra os efeitos danosos das descargas atmosféricas, e outros fenômenos impulsivos, no sistema elétrico.

1.2 – Contextualização da dissertação

O crescente desenvolvimento tecnológico fez nascer também a preocupação com o nível de confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. Neste contexto, as descargas atmosféricas em linhas de transmissão têm grande importância por serem o principal fator de desligamentos dessas linhas, causando um alto número de interrupções no fornecimento de energia elétrica e distúrbios na qualidade do suprimento de energia aos consumidores.

O Brasil possui elevadas taxas de incidência de descargas atmosféricas em relação às regiões de clima moderado, o que provoca considerável número de desligamento de suas linhas de transmissão e distribuição de energia.

Associado ao alto índice de descargas atmosféricas, o país possui características peculiares de solos que acarretam em um alto valor de sua resistividade. Por exemplo, em Minas Gerais o valor médio é 2.400 Ω .m, podendo chegar a 20.000 Ω .m em algumas regiões.

Todos estes fatores reunidos causam sérias dificuldades na elaboração de projetos de aterramento elétrico e justificam porque deve ser evitada a repetição de técnicas e práticas de proteção já anteriormente desenvolvidas para regiões com características de relevo e clima menos severos. Nesse sentido, o tema sob investigação é de grande interesse para algumas concessionárias de energia elétrica no Brasil, em especial à Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Surgiu então um projeto cooperativo de pesquisa, P&D, entre a CEMIG, ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e o CEFET-MG/GEAP (Grupo de Eletromagnetismo Aplicado – cadastrado no CNPq). Este trabalho de mestrado está inserido no referido projeto de pesquisa, que busca a compreensão e quantificação dos efeitos devastadores que as descargas atmosféricas causam no sistema elétrico, com ênfase na avaliação do comportamento transitório de cabos contrapeso de aterramentos elétricos de linhas de transmissão.

1.3 – Objetivos Gerais e Específicos

1.3.1 – Objetivos gerais

O objetivo geral do presente trabalho consiste em obter uma avaliação pertinente do comportamento transitório de cabos contrapeso de aterramentos elétricos típicos de linhas de transmissão quando submetidos a fenômenos impulsivos, contemplando de forma plausível a variação da permissividade e da condutividade do solo com a frequência e, assim, subsidiar práticas de projetos e de proteção. Com os resultados obtidos, tem-se a intenção de caracterizar alguns parâmetros importantes para o desempenho de sistemas de aterramento, como a impedância impulsiva e o comprimento efetivo. Pretende-se com isso analisar o desempenho de sistemas de aterramento em diversas situações práticas. Tem-se a expectativa de que este estudo possa possibilitar a melhor avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Desta forma, técnicas de aterramento e proteção adequadas poderão ser propostas para cada região de Minas Gerais, levando-se em conta as características de solo e clima de cada região.

1.3.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos a serem obtidos a fim de que o objetivo principal deste trabalho seja alcançado são:

- Estudo de metodologias adequadas para o cômputo da variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo com a frequência;
- Estudo, desenvolvimento e aplicação de ferramenta computacional para a modelagem de sistemas de aterramento compostos de eletrodos horizontais, incluindo a variação da condutividade (σ) e da permissividade (ε) do solo com a frequência;
- Elaboração de análises de sensibilidade considerando valores típicos de resistividade de solo, comprimento de eletrodos, ondas de corrente etc. e suas influências no comportamento transitório de cabos contrapeso de linhas de transmissão;
- Ampla divulgação do trabalho por meio da publicação de artigos técnico-científicos em seminários, congressos e revistas.

1.4 – Metodologia

O presente trabalho utiliza a modelagem eletromagnética computacional, implentada em [1], cujas bases foram originalmente divulgadas em [2], já validada por meio de comparação com resultados de medição, para avaliação da sensibilidade do aterramento elétrico na presença de fenômenos impulsivos.

São desenvolvidas análises de sensibilidade de parâmetros físico-práticos dos sistemas de aterramentos, como por exemplo: sobretensão no ponto de injeção de corrente; impedância impulsiva de aterramentos elétricos; comprimento efetivo de cabos contrapeso; coeficiente impulsivo. Tais parâmetros permitem avaliar o comportamento transitório de aterramentos elétricos e, assim, subsidiam as práticas de projeto e de proteção contra, por exemplo, as descargas atmosféricas.

Para tanto são explorados alguns itens. São eles:

- Estudo do estado da arte no tema associado à quantificação experimental da variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo (condutividade e permissividade elétricas) com a frequência;
- Investigação mais aprofundada do efeito desta variação na resposta transitória de aterramentos elétricos típicos de linhas de transmissão;
- Análise comparativa entre as diferentes formulações existentes, para cômputo da variação da condutividade e da permissividade do solo, por meio dos resultados de desempenho do aterramento elétrico.

1.5 – Organização do texto

O presente texto está organizado em quatro capítulos e dois anexos, incluindo este capítulo introdutório.

No Capítulo 2 faz-se o Estudo do Estado da Arte do tema em questão. Inicialmente, são descritos os aspectos básicos da modelagem eletromagnética para o estudo do desempenho do aterramento elétrico, a ser utilizada no presente trabalho, para a análise do comportamento transitório de cabos contrapeso, frente a fenômenos impulsivos. Em seguida, apresentam-se as metodologias e formulações existentes na literatura que contemplam a variação da condutividade e da permissividade do solo com a frequência. Na parte final do capítulo é feita uma comparação entre as principais formulações de interesse nesta dissertação para o cômputo da variação da condutividade e da permissividade do solo.

No Capítulo 3 são apresentados resultados de simulação do comportamento do aterramento elétrico submetido a fenômenos impulsivos e as respectivas análises de sensibilidade. São considerados, como configuração de aterramento, eletrodos horizontais de diversos comprimentos e inseridos em solos de diferentes resistividades medidas em baixa frequência, solicitados por ondas de corrente rápidas (típicas de descargas atmosféricas) e lentas (associadas a operações de manobra). Os resultados são obtidos considerando os parâmetros elétricos do solo constantes e também variáveis com a frequência de acordo com as metodologias apresentadas no Capítulo 2.

Finalmente, no Capítulo 4, apresentam-se algumas conclusões gerais provenientes desta dissertação e propostas de trabalhos futuros.

Para um melhor entendimento da resposta de meios materiais na presença de campos elétricos é apresentado sucintamente, no Anexo A, um estudo da interação de tais campos com meios de características condutivas e dielétricas.

Em função do número excessivo de análises de sensibilidade envolvidas nesta dissertação, o que inviabiliza a apresentação e interpretação de todas no texto (pois do contrário o mesmo ficaria muito sobrecarregado), reserva-se o Anexo B para apresentar alguns resultados extras não contemplados no Capítulo 3 desta dissertação.

CAPÍTULO 2 – ESTUDO DO ESTADO DA ARTE

2.1 – Introdução

Como mencionado no capítulo anterior, no presente trabalho deseja-se realizar uma sistemática avaliação do comportamento transitório de cabos contrapeso de aterramentos elétricos típicos de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Para tanto, toma-se como base o modelo eletromagnético utilizado por R. Alípio em sua dissertação de mestrado [1]. Este modelo foi inicialmente idealizado, desenvolvido e implementado por S. Visacro [2], [3]. Os detalhes dos desenvolvimentos adicionais realizados por R. Alípio em relação ao modelo de S. Visacro podem ser encontrados em [1].

Deseja-se abordar aqui alguns pontos não ressaltados por R. Alípio [1]. Um deles é a investigação mais aprofundada do efeito da variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo (condutividade e permissividade) com a frequência na resposta transitória do aterramento.

Para tanto, é necessário o prévio entendimento do modelo eletromagnético utilizado neste trabalho, bem como salientar os progressos desejados em relação à [1].

O presente capítulo apresenta primeiramente os aspectos básicos da modelagem utilizada (seção 2.2). A seção 2.3 apresenta, sucintamente, os principais trabalhos existentes na literatura referentes à variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo com a frequência. Ao fim do capítulo (seção 2.4), são destacados alguns detalhes que fundamentam a escolha da formulação que computa a variação da condutividade e permissividade do solo com a frequência, para a inclusão na modelagem eletromagnética e obtenção das respectivas análises de sensibilidade.

2.2 – Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos

Em 1992, S. Visacro propôs uma modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos de configurações geométricas genéricas, que caracteriza a resposta dos mesmos frente a descargas atmosféricas [2]. Para que o referido modelo pudesse ser aplicado em aterramentos de configurações genéricas e, para que fosse possível a inclusão da variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo (condutividade e permissividade) com a frequência, este modelo foi desenvolvido baseando-se na teoria de campo, por meio da solução direta das equações de Maxwell no domínio da frequência. No final de 2008, R. S. Alípio implementou o modelo eletromagnético elaborado por S. Visacro, com alguns acréscimos importantes [1]: i) utilização do método dos momentos e ii) inclusão de imagens complexas no acoplamento transversal. Vale salientar que a modelagem desenvolvida foi exaustivamente validada por meio de comparações com resultados experimentais e com outros modelos teóricos [1]-[3].

A Figura 2.1 ilustra o sistema físico modelado, sendo constituído da malha de aterramento de configuração genérica imersa em um solo de condutividade elétrica σ_s , permissividade elétrica ϵ_s e permeabilidade magnética μ_s , sendo solicitado por uma onda de corrente i(t).



Figura 2.1 – Sistema físico sob estudo [1]

O solo onde a malha está inserida é considerado como meio semi-infinito, linear, homogêneo e isotrópico, existindo interface com o meio ar de condutividade σ_a , permissividade elétrica ε_a e permeabilidade magnética μ_a , conforme mostra a Figura 2.1. Ademais, em [1], pelo menos na maior parte, o solo foi considerado um meio não dispersivo. Vale relembrar que nesta dissertação, em sua maior parte, o solo é modelado como um meio dispersivo.

A modelagem do aterramento é obtida a partir da consideração dos efeitos transversais e longitudinais da onda de corrente nos eletrodos de aterramento.

De acordo com a Figura 2.2, cada eletrodo é dividido em diversos segmentos. Cada segmento é considerado uma fonte de corrente transversal I_T/L , que dispersa do elemento (onde L é o comprimento do segmento), e também uma fonte de corrente longitudinal I_L , que flui ao longo do elemento [1], [2]. Ambas as fontes de corrente possuem variações harmônicas no tempo.



Figura 2.2 – Fontes de correntes no eletrodo [1]-[3]

As correntes presentes em cada elemento causam efeito eletromagnético em pontos genéricos do meio onde está inserido e, também, nos demais elementos e nele próprio. A corrente transversal está associada à elevação de potencial, em relação ao infinito, dos pontos vizinhos ao elemento (inclusive nele mesmo), enquanto a corrente longitudinal é associada à força eletromotriz induzida gerada no próprio elemento e em outros [1], [2].

A Figura 2.3 ilustra um eletrodo emissor (fonte) genérico, de formato cilíndrico e comprimento L_j (suficientemente pequeno), de onde dispersa uma corrente total I_{Tj} , considerada distribuída uniformemente ao longo do segmento. O efeito transversal do eletrodo emissor em um receptor (observação do campo), de comprimento L_i , pode ser representado como uma soma finita de fontes de corrente transversais pontual, conforme mostra a Figura 2.3.



Figura 2.3 – Distâncias entre eletrodo emissor e eletrodo receptor [1]

O potencial escalar médio ao longo do eletrodo receptor devido à densidade de corrente linear que deixa o eletrodo emissor é dado por [1, 2, 3]:

$$V_{ij} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)L_jL_i} \int_{L_i} \int_{L_j} I_{T_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j di_i, \qquad (2-1)$$

onde $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$ corresponde à constante de propagação. As demais grandezas geométricas estão definidas na Figura 2.3.

Considerando agora uma corrente filamentar I_{Lj} fluindo ao longo do eletrodo emissor da Figura 2.3, tem-se, por meio de procedimento similar ao utilizado para encontrar o potencial escalar médio no eletrodo receptor, a expressão para cálculo da força eletromotriz induzida no eletrodo receptor (ΔV_{ij}), devida à corrente longitudinal I_{Lj} [1], [2], [3]:

$$\Delta V_{ij} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{L_i} \int_{L_j} I_{L_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i, \qquad (2-2)$$

O Método dos Momentos (MoM) é utilizado em [1] para solucionar as equações (2-1) e (2-2). Este foi escolhido por possibilitar a redução das equações integrais a um sistema de equações lineares e também por permitir representar as correntes I_{Tj} e I_{Lj} por funções base variadas [1]. O procedimento para a solução consiste em discretizar os eletrodos cilíndricos utilizados para o estudo em N elementos uniformes, cada um com comprimento $I = \frac{L_e}{N}$, sendo L_e o comprimento do eletrodo.

A elevação de potencial médio em relação ao infinito e a queda de tensão em cada elemento podem ser dadas, respectivamente, pelas seguintes formas matriciais [1, 2, 3]:

$$V = Z_T I_T$$
(2-3)

$$\Delta V = Z_L I_L \tag{2-4}$$

Nas equações (2-3) e (2-4) V, de dimensão N × 1, corresponde ao vetor elevação de potencial médio em cada elemento, ΔV é o vetor de queda de tensão em cada elemento, também de dimensão N × 1. I_T e I_L, ambos de dimensão N × 1, correspondem aos vetores de corrente transversal e longitudinal, respectivamente, e

 Z_T e Z_L são as matrizes de impedância transversal e longitudinal, respectivamente, ambas de dimensão N × N [1], [2], [3].

O acoplamento entre as equações (2-3) e (2-4) resulta em uma única equação matricial da forma Ax = b [1], [2], [3]:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{N1} \\ V_{N2} \\ \vdots \\ V_{N3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$
(2-5)

onde:

- A, é a matriz resultante do relacionamento das correntes transversal e longitudinal para cada nó do sistema sob estudo, bem como das elevações de potencial e quedas de tensão com as tensões nos nós. Possui dimensão p × p, onde p corresponde ao número de nós resultante da segmentação dos eletrodos.
- x é o vetor de tensões nodais, V_N , de dimensão p × 1.
- b é o vetor correspondente à injeção de correntes externas, de dimensão p × 1. Ele possui o valor "1" nos nós em que há injeção de corrente externa e zero nos demais nós.

A partir da solução da equação matricial (2-5), e a obtenção do vetor V_N , é possível definir os valores das correntes transversal e longitudinal, em cada elemento. Obtidas tais correntes, o modelo implementado em [1] permite determinar outras importantes variáveis para análise do sistema de aterramento, como: impedância de aterramento, resistência de aterramento, potenciais ao longo da malha de aterramento, impedância impulsiva, coeficiente impulsivo e comprimento efetivo [1], [2], [3].

Detalhes adicionais do modelo eletromagnético, tais como dedução das equações e sistemas lineares, aplicação do método dos momentos, consideração da interface solo-ar, acoplamentos eletromagnéticos, composição de corrente no solo e solução numérica das integrais duplas, encontram-se em [1], [2], [3].

2.3 – Variação dos Parâmetros do Solo com a Frequência

2.3.1 – Aspectos Gerais

Um dos principais quesitos para um estudo adequado dos fenômenos transitórios em sistemas elétricos de potência é uma representação apropriada dos efeitos do aterramento. Neste contexto, o comportamento eletromagnético do solo possui fundamental importância. Tal comportamento é caracterizado pelos seguintes parâmetros: permeabilidade magnética μ , permissividade elétrica ϵ e condutividade elétrica σ .

No presente trabalho o solo é considerado um meio linear, homogêneo, isotrópico e dispersivo. A permeabilidade do solo é aproximadamente igual à permeabilidade do vácuo (μ_0), porém a condutividade e a permissividade são fortemente dependentes da frequência [2], [3].

No Anexo A encontra-se uma descrição objetiva da interação de campo elétrico com materiais de características condutivas e dielétricas.

2.3.2 – Composição de corrente no solo

A equação de Maxwell-Ampère, que traduz a natureza rotacional do campo magnético, é igual à soma das parcelas de densidade de corrente de condução $(\vec{J}_c = \sigma_0 \vec{E})$ e de corrente de deslocamento $(\vec{J}_d = j\omega\epsilon\vec{E})$:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \vec{J}_d \tag{2-6}$$

Considerando a permissividade complexa e variável com a frequência $\varepsilon = \varepsilon^{'} - j\varepsilon^{''}$ tem-se de (2-6):

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma_0 \vec{E} + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')\vec{E} = (\sigma_0 + \omega\epsilon'')\vec{E} + j\omega\epsilon'\vec{E} = \sigma_e\vec{E} + j\omega\epsilon'\vec{E}$$
(2-7)

onde σ_e corresponde à condutividade equivalente para o caso de campo aplicado variante, onde σ_0 é a condutividade para campo quase estático (medido em baixa frequência) e $\omega \epsilon^{''}$ representa a parcela da condutividade referente à condição do

campo variante. Também em (2-7), $\omega \epsilon'$ traduz a permissividade equivalente para o caso de campo variante.

Para ocorrências em baixas frequências a caracterização dos parâmetros do solo, ou seja, sua condutividade e permissividade, já são satisfatoriamente abordadas na literatura. Normalmente, a permissividade é desconsiderada e a resistividade (1/condutividade) é medida na frequência próxima de 100 Hz. Tal consideração é fisicamente consistente, pois em baixas frequências a corrente de deslocamento (Jd) pode ser desprezada e, assim, a composição de corrente no solo considera apenas a parcela da corrente de condução (J_c) [4]. Por outro lado, quando o aterramento é submetido a fenômenos impulsivos, como no caso de ocorrência de descargas atmosféricas e manobras, principalmente para componentes de frequências mais alta, a corrente de deslocamento não pode ser negligenciada [2], [3]. Ademais, os parâmetros eletromagnéticos do solo (permissividade e condutividade) variam significativamente com a frequência $(\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) = \sigma_0 + \omega \varepsilon''(\omega))$, fazendo com que as correntes de condução e deslocamento também variem. Tal variação pode ser determinada por processo de medição. No entanto, o estudo do estado da arte nesta área mostra que uma quantidade relativamente reduzida de trabalhos aborda esta questão no espectro de frequência associado às descargas atmosféricas.

Na seção seguinte é feita a descrição das metodologias de medição e modelagem dos parâmetros eletromagnéticos ($\sigma e \varepsilon$) existentes, quando o aterramento é submetido à faixa de frequências dominantes em descargas atmosféricas (de 0 a 2 MHz). É também interesse da próxima seção apresentar a justificativa para a escolha das formulações a serem utilizadas para considerar a variação de $\sigma e \varepsilon$ com a frequência ao longo deste trabalho. Tais desenvolvimentos permitem a inclusão, no modelo eletromagnético, das variações em causa e, em consequência, análises de sensibilidade do comportamento transitório de aterramentos elétricos com e sem variação dos parâmetros do solo com a frequência. Estas análises de sensibilidade são apresentadas no Capítulo 3.

2.3.3 – Descrição das Principais Metodologias de Estimativa da Variação dos Parâmetros do Solo com a Frequência

Em 1967, James H. Scott conduziu um trabalho para estimar a variação da condutividade e da permissividade de solos com a frequência [5]. Segundo o autor, a estimativa da condutividade e da permissividade de solos e rochas para a faixa de frequência de 100 Hz a 1 MHz pode ser feita baseando-se em valores de condutividade obtidos a partir de valores de resistividade medidas em campo, juntamente com correlação estatística de três parâmetros obtidos em laboratório. Esses parâmetros são: condutividade a 100 Hz, frequência e condutividade de solos e rochas obtidos por meio de medições para frequências entre 100 Hz a 1 MHz.

Uma vez que a condutividade de solos e rochas, que possuem quantidade natural de água, é quase constante para frequências entre 0 e 100 Hz, os valores de condutividade obtidos a partir de medições em campo, feitas na gama de 0 a 20 Hz, podem ser aplicáveis para 100 Hz. Erros devido a essa suposição são geralmente menores do que 1 por cento [5].

Baseando-se no método descrito acima, as seguintes formulações para estimar a condutividade e a constante dielétrica de solos foram propostas [5]:

$$k = 0.028 + 1.098k_{100} - 0.068F + 0.036k_{100}^2 - 0.046Fk_{100} + 0.018F^2$$
(2-8)

$$D = 5,491 + 0,946k_{100} - 1,097F + 0,069k_{100}^2 - 0,114Fk_{100} + 0,067F^2$$
(2-9)

Em (2-8) e (2-9) k é o \log_{10} da condutividade (mS/m) especificada para a faixa de frequência de 100 Hz a 1 MHz, k_{100} é o \log_{10} da condutividade (mS/m) a 100 Hz, F é o \log_{10} da frequência (Hz) especificada entre 100 Hz a 1 MHz e D é o \log_{10} da constante dielétrica especificada para a faixa de frequência de 100 Hz a 1 MHz.

Scott sugere, também, uma formulação para estimar a condutividade e a constante dielétrica como função da frequência e da quantidade de água, desenvolvida com base em dados obtidos em laboratório para o mesmo conjunto de amostras utilizadas para obter as equações (2-8) e (2-9).

$$k = -0.604 + 1.64W - 0.062F + 0.062W^{2} - 0.07FW + 0.021F^{2}$$
(2-10)

$$D = 4,905 + 1,308W - 0.971F + 0.111W^{2} - 0.168FW + 0.059F^{2}$$
(2-11)

Em (2-10) e (2-11) k é o \log_{10} da condutividade (mS/m) especificada para a faixa de frequência de 100 Hz a 1 MHz, W é o \log_{10} da quantidade de água (% por volume) contida no solo, F é o \log_{10} da frequência (Hz) especificada entre 100 Hz a 1 MHz e D é o \log_{10} da constante dielétrica especificada para a faixa de frequência de 100 Hz a 1 MHz.

Em 1974, o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) elaborou um guia de métodos para medição da condutividade do solo utilizando fontes de ondas de radiofrequência [6]. O material utilizado na elaboração deste guia provém de vários artigos e ensaios da área, estando a maioria destes disponíveis na literatura aberta. Neste guia discutem-se dois tipos de técnicas para a medição em campo da condutividade do solo: i) métodos que utilizam sondas de superfície e ii) métodos que envolvem perfurações no solo. Adicionalmente, uma combinação entre os dois métodos pode ser aplicável em poucos casos. Uma das características de propagação de ondas no solo, a fase da onda, pode ser utilizada para deduzir parâmetros eletromagnéticos do solo. Supondo o solo plano e homogêneo, o campo elétrico incidido nele possui dois componentes ortogonais, um vertical, E_v , e outro horizontal, E_H . A fase da onda é então dada por [6]:

$$\frac{E_{\rm H}}{E_{\rm V}} \approx n^{-1} \left(1 - n^{-2}\right)^{0.5} \approx \frac{1}{n}$$
(2-12)

onde, n é o índice de refração (complexo) do solo em relação ao ar e é dado por [6]:

$$n = (\varepsilon_r)^{0,5} = (\varepsilon'_r)^{0,5} (1-jp)^{0,5},$$
(2-13)

onde ε_r é a constante dielétrica complexa, ε'_r é a parcela real da constante dielétrica complexa e p é a tangente de perdas definida como [6]:

$$p = \sigma / \omega \varepsilon_0 \varepsilon'_r , \qquad (2-14)$$

sendo ω a frequência angular (rad/s) e ε_0 a permissividade do vácuo (F/m).

Em 1975, C. L. Longmire e K. S. Smith propuseram uma formulação universal para impedância de solo baseado na idéia de que cada elemento de volume do solo pode ser representado por uma rede RC [7]. A formulação é válida para frequências compreendidas na faixa de 100 Hz a 1 MHz.

As equações (2-15) e (2-16) computam a permissividade relativa e a condutividade do solo, respectivamente, segundo [7]:

$$\varepsilon_{\rm r} = \varepsilon_{\infty} + \sum_{n=1}^{\rm N} \frac{a_n}{1 + (f/f_n)^2}$$
 (2-15)

$$\sigma = \sigma_{i} + 2\pi\epsilon_{0} \sum_{n=1}^{N} a_{n} f_{n} \frac{(f/f_{n})^{2}}{1 + (f/f_{n})^{2}}$$
(2-16)

Em (2-15) $\varepsilon_{\infty} = 5$, $f_n = (P/10)^{1,28} \times 10^{n-1}$ Hz e a_n assume os valores da Tabela 2.1. Em (2-16) $\sigma_i = 8 \times 10^{-3} (P/10)^{1,54}$ S/m, a_n e f_n valem o mesmo que na equação anterior. P é ajustável segundo o valor da resistividade do solo em baixa frequência [7].

Ν	a _n	Ν	a _n	Ν	a _n
1	3,4x10 ⁶	6	1,33x10 ²	11	9,8x10 ⁻¹
2	2,74x10⁵	7	2,72x10	12	3,92x10 ⁻¹
3	2,58x10 ⁴	8	1,25x10	13	1,73x10 ⁻¹
4	3,38x10 ³	9	4,8		
5	5,26x10 ²	10	2,17		

Tabela 2.1 – Coeficiente an para solo universal [7]

Em 1992, Silvério Visacro Filho propôs um método para medição e modelagem da resistividade e da permissividade de solos típicos [2], [8]. Neste trabalho o autor, seguindo uma metodologia similar à adotada por Scott [5], toma como base a condutividade medida a 100 Hz, o teor de umidade e a frequência para estimar a permissividade e condutividade de solos para todo o espectro de frequência. As seguintes expressões foram estimadas para o calculo da resistividade (ρ) e constante dielétrica do solo (ϵ_r) em função da frequência (f) e da resistividade medida a 100 Hz (ρ_0) [2].

$$\rho \cong \rho_0 \left(\frac{100}{f}\right)^{0.072} \tag{2-17}$$

$$\varepsilon_r \simeq 2,34.10^6 (\rho_0)^{-0.535} f^{-0.597}$$
 (2-18)

Essas equações foram obtidas por meio de medições em amostras de três tipos de solos característicos da região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais: um solo arenoso, um solo argiloso e um solo residual. Nos ensaios foram considerados quatro valores de umidade, entre 15% (quando o solo se encontrava encharcado) e 2,5% (quando se apresentava bastante seco). Os valores percentuais de umidade

correspondem à relação percentual entre o peso da água destilada adicionada à amostra e o peso do solo seco a 80°C [2].

Para cada amostra e cada umidade considerada procedeu-se à medição da impedância da amostra de solo em formato de cuba cilíndrica, constituída de dois tubos cilíndricos de alumínio concêntricos, de mesmo comprimento e separadas por uma distância de 0,015 m. Empregaram-se cubas de dois comprimentos (0,19 m e 0,95 m) onde as amostras de solo foram densamente compactadas. O arranjo utilizado para medição é apresentado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Arranjo utilizado para medição da impedância das amostras de solo [2].

Para realização das medições foram aplicadas tensões senoidais entre 8 e 20 V com frequências na faixa de 40 Hz a 2 MHz entre as faces condutoras dos cilindros [2].

A partir dos valores de impedâncias medidas foi possível determinar a admitância correspondente a cada frequência e, consequentemente, os valores da resistividade e da permissividade relativa das amostras de solo [2].

A condutância e a capacitância da cuba cilíndrica de comprimento L, raios externo e interno respectivamente b e a e preenchida com material de resistividade ρ e permissividade relativa ε_r , é dada por [2]:

$$G = \frac{1}{\rho} \cdot 2\pi \frac{L}{Ln(b/a)}$$
(2-19)

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot 2\pi \frac{L}{Ln(b/a)},$$
(2-20)

onde ε_0 é o valor da permissividade do vácuo (8,854 x 10⁻¹² F/m).

A permissividade, de acordo com a formulação (2-18) assume altos valores em baixas frequências e diminui consideravelmente nas faixas superiores do espectro. A diminuição dos valores da permissividade não implica a diminuição da corrente de deslocamento nas amostras de solo, uma vez que a mesma é proporcional ao produto da permissividade pela frequência. Verificou-se uma sensível redução da resistividade das amostras com o aumento da frequência. O aumento da umidade resultou na diminuição da resistividade do solo e aumento de sua permissividade em todo o espectro de frequência considerado [2].

Em 1996, I. E. T. Iben, W. A. Edelstein e P. B. Roemer pela GE *Research & Development Center* desenvolveram um trabalho sobre o estudo das propriedades elétricas do solo, a fim de obter conhecimento essencial para o uso de energia eletromagnética como um meio de aquecer a terra para a remoção de detritos orgânicos [9]. Para tanto, foi feito um estudo das propriedades condutoras e dielétricas de diversas classes de solo para determinar a viabilidade e a faixa de frequência para o aquecimento direto do solo por meio de energia eletromagnética. Os solos estudados foram: as argilas do tipo montmorilonita e caolinita, areia e os minerais de ferro hematita e magnetita.

As medições de impedâncias, para a obtenção dos valores de condutividade e resistividade, foram feitas com frequências na faixa de 100 Hz a 40 MHz, e entre temperaturas de 20°C a 200°C e para conteúdos de umidades na faixa de 0 a 70%. O percentual de umidade foi medido pela relação entre o peso do solo totalmente seco e o umedecido [9].

As propriedades dielétricas dos solos estudados foram determinadas medindo a impedância de uma linha cilíndrica coaxial preenchida com amostras de solos. A linha coaxial foi composta de duas cubas cilíndricas de cobre de 25 cm de comprimento. Os tubos interno e externo possuem diâmetros de 3,18 cm e 6,35 cm, respectivamente. Uma orla de metal foi soldada à base do condutor externo para o qual um disco de quartzo foi solidamente preso. As temperaturas, dentro e fora da linha coaxial, foram mantidas com o auxílio de um controlador de temperatura [9].

Para um cilindro coaxial com raios interno e externo de valores a e b, respectivamente, e de comprimento d, as parcelas real, ϵ' , e imaginária, ϵ ", da permissividade do solo são dadas por [9]:

$$\varepsilon' = \left(\frac{\ln(b_{a})}{2\pi d\omega \varepsilon_{0}}\right) \left(\frac{Z'' - \omega_{\text{Lconexão}}}{(Z')^{2} + (Z'' - \omega_{\text{Lconexão}})^{2}}\right)$$
(2-21)
$$\varepsilon'' = \left(\frac{\ln(b_{a})}{2\pi d\omega \varepsilon_{0}}\right) \left(\frac{Z'}{(Z')^{2} + (Z'' - \omega_{\text{Lconexão}})^{2}}\right) - \frac{\sigma_{0}}{2\pi d\omega \varepsilon_{0}}$$
(2-21)

$$\varepsilon'' = \left(\frac{\sqrt{a'}}{2\pi d\omega \varepsilon_0}\right) \left(\frac{Z}{(Z')^2 + (Z'' - \omega_{\text{Lconexão}})^2}\right)^{-\frac{C_0}{\omega \varepsilon_0}}$$
(2-22)

onde, $Z' \in Z''$ são, respectivamente, os componentes real e imaginário da impedância do solo e $L_{conexão}$ é a indutância da conexão entre o adaptador e a linha coaxial.

No desenvolvimento deste trabalho os autores observaram o fenômeno Maxwell-Wagner, definido como o tempo de relaxação devido à polarização interfacial. Ele é o resultado da necessidade de continuidade da corrente elétrica entre a interface de dois meios que possuem diferentes valores de permissividade e condutividade. Segundo os autores, se não fosse pelo mecanismo de polarização interfacial as perdas por altas frequências poderiam ser desprezíveis [9].

Em 1998, Jonh Curtis e Ram Narayanan publicaram um trabalho onde foram comparados os dados de medição das propriedades elétricas do solo coletados pela Universidade de Nebraska-Lincon (UNL) e pela U.S. Army Engineer Waterways Station (WES) [10]. As duas instituições usaram nas medições amostras de solos da mesma região, mas, porém utilizaram técnicas de medição diferentes. O uso destas diferentes técnicas, segundo os autores, foi o responsável pelas diferenças entre os valores obtidos. As medições foram efetuadas para frequências na faixa de 100 MHz a 18 GHz. Tanto a WES quanto a ANL empregaram o modelo de problema de valor de contorno para onda plana e, assim, foi utilizado uma equação algébrica que pode ser resolvida para a constante dielétrica complexa [10]:

$$\cos\left(\omega d\frac{\sqrt{\epsilon}}{c}\right) = \frac{1 + (S_{21})^2 - (S_{11})^2}{2S_{21}},$$
(2-23)

onde S_{11} e S_{21} são os coeficientes de reflexão e transmissão, respectivamente, \mathfrak{O} é a frequência angular (rad/s), d é o comprimento da amostra de solo, c é a velocidade da luz no vácuo e ε é a constante dielétrica complexa do solo.

Em 1999, Carlos Portela apresentou um trabalho a respeito de procedimentos para medir e modelar parâmetros eletromagnéticos do solo no domínio da frequência [11], trabalho este adequado para estudo do comportamento do solo submetido a transitórios típicos de descargas atmosféricas (100 Hz a 2 MHz).

Os procedimentos escolhidos para medições de solos necessitaram, basicamente, que os seguintes aspectos fossem assegurados [11]: i) a consistência e umidade da terra natural fossem conservadas, com amostras de material "idênticas" ao solo natural; ii) a influência de efeitos de superfície, como sol, vento e vegetação fossem evitadas, minorando assim efeitos importantes de heterogeneidade do solo local; iii) os erros de medição relacionados à condição de contato entre os eletrodos e as amostras de solo fossem limitados. Para solos de consistência física razoável (não arenosos, lamosos ou afins), aplicou-se um procedimento para coleta de suas amostras obtendo modelos em forma de paralelepípedos de dimensões 1,2 m X 0,2 m X 0,2 m, cobertos com uma rede, parafina e uma caixa de madeira [11].

Dois eletrodos de corrente em forma de placa feitos de cobre (EC) foram fixados às extremidades das amostras e dois eletrodos de tensão em formato cilíndrico (EV) foram inseridos, como mostra a Figura 2.5.

Uma tensão senoidal foi aplicada à amostra de solo com o uso de um oscilador de frequência variável. Foi então possível medir a corrente elétrica na amostra, em módulo e fase, por meio da medição da tensão no resistor R (V_R).



Figura 2.5 – Representação esquemática de uma amostra de terra para medida de σ + jωε no domínio de frequência [11]

Considerando os fatores da geometria das amostras, os valores de impedância foram obtidos de um grande número de amostras por meio de várias medições, considerando frequências até 2 MHz. Desta forma, foi possível o cálculo estimado dos parâmetros do solo a partir da equação seguinte:

$$\sigma(\omega) \pm j\omega\varepsilon(\omega) = \sigma_0 + \Delta i \left[\cot ang\left(\frac{\pi}{2}\alpha_m\right) \mp j \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \times 10^6}\right)^{\alpha_m}$$
(2-24)

onde, $\sigma(\omega)$ é a condutividade do solo em função da frequência (S/m), $\epsilon(\omega)$ é a permissividade do solo em função da frequência (F/m), ω é a frequência angular $2\pi f$ (rad/s), sendo f frequência elétrica (Hz), σ_0 é a condutividade elétrica do solo medida em baixa frequência (S/m), α_m e Δi (F/m) são parâmetros do modelo do solo.

Os parâmetros α_m e Δi definem a variação dos parâmetros $\sigma(\omega)$ e $\epsilon(\omega)$ com a frequência e são necessários para definir valores razoáveis da condutividade e permissividade. De acordo com [12] sugere-se como valores de α_m e Δi :

$\alpha_{\rm m} \cong 0,706$	(2-25)
$\Delta i \simeq 11,71 \mathrm{mS/m}$	

Esta metodologia de medição foi aplicada em diversas análises de transitórios eletromagnéticos [13], [14], [15].

Em 2001, W.G. Fano e V. Trainotti apresentaram um trabalho onde ilustram resultados de medição em função da frequência do fator de perda, tangente de perda e condutividade de areia seca, areia úmida e solo típico da Argentina [16].

Os autores utilizaram dois métodos para medir a impedância complexa do solo: i) método de linha de transmissão e ii) método de capacitor de placas paralelas. Os resultados para o método de linha de transmissão foram obtidos tomando por base a expressão para determinar a impedância de linha com perdas [16]:

$$Z_{i} = Z_{0} \frac{Z_{L} + Z_{0} \tanh(\gamma L)}{Z_{0} + Z_{L} \tanh(\gamma L)}$$
(2-26)

Em (2-26) Z_i é a impedância de entrada da linha Z_L é a impedância da carga, L é a distância entre a carga e a fonte, Z_o é a impedância característica da linha, γ é a constante de propagação.

A faixa de frequência aplicada nas medições está compreendida entre 10 kHz e 300 MHz.

Conhecendo-se as impedâncias características e a impedância de entrada da linha, é possível calcular γ , que é definida por [16]:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + \beta j$$
(2-27)

onde a parcela real α , ou constante de atenuação, caracteriza o amortecimento da amplitude das ondas de tensão ou corrente no solo e β é a constante de propagação, que representa a variação de fase das ondas durante a propagação.

Os parâmetros eletromagnéticos do solo são, portanto, dados por [16]:

$$\varepsilon = \frac{\left(\alpha^2 + \beta^2\right)}{-\omega^2 \mu} \cos\left(2 \arctan\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)\right)$$
(2-28)

$$\sigma = \frac{\left(\alpha^2 + \beta^2\right)}{\omega\mu} \sin\left(2\arctan\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)\right)$$
(2-29)
O método do capacitor de placas paralelas apresenta as seguintes expressões para cômputo da condutividade, em função da frequência e da condutividade medida em baixas frequências (σ_0), para areia seca e úmida, respectivamente:

$$\sigma = (1,35 \times 10^{-11} f^{0,94} + \sigma_0) \tag{2-30}$$

$$\sigma = (4,68 \times 10^{-10} f^{0,87} + \sigma_0) \tag{2-31}$$

É importante salientar que as equações (2-30) e (2-31) são válidas para a faixa de frequência compreendida entre 1 MHz a 100 MHz [16].

Em 2004, S. Lambot e outros publicaram um trabalho onde apresentavam uma modelagem para a variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo obtida por meio de medição utilizando GPR (*ground-penetrating radar*) [17]. Neste trabalho, os autores afirmam que a parcela real da permissividade parece não ser fortemente influenciada pela frequência e, portanto, consideraram apenas a parte imaginária da permissividade dependente da frequência ($\sigma = \sigma' + \sigma'' = \sigma' + \omega\epsilon''$).

Para a faixa de frequência considerada entre 1 GHz e 2 GHz a condutividade em função da frequência foi aproximada por [17]:

$$\sigma(f) = \sigma_1 + \delta(f - 10^9), \tag{2-32}$$

onde σ_1 refere-se ao valor da condutividade elétrica na frequência de 1 GHz e δ é a taxa de variação linear de $\sigma(f)$ [17].

2.3.4 – Comparação entre as principais metodologias de interesse nesta dissertação

A seção 2.3.2 apresenta as principais metodologias de medição da condutividade e da permissividade de solos em função da frequência existentes na literatura. Algumas dessas metodologias são utilizadas nesta dissertação nas análises de sensibilidade do comportamento transitório de aterramentos elétricos. Para uma melhor avaliação dos efeitos da variação da condutividade e da permissividade de solos de acordo com as técnicas de medição aplicadas em cada um dos trabalhos desenvolvidos na literatura e aqui apresentados [2, 5, 6 7, 8, 9, 10, 11, 16, 17], a

presente seção faz um estudo comparativo entre as formulações desenvolvidas por eles. No entanto, algumas restrições necessitam ser feitas.

As formulações apresentadas pelo Guia IEEE [6], por J. Curtis e E. R. Narayanan [10] e por S. Lombot e outros [17] foram desenvolvidas para medições com frequências na ordem de GHz. Esta faixa de frequência foge ao escopo desta dissertação, já que aqui a faixa de frequência de interesse é a característica de descargas atmosféricas (de 0 a 2 MHz). Portanto, as formulações de σ e ε destes trabalhos não são utilizadas nas comparações e análises de sensibilidade apresentadas adiante. Fato semelhante ocorre, também, para o trabalho de W.G. Fano e V. Trainotti [16], pois apresenta formulações válidas para frequências na ordem de GHz e para a faixa entre 1 MHz e 100 MHz.

A metodologia adotada pelo trabalho da GE [9] gerou em uma formulação para cômputo da variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo, que não é dada como função direta da condutividade do solo medida em baixas frequências (até 100 Hz) e da frequência. Portanto, não é considerada nos próximos capítulos.

Deste modo, as formulações que compreendem resultados de medição na faixa de frequência de descargas atmosféricas e são empregadas na presente seção para fins de comparações são as seguintes:

> • H. S. Scott: equações (2-8) e (2-9): $k = 0,028 + 1,098k_{100} - 0,068F + 0,036k_{100}^2 - 0,046Fk_{100} + 0,018F^2$ $D = 5,491 + 0,946k_{100} - 1,097F + 0,069k_{100}^2 - 0,114Fk_{100} + 0,067F^2$

As expressões que derivam os valores de condutividade e permissividade de solos em função do teor de umidade apresentadas em [5] não são escopo do presente trabalho.

• C. L. Longmire e K. S. Smith: equações (2-15) e (2-16):

$$\varepsilon_{\rm r} = \varepsilon_{\infty} + \sum_{n=1}^{\rm N} \frac{a_n}{1 + (f/f_n)^2}$$

$$\sigma = \sigma_{i} + 2\pi\epsilon_{0}\sum_{n=1}^{N} a_{n}f_{n}\frac{(f/f_{n})^{2}}{1 + (f/f_{n})^{2}}$$

• S. Visacro: equações (2-17) e (2-18):

$$\rho \cong \rho_{100\text{Hz}} \left(\frac{100}{f}\right)^{0.072}$$
$$\varepsilon_r \cong 2,34.10^6 \left(\rho_{100\text{Hz}}\right)^{-0.535} f^{-0.597}$$

• C. M. Portela: equação (2-24):

$$\sigma(\omega) \pm j\omega \, \epsilon(\omega) = \sigma_0 + \Delta i \left[\cot ang \left(\frac{\pi}{2} \, \alpha_m \right) \mp j \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \times 10^6} \right)^{\alpha_m}$$

A Figura 2.6 apresenta o gráfico da variação da condutividade de acordo com as metodologias dos quatro trabalhos (Scott, Longmire e Smith, Visacro e Portela). Em cada caso considerou-se solos cujas resistividades, para a faixa de frequência industrial, são de 100 Ω .m e 2.400 Ω .m, Figura 2.6 (a) e Figura 2.6 (b) respectivamente. Vale salientar que, para a metodologia de Scott, $k_{100} = \log_{10}(\sigma_0)$. Além do mais, as relações matemáticas de $\sigma(\omega)$ e $\omega \epsilon(\omega)$ desenvolvidas por Portela são válidas para solos cuja resistividade em baixas frequências está compreendida entre 100 Ω .m a 10.000 Ω .m, conforme descrito em [11, 12].

Pela análise da Figura 2.6 observam-se diferenças significativas entre as metodologias. Para baixos valores de resistividade do solo medida em baixa frequência (100 Ω .m), Figura 2.6 (a), as relações de Scott, Longmire e Portela apresentam resultados próximos e sensivelmente menores que os da relação de Visacro. No entanto, para valores altos de resistividade do solo medida em baixa frequência (2.400 Ω .m, típico do solo do Estado de Minas Gerais), Figura 2.6 (b), o quadro se inverte e a formulação de Portela sugere uma dependência da condutividade com a frequência muito maior do que a sugerida pelos outros trabalhos na faixa superior do espectro de frequência (a partir de aproximadamente 40 kHz).



Figura 2.6 – Variação da condutividade do solo com a frequência para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100 \ \Omega$.m, e (b) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400 \ \Omega$.m

A Figura 2.7 mostra o comportamento do produto $\omega \varepsilon(\omega)$ em função da frequência para solos de resistividades em baixa frequência iguais a 100 Ω .m (Figura 2.7 (a)) e 2.400 Ω .m (Figura 2.7 (b)) , de acordo com os quatro trabalhos. Vale salientar que a permissividade do solo diminui com a frequência. No entanto, o produto entre a permissividade e a frequência angular tem comportamento crescente ao longo do espectro de frequência. Neste caso, a formulação de Portela apresenta valores maiores de $\omega \varepsilon(\omega)$ do que os de Visacro, Longmire e Scott, tanto para 100 Ω .m quanto para 2.400 Ω .m, na faixa superior do espectro de frequência.

Ao observar o comportamento das curvas da Figura 2.7 verifica-se que as quatro metodologias sugerem que não é prudente desconsiderar a parcela $\omega\epsilon$ na composição de corrente no solo, principalmente, na faixa superior do espectro de frequência.

Outras análises de sensibilidade, similares às apresentadas na Figura 2.6 e Figura 2.7, podem ser encontradas em [18].



Figura 2.7 – Variação com a frequência da permissividade do solo x frequência angular para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100\Omega$.m e, (b) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400\Omega$.m.

A constante de propagação γ é um importante parâmetro para avaliar o comportamento das ondas de corrente e tensão no sistema de aterramento e auxiliar a compreender como se processa a propagação destas no solo. Esta constante, que determina a atenuação e defasamento do campo eletromagnético, é fortemente influenciada pela variação da condutividade e da permissividade do solo com a frequência e é expressa por:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma(\omega) + j\omega\epsilon(\omega))} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$$
(2-33)

A parcela real α , ou constante de atenuação, caracteriza o amortecimento da amplitude das ondas de tensão ou corrente no solo. A Figura 2.8 mostra a variação da constante de atenuação com a frequência, considerando as variações dos parâmetros σ e ε com a frequência propostas em [2], [5], [7], [11]. Considera-se, também, na Figura 2.8 a variação de α com a frequência, mas para σ e ε independentes da frequência (neste caso, $\sigma_0 = 0.01$ S/m, $\varepsilon_r = 15$). Na Figura 2.8 (a) considera-se $\rho_0 = 100 \ \Omega$.m e na Figura 2.8 (b) $\rho_0 = 2.400 \ \Omega$.m. Para solos com baixo valor de resistividade medida a 100 Hz (100 Ω .m), as formulações sugeridas por Portela e Scott aproximam-se mais da curva que representa a variação de α com a frequência, mas que considera a condutividade e a permissividade constantes em relação à sugerida por Visacro e Longmire. No entanto, para solos com alto valor de resistividade medida a 100Hz (2.400 Ω .m) o quadro se inverte e α segundo Portela cresce mais acentuadamente com o aumento da frequência.

Tal comportamento pode ser percebido, mais facilmente, por meio da Figura 2.9, que mostra as relações entre as constantes de atenuação determinadas considerando a variação de σ e ε com a frequência segundos as quatro metodologias e a constante de atenuação considerando σ e ε constantes.

O valor da parcela imaginária da constante de propagação, β, representa a variação de fase das ondas de tensão ou corrente durante a propagação, ou seja, representa a deformação da onda à medida que se propaga e está associada fisicamente às diferentes velocidades que cada componente de frequência apresenta.

A Figura 2.10 mostra a variação da constante de fase β com a frequência, considerando a variação dos parâmetros $\sigma \in \varepsilon$ com a frequência propostas em [2, 5, 7 e 11] e considerando os dois tipos de solo (de resistividade 100 Ω .m e 2.400 Ω .m) e, também, sem variação de $\sigma \in \varepsilon$ com a frequência. Verifica-se que a metodologia proposta por Portela apresenta valores maiores de β quando comparado com as demais metodologias.



Figura 2.8 – Variação de α considerando a variação de σ e ϵ com a frequência para : (a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100\Omega$.m e, (b) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400 \Omega$.m





Figura 2.9 – Relação entre valores de α considerando a variação de σ e ϵ com a frequência e α considerando σ e ϵ constantes para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100\Omega$.m e, (b) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400 \Omega$.m



Figura 2.10 – Variação de β considerando a variação de σ e ϵ com a frequência para:

(a) $1\!/\!\sigma_0=\rho_0=$ 1000.m e, (b) $1\!/\!\sigma_0=\rho_0=$ 2.4000.m

A Figura 2.11 mostra as relações entre as constantes de fase determinadas considerando a variação de σ e ε com a frequência segundo os autores e a constante de atenuação considerando σ e ε independentes da frequência. Por meio da Figura 2.11 nota-se que os valores da condutividade e da permissividade do solo segundo Portela afetam de forma mais intensa a constante de fase do que para os outros autores. O fato é ainda mais pronunciado em solos de resistividade mais elevada.



Figura 2.11 – Relação entre valores de β considerando a variação de σ e ϵ com a frequência e β considerando σ e ϵ constantes para: (a) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 100 \ \Omega$.m e, (b) $1/\sigma_0 = \rho_0 = 2.400 \ \Omega$.m

2.4 – Conclusões

É importante salientar que as formulações aqui citadas para cômputo da condutividade e da permissividade do solo sofrem acentuado efeito em razão do tipo de solo utilizado em cada metodologia experimental. Isto acarreta dificuldade em se obter um modelo geral para quantificação dos parâmetros do solo com a frequência.

Por todo o exposto, é possível verificar a importância fundamental da consideração da variação de σ e ε com a frequência e como esta variação afeta de forma substancial a composição de corrente no solo (condução e deslocamento) ao longo do espectro de frequência, cujo efeito se traduz na redução da impedância de aterramento, como se verifica no Capítulo 3. Outro importante efeito da referida variação está na propagação do campo eletromagnético no solo, expresso por α e β ao longo do espectro de frequência típico de descargas atmosféricas.

Tais alterações influenciam de forma significativa algumas importantes grandezas relacionadas a aterramentos elétricos, como por exemplo, sobretensão no ponto de injeção de corrente, comprimento efetivo, impedância impulsiva e coeficiente impulsivo.

A avaliação sistemática da influência da inclusão dos parâmetros do solo variáveis com a frequência no desempenho transitório do aterramento é discutida no Capítulo 3.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS

3.1 – Introdução

Quando submetidos a uma corrente de descarga atmosférica, ou outra corrente impulsiva qualquer, os eletrodos de aterramento apresentam um comportamento bastante particular [19]. Nesse sentido, é essencial a definição de parâmetros que permitam a caracterização do comportamento impulsivo do aterramento. É, ainda, importante, que tais parâmetros denotem informação física consistente e que sejam função de grandezas diretamente ligadas ao projeto de aterramento como, por exemplo, suas dimensões e resistividade do solo. Ademais, a definição consistente de parâmetros de caracterização do comportamento dinâmico do aterramento permite e facilita a comparação entre o seu comportamento frente a solicitações de baixa e alta frequências [20].

Basicamente, o desempenho de aterramento em baixa frequência, além dos potenciais no nível do solo, é determinado pelo parâmetro resistência de aterramento, definida como [4]:

R = V/I, onde V é a elevação de potencial desenvolvida no ponto de injeção de corrente, em relação ao terra remoto e I é a corrente injetada. Deve-se ressaltar que a resistência de aterramento também caracteriza certo período do comportamento do aterramento frente a solicitações devido às descargas atmosféricas, nomeadamente aquele associado ao tempo de cauda.

Na caracterização do desempenho de aterramento em alta frequência, os seguintes parâmetros e definições são adotados nesta dissertação [2], [19], [21]:

- Sobretensão transitória no ponto de injeção de corrente: v(t);
- Impedância impulsiva: Zp = Vp/Ip, onde Vp corresponde ao valor de pico de v(t) e Ip corresponde ao valor de pico de i(t), onda de corrente impulsiva injetada no aterramento;
- Coeficiente impulsivo: A = Zp/R, onde Zp é a impedância impulsiva e R é a resistência de aterramento;
- Comprimento efetivo: l_{ef}, é aquele a partir do qual a impedância impulsiva não apresenta diminuições significativas para acréscimos adicionais no comprimento do eletrodo.

Adicionalmente, a impedância complexa possui importância na análise de transitórios em aterramentos elétricos uma vez que, além de ser o domínio original de sua definição, possibilita a visualização das características condutivas, capacitivas e indutivas do aterramento bem como dos efeitos de propagação. Ela depende apenas da geometria e características eletromagnéticas do meio, na consideração de um sistema linear. Define-se a impedância complexa no domínio da frequência como:

Z(jω) = V(jω)/I(jω), onde V(jω) e I(jω) são os fasores de tensão e corrente no ponto de injeção, respectivamente, ao longo de um espectro de 0 Hz até uma frequência superior, que depende do transitório analisado.

Levando-se em consideração o modelo eletromagnético apresentado no Capítulo 2 e as definições dos parâmetros para avaliação do comportamento dinâmico do aterramento, neste capítulo é apresentada uma série de simulações com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre o desempenho em baixa e alta frequências do aterramento elétrico. Considera-se uma configuração básica de aterramento, típica de cabos contrapeso de linhas de transmissão, ou seja: eletrodos horizontais, de comprimentos 10 m, 30 m, 50 m 70 m e 90 m, todos com raio igual a 1 cm e inseridos a uma profundidade de 0,5 m no solo.

Os resultados apresentados ponderam, basicamente, nos domínios do tempo e da freguência, o comportamento do aterramento guando solicitado pela injeção de ondas de corrente impulsivas considerando a condutividade e a permissividade do solo constantes e também variáveis com a frequência segundo [2], [5], [7], [11]. Para o caso dos parâmetros do solo constantes, o valor utilizado para permissividade relativa é de 15, uma vez que esse é um valor usualmente adotado na literatura [22]. Os valores adotados para as resistividades do solo medidas em baixa frequência (ρ_0) são de: 500 Ω.m, 1.000 Ω.m, 2.400 Ω.m, 5.000 Ω.m e 10.000 Ω.m. Tais valores contemplam desde solos de baixa resistividade até solos de resistividade elevada, passando pelo valor de resistividade típico brasileiro (1.000 Ω .m) e valor médio de Minas Gerais (2.400 Ω .m) [23]. Nas simulações em que é incluída a variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo com a frequência, os valores de condutividade e permissividade adotados são função da frequência e expressos de acordo com as formulações indicadas na seção 2.3.4. Vale lembrar, que as formulações que computam a condutividade e a permissividade em função da frequência adotadas nesta dissertação são expressas em função do valor da resistividade do solo em baixa frequência (ρ_0). Neste caso, os valores de ρ_0 são os mesmos para o caso que considera os parâmetros do solo constantes.

3.2 – Parâmetros das ondas de corrente adotadas

Para as simulações apresentadas nesse capítulo são consideradas, para representação das ondas de corrente impulsivas, dois tipos de funções: dupla exponencial [23, 24] e função de Heidler [25].

 Dupla Exponencial - a função matemática que define a forma de onda do tipo dupla exponencial é a seguinte [23, 24]:

$$i(t) = A\left(e^{\phi t} - e^{\lambda t}\right)$$
(3-1)

onde A, $\varphi \in \lambda$ são parâmetros que ajustam a onda dupla exponencial ao tempo de frente, tempo de cauda e amplitude desejados. As análises de sensibilidade apresentadas neste trabalho consideram ondas de corrente com amplitude de 1 kA e com os seguintes tempos de frente e de cauda: 1,2/50 µs e 10/350 µs, caracterizando ondas de descargas atmosféricas rápidas e relativamente lentas [23], [24]. A Tabela 3.1 mostra os valores de A, $\varphi \in \lambda$ para as ondas em questão [26].

Onda de corrente	Δ	(0	2
(tempo de frente/	(Ampàros)	ψ	(1 (-)
tempo de cauda)	(Amperes)	(1/S)	(1/S)
1,2/50 µs	1.020,2926	14.293,82	4.874.195,9
10/350 µs	1.024,4359	2.049,9165	563.727,03

Tabela 3.1 – Valores de A, ϕ e λ para as ondas 1,2/50 µs e 10/350 µs

A Figura 3.1 ilustra as duas ondas de correntes do tipo dupla exponencial usadas nas simulações.



Figura 3.1 – Formas de onda de corrente dupla exponencial

ii. Função de Heidler - um modelo mais adequado para representação das ondas de corrente de descargas atmosféricas é obtido por meio da função analítica de Heidler que permite reproduzir a natureza côncava da frente de onda observada em curvas reais de descargas atmosféricas [25]. Ademais, a função de Heidler, dada por (3-2), apresenta derivada máxima próximo a seu pico tal qual ocorre em ondas reais [23, 24]. Diferentemente, a representação por dupla exponencial apresenta derivada máxima no início da onda [23, 24].

$$i(t) = \frac{I_0}{\varphi} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2},$$

(3-2)

onde, I₀ é a amplitude da corrente na base do canal, τ_1 é a constante relacionada ao tempo de frente da onda de corrente, τ_2 é a constante relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente, $\varphi = e^{-(\tau_1/\tau_2)(n \times \tau_2/\tau_1)^{1/n}}$, n é um expoente de ajuste.

A Figura 3.2 mostra uma onda de corrente típica de descarga atmosférica, de amplitude igual a 1 kA e tempo de frente de 1 µs modelada pela soma de duas funções de Heidler a ser utilizada nas análises de sensibilidade. A Tabela 3.2 ilustra os valores dos termos presentes nesta função de Heidler.

I _{o1} (Ampères)	871		
τ ₁₁ (s)	0,25x10 ⁻⁶		
τ ₁₂ (s)	2,5x10 ⁻⁶		
I _{o2} (Ampères)	667,2		
τ ₂₁ (s)	2,1x10 ⁻⁶		
τ ₂₂ (s)	230x10 ⁻⁶		
n	2		

Tabela 3.2 – Valores dos termos da função de Heidler utilizada nas simulações



Figura 3.2 - Onda típica de descarga atmosférica representada pela função de Heidler

3.3 – Impedância na Frequência

A presente seção apresenta a análise da impedância de aterramento em função da frequência para as configurações de aterramento e valores de resistividade e permissividade descritos na seção 3.1 (constantes e variáveis com a frequência).

A definição original de impedância de aterramento é no domínio da frequência para excitações com variação senoidal no tempo e se aplica, geralmente, entre pontos próximos no espaço [27]. Em situações em que o aterramento fica submetido a fenômenos de alta frequência o mesmo pode ser representado por uma impedância, sendo que uma impedância complexa deve ser determinada para cada frequência específica do sinal aplicado, conforme equação (3-3).

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)}$$
(3-3)

No entanto, para solicitações de baixas frequências (100 Hz) a parcela reativa da impedância de aterramento pode ser desprezada e o sistema pode então ser representado por uma resistência de aterramento.

A Figura 3.3 apresenta gráficos do módulo e da fase da impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 50 m de comprimento, enterrado a 0,5 m de profundidade, em função da frequência (0 Hz a 1 MHz). Consideram-se solos com valores de resistividades medidas em baixa frequência iguais a 500 Ω .m, 1000 Ω .m, 2.400 Ω .m, 5000 Ω .m e 10.000 Ω .m. Na Figura 3.3 (a) é apresentada a impedância de aterramento considerando os valores de condutividade e permissividade do solo constantes. Nas Figura 3.3 (b), (c), (d) e (e) são apresentados os mesmos resultados, considerando, porém, os parâmetros do solo variáveis com a frequência, segundo as formulações de Scott [5], Longmire [7], Visacro [2] e Portela [11], respectivamente.

Para o caso dos parâmetros do solo constantes nota-se claramente, por meio da Figura 3.3 (a), que:

 Para baixas frequências a impedância assume módulo constante e fase nula e, por isso, pode ser aproximada por uma resistência de aterramento. No entanto, para frequências acima de 10 kHz percebe-se a presença dos efeitos reativos (capacitivo ou indutivo) na impedância de aterramento, uma vez que os valores do módulo e fase da impedância diferem consideravelmente dos valores obtidos em baixas frequências.

- Para solos com resistividades (ρ₀) mais baixas (500 Ω.m e 1000 Ω.m): percebe-se o predomínio do efeito indutivo na faixa superior do espectro de frequência. O fato pode ser percebido pelo aumento no valor do módulo da impedância de aterramento para altas frequências e, também, pelos valores positivos dos ângulos de fase.
- Para solos com resistividades (ρ₀) mais altas (2.400 Ω.m, 5.000 Ω.m e 10.000 Ω.m): percebe-se em um primeiro momento, para o espectro superior de frequência, o predomínio do efeito capacitivo. O fato é corroborado pela diminuição do módulo da impedância para frequências acima de 10 kHz e também pelos valores negativos do ângulo de fase. Por outro lado, para frequências acima de aproximadamente 200 kHz, nota-se o aumento do efeito indutivo no aterramento.

A consideração de um valor de resistência de aterramento constante quando o mesmo está sujeito a fenômenos impulsivos gera uma análise errônea do desempenho do aterramento e pode provocar a utilização de técnicas inadequadas de proteção.

Para os casos em que se consideram os parâmetros do solo variáveis com a frequência, Figuras 3.3 (b), (c), (d) e (e), os seguintes comentários podem ser extraídos:

- A faixa de frequência em que o aterramento pode ser representado por uma "resistência pura" diminui consideravelmente, para todas as 4 metodologias, quando comparada com àquela de parâmetros do solo constantes.
- Os valores de resistência (frequência nula) variam em relação ao valor de resistência do solo com parâmetros constantes, principalmente para as metodologias de Scott e Visacro. Para as metodologias de Longmire e Portela os valores são muito próximos para o de solo com parâmetros constantes.
- Os comportamentos indutivos e capacitivos são verificados, de forma geral, para os diversos valores de ρ₀ considerados, de maneira similar à do caso de solo com parâmetros constantes. Todavia, as faixas de frequência com que tais comportamentos predominam variam substancialmente.
- Quanto maior o valor de ρ₀ (solos típicos do Brasil) maior é a diferença no comportamento da impedância (módulo e fase), ao longo do espectro de frequência, quando se compara solos com parâmetros constantes e variáveis com a frequência.



- /



Figura 3.3 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 50 m considerando os parâmetros do solo (a) Constantes, e dependentes da frequência segundo (b) Scott [5], (c) Longmire [7], (d) Visacro [8] e (e) Portela [11].

Com o objetivo de verificar a influência do comprimento do eletrodo de aterramento na impedância no domínio da frequência, foram construídos gráficos de módulo e ângulo para comprimentos de 10 m e 90 m e valores de ρ_0 de 500 Ω .m e 2.400 Ω .m, com solos de parâmetros constantes e variáveis com a frequência. Os resultados estão ilustrados na Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.6 e Figura 3.7. Com base nestas figuras, os seguintes comentários podem ser tecidos:

Para eletrodos de 10 m – Figura 3.4 e Figura 3.6: o efeito capacitivo predomina, principalmente para solo com maior valor de resistividade (2.400 Ω.m). Na faixa superior do espectro, o efeito indutivo passa a predominar, principalmente para solo com menor resistividade (500 Ω.m). De um modo geral, as metodologias que consideram solos com parâmetros constantes e variáveis com a frequência geram resultados similares, à exceção da de Portela, cujos resultados destoam das demais.

- Para eletrodos de 90 m Figura 3.5 e Figura 3.7: o efeito indutivo predomina, principalmente para solo com menor valor de resistividade (500 Ω.m). Na faixa superior do espectro, o efeito capacitivo passa a predominar, principalmente para solo com maior resistividade (2.400 Ω.m) e formulação de Portela. De um modo geral, as metodologias que consideram solos com parâmetros constantes e variáveis com a frequência geram resultados similares, à exceção da de Portela, cujos resultados destoam das demais.
- Para solos com menor valor de resistividade (500 Ω.m) Figura 3.4 e Figura 3.5: a resistência de aterramento é maior para o eletrodo menor (10 m). O eletrodo de maior comprimento apresenta comportamento predominantemente indutivo, exceto para o espectro superior de frequência, enquanto o menor possui predominância capacitiva, exceto para altas frequências.
- Para solos com maior valor de resistividade (2.400 Ω.m) Figura 3.6 e Figura 3.7: a resistência de aterramento é maior para o eletrodo menor (10 m). O eletrodo de maior comprimento apresenta comportamento predominantemente indutivo, exceto para o espectro superior de frequência, e para a metodologia de Portela. Por outro lado, o menor possui predominância capacitiva, exceto para altas frequências, principalmente para a metodologia de Portela.



Figura 3.4 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 10 m, enterrado a 0,5 m em solo com resistividade medida em baixa frequência de 500 Ω.m.



Figura 3.5 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 90 m, enterrado a 0,5 m em solo com resistividade medida em baixa frequência de 500 Ω.m.



Figura 3.6 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 10 m, enterrado a 0,5 m em solo com resistividade medida em baixa frequência de 2.400 Ω.m.



Figura 3.7 – Impedância de aterramento para eletrodo horizontal de 90 m, enterrado a 0,5 m em solo com resistividade medida em baixa frequência de 2.400 Ω.m.

As diferenças de comportamento do aterramento no domínio da frequência descritas nesta seção, considerando solos com parâmetros constantes e variáveis com a frequência, traduzem desempenho transitório do aterramento bastante diverso, como é verificado nas próximas seções.

Verifica-se, com essa seção, e também com as demais, uma enorme quantidade possível de análises de sensibilidade. Evidentemente, não é razoável, devido a limitações de tamanho do texto, apresentar todas as análises realizadas nesta dissertação. Assim sendo, para não sobrecarregar o texto, no Anexo B são relacionados diversos resultados adicionais das análises em causa.

3.4 – Sobretensão no Ponto de Injeção de Corrente

A presente seção verifica os efeitos que a variação do comprimento do eletrodo de aterramento e da resistividade do solo medida em baixa frequência oferecem para os valores de sobretensão transitória desenvolvidos no ponto de injeção de corrente.

A sobretensão transitória é um parâmetro de grande importância prática, uma vez que é capaz de revelar a tensão máxima a que o aterramento fica submetido quando o mesmo está sujeito a fenômenos impulsivos. Ademais, com ela pode-se avaliar também o tempo a que o aterramento fica submetido a determinados níveis de tensão transitória.

A Figura 3.8 ilustra os gráficos de sobretensão no ponto de injeção para um eletrodo horizontal de 50 m inserido em solos com valores de resistividades (ρ_0) 500 Ω .m, 1.000 Ω .m e 10.000 Ω .m, solicitados por uma onda de corrente de 1,2/50 µs. São analisados os comportamentos das sobretensões transitórias considerando a condutividade e a permissividade elétricas do solo independentes da frequência e também variáveis com a frequência de acordo com [2, 5, 7 e 11]. Com base nesta figura, os seguintes resultados podem ser destacados:

- Os maiores níveis de sobretensão são observados para solos com valores de resistividade mais elevados.
- A consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência, para todas as metodologias de medição consideradas, resulta em uma sensível diminuição nos níveis máximos de sobretensão. As maiores diferenças são resultantes da aplicação da metodologia de Portela, sendo que esta diferença aumenta à medida que ρ₀ aumenta.

- O tempo em que a máxima sobretensão ocorre é relativamente próximo para solo com parâmetros constantes e variáveis com a frequência, à exceção da metodologia de Portela, onde este tempo aumenta à medida que ρ₀ aumenta.
- Estes resultados podem ser explicados com base nas análises de sensibilidade realizadas no Capítulo 2, que consideram as variações de σ, ωε, α e β com a frequência, para solos com parâmetros constantes e variáveis com a frequência.



(C)

Figura 3.8 –Tensões resultantes da injeção de uma onda de corrente de 1,2/50 μs na extremidade de eletrodo horizontal de 50 m para solos com valores de resistividade medidas em baixa frequência de (a) 500 Ω.m, (b) 1.000 Ω.m e (c) 10.000 Ω.m

A Figura 3.9 ilustra os gráficos de sobretensão no ponto de injeção para eletrodos horizontais, de comprimentos 10 m, 50 m e 90 m, inseridos em solo com valor de resistividade (ρ_0) 2.400 Ω .m e solicitados por uma onda de corrente de 1,2/50 µs. Os seguintes comentários podem ser elaborados:

- À medida que o comprimento do eletrodo aumenta, os valores de sobretensão transitória diminuem, para todas as metodologias. No entanto, este efeito de diminuição é verificado até certo limite, pois a Figura 3.9 (b) e Figura 3.9 (c) mostram que apesar de haver aumento no comprimento do eletrodo (50 para 90 m), a sobretensão não sofre redução sensível. Este comportamento está associado com o conceito de comprimento efetivo do eletrodo, abordado nas seções seguintes.
- Novamente, verifica-se uma diminuição nos níveis de sobretensão quando os parâmetros do solo apresentam variação com a frequência. Tal diminuição é mais pronunciada quando se considera a metodologia de Portela.



Figura 3.9 – Tensões resultantes da injeção de uma onda de corrente de 1,2/50 μs na extremidade de eletrodo horizontal para solo com valor de resistividade medida em baixa frequência de 2.400 Ω.m e eletrodos de comprimentos (a) 10 m (b) 50 m e (c) 90 m

A Figura 3.10 ilustra os gráficos de sobretensão no ponto de injeção para eletrodos horizontais, de comprimentos 50 m e 90 m, inseridos em solo com valor de

resistividade (ρ_0) 2.400 Ω .m e solicitados por uma onda de corrente de 10/350 µs. Os seguintes comentários podem ser esboçados:

- A medida que o comprimento do eletrodo aumenta, os valores de sobretensão transitória diminuem, para todas as metodologias. Observa-se que, diferentemente das Figuras 3.9 (b) e (c), o aumento no comprimento do eletrodo provoca uma diminuição sensível nos níveis máximos de sobretensão. Este fato está associado com o maior conteúdo espectral da onda mais rápida (1,2/50 µs) em relação à mais lenta (10/350 µs), o que provoca um acentuado efeito de propagação (maior atenuação). Verifica-se, assim, a dependência do comprimento efetivo do eletrodo em relação à onda de corrente solicitante. Neste caso, tal comprimento é maior para a onda mais lenta.
- Mais uma vez observa-se uma diminuição nos picos de sobretensão quando os parâmetros do solo apresentam variação com a frequência, sendo mais pronunciada quando se considera a metodologia de Portela.



Figura 3.10 – Tensões resultantes da injeção de uma onda de corrente de 10/350 µs na extremidade de eletrodo horizontal de (a) 50 m e (b) 90 m, para solo com valor de resistividade medida em baixa frequência de 2.400 Ω.m

Com o objetivo de analisar a influência da representação matemática da onda de corrente, é apresentada a Figura 3.11, que considera a mesma situação da Figura 3.9 (b) e (c), porém utilizando a função de Heidler para caracterizar a injeção de corrente. Em termos práticos, são observados os mesmos níveis máximos de sobretensão. As maiores diferenças são encontradas para a metodologia de Portela. Em termos de comparação dos resultados de solo com parâmetros constantes e variávies com a frequência, os mesmos comentários realizados para o caso da Figura 3.9 são válidos no caso da Figura 3.11.



Figura 3.11 – Tensões resultantes da injeção de uma onda de corrente Heidler com tempo de frente 1 μs na extremidade de eletrodo horizontal de (a) 50 m e (b) 90 m para solo com valor de resistividade medida em baixa frequência de 2.400 Ω.m

3.5 – Impedância Impulsiva

A impedância impulsiva (Zp) é definida como a razão entre os picos de tensão e corrente no ponto de injeção e seu conceito é originalmente no domínio do tempo. Este é um parâmetro bastante interessante, pois permite estimar de forma rápida o valor máximo da sobretensão no ponto de injeção apenas multiplicando o valor do pico de corrente por Z_p. Como é mostrada nesta seção, a impedância impulsiva é dependente do comprimento do eletrodo, condutividade do solo, intensidade e forma da corrente injetada.

A Figura 3.12 ilustra a resposta de eletrodos horizontais de aterramento de diferentes comprimentos (10 m, 30 m, 50 m, 70 m e 90 m), raio 1 cm e profundidade 0,5 m, enterrados em solos de diferentes resistividades (ρ_0 : 500 Ω .m, 1.000 Ω .m, 2.400 Ω .m, 5.000 Ω .m e 10.000 Ω .m), sujeitos a três ondas de corrente distintas: duplas exponenciais de 1,2/50 µs e 10/350 µs e função de Heidler com tempo de frente de 1 µs. As curvas foram obtidas considerando os parâmetros do solo variáveis com a frequência segundo a metodologia de Scott [5]. Os seguintes comentários são descritos:

 Para todas as ondas de corrente injetadas, Zp aumenta à medida que ρ₀ aumenta, pois o efeito de atenuação é mais acentuado para solos com resistividades menores, diminuindo os níveis de sobretensão no ponto de injeção.

- Os resultados da Figura 3.12 (a) e (c) são, praticamente, os mesmos, corroborando as conclusões descritas na seção anterior.
- Para o comprimento do eletrodo menor que o comprimento efetivo, os valores de Zp tendem a ser ligeiramente menores para ondas de corrente mais rápidas (1,2/50 µs) em relação aos valores para ondas mais lentas (10/350 µs). Neste caso, prevalece o efeito de atenuação, mais intenso para ondas rápidas (de maior conteúdo espectral), implicando em valores menores de Zp.
- Para eletrodos de comprimento igual ou maior que o comprimento efetivo, os valores de Zp são menores para ondas de corrente mais lentas. Isto ocorre por que o comprimento efetivo é maior para estas ondas, o que corresponde a reduções mais intensas nos valores de Zp associadas ao aumento do comprimento do eletrodo.
- A precisão dos resultados pode ser melhorada se valores intermediários de comprimentos de eletrodo forem considerados, como por exemplo, se as simulações forem realizadas considerando um passo de 5 m. Neste caso, as curvas ficariam mais suaves. Este comentário é válido, também, para as demais seções deste capítulo.





Figura 3.12 – Impedância impulsiva em função do comprimento do eletrodo considerando a variação dos parâmetros do solo segundo Scott e ondas de corrente dupla-exponencial (a) 1,2/50 µs, (b) 10/350 µs e (c) modelada pela função de Heidler com tempo de frente 1 µs.

A Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15 esboçam resultados similares aos apresentados na Figura 3.12, porém considerando, respectivamente, as metodologias de Longimire, Visacro e Portela. Basicamente, conclusões similares às obtidas para os resultados representados na Figura 3.12 podem ser extraídas para os apresentados na Figura 3.13 e Figura 3.14, metodologias de Longmire e Visacro. Contudo, os resultados decorrentes da aplicação da metodologia de Portela apresentam comportamentos distintos, confirmando as observações da seção anterior.





Figura 3.13 – Impedância impulsiva em função do comprimento do eletrodo considerando a variação dos parâmetros do solo segundo Longmire e ondas de corrente dupla-exponencial (a) 1,2/50 µs e (b) 10/350 µs e (c) modelada pela função de Heidler com tempo de frente 1 µs.



Figura 3.14 – Impedância impulsiva em função do comprimento do eletrodo considerando a variação dos parâmetros do solo segundo Visacro e ondas de corrente dupla-exponencial (a) 1,2/50 µs e (b) 10/350 µs e (c) modelada pela função de Heidler com tempo de frente 1 µs.



Figura 3.15 – Impedância impulsiva em função do comprimento do eletrodo considerando a variação dos parâmetros do solo segundo Portela e ondas de corrente dupla-exponencial (a) 1,2/50 µs e (b) 10/350 µs e (c) modelada pela função de Heidler com tempo de frente 1 µs.

Para finalizar esta seção, é importante mencionar que, com base na Seção 3.4, pode-se concluir que a inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência promove uma diminuição no valor de Zp de determinado eletrodo de aterramento quando comparado com o valor de Zp, para o mesmo eletrodo, considerando os parâmetros do solo constantes.

3.6 – Comprimento Efetivo

Devido ao fenômeno de propagação de ondas, mencionado na seção 2.3.4, a densidade de corrente que é dispersa pelo eletrodo (A/m) diminui ao longo do comprimento do mesmo devido ao fenômeno de atenuação, e, por isso, manifesta-se

assim uma distribuição de corrente não uniforme ao longo do eletrodo de aterramento [19].

O conceito de comprimento efetivo corresponde ao comprimento limite do eletrodo por meio do qual toda a corrente de dispersão é escoada para o solo. Isso por que a atenuação da onda para tal comprimento já é tão acentuada, que a corrente que dispersa para o solo a partir deste ponto é desprezível. Eletrodos com comprimento superior a esse valor limite não provocam diminuição da impedância impulsiva. Desta forma, para o aterramento sujeito a fenômenos impulsivos a definição de comprimento efetivo pode ser dada como o comprimento a partir do qual a impedância impulsiva não apresenta diminuições significativas [19].

A Figura 3.16 representa as curvas de impedância impulsiva em função do comprimento de eletrodos horizontais, imersos em solos de resistividades medidas em baixas frequências (ρ_0) de 500 Ω .m, 1.000 Ω .m, 2.400 Ω .m, 5.000 Ω .m e 10.000 Ω .m, para injeção de uma onda de corrente impulsiva dupla exponencial de 1,2/50 µs. A análise desta figura permite concluir que:

- O comprimento efetivo é maior para solos cujos parâmetros são modelados de forma variável com a frequência para a metodologia de Portela quando comparados com o de solos com parâmetros constantes, sendo este aumento mais pronunciado para solos com altos valores de resistividade. Estes resultados estão de acordo com as conclusões descritas na Seção 3.5 e com os resultados apresentados no Capítulo 2.
- O comprimento efetivo do eletrodo é maior em solos com resistividades mais elevadas. O fato é prontamente compreendido uma vez que o fenômeno de atenuação se acentua à medida que a condutividade do meio aumenta, como mostram os resultados do Capítulo 2.





Figura 3.16 – Impedância impulsiva em função do comprimento de eletrodos horizontais, para injeção de uma onda de corrente impulsiva de 1,2/50 μs, imersos em solos de resistividades em baixas frequências de: (a) 500 Ω.m, (b) 1.000 Ω.m (c) 2.400 Ω.m, (d) 5.000 Ω.m e (e) 10.000 Ω.m

Para verificar o efeito da injeção de diferentes ondas de corrente no valor do comprimento efetivo do eletrodo, foram simulados os valores de impedância impulsiva em função do comprimento considerando ondas injetadas modeladas por função dupla exponencial 10/350 μ s e, também, modelada pela função de Heidler com tempo de frente de 1 μ s. Os resultados encontram-se, respectivamente, na Figura 3.17 e Figura 3.18, para valores de ρ_0 iguais a 500 Ω .m, 2.400 Ω .m e 10.000 Ω .m. Pela análise das figuras mencionadas é possível perceber que:

 Para ondas de corrente rápidas o comprimento efetivo apresenta valores reduzidos se comparados àqueles de ondas mais lentas. Isto ocorre por que a elevação extremamente rápida da frente de onda da corrente está associada a altas frequências, enquanto que a cauda alongada da onda corresponde às componentes de baixa frequência e, como pode ser visto no Capítulo 2, o efeito de atenuação é sensivelmente mais pronunciado no espectro de frequência mais elevado. Por conseguinte, deduz-se que o valor do tempo de cauda da onda de corrente injetada, por estar associada a baixas frequências, não interfere de forma significativa no valor do comprimento efetivo do eletrodo.

Para determinar com maior exatidão o comprimento efetivo do eletrodo de aterramento, nas situações investigadas, deve-se diminuir o passo de variação do comprimento do condutor e, assim, obter valores com maior refinamento.



Figura 3.17 – Impedância impulsiva em função do comprimento de eletrodos horizontais, para injeção de uma onda de corrente impulsiva de 10/350 μs, imersos em solos de resistividades em baixas frequências de: (a) 500 Ω.m, (b) 2.400 Ω.m e (c) 10.000 Ω.m



Figura 3.18 – Impedância impulsiva em função do comprimento de eletrodos horizontais, para injeção de uma onda de corrente impulsiva do tipo Heidler com tempo de frente de 1 μs, imersos em solos de resistividades em baixas frequências de: (a) 500 Ω.m, (b) 2.400 Ω.m e (c) 10.000 Ω.m

3.7 – Coeficiente Impulsivo

A Figura 3.19 ilustra os valores dos coeficientes impulsivos de eletrodos horizontais, em função de seus comprimentos, solicitados por uma onda de corrente do tipo dupla exponencial 1,2/50 μ s, imersos em solos de valores de ρ_0 iguais a 500 Ω .m e 2.400 Ω .m. Constata-se que:

 A consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência gera valores de coeficientes impulsivos menores que aqueles em que o solo é modelado com parâmetros constantes. Tal fato direciona a um melhor desempenho impulsivo do eletrodo de aterramento (Zp < R). Esta diferença é tanto mais acentuada quanto maior o valor de ρ_0 e quando se considera a metodologia de Portela.

- O coeficiente impulsivo é sempre maior que 1 para solos cujos parâmetros são considerados constantes. Estes resultados estão em concordância com [20].
- Para solos com parâmetros variáveis com a frequência (eletrodos curtos e solos de menor resistividade; solos de resistividades mais altass independente do comprimento; ambos para metodologia de Portela) o coeficiente impulsivo é menor que 1, traduzindo um desempenho transitório mais satisfatório.
- Eletrodos longos em solos de menor resistividade (de maior condutividade) apresentam desempenho impulsivo menos satisfatório.
- Estes resultados (valores de A menores que a unidade) estão em discordância com [20] e em concordância com análises e estudos experimentais recentes [28].

É importante comentar que o coeficiente impulsivo não deve ser analisado individualmente. Assim, para avaliação completa da informação física associada ao coeficiente impulsivo, o valor da resistência em baixa frequência deve ser também analisado [20].

Outra informação fundamental oriunda dos resultados ilustrados na Figura 3.19 corresponde à observação de dois domínios de comportamentos do aterramento, em relação ao comprimento efetivo dos eletrodos. No primeiro domínio, eletrodos menores que o comprimento efetivo, apresentam valores de Z_p inferiores a R, que se traduz em valores de A abaixo da unidade. No segundo domínio, eletrodos maiores que o comprimento efetivo, apresentam valores de Z_p superiores a R, que implica em valores de *A* além da unidade. Uma vez que para comprimentos acima do efetivo o valor de Z_p se mantém constante enquanto o de R diminui, observa-se um aumento contínuo do coeficiente impulsivo. Este comportamento está explicado em [28]. Além disso, julga-se que, ao menos em partes, o efeito capacitivo do aterramento é responsável pelos valores de coeficiente impulsivo menores que a unidade. Essa última observação merece atenção especial, uma vez que o efeito capacitivo apresenta influência mais significativa que aquela geralmente assumida em alguns estudos tradicionais referentes ao comportamento impulsivo do aterramento, conforme destacado por [28].



Figura 3.19 – Coeficiente impulsivo de eletrodos horizontais, solicitados por uma onda de corrente do tipo dupla exponencial 1,2/50 μs, imersos em solos de resistividades em baixas frequências de: (a) 500 Ω.m e (b) 2.400 Ω.m

A Figura 3.20 apresenta resultados similares aos da Figura 3.19, porém considerando que os eletrodos são submetidos a ondas de corrente do tipo dupla exponencial mais lenta (10/350 μs). Os resultados ilustram que:

- Novamente, a consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência gera valores de coeficientes impulsivos menores que aqueles em que o solo é modelado com parâmetros constantes. Também, esta diferença é tanto mais acentuada quanto maior o valor de ρ₀ e quando se considera a metodologia de Portela.
- Para menores valores de resistividade, o coeficiente impulsivo apresenta valores menores que a unidade para uma gama maior de comprimento de eletrodos, implicando em comportamento impulsivo mais satisfatório, quando comparado com os resultados associados a ondas rápidas.
- Para solos com valor de resistividade mais elevada (2400 Ω.m) o coeficiente impulsivo é sempre menor que a unidade para a consideração dos parâmetros do solo variáveis com a frequência, independente do comprimento do eletrodo, diferentemente do comportamento para o caso de ondas rápidas.



Figura 3.20 – Coeficiente impulsivo de eletrodos horizontais, solicitados por um onda de corrente do tipo dupla exponencial 10/350 μs, imersos em solos de resistividades em baixas frequências de: (a) 500 Ω.m e (b) 2.400 Ω.m

3.8 – Conclusões

Neste capítulo são apresentados resultados relativos a grandezas de influência no desempenho transitório de eletrodos de aterramento elétrico frente a fenômenos impulsivos. Os resultados para a configuração de eletrodo horizontal foram obtidos por meio da ferramenta computacional apresentada no Capítulo 2. Foram inferidas algumas análises de sensibilidade para o comportamento da impedância de aterramento, impedância impulsiva, comprimento efetivo, sobretensão no ponto de injeção de corrente e coeficiente impulsivo, de acordo com algumas variáveis (resistividade elétrica do solo medida em baixas frequência, comprimento do eletrodo e forma de onda da corrente injetada) [31], [32]. Ademais, procurou-se elaborar sobre os resultados análises de sensibilidade considerando os parâmetros do solo independentes da frequência e também variáveis com a frequência de acordo com as formulações sugeridas em [2], [5], [7], [11]. Devido ao razoável volume de resultados e análises de sensibilidade do aterramento decorrentes deste trabalho, julga-se adequado um breve resumo das análises de alguns pontos a respeito dos parâmetros de aterramento.
Impedância Harmônica

- A análise da impedância de aterramento Z(ω) (módulo e fase) para solicitações típicas de surtos atmosféricos mostrou que a consideração dos parâmetros eletromagnéticos do solo variáveis com a frequência resulta em diminuição do módulo de Z(ω) em relação aos parâmetros considerados constantes. Esta diminuição é mais pronunciada para eletrodos mais longos e para o espectro de frequência superior.
- Para eletrodos mais longos o efeito indutivo predomina, principalmente para solo com menor valor de resistividade. Já para eletrodos menores o efeito capacitivo é predominante, mesmo para solos com menor valor de resistividade (σ(ω) e ε (ω)).
- De modo geral, as metodologias que consideram solos com parâmetros variáveis com a frequência possuem tendência de comportamentos similares, à exceção para a formulação sugerida por Portela.

Sobretensão no ponto de injeção

- A consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência resulta em valores reduzidos de sobretensão no ponto de injeção de corrente, V(t), quando se compara com o caso dos parâmetros elétricos do solo independentes da frequência, principalmente para solos com maiores valores de resistividade e metodologia de Portela.
- Os tempos em que ocorrem os máximos valores de V(t) são próximos para consideração dos parâmetros do solo constantes e também variáveis com a frequência, exceto para a formulação de Portela. Os maiores níveis de V(t) são observados para solos com maiores valores de resistividade.
- À medida que comprimento do eletrodo aumenta os valores de V(t) diminuem. Esta diminuição acontece até que o eletrodo atinja seu comprimento efetivo. O aumento do comprimento do eletrodo provoca diminuições mais sensíveis de V(t) para o caso de injeção de ondas mais lentas.

Impedância Impulsiva e Comprimento Efetivo

 A inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência promove a diminuição nos valores de impedância impulsiva Zp em relação à consideração da condutividade e da permissividade do solo independentes da frequência, para as 4 (quatro) metodologias de medição consideradas nesta dissertação. Este efeito é mais pronunciado para a metodologia de Portela e para solos com maiores valores de resistividade.

- Em relação ao comprimento efetivo lef, quando se considera a metodologia de Portela, a inclusão da variação com a frequência promove um aumento de lef. Este efeito é mais pronunciado para o caso de solos com maiores valores de resistividade.
- O aumento do comprimento do eletrodo promove a diminuição nos valores de Zp.
 Esta diminuição ocorre até que o eletrodo atinja seu comprimento efetivo.
- Tanto a impedância impulsiva quanto o comprimento efetivo aumentam à medida que o solo passa a assumir maiores resistividades. Este fato é explicado pela diminuição do efeito de atenuação em solos de condutividade mais baixa.
- O comprimento efetivo do eletrodo tende a ser menor para o caso de injeção de ondas de correntes mais rápidas. Isto ocorre devido ao fato de que estas ondas apresentam conteúdo espectral maior e, por isso, o efeito de atenuação é mais pronunciado. Por outro lado, a impedância impulsiva é maior para ondas mais rápidas.
- O valor do tempo de cauda da onda de corrente injetada não interfere nos valores do comprimento efetivo.

Coeficiente Impulsivo

- O coeficiente impulsivo A é sempre maior que a unidade (ou no máximo igual) para solos cujos parâmetros são considerados constantes.
- A consideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência gera valores de coeficientes impulsivos menores e assim, o desempenho impulsivo do aterramento para este caso é melhor do que para a consideração dos parâmetros do solo constantes.
- Para a metodologia de Portela os valores do coeficiente impulsivo (A) são sempre menores que a unidade, principalmente para solos com maiores valores de resistividade. Para solos com menores valores de resistividade, A é menor que 1 principalmente para eletrodos mais curtos.
- Eletrodos de aterramento em solos com maiores valores de resistividade apresentam melhor desempenho impulsivo (menores valores de A). Eletrodos mais longos em solos com menor valor de resistividade acarretam em desempenho impulsivo do aterramento menos satisfatório.

Um ponto que merece destaque é o fato de que o desempenho do aterramento elétrico considerando a condutividade e a permissividade do solo dependentes da frequência segundo Portela apresenta resultados bastante distintos das demais formulações que computam a dependência em causa. Isto ocorre porque a formulação de Portela estima um efeito capacitivo muito mais acentuado em relação às demais formulações. Acredita-se, portanto, que investigações mais aprofundadas devam ser realizadas nesta área a fim de que este efeito seja ponderado adequadamente na análise do comportamento do aterramento frente a fenômenos impulsivos.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

4.1 – Introdução

Neste trabalho é apresentada uma avaliação dos efeitos da variação com a frequência dos parâmetros do solo, condutividade e permissividade elétricas, no comportamento transitório de eletrodos horizontais de aterramento (característicos de cabos contrapeso de linhas de transmissão) quando solicitados por correntes impulsivas (rápidas e lentas). São apresentadas, também, comparações com resultados oriundos de solos cujos parâmetros são modelados independentes da frequência. Diversas análises de sensibilidade do desempenho em causa são realizadas, em função dos parâmetros descritos e, também, do comprimento dos eletrodos.

A base para tal avaliação, correspondente ao cálculo do desempenho transitório dos eletrodos, refere-se à determinação dos seguintes elementos: sobretensão no ponto de injeção de corrente, impedância impulsiva, comprimento efetivo e coeficiente impulsivo.

As análises de sensibilidade são realizadas por meio da utilização de um modelo eletromagnético, fisicamente consistente, baseado diretamente nas Equações de Maxwell, validado mediante comparações com resultados experimentais (em trabalhos anteriores). Este modelo é desenvolvido no domínio da frequência, o que possibilita a inclusão direta de expressões matemáticas que traduzem a variação dos parâmetros do solo com a frequência. Tal modelagem foi, originalmente, desenvolvida por S. Visacro [2] e, posteriormente, implementada por R. S. Alípio [1].

4.2 – Principais Resultados

De um modo geral, os resultados expressam que os cabos contrapeso apresentam desempenho transitório mais satisfatório quando os parâmetros do solo são modelados considerando suas variações com a frequência, quando comparado com o desempenho de tais cabos no caso de parâmetros constantes ao longo do espectro de frequência. Desta forma, os níveis máximos de sobretensão, a impedância impulsiva e o coeficiente impulsivo são menores, enquanto o comprimento efetivo é maior, quando comparados com os resultados oriundos da desconsideração da variação dos parâmetros do solo com a frequência. Estas reduções e este aumento são mais expressivos quando se considera a formulação proposta por Portela e para solos com valores mais elevados de resistividade. Para esta formulação tal fato é atribuído ao acentuado efeito capacitivo, mais pronunciado em solos de menores condutividades. Este efeito é mais moderado nas outras metodologias de medição (Scott, Longmire e Visacro), mesmo em solos com altos valores de resistividade [31], [32].

As diferenças entre os resultados obtidos a partir de metodologias distintas de quantificação dos parâmetros do solo em função da frequência (Scott, Longmire, Visacro e Portela) ilustra que pesquisas adicionais devem ser realizas neste campo [31], [32].

Os resultados obtidos neste trabalho levam os autores a refletir sobre diversos aspectos associados a aterramentos elétricos e solicitações oriundas de, por exemplo, descargas atmosféricas. Dentre os já destacados no parágrafo anterior, e ao longo do texto, dois outros merecem ser novamente salientados. Primeiro, a partir dos resultados apresentados, ficou clara a importância de, na análise de aterramentos solicitados por correntes impulsivas, se considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência. A não inclusão dessa variação conduz a resultados conservativos, todavia irreais. Ao se trabalhar com valores irreais de, por exemplo, impedância impulsiva, perde-se a referência de análise do sistema elétrico e o engenheiro é conduzido a erros em cascata como a estimativa de falsos valores de sobretensão na cadeia de isoladores e, sobretudo, estabelecimento de técnicas inadequadas de proteção contra descargas. Segundo, os resultados obtidos mostram uma redução significativa da impedância impulsiva quando incluída a dependência dos parâmetros do solo com a frequência. Esta redução implica expectativa superior do desempenho do aterramento.

Por outro lado, nas avaliações realizadas na literatura acerca da resposta do aterramento frente a correntes impulsivas de alta intensidade como as das Descargas Atmosféricas, embora a dependência da frequência dos parâmetros do solo não seja considerada, atribui-se uma melhora do desempenho à ocorrência do efeito de ionização do solo. Segundo Visacro [19], este efeito de ionização tem sido superestimado, o que compensaria a inobservância da dependência da frequência dos parâmetros do solo. Finalmente, é oportuno frisar que os resultados destacados acima, decorrentes das diversas análises de sensibilidade realizadas nesta dissertação, discordam sobremaneira dos divulgados na literatura científica especializada, normalmente assumidos como tradicionais e definitivos [20]. Todavia, estão em consonância com resultados experimentais recentemente divulgados [28].

4.3 – Propostas de Continuidade

Os desenvolvimentos alcançados nesta pesquisa abrem diversas discussões e necessidades de trabalhos futuros, dentre os quais podem ser citados os seguintes:

- Realização de análises de sensibilidade em sistemas de aterramento mais complexos;
- Realização de medições adicionais da variação da condutividade e permissividade elétricas de solos com a frequência e comparação com as existentes;
- Inclusão de fenômenos não-lineares no modelo eletromagnético, como por exemplo, ionização do solo, e verificação da influência nas análises de sensibilidade;
- Desenvolvimento de um modelo completo que compute o acoplamento eletromagnético entre elementos aéreos (linhas de transmissão) e enterrados (eletrodos de aterramento), com e sem a consideração de variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, e respectivas análises de sensibilidade;
- Investigação, com maior rigor, de outros possíveis elementos do sistema elétrico que possam influenciar o desempenho do mesmo frente a descargas atmosféricas.

Referências Bibliográficas

- R. S. Alipio, Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPGMMC/CEFET-MG), Dezembro de 2008.
- S. F. Visacro, Modelagem de Aterramentos Elétricos, Tese de Doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Julho de 1992.
- S. F. Visacro, A. S. Junior, "HEM: A model for simulation of lightning-related engineering problems", IEEE Transactions on power delivery, vol. 20, nº 2, pp. 1206-1208, abril de 2005.
- 4. S. F. Visacro, Aterramentos elétricos, Artliber, São Paulo, 2002.
- H. S. Scott, "Dielectric constant and electrical conductivity measurements of moist rocks: A new laboratory method", J. Geophys. Res., vol. 72, no. 20, pp. 5101–5115, 1967.
- "IEEE Guide for radio methods of measuring earth conductivity", Intitute of Eletrical and Eletronics Engineers.
- C. L. Longmire, K. S. Smith, "Universal Impedance for soil", Defense Nuclear Agency, Washington, October 1975.
- S. F. Visacro, C. M. Portela, "Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric", Power systems, Proceedings of Sym, High Voltage Engineering, Braunschweig, Alemanha,1987.
- I.E.T. Iben, W.A. Edelstein, P.B. Roemer "Dielectric Properties of Soil: Application to Radio Frequency Ground Heating", GE Research & Development Center, Electronic Systems Laboratory, October 1996.
- J. Curtis, R. Narayanan, "Effects of Laboratory Procedures on Soil Eletrical Property Measurements", IEEE Transactions on Instrumentatuin and Measurements, vol. 47, no. 6., Dez 2008.
- C. M. Portela, "Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior", Proceedings of the IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility — EMC Society, United States, August, 1999, pp. 1004–1009.

- 12. C. M. Portela, "Influence in lightning effects f soil electromagnetic behavior in frequency domain", Proceedings of the International Conference on Lightnig Protection (ICLP), vol.1, pp 394-399, Cracow, Poland.
- 13. C. M. Portela, "Frequency and transient behavior of grounding systems; I Physical and methodological aspects", Proceedings of the IEEE International symposium on electromagnetic compatibility, pp. 379-384, Austin, United States of America, 1997.
- 14. C. M. Portela, "Frequency and transient behavior of grounding systems; II Practical Application Examples", Proceedings of the IEEE International symposium on electromagnetic compatibility, pp. 379-384, Austin, United States of America, 1997.
- C. M. Portela, "Earth conductivity and permittivity data measurements: Influence in transmission line transient performance", Electric Power Systems Research, pp. 907-915, 2006
- 16. W. G. Fano and V. Trainotti, "*Dielectric Properties of Soils*", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001.
- S. Lambot, E. C. Slob, I. Bosch, B. Stockbroeckx, M. Vanclooster, "Modeling of ground penetrating radar for accurate characterization of subsurface dielectricproperties". IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, v. 42, p. 2555–2568, 2004.
- 18. R. S. Alipio, A. G. Pedrosa, M. A. O. Schroeder, R. K. Oliveira, "Estudo comparativo entre cormulações de medição de variação da condutividade e da permissividade de solos típicos com a frequência", XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XX SNPTEE), Recife, Brasil, Nov. 2009.
- S. F. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, nº1, pp. 381-386, 2007.
- 20. L. Grcev, "*Impulse Efficiency of Ground Electrodes*". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, nº1, pp. 441-451, 2009.
- 21. S. F. Visacro, A. Soares, M. A. O. Schroeder, L. C. L. Cherchiglia, A. M. Carvalho, "Investigação sobre o Aterramento de Torres do Sistema de Transmissão da CEMIG para Melhoria de Desempenho de Linhas Frente a Descargas Atmosféricas", IV International Seminar on Ligthning Protection, São Paulo, Setembro de 1997

- 22. L. Grcev, "Computer analysis of transient voltages in large grouding systems", IEEE Transactions on power delivery, vol. 11, nº 2, pp. 815-823, abril de 1996.
- 23. M. A. O. Schroeder, Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: aplicação às medições da estação do morro do cachimbo, Tese de doutorado, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG), março de 2001.
- 24. S. F. Visacro, *Descargas Atmosféricas, uma abordagem de engenharia*, Artliber, 2005.
- 25. F. Heidler, J. M. Cvetic, B. V. Stanic, "Calculation of Lightning Current Parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, n° 2, pp. 399-404, abril de 1999.
- 26. M. A. Matos, *Técnicas de Aterramentos,* Okime, Campinas, 2004.
- 27. L. Grcev, V. Arnautovski-Toseva, "Grounding systems modeling for high frequencies and transients: some fundamental considerations", Proceedings of the IEEE Bologna PowerTech Conference, Bologna, Itália, junho de 2003.
- 28. S. F. Visacro, G. Rosado, "Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, nº1, pp. 161-164, 2009.
- 29. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, New York: IEEE, 2000, (IEEE Std. 80-2000).
- 30. R. S. Alípio, M. L. F. Oliveira, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, T. A. S. Oliveira, "Análise do desempenho de aterramentos típicos de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: utilização da transformada de Fourier e do Método dos Momentos", *Anais 8º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional*, Natal, Brasil, novembro 2008.
- A. G. Pedrosa, R. S. Alípio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, "Simulation of behavior electrical grounding – Comparative analysis for performance in frequency-domain", Workshop on Applied Modeling and Simulation (WAMS'2010), Buzios, Brasil, maio 2010.
- 32. A. G. Pedrosa, R. S. Alipio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, "Influência dos parâmetros eletromagnéticos dependentes da frequência de solos típicos na resposta harmônica de aterramentos elétricos", XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA'2010), Bonito, Setembro 2010.
- A. C. Balanis, Advanced engineering electromagnetic, John Wiley & Sons, New York, 1889.

ANEXO A – INTERAÇÃO ENTRE CAMPO ELÉTRICO E MATERIAIS

Este anexo apresenta uma descrição básica da interação entre campos elétricos e meios materiais de características condutivas e dielétricas [33].

A.1 Materiais Condutores

Materiais condutores são aqueles cujos elétrons da camada atômica mais externa não são fortemente presos ao núcleo e, por isso, podem migrar de um átomo a outro do material com facilidade. Para um condutor perfeito (condutividade infinita) as cargas livres, quando sujeitas a campos elétricos externos (E_a), migram muito rapidamente para a superfície do condutor no sentido oposto ao do campo aplicado, estabelecendo uma densidade superficial de carga q_s que induz um campo elétrico E_i tal que o campo resultante no interior do condutor é nulo. Isto é ilustrado na Figura A.1 [33].



Figura A.1 – Campo elétrico aplicado em um condutor perfeito - adaptado de [33]

Outro ponto de relevância é que um condutor é um corpo equipotencial, além de que sua condutividade é constante sobre largas faixas de densidade de corrente e intensidade de campo elétrico. A variação da condutividade em função da frequência é abordada mais adiante.

A.2 Materiais Dielétricos

Os elétrons de um dielétrico encontram-se bastante presos ao núcleo atômico, e então não podem ser arrebatados de suas posições de equilíbrio pela aplicação de campos elétricos abaixo da rigidez dielétrica do material. A rigidez dielétrica é o maior valor de campo elétrico que os dipolos de um material podem suportar sem se romper; e sem conduzir. O valor da rigidez dielétrica depende de vários fatores como a temperatura, a espessura do material, o tempo e amplitude da diferença de potencial aplicada.

Portanto, um campo elétrico não produz migração de carga num dielétrico e, em geral esta propriedade faz com que os dielétricos sejam bons isolantes. No entanto, a aplicação de campo elétrico neste tipo de material provoca a formação de dipolos elétricos, que será estudado a seguir.

Em alguns átomos e moléculas o centro de carga positivo se encontra no centro do átomo e a nuvem eletrônica, região que envolve o núcleo e onde se localiza os elétrons, é simétrica. Neste caso, o átomo ou molécula é considerado apolar [33].



Figura A.2 – Representação da distribuição de cargas atômicas ou moleculares apolares adaptado de [33]

Quando um campo elétrico é aplicado, os elétrons, que não são livres, se afastam dos prótons sem se liberarem do átomo, criando assim, os dipolos eletrostáticos. Ou seja, um dielétrico em um campo elétrico pode ser interpretado como um arranjo de dipolos elétricos e exemplificado pela Figura A.3, em que as cargas deslocam-se para as extremidades do átomo ou molécula.



Figura A.3 – Formação de dipolo no átomo ou molécula - adaptado de [33]

Considerando-se l o vetor posição da carga positiva em relação à carga negativa, como ilustrado na Figura A.3, o momento de dipolo elétrico é dado pelo produto da carga, Q, pela distância entre elas (A-1):

$$d\vec{p} = Q\vec{l} \tag{A-1}$$

Quando dipolos elétricos estão presentes no material diz-se que o dielétrico está polarizado. O vetor polarização elétrica P é o momento de dipolo por unidade de volume e é dado por:

$$\vec{\mathbf{P}} = \lim_{\Delta \nu \to 0} \left[\frac{1}{\Delta \nu} \sum_{i=1}^{N_e \Delta \nu} d\vec{p}_i \right] (C/m^2)$$
(A-2)

onde N_e é o número de dipolos por unidade de volume Δv .

O vetor polarização elétrica pode ser escrito, quando todos os dipolos estão alinhados na mesma direção, como:

$$\vec{P} = N_e Q \vec{I} \tag{A-3}$$

Considerando a barra dielétrica da Figura A.4 e supondo um campo elétrico estático uniforme Ea aplicado à barra. Este campo polarizará o dielétrico e, em seu interior, as cargas positivas e negativas dos dipolos adjacentes anulam os efeitos umas das outras. Como resultado final, a polarização produz uma camada de cargas negativa em uma superfície da barra e uma camada de cargas positivas na outra. No interior do material a densidade de carga volumétrica q_v é zero.



Figura A.4 – Barra dielétrica sob efeito de um campo elétrico externo - adaptado de [33] .

Para verificar o efeito de Polarização seja o capacitor da Figura de placas paralelas separadas por uma distância S. O meio na parte esquerda das placas é o vácuo com permissividade ε_0 . O lado direito está completo com material dielétrico de permissividade ε .



Figura A.5 Capacitor de placas paralelas com barra dielétrica em seu interior - adaptado de [33].

Para o lado do capacitor onde se tem vácuo, a densidade de fluxo elétrico D_0 é dada por:

$$\vec{D}_0 = \varepsilon_0 \vec{E}_a \tag{A-4}$$

Na parte onde se encontra o dielétrico o campo elétrico polariza o dielétrico fazendo com que apareça uma densidade superficial de carga em ambas as faces da barra dielétrica. Estas cargas ligadas induzem cargas livres de sinais contrários nas placas do capacitor. Como conseqüência, a densidade de fluxo elétrico D será dada por [33]:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_a + \vec{P}$$

O vetor polarização P também pode ser expresso por:

$$\vec{P} = \epsilon_0 x_e \vec{E}_a$$
(A-5)

onde x_e é chamada de suscetibilidade elétrica, que é, de forma simplificada, a sensibilidade de um material em relação aos campos elétricos aplicados no mesmo.

De (A-4) e (A-5) tem-se:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_a + \varepsilon_0 x_e \vec{E}_a = \varepsilon_s \vec{E}_a$$
(A.6)

Na equação A.6 ϵ_s é a permissividade do meio, cujo valor relativo ao vácuo é dado por:

$$\varepsilon_{\rm s} = \varepsilon_0 (1 + x_{\rm e}) \tag{A-7}$$

A permissividade relativa, ou constante dielétrica, do material é a medida da facilidade com que o dielétrico permite o estabelecimento de linhas de campo em seu interior e, por estar relacionada à capacidade do material em se polarizar, seu valor varia em função da frequência do campo aplicado.

Quando o campo elétrico aplicado no material possui polaridade alternada, o vetor polarização \vec{P} e a permissividade são afetados e suas variações são funções da frequência deste campo aplicado. Para o processo de equacionamento da permissividade complexa, é usada a analogia ao sistema mecânico massa-mola. Na Figura A.6 a esfera positiva de massa M representa a massa do núcleo enquanto a esfera negativa, de massa m e carga –Q representa os elétrons. Quando um campo elétrico é aplicado assume-se que a carga positiva permanece estacionária e a carga negativa se move *l* metros pela plataforma cujo coeficiente de atrito vale d. Tem-se, portanto que:

$$\frac{d^{2}l}{dt^{2}} + \frac{d}{m}\frac{dl}{dt} + \frac{s}{m}l = \frac{Q}{m}E_{0}^{e^{j\omega t}}$$
(A-8)
$$M + \frac{M}{d}$$

Figura A.6 – Sistema mecânico massa-mola equivalente.

A solução da equação (A-8) é composta por duas partes: uma referente à solução particular l_p e outra referente à solução complementar l_c . A solução l_p é dada por:

$$l_{p}=l_{0}e^{j\omega t}$$
 (A-9)

onde l_0 é a solução de l_p quando *t=0*.

Substituindo a equação (A-9) em (A-8) tem-se a solução:

$$l_0 = \frac{\frac{Q}{m}E_0}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega(d/m)}$$
(A-10)

O modelo macroscópico, em regime permanente, do vetor polarização \vec{P} descrito na equação (A-3) pode ser escrita como [33]:

$$\vec{P} = \frac{N_e \frac{Q^2}{m} E_0^{j\omega t}}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega (d/m)}$$
(A-11)

Dividindo ambos os lados da equação (A-11) por $E_0^{j\omega t}$ e substituindo na equação A.5 tem-se:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon_0 \frac{N_e \frac{Q^2}{m}}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega \left(\frac{d}{m}\right)} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$
(A-12)

Da equação (A-12) resulta a parte real e imaginária da permissividade complexa, que são escritas, respectivamente, como:

$$\varepsilon_{r}^{'} = 1 + \frac{N_{e} \frac{Q^{2}}{\varepsilon_{0} m} (\omega_{0}^{2} - \omega^{2})}{(\omega_{0}^{2} - \omega^{2})^{2} + j\omega (d/m)^{2}}$$

$$\varepsilon_{r}^{''} = N_{e} \frac{Q^{2}}{\varepsilon_{0} m} \left[\frac{\omega (d/m)}{(\omega_{0}^{2} - \omega^{2})^{2} + \omega (d/m)^{2}} \right]$$
(A-13)
(A-14)

Por todo o exposto e, principalmente, pelas equações (A-13) e (A-14) percebese que desconsiderar a variação de ambos, permissividade elétrica do solo (ϵ') e condutividade elétrica ($\sigma_0 + \epsilon''$) com a frequência, é inadequada para a correta avaliação do comportamento transitório de aterramentos elétricos frente a fenômenos impulsivos.

ANEXO B – GRÁFICOS DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE ELETRODOS HORIZONTAIS

B.1 – Gráficos de impedância harmônica



Figura B.1 – Impedância harmônica para eletrodo de 10 m imerso em solo de 500 Ω.m



Figura B.2 – Impedância harmônica para eletrodo de 10 m imerso em solo de 1.000 Ω.m



Figura B.3 – Impedância harmônica para eletrodo de 10 m imerso em solo de 2.400 Ω.m



Figura B.4 – Impedância harmônica para eletrodo de 10 m imerso em solo de 5.000 Ω .m



Figura B.5 – Impedância harmônica para eletrodo de 10 m imerso em solo de 10.000 Ω .m



Figura B.6 – Impedância harmônica para eletrodo de 30 m imerso em solo de 500 Ω.m



Figura B.7 – Impedância harmônica para eletrodo de 30 m imerso em solo de 1.000 Ω .m



Figura B.8 – Impedância harmônica para eletrodo de 30 m imerso em solo de 2.400 Ω.m



Figura B.9- Impedância harmônica para eletrodo de 30 m imerso em solo de 5.000 Ω.m



Figura B.10 – Impedância harmônica para eletrodo de 30 m imerso em solo de 10.000 Ω.m



Figura B.11 – Impedância harmônica para eletrodo de 50 m imerso em solo de 500 Ω .m



Figura B.12 – Impedância harmônica para eletrodo de 50 m imerso em solo de 1.000 Ω.m



Figura B.13 – Impedância harmônica para eletrodo de 50 m imerso em solo de 2.400 Ω .m



Figura B.14 – Impedância harmônica para eletrodo de 50 m imerso em solo de 5.000 Ω.m



Figura B.15 – Impedância harmônica para eletrodo de 50 m imerso em solo de 10.000 Ω.m



Figura B.16 – Impedância harmônica para eletrodo de 70 m imerso em solo de 500 Ω.m



Figura B.17 – Impedância harmônica para eletrodo de 70 m imerso em solo de 1.000 Ω.m



Figura B.18 – Impedância harmônica para eletrodo de 70 m imerso em solo de 2.400 Ω .m



Figura B.19 – Impedância harmônica para eletrodo de 70 m imerso em solo de 5.000 Ω .m



Figura B.20 – Impedância harmônica para eletrodo de 70 m imerso em solo de 10.000 Ω.m



Figura B.21 – Impedância harmônica para eletrodo de 90 m imerso em solo de 500 Ω.m



Figura B.22 – Impedância harmônica para eletrodo de 90 m imerso em solo de 1.000 Ω.m



Figura B.23 – Impedância harmônica para eletrodo de 90 m imerso em solo de 2.400 Ω.m



Figura B.24 – Impedância harmônica para eletrodo de 90 m imerso em solo de 5.000 Ω .m



Figura B.25 – Impedância harmônica para eletrodo de 90 m imerso em solo de 10.000 Ω .m

B.2 – Gráficos de Sobretensões no ponto de injeção



B.2.1 – Onda de corrente dupla exponencial 1,2/50 µs

Figura B.26 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com ρ_0 500 Ω .m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m,(d) 70 m, (e) 90 m



Figura B.27 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 1.000 Ω .m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m



Figura B.28 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 2.400 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m



Figura B.29 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 5.000 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m



(e)

Figura B.30 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 10.000 Ω .m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m

B.2.2 - Onda de corrente dupla exponencial 10/350 µs



Figura B.31 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 500 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m



Figura B.32 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 1.000 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m



Figura B.33 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 2.400 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m



Figura B.34 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 5.000 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m



Figura B.35 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 10.000 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m





Figura B.36 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 500 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m



Figura B.37 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 1.000 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m


Figura B.38 – Sobretensão no ponto de injeção para eletrodo imerso em solo com resistividade em baixa frequência 2.400 Ω.m e comprimento (a) 10 m, (b) 30 m, (c) 50 m, (d) 70 m e (e) 90 m

B.3 – Gráficos de Impedância Impulsiva

B.3.1 - Onda de corrente dupla exponencial 1,2/50



Figura B.39 – Impedância Impulsiva em função do comprimento do eletrodo considerando os parâmetros do solo (a) independentes da frequência, e dependentes da frequência segundo (b) Scott, (c) Longmire, (d) Visacro e (e) Portela

B.3.2 - Onda de corrente dupla exponencial 10/350



Figura B.40 – Impedância Impulsiva em função do comprimento do eletrodo considerando os parâmetros do solo (a) independentes da frequência, e dependentes da frequência segundo (b) Scott, (c) Longmire, (d) Visacro e (e) Portela



B.3.3 Onda de corrente Função de Heidler com tempo de frente 1 µs

Figura B.41 – Impedância Impulsiva em função do comprimento do eletrodo considerando os parâmetros do solo (a) independentes da frequência, e dependentes da frequência segundo (b) Scott, (c) Longmire, (d) Visacro e (e) Portela

B.4 – Gráficos de coeficiente impulsivo



B.4.1 - Onda de corrente dupla exponencial 1,2/50

(e)

Figura B.42 – Coeficiente Impulsivo em função do comprimento do eletrodo considerando a resistividade do solo em baixa frequência (a) 500 Ω .m (b) 1.000 Ω .m, (c) 2.400 Ω .m, (d) 5.000 Ω .m e (e) 10.000 Ω .m

B.4.2 - Onda de corrente dupla exponencial 10/350



Figura B.43 – Coeficiente Impulsivo em função do comprimento do eletrodo considerando a resistividade do solo em baixa frequência (a) 500 Ω .m (b) 1.000 Ω .m, (c) 2.400 Ω .m, (d) 5.000 Ω .m e (e) 10.000 Ω .m



B.4.3 – Onda de corrente Função de Heidler com tempo de frente 1 µs

Figura B.44 – Coeficiente Impulsivo em função do comprimento do eletrodo considerando a resistividade do solo em baixa frequência (a) 500 Ω .m (b) 1.000 Ω .m, (c) 2.400 Ω .m, (d) 5.000 Ω .m e (e) 10.000 Ω .m