

CARLOS ANTONIO FRANÇA SARTORI

**ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM
ESTRUTURAS ATINGIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia de Eletricidade.

São Paulo
1999

CARLOS ANTONIO FRANÇA SARTORI

**ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM
ESTRUTURAS ATINGIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

24 085

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia de Eletricidade.

São Paulo
1999



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

**TERMO DE JULGAMENTO
DE
DEFESA DE TESE DE DOUTORAMENTO**

Aos 08 dias do mês de abril de 1999, às 09:30 horas, no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Senhores Professores Doutores José Roberto Cardoso, Orientador do candidato, Jorge Mieczlaw Janiszewski, Newton Geraldo Bretas, Alexandre Piantini e José Osvaldo Saldanha Paulino iniciou-se a Defesa de Tese de Doutorado do Senhor **CARLOS ANTONIO FRANÇA SARTORI**.

Título da Tese: "ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM ESTRUTURAS ATINGIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS".

Concluída a arguição, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora considerado o candidato:

Prof. Dr. José Roberto Cardoso.....	(Aprovado))
Prof. Dr. Jorge Mieczlaw Janiszewski.....	(Aprovado))
Prof. Dr. Newton Geraldo Bretas	(Aprovado))
Prof. Dr. Alexandre Piantini	(Aprovado))
Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino.....	(Aprovado))

Para constar, é lavrado o presente termo, que vai assinado pela Comissão Julgadora e pela Secretária da Seção de Pós-Graduação.

São Paulo, 08 de abril de 1999.

A Comissão Julgadora:

Secretária: Elisabete Ap^o F.S. Ramos *Elisabete Ramos*

Obs: Resolução 4476, de 17-9-1997 Altera dispositivos do Regimento Geral da USP Art.109 - Imediatamente após o encerramento da arguição da dissertação ou da tese cada examinador expressará seu julgamento em sessão secreta, considerando o candidato **aprovado** ou **reprovado**.

Homologado pela C.P.G. em reunião realizada a 10/05/1999.

PEA

CARLOS ANTONIO FRANÇA SARTORI
Engenheiro Eletricista, EPUSP, 1983
Mestre em Engenharia de Eletricidade, EPUSP, 1994

**ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM
ESTRUTURAS ATINGIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia de Eletricidade.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência
Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Orientador:
Prof. Dr. José Roberto Cardoso

São Paulo
1999

001
11.03.1999

11.03.1999

DEDALUS - Acervo - EPEL



31500009422

Sartori, Carlos Antonio França

Aspectos de compatibilidade eletromagnética em estruturas atingidas por descargas atmosféricas. São Paulo, 1999.

161p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Energia e Automação Elétricas.

1. Compatibilidade eletromagnética 2. Análise de ambientes eletromagnéticos 3. Descargas atmosféricas 4. Método numérico - Aplicações I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Energia e Automação Elétricas II. t

**Aos meus pais, Carlos e Therezinha e
à minha esposa Ana e filhos, Vitor e Felipe.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Roberto Cardoso, pelas diretrizes e constante incentivo;

Ao Prof. Dr. Antonio Orlandi, pelo incentivo e colaboração;

Aos Profs. Drs. Aderbal A. Penteado Jr., Eduardo César Senger e Paulo Álvaro Maya, pelo interesse e incentivo;

Ao colega Prof. Dr. Silvio I. Nabeta, pelo companheirismo e incentivo;

Aos colegas André Tosin, Cleomir B. Longo, Tércio Alberto de Oliveira, Waldomiro Rios de Mello, Nei G. Brazão e Adolfo de Aguiar Braid, pelo apoio e incentivo;

Aos colegas do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado: LMAG-PEA-USP, pelo apoio e incentivo;

Ao Centro das Ciências Exatas e Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, pelo apoio e colaboração;

À Cnen-CTMSP, pelo apoio e colaboração;

À minha esposa e filhos, pelo estímulo e compreensão, e

A todos, que direta ou indiretamente, colaboraram durante o desenvolvimento deste trabalho.

ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM ESTRUTURAS ATINGIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Tese (doutorado), EPU/SP, São Paulo 1999

Sartori, Carlos Antonio França

ERRATA

Página:	Onde se lê:	Leia-se:
13, último parágrafo	Atualmente, observam-se diversos trabalhos publicados na literatura, ressaltando-se a utilização de expressões analíticas ...	Atualmente, observam-se diversos trabalhos publicados na literatura, ressaltando-se a utilização de expressões analíticas ...
40	$R_{gr} = R_g \approx \left(1, \frac{\rho}{\epsilon} - 0,263\right) \rho^{0,6918} \left(\frac{l}{L_0}\right)^{0,1082}$, para $l \geq l_{cm}$ (4.24)	$R_{gr} = R_g \approx \left(1, \frac{\rho}{\epsilon} - 11, \frac{\rho}{\epsilon}\right)^{0,1082} \rho^{0,6918} \left(\frac{l}{L_0}\right)^{0,1082}$, para $l \geq l_{cm}$ (4.24)
45, primeiro parágrafo	Assumindo-se, portanto, $r = r_{ef}$ em (4.25) e (4.26) determina-se o novo valor da resistência "R _{ge} " e o valor da indutância "L _{ge} " ...	Assumindo-se, portanto, $r = r_{ef}$ em (4.26) e (4.30) determina-se o novo valor da resistência "R _{ge} " e o valor da capacitância "C _{ge} " ...
53	$h_e = \sqrt{\rho / 2\pi f \mu}$ (Relacionada à eq. (4.40))	$h_e = \sqrt{\rho / 2\pi f \mu}$
55, primeiro parágrafo	Destaca-se, porém, que os resultados apresentados em [46] mostram que para frequências até 1MHz, frequência usualmente considerada como típica para as descargas atmosféricas ...	Destaca-se, porém, que os resultados apresentados em [46] mostram que para frequências até 1MHz, frequência usualmente considerada como "típica" para as descargas atmosféricas ...
57, Fig. 4.7.1.1	"μ _z "	"μ _y "
86	Nota-se que na Fig. 4.7.3.3 o degraú de corrente é representado pela soma de duas funções, uma positiva e uma negativa, deslocada ...	Nota-se que na Fig. 4.7.3.3 o degraú de corrente é representado pela soma de duas funções, uma positiva e uma negativa, deslocada ...
87	$i_e = \sum_m \sum_n \sum_p \left(\frac{\bar{B} \times \Delta S \bar{n} - k_1 \bar{B} \times \Delta S \bar{n}}{2r} \right)$	$i_e = \sum_m \sum_n \sum_p \left(\frac{k_1 \bar{B} \times \Delta S \bar{n} - k_1 \bar{B} \times \Delta S \bar{n}}{2r} \right)$ (4.121)
90, primeiro parágrafo	Assim, mantendo-se o intervalo de tempo Δt=τ, a amostragem inicial dos valores intermediários ...	Assim, mantendo-se o intervalo de tempo Δt=τ, a amostragem inicial dos valores intermediários ...
114, primeiro parágrafo	As Fig. 5.4.1.3, Fig. 5.4.1.4, e Fig. 5.4.1.4 apresentam ...	As Fig. 5.4.1.3, Fig. 5.4.1.4, e Fig. 5.4.1.5 apresentam ...

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO LITERÁRIA	5
3 METODOLOGIA	15
3.1 Introdução	15
3.2 Considerações Atuais	17
4 MODELAGEM E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	19
4.1 Introdução	19
4.2 Considerações gerais sobre os S.P.C.D.A	20
4.3 Modelo das descargas atmosféricas	23
4.4 Resposta da célula elementar aos impulsos	25
4.4.1 Resposta da célula elementar aos impulsos de tensão	26
4.4.2 Resposta de uma célula quando excitada externamente	29
4.4.3 Resposta dos nós vinculados ao sistema de aterramento	30
4.4.4 Determinação das correntes nas células	33
4.5 Modelagem do sistema de aterramento	35
4.5.1 Modelagem derivada de Korsuncev	35
4.5.2 Consideração da malha de piso no modelo proposto	40

4.5.3 Considerações gerais sobre a resposta das células vinculadas ao sistema de aterramento	45
4.6 Modelagem dos condutores da estrutura	47
4.6.1 Modelagem dos condutores horizontais	48
4.6.2 Modelagem dos condutores verticais	51
4.6.3 Comentários gerais sobre a modelagem dos condutores	54
4.7 Avaliação dos campos magnético e elétrico	56
4.7.1 Avaliação do campo magnético	56
4.7.1.1 Campo magnético de um dipolo elementar de corrente	56
4.7.1.2 Campo magnético de uma função degrau de corrente	58
4.7.1.3 Campo magnético resultante das correntes que se deslocam no eixo y da célula tridimensional proposta	63
4.7.1.4 Campo magnético resultante das correntes que se deslocam no eixo z da célula tridimensional proposta	69
4.7.1.5 Campo magnético resultante das correntes que se deslocam no eixo x da célula tridimensional proposta	74
4.7.1.6 Considerações gerais sobre as expressões de cálculo do campo magnético	79
4.7.2 Avaliação do campo elétrico	80
4.7.3 Intervalos de validação das expressões de campo	84
4.7.4 Avaliação das tensões induzidas	87

4.7.5	Algumas considerações sobre os aspectos relacionados à precisão e estabilidade do método de cálculo proposto	88
4.7.5.1	Considerações sobre a precisão do método	88
4.7.5.2	Considerações sobre a estabilidade do método	90
4.7.5.3	Aspectos comparativos relacionados com as condições de estabilidade do método "FDTD"	91
5	RESULTADOS	92
5.1	Caso geral	92
5.1.1	Critérios gerais	93
5.1.2	Perfis do campo magnético	94
5.1.3	Tensões induzidas no "loop"	97
5.1.4	Distribuição de Corrente	98
5.1.5	Comparações com outros métodos	99
5.1.6	Avaliação da influência da configuração da estrutura	101
5.2	Influência da variação da impedância característica na determinação do ambiente eletromagnético	103
5.2.1	Campo magnético	104
5.2.2	Tensões Induzidas	108
5.3	Influência da forma de onda da descarga atmosférica no ambiente eletromagnético	110
5.4	Influência do sistema de aterramento na determinação do ambiente eletromagnético	112

5.4.1	Influência da resistência de aterramento e da resistividade do solo de um sistema de aterramento pré-definido	112
5.4.2	Efeito da Ionização do Solo	115
5.5	Avaliação da influência da configuração da estrutura considerando-se as premissas atuais	118
5.6	Coordenação de campo magnético	119
5.6.1	Estrutura e região avaliada	120
5.6.2	Critérios Gerais	121
5.6.3	Perfis do campo magnético	123
5.7	Aplicações relacionadas à avaliação do campo elétrico	124
5.7.1	Caso-teste	125
5.7.1.1	Descrição da aplicação - Critérios gerais	125
5.7.1.2	Perfis do campo elétrico	126
5.7.2	Caso geral	127
5.7.2.1	Perfis do campo elétrico: Influência da forma de onda	128
5.7.2.2	Perfis do campo elétrico: Influência dos parâmetros relacionados às variações no espaço " δl " e no tempo " δt "	130
6	DISCUSSÃO	134
6.1	Análise dos resultados	134
6.2	Aplicabilidade do método, principais contribuições e restrições	149
6.3	Sugestões para trabalhos futuros	152

7 CONCLUSÃO	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de cálculo da distribuição de correntes e dos campos eletromagnéticos e tensões induzidas associadas em estruturas atingidas diretamente por descargas atmosféricas que, agregada à filosofia geral de compatibilidade eletromagnética (CEM), constitua uma abordagem inovadora e abrangente quando comparada às recomendações de proteção contra descargas atmosféricas atuais.

Propõe-se, portanto, desenvolver uma metodologia que:

- Constitua uma ferramenta de auxílio nas tomadas de decisões, aplicável desde a etapa de definição da arquitetura da estrutura e do layout dos equipamentos até a definição final da configuração do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (S.P.C.D.A);
- Possibilite a implementação de uma filosofia de proteção dos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos contra descargas atmosféricas na qual se integre as recomendações tradicionais às necessidades atuais relacionadas à área de compatibilidade eletromagnética;
- Seja abrangente e com grau de precisão satisfatório, quando comparadas com as recomendações atuais, com possibilidade de exploração dos valores das grandezas elétricas envolvidas no domínio do espaço e do tempo, e
- Apresente simplicidade na implementação em computadores pessoais.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to present a suitable method for calculating the current distribution, the electric and magnetic field, and the induced voltage on electric circuits regarding a structure directly struck by lightning. Moreover, when the method is used together with the electromagnetic compatibility (EMC) requirements, it can provide the designer with a new and helpful methodology meeting the recent aspects or the state of the art on lightning protection systems (L.P.S).

Thus, a methodology is proposed, which provides the L.P.S. design team with:

- The availability to take technical decisions in all steps of the project, from the definition of the architecture of the structure to the definition of the best layout of L.P.S.;
- Recommendations to achieve the EMC of the electric and electronic system, in addition to the traditional ones;
- Reliable numerical results concerning simulations in the space and time-domain, and
- Simple implementation in personal computers.

1. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são reconhecidamente uma das maiores causas de danos e interrupções nos sistemas elétricos e eletrônicos mundiais [1-3].

Apesar do crescente desenvolvimento de novas técnicas de proteção contra descargas atmosféricas, tais como as recomendações de projeto de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (S.P.C.D.A) atuais e as novas tecnologias de dispositivos de proteção, os problemas decorrentes deste fenômeno têm assumido proporções bastante elevadas [1]. Como exemplo, pode-se mencionar os prejuízos causados aos diversos setores da nossa sociedade devido às interrupções dos sistemas de distribuição de energia elétrica, dos sistemas de comunicação de dados e telecomunicações.

A explicação destes fatos relaciona-se principalmente à utilização em larga escala de equipamentos de elevada susceptibilidade, nos quais a ação direta dos campos eletromagnéticos, as interferências eletromagnéticas resultantes do acoplamento destes campos com os meios condutores e as sobretensões resultantes de descargas atmosféricas diretas nos condutores podem provocar desde operações indevidas até a destruição dos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos.

Durante esta década, devido à sensível preocupação da sociedade com

relação aos fatos anteriormente mencionados e, conseqüentemente, da necessidade de se elaborar metodologias e recomendações técnicas com o objetivo de se avaliar e minimizar os problemas decorrentes das descargas atmosféricas, resultaram uma série de publicações nacionais e internacionais [4-10]. Estas publicações, nas quais se destacam as normas internacionais da IEC [4-9], abrangem basicamente os seguintes aspectos:

- Critérios e princípios gerais de proteção externa e interna das estruturas;
- Critérios e princípios gerais de compatibilidade eletromagnética relacionados às sobretensões de origem atmosférica na forma de interferências conduzidas;
- Critérios e princípios gerais de compatibilidade eletromagnética considerando-se os efeitos diretos dos campos eletromagnéticos pulsantes de origem atmosférica (LEMP), e
- Recentemente, o conceito de proteção com base na divisão por zonas, de acordo com o grau de severidade do ambiente eletromagnético.

Embora as recomendações existentes tenham evoluído a ponto de serem consideradas não só as descargas diretas e as proteções externas das estruturas, mas também os efeitos de descargas indiretas, além do efeito do campo magnético sobre os equipamentos elétricos e eletrônicos, deve-se ressaltar que os critérios e alguns dos valores recomendados por estas publicações não representam consenso entre os especialistas mundiais.

Além disto, as metodologias atuais de avaliação dos valores de campos eletromagnéticos, dos valores das correntes e das sobretensões são aplicáveis a configurações particulares, utilizando-se critérios e valores específicos, restringindo-se, desta forma, as avaliações destas grandezas tanto no domínio do tempo quanto no domínio do espaço.

Outro aspecto a se ressaltar é que a filosofia atual de proteção contra descargas atmosféricas ainda não é suficientemente abrangente de maneira a integrar totalmente os requisitos tradicionais de proteção aos aspectos de compatibilidade eletromagnética (CEM).

Deve-se observar que a aplicação separada das recomendações internacionais não garante a proteção mais econômica e tecnicamente eficaz dos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos contra os efeitos decorrentes das descargas atmosféricas [11,12].

Menciona-se, portanto, a importância da implementação de uma filosofia de proteção que integre as recomendações tradicionais de proteção contra descargas atmosféricas às necessidades atuais dos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos relacionadas à área de compatibilidade eletromagnética.

Os principais tópicos relacionados ao desenvolvimento deste trabalho têm como origem a nossa dissertação de mestrado e alguns trabalhos publicados em seminários nacionais e internacionais em que, alertados pela comunidade científica, principalmente no que se refere aos aspectos

inovadores resultantes das suas aplicações, fomos motivados à aprimorá-los e desenvolvê-los de forma que possam satisfazer as necessidades anteriormente descritas [13-17].

Atualmente podem-se observar na literatura existente diversos trabalhos que dizem respeito a este tema cujo enfoque principal é dado aos métodos de avaliação das grandezas elétricas resultantes de descargas atmosféricas [18-31].

Destacam-se os trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores das Universidades de Roma e L'Aquila, que serão utilizados na validação de alguns dos valores calculados pela metodologia proposta [25-27].

Ressalta-se, porém, que muito embora reconheçamos os trabalhos das entidades normativas e das instituições de pesquisa referentes à definição de metodologias que integrem os requisitos convencionais de proteção contra descargas atmosféricas às necessidades da área de compatibilidade eletromagnética, considera-se que a quantidade de trabalhos publicados que ressalte esta filosofia geral de proteção ainda é pequena. As referências [11,12] são exemplos de trabalho com estas características.

2. REVISÃO LITERÁRIA

Neste capítulo serão destacados alguns dos principais trabalhos referentes a este tema, iniciando-se com os aspectos relativos às normas internacionais.

As recomendações atuais relacionadas à proteção contra descargas atmosféricas, embora tenham suas origens no final da década passada, datam de meados desta. As normas internacionais propostas pela International Electrotechnical Commission (IEC) são consideradas atualmente as mais abrangentes, abordando tanto os aspectos relativos às recomendações gerais dos S.P.C.D.A. quanto os aspectos da área de compatibilidade eletromagnética [4-9].

A norma IEC 1024 [4-5], base da norma brasileira NBR-5419 [10], apresenta os critérios e princípios gerais necessários à proteção externa e interna das estruturas.

As recomendações referentes à proteção externa abrangem a interceptação das descargas atmosféricas pelos captores, a condução das correntes do raio pelos condutores de descida e sua dispersão no sistema de aterramento.

Na proteção interna das estruturas são consideradas a “equipotencialização” das estruturas e dutos metálicos, inclusive as

instalações elétricas e de comunicações, e o controle das distâncias de isolamento com o objetivo de se evitar faiscamentos entre o S.P.C.D.A. e as partes metálicas. Destaca-se a apresentação de uma metodologia simplificada de avaliação da distribuição das correntes e de tensões induzidas em algumas configurações, decorrentes de descargas atmosféricas diretas.

Não são consideradas nesta norma as estruturas em que a ocorrência de descargas atmosféricas possam acarretar perdas de serviço considerados essenciais, explosões ou fogo com riscos à população e ao meio ambiente, além das estruturas elevadas.

Como exemplo de estruturas classificadas como especiais estão os centros de telecomunicações, as plantas de geração de energia elétrica, as plantas nucleares e as plantas químicas com áreas classificadas.

A proteção de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos são abordados separadamente pelas normas dadas pelas referências [6-9], as quais consideram os aspectos de imunidade associados à área de compatibilidade eletromagnética.

Na norma IEC 1000-4-5 [6] são apresentados os critérios, os princípios gerais e os níveis de imunidade para se obter a compatibilidade eletromagnética dos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos quando sujeitos às interferências conduzidas, abrangendo as sobretensões resultantes do chaveamento de dispositivos elétricos da rede de distribuição e das descargas atmosféricas que penetrem nas estruturas.

No caso das descargas atmosféricas, consideram-se:

- As descargas diretas nos circuitos elétricos externos;
- As descargas no solo, distantes ou próximas às estruturas, e
- As descargas entre nuvens ou internas às nuvens.

Desta forma, as sobretensões nos condutores internos descritas em [6], quando relacionadas às descargas atmosféricas, resultam das quedas de tensões nas impedâncias dos circuitos elétricos e no sistema de aterramento, ou do acoplamento dos campos eletromagnéticos com os condutores.

A consideração das descargas próximas e indiretas deve ser destacada, já que a não inclusão destes aspectos mereceu críticas dos especialistas no passado [12].

Observa-se, no entanto, que mesmo nas revisões mais recentes desta norma não são mencionadas, explicitamente, as sobretensões resultantes de descargas diretas na estrutura.

As recomendações das normas IEC 1000-4-9 [7] e IEC 1312-1 [8] merecem especial destaque, já que vão ao encontro das necessidades atuais de proteção dos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos.

A busca de uma maior eficiência na proteção destes equipamentos e sistemas, destacando-se a necessidade de uma abordagem geral e integrada aos requisitos de compatibilidade eletromagnética, pode ser observada na literatura, de uma maneira mais intensa, a partir do início desta década [11-12].

Nestes trabalhos, destacam-se os comentários relativos à necessidade de se apresentar um conceito de proteção em que se considerasse os graus de imunidade dos equipamentos, além do ambiente eletromagnético resultante de descargas diretas e indiretas.

O conceito de proteção proposto por HASSE e WIENSINGER [12], denominado "Lightning Protection Zoning - LPZ", representa em linhas gerais as recomendações propostas e em fase de implementação nas normas atuais, IEC 1000-4-9 e IEC 1312-1.

Ressalta-se a influência dos trabalhos produzidos na década passada e início desta, relativos à abordagem de eventuais problemas resultantes de pulsos eletromagnéticos nucleares "NEMP" e, principalmente, a semelhança com o conceito de proteção denominada Proteção Topológica, apresentado por TESCHE [49] e, posteriormente, por VANCE e colaboradores [50], com o conceito de LPZ. Observa-se que na Proteção Topológica o ambiente eletromagnético considerado é bastante abrangente, envolvendo outros fenômenos além dos relacionados aos LEMP e NEMP.

A norma IEC 1000-4-9 estabelece os requisitos de CEM para os equipamentos elétricos e eletrônicos sujeitos a campos magnéticos pulsantes oriundos de descargas atmosféricas diretas em estruturas e de chaveamentos ou faltas em linhas de distribuição de baixa, média e alta tensão.

Em termos de aplicação direta das recomendações da IEC 1000-4-9 destaca-se a utilização dos níveis de imunidade recomendados na definição de

leiautes e de roteamentos de condutores [15-16].

No 1995 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMC, em Atlanta, apresentamos um estudo em que associam-se os valores do campo magnético, resultante de descargas diretas em diversos pontos de uma estrutura metálica, aos níveis de imunidade dos equipamentos elétricos e eletrônicos com o objetivo de definir o leiaute de uma sala de controle [15].

Observa-se que, embora esta norma não tenha sido referenciada diretamente em [15], os valores dos níveis de imunidade adotados praticamente coincidiram com os atualmente recomendados, indo ao encontro das recomendações técnicas daquela época.

A norma IEC 1312-1 apresenta as recomendações mais atuais em termos de proteção dos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos contra descargas atmosféricas, tendo por objetivo complementar as deficiências das normas anteriores e constituir a base principal na definição destes sistemas de proteção.

Dá-se ênfase às aplicações relacionadas à proteção de equipamentos e sistemas de comunicação, aquisição e processamento de dados, tendo como fonte principal de interferência os efeitos resultantes dos LEMP.

Conforme descrito anteriormente, a filosofia de proteção (LPZ) utilizada baseia-se no conceito de divisão da estrutura a ser protegida em diversas zonas, de acordo com o grau de severidade do ambiente eletromagnético.

Um aspecto importante considerado na IEC 1312-1 é a proposição da aplicação da coordenação de isolamento com base nas sobretensões, nas correntes e nos campos magnéticos das diversas zonas. Observa-se que a aplicação deste conceito está intimamente relacionada à utilização de dispositivos protetores contra surtos (SPD) [8-9,12].

A referência [9], recentemente enviada aos membros da IEC para comentários, apresenta os parâmetros e critérios gerais para se estabelecer a coordenação de isolamento e a especificação mais adequada dos SPD a serem utilizados nas transições das diversas zonas.

Com relação aos trabalhos nos quais são evidenciadas as metodologias de cálculo das grandezas associadas às descargas atmosféricas, vários foram desenvolvidos, principalmente na Itália e Polônia, ressaltando-se o período compreendido entre o final da década passada e meados desta década [18-31].

Na Itália destacam-se os trabalhos desenvolvidos por GERI, VECA e seus colaboradores [18-20] e por CRISTINA e ORLANDI [21-27], e na Polônia os desenvolvidos por SOWA [28-31].

Considera-se a referência [20] o principal trabalho divulgado por GERI.

Neste trabalho apresentam-se diversas simulações nas quais o comportamento eletromagnético ao longo do tempo dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas é avaliado.

De uma maneira geral, o procedimento de cálculo apresentado por GERI tem como base a representação dos parâmetros elétricos através do

método proposto por DOMMEL e o método das diferenças finitas [51].

Os parâmetros elétricos são calculados através da formulação tradicional apresentada na literatura considerando-se, no entanto, o efeito da ionização ao redor dos condutores. A descarga atmosférica é representada através de uma fonte de corrente, matematicamente representada por uma função exponencial dupla.

Desta forma, a solução do circuito resultante das associações dos diversos quadripolos tipo π permite determinar a distribuição das correntes e, posteriormente, utilizando-se do conceito do potencial vetor a determinação do campo magnético em função do ponto e do tempo. As tensões induzidas são calculadas aplicando-se a Lei de Faraday.

Os trabalhos desenvolvidos por CRISTINA e ORLANDI [21-25] apresentam aspectos investigativos bastante amplos, tanto no que se refere aos métodos de cálculo como na verificação das influências dos parâmetros e fenômenos elétricos. Em diversos trabalhos observa-se, por exemplo, a consideração do canal do raio, do acoplamento entre os condutores, da não linearidade do sistema de aterramento, de estudos no domínio do tempo e da frequência, além da utilização de resultados experimentais.

Embora utilizem diversos métodos, como por exemplo o método dos momentos, evidenciam-se os trabalhos em que a abordagem de circuitos elétricos é utilizada [21,22,25].

Na referência [26], ORLANDI e seus colaboradores apresentam as

expressões relacionadas às funções de distribuição das correntes, uma metodologia desenvolvida a partir da aplicação sistemática da modelagem dos circuitos elétricos, numericamente resolvidos através da análise nodal. A aplicação destas funções permite uma avaliação rápida da distribuição das correntes no S.P.C.D.A. a partir das suas características geométricas, basicamente do número de descidas e das distâncias entre descidas e entre os anéis de equalização horizontais.

Em [27] é apresentada uma metodologia de avaliação dos níveis máximos e da atenuação das tensões induzidas em condutores internos aos S.P.C.D.A. como uma extensão do conceito das funções de distribuição das correntes. As expressões relacionadas às tensões induzidas são obtidas com base nas indutâncias mútuas e nas derivadas das correntes. Apresenta-se, também, um estudo comparativo, validando-se o método proposto a partir de resultados obtidos, aplicando-se a metodologia completa de circuitos elétricos apresentada em [25].

Na Polônia, SOWA [28-31], utilizando-se da transformada de Laplace na solução de circuitos compostos por indutâncias próprias e mútuas, determina a distribuição das correntes, c , a partir do potencial vetor, determina o campo magnético.

Na referência [17], motivados por uma proposta de ORLANDI, apresentamos um estudo, no domínio do tempo, ressaltando a influência do fenômeno da propagação das correntes em estruturas elevadas nos perfis dos

campos magnéticos e nos valores das tensões induzidas em condutores internos (“loops”). Os resultados, relacionados a algumas configurações particulares dos condutores, são validados com base nas metodologias propostas por CRISTINA e ORLANDI [25-27].

Com relação aos métodos de avaliação dos campos eletromagnéticos associados às correntes transitórias, RUBINSTEIN e UMAN apresentam na referência [52] uma descrição das técnicas do monopolo e do dipolo.

Observa-se que, já em 1975, UMAN e seus colaboradores [53] comentavam a dificuldade de se encontrar na literatura expressões aplicáveis aos problemas de antenas, com desenvolvimento no domínio do tempo.

Apresentaram, então, uma primeira abordagem de avaliação dos campos elétrico e magnético no domínio do tempo.

Em 1983, MASTER e UMAN [54] apresentaram, de uma forma mais abrangente, a técnica do dipolo associada ao cálculo dos campos eletromagnéticos devido às distribuições de correntes oriundas de descargas atmosféricas. Em 1991, em função de um erro observado por RUBINSTEIN, este trabalho é revisado e reapresentado [37].

Atualmente, observam-se diversos trabalhos publicados na literatura, ressaltando-se a utilização de expressões analíticas no domínio do tempo e suas aplicações à fenômenos transitórios [55-57]. Dentre estes trabalhos destaca-se o trabalho desenvolvido por SHI e seus colaboradores [57], que apresenta uma metodologia similar à apresentada em [13], porém,

inicialmente aplicável a trechos de linhas de transmissão horizontais.

Da mesma forma, são ressaltadas as vantagens de se obter através de expressões analíticas o valor do campo magnético em função do ponto e do tempo, restringindo-se a necessidade de se recorrer a processos numéricos auxiliares.

3. METODOLOGIA

3.1 Introdução

A metodologia proposta de avaliação das grandezas elétricas relacionadas às descargas atmosféricas diretas em estruturas tem como base a divisão das partes condutoras do S.P.C.D.A. em um número finito de células unitárias. Observa-se que nos casos de estruturas metálicas, as próprias vigas e colunas poderão ser consideradas como componentes naturais deste sistema.

A Fig. 3.1 apresenta as características gerais de uma célula tridimensional utilizada no desenvolvimento desta metodologia.

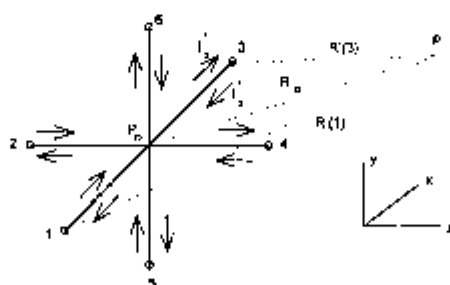


Fig. 3.1 Célula tridimensional proposta

A próxima etapa constitui-se na determinação das respostas das células aos impulsos das tensões e das correntes. Para este propósito, as teorias

tradicionais de linhas de transmissão e ondas viajantes são utilizadas [32-36].

A partir dos valores das correntes nos trechos de linhas de transmissão das células determina-se, com base na integração dos dipolos infinitesimais ao longo de cada segmento da célula e no método das imagens, o valor do campo magnético resultante de cada célula em um determinado ponto [37]. O campo magnético total em um determinado ponto do espaço poderá, desta forma, ser obtido por superposição, na medida que o fenômeno pode ser considerado, em cada instante, como linear.

Após determinar-se o campo magnético, e utilizando-se, parcialmente, o método das diferenças finitas no domínio do tempo, calcula-se o campo elétrico nos pontos de interesse [38-40].

As tensões induzidas associadas aos campos eletromagnéticos serão calculadas a partir da derivada do campo magnético nos pontos de interesse e posterior integração na superfície compreendida pelos condutores do circuito a ser considerado, utilizando-se do método das diferenças finitas.

Com relação à filosofia geral de proteção, o procedimento principal constitui-se em confrontar os valores das grandezas elétricas resultantes das descargas atmosféricas calculados com os valores referentes aos graus de imunidade ou níveis de susceptibilidade dos equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos recomendados pelas normas de CEM [6-8].

Neste ponto, destacam-se as aplicações relacionadas à definições de leiaute (“coordenação de campos eletromagnéticos”), coordenação de

isolamento devido a sobretensões e verificação da suportabilidade quanto a interferências eletromagnéticas conduzidas, além de auxiliar na definição dos dispositivos de proteção contra descargas atmosféricas.

3.2 Considerações Atuais

A metodologia de cálculo a ser contemplada por este trabalho conterá vários tópicos adicionais à metodologia apresentada na Dissertação de Mestrado [13].

No cálculo da distribuição das correntes no S.P.C.D.A. considerar-se-á uma análise mais aprofundada do cálculo das impedâncias características.

Embora no cálculo das impedâncias características horizontais dos trechos de linhas de transmissão utilize-se a formulação tradicionalmente apresentada na literatura [41-45], no cálculo das impedâncias verticais utilizar-se-á uma formulação recentemente proposta na representação de modelos de torres de transmissão [46].

Além disto, pretende-se considerar a variação das resistências de aterramento das descidas em função dos valores das correntes injetadas como parte integrante do cálculo das distribuições das correntes [47-48]. Na metodologia anterior, estes valores eram considerados fixos, não se considerando o efeito da ionização do solo.

Com relação ao cálculo do campo magnético, a metodologia proposta

anteriormente mostrou-se plenamente satisfatória quando aplicável em estruturas baixas, porém, durante o desenvolvimento de trabalhos recentes relacionados à estruturas elevadas, percebeu-se a necessidade de adequação dessa formulação [17].

O procedimento de cálculo do campo elétrico e das tensões induzidas em circuitos elétricos não foram contemplados anteriormente e serão implementados no decorrer deste trabalho. A formulação proposta para o cálculo do campo elétrico terá como base a aplicação parcial do método das diferenças finitas no domínio do tempo [38].

Outro aspecto a considerar neste trabalho refere-se à utilização dos resultados obtidos integrados às necessidades atuais de projeto, já que as aplicações propostas anteriormente restringiam-se às avaliações de ambientes eletromagnéticos.

Desta forma, enfatizar-se-ão as aplicações relacionadas à definição de leiautes de equipamentos, além da avaliação das tensões induzidas em circuitos de baixa tensão, tópicos considerados importantes para se atingir a compatibilidade eletromagnética de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos.

Devido à importância do campo magnético associado ao fenômeno considerado serão realçadas as aplicações associadas a esta grandeza elétrica.

4. MODELAGEM E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

4.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar a formulação matemática e os modelos associados à metodologia proposta neste trabalho, tendo como ponto de partida o desenvolvimento descrito na nossa dissertação de mestrado [13].

Inicialmente, descrevem-se os modelos do S.P.C.D.A. e das descargas atmosféricas, seguidos da formulação correspondente à resposta de uma célula tridimensional aos impulsos de tensão e corrente.

A partir deste ponto considera-se o desenvolvimento da formulação matemática atual, na qual são abordados como tópicos principais a modelagem dos trechos de linhas de transmissão, destacando-se a relacionada aos trechos verticais, a modelagem do sistema de aterramento considerando-se o efeito da ionização do solo, o cálculo dos campos magnético e elétrico, e o cálculo das tensões induzidas.

No que se refere ao cálculo dos campos, ressalta-se que, de maneira distinta da proposta por UMAN e seus colaboradores [37,52-54], o desenvolvimento apresentado a seguir aplica-se a deslocamentos de dipolos de correntes em quaisquer trechos de linhas de transmissão situados ao longo dos eixos z , x ou y , além de, não necessariamente, considerar como

origem do sistema de coordenadas e como ponto inicial ou final do percurso do dipolo um ponto situado no nível do solo.

Esta abordagem matemática faz-se necessária já que as correntes resultantes das descargas atmosféricas percorrem trechos que não se restringem aos verticais, como nas aplicações descritas por esses autores.

Observa-se, também, que a implementação desta formulação atual diminui as restrições referentes ao estágio anterior deste método, destacando-se, entre os pontos principais, a adequação desta às aplicações relacionadas às avaliações de configurações de S.P.C.D.A. com diferentes níveis de complexidade de arranjo dos condutores, além das estruturas consideradas elevadas.

4.2 Considerações gerais sobre os S.P.C.D.A.

O S.P.C.D.A. de uma edificação pode ser constituído por condutores externos, formando um conjunto no qual fazem parte os captosres aéreos, a malha ou anel de equalização superior, os condutores de descida, os anéis de equalização intermediários e os terminais de aterramento.

As dimensões mínimas dos condutores, bem como as dimensões geométricas relacionadas à configuração das malhas superiores, dimensões médias entre descidas e entre anéis de equalização, e os critérios para definição da localização de hastes de captação e verificação das regiões protegidas são apresentadas nas normas internacionais e na norma nacional

correspondentes às referências [4,5] e [10], respectivamente.

Neste caso, a configuração do S.P.C.D.A. poderá ser obtida em função dos níveis de proteção, definidos pelo projetista de acordo com o tipo ou finalidade da edificação e conforme as orientações em anexo às normas referenciadas.

A tabela 4.2.1 reproduz, parcialmente, os critérios utilizados na definição da configuração do S.P.C.D.A. em função do nível de proteção, sendo o nível I aquele correspondente às edificações que envolvam os maiores riscos para os seres humanos e para suas instalações quando da ocorrência de descargas atmosféricas.

Tabela 4.2.1 Configuração do S.P.C.D.A. conforme os níveis de proteção

Níveis de Proteção	Raio da Esfera Rolante - R (m)	Módulo da Malha (m)	Distância Média - Descidas (m)
I	20	5 x 10	10
II	30	10 x 15	15
III	45	10 x 15	20
IV	60	15 x 20	25

Fonte: [10]

Obs: O raio da esfera rolante correspondente ao raio crítico definido pelo modelo eletrogeométrico.

A Fig. 4.2.1 mostra esquematicamente o tipo de S.P.C.D.A. mencionado anteriormente, na qual (1) representa a malha superior, (2) um

dos condutores de descida, (3) um dos terminais de aterramento, (4) o anel de equalização intermediário, e (5) uma das hastes de captação.

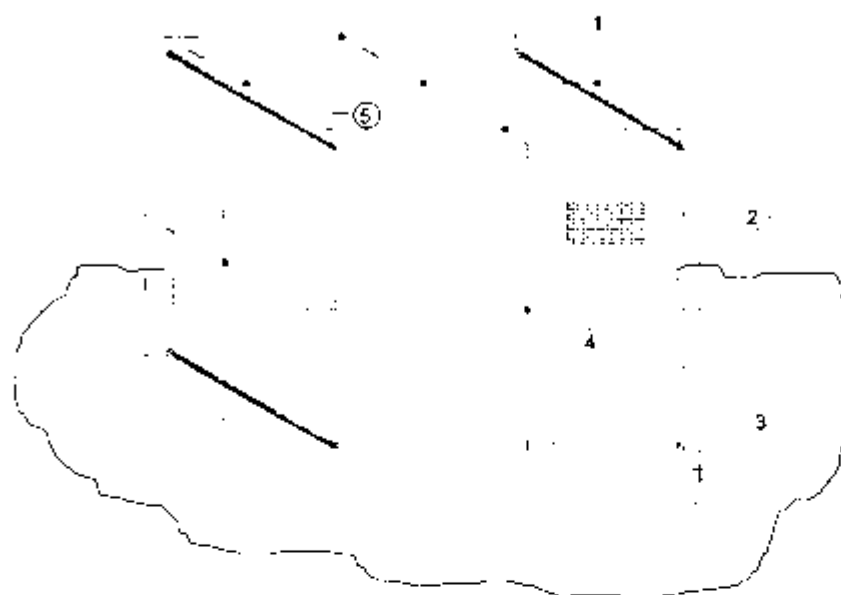


Fig. 4.2.1 Representação esquemática de um S.P.C.D.A.

Quando as dimensões das partes metálicas das edificações apresentam as dimensões mínimas recomendadas pelas normas, estas poderão ser utilizadas como componentes naturais do S.P.C.D.A. Como exemplo, pode-se mencionar as vigas e colunas metálicas, bem como, as armações de ferro das colunas, lajes, baldrame, sapatas etc.

Os modelos das descargas atmosféricas, do sistema de aterramento e dos condutores das estruturas utilizados na metodologia de cálculo proposta são apresentados nos itens a seguir.

4.3 Modelo das descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas serão representadas de uma maneira simplificada através de uma fonte de corrente ideal e unidirecional, cuja corrente no ponto de incidência será obtida, preferencialmente, através da função de distribuição espacial-temporal $i(\theta, t)$, correspondente ao valor da corrente na base do canal do raio, descrita por:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad (4.1)$$

na qual:

I_0 é amplitude da corrente na base do canal do raio;

τ_1 a constante de tempo frontal;

τ_2 a constante de tempo de decaimento;

η o fator de correção da amplitude da corrente, e

n expoente (2, ..., 10).

O fator de correção da amplitude da corrente é obtido através da seguinte expressão:

$$\eta = \exp\left[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_1/\tau_2)^{(1/n)}\right] \quad (4.1a)$$

A utilização desta função é bastante apropriada para o modelo proposto, permitindo que o ajuste da forma de onda seja facilmente obtido através dos valores dos parâmetros previamente definidos.

Outro aspecto importante a se ressaltar é que esta função corresponde a uma representação física mais adequada da corrente na base do canal do raio, sendo preferencialmente utilizada por apresentar derivada igual a zero no instante $t = 0$, valor consistente com os das formas de onda de corrente de retorno observados na prática através de medições [8,9,58].

Como exemplo, a Fig. 4.3.1 representa uma corrente na base do canal do raio, assumindo-se $I_0 = 50,0$ kA, $\tau_1 = 1,2\mu\text{s}$, $\tau_2 = 50,0\mu\text{s}$ e $n = 2$ como valores típicos dos parâmetros da forma de onda.

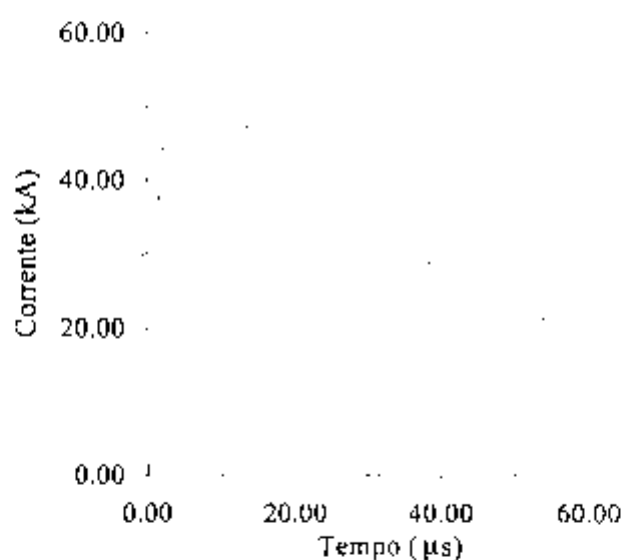


Fig. 4.3.1 Forma de onda da corrente do raio

Embora a forma de onda recomendada seja a descrita pela eq. (4.1), outras funções poderão ser aplicadas, tais como a obtida pela soma de funções tipo rampa ou as definidas por exponenciais duplas, não representando uma limitação para a metodologia proposta.

4.4 Resposta da célula elementar aos impulsos

Neste item, descreve-se, resumidamente, a formulação básica relacionada à resposta da célula elementar ou elemento tridimensional aos impulsos de tensão. O desenvolvimento completo deste modelamento é apresentado, de forma detalhada, na nossa dissertação de mestrado [13].

Conforme mencionado em [13], a resposta da célula elementar aos impulsos surgiu a partir da observação do método TLM ("Transmission Line Matrix Method" ou "Transmission Line Modeling"), no qual, através de um processo de discretização, em que se substitui um sistema contínuo por uma malha composta por linhas de transmissão, obtêm-se os valores dos campos elétrico e magnético a partir da equivalência entre as equações de Maxwell e as equações das linhas de transmissão.

Na avaliação dos valores dos impulsos das tensões e das correntes na célula elementar utiliza-se o modelo de linhas de transmissão (L.T) sem perdas. Desta forma, assume-se que as tensões e correntes propagar-se-ão com velocidade constante e sem alteração das suas formas enquanto as constantes das L.T não se alterarem [34].

Além disto, ao se considerar os condutores envoltos em um meio de permeabilidade e permissividade relativas unitárias e a indutância total igual a indutância externa, ter-se-á como velocidade de propagação a velocidade $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 1/\sqrt{LC}$, correspondente à velocidade da luz, e a relação

$LC = \mu_0 \epsilon_0$ como válida na avaliação dos parâmetros das LT [36].

4.4.1 Resposta da célula elementar aos impulsos de tensão

Tendo como base as considerações anteriores, a relação entre os pulsos das tensões refletidas e incidentes em um nó n de uma célula tridimensional, no instante $t = k \Delta l / 2c$ representadas por ${}_k V_n^r$ e ${}_k V_n^i$, respectivamente, pode ser expressa por:

$${}_k V_n^r = \sigma_h \sum_{m=1}^4 {}_k V_m^i - {}_k V_n^i + \sigma_v \sum_{m=5}^6 {}_k V_m^i \quad (4.2)$$

Para os nós centrais ou paralelos, cujas coordenadas (z,x,y) definem a posição da célula e n a direção do pulso, é válida a seguinte relação:

$${}_k V_n^{r,n} = \sigma_h \sum_{m=1}^4 {}_k V_m^i - {}_k V_n^i + \sigma_v \sum_{m=5}^6 {}_k V_m^i \quad (4.2a)$$

Nestas expressões, σ_h e σ_v são os coeficientes de transmissão dos trechos das linhas de transmissão horizontais e verticais da célula tridimensional considerada.

Observa-se que as expressões anteriores são facilmente obtidas considerando-se a somatória das contribuições dos impulsos de tensão devido a cada trecho de linha de transmissão da célula, resultantes da aplicação dos coeficientes de transmissão correspondentes, além da parcela correspondente a reflexão do impulso associado ao nó considerado.

A Fig. 4.4.1.1 ilustra o comportamento de uma célula tridimensional,

em três instantes consecutivos, quando excitada por impulsos de tensão.

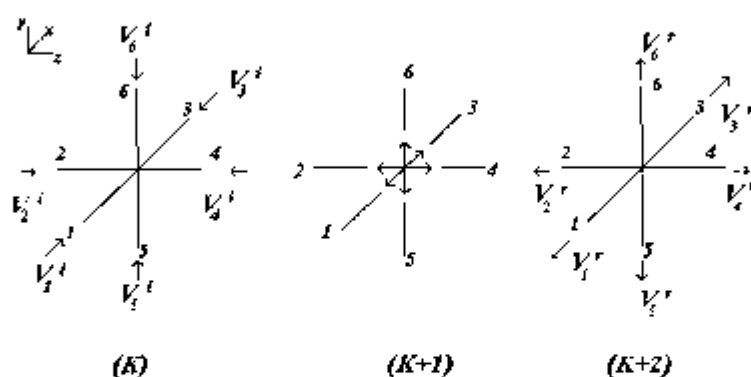


Fig. 4.4.1.1 Resposta de uma célula aos impulsos de tensão

Na forma matricial, a relação entre as tensões incidentes e refletidas, nos instantes k e $(k-2)$, em um elemento tridimensional definido pelo nó central (z,x,y) , pode ser descrita por:

$${}_k[V_n^r(z,x,y)] = [\sigma(i,j)]_{k,2} [V_n^i(z,x,y)] \quad (4.3)$$

na qual, a matriz dos coeficientes de transmissão $[\sigma(i,j)]$ é dada por:

$$[\sigma(i,j)] = \begin{bmatrix} (\sigma_h - 1) & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_v & \sigma_v \\ \sigma_h & (\sigma_h - 1) & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_v & \sigma_v \\ \sigma_h & \sigma_h & (\sigma_h - 1) & \sigma_h & \sigma_v & \sigma_v \\ \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & (\sigma_h - 1) & \sigma_v & \sigma_v \\ \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & (\sigma_v - 1) & \sigma_v \\ \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_v & (\sigma_v - 1) \end{bmatrix} \quad (4.3a)$$

A relação entre estas grandezas em instantes consecutivos pode ser obtida substituindo-se, por exemplo, ${}_k V_n^r$ por ${}_k V_n^{r'}$, impulso de tensão refletida no nó central associado ao trecho de linha de transmissão correspondente ao nó "n", no instante $(k-1)$.

A conexão entre os elementos é dada através da matriz $C(i,j)$, denominada "matriz de conexões", que representa como os impulsos emergentes dos nós série dos elementos vizinhos a um elemento, dado pela posição (z,x,y) , transformam-se em impulsos incidentes.

$$\begin{bmatrix} {}_kV_1'(z,x,y) \\ {}_kV_2'(z,x,y) \\ {}_kV_3'(z,x,y) \\ {}_kV_4'(z,x,y) \\ {}_kV_5'(z,x,y) \\ {}_kV_6'(z,x,y) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{C(i,j)} \begin{bmatrix} {}_kV_1''(z,x+\Delta l,y) \\ {}_kV_2''(z+\Delta l,x,y) \\ {}_kV_3''(z,x-\Delta l,y) \\ {}_kV_4''(z-\Delta l,x,y) \\ {}_kV_5''(z,x,y+\Delta l) \\ {}_kV_6''(z,x,y-\Delta l) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Desta forma, após a atribuição inicial dos valores de impulso de tensão em um instante $t=0$, é possível determinar-se a resposta aos impulsos através do cálculo em instantes sucessivos do estado da malha.

As tensões nos nós do elemento tridimensional são obtidas considerando-se as tensões refletidas e incidentes. Para os nós centrais ou paralelos são válidas as seguintes expressões:

$${}_{k+1}V_N^{r,1} + {}_kV_1' = {}_{k+1}V_N^{r,1} + {}_kV_1' = \dots = {}_{k+1}V_N^{r,n} + {}_kV_n' \quad (4.5)$$

Aplicando-se a equação (4.2a) resulta:

$${}_{k+1}V_N = \sigma_h \sum_{m=1}^4 {}_kV_m' + \sigma_v \sum_{m=5}^6 {}_kV_m' \quad (4.6)$$

ou na forma matricial, dada por:

$${}_{k+1}V_N(z,x,y) = [\sigma_h \quad \sigma_h \quad \sigma_h \quad \sigma_h \quad \sigma_v \quad \sigma_v]_b [V_a'(z,x,y)] \quad (4.6a)$$

De maneira similar, obtêm-se as seguintes expressões para as tensões nos nós série dos elementos:

$${}_kV'_1 + {}_kV'_1 = {}_kV'_2 + {}_kV'_1 = \dots = {}_kV'_n + {}_kV'_n \quad (4.7)$$

ou matricialmente:

$${}_k[V'_n(z, x, y)] = [V'_n(z, x, y)] + [V'_n(z, x, y)] \quad (4.7a)$$

4.4.2 Resposta de uma célula quando excitada externamente

A utilização das equações anteriores na avaliação de grandezas elétricas em estruturas atingidas por descargas atmosféricas requer a aplicação de algumas definições, tais como a da "matriz de impulso" dada por [13]:

$${}_kV_s(z, x, y) = \begin{bmatrix} {}_kV_N^{r,1}(z, x, y) \\ {}_kV_N^{r,2}(z, x, y) \\ {}_kV_N^{r,3}(z, x, y) \\ {}_kV_N^{r,4}(z, x, y) \\ {}_kV_N^{r,5}(z, x, y) \\ {}_kV_N^{r,6}(z, x, y) \end{bmatrix} = {}_kI_s [Z_s(i)] - {}_kI_s \begin{bmatrix} Z_s(1) \\ Z_s(2) \\ Z_s(3) \\ Z_s(4) \\ Z_s(5) \\ Z_s(6) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

na qual, ${}_kI_s$ e ${}_kV_s$ representam o impulso de corrente e da tensão resultantes da descarga atmosférica no ponto de impacto, definido pelo nó central (z, x, y) do elemento tridimensional, no instante "k".

Os elementos da matriz $Z_s(i)$, correspondentes à impedância de impulso resultante, serão nulos quando o nó série "n=i" não existir e iguais a "Z_s" quando o nó "n=i" fizer parte do elemento tridimensional considerado. A impedância de impulso "Z_s" é definida considerando-se o plano horizontal dado pelos eixos "z" e "x", tendo-se, portanto, a

representação das impedâncias características e dos nós série horizontais (1 a 4) e verticais (5 a 6) dadas por “ $Z_h=Z_h(z,x,y)$ ” e “ $Z_v=Z_v(z,x,y)$ ”, e por “ n_h ” e “ n_v ”, respectivamente.

$$Z_s = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n_h} \frac{1}{Z_h} + \sum_{n=1}^{n_v} \frac{1}{Z_v}} = \frac{1}{\frac{n_h}{Z_h} + \frac{n_v}{Z_v}} \quad (4.9)$$

Resultam, desta forma, as seguintes expressões correspondentes às equações (4.3) e (4.6a) quando os elementos são atingidos por descargas atmosféricas:

$${}_k[V'_n(z,x,y)] = [\sigma(i,j)]_{k-2} [V'_n(z,x,y)] + {}_{k-1}I_s [Z_s(i)] \quad (4.3b)$$

$${}_{k-1}V'_s(z,x,y) = [\sigma_h \quad \sigma_h \quad \sigma_h \quad \sigma_h \quad \sigma_v \quad \sigma_v]_k [V'_n(z,x,y)] + {}_{k+1}I_s [Z_s(i)] \quad (4.6b)$$

4.4.3 Resposta dos nós vinculados ao sistema de aterramento

Além das condições anteriores, deve-se analisar as condições relacionadas aos nós vinculados ao sistema de aterramento. Quando o nó considerado é um nó série, a condição imposta é descrita por:

$${}_kV'_s(z,x,y) = \Gamma_{at} {}_kV'_s(z,x,y) \quad (4.10)$$

na qual, o “coeficiente de reflexão de aterramento” é definido, admitindo-se R_{at} como a resistência de aterramento, por:

$$\Gamma_{at} = \frac{R_{at} - Z_v}{R_{at} + Z_v} \quad (4.11)$$

No caso do nó vinculado ao sistema de aterramento corresponder a um nó central ou paralelo do elemento tridimensional, deve-se considerar as seguintes condições, admitindo-se $Z_s(z, x, y) = R_m$:

Para o nó "n=5", o impulso de tensão injetado no solo a partir do nó central pode ser determinado por:

$${}_k V_N'^{5} = \sigma_h^{oi} \sum_{m=1}^{n_h} {}_{k-1} V_m' + \sigma_b^{oi} {}_{k-1} V_b' \quad (4.12)$$

Nesta expressão, admitiu-se que o impulso de tensão incidente na célula oriundo do solo ${}_k V_N'^{5}(z, x, y)$ é nulo, não se considerando, portanto, as eventuais reflexões dos pulsos de tensão nas camadas do solo.

Observa-se que esta consideração é equivalente a adotar um solo homogêneo ou que o tempo de reflexão do pulso nas camadas do solo é elevado face ao tempo de análise do fenômeno considerado.

De maneira similar, obtêm-se para os nós "n=1 a 4" e "n=6", a seguinte expressão:

$${}_k V_N'^{n} = \sigma_h^{oi} \sum_{m=1}^{n_h} {}_{k-1} V_m' - {}_{k-1} V_n' + \sigma_b^{oi} {}_{k-1} V_b' \quad (4.13)$$

Nota-se que em (4.13) a parcela relativa à reflexão do impulso incidente no trecho correspondente ao nó "n" passa a ser considerada, por exemplo, para o nó série "n=6" ${}_k V_N'^{6}(z, x, y) = -{}_{k-1} V_b'(z, x, y) \neq 0$.

Analisando-se as expressões anteriores, conclui-se que a expressão (4.13a) representa, genericamente, a resposta de uma célula vinculada ao sistema de aterramento através do nó central, considerando-se, no entanto,

${}_k V_N^{1,5}(z, x, y) = {}_{k-1} V_5' = 0$, e os coeficientes de transmissão descritos a seguir:

$${}_k V_N^{1,6} = \sigma_h^{af} \sum_{m=1}^{n_h} {}_{k-1} V_{m-1}^{1,5} {}_k V_m' + \sum_{m=5}^6 \sigma_m^{af} {}_{k-1} V_m' \quad (4.13a)$$

$$\sigma_h^{af} = \frac{2Z_{h,rev}^{af}}{Z_h + Z_{h,rev}^{af}} \quad (4.13b)$$

$$\sigma_5^{af} = \frac{2Z_{v,rev}^5}{R_{af} + Z_{v,rev}^5} \quad (4.13c)$$

$$\sigma_6^{af} = \frac{2Z_{v,rev}^6}{Z_v + Z_{v,rev}^6} \quad (4.13d)$$

nas quais, as impedâncias resultantes “vistas” através dos trechos de linhas horizontais e verticais são dadas por:

$$Z_{h,rev}^{af} = \frac{1}{\frac{(n_h - 1)}{Z_h} + \frac{1}{Z_v} + \frac{1}{R_{af}}} \quad (n_h \neq 0) \quad (4.13e)$$

$$Z_{v,rev}^5 = \frac{1}{\frac{(n_h)}{Z_h} + \frac{1}{Z_v}} \quad (4.13f)$$

$$Z_{v,rev}^6 = \frac{1}{\frac{(n_h)}{Z_h} + \frac{1}{R_{af}}} \quad (4.13g)$$

Assim sendo, quando o nó vinculado ao sistema de aterramento for um nó central ou paralelo, as expressões descritas neste item se assemelham as expressões (4.2) a (4.6a), ressaltando-se que as diferenças básicas são as condições anteriormente impostas, dadas por ${}_{k-1} V_5'(z, x, y) = 0$,

$\sigma_5(n=5) = \sigma_5^{af}$, $\sigma_6(n=6) = \sigma_6^{af}$ e $\sigma_h = \sigma_h^{af}$, e pelos valores das

impedâncias associadas [(4.13a) a (4.13g)].

Nota-se que quando os condutores horizontais não fizerem parte da configuração do sistema de aterramento, a expressão (4.13a) resultante será descrita por ${}_k V_n^{r,n} = (\sigma_0^{nr} - 1) {}_{k-1} V_b^r$, expressão equivalente à (4.10) utilizada na determinação da resposta das células quando os vínculos com o sistema de aterramento são realizados através dos nós série "n-5".

4.4.4 Determinação das correntes nas células

Na avaliação das correntes nas células tridimensionais, em função dos sentidos de propagação dos pulsos de tensão, são consideradas as células que incorporam o nó excitado externamente pelo impulso atmosférico, denominado "nó gerador", e as demais células excitadas pelos nós vizinhos da malha, denominadas "receptoras".

As correntes ao longo do trecho de uma linha definida pelo nó série "n" da célula, quando relacionada ao nó gerador, é dada por [13]:

$${}_k [I_n(z, x, y)] = \left[\frac{1}{Z_n} \right]_k [V_n^r(z, x, y)] - \left[\frac{1}{Z_n} \right] \underbrace{[C(i, j)]_k}_{\substack{\leftarrow {}_{k-1} V_b^r(z, x, y) - V_b^{r,n}(z, x, y)}} [V_n^r(z, x, y, \Delta t)] \quad (4.14)$$

na qual:

$[1/Z_n]$ é uma matriz diagonal (6x6), ($\alpha_{nn} = 1/Z_n$), e

${}_k [I_n(z, x, y)]$ o vetor coluna das correntes nas linhas da célula.

Os demais elementos seguem as definições anteriores.

Para as células receptoras, a determinação da corrente dependerá dos sentidos de propagação dos impulsos incidentes e refletidos, classificados como “*progressivos ou regressivos*”, dependendo da concordância ou não com o sentido de propagação do fenômeno.

Neste caso, utilizam-se as “*matrizes de propagação*” dos impulsos refletidos e incidentes nos nós série, $SR(i,n)$ e $SI(i,n)$, como base no cálculo das correntes.

Observa-se que as matrizes de propagação, descritas conforme tabela 4.4.4.1, foram construídas através da observação do fenômeno de propagação de onda em uma malha de estrutura tridimensional atribuindo-se os valores unitários positivos ou negativos para os impulsos progressivos ou regressivos, respectivamente.

Tabela 4.4.4.1 Matrizes de propagação $SR(i,n)$ e $SI(i,n)$

z	x	y	in	$SR(i,n)$						$SI(i,n)$					
				1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0	0	0	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1
0	0	1	2	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
0	1	0	3	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
0	1	1	4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	0	0	5	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
1	0	1	6	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
1	1	0	7	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	-1
1	1	1	8	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1

Obs: Os valores 0 ou 1, relacionados aos eixos z, x e y, correspondem às coordenadas positivas ou negativas destes eixos.

A partir das linhas das matrizes de propagação determinam-se as matrizes diagonal $SR^D(\alpha_{mn} = SR(i, n))$ e $SI^D(\alpha_{mn} = SI(i, n))$, cujos elementos unitários estão relacionados aos sinais de cada uma das parcelas correspondentes às correntes refletidas e incidentes dos trechos de linha de transmissão das células.

Desta forma, estabelecem-se as seguintes expressões para a determinação das correntes nas células receptoras:

$${}_k[I_n(z, x, y)] = \left[\frac{1}{Z_n} \right] SR^D {}_k[V'_n(z, x, y)] + \left[\frac{1}{Z_n} \right] SI^D {}_k[V''_n(z, x, y)] \quad (4.15)$$

ou

$${}_k[I_n(z, x, y)] = \left[\frac{1}{Z_n} \right] SR^D {}_k[V'_n(z, x, y)] + \left[\frac{1}{Z_n} \right] \underbrace{[C(i, j)] SR^D}_{SR^D, V''_n(z, x, y)} {}_{k-1}[V'_n(z, x, y, \Delta t)] \quad (4.15a)$$

4.5 Modelagem do sistema de aterramento

4.5.1 Modelagem derivada de Korsuncev

O comportamento do sistema de aterramento resultante das correntes transitórias devido às descargas atmosféricas será inicialmente avaliado com base em um modelo similar ao proposto por KORSUNCEV [59].

Este modelo têm sido amplamente utilizado nas avaliações das

resistências dos sistemas de aterramento de torres de linhas de transmissão, observando-se que dois estágios distintos do sistema de aterramento, delimitados pelo instante correspondente à ionização do solo nas regiões situadas ao redor dos condutores de aterramento, são considerados [48].

Nestes trabalhos [48,59], as resistências das diferentes configurações de eletrodos de aterramento são avaliadas considerando-se dois parâmetros adimensionais, Π_1 e Π_2 :

$$\Pi_1 = \frac{sR_j}{\rho} \quad (4.16)$$

$$\Pi_2 = \frac{\rho I}{E_0 s^2} \quad (4.17)$$

nas quais,

s : é a distância do centro ao ponto mais afastado do eletrodo (m);

ρ : é resistividade do solo (Ωm);

E_0 : é a intensidade do campo elétrico crítico de ionização (kV/m);

I : é o valor instantâneo da corrente (kA), e

R_j : a “resistência de pé de torre” (Ω).

A relação entre estes parâmetros foi obtida através do processamento de vários dados experimentais, sendo representada pela Fig. 4.5.1.1 extraída da referência [48].

Admite-se que esta figura é composta por três regiões definidas pela mudança da inclinação da curva. Na primeira região o valor do parâmetro Π_1 , praticamente não varia com relação a Π_2 , e nas demais regiões observa-se uma

variação linear do " $\ln \Pi_1$," em relação ao " $\ln \Pi_2$,".

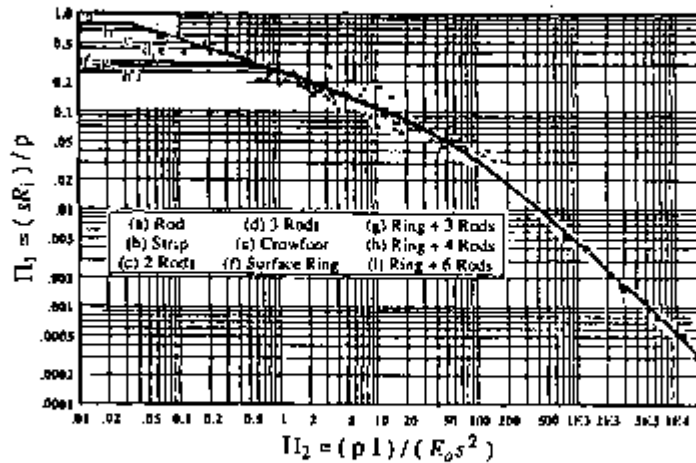


Fig. 4.5.1.1 Relação entre Π_1 e Π_2 , extraída de [48]

No trecho correspondente ao estágio anterior à ocorrência da ionização, onde as correntes injetadas no solo são de pequena intensidade, os valores das resistências de aterramento podem ser obtidas através da formulação tradicional encontrada na literatura.

Se considerada a resistência de uma calota esférica em um solo homogêneo, o valor da resistência de aterramento correspondente pode ser obtido em função da resistividade do solo " ρ " e da distância " s ", que neste caso é igual ao seu raio, através da seguinte expressão [60]:

$$R_{calota} = \frac{\rho}{2\pi s} \quad (4.18)$$

Desta forma, obtém-se para o parâmetro Π_1 o valor:

$$\Pi_1^0(calota) = \frac{sR_i}{\rho} = \frac{1}{2\pi} = 0,159 \quad (4.18a)$$

No caso da geometria avaliada corresponder a de uma haste, a resistência de terra é obtida considerando-se a distância “s” como o comprimento, “r” como o raio da haste, e “ $A = 2\pi s$ ” como a área de contato lateral.

Desta forma, têm-se [60]:

$$R_{haste} = \frac{\rho}{2\pi s} \ln\left(\frac{2s}{r}\right) \quad (4.19)$$

$$\Pi_1^0(haste) = \frac{sR_i}{\rho} = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{r}\right) = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{4\pi s^2}{A}\right) \quad (4.19a)$$

Nota-se que, para os valores de “s/r” normalmente utilizados (75 a 300), os valores do parâmetro Π_1 encontram-se dentro da faixa de 0,8 a 1,0.

Com base nas considerações anteriores, e observando-se a Fig. 4.5.1.1, pode-se admitir que, durante o processo de início de ionização, os valores de Π_1 estão associados à resistência de uma calota esférica.

Por outro lado, se considerada a expansão em série das expressões (4.18a) e (4.19a), e adotando-se a expansão correspondente à configuração da calota esférica para a haste, observar-se-á um erro, correspondente à parcela constante (0,4517-0,4028), de aproximadamente 10%:

$$\Pi_1^0(calota) = \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \ln e \cong \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{2\pi s^2}{A} e\right) = 0,4517 + \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{s^2}{A}\right) \quad (4.18b)$$

$$\Pi_1^0(haste) = \frac{sR_i}{\rho} = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{4\pi s^2}{A}\right) = 0,4028 + \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{s^2}{A}\right) \quad (4.19b)$$

Diante das considerações anteriores, adotar-se-á a expressão (4.18b) como representativa do trecho relacionado ao estágio anterior à ocorrência da ionização, mesmo nos trechos correspondentes à geometria da haste.

Para a "Região II", adotar-se-á a expressão obtida a partir do ajuste da curva cujos valores de Π_1 situam-se entre 0,3 e 50. Na prática, a adoção desta faixa de valores para Π_1 é bastante satisfatória, não sendo necessário, portanto, a representação da "Região III" da curva [48].

Com base nestas considerações, a expressão resultante do ajuste da curva, representativa da "Região II", será dada por:

$$\Pi_1 = 0,2631\Pi_2^{-3,3082} \quad (4.20)$$

na qual, Π_2 é descrita pela equação (4.17), adotando-se para o cálculo do campo elétrico crítico a expressão de Oettle [48], dada em função de ρ (Ωm):

$$E_0 = 241\rho^{0,215} \text{ (kV/m)} \quad (4.21)$$

Das expressões anteriores, obtêm-se as seguintes relações, úteis na definição dos limites de aplicação das expressões relacionadas aos estágios anterior e posterior ao fenômeno de ionização:

O valor da corrente que delimita os estágios anteriormente mencionados, denominada corrente crítica, é obtida a partir de (4.17) e descrita por:

$$I_{crit} = \frac{\Pi_2^0 E_0 s^2}{\rho} \text{ (kA)} \quad (4.22)$$

O valor do parâmetro Π_2^0 da expressão anterior é obtido a partir de (4.20), substituindo-se o valor Π_1^0 , resultante da aplicação de (4.18b), em:

$$\Pi_2 = 0,01314\Pi_1^{3,2446} \quad (4.23)$$

ou

$$\Pi_2^0 = 0,01314\Pi_1^{0-3,2446} \quad (4.23a)$$

Desta forma, conhecendo-se o valor da corrente crítica, a resistência de aterramento será obtida por:

$$R_{at} = R_0 = \Pi_1^0 \frac{\rho}{s} \cong \frac{1}{2\pi} \frac{\rho}{s}, \text{ para } I < I_{crit} \quad (4.18c)$$

e

$$R_{at} = R_k = \Pi_1 \frac{\rho}{s} = 0,2631 \rho^{0,6918} s^{-0,3026} \left(\frac{I}{E_0} \right)^{-0,3082}, \text{ para } I \geq I_{crit} \quad (4.24)$$

A expressão (4.24) é obtida substituindo-se o valor da intensidade do campo elétrico crítico dado por (4.21) em Π_2 (4.17); o valor resultante desta substituição em Π_1 (4.20), e utilizando-se a relação $R = \Pi_1 \rho/s$.

Observa-se que, para sistemas de aterramento cuja ordem de grandeza da resistência de terra inicial R_0 é inferior a 10Ω , os valores das resistências de terra praticamente não sofrem influência dos valores das correntes injetadas no solo. Este fato é particularmente importante em sistemas de aterramento que utilizam os componentes naturais das edificações, tais como baldrame, sapatas, etc... como eletrodos de aterramento.

4.5.2 Consideração da malha de piso no modelo proposto

Uma abordagem mais abrangente para o sistema de aterramento pode ser adotada na qual os condutores horizontais, componentes da malha do piso, além dos condutores verticais, são considerados. Neste caso, propõe-se o modelo equivalente apresentado na Fig. 4.5.2.1.

Neste modelo, cada segmento horizontal é um segmento de linha de transmissão representado, separadamente, através da impedância característica " Z_c " e por uma condutância transversal " G_{ye} ". O modelo completo é obtido ao considerar-se nas junções das linhas de transmissão, nós centrais, os valores das resistências das hastes de aterramento " R_{gh} ".

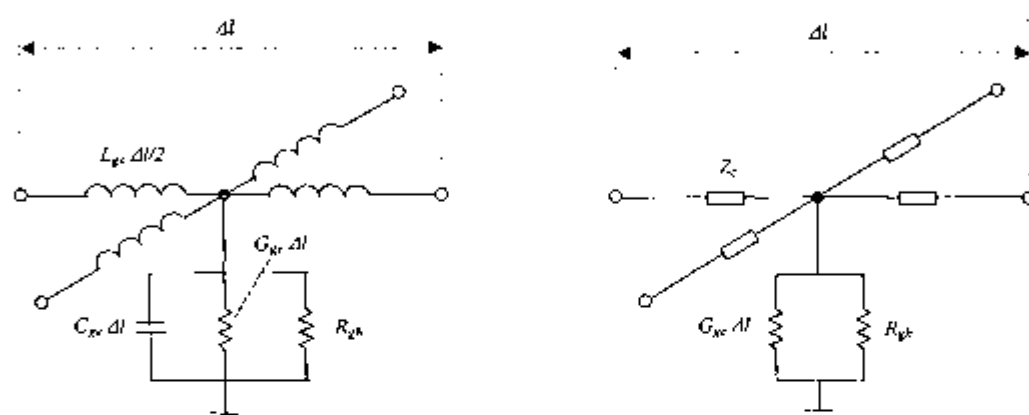


Fig. 4.5.2.1 Modelo adotado para o sistema de aterramento (malha de piso e haste vertical de aterramento)

Observa-se que os valores correspondentes a resistência de cada elemento da malha de piso é desprezada neste modelamento.

Na literatura existente, diversas formulações são utilizadas na avaliação dos parâmetros elétricos [24,47,48,60]. Neste trabalho, propõe-se, para os condutores horizontais, a utilização da formulação descrita inicialmente por SUNDE em [60], na qual considera-se como hipóteses que o comprimento do condutor " Δl " seja superior a profundidade em relação ao nível do solo " P ", e que esta seja superior ao raio do condutor " r " ($\Delta l \gg P \gg r$).

Desta forma, os parâmetros elétricos, por unidade de comprimento, no estágio anterior à ocorrência do fenômeno de ionização do solo, podem ser avaliados através da formulação apresentada a seguir:

$$L_{gr} = \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{\Delta l}{\sqrt{2rP}} \right) - 1 \right] (H/m) \quad (4.25)$$

$$R_{gr} = \frac{\rho}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2\Delta l}{\sqrt{2rP}} \right) - 1 \right] (\Omega m) \quad (4.26)$$

$$G_{gr} = \frac{1}{R_{gr}} (S/m) \quad (4.26a)$$

No caso do condutor facer a superfície do solo, os termos correspondentes ao raio equivalente " $\sqrt{2rP}$ " serão substituídos pelo próprio raio do condutor " r ". No caso do parâmetro R_{gr} , a expressão correspondente será:

$$R_{gr} = \frac{\rho}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2\Delta l}{r} \right) - 1 \right] (\Omega m) \quad (4.26b)$$

A impedância característica será calculada a partir da velocidade de propagação dos pulsos no condutor, definida, no caso de condutores instalados a pequenas profundidades, por:

$$v_{gr} = \frac{1}{\sqrt{\mu \frac{(\epsilon_0 + \epsilon)}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{gr} C_{gr}}} = \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (4.27)$$

na qual μ e ϵ são a permeabilidade e permissividade do solo.

O intervalo de tempo " ΔT ", correspondente ao percurso do pulso ao longo do segmento " Δl ", será, portanto:

$$\Delta T = \sqrt{L_{gk} \Delta l C_{gk} \Delta l} = \sqrt{L_k C_k} \quad (4.27a)$$

Assim, os valores totais da indutância e da capacitância do segmento de uma linha de transmissão " Δl ", obtidos a partir de (4.27a) serão:

$$L_k = \frac{\Delta T^2}{C_k} \quad (4.27b) \quad \text{e} \quad C_k = \frac{\Delta T^2}{L_k} \quad (4.27c)$$

Aplicando-se (4.27c), resulta:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_{gk}}{C_{gk}}} = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} = \sqrt{\frac{L_k^2}{\Delta T^2}} \quad \text{ou} \quad Z_c = \frac{L_k}{\Delta T} \quad (4.28)$$

na qual o valor de L_{gk} , obtido a partir de (4.25) e (4.27a), é:

$$L_k = L_{gk} \Delta l \quad (4.28a)$$

e, se considerarmos Δt_{gk} como o intervalo de tempo relacionado à "discretização" da célula do modelo do sistema de aterramento, e a velocidade de propagação dada por (4.27), o valor de ΔT será igual a:

$$\Delta T = 2\Delta t_{gk} = 2 \left(\frac{\Delta l}{2v_{gk}} \right) \quad (4.27d)$$

Com relação as hastes verticais, o valor da resistência " R_{gh} " é obtido utilizando-se a expressão (4.19).

Observa-se que, numa primeira instância, os valores das indutâncias mútuas não serão considerados neste método, pois admite-se que a distribuição das correntes ocorrerá, majoritariamente, nas direções perpendiculares ao longo dos elementos de cada célula do modelo adotado para o sistema de aterramento.

Após a ocorrência do fenômeno da ionização do solo, o valor da

resistência “ R_{gh} ” será determinado pela metodologia anteriormente discutida, e os demais parâmetros elétricos serão calculados considerando-se o aumento dos diâmetros dos condutores e a diminuição da velocidade de propagação nestes.

Os diâmetros ou raios efetivos dos condutores e a velocidade de propagação dos pulsos serão, então, calculados a partir do valor do campo elétrico correspondente ao valor crítico de ionização, admitindo-se que:

- O efeito da ionização ocorrerá imediatamente após os valores críticos do campo elétrico e da corrente de ionização serem atingidos;
- Os valores do campo elétrico e da corrente de ionização são os mesmos calculados para as hastes verticais, e
- O valor da indutância distribuída dos condutores horizontais não é afetado pelo fenômeno da ionização, já que se admite que a ionização dará origem apenas a correntes transversais.

Desta forma, a partir da expressão genérica do campo elétrico descrita a seguir, pode-se determinar o raio equivalente dos condutores “ r_{eq} ”:

$$E_0 = \rho \cdot \frac{I}{A} \quad (4.29)$$

na qual, para $I > I_{crit}$:

E_0 : é a intensidade do campo elétrico crítico de ionização (kV/m);

ρ : é resistividade do solo (Ωm);

I : é o valor instantâneo da corrente (kA), e

A : a área de contato lateral (m^2), ou

$A = 2\pi r_{eq} \Delta l$ para os condutores horizontais.

Assim sendo, o raio equivalente será descrito por:

$$r_{eq} = \rho \frac{I}{2\pi\Delta I E_0} \quad (4.29a)$$

Assumindo-se, portanto, $r = r_{eq}$ em (4.25) e (4.26) determina-se o novo valor da resistência " R_{ge} " e o valor da indutância " L_{ge} " que será utilizada na avaliação da velocidade de propagação. O valor da capacitância, extraída de [60], e da velocidade de propagação poderão ser calculados por:

$$C_{ge} = \frac{\pi(\epsilon_0 + \epsilon)}{\left[\ln \left(\frac{2\Delta l}{\sqrt{2r_{eq}P}} \right) - 1 \right]} (F/m) \quad (4.30)$$

e

$$v_{ge} = \frac{1}{\sqrt{L_{ge} C_{ge}}} \quad (4.27)$$

Finalmente, utilizando-se (4.28), (4.28a) e (4.27d) determina-se a impedância característica do segmento de linha de transmissão.

4.5.3 Considerações gerais sobre a resposta das células vinculadas ao sistema de aterramento

Com relação ao cálculo das correntes nas células vinculadas ao sistema de aterramento, observa-se que, a menos das particularidades referentes ao nó série " $n=5$ ", as expressões desenvolvidas no item 5 poderão ser utilizadas.

Desta forma, as expressões (4.15) e (4.15a) poderão ser utilizadas na

determinação das correntes na malha de piso, e a expressão descrita a seguir no cálculo da corrente correspondente ao nó “ $n=5$ ”, corrente injetada no solo:

$${}_k I_5(z, x, y) = [1/Z_n] {}_k V_N^{r,5}(z, x, y) \quad (4.15b)$$

Esta expressão deriva diretamente da expressão (4.15) ao se considerar ${}_k V_N^{r,5}(z, x, y) = {}_k V_5^i = 0$ e ${}_k V_N^{r,5}(z, x, y)$ ao invés de ${}_k V_5^r$, já que, pelo método proposto, não se define ${}_k V_5^r$ para estes tipos de células.

Com relação ao “sincronismo” com as demais células da estrutura, condição necessária para a determinação das distribuições das correntes, deverão ser respeitados os aspectos relacionados à diferença da velocidade de propagação decorrente das características distintas dos meios, além das diferenças relacionadas às eventuais diferenças de dimensões das células.

Desta forma, para que o sincronismo entre as células seja preservado, é necessário que os impulsos, correspondentes à resposta da célula cujo tempo de propagação é maior, sejam armazenados por um número de iterações (TD) antes de serem “reinjetados” nas células vizinhas.

Menciona-se que o número de iterações (TD) corresponde ao fator dado pelo número inteiro, imediatamente superior à unidade, obtido pela relação entre o maior e o menor tempo de propagação das células. Assim sendo, a resposta das células com tempo de propagação maior será obtida em função dos impulsos incidentes no instante “ $k-1-TD$ ” e não em função do instante “ $k-2$ ” se considerada a expressão (4.3), e de “ $k-TD$ ” ao invés de “ $k-1$ ”, se considerada a expressão (4.13a).

O mesmo raciocínio deverá ser aplicado às demais equações envolvendo instantes de tempo distintos.

4.6 Modelagem dos condutores da estrutura

Analisando-se a formulação existente, observa-se que diversos aspectos geométricos e físicos estão envolvidos no cálculo dos parâmetros elétricos dos condutores [41-45]. Este fato faz com que a determinação destes parâmetros não possa ser executada através de uma formulação geral e simplificada.

Desta forma, algumas aproximações são adotadas nas formulações tradicionalmente propostas na literatura, tais como a consideração de que os condutores são infinitos ou filiformes, normalmente utilizadas na avaliação das características dos condutores dos sistemas de potência [25-26,41-42].

Observa-se, porém, que quando um grau de precisão maior é desejado, não se recomenda a adoção destas simplificações, já que, devido às dimensões e configurações dos componentes utilizados nos S.P.C.D.A., tais como as relacionadas às estruturas metálicas ou aos condutores, estas aproximações não são satisfatórias. Estas considerações são particularmente importantes, nos casos em que as edificações são elevadas e nos S.P.C.D.A. que utilizam as vigas metálicas ou estruturas das edificações como componentes naturais.

Neste trabalho, com o objetivo de minimizar as dificuldades anteriormente descritas e permitir a avaliação dos parâmetros elétricos dos condutores da maneira mais geral possível, também, serão adotadas algumas

simplificações.

Entre estas simplificações, menciona-se a utilização do conceito de seção equivalente, possibilitando, desta forma, a utilização da formulação aplicável às seções transversais cilíndricas para os demais tipos de seções de condutores.

Além destas premissas básicas, deve-se ressaltar que ao se escolher as dimensões dos elementos, estas deverão ser bem menores que o comprimento de onda considerado, ou seja, os elementos condutores ou trechos de linhas de transmissão serão considerados eletricamente curtos. Uma simplificação adicional refere-se a não consideração dos efeitos das mútuas no cálculo dos parâmetros elétricos, além de se considerar o plano de terra com resistividade nula, ou seja, como sendo um condutor perfeito.

Menciona-se que as referências [43-46] serão a base do desenvolvimento da modelagem dos condutores horizontais e verticais, com ênfase na aplicação da referência [45] para os horizontais, e da referência [46] para os verticais.

4.6.1 Modelagem dos condutores horizontais

A metodologia proposta para a determinação dos parâmetros elétricos distribuídos, bem como das impedâncias características dos trechos de linhas de transmissão horizontais, é similar ao desenvolvido para o modelo dos condutores dos sistemas de aterramento.

A formulação tradicionalmente observada na literatura tem como ponto de partida os valores das indutâncias dos condutores, observando-se as

simplicificações comentadas anteriormente. Como exemplo, pode-se mencionar o cálculo da indutância total " L_T " de um condutor cujo comprimento " l " é considerado bem maior que o seu raio " r " que pode ser obtido através da seguinte expressão, válida para os condutores filiformes [36,44]:

$$L_T = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2l}{r}\right) - 1 \right] (H) \quad (4.31)$$

Para o caso de condutores cilíndricos a fórmula proposta em [44] é normalmente recomendada:

$$L_T = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2l}{r}\right) - \frac{3}{4} \right] (H) \quad (4.32)$$

Desta forma, a partir da expressão correspondente à velocidade de propagação da luz no vácuo dada por:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{L C}} = \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (4.33)$$

na qual:

μ_0 e ϵ_0 são a permeabilidade e permissividade do vácuo;

L e C : a indutância e a capacitância unitária, respectivamente;

Δl : o comprimento de um trecho de linha de transmissão, e

ΔT : o tempo de percurso.

Obtêm-se:

$$\Delta T = \sqrt{L \Delta l C \Delta l} = \sqrt{L_T C_T} \quad (4.33a)$$

$$L_T = \frac{\Delta T^2}{C_T} \quad (4.33b) \quad \text{e} \quad C_T = \frac{\Delta T^2}{L_T} \quad (4.33c)$$

Resultando ao aplicar (4.33c):

$$Z_h = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = \sqrt{\frac{L_r^2}{\Delta T^2}} \quad \text{ou} \quad Z_h = \frac{L_r}{l\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (4.34)$$

Assim, aplicando-se as expressões correspondentes às indutâncias, as impedâncias características dos condutores horizontais poderão ser obtidas por:

$$Z_h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} A_h = 60 A_h \quad (4.35)$$

na qual:

$$A_h = \ln\left(\frac{2l}{r}\right) - 1, \text{ para condutores filiformes horizontais [43], e}$$

$$A_h = \ln\left(\frac{2l}{r}\right) - \frac{3}{4}, \text{ para condutores cilíndricos horizontais [44].}$$

Para os condutores considerados infinitos ($l \gg r$), situados a uma altura “ h ”, o fator “ A_h ” correspondente é $A_h = \ln(2h/r)$ [41,42]:

Uma abordagem mais genérica para a avaliação dos valores da impedâncias características dos condutores cilíndricos horizontais é proposta por Kuffel e Zaengl na referência [45]. Ressalta-se que esta formulação será preferencialmente utilizada neste trabalho.

O desenvolvimento apresentado em [45] é semelhante ao proposto anteriormente, tendo como ponto de partida a expressão da capacitância total dada por:

$$C_r = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{A_c} \quad (4.36)$$

com,

$$A_c = \ln \left[\frac{l}{r} \left(\frac{\sqrt{1 + (2h/l)^2} - 1}{\sqrt{1 + (2h/l)^2} + 1} \right)^2 \right] = \ln \left(\frac{2h}{r} \right) - \ln \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + (2h/l)^2} + 1 \right) \quad (4.36a)$$

Resultando, quando aplicada (4.33b) ao invés de (4.33c):

$$Z_h = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} = \sqrt{\frac{\Delta T^2}{C_T^2}} \quad \text{ou} \quad Z_h = \frac{l \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}{C_T} = 60 A_c \quad (4.37)$$

Desta maneira, as impedâncias características dos condutores horizontais serão obtidas por:

$$Z_h = 60 \left[\ln \left(\frac{2h}{r} \right) - \ln \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + (2h/l)^2} + 1 \right) \right] \quad (4.38)$$

Observa-se que para $l \gg h$ a expressão resultante será a mesma recomendada em [41,42].

4.6.2 Modelagem dos condutores verticais

As impedâncias características dos condutores verticais podem ser obtidas de maneira semelhante às desenvolvidas para os condutores horizontais através da seguinte expressão geral:

$$Z_v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} A_v = 60 A_v \quad (4.39)$$

na qual:

$$A_v = \ln \left(\frac{2l}{r} \right) - 1, \text{ para condutores filiformes verticais [43], e}$$

$$A_v \approx \ln \left[\frac{l}{r} \left(\frac{4h_v + l}{4h_v - 3l} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \text{ para os condutores cilíndricos verticais [45].}$$

Os parâmetros relacionados ao fator “ A_v ” desta equação estão representados na Fig. 4.6.2.1.

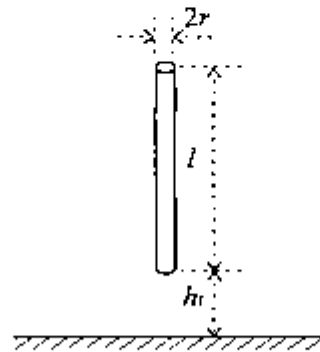


Fig. 4.6.2.1 Condutor vertical sobre o plano.

Recentemente, Ametani e seus colaboradores desenvolveram uma formulação bastante abrangente, que, embora não tão simples como as anteriores, será preferencialmente utilizada na avaliação das impedâncias características dos condutores cilíndricos verticais [46].

Esta formulação pode ser resumidamente descrita através das seguintes expressões, adotando-se como geometria básica a descrita através dos parâmetros apresentados na Fig. 4.6.2.2:

$$Z_{ii} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} P_{ij} = 60 \left(\frac{\Delta}{2y_{ij}} \right) \quad (4.40)$$

na qual:

$$\Delta = -h_1 \ln(T_1) + h_2 \ln(T_2) + h_3 \ln(T_3) - h_4 \ln(T_4) + a_1 - a_2 - a_3 + a_4 - \\ (h_5 \ln(T_5) - h_6 \ln(T_6) - h_7 \ln(T_7) + h_8 \ln(T_8) - a_5 + a_6 + a_7 - a_8)^2;$$

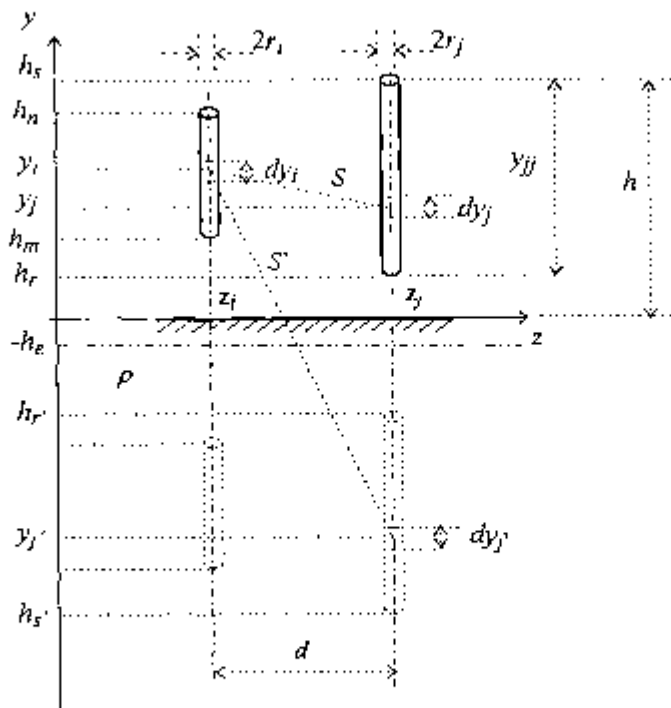


Fig. 4.6.2.2 Configuração dos condutores verticais

$$h_e = \sqrt{\rho / j2\pi f \mu};$$

f : frequência (Hz);

μ e ρ a permeabilidade e resistividade do solo, respectivamente;

$$h_1 = h_n - h_s;$$

$$h_2 = h_m - h_s;$$

$$h_3 = h_n - h_r;$$

$$h_4 = h_m - h_r;$$

$$h_5 = h_n + h_s + 2h_e;$$

$$h_6 = h_m + h_s + 2h_e;$$

$$h_7 = h_n + h_r + 2h_e;$$

$$h_8 = h_m + h_r + 2h_s;$$

$$a_i = \sqrt{h_i^2 + d^2}, \quad (i = 1, 2, \dots, 8);$$

$$T_i = a_i + h_i, \quad (i = 1, 2, \dots, 8);$$

$$y_u = h_n - h_m;$$

$$y_d = h_s - h_r, \text{ e}$$

$$y_v = 0,5(y_u + y_d)$$

O valor da impedância própria Z_n é obtido considerando-se $h_s = h_n$, $h_r = h_m$, $h_n - h_m = l$ e $d = r$. Além disto, ao se admitir o solo como um condutor perfeito, uma simplificação adicional será introduzida nesta formulação, já que $h_s = 0$

4.6.3 Comentários gerais sobre a modelagem dos condutores

Os principais aspectos a serem comentados neste item referem-se às simplificações adotadas nas expressões utilizadas na modelagem dos condutores, em particular, as relacionadas aos condutores verticais.

O trabalho desenvolvido por Ametani [46] apresenta alguns resultados muito interessantes sob o ponto de vista prático, aplicáveis em modelamento de condutores de torres de linhas de transmissão. Devido à similaridade destas estruturas metálicas com as consideradas nos S.P.C.D.A., optamos por implementar esta metodologia na avaliação das impedâncias características ou

de surto dos condutores verticais. Conforme mencionado anteriormente, várias simplificações foram utilizadas, destacando-se a consideração do solo como sendo perfeitamente condutor.

Destaca-se, porém, que os resultados apresentados em [46] mostram que para frequências até 1MHz, frequência usualmente considerada como típica para as descargas atmosféricas, a impedância característica é praticamente constante e proporcional a (h/r) .

A partir de 1MHz o valor da impedância característica decresce até atingir o valor da impedância característica correspondente a um solo perfeitamente condutor ($\rho \approx 0$ ou $h_e \approx 0$).

Por outro lado, merece destaque o fato de que, para baixas frequências, analiticamente correspondentes a valores de $h_e \approx \infty$ ou $\rho \approx \infty$, o valor da impedância característica apresenta seu valor máximo, aproximadamente 21Ω superior ao seu limite inferior [46]. Conforme comentado por Ametani, este fato pode levar-nos a intuir sobre o porquê das variações encontradas nos valores das impedâncias calculadas pelas diversas expressões propostas na literatura.

Diante disto, considera-se conveniente adotar-se a expressão (4.40), relacionando-a aos solos perfeitamente condutores, na avaliação dos valores das impedâncias características (surto) dos condutores verticais.

Pela similaridade entre as expressões, acredita-se que as mesmas simplificações, quando consideradas para os condutores horizontais, não resultam em erros expressivos no modelamento destes condutores.

4.7 Avaliação dos campos magnético e elétrico

Os sub-itens seguintes apresentam, detalhadamente, o desenvolvimento matemático necessário à avaliação dos campos elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{B}) no domínio do espaço e do tempo. As expressões utilizadas na avaliação do campo magnético derivam diretamente das equações de Maxwell a partir da solução geral correspondente, normalmente apresentada na literatura clássica [61]. Já na determinação das expressões relacionadas à avaliação do campo elétrico, optou-se pela utilização parcial do método das diferenças finitas no domínio do tempo associado aos valores do campo magnético previamente determinados.

4.7.1 Avaliação do campo magnético

4.7.1.1 Campo magnético de um dipolo elementar de corrente

A formulação matemática do Campo Magnético $d\vec{B}$ no domínio do tempo resultante de um dipolo elementar de corrente, deriva do desenvolvimento da seguinte equação, descrita em termos do vetor potencial elementar $d\vec{A}$:

$$d\vec{B} = \nabla \times d\vec{A} \quad (4.41)$$

Adotando-se as coordenadas cilíndricas, e admitindo-se, inicialmente,

que o dipolo elementar de corrente $i(y', t)$, de comprimento dy' , está situado ao longo do eixo y em y' , o vetor potencial é determinado através de seu componente "y" dado por:

$$d\vec{A}, (r, \phi, y, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} dy' \left(\frac{i(y', t - R/c)}{R} \right) u_y \quad (4.42)$$

Na equação (4.42), os fatores geométricos são definidos através da Fig. 4.7.1.1 e μ_0 é a permeabilidade do vácuo.

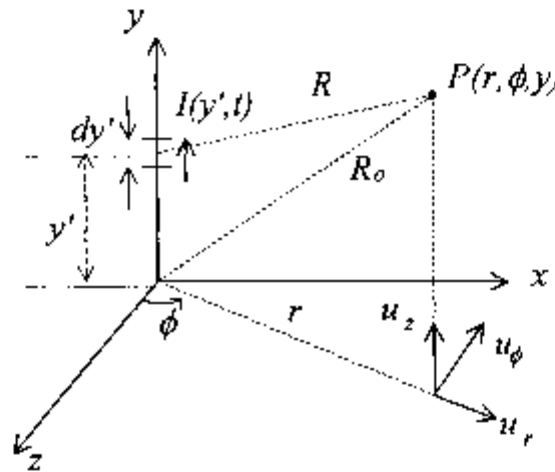


Fig. 4.7.1.1 Definição dos fatores geométricos

Substituindo-se a equação (4.42) em (4.41) resulta:

$$d\vec{B} = \nabla \times d\vec{A} = \left(-\frac{\partial A_y}{\partial r} \right) u_\phi = -\frac{\mu_0 dy'}{4\pi} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{i(y', t - R/c)}{R} \right) u_\phi \quad (4.43)$$

Da Fig. 4.7.1.1, obtêm-se as relações:

$$r^2 = x^2 + z^2 \quad (4.44)$$

$$R^2 = r^2 + (y - y')^2 \quad (4.45)$$

Considerando-se $t' = (t - R/c)$, argumento da função representativa do dipolo de corrente, e aplicando-se as relações anteriores, obtêm-se:

$$\frac{\partial}{\partial r} i(y', t - \frac{R}{c}) = i'(t - \frac{R}{c}) \frac{\partial t'}{\partial r} \quad (4.46)$$

$$i'(t - \frac{R}{c}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(i(y', t - \frac{R}{c}) \right) \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial t'}{\partial r} = -\frac{r}{cR} \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{R} \right) = -\frac{r}{R^3} \quad (4.49)$$

Desta forma, expandindo-se a equação (4.43) e substituindo-se cada um dos termos pelas expressões correspondentes, resulta:

$$d\vec{B}(r, \phi, y, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(y', t - R/c)}{\partial t} + \frac{r}{R^3} i(y', t - \frac{R}{c}) \right) dy' u_y \quad (4.50)$$

4.7.1.2 Campo magnético de uma função degrau de corrente

Se na equação (4.50) admitirmos a função $i(y', t - R/c)$ como uma função degrau associada a uma corrente uniformemente distribuída e deslocando-se ao longo do eixo y com velocidade v , esta corrente poderá ser representada por:

$$i(y', t) = I_0 u(t - \frac{y'}{v}) \quad (4.51)$$

Nesta equação, $y' = vt$ é a coordenada corresponde ao ponto de

deslocamento da corrente e $u(\xi)$ a função de Heaviside que assegura para $y' > vt$ que a corrente é nula.

$$u(\xi) = \begin{cases} 0, (\xi < 0) \\ 1, (\xi \geq 0) \end{cases} \quad (4.52)$$

Desta forma, no desenvolvimento da equação (4.50) serão consideradas duas parcelas.

A primeira, corresponde ao termo da equação (4.50) que é diretamente proporcional ao valor da corrente, resultando em:

$$\frac{\mu_0 r I_0}{4\pi R^2} dy' (t) \left(\frac{R}{c} + \frac{y'}{v} \right) \quad (4.50a)$$

A segunda parcela é proporcional à derivada do valor da corrente, sendo diferente de zero apenas devido à descontinuidade desta.

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(y' - R/c)}{\partial t} \right) dy' \quad (4.50b)$$

O desenvolvimento desta expressão corresponde, portanto, à parcela de campo devido à frente de onda da corrente.

Admitindo-se $r/cR^2 = f(y', y, r)$, resulta:

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \left(f(y', y, r) \frac{I_0}{\Delta t} \right) \Delta y' = \frac{\mu_0 I_0}{4\pi} (f(y', y, r) V) \quad (4.50c)$$

na qual, V é a velocidade de propagação da frente de onda vista por um observador cuja posição "O" e demais valores de referência estão indicados na Fig. 4.7.1.2.

No caso em que $R_2 > R_1$, as posições associadas à base e à frente de

onda da corrente até que possam ser observadas em "O" correspondem a um deslocamento da frente de onda menor que o atual (tracejado), já que, $\frac{R_2}{c}v > \frac{R_1}{c}v$. Nesta situação o observador "verá", portanto, uma frente de onda menor.

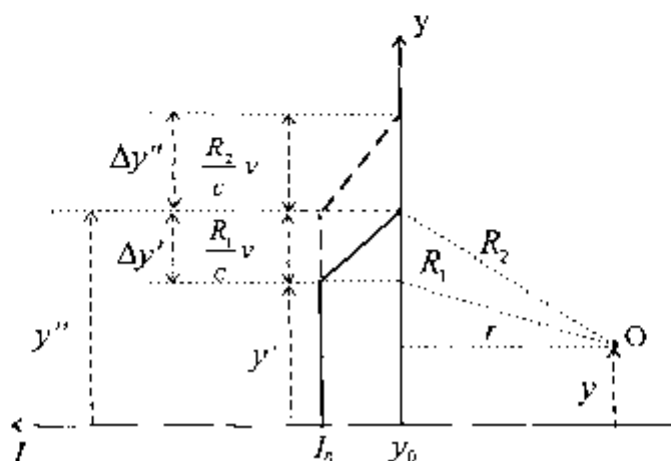


Fig. 4.7.1.2 Deslocamento de um degrau de corrente no eixo y

Para esta situação, obtêm-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \Delta y' &= \left(y'' + \Delta y'' - \frac{R_2}{c}v \right) - \left(y' + \Delta y' - \frac{R_1}{c}v \right) \\ &= \Delta y'' - (R_2 - R_1) \frac{v}{c} \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$\frac{\Delta y''}{\Delta t} = \frac{\Delta y'}{\Delta t} \left(1 + \frac{(R_2 - R_1)v}{\Delta y' c} \right) \quad (4.54)$$

$$V = \frac{v}{\left(1 + \frac{(R_2 - R_1)v}{\Delta y' c} \right)} \quad (4.55)$$

Na expressão anterior, observa-se ao substituir os valores:

$$R_2 = [(y' + \Delta y' - y)^2 + r^2]^{1/2} \quad (4.56)$$

$$R_1 = [(y' - y)^2 + r^2]^{1/2} \quad (4.57)$$

que:

$$\frac{(R_2 - R_1)}{\Delta y'} = \frac{\partial [(y' - y)^2 + r^2]^{1/2}}{\partial y'} = \frac{(y' - y)}{[(y' - y)^2 + r^2]^{1/2}} \quad (4.58)$$

Resultando, para esta condição ($R_2 > R_1$ ou $y' > y$):

$$V = \frac{1}{\left[\frac{1}{v} + \frac{(y' - y)}{c[(y' - y)^2 + r^2]^{1/2}} \right]} \quad (4.55a)$$

Esta expressão, que, conforme descrito anteriormente, representa a velocidade de propagação vista por um observador em "O", é apresentada por Uman e seus colaboradores em [37]. Deve-se ressaltar, no entanto, que ao se considerar a integração de dipolos de correntes em trechos de linhas de transmissão cujo posicionamento resulte $R_2 > R_1$ ou $y' > y$, a expressão anterior não será mais válida.

A expressão resultante para esta condição, correspondente à situação em que a frente de onda vista pelo observador é maior, é obtida de maneira análoga a partir das relações resultantes da análise da Fig. 4.7.1.3.

Desta forma, têm-se:

$$R_2 = [(y - y' - \Delta y')^2 + r^2]^{1/2} \quad (4.59)$$

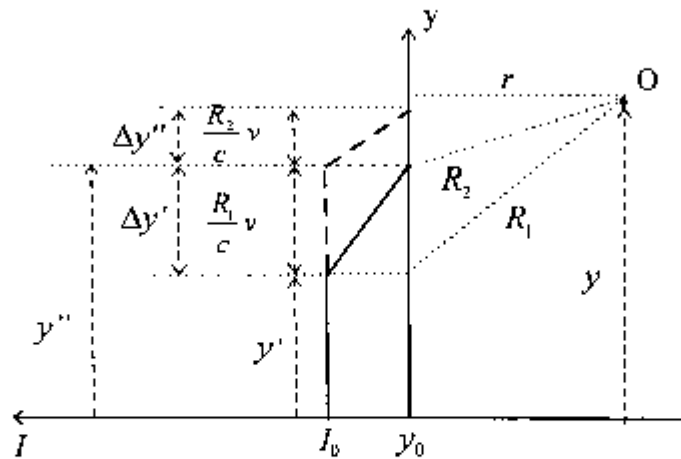


Fig. 4.7.1.3 Deslocamento de um degrau de corrente no eixo y

$$R_1 = [(y - y')^2 + r^2]^{1/2} \quad (4.60)$$

$$\frac{(R_2 - R_1)}{\Delta y'} = \frac{\partial \left\{ [-(y' - y)]^2 + r^2 \right\}^{1/2}}{\partial y'} = \frac{(y - y')}{[(y - y')^2 + r^2]^{1/2}} \quad (4.61)$$

Resultando, para a condição $(R_1 > R_2$ ou $y > y')$:

$$V = \left(\frac{1}{\frac{1}{v} + \frac{(y - y')}{c[(y - y')^2 + r^2]^{1/2}}} \right) \quad (4.55b)$$

Portanto, a expressão que satisfaz as condições anteriores pode ser descrita por:

$$V = \left(\frac{1}{\frac{1}{v} + \frac{|y - y'|}{c[(y - y')^2 + r^2]^{1/2}}} \right) \quad (4.62)$$

Analisando-se a expressão anterior, pode-se enfatizar a dependência dos fatores geométricos relacionados à base e ao topo da frente de onda e que

para um observador distante ($R \gg (y - y')$) ter-se-á $V = v$.

Substituindo-se a equação (4.62) em (4.50c), obtém-se, então, a equação (4.50d) representativa da parcela do campo magnético devido à frente de onda de um dipolo infinitesimal de corrente (“turn on field”) [37].

$$4\pi c \left[\frac{\mu_0 I_0 r}{(y - y')^2 + r^2} \right] \left(\frac{1}{v} + \frac{|y - y'|}{c[(y - y')^2 + r^2]^{3/2}} \right) \left(t - \frac{R}{c} + \frac{y'}{v} \right) \quad (4.50d)$$

Desta forma, o campo magnético devido a uma função degrau de corrente, uniformemente distribuída, propagando-se ao longo do eixo y com velocidade v , pode ser obtida integrando-se a equação (4.50a) e somando-se o valor resultante à parcela correspondente à equação (4.50d).

4.7.1.3 Campo magnético resultante das correntes que se deslocam no eixo y da célula tridimensional proposta

O campo magnético resultante das correntes I'_6, I'_3, I'_6 e I'_3 , que se deslocam ao longo do eixo y em uma célula localizada em $P(z_0, x_0, y_0)$, será determinada a partir das equações anteriormente mencionadas, considerando-se os limites de integração correspondentes aos deslocamentos dos degraus de corrente e das suas imagens de y_1 para y_{max} e de y_{max} para y_{01} , respectivamente.

Desta forma, têm-se, para o deslocamento de um degrau de corrente cuja configuração é dada pela Fig. 4.7.1.3.1, o seguinte valor de campo

magnético no ponto $P(z,x,y)$, para $t \left(\frac{R'}{c} + \frac{y'}{v} \right)$:

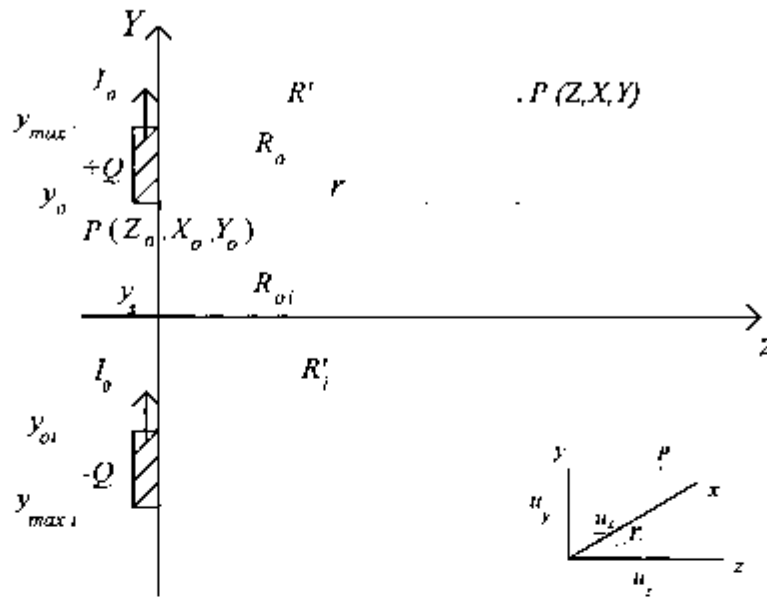


Fig. 4.7.1.3.1 Deslocamento de um degrau de corrente de amplitude I_0 e da sua imagem no eixo y

$$\vec{B}_p = \vec{B}_\psi + \vec{B}_\phi \quad (4.63)$$

$$\vec{B}_\psi = \left\{ \frac{\mu_0 I_0}{4\pi r} \left[\frac{(y - y_0)}{R_0} - \frac{(y - y'_{max})}{R'} \right] \right\} \vec{u}_\psi + \left\{ \frac{\mu_0 I_0 r}{4\pi c (R')^2} \frac{1}{\left(\frac{1}{v} + \frac{|y - y'_{max}|}{cR'} \right)} \right\} \vec{u}_\phi \quad (4.63a)$$

$$\vec{B}_\phi = - \left\{ \frac{\mu_0 I_0}{4\pi r} \left[\frac{(y - y_{0i})}{R_0} - \frac{(y - y'_{max,i})}{R'_i} \right] \right\} \vec{u}_\psi + \left\{ \frac{\mu_0 I_0 r}{4\pi c (R'_0)^2} \frac{1}{\left(\frac{1}{v} + \frac{|y - y'_{0i}|}{cR'_0} \right)} \right\} \vec{u}_\phi \quad (4.63b)$$

Os fatores geométricos das equações anteriores podem ser obtidos analisando-se a Fig. 4.7.1.3.1. Nas relações apresentadas a seguir, Δl e y_s correspondem, respectivamente, à distância entre os nós paralelos da célula e a posição do plano de referência adotado:

$$y_{max} = y_0 + \frac{\Delta l}{2} \quad (4.64)$$

$$y_{0i} = y_s - (y_0 \cdots y_s) = 2y_s - y_0 \quad (4.65)$$

$$y_{maxi} = y_s - (y_{max} - y_s) = 2y_s - y_{max} = y_{0i} - \frac{\Delta l}{2} \quad (4.66)$$

$$R_0 = \left[(y - y_0)^2 + r^2 \right]^{1/2} = \left[(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{1/2} \quad (4.67)$$

$$R_{0i} = \left[(y - y_{0i})^2 + r^2 \right]^{1/2} = \left[(y - y_{0i})^2 + (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{1/2} \quad (4.68)$$

$$R' = \left[(y - y_{max})^2 + r^2 \right]^{1/2} = \left[(y - y_{max})^2 + (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{1/2} \quad (4.69)$$

$$R'_i = \left[(y - y_{maxi})^2 + r^2 \right]^{1/2} = \left[(y - y_{maxi})^2 + (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{1/2} \quad (4.70)$$

Obtém-se, portanto, o campo magnético devido à contribuição de todas as correntes que se deslocam no eixo y de uma célula, aplicando-se a expressão resultante da soma das equações (4.63a) e (4.63b) para as correntes I'_6 , I'_5 , I'_6 e I'_5 e considerando-se a superposição de seus efeitos.

Este campo, representado por $\vec{B}_{\phi 56}$, poderá, então, ser determinado através das equações:

$$\vec{B}_{\phi 56}(z_0, x_0, y_0) = B_{\phi 56}(z_0, x_0, y_0) u_{\phi} \quad (4.71)$$

$$B_{\phi 56} = \frac{\mu_0}{4\pi} [I'_6 SR(I,6) - I'_6 SI(I,6)] F(6) - \frac{\mu_0}{4\pi} [I'_5 SR(I,6) - I'_5 SI(I,6)] F(5) \quad (4.71a)$$

na qual, $F(n)$ e os parâmetros associados são descritos por:

$$F(n) = \frac{1}{r} \left\{ \frac{A(n)}{[r^2 + (A(n))^2]^{1/2}} - \frac{B(n)}{[r^2 + (B(n))^2]^{1/2}} \right\} + \frac{r(n)}{c[r^2 + (B(n))^2]} \left[\frac{1}{v} + \frac{|B(n)|}{c[r^2 + (B(n))^2]^{1/2}} \right] + \frac{1}{r} \left\{ \frac{C(n)}{[r^2 + (C(n))^2]^{1/2}} - \frac{D(n)}{[r^2 + (D(n))^2]^{1/2}} \right\} + \frac{r(n)}{c[r^2 + (D(n))^2]} \left[\frac{1}{v} + \frac{|D(n)|}{c[r^2 + (D(n))^2]^{1/2}} \right] \quad (4.72)$$

A tabela 4.7.1.3.1 apresenta os valores de $A(n)$, $B(n)$, $C(n)$ e $D(n)$, que se relacionam aos sentidos de percurso dos degraus de corrente e, portanto, aos intervalos de integração anteriormente considerados.

Observa-se que a inclusão dos fatores $SR(I,n)$ e $SI(I,n)$ nas equações anteriores visa adequar os valores das correntes I'_6 , I'_5 , I'_6 e I'_5 à orientação adotada para o campo magnético, já que, estas expressões foram desenvolvidas considerando-se a orientação do vetor unitário u_ϕ vinculada ao sentido de propagação destas correntes.

Tabela 4.7.1.3.1 Valores de $A(n)$, $B(n)$, $C(n)$ e $D(n)$ da eq. (4.72)

(n)	$A(n)$	$B(n)$	$C(n)$	$D(n)$
5	$y - y_0 + \frac{\Delta l}{2}$	$y - y_0$	$y - 2y_s + y_0$	$y - 2y_s + y_0 - \frac{\Delta l}{2}$
6	$y - y_0$	$y - y_0 - \frac{\Delta l}{2}$	$y - 2y_s + y_0 + \frac{\Delta l}{2}$	$y - 2y_s + y_0$

Além disto, faz-se necessária esta consideração devido ao vínculo das expressões de campo, não só com o ponto onde será avaliado, mas também, com os intervalos de tempo relacionados aos períodos de deslocamentos dos degraus de corrente. Destaca-se, portanto, a importância da consideração do sentido de deslocamento das correntes incidente e refletida e não da corrente resultante.

O fator $F(n)$ pode ser considerado como um "fator de antena", porém, representando uma relação direta entre o campo magnético e as correntes que se deslocam no eixo y .

A representação do campo magnético em coordenadas cartesianas resulta da aplicação das relações obtidas por inspeção da Fig. 4.7.1.3.2.

Diante disto, a relação entre os sistemas de coordenadas considerados e a expressão do campo magnético em coordenadas cartesianas são descritas por:

$$\begin{bmatrix} u_\phi \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\gamma & \text{cos}\gamma \\ \text{cos}\gamma & \text{sen}\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_z \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

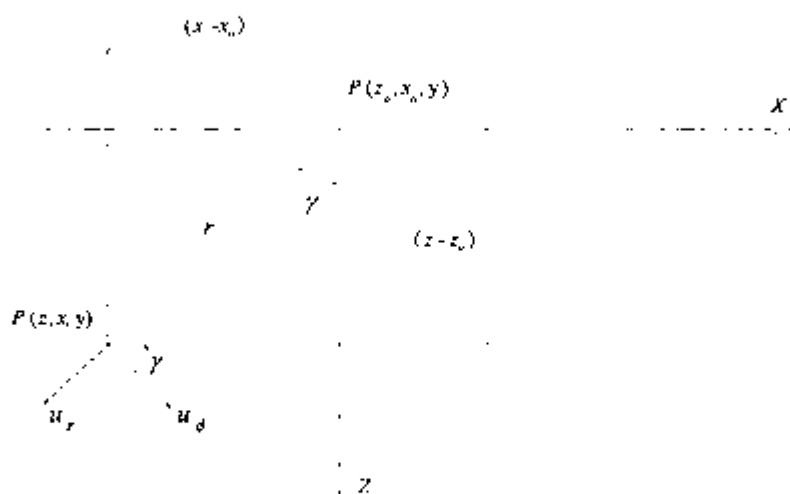


Fig. 4.7.1.3.2 Coordenadas cilíndricas e cartesianas - Plano (z,x)

$$\text{sen } \gamma = \frac{(x - x_0)}{r} \quad (4.74)$$

$$\text{cos } \gamma = \frac{(z - z_0)}{r} \quad (4.75)$$

em que γ é o ângulo entre r e o eixo z , e

$$\vec{B}_{\phi_{56}}(z_0, x_0, y_0) = B_{\phi_{56}} \text{sen } \gamma u_z + B_{\phi_{56}} \text{cos } \gamma u_x \quad (4.76)$$

O mesmo raciocínio é utilizado para se determinar as parcelas do campo magnético de uma célula quando se considera o deslocamento dos degraus de corrente nos demais eixos.

4.7.1.4 Campo magnético resultante das correntes que se deslocam no eixo z da célula tridimensional proposta

As expressões do campo magnético referentes ao deslocamento das correntes ao longo do eixo z são obtidas de maneira análoga as do item anterior, utilizando-se como auxílio a Fig. 4.7.1.4.1 e a Fig. 4.7.1.4.2.

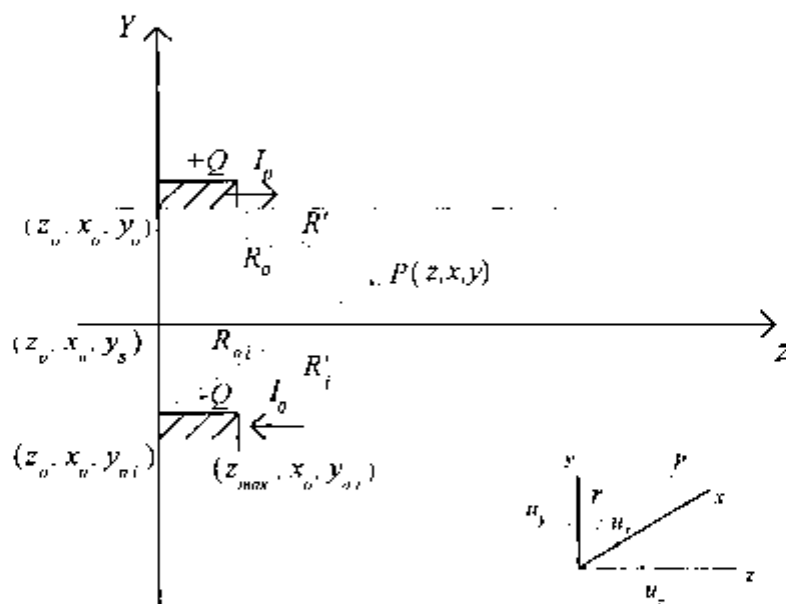


Fig. 4.7.1.4.1 Deslocamento de um degrau de corrente de amplitude I_0 e da sua imagem relacionados ao eixo z

Ressalta-se, porém, que neste caso os deslocamentos dos degraus de corrente e da sua imagem não ocorrem no mesmo eixo, sendo utilizados como recurso no desenvolvimento das expressões apresentadas a seguir dois sistemas de coordenadas cilíndricas associados ao deslocamento da corrente e da sua imagem, respectivamente.

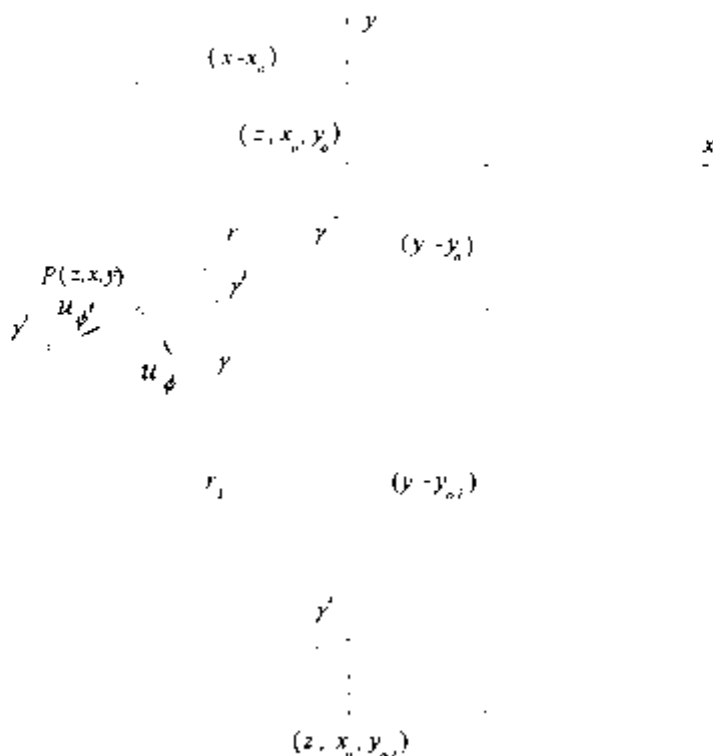


Fig. 4.7.1.4.2 Coordenadas cilíndricas e cartesianas - Plano (x,y)

Destas figuras, obtém-se as relações:

$$z_{max} = z_0 + \frac{\Delta l}{2} \quad (4.77)$$

$$y_{0i} = y_s - (y_0 - y_s) = 2y_s - y_0 \quad (4.65)$$

$$z_{max i} = z_{max} \quad (4.78)$$

$$R_0 = \left[(z - z_0)^2 + r^2 \right]^{1/2} = \left[(z - z_0)^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right]^{1/2} \quad (4.79)$$

$$R_{0i} = \left[(z - z_0)^2 + r_i^2 \right]^{1/2} = \left[(z - z_0)^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_{0i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.80)$$

$$R' = \left[(z - z_{max})^2 + r^2 \right]^{1/2} = \left[(z - z_{max})^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right]^{1/2} \quad (4.81)$$

$$R'_i = \left[(z - z_{max})^2 + r_i^2 \right]^{1/2} = \left[(z - z_{max i})^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_{0i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.82)$$

e as relações associadas à conversão dos sistemas de coordenadas, nas quais γ e γ' são os ângulos formados entre r e entre r_i e o eixo y :

$$\begin{bmatrix} u_\phi \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \gamma & \text{sen} \gamma \\ \text{sen} \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4.83)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\phi'} \\ u_{r'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \gamma' & \text{sen} \gamma' \\ \text{sen} \gamma' & \cos \gamma' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4.84)$$

$$\text{sen} \gamma = \frac{(x - x_0)}{r} \quad (4.85)$$

$$\cos \gamma = \frac{(y - y_0)}{r} \quad (4.86)$$

$$\text{sen} \gamma' = \frac{(x - x_0)}{r_i} \quad (4.87)$$

$$\cos \gamma' = \frac{(y - y_{0i})}{r_i} \quad (4.88)$$

Observa-se que algumas notações, necessárias ao desenvolvimento deste item, receberam, propositalmente, a mesma denominação do item anterior.

As expressões referentes à parcela do campo magnético devido às correntes I_1 , I_2 , I_4 e I_2' , que se deslocam no eixo z de uma célula, são obtidas a partir da função resultante da integral da equação (4.50a) e da soma da parcela correspondente a (4.50d), admitindo-se os sentidos de deslocamento dos degraus de corrente e das suas imagens de z_0 para z_{max} e de z_{max} para z_0 .

Destaca-se, porém, que neste caso o valor da corrente da imagem associado a este limite de integração é $(-I_0)$.

Assim sendo, o valor do campo magnético no ponto $P(z,x,y)$, para $t) \left(\frac{R'}{c} + \frac{z'}{v} \right)$, correspondente ao deslocamento de um degrau de corrente ao longo do eixo z e da sua imagem, é obtido através das equações:

$$\bar{B}_\phi = \bar{B}_{\phi r} + \bar{B}_\phi \quad (4.89)$$

$$\bar{B}_{\phi r} = \left\{ \frac{\mu_0 I_c}{4\pi r} \left[\frac{(z - z_0)}{R_0} - \frac{(z - z'_{max})}{R'} \right] \right\} u_\phi + \left\{ \frac{\mu_0 I_b r}{4\pi c (R')^2} \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{cR'} \left| \frac{z - z'_{max}}{cR'} \right| \right) \right\} u_\phi \quad (4.89a)$$

$$\bar{B}_\phi = \left\{ \frac{\mu_0 I_0}{4\pi r} \left[\frac{(z - z_0)}{R_0} - \frac{(z - z'_{max})}{R'_i} \right] \right\} u_\phi + \left\{ \frac{\mu_0 I_0 r}{4\pi c (R'_i)^2} \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{cR'_i} \left| \frac{z - z'_{max}}{cR'_i} \right| \right) \right\} u_\phi \quad (4.89b)$$

Resultando do efeito da superposição das correntes I'_4 , I'_7 , I'_4 e I'_2 :

$$\bar{B}_{\phi 24}(z_0, x_0, y_0) = B_{\phi 24}(z_0, x_0, y_0) u_\phi + B_{\phi 24}(z_0, x_0, y_0) u_\phi \quad (4.90)$$

$$B_{\phi 24}(z_0, x_0, y_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} [I'_4 SR(I,4) - I'_4 SI(I,4)] FR(4) - \frac{\mu_0}{4\pi} [I'_2 SR(I,2) - I'_2 SI(I,2)] FR(2) \quad (4.90a)$$

$$B_{\phi 24}(z_0, x_0, y_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} [I'_4 SR(I,4) - I'_4 SI(I,4)] FI(4) - \frac{\mu_0}{4\pi} [I'_7 SR(I,2) - I'_2 SI(I,2)] FI(2) \quad (4.90b)$$

Utilizando-se a representação matricial, têm-se as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \bar{B}_{\rho_{24}}(z_0, x_0, y_0) = & \frac{\mu_0}{4\pi} (I'_4 SR(I,4) - I'_4 SI(I,4)) \begin{bmatrix} FR(4) & FI(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\phi \\ u_\rho \end{bmatrix} - \\ & \frac{\mu_0}{4\pi} (I'_2 SR(I,2) - I'_2 SI(I,2)) \begin{bmatrix} FR(2) & FI(2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\phi \\ u_\rho \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.90c)$$

A representação de $\bar{B}_{\rho_{24}}$ em coordenadas cartesianas é obtida substituindo-se em (4.90c) a equação (4.91), derivada das eq. (4.83) e (4.84).

$$\begin{bmatrix} u_\phi \\ u_\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\gamma & \text{sen}\gamma \\ -\cos\gamma' & \text{sen}\gamma' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4.91)$$

Os fatores $FR(n)$, $FI(n)$ e os parâmetros associados são descritos por:

$$\begin{aligned} FR(n) = & \frac{1}{r} \left\{ \frac{A(n)}{[r^2 + (A(n))^2]^{1/2}} - \frac{B(n)}{[r^2 + (B(n))^2]^{1/2}} \right\} + \\ & \frac{r(n)}{c[r^2 + (B(n))^2]} \left[\frac{1}{v} + \frac{1}{c[r^2 + (B(n))^2]^{1/2}} \right] \end{aligned} \quad (4.92)$$

$$\begin{aligned} FI(n) = & \frac{1}{r} \left\{ \frac{C(n)}{[r^2 + (C(n))^2]^{1/2}} - \frac{D(n)}{[r^2 + (D(n))^2]^{1/2}} \right\} + \\ & \frac{r(n)}{c[r^2 + (D(n))^2]} \left[\frac{1}{v} + \frac{1}{c[r^2 + (D(n))^2]^{1/2}} \right] \end{aligned} \quad (4.93)$$

Os parâmetros r e r_i estão representados na Fig. 4.7.1.4.2, e a tabela 4.7.1.4.1 apresenta os valores de $A(n)$, $B(n)$, $C(n)$ e $D(n)$, que se relacionam aos sentidos de percurso dos degraus de corrente e, portanto, aos intervalos de integração anteriormente considerados.

Tabela 4.7.1.4.1 Valores de $A(n)$, $B(n)$, $C(n)$ e $D(n)$ das eq. (4.92) e (4.93)

(n)	$A(n)$	$B(n)$	$C(n)$	$D(n)$
2	$z - z_0 + \frac{\Delta l}{2}$	$z - z_0$	$z - z_0 + \frac{\Delta l}{2}$	$z - z_0$
4	$z - z_0$	$z - z_0 - \frac{\Delta l}{2}$	$z - z_0$	$z - z_0 - \frac{\Delta l}{2}$

4.7.1.5 Campo magnético resultante das correntes que se deslocam no eixo x da célula tridimensional proposta

A similaridade entre as expressões do campo magnético devido à contribuição das correntes I'_3 , I'_1 , I'_3 e I'_1 , que se deslocam ao longo do eixo x de uma célula tridimensional, e as expressões descritas no item anterior é bastante grande.

Desta forma, descrevem-se a seguir as expressões desta parcela de campo magnético da célula tridimensional, observando-se que a Fig. 4.7.1.5.1 e a Fig. 4.7.1.5.2 servem de orientação para o entendimento destas.

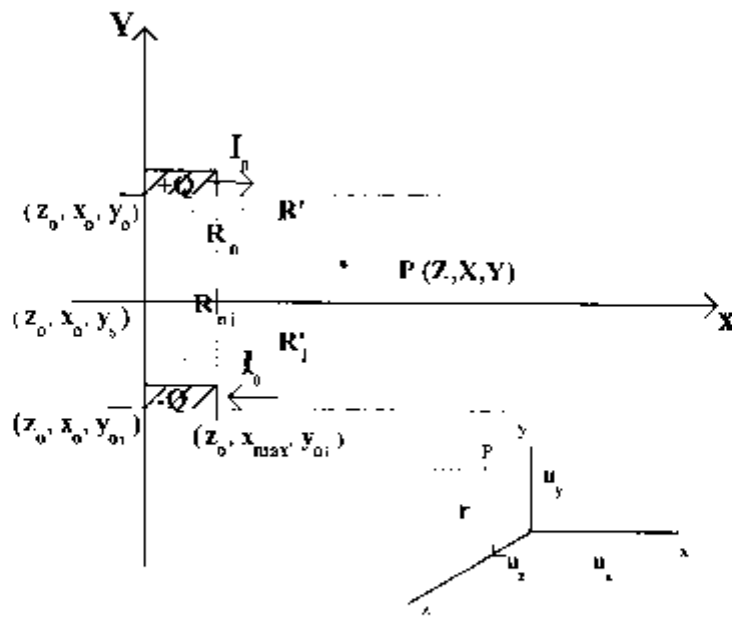


Fig. 4.7.1.5.1 Deslocamento de um degrau de corrente de amplitude I_0 e da sua imagem relacionados ao eixo x

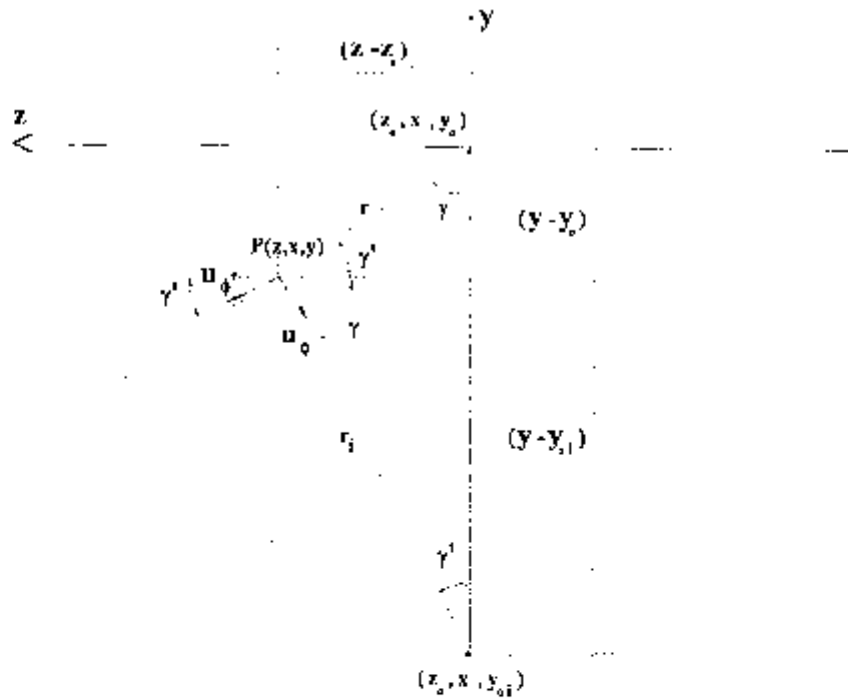


Fig. 4.7.1.5.2 Coordenadas cilíndricas e cartesianas - Plano (z, y)

$$x_{max} = x_0 + \frac{\Delta l}{2} \quad (4.94)$$

$$y_{0i} = y_s - (y_0 - y_s) = 2y_s - y_0 \quad (4.65)$$

$$x_{max i} = x_{max} \quad (4.95)$$

$$R_0 = \left[(x - x_0)^2 + r^2 \right]^{1/2} = \left[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 + (y - y_0)^2 \right]^{1/2} \quad (4.96)$$

$$R_{0i} = \left[(x - x_0)^2 + r_i^2 \right]^{1/2} = \left[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 + (y - y_{0i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.97)$$

$$R' = \left[(x - x_{max})^2 + r^2 \right]^{1/2} = \left[(x - x_{max})^2 + (z - z_0)^2 + (y - y_0)^2 \right]^{1/2} \quad (4.98)$$

$$R'_i = \left[(x - x_{max i})^2 + r_i^2 \right]^{1/2} = \left[(x - x_{max i})^2 + (z - z_0)^2 + (y - y_{0i})^2 \right]^{1/2} \quad (4.99)$$

Neste caso, as relações associadas à conversão dos sistemas de coordenadas, nas quais γ e γ' são os ângulos formados entre r e o eixo y , e entre r_i e o eixo y , são:

$$\begin{bmatrix} u_\phi \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\text{sen} \gamma \\ \text{sen} \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_z \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4.100)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\phi'} \\ u_{r_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma' & -\text{sen} \gamma' \\ \text{sen} \gamma' & \cos \gamma' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_z \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4.101)$$

$$\text{sen} \gamma = \frac{(z - z_0)}{r} \quad (4.102)$$

$$\cos \gamma = \frac{(y - y_0)}{r} \quad (4.103)$$

$$\text{sen} \gamma' = \frac{(z - z_0)}{r_i} \quad (4.104)$$

$$\cos \gamma' = \frac{(y - y_0)}{r_i} \quad (4.105)$$

Resultando para efeito da superposição das correntes I_3' , I_1' , I_3' e I_1' , as seguintes equações para o campo magnético no ponto $P(z, x, y)$, quando $t) \left(\frac{R'}{c} + \frac{z'}{v} \right)$:

$$\vec{B}_{\phi 13}(z_0, x_0, y_0) = B_{\phi 13}(z_0, x_0, y_0)u_\phi + B_{\phi' 13}(z_0, x_0, y_0)u_{\phi'} \quad (4.106)$$

$$B_{\phi 13}(z_0, x_0, y_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} [I_3' SR(I, 3) - I_3' SI(I, 3)] FR(3) - \frac{\mu_0}{4\pi} [I_1' SR(I, 1) - I_1' SI(I, 1)] FR(1) \quad (4.106a)$$

$$B_{\phi' 13}(z_0, x_0, y_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} [I_3' SR(I, 3) - I_3' SI(I, 3)] FI(3) - \frac{\mu_0}{4\pi} [I_1' SR(I, 1) - I_1' SI(I, 1)] FI(1) \quad (4.106b)$$

e as seguintes expressões quando se utiliza a representação matricial:

$$\vec{B}_{\phi 13}(z_0, x_0, y_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} (I_3' SR(I, 4) - I_3' SI(I, 4)) \begin{bmatrix} FR(3) & FI(3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\phi \\ u_{\phi'} \end{bmatrix} - \frac{\mu_0}{4\pi} (I_1' SR(I, 2) - I_1' SI(I, 2)) \begin{bmatrix} FR(1) & FI(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\phi \\ u_{\phi'} \end{bmatrix} \quad (4.106c)$$

$$\begin{bmatrix} u_\phi \\ u_{\phi'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\operatorname{sen} \gamma \\ \cos \gamma' & -\operatorname{sen} \gamma' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (4.107)$$

Os fatores $FR(n)$, $FI(n)$ e os parâmetros associados são descritos por:

$$FR(n) = \frac{1}{r} \left\{ \frac{A(n)}{\left[r^2 + (A(n))^2 \right]^{1/2}} - \frac{B(n)}{\left[r^2 + (B(n))^2 \right]^{1/2}} \right\} + \frac{r(n)}{c \left[r^2 + (B(n))^2 \right] \left(\frac{1}{v} + \frac{|B(n)|}{c \left[r^2 + (B(n))^2 \right]^{1/2}} \right)} \quad (4.108)$$

$$FI(n) = \frac{1}{r_i} \left\{ \frac{C(n)}{\left[r_i^2 + (C(n))^2 \right]^{1/2}} - \frac{D(n)}{\left[r_i^2 + (D(n))^2 \right]^{1/2}} \right\} + \frac{r(n)}{c \left[r_i^2 + (D(n))^2 \right] \left(\frac{1}{v} + \frac{|D(n)|}{c \left[r_i^2 + (D(n))^2 \right]^{1/2}} \right)} \quad (4.109)$$

cujos parâmetros r e r_i estão representados na Fig. 4.7.1.5.2 e os valores de $A(n)$, $B(n)$, $C(n)$ e $D(n)$ apresentados na tabela 4.7.1.5.1.

Tabela 4.7.1.5.1 Valores de $A(n)$, $B(n)$, $C(n)$ e $D(n)$ das eq. (4.108) e (4.109)

(n)	$A(n)$	$B(n)$	$C(n)$	$D(n)$
1	$x - x_0 + \Delta l/2$	$x - x_0$	$x - x_0 + \Delta l/2$	$x - x_0$
3	$x - x_0$	$x - x_0 - \Delta l/2$	$x - x_0$	$x - x_0 - \Delta l/2$

4.7.1.6 Considerações gerais sobre as expressões de cálculo do campo magnético

Conforme enfatizado no desenvolvimento das expressões do cálculo do campo magnético, a parcela de campo proporcional à derivada da corrente em função do tempo, correspondente à contribuição da frente de onda, apresenta uma dependência geométrica que é, exclusivamente, função das coordenadas do ponto de avaliação e da "base da frente de onda". Esta dependência é, portanto, diferente daquela relacionada ao valor constante da corrente em que a origem do degrau de corrente também é considerada. Estas observações são evidenciadas, analisando-se as expressões resultantes da soma da integral da equação (4.50a) com a parcela correspondente à equação (4.50d), por exemplo, a equação (4.63a).

Isto é, a contribuição de uma corrente deslocando-se sobre um eixo em um sentido poderá ser diferente daquela que, embora apresente a mesma intensidade, desloca-se em sentido oposto, já que as parcelas de campo devido às frentes de onda podem ser distintas.

Neste trabalho são consideradas, no entanto, algumas simplificações decorrentes do fato de adotar-se as contribuições das imagens como sendo, sempre, devido às frentes de onda dos degraus de corrente concordantes com a orientação dos eixos de coordenadas. Resultam, desta forma, "fatores de antena" únicos, tanto para as correntes refletidas como para as correntes

incidentes das células tridimensionais.

Observa-se, porém, que a adoção destas simplificações não acarretam diferenças significativas de valores, não sendo apreciáveis para pontos distantes do trecho de linha de transmissão considerado e apresentando maior influência em algumas configurações particulares em que as distâncias dos pontos avaliados a estes trechos são pequenas, aproximadamente da mesma ordem de grandeza quando comparadas com a distância radial, e assimétricas com relação aos nós da célula.

4.7.2 Avaliação do campo elétrico

A metodologia de avaliação do campo elétrico utiliza os valores pré-calculados do campo magnético e considera como ponto de partida a equação de Maxwell, aplicável para meios isotrópicos, e lineares descrita a seguir:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = \mu \left(\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (4.110)$$

Na qual:

μ é a permeabilidade do meio (H/m);

ε é a permissividade do meio (F/m);

\vec{J} é densidade de corrente de condução (A/m²), e

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ a densidade de corrente de deslocamento (A/m²)

O vetor definido pela equação anterior corresponde a um sistema escalar de três equações, descrito em coordenadas cartesianas através de cada uma de suas componentes (z , x e y) por:

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu\epsilon} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} - \mu\sigma E_z \right) \quad (4.110a)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu\epsilon} \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} - \mu\sigma E_x \right) \quad (4.110b)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu\epsilon} \left(\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} - \mu\sigma E_y \right) \quad (4.110c)$$

A resolução deste sistema basear-se-á em aproximações obtidas através das diferenças finitas centrais das derivadas parciais no espaço e no tempo, e, conforme descrito anteriormente, nos componentes previamente determinados do campo magnético.

Assim sendo, admitindo-se uma malha regular na região sob análise, e adotando-se a notação (m,n,p) para as coordenadas de um ponto $P(m\Delta z, n\Delta x, p\Delta y)$ e ${}_k F(m,n,p)$ para uma função $F(m\Delta z, n\Delta x, p\Delta y, k\Delta t)$, na qual $\delta l/2 = \Delta z = \Delta x = \Delta y$ é o incremento no espaço e Δt o incremento no tempo, com m, n, p e k inteiros, têm-se [35,38]:

$$\frac{\partial {}_k F(m,n,p)}{\partial z} = \frac{{}_k F(m+1,n,p) - {}_k F(m-1,n,p)}{\delta l} + O(\delta l)^2 \quad (4.111)$$

$$\frac{\partial {}_k F(m,n,p)}{\partial t} = \frac{{}_{k+1/2} F(m,n,p) - {}_{k-1/2} F(m,n,p)}{\Delta t} + O(\Delta t)^2 \quad (4.112)$$

Observa-se que as precisões das expressões anteriores são de segunda ordem, $O(\delta l)^2$ e $O(\Delta t)^2$, respectivamente, resultantes do truncamento das

séries de Taylor correspondentes, e que as as expressões relacionadas aos demais eixos são determinadas de maneira análoga.

Desta forma, aplicando-se estas expressões nas eq. (4.110a), (4.110b) e (4.110c), resultantes da equação de Maxwell, obtêm-se [35,38]:

$$\begin{aligned} {}_{\kappa+\frac{1}{2}}E_z(m, n, p) = & \left(1 - \frac{\sigma(m, n, p)\Delta t}{\varepsilon(m, n, p)}\right) {}_{\kappa-\frac{1}{2}}E_z(m, n, p) + \\ & \frac{\Delta t}{\mu(m, n, p)\varepsilon(m, n, p)\partial l} \left[{}_{\kappa}B_y(m, n+1, p) - {}_{\kappa}B_y(m, n-1, p) + \right. \\ & \left. {}_{\kappa}B_x(m, n, p-1) - {}_{\kappa}B_x(m, n, p+1) \right] \end{aligned} \quad (4.113)$$

$$\begin{aligned} {}_{\kappa+\frac{1}{2}}E_x(m, n, p) = & \left(1 - \frac{\sigma(m, n, p)\Delta t}{\varepsilon(m, n, p)}\right) {}_{\kappa-\frac{1}{2}}E_x(m, n, p) + \\ & \frac{\Delta t}{\mu(m, n, p)\varepsilon(m, n, p)\partial l} \left[{}_{\kappa}B_z(m, n, p+1) - {}_{\kappa}B_z(m, n, p-1) + \right. \\ & \left. {}_{\kappa}B_y(m-1, n, p) - {}_{\kappa}B_y(m+1, n, p) \right] \end{aligned} \quad (4.114)$$

$$\begin{aligned} {}_{\kappa+\frac{1}{2}}E_y(m, n, p) = & \left(1 - \frac{\sigma(m, n, p)\Delta t}{\varepsilon(m, n, p)}\right) {}_{\kappa-\frac{1}{2}}E_y(m, n, p) + \\ & \frac{\Delta t}{\mu(m, n, p)\varepsilon(m, n, p)\partial l} \left[{}_{\kappa}B_x(m+1, n, p) - {}_{\kappa}B_x(m-1, n, p) + \right. \\ & \left. {}_{\kappa}B_z(m, n-1, p) - {}_{\kappa}B_z(m, n+1, p) \right] \end{aligned} \quad (4.115)$$

As expressões anteriores podem ser descritas de uma forma simplificada, se na região considerada o meio for o ar. Neste caso, têm-se:

$$\begin{aligned} {}_{\kappa+\frac{1}{2}}E_z(m, n, p) = & {}_{\kappa-\frac{1}{2}}E_z(m, n, p) + \frac{c^2\Delta t}{\partial l} \left[{}_{\kappa}B_y(m, n+1, p) - \right. \\ & \left. {}_{\kappa}B_y(m, n-1, p) + {}_{\kappa}B_x(m, n, p-1) - {}_{\kappa}B_x(m, n, p+1) \right] \end{aligned} \quad (4.113a)$$

$${}_{\kappa+\frac{1}{2}}E_x(m, n, p) = {}_{\kappa-\frac{1}{2}}E_x(m, n, p) + \frac{c^2 \Delta t}{\delta l} \left[{}_{\kappa}B_z(m, n, p+1) - {}_{\kappa}B_z(m, n, p-1) + {}_{\kappa}B_x(m-1, n, p) - {}_{\kappa}B_x(m+1, n, p) \right] \quad (4.114a)$$

$${}_{\kappa+\frac{1}{2}}E_y(m, n, p) = {}_{\kappa-\frac{1}{2}}E_y(m, n, p) + \frac{c^2 \Delta t}{\delta l} \left[{}_{\kappa}B_x(m+1, n, p) - {}_{\kappa}B_x(m-1, n, p) + {}_{\kappa}B_z(m, n-1, p) - {}_{\kappa}B_z(m, n+1, p) \right] \quad (4.115a)$$

A Fig. 4.7.2.1 apresenta a disposição dos componentes do campo magnético na célula cujo ponto central representa o componente do campo elétrico a ser determinado.

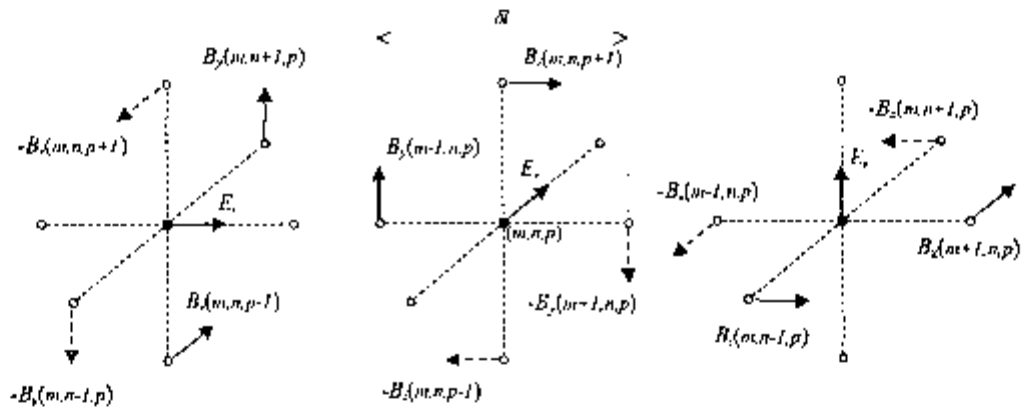


Fig. 4.7.2.1 Arranjos utilizados no cálculo dos componentes do campo elétrico

Além das considerações anteriores, admitir-se-á nestas equações o incremento de tempo $\Delta t = \tau$, considerado na determinação do campo magnético, e a velocidade de propagação da luz dada por $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$.

Nota-se, portanto, que esta metodologia constitui-se em um método híbrido (numérico e analítico) onde os componentes do campo elétrico podem ser determinados em qualquer ponto do espaço, em intervalos de tempo

intercalados de $\tau/2$ com relação aos do campo magnético, obtidos a partir dos valores pré-determinados do campo magnético e da utilização parcial do método das diferenças finitas.

4.7.3 Intervalos de tempo de validação das expressões de campo

Os intervalos de tempo definidos neste item referem-se à validação das expressões do campo magnético resultante da contribuição de cada uma das correntes de uma célula emissora que, uma vez calculado, será utilizado na determinação do campo elétrico associado.

Adota-se como base, a configuração de um degrau de corrente, representado pela Fig. 4.7.3.1, cujo “intervalo de validação” é dado por $R_0/c < t < (\Delta l/2v + R'/c)$, na qual “ v ” é velocidade de deslocamento do degrau de corrente e “ c ” é velocidade da luz.

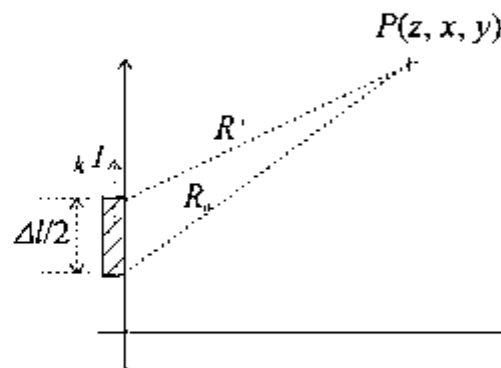


Fig. 4.7.3.1 Deslocamento de um degrau de corrente

A representação de uma curva de corrente através de degraus de

correntes definidos em intervalos de tempo $[t_k - \tau/2, t_k + \tau/2]$, com valor central e incremento de tempo t_k e $\tau = \Delta l/2v$, respectivamente, e valor de pico ${}^k I^*$, é mostrada na Figura 4.7.3.2.

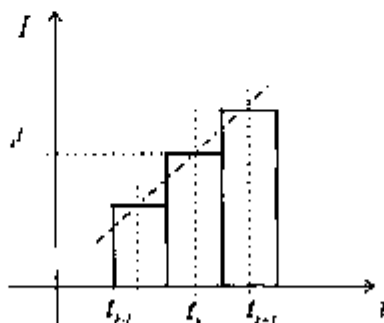


Fig. 4.7.3.2 Trecho de uma curva de corrente, $I = f(t)$

Por outro lado, de uma forma ilustrativa, o deslocamento de um destes degraus ao longo de um trecho de linha de transmissão, de comprimento $\Delta l/2$, correspondentes a um trecho da célula, no intervalo $[t_k - \tau/2, t_k + \tau/2 + \Delta l/2c]$, pode ser representado pela Figura 4.7.3.3.

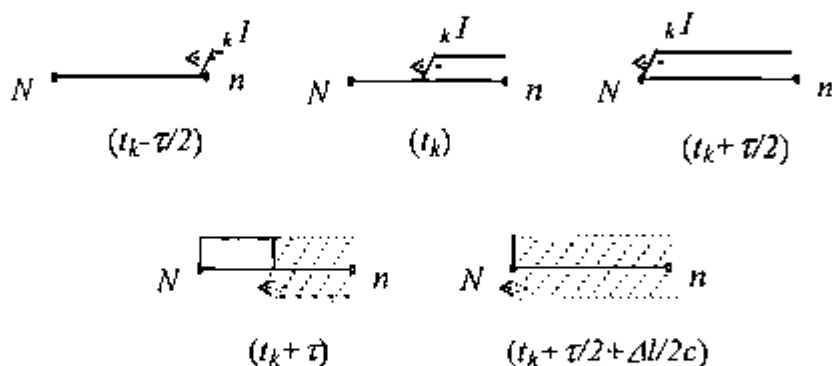


Fig. 4.7.3.3 Deslocamento de um degrau de corrente incidente em um nó "n", no intervalo de validação das expressões de campo

Nota-se que na Fig. 4.7.3.3 o degrau de corrente é representado pela soma de duas funções, uma positiva e uma negativa, deslocada em relação à positiva. As parcelas que se cancelam no trecho considerado correspondem às partes hachuradas, ressaltadas a partir do instante " $t_k + \tau$ ".

Assim, admite-se que a contribuição média de cada uma das correntes da célula tridimensional será obtida através das expressões descritas nos itens 4.7.1.3, 4.7.1.4, e 4.7.1.5 considerando-se como valor médio da corrente o valor de pico do degrau de corrente $I_0 = I_k$. Ressalta-se, também, que para o valor médio do "turn on field" considerar-se-á a parcela relacionada à $|\xi - \xi_{\text{max}}|$, na qual ξ_{max} é o valor da coordenada da frente da onda no eixo de deslocamento do degrau de corrente, dadas pelas posições do nó central ou do nó série das células, conforme o sentido do deslocamento.

Desta forma, as contribuições das correntes da célula emissora serão definidas em intervalos $t_{\text{min}}^r < t < t_{\text{max}}^r$ e $t_{\text{min}}^i < t < t_{\text{max}}^i$, correspondentes às correntes refletidas e incidentes, respectivamente.

Com base nas premissas anteriores e com o auxílio da Fig. 3.1, representação da célula emissora e das correntes refletidas e incidentes, definem-se os limites dos intervalos de validação para as expressões de campo através das seguintes expressões:

$$t_{\text{min}}^r = \frac{R_0}{c} + t_k - \frac{\tau}{2} \quad (4.116)$$

$$t_{max}^r(n) = t_k + \frac{\tau}{2} + \frac{\Delta l}{2c} + \frac{R'(n)}{c} \quad (4.117)$$

$$t_{min}^i = \frac{R'(n)}{c} + t_k - \frac{\tau}{2} \quad (4.118)$$

$$t_{max}^i(n) = t_k + \frac{\tau}{2} + \frac{\Delta l}{2c} + \frac{R_0(n)}{c} \quad (4.119)$$

Destaca-se, desta forma, a importância da vinculação do cálculo do campo, não só à posição onde se deseja avaliar o campo, mas também, aos sentidos de deslocamento dos degraus de corrente das células que estão diretamente relacionados à definição dos intervalos de validação.

4.7.4 Avaliação das tensões induzidas

As tensões induzidas consideradas relacionam-se a circuitos fechados ou "loops", sendo calculadas a partir de uma metodologia simplificada utilizando-se, de uma maneira análoga à utilizada no cálculo do campo elétrico, de aproximações por diferenças finitas centrais na avaliação da seguinte equação:

$$e = - \frac{\partial \int \vec{B} \times d\vec{S}}{\partial t} \quad (4.120)$$

Resultando:

$${}_k e = \sum_w \sum_n \sum_p \left(\frac{{}_k \vec{B} \times \Delta S \vec{n} - {}_{k+1} \vec{B} \times \Delta S \vec{n}}{2\tau} \right) \quad (4.121)$$

na qual:

$\vec{B} = \vec{B}(m, n, p)$, campo magnético no ponto $P(m\Delta z, n\Delta x, p\Delta y)$, e

$\Delta\vec{S} = \Delta S \vec{n} = \Delta S(m, n, p)\vec{n}$ um vetor com direção normal à área elementar ΔS da superfície discretizada definida pela região entre os condutores do circuito considerado, em que $P(m\Delta z, n\Delta x, p\Delta y)$ é o ponto central.

4.7.5. Algumas considerações sobre os aspectos relacionados à precisão e estabilidade do método de cálculo proposto

4.7.5.1 Considerações sobre a precisão do método

Com relação à precisão do método proposto, deve-se ressaltar a importância das dimensões das células escolhidas.

O critério de precisão adotado baseia-se no fato que o comportamento da variação dos campos elétrico e magnético com o tempo não deverá sofrer alterações significativas em função da direção de propagação. Portanto, da mesma forma que no método das diferenças finitas no domínio do tempo tradicional ("FDTD"), a precisão dependerá da escolha do tamanho das células.

No caso do campo elétrico, esta consideração tem como base as expressões 4.110a, 4.110b e 4.110c nas quais pode-se observar que a sua variação no tempo é função da variação do campo magnético no espaço.

Quanto ao campo magnético, devido a metodologia de cálculo proposta, a precisão dos valores obtidos estão relacionados à resposta das células da estrutura aos pulsos de tensão e corrente.

Para se atender as condições anteriores, adotam-se como dimensões das células vinculadas à estrutura e à região interna valores inferiores à fração do comprimento de onda, normalmente da ordem de $\lambda/20$ a $\lambda/10$ [35,38-40].

Com relação ao incremento de tempo associado à determinação do campo elétrico, a condição pré-estabelecida $\Delta t = \tau$ advém das condições intrínsecas do método. Nota-se que os valores dos campos elétricos são determinados em instantes intercalados aos dos campos magnéticos pré-calculados, considerando-se variações iguais à metade do incremento de tempo destes.

Isto é, as condições necessárias para se estabelecer os valores de incremento de tempo que garantam uma precisão satisfatória e o "sincronismo" do método são estabelecidos ao se definir a dimensão da célula tridimensional relacionada ao cálculo dos pulsos de tensão e corrente na estrutura, necessários à determinação do campo magnético.

Desta forma, diferentemente do "FDTD" tradicional, não existe, à princípio, vínculo entre as dimensões lineares da célula " δ ", relacionada ao cálculo do campo elétrico, e o intervalo de tempo " Δt " escolhido.

Recomenda-se, no entanto, como critério prático, a adoção de valores de $\Delta t < (\delta/2c)$ no processo inicial de cálculo do campo elétrico em regiões,

cujas distâncias aos meios condutores são pequenas. Assim, mantendo-se o intervalo de tempo $\Delta t = \tau$, a amostragem inicial dos valores intermedeários do campo magnético será realizada utiliza-se do recurso da interpolação.

4.7.5.2 Considerações sobre a estabilidade do método

Ao analisar a estabilidade do método, deve-se verificar a eventual possibilidade da ocorrência acumulativa de erros.

No caso do campo magnético, por ser determinado a partir dos valores das correntes nas estruturas, os erros associados resultam basicamente da avaliação da resposta impulsiva da célula, não sendo acumulativos em função das características do método proposto. O método proposto é um método híbrido (numérico e analítico), desenvolvido a partir do método "TLM", que apresenta como principal característica o fato de não apresentar problemas relacionados à convergência, estabilidade ou soluções espúrias [35].

Por outro lado, ao se observar as expressões de cálculo do campo elétrico, nota-se que os erros resultarão dos valores do campo magnético e do valor do campo elétrico obtido a partir do seu valor no instante inicial ($k=0$).

Menciona-se, porém, que esses erros não são acumulativos ou "amplificados", já que, ao se considerar o meio como sendo o ar, o fator multiplicativo do campo elétrico, grandeza determinada de forma progressiva em função de valores relacionados a instantes de tempo anteriores, sempre

será igual a unidade. Este fato garante que o método proposto é incondicionalmente estável.

4.7.5.3 Aspectos comparativos relacionados com as condições de estabilidade do método "FDTD"

Observa-se que no método "FDTD" tradicional, se as dimensões do "grid" da malha forem iguais ($\Delta z = \Delta x = \Delta y = \delta\xi$), deve-se satisfazer a condição de estabilidade dada por $\sqrt{3}\delta\xi > c\Delta t$ ou $\Delta t < \sqrt{3}(\delta\xi/c)$ [38].

Assim, se aplicarmos, isoladamente, esta condição na análise de estabilidade quando relacionada ao cálculo do campo magnético, nota-se que a condição proposta sempre será satisfeita, já que o incremento de tempo adotado $\Delta t = \Delta l/2c$ é menor que $\sqrt{3}(\Delta l/2c)$.

Da mesma forma, quando considerado o campo elétrico, observa-se que, se admitirmos δl como uma fração de Δl ou $\delta\xi = \delta l/2 = \Delta l/2n$ ($n \geq 1$), a condição anteriormente descrita também estará sempre satisfeita.

Apesar das diferenças metodológicas e de não se observar problemas de instabilidade nas aplicações realizadas no decorrer deste trabalho, pode-se recomendar, também neste caso, o mesmo critério descrito no item 4.7.5.1 quando da avaliação inicial do campo elétrico em regiões próximas aos meios condutores onde δl for menor que Δl , ou seja: $\Delta t < (\delta l/2c)$.

5. RESULTADOS

Com a finalidade de mostrar o estágio atual e o potencial desta ferramenta, apresentamos neste item algumas aplicações do método proposto nas quais são enfatizados, principalmente, os aspectos associados ao campo magnético.

5.1 Caso Geral

A aplicação selecionada refere-se à simulação no domínio do tempo do campo magnético, da distribuição de corrente em partes do S.P.C.D.A. e da tensão induzida em um "loop" metálico posicionado em diferentes pontos no interior de uma edificação, estrutura metálica, quando diretamente atingida por uma descarga atmosférica.

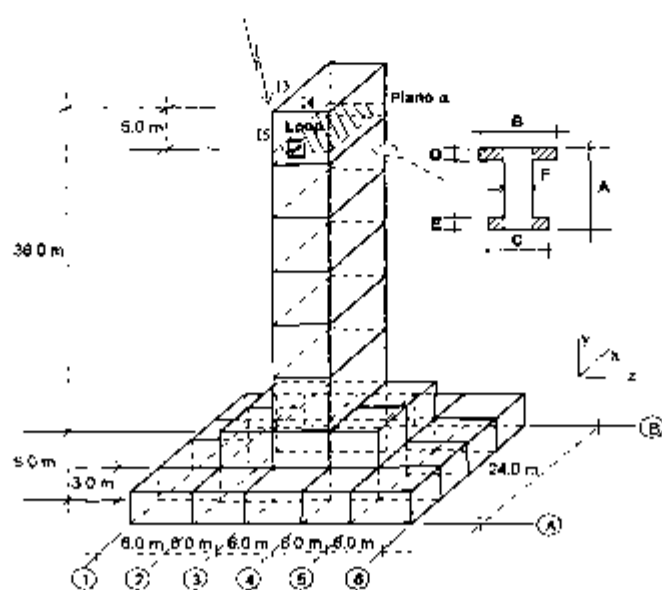


Fig. 5.1.1 Esboço da estrutura metálica

A Fig. 5.1.1 apresenta um esboço da estrutura considerada, na qual são apresentadas suas características geométricas, tais como suas dimensões principais e a seção transversal das estruturas metálicas, o ponto atingido pela descarga atmosférica e uma das regiões sob análise.

5.1.1 Critérios gerais

Os seguintes critérios foram adotados na determinação dos perfis do campo magnético, das distribuições de correntes e das tensões induzidas:

- As vigas e colunas da estrutura metálica da edificação foram consideradas como componentes naturais do S.P.C.D.A., correspondentes à malha de captação superior e às descidas, respectivamente;
- Com base nas dimensões médias da edificação considerada, a estrutura foi dividida em células idênticas com distâncias entre nós série " $\Delta l=6,0m$ ";
- Cada condutor do S.P.C.D.A. foi representado através de um condutor cilíndrico de diâmetro circular equivalente " $d=0,15m$ ";
- As impedâncias características foram calculadas para cada elemento da estrutura, adotando-se, porém, os valores médios para os trechos de linhas verticais (236Ω) e horizontais (372Ω);
- Admitiu-se que o solo possui baixa resistividade, assumindo-se um valor constante de resistência de aterramento igual a 10Ω para cada

eletrodo de terra relacionado às descidas do S.P.C.D.A., não sendo considerado o eventual efeito da ionização do solo;

- A descarga atmosférica foi representada através da seguinte função, detalhada anteriormente no item 4.3:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad (5.1)$$

$$\eta = \exp\left[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_1/\tau_2)^{1/n}\right] \quad (5.1a)$$

Admitiu-se $I_0 = 50,0\text{kA}$; $\tau_1 = 0,25\mu\text{s}$, $\tau_2 = 2,5\mu\text{s}$, e $n = 2$ como parâmetros típicos da forma de onda da corrente do raio;

- O "loop" considerado apresenta uma área de $1,0\text{m}^2$, situando-se no plano (z,y) e ao longo da diagonal definida pelo ponto de queda da descarga atmosférica. Foram adotadas as posições correspondentes ao ponto central da diagonal e aos pontos próximos aos trechos verticais da estrutura (descidas) nas avaliações das tensões induzidas, e
- Definiu-se o ponto de incidência da descarga atmosférica como origem do sistema de coordenadas $P(0,0,0)$.

5.1.2 Perfis do campo magnético

A Fig. 5.1.2.1 apresenta os perfis do campo magnético no instante " $t=1,0\mu\text{s}$ ", correspondentes aos planos $\alpha(y = -5,0)$, $\beta(y = -17,0)$, $\gamma(y = -29,0)$ e $\delta(y = -44,0)$ da estrutura representada na Fig. 5.1.1.

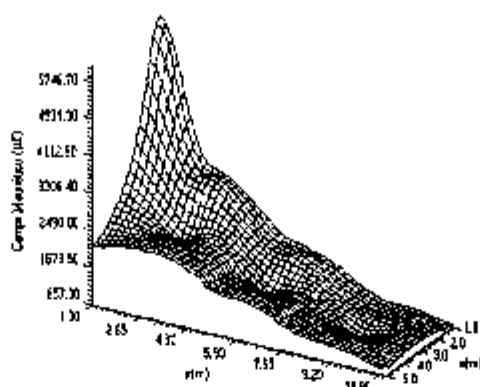
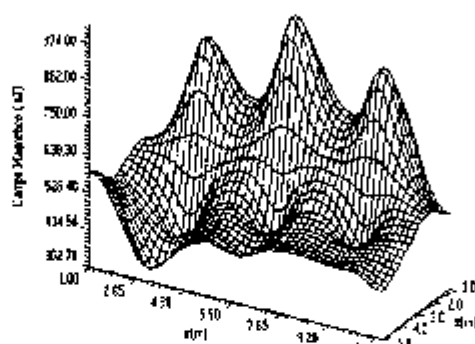
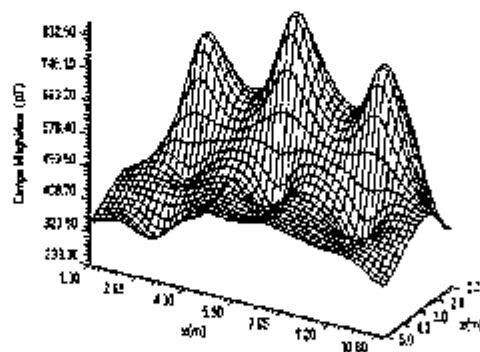
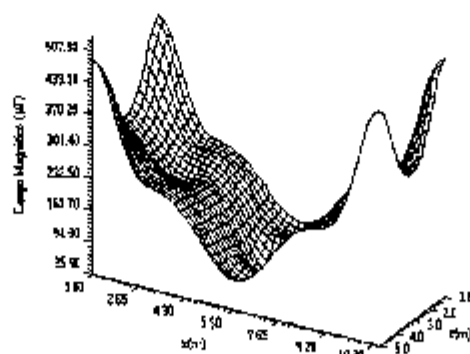
Plano α .Plano β .Plano γ .Plano δ .

Fig. 5.1.2.1 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ no instante " $t=1,0 \mu\text{s}$ ": Planos $\alpha(y = -5,0)$, $\beta(y = -17,0)$, $\gamma(y = -29,0)$ e $\delta(y = -44,0)$

As figuras apresentadas a seguir representam o campo magnético $B(\mu\text{T})$ em função do tempo $t(\mu\text{s})$ em alguns dos pontos do plano $\alpha(y = -5,0)$ situados na diagonal definida pelo ponto de incidência da descarga atmosférica:

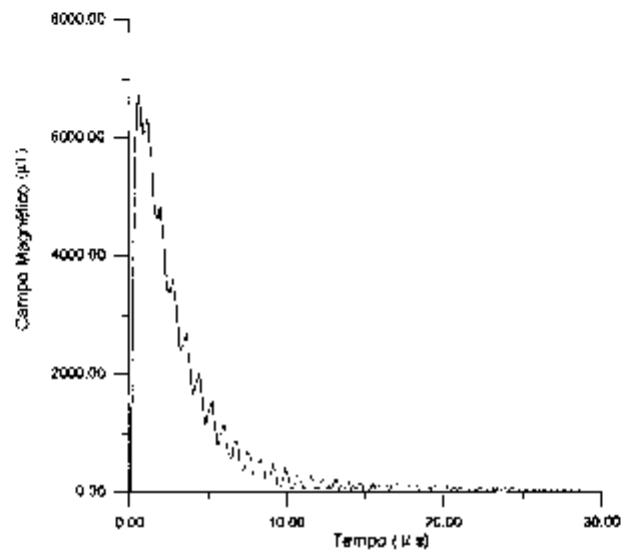


Fig. 5.1.2.2 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ no ponto $P(1,1,-5)$

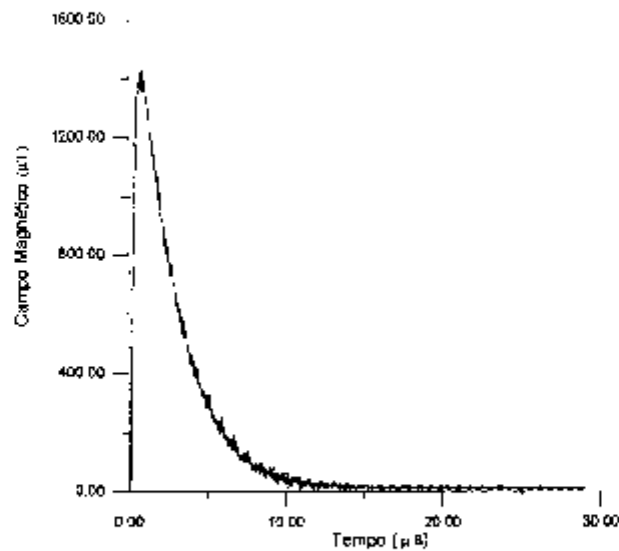


Fig. 5.1.2.3 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ no ponto $P(3,6,-5)$

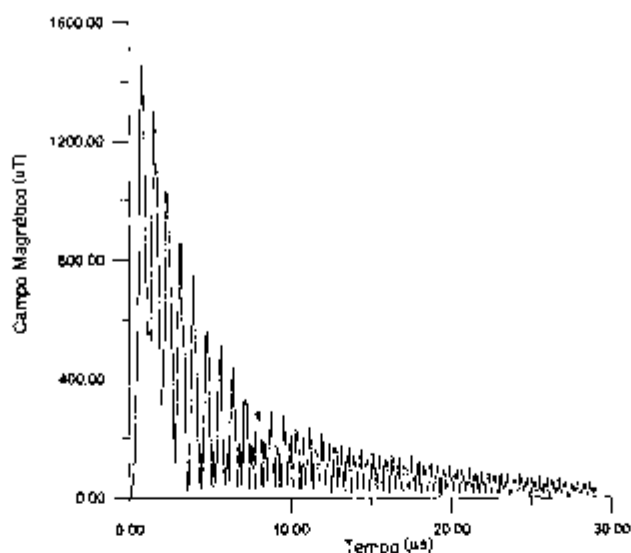


Fig. 5.1.2.4 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ no ponto $P(5,11,-5)$

5.1.3 Tensões induzidas no “loop”

As tensões induzidas (V) em função do tempo (μs) no “loop” situado no plano (z,y) , cujas coordenadas do ponto central são as mesmas descritas no item anterior, são representadas a seguir:

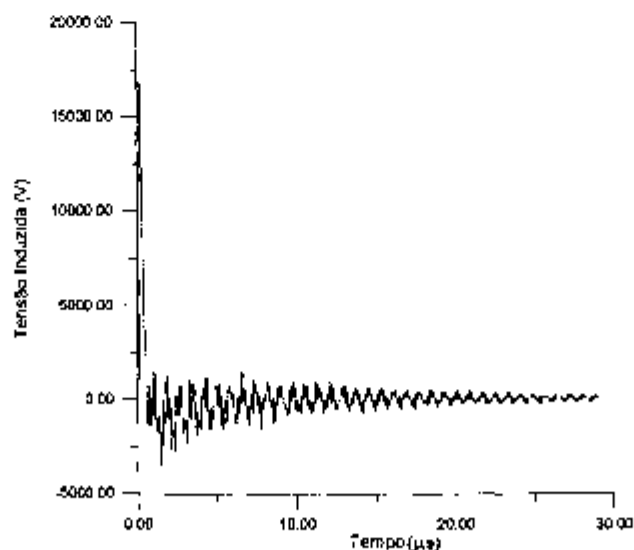


Fig. 5.1.3.1 Tensão induzida (V): “Loop” na posição $P(1,1,-5)$

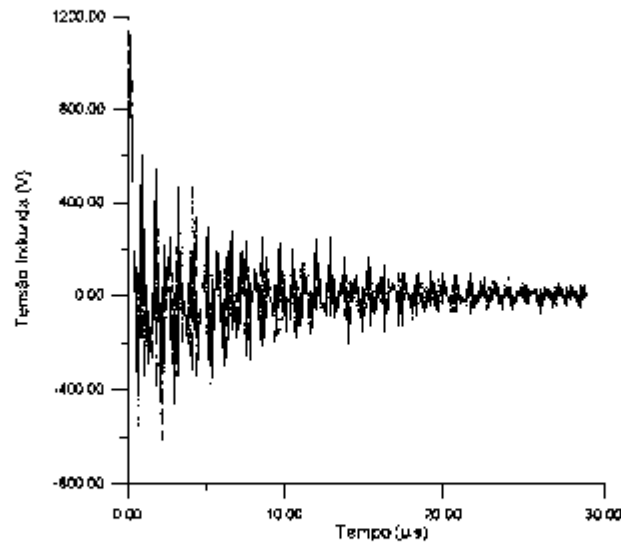


Fig. 5.1.3.2 Tensão induzida (V): "Loop" na posição $P(3,6,-5)$

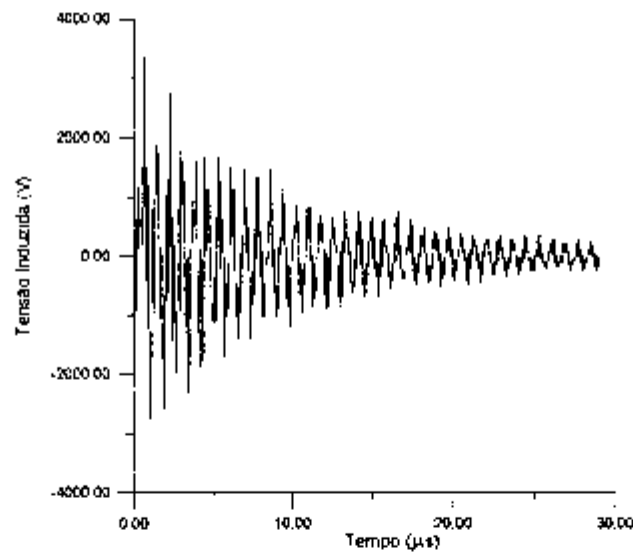


Fig. 5.1.3.3 Tensão induzida (V): "Loop" na posição $P(5,11,-5)$

5.1.4 Distribuição de Corrente

A figura a seguir apresenta a distribuição de corrente nos condutores de uma célula, detalhada na Fig. 5.1.1, cujo nó central corresponde ao ponto de incidência da descarga atmosférica:

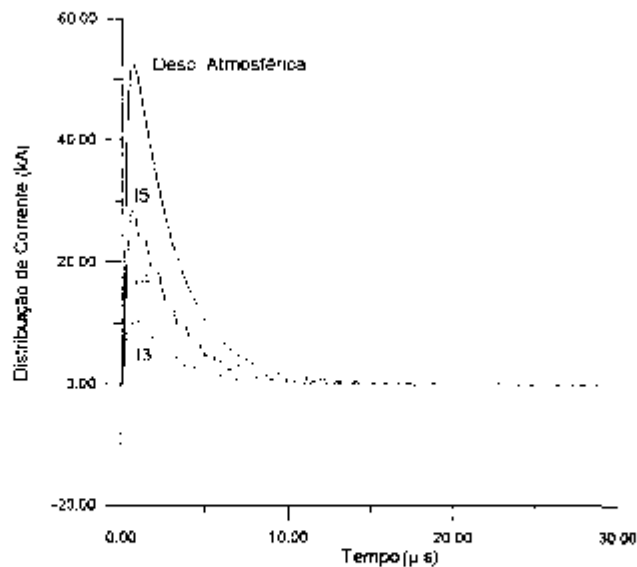


Fig. 5.1.4.1 Distribuição de corrente (kA) em função do tempo (μs)

5.1.5 Comparações com outros métodos

Neste item, alguns resultados obtidos pelo método proposto são comparados com os obtidos por outras metodologias:

- A corrente no condutor de descida ($I5$) e a sua derivada ($dI5/dt$) são comparadas com os resultados obtidos através das expressões relacionadas às funções de distribuição das correntes [26,27], e
- O valor da tensão induzida no “loop”, cujo ponto central é $P(1,1,-5)$, é comparado com o calculado com base na indutância mútua entre o condutor de descida e o “loop”, desprezando-se o efeito dos demais condutores da estrutura. Neste caso, são consideradas as correntes obtidas através das funções de distribuições das correntes [26,27] e pela teoria de linhas de transmissão [32].

As Fig. 5.1.5.1, 5.1.5.2 e 5.1.5.3 apresentam as comparações relacionadas à corrente do condutor de descida, a sua derivada em relação ao tempo e à tensão induzida no “loop”, respectivamente.

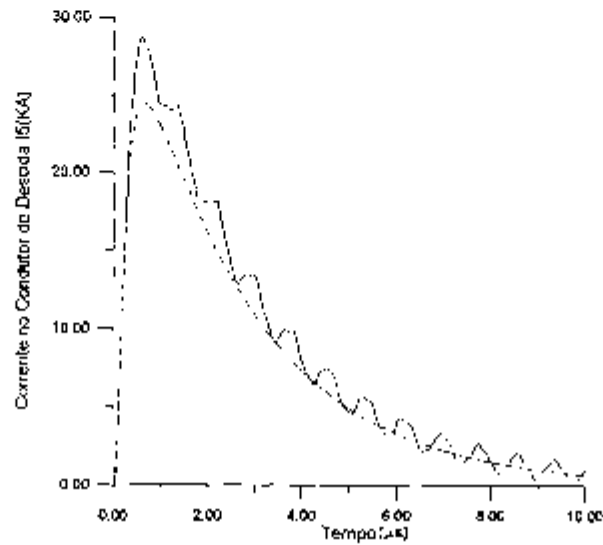


Fig. 5.1.5.1 Distribuição de corrente (kA) em função do tempo (μ s):
Linha cheia [17] e linha tracejada [26,27]

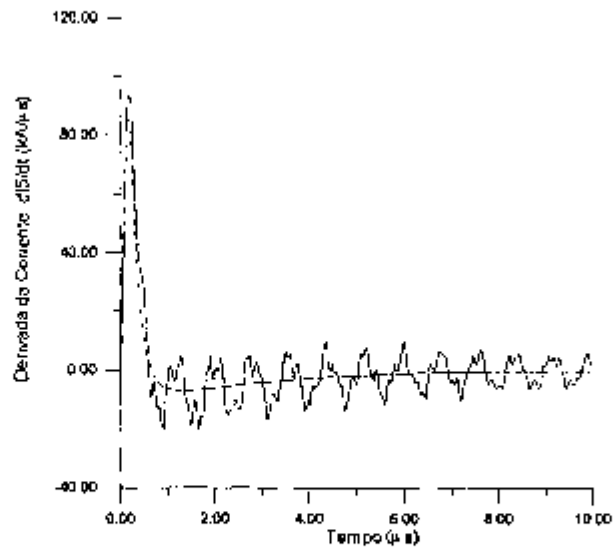


Fig. 5.1.5.2 Derivada da corrente do condutor de descida dI/dt (kA/ μ s):
Linha cheia [17] e linha tracejada [26,27]

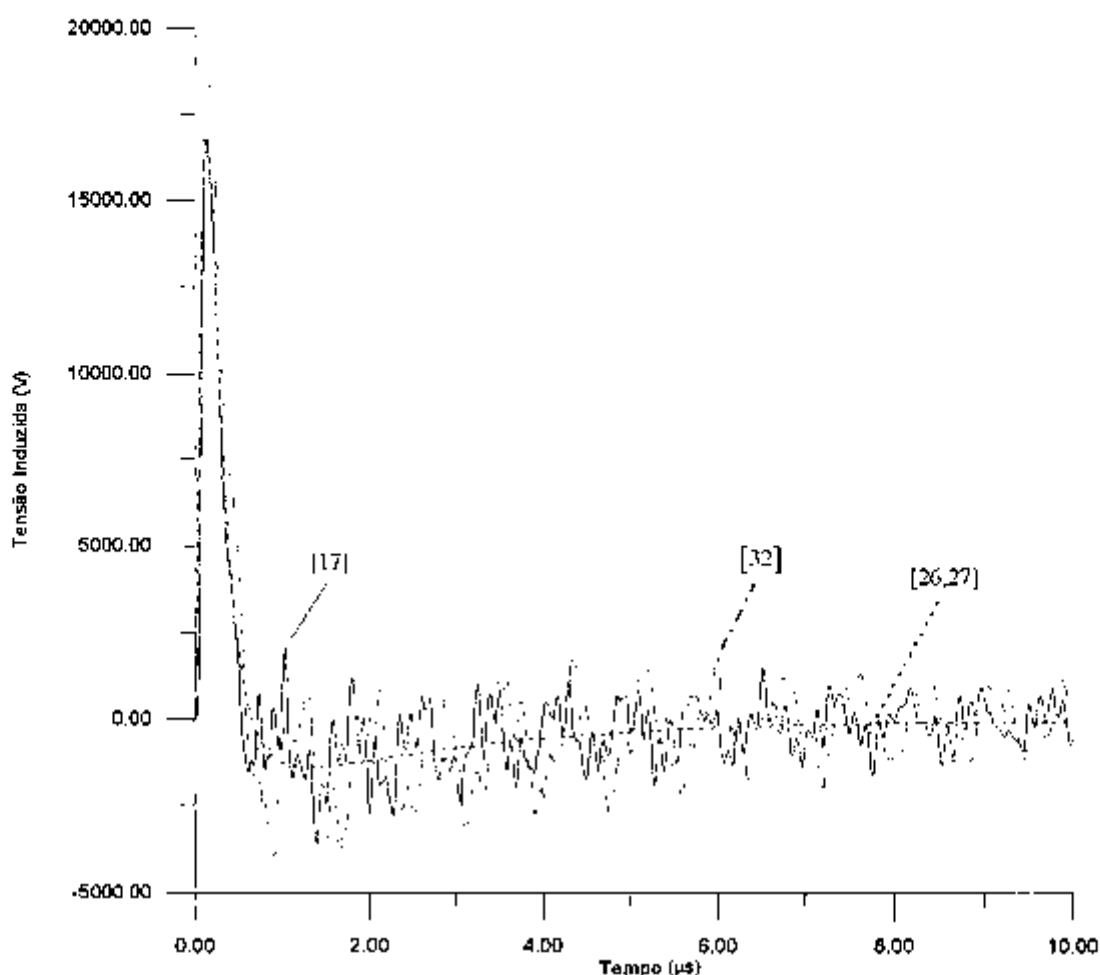


Fig. 5.1.5.3 Tensão induzida no "loop": Linha cheia [17], linha média tracejada [26,27] e linha (traço-ponto) [32]

5.1.6 Avaliação da influência da configuração da estrutura

Os resultados apresentados neste item ilustram a importância da configuração da estrutura no desempenho do S.P.C.D.A.

Como exemplo, são apresentados alguns resultados comparativos entre os perfis do campo magnético e da tensão induzida em uma estrutura cuja configuração é similar ao andar superior da estrutura elevada (Fig. 5.1.6.1) e os relacionados à estrutura original. Observa-se que estes resultados

relacionam-se ao plano $\alpha(y=-5,0)$ e ao ponto $P(3,6,-5)$, posição correspondente ao ponto central do andar superior da estrutura elevada.

Outras comparações poderão ser feitas futuramente, por exemplo, analisando-se os valores do campo magnético e as tensões induzidas ao longo do eixo da estrutura elevada.

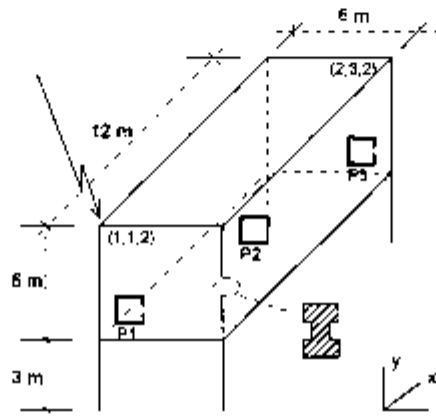


Fig. 5.1.6.1 Esboço da estrutura baixa

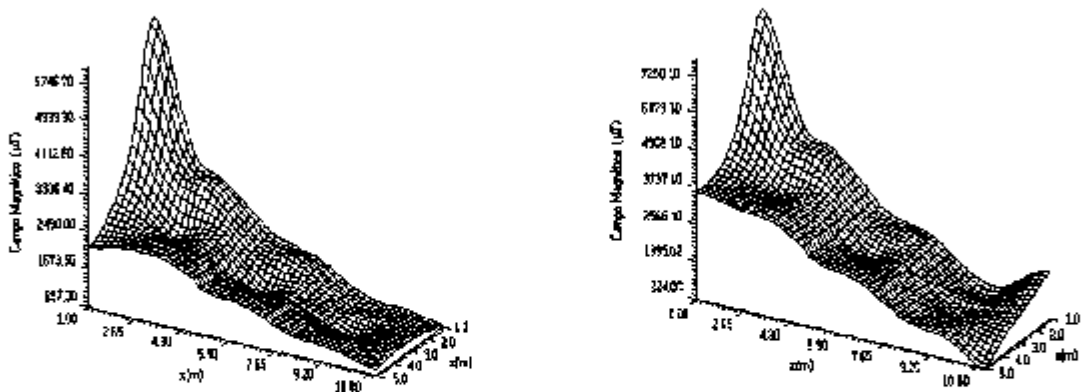


Fig. 5.1.6.2 Campo magnético $B(\mu T)$ no instante " $t=1,0 \mu s$ ":
Plano $\alpha(y = -5,0)$ - Estruturas alta (esquerda) e baixa (direita)

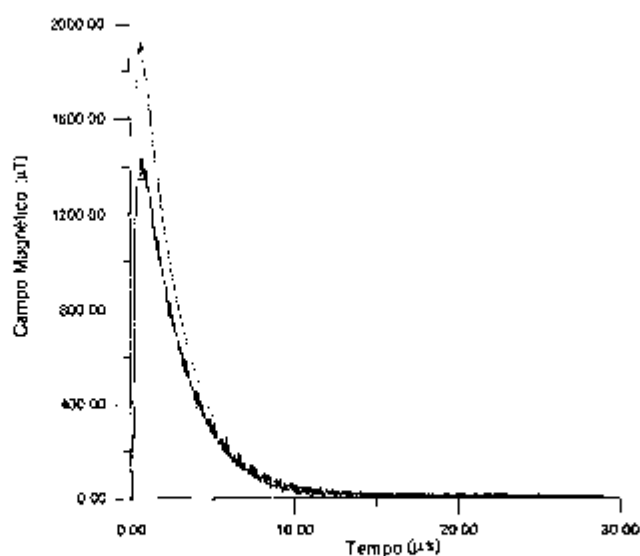


Fig. 5.1.6.3 Campo magnético $B(\mu T)$ - Ponto $P(3,6,-5)$. Estruturas alta (curva inferior) e baixa (curva superior)

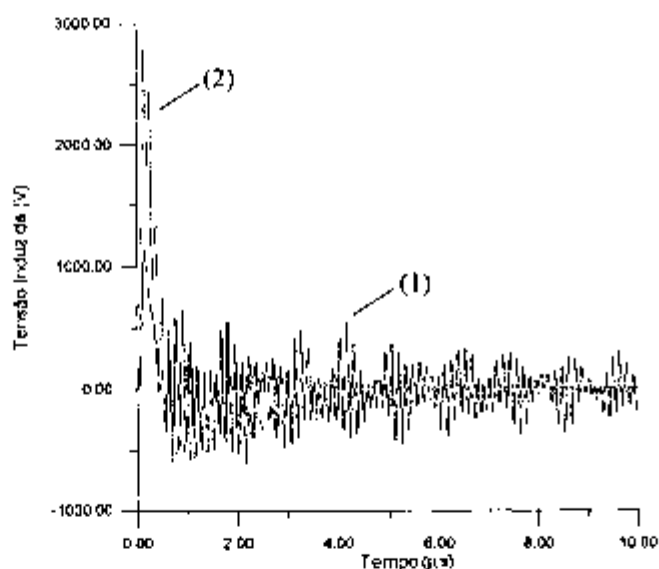


Fig. 5.1.6.4 Tensão induzida no "loop" - Ponto $P(3,6,-5)$: Estruturas alta (1) e baixa (2)

5.2 Influência da variação da impedância característica na determinação do ambiente eletromagnético

Os resultados apresentados a seguir relacionam-se à análise de sensibilidade do ambiente eletromagnético do S.P.C.D.A face à variação

dos valores das impedâncias características com as alturas dos condutores.

Neste caso, as impedâncias características são calculadas com base na aplicação da referência [45] para o cálculo dos condutores horizontais, e na referência [46] para os condutores verticais. Com relação aos “valores médios” das impedâncias características adotadas no caso geral, ressalta-se que as referências [41,42] e [46] foram adotadas.

Menciona-se que a estrutura analisada é a mesma apresentada no caso geral, representada pela Fig. 5.1.1, e que, além das considerações referentes aos valores das impedâncias características, adotou-se neste estudo comparativo um valor de resistência de aterramento equivalente igual a $10,97\Omega$. Observa-se que este valor correspondente a um eletrodo esférico de raio igual a $3,18\text{m}$ em um solo de resistividade média de $200\Omega\text{m}$, sendo mantidos os demais critérios descritos no item 5.1.1.

5.2.1 Campo magnético

As figuras a seguir apresentam os perfis comparativos do campo magnético $B(\mu\text{T})$ em função do tempo $t(\mu\text{s})$ em alguns dos pontos dos planos $\alpha(y = -5,0)$ e $\delta(y = -44,0)$, situados na diagonal definida pelo ponto de incidência da descarga atmosférica, quando se considera ou não os “valores médios” das impedâncias características.

As Fig. 5.2.1.1, 5.2.1.2, e 5.2.1.3 apresentam os perfis do campo magnético nos pontos $P(1,1,-5)$, $P(3,6,-5)$, e $P(5,11,-5)$, e as Fig. 5.2.1.4,

5.2.1.5, e 5.2.1.6 os perfis correspondentes aos pontos $P(1,1,-44)$, $P(3,6,-44)$, e $P(5,11,-44)$:

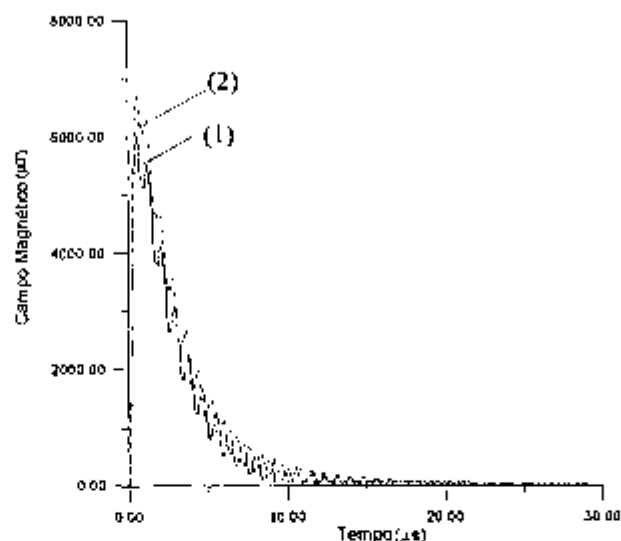


Fig. 5.2.1.1 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ - Ponto $P(1,1,-5)$: Não se adotando os valores médios (1) e com os valores médios (2)

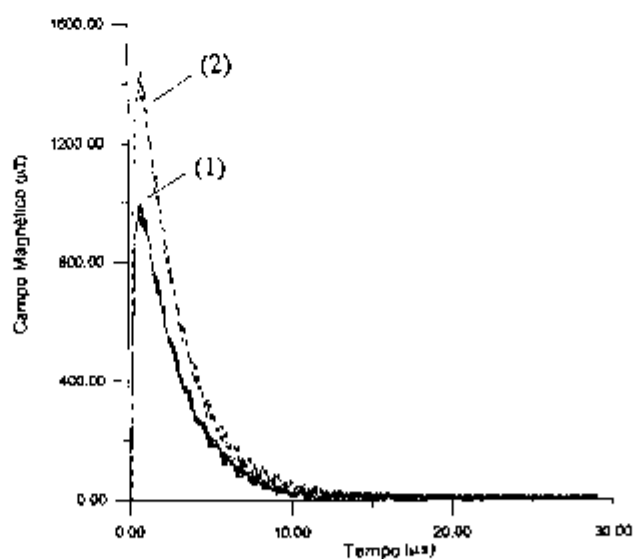


Fig. 5.2.1.2 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ - Ponto $P(3,6,-5)$: Não se adotando os valores médios (1) e com os valores médios (2)

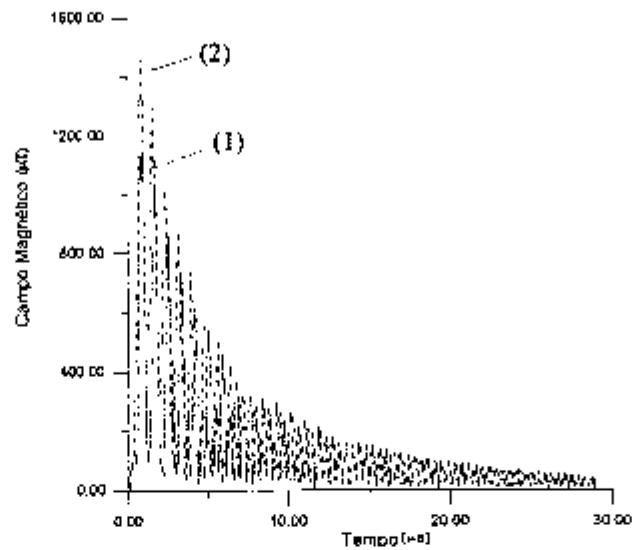


Fig. 5.2.1.3 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ - Ponto $P(5,11,-5)$: Não se adotando os valores médios (1) e com os valores médios (2)

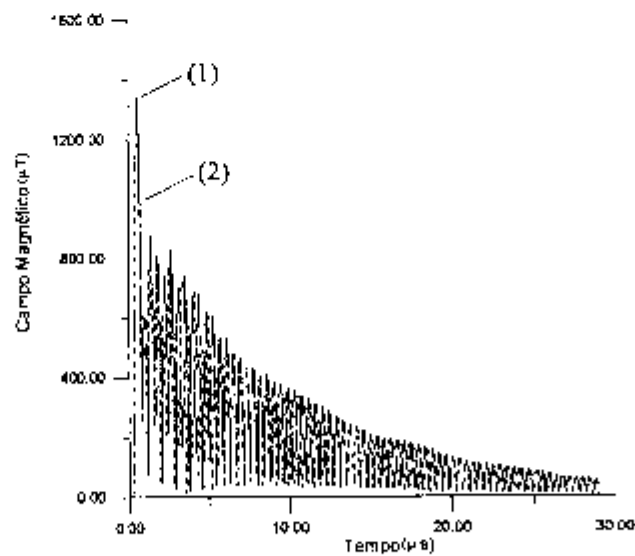


Fig. 5.2.1.4 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ - Ponto $P(1,1,-44)$: Não se adotando os valores médios (1) e com os valores médios (2)

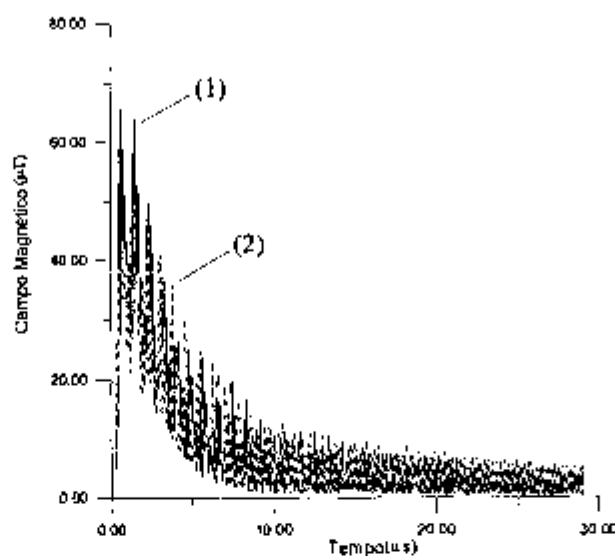


Fig. 5.2.1.5 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ - Ponto $P(3,6,-44)$: Não se adotando os valores médios (1) e com os valores médios (2)

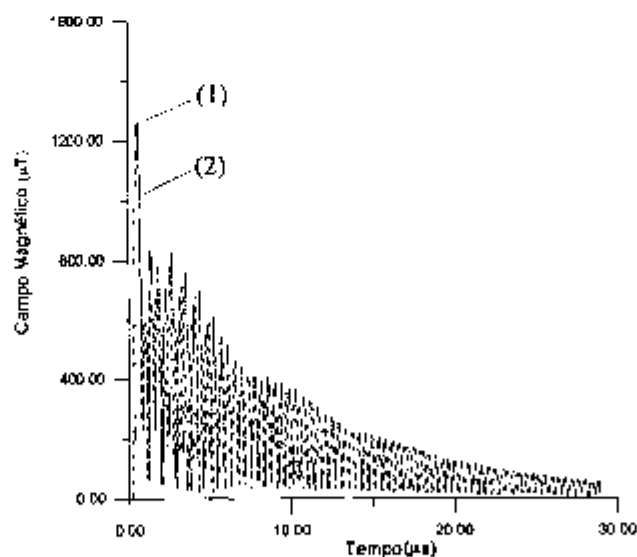


Fig. 5.2.1.6 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ - Ponto $P(5,11,-44)$: Não se adotando os valores médios (1) e com os valores médios (2)

Nota-se, em alguns casos, uma grande similaridade entre os envoltórios dos perfis dos campos magnéticos, sendo que as diferenças são ressaltadas se representarmos as diferenças, em cada instante de tempo, entre os valores de

campos magnéticos associados a cada uma das impedâncias características consideradas. Este fato é comentado no próximo item no qual se consideram as tensões induzidas associadas a estes valores de campo.

5.2.2 Tensões Induzidas

Com o objetivo de facilitar a visualização das diferenças existentes, optou-se pela apresentação das tensões induzidas (V) em função do tempo $t(\mu s)$ nos “loops” situados no plano (z,y) do andar superior da estrutura, região cujos resultados obtidos favorecem a análise comparativa. As coordenadas dos pontos centrais dos “loops” estão descritas nos títulos das figuras.

Desta forma, as figuras apresentadas a seguir são, comparativamente, correspondentes às Fig. 5.1.3.1, Fig. 5.1.3.2, e Fig. 5.1.3.3, respectivamente.

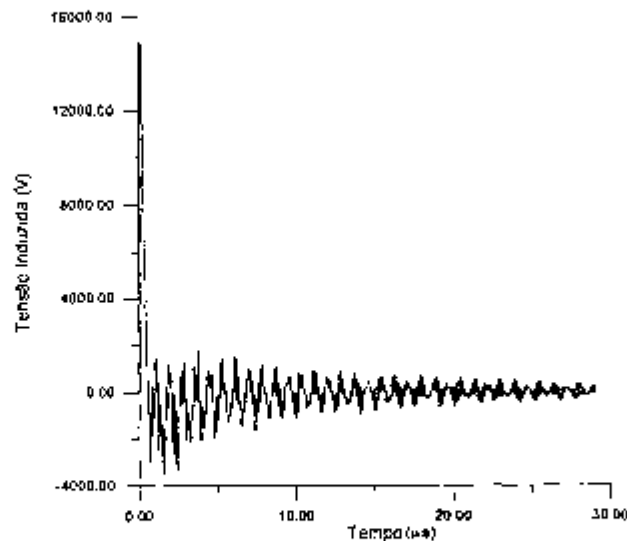


Fig. 5.2.2.1 Tensão Induzida “não” se adotando os valores médios: “Loop” na posição $P(1,1,-5)$

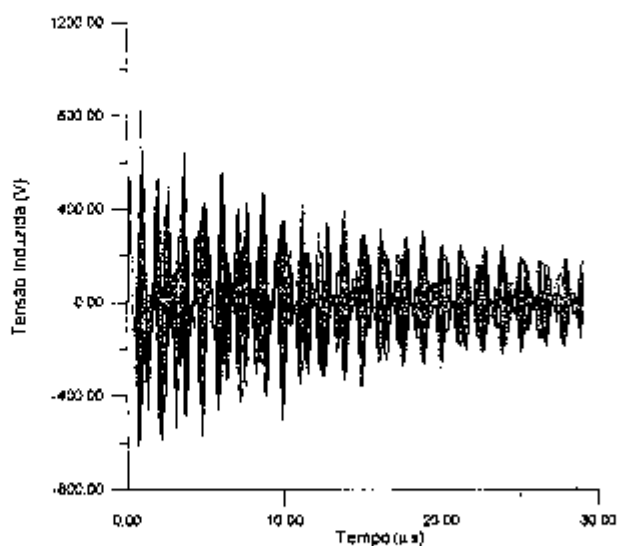


Fig. 5.2.2.2 Tensão Induzida “não” se adotando os valores médios:
“Loop” na posição $P(3,6,-5)$

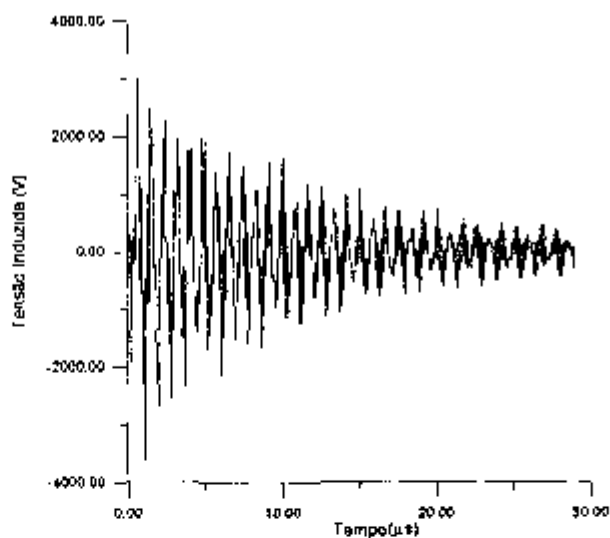


Fig. 5.2.2.3 Tensão Induzida “não” se adotando os valores médios:
“Loop” na posição $P(5,11,-5)$

A Fig. 5.2.2.4 representa a diferença, em cada instante de tempo, entre os valores das tensões induzidas representadas nas Fig. 5.1.3.3 e Fig. 5.2.2.3.

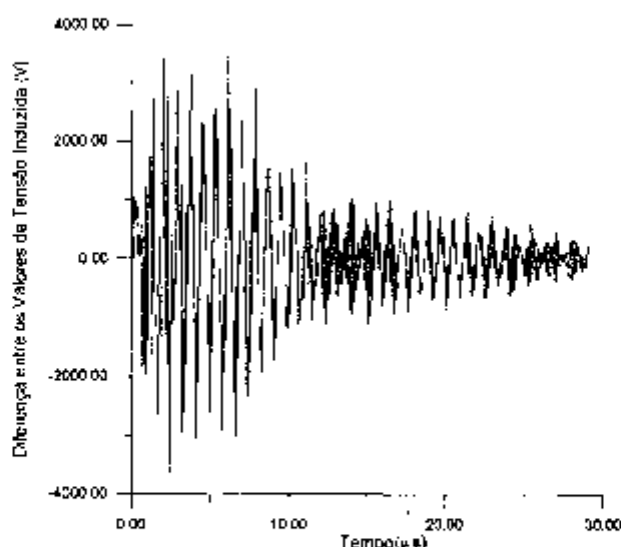


Fig. 5.2.2.7 Diferença entre os valores das tensões induzidas representadas nas Fig. 5.1.3.3 e Fig. 5.2.2.3 - "Loop" na posição $P(5,11,-5)$

Nota-se que esta representação é conveniente, já que os efeitos resultantes do fenômeno de propagação são mais facilmente observados.

5.3 Influência da forma de onda da descarga atmosférica no ambiente eletromagnético

As Fig. 5.3.1 e Fig. 5.3.2 mostram os perfis do campo magnético e da tensão induzida no "loop" cujo ponto central é o ponto $P(1,1,-5)$ do plano α da Fig. 5.1.1, admitindo-se como parâmetros da função (5.1), representativa da descarga atmosférica, $I_0 = 50,0\text{kA}$; $\tau_1 = 1,2\mu\text{s}$, $\tau_2 = 50,0\mu\text{s}$, e $n = 2$.

Neste caso, a análise da influência da forma de onda pode ser feita ao comparar-se estas figuras com as Fig. 5.2.1.1 e Fig. 5.2.2.2 relacionadas aos parâmetros $I_0 = 50,0\text{kA}$; $\tau_1 = 0,25\mu\text{s}$, $\tau_2 = 2,5\mu\text{s}$, e $n = 2$, sendo válidos todos os demais critérios mencionados anteriormente associados a estas figuras.

As Fig. 5.3.1 e Fig. 5.3.2 foram escolhidas com o objetivo de se facilitar a visualização da influência da forma de onda nos perfis do campo magnético e tensões induzidas, ressaltando-se que este comportamento pode ser observado, em maior ou menor grau, nos diversos pontos desta estrutura.

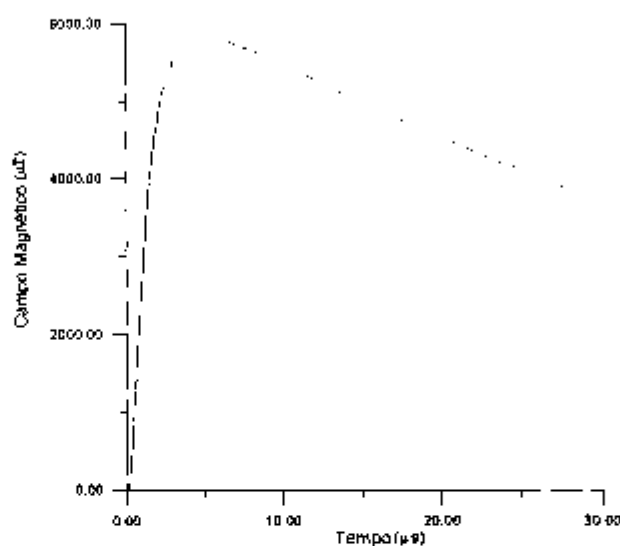


Fig. 5.3.1 Campo magnético $B(\mu T)$ - Ponto $P(1,1,-5)$

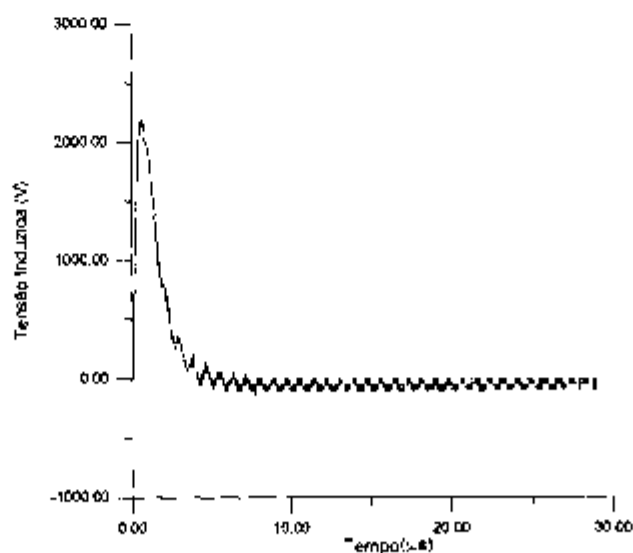


Fig. 5.3.2 Tensão Induzida - "Loop" na posição $P(1,1,-5)$

5.4 Influência do sistema de aterramento na determinação do ambiente eletromagnético

Neste item são apresentados alguns resultados os quais relacionam os valores da resistividade do solo, da resistência de aterramento, bem como o efeito da ocorrência da ionização do solo com o comportamento do ambiente eletromagnético no interior de uma estrutura atingida diretamente por uma descarga atmosférica.

5.4.1 Influência da resistência de aterramento e da resistividade do solo de um sistema de aterramento pré-definido

Inicialmente considerar-se-á a estrutura representada pela Fig. 5.1.6.1, similar ao andar superior da estrutura elevada (Fig. 5.1.1), observando-se que, a menos das considerações referentes ao sistema de aterramento, são válidos os critérios propostos no item 5.2.

O sistema de aterramento adotado corresponde a uma configuração na qual a relação entre o valor de resistência de um eletrodo esférico equivalente (R) e a resistividade do solo (ρ) será admitida constante igual a $R/\rho = 1/20$.

O comportamento do ambiente eletromagnético foi avaliado para valores de resistência " R " iguais a $0,5\Omega$; $1,0\Omega$, 10Ω , e 50Ω , considerando-se um eletrodo esférico de raio equivalente igual a $3,18\text{m}$ imerso em solos de

resistividades (ρ) iguais a $10\Omega\text{m}$, $20\Omega\text{m}$, $200\Omega\text{m}$, e $1000\Omega\text{m}$. Nestes casos, os valores das resistências do sistema de aterramento equivalente correspondem a $0,55\Omega$; $1,10\Omega$; $10,97\Omega$; e $54,85\Omega$, respectivamente.

As Fig. 5.4.1.1 e Fig. 5.4.1.2 mostram os perfis dos campo magnético e da tensão induzida no ponto (1,1,-5) para "R" igual a $0,5\Omega$ e 50Ω .

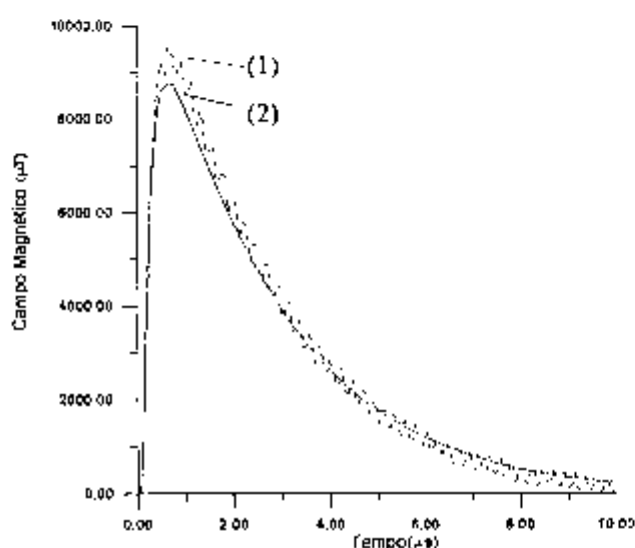


Fig. 5.4.1.1 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ -Ponto $P(1,1,-5)$:
 $R=0,5\Omega$ (1) e $R=50\Omega$ (2)

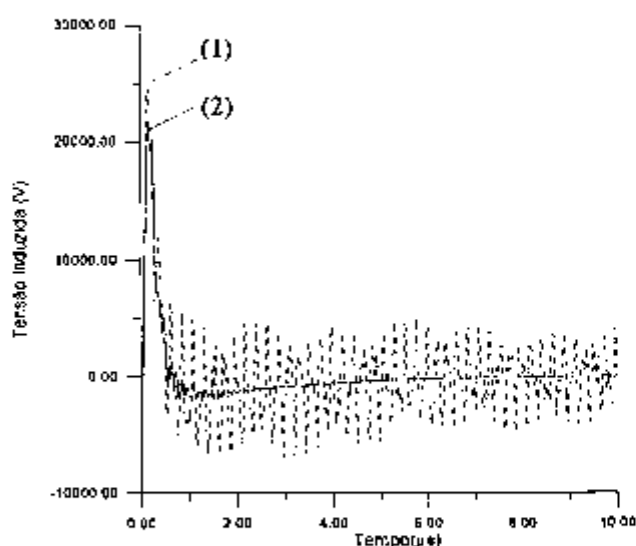


Fig. 5.4.1.2 Tensão Induzida - "Loop" na posição $P(1,1,-5)$:
 $R=0,5\Omega$ (1) e $R=50\Omega$ (2)

As Fig. 5.4.1.3, Fig. 5.4.1.4, e Fig. 5.4.1.4 apresentam os valores das grandezas elétricas associadas ao ponto $P(5,11,-5)$, observando-se para este ponto uma maior sensibilidade do campo magnético e da tensão induzida aos valores da resistência do sistema de aterramento.

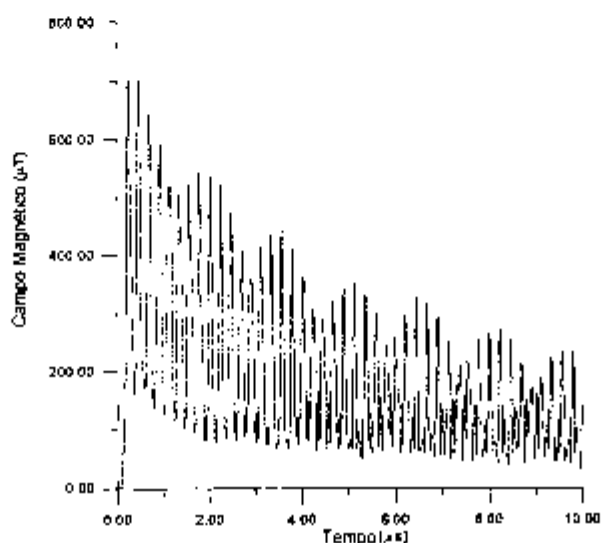


Fig. 5.4.1.3 Campo magnético $B(\mu T)$ -Ponto $P(5,11,-5)$: $R=0,5\Omega$

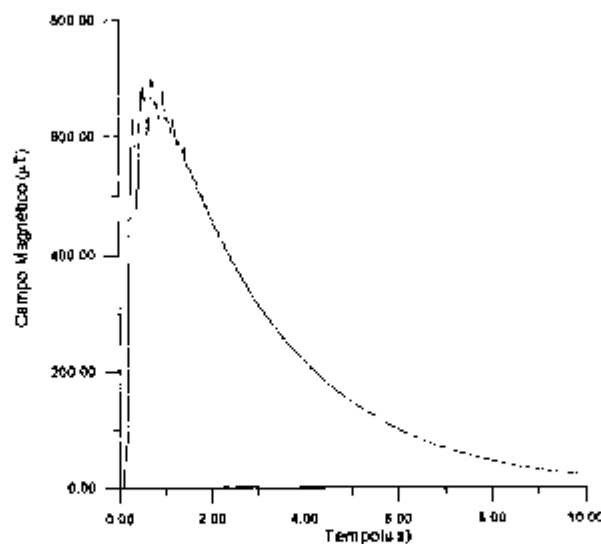


Fig. 5.4.1.4 Campo magnético $B(\mu T)$ -Ponto $P(5,11,-5)$: $R=50\Omega$

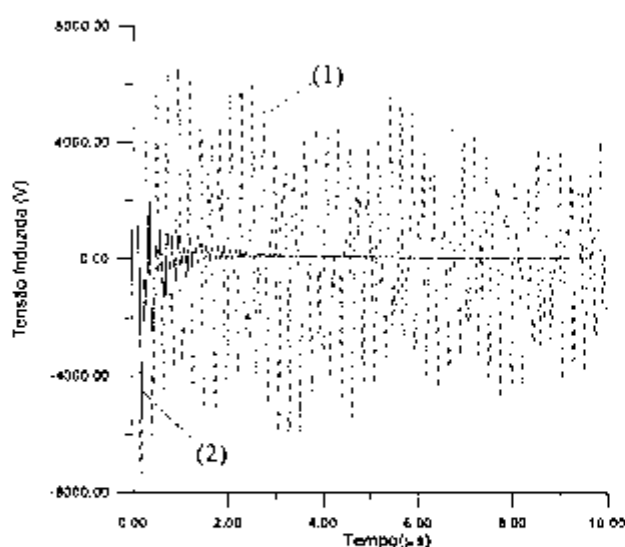


Fig. 5.4.1.5 Tensão Induzida - "Loop" na posição $P(5,11,-5)$:
 $R=0,5\Omega$ (1) e $R=50\Omega$ (2)

Ressalta-se que os resultados apresentados neste item não estão relacionados à ocorrência de ionização do solo, aspecto a ser analisado no próximo item.

5.4.2 Efeito da Ionização do Solo

Os resultados apresentados neste item referem-se a dois sistemas de aterramento com características geométrica e geológicas distintas, porém, com o mesmo valor de resistência de aterramento equivalente, aproximadamente $37,5\Omega$. Os valores de resistividade do solo adotados são $10\Omega\text{m}$ e $200\Omega\text{m}$, com correntes críticas " I_c " iguais a $0,21\text{kA}$ e $7,79\text{kA}$, respectivamente.

Nota-se que, da mesma forma que nas situações anteriores, o efeito resultante nos perfis do campo magnético e da tensão induzida dependerá da posição analisada. Desta forma, apresenta-se a seguir alguns resultados

referentes aos pontos $P(1,1,-5)$ e $P(5,11,-5)$:

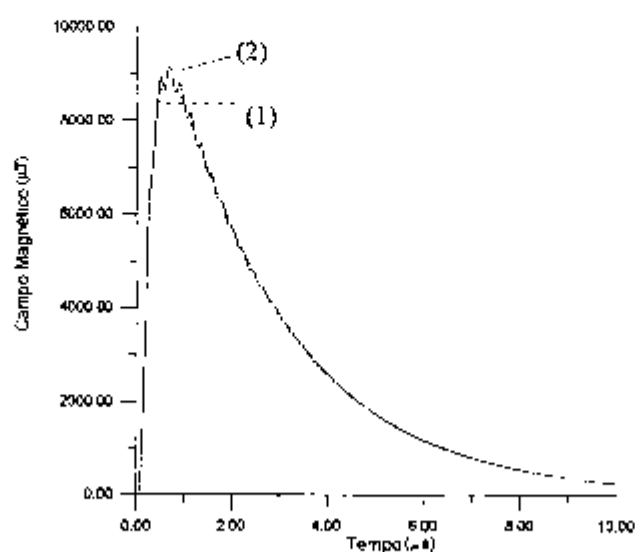


Fig. 5.4.2.1 Campo magnético $B(\mu T)$ -Ponto $P(1,1,-5)$:
 $\rho=200\Omega m$ (1) e $\rho=10\Omega m$ (2)

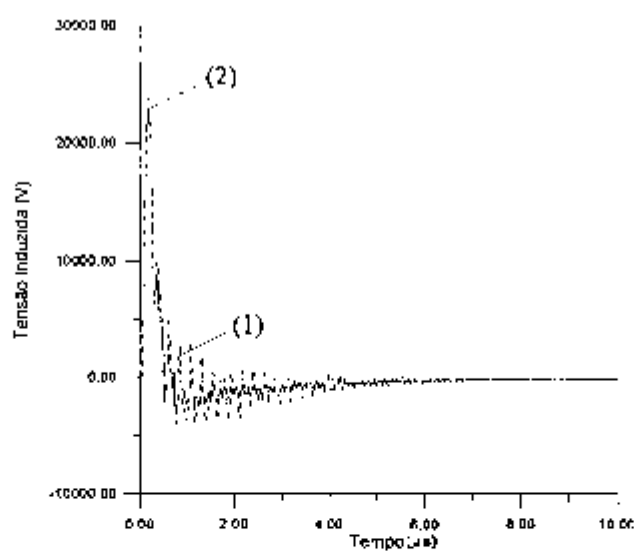


Fig. 5.4.2.2 Tensão Induzida - "Loop" na posição $P(1,1,-5)$:
 $\rho=200\Omega m$ (1) e $\rho=10\Omega m$ (2)

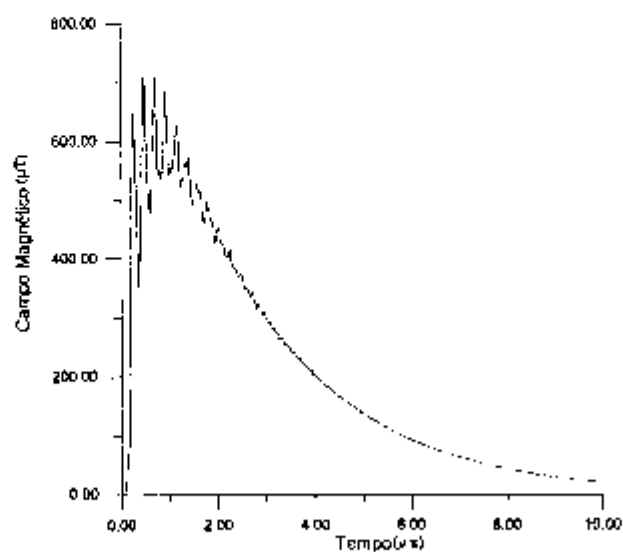


Fig. 5.4.2.3 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ -Ponto $P(5,11,-5)$: $\rho=200\Omega\text{m}$

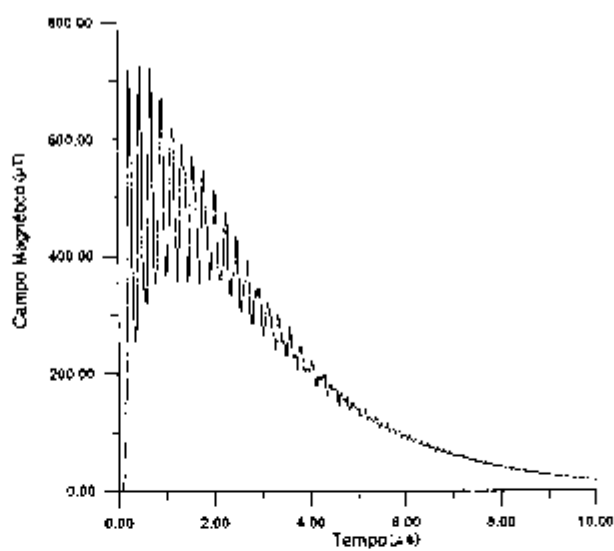


Fig. 5.4.2.4 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ -Ponto $P(5,11,-5)$: $\rho=10\Omega\text{m}$

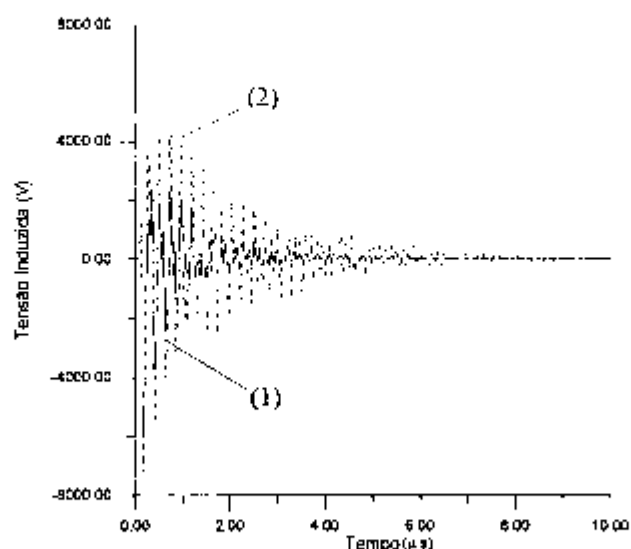


Fig. 5.4.2.5 Tensão Induzida - "Loop" na posição $P(5,11,-5)$:
 $\rho = 200\Omega\text{m}$ (1) e $\rho = 10\Omega\text{m}$ (2)

5.5 Avaliação da influência da configuração da estrutura considerando-se as premissas atuais

De maneira semelhante ao item 5.1.6, apresentam-se neste item alguns resultados comparativos relacionados ao ambiente eletromagnético das estruturas, elevada e baixa, anteriormente descritas.

Menciona-se que, de um modo geral, são válidas as mesmas premissas ressaltadas no item 5.2, destacando-se os dados referentes ao sistema de aterramento: resistência de aterramento equivalente igual a $10,97\Omega$ e resistividade média do solo igual a $200\Omega\text{m}$.

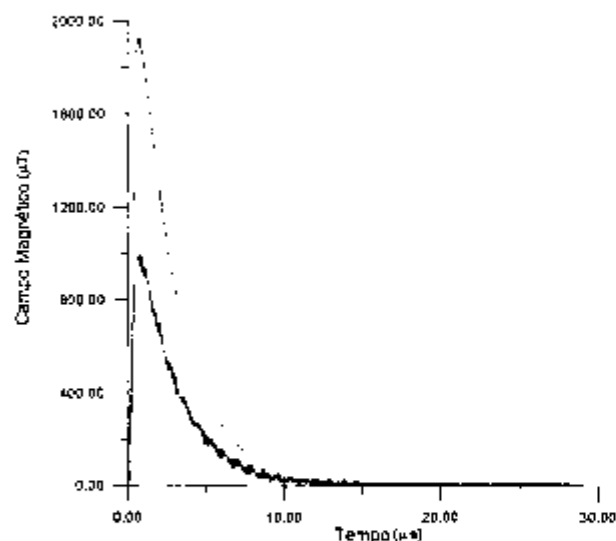


Fig. 5.4.3.1 Campo magnético $B(\mu\text{T})$ - Ponto $P(3,6,-5)$: Estruturas alta (curva inferior) e baixa (curva superior)

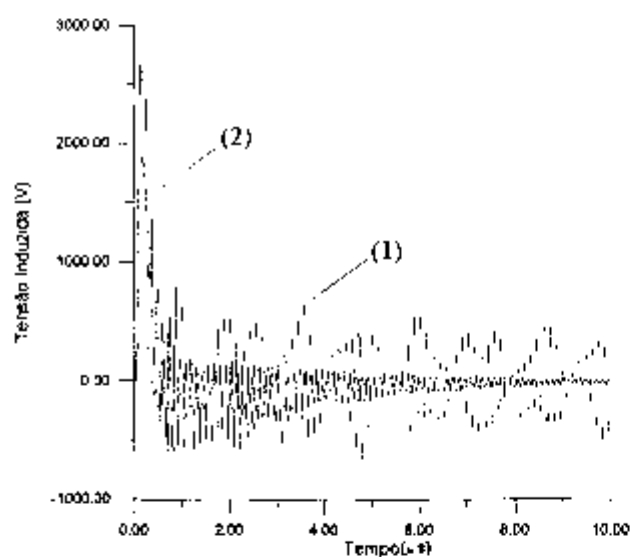


Fig. 5.4.3.2 Tensão induzida no "loop" - Ponto $P(3,6,-5)$. Estruturas alta (1) e baixa (2)

5.6 Coordenação de campo magnético

Os resultados apresentados neste item relacionam-se aos estudos de otimização de leiautes de sistemas elétricos quando considerados os aspectos

de compatibilidade eletromagnética. Em particular, são apresentados alguns resultados úteis nas análises comparativas em que são confrontados os valores de susceptibilidade, definidos em função das classes dos sistemas elétricos, com os valores máximos do campo magnético na região sob análise.

Gostaríamos de mencionar que a estrutura analisada corresponde a uma subestação abrigada da antiga “Eletropaulo”, em cujo projeto original previa-se a sua instalação em uma área urbana da cidade de São Paulo.

5.6.1 Estrutura e região avaliada

As Fig. 5.6.1.1 e Fig. 5.6.1.2 apresentam o esboço de uma estrutura metálica, e a região sob análise considerando-se dois pontos distintos de incidência da descarga atmosférica.

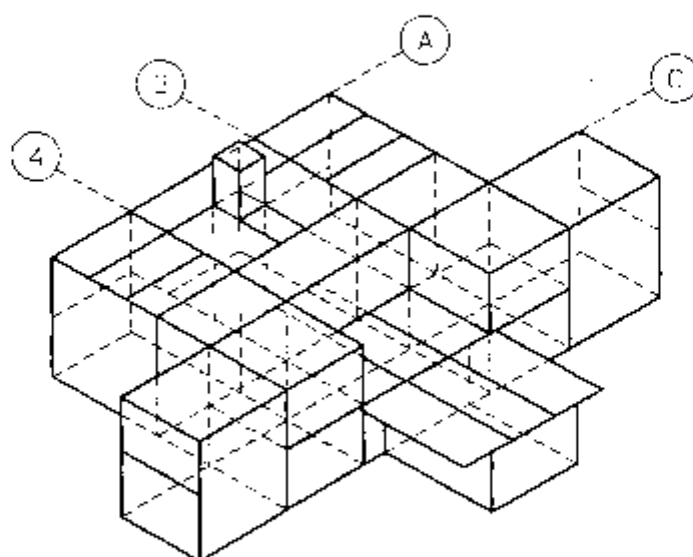


Fig 5.6.1.1 Estrutura metálica, dimensões médias: (32x44x14)m

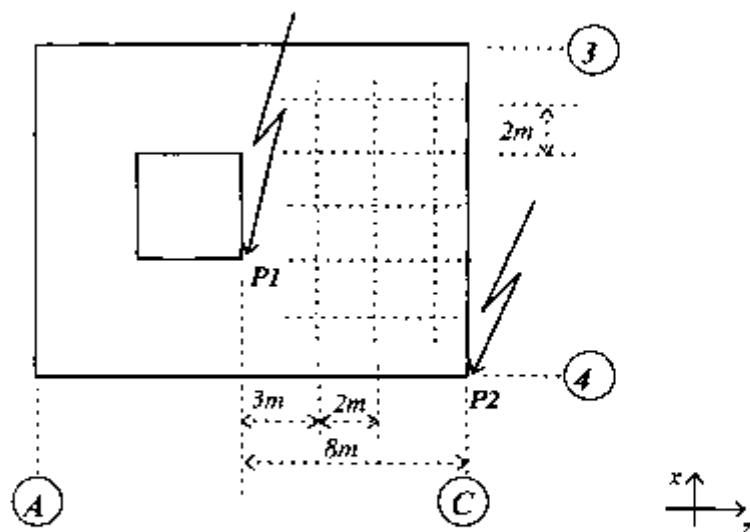


Fig 5.6.1.2 Representação da região sob análise considerando-se $P1$ ou $P2$ como ponto de incidência da descarga atmosférica

5.6.2 Critérios Gerais

A menos das premissas descritas a seguir, os critérios gerais relacionados à esta aplicação são semelhantes aos descritos no item 5.1.1:

- Utilizou-se " $\Delta l=4,0m$ " como distância entre os nós série das células elementares;
- Cada condutor do S.P.C.D.A. foi representado através de um condutor cilíndrico de diâmetro circular equivalente " $d=0,10m$ ";
- As impedâncias características foram calculadas para cada elemento da estrutura com base nas metodologias descritas na referência [45] para os condutores horizontais, e na referência [46] para os condutores verticais;
- Adotou-se para cada eletrodo de terra relacionado às descidas do

S.P.C.D.A. um valor de resistência de aterramento equivalente igual a $5,8\Omega$, correspondente a um eletrodo esférico de raio igual a $6,36\text{m}$ em um solo de resistividade média igual a $200\Omega\text{m}$;

- As descargas atmosféricas foram representadas através da seguinte função, já descrita em itens anteriores:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad (5.1)$$

$$\eta = \exp\left[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_1/\tau_2)^{(1/n)}\right] \quad (5.1a)$$

Admitiu-se, porém, $I_0 = 10,0\text{kA}$; $\tau_1 = 1,2\mu\text{s}$, $\tau_2 = 50,0\mu\text{s}$, e $n = 2$, como parâmetros típicos da forma de onda da corrente do raio;

- Os pontos de incidência das descargas atmosféricas $P_I(0,0,0)$ foram definidos através da aplicação do modelo eletrogeométrico, admitindo-se como raio crítico, " $R_c = 45\text{m}$ ", e como pontos de incidência prioritários os pontos mais próximos à região analisada;
- Não se considerou a parte mais elevada da estrutura na avaliação dos perfis do campo magnético. Desta forma, o ponto de incidência P_I passa a corresponder ao ponto imediatamente inferior, situado a 10m do solo no plano definido pelos eixos A, C e $3, 4$, e
- Os resultados apresentados correspondem aos valores máximos do campo magnético calculados nos pontos da região representada pela Fig. 5.6.1.2 de coordenadas $y = -3$.

5.6.3 Perfis do campo magnético

Os valores máximos do campo magnético considerando-se os pontos de incidência anteriormente descritos são representados nas figuras a seguir:

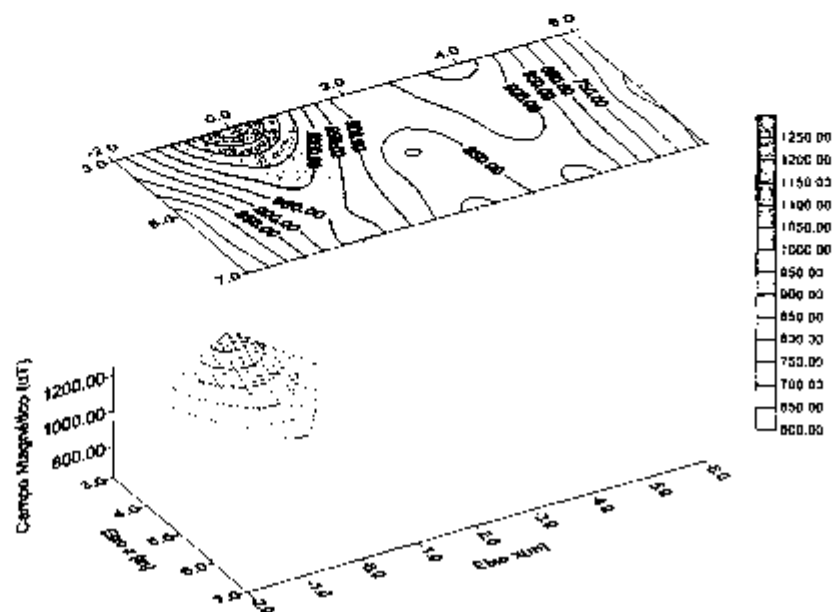


Fig 5.6.3.1 Valores máximos do campo magnético $B(\mu\text{T})$ admitindo-se $P1(0,0,0)$ como ponto de incidência da descarga atmosférica

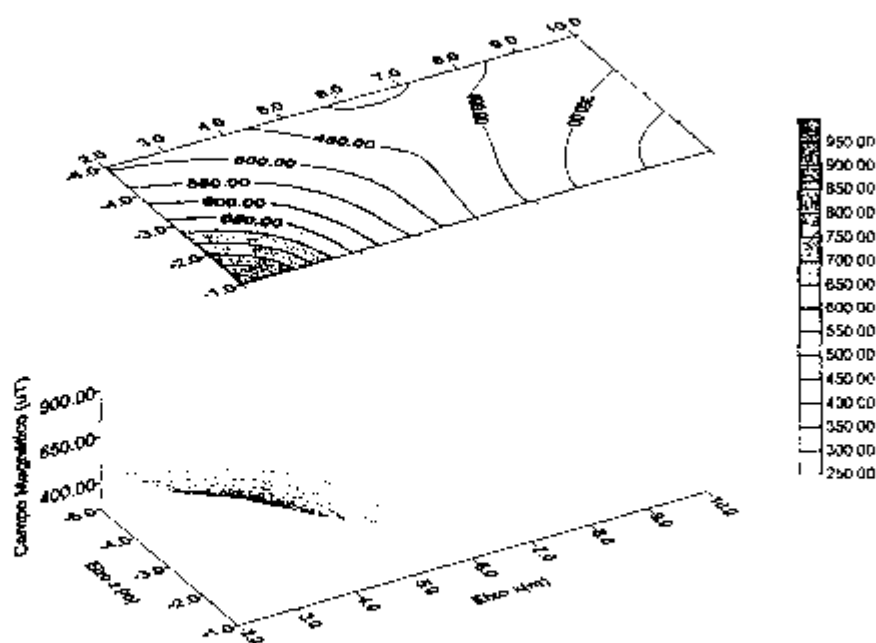


Fig 5.6.3.2 Valores máximos do campo magnético $B(\mu\text{T})$ admitindo-se $P2(0,0,0)$ como ponto de incidência da descarga atmosférica

Nota-se que os valores máximos do campo magnético na região de interesse resultam da combinação dos efeitos decorrentes da descarga atmosférica nos pontos *P1* ou *P2* e dos aspectos relacionados à simetria da estrutura. A Fig. 5.6.3.3 representa o perfil do campo magnético resultante correspondente aos seus valores máximos quando se considera como origem do sistema de coordenadas o ponto *P2*:

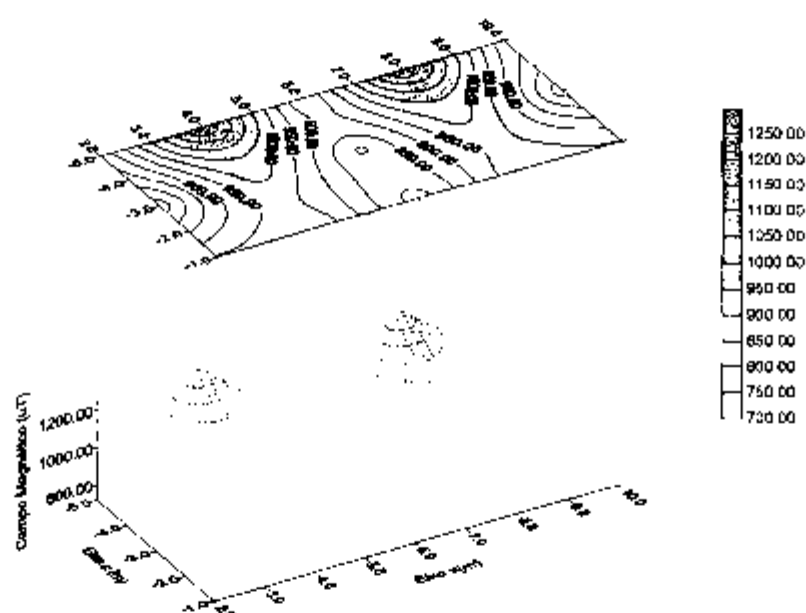


Fig 5.6.3.3 Valores máximos resultantes do campo magnético $B(\mu\text{T})$

5.7 Aplicações relacionadas à avaliação do campo elétrico

Embora de uma maneira não tão abrangente quanto nas aplicações nas quais os aspectos referentes ao campo magnético são enfatizados, apresentam-se a seguir alguns resultados relacionados à avaliação do campo elétrico:

5.7.1 Caso-teste

Este caso-teste tem por objetivo apresentar uma primeira abordagem comparativa entre os resultados obtidos pela metodologia proposta neste trabalho e aqueles obtidos por outros métodos e com reconhecimento da comunidade científica internacional.

Desta forma, selecionou-se um caso simples, porém bastante representativo, inicialmente descrito por MASTER e UMAN em [54], referente à avaliação do campo elétrico resultante de um pulso de corrente percorrendo um condutor vertical. Observa-se, no entanto, que os resultados utilizados são os obtidos analiticamente através da formulação revista por RUBINSSTEIN e UMAN e que, supostamente, foram confrontados com os obtidos experimentalmente em um campo de futebol [37].

Menciona-se, portanto, que optou-se pela escolha deste caso-teste devido à disponibilidade de informações e possibilidade de controle dos parâmetros envolvidos, decorrentes da simplicidade da configuração proposta.

5.7.1.1 Descrição da aplicação - Critérios gerais

As condições assumidas na determinação analítica dos valores do campo elétrico utilizados na análise comparativa foram [37,54]:

- Pulso de corrente com intensidade $I_0=2A$, e duração $T=10ns$;

- Comprimento total do condutor vertical: $H=10m$;
- Coordenadas do ponto avaliado: $(z,y)=(1,5)$, e
- Velocidade de propagação do pulso: $v=c= 3 \times 10^8 m/s$.

Além disto, as seguintes condições foram adotadas na avaliação do campo elétrico através do método proposto:

- Incremento no espaço: $\delta l/2 = 0,01/2 = 0,005m$, e
- Incremento no tempo: $\Delta t = 10^{-6} \mu s$

5.7.1.2 Perfis do campo elétrico

As figuras a seguir apresentam de uma maneira comparativa os componentes verticais e horizontais do campo elétrico no ponto $P(1,5)$ resultante do pulso de corrente descrito anteriormente:

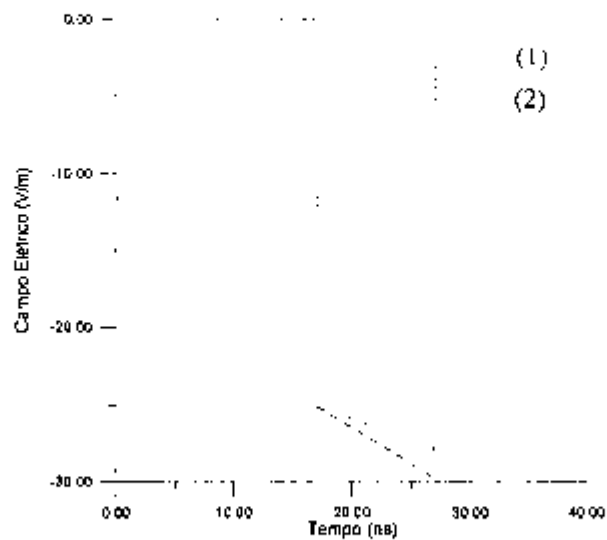


Fig 5.7.1.2.1 Componente vertical do campo elétrico: (1) Método analítico-numérico proposto e (2) Método analítico [37]

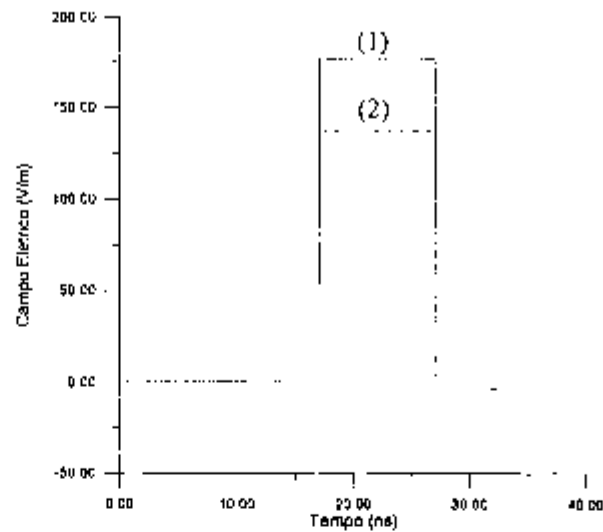


Fig 5.7.1.2.2 Componente horizontal do campo elétrico:(1) Método analítico-numérico proposto e (2) Método analítico [37]

5.7.2 Caso geral

Os resultados apresentados neste item referem-se aos valores do campo elétrico calculados no ponto $P(3,6,-44)$ da estrutura elevada representada na Fig. 5.1.1, observando-se, de uma maneira geral, os mesmos critérios descritos no item 5.2.

Menciona-se que entre os principais aspectos analisados durante a aplicação da metodologia proposta no cálculo do campo elétrico estão a influência da forma de onda da corrente da descarga atmosférica, e dos incrementos no espaço e no tempo.

Com relação à análise da influência do incremento de tempo, esta foi realizada através da consideração de um fator, implementado com o propósito de se adotar uma maior “discretização” do tempo no processo de amostragem dos valores do campo magnético utilizados no cálculo do campo elétrico,

valores obtidos através do processo de interpolação “cubic-spline” a partir de valores iniciais calculados analiticamente [62].

5.7.2.1 Perfis do campo elétrico: Influência da forma de onda

Como nos itens anteriores, serão utilizadas as expressões (5.1) e (5.1a) para se representar as correntes das descargas atmosféricas. Os parâmetros adotados relacionam-se a duas formas de onda típicas:

- Tipo I: $\tau_1 = 0,25\mu\text{s}$, $\tau_2 = 2,5\mu\text{s}$, e $n = 2$, com “amplitudes” $I_0 = 10,0\text{kA}$ e $I_0 = 50,0\text{kA}$, e
- Tipo II: $\tau_1 = 1,2\mu\text{s}$, $\tau_2 = 50,0\mu\text{s}$, e $n = 2$, com $I_0 = 10,0\text{kA}$.

Quanto aos aspectos referentes ao cálculo do campo elétrico, utilizou-se o intervalo de tempo ($\delta t = 1,0\text{ns}$) na amostragem dos valores interpolados do campo magnético, valor correspondente a utilização de um fator igual a “1/10” do intervalo de tempo inicial relacionado aos valores obtidos analiticamente, e “ $\delta l = 0,3\text{m}$ ” como incremento no espaço.

A seguir são apresentados os perfis dos campos elétricos associados à forma de onda Tipo I, Fig. 5.7.2.1.1 e Fig. 5.7.2.1.2, e à forma de onda Tipo II, Fig. 5.7.2.1.3, respectivamente. Observa-se que com o objetivo de se facilitar as comparações, apresenta-se, primeiramente, o perfil do campo magnético correspondente à amplitude de corrente igual a 50kA e, em seguida, os perfis correspondentes ao valor de 10kA:

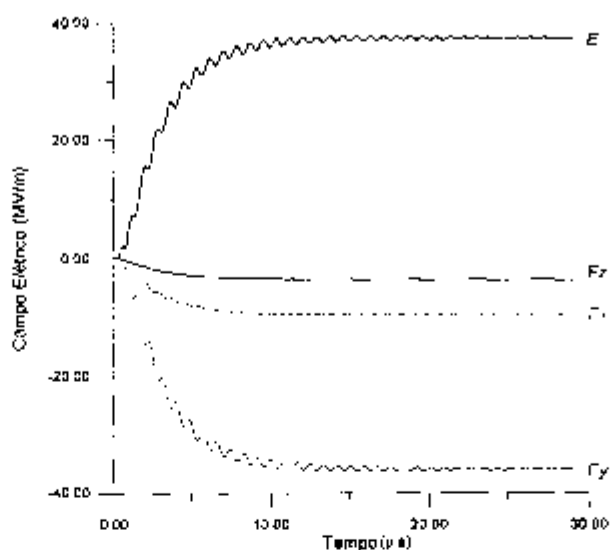


Fig 5.7.2.1.1 Componentes do campo elétrico (E_z , E_x , E_y) e módulo E (MV/m) resultantes de uma descarga atmosférica “Tipo I” com $I_0 = 50,0\text{kA}$

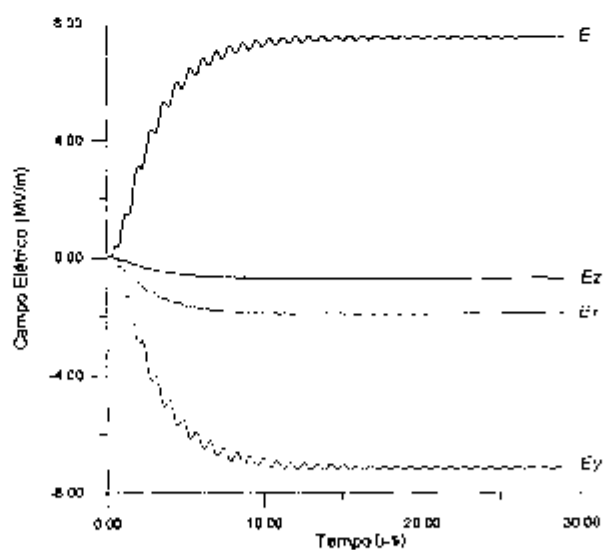


Fig 5.7.2.1.2 Componentes do campo elétrico (E_z , E_x , E_y) e módulo E (MV/m) resultantes de uma descarga atmosférica “Tipo I” com $I_0 = 10,0\text{kA}$

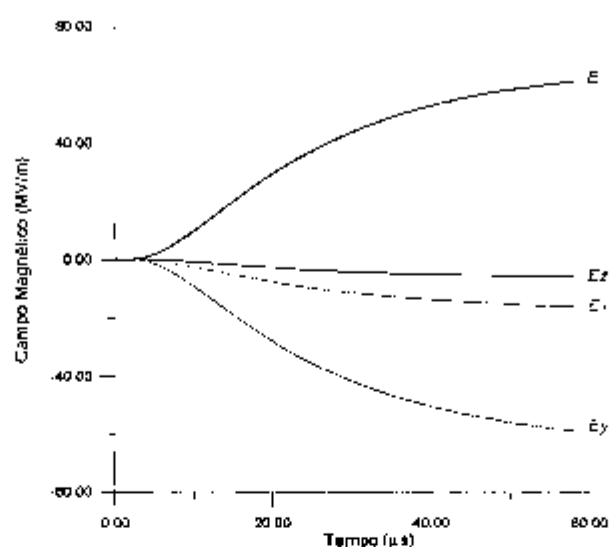


Fig 5.7.2.1.3 Componentes do campo elétrico (E_x , E_z , E_y) e módulo E (MV/m) resultantes de uma descarga atmosférica “Tipo II” com $I_0 = 10,0\text{kA}$

5.7.2.2 Perfis do campo elétrico: Influência dos parâmetros relacionados às variações no espaço “ δl ” e no tempo “ δt ”

Inicialmente, apresentam-se na Fig. 5.7.2.2.1 e na Fig. 5.7.2.2.2 os perfis do campo elétrico relacionados a diferentes valores de “ δl ” e “ δt ”, e, em seguida, as figuras correspondentes às variações relativas do campo elétrico em função de “ δt ”, valores calculados tendo como referência o menor fator adotado em cada caso, ou seja, o menor valor de “ δt ”.

Menciona-se, também, que estes resultados referem-se aos valores de “ δl ” iguais a $0,3\text{m}$, $0,6\text{m}$ e $1,0\text{m}$, considerando-se “ $\delta t = 1,0\text{ns}$ ”, e aos valores de “ δt ” resultantes da aplicação dos fatores 1,0; 0,1 e 0,01 ao intervalo de tempo inicial ($\tau = 10\text{ns}$), assumindo-se “ $\delta l = 0,3\text{m}$ ”, respectivamente. A forma de onda

considerada para a descarga atmosférica é a do "Tipo I", com $I_0 = 50,0\text{kA}$, já descrita no item anterior.

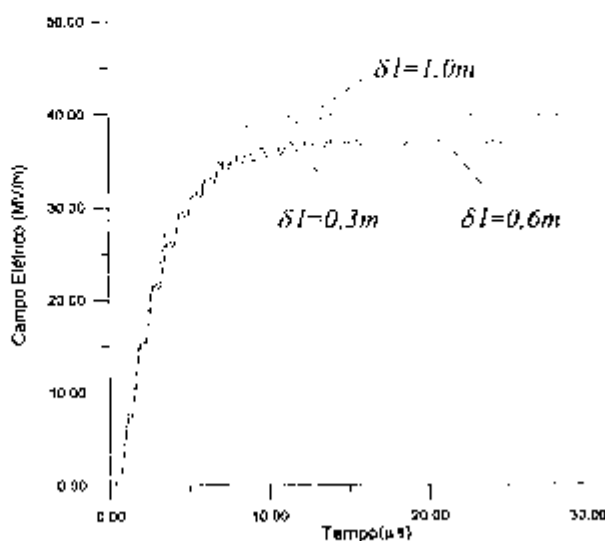


Fig 5.7.2.2.1 Campo elétrico $E(\text{MV/m})$ para diferentes valores de δl , e $\delta t = 1,0\text{ns}$

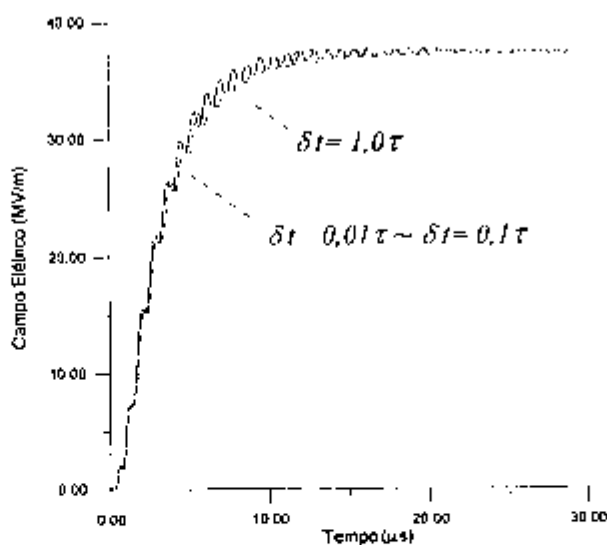


Fig 5.7.2.2.2 Campo elétrico $E(\text{MV/m})$ para diferentes valores de δt , e $\delta l = 0,3\text{m}$

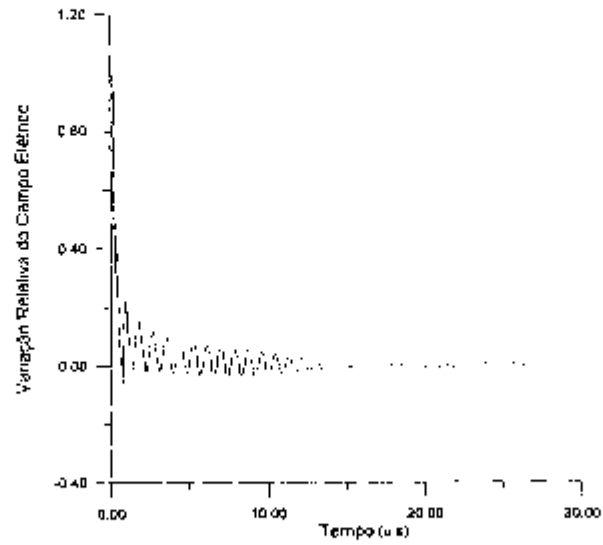


Fig 5.7.2.2.3 Variação relativa do campo elétrico: $(E_{\delta_1} - E_{\delta_2})/E_{\delta_1}$,
admitindo-se $\delta t_1 = 0,01\tau$ e $\delta t_2 = \tau$

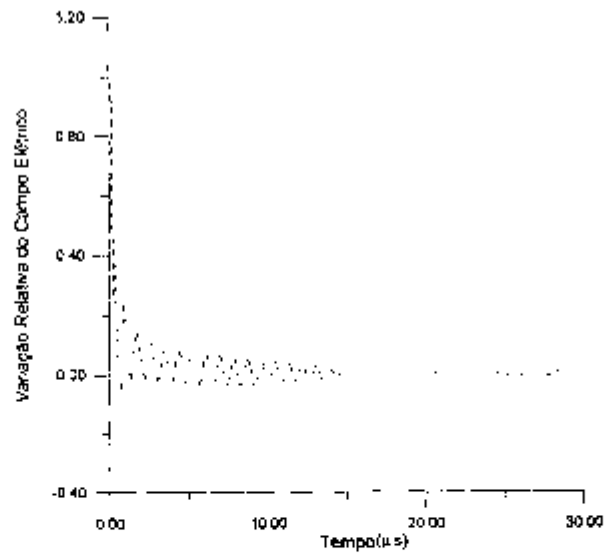


Fig 5.7.2.2.4 Variação relativa do campo elétrico: $(E_{\delta_1} - E_{\delta_2})/E_{\delta_1}$,
admitindo-se $\delta t_1 = 0,1\tau$ e $\delta t_2 = \tau$

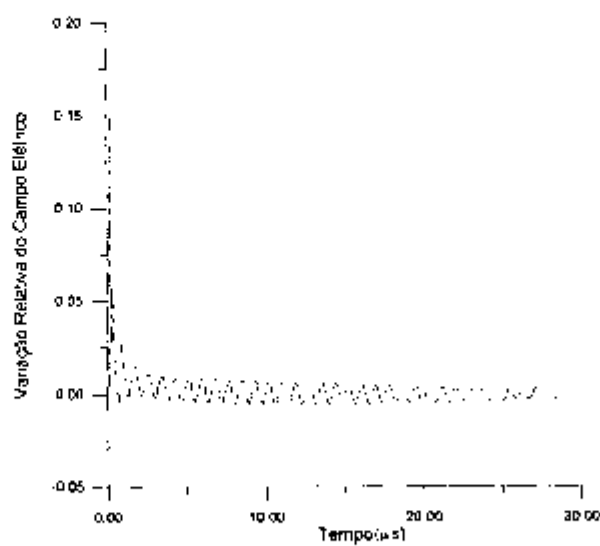


Fig 5.7.2.2.5 Variação relativa do campo elétrico: $(E_{\delta_1} - E_{\delta_2})/E_{\delta_1}$,
admitindo-se $\delta t_1 = 0,01 \tau$ e $\delta t_2 = 0,1 \tau$

6. DISCUSSÃO

Este item tem por objetivo apresentar uma avaliação geral da metodologia proposta com base nos tópicos e resultados principais ressaltados durante o desenvolvimento deste trabalho.

6.1 Análise dos resultados

A análise dos resultados apresentados mostram a abrangência da metodologia proposta, bem como a importância dos parâmetros elétricos considerados no desempenho global dos S.P.C.D.A.:

- O “caso geral”, descrito no item 5.1, apresenta os resultados relacionados a uma estrutura metálica elevada e com arranjo estrutural relativamente complexo nos quais se evidenciam o potencial e o grau de precisão da metodologia proposta quando associada ao cálculo do campo magnético. Apresentam-se, em linhas gerais, a distribuição de corrente na célula correspondente ao ponto de incidência da descarga atmosférica, o perfil do campo magnético em alguns planos internos à estrutura após um tempo pré-estabelecido da incidência do raio, bem como as tensões induzidas nos “loops”, cujos pontos centrais são os mesmos em que o campo magnético em função do tempo foi avaliado.

Nota-se que a comparação de alguns destes resultados com os determinados através de outros métodos assegura à metodologia proposta um grau de precisão satisfatório, sendo que as diferenças observadas podem ser atribuídas, principalmente, aos aspectos referentes às considerações das discontinuidades das linhas de transmissão, condutores da estrutura metálica, e aos tempos de validação utilizados nas expressões de cálculo do campo magnético. Ressalta-se, também, que as “funções distribuição de correntes” descritas em [26,27] foram obtidas através da aplicação sistemática da modelagem dos circuitos elétricos em diversas configurações de S.P.C.D.A. resultando, assim, em fórmulas gerais.

Estes fatos podem ser observados através da análise da Fig. 5.1.5.3, cujos valores da linha média tracejada correspondem àqueles obtidos conforme metodologia descrita em [26,27].

Outros resultados podem ser destacados, tais como os relacionados ao efeito da propagação das correntes na estrutura no perfil do campo magnético, representados na Fig. 5.1.2.1; os relacionados à proporcionalidade entre os valores da derivada da corrente e os valores da tensão induzida nos “loops” situados nas proximidades do condutor de descida imediatamente inferior ao ponto de queda do raio, observados ao se confrontar a Fig. 5.1.5.2 com a Fig. 5.1.5.3, e aqueles nos quais a influência da configuração da estrutura, alta ou baixa, no perfil do campo magnético e da tensão induzida, é destacada,

comparativamente, nas Fig. 5.1.6.2, Fig. 5.1.6.3, e Fig. 5.1.6.4.

Além disto, analisando-se as Fig. 5.1.2.2, Fig. 5.1.2.3, Fig. 5.1.2.4 e as Fig. 5.1.3.1, Fig. 5.1.3.2, e Fig. 5.1.3.3, evidencia-se a influência da proximidade do ponto avaliado ao ponto de incidência do raio, bem como das variações relativas à forma da curva do perfil do campo magnético e da tensão induzida. Assim, pode-se observar que os valores máximos do campo magnético nos pontos da diagonal mais próximos às descidas são mais elevados, e que, embora o envoltório e o valor máximo do campo magnético nos pontos intermediários e oposto ao ponto de queda do raio sejam semelhantes, os perfis das tensões induzidas apresentam diferenças significativas.

Pode-se mencionar, portanto, a importância do fenômeno de propagação das correntes na estrutura, das correntes nas descidas associadas aos pontos de queda do raio, e dos tempos de validação na determinação dos perfis dos campos magnéticos e das tensões induzidas.

No que diz respeito às comparações envolvendo estruturas elevadas e baixas, os resultados apresentados podem ser justificados, observando-se que nas estruturas baixas o efeito das reflexões das correntes, resultantes das discontinuidades existentes, principalmente devido à conexão com o sistema de aterramento, são mais pronunciados, fazendo-se sentir previamente com relação às estruturas elevadas.

Deve-se observar que os parâmetros relacionados aos eventos anteriormente analisados estão vinculados, fortemente, às configurações das estruturas ou dos S.P.C.D.A.

- Os resultados comparativos nos quais se enfatiza o grau de precisão na determinação dos valores das impedâncias características horizontais e verticais são apresentados nos itens 5.2.

No que se refere aos casos envolvendo a avaliação do campo magnético, pode-se afirmar que as diferenças são facilmente observadas nas regiões correspondentes ao andar superior da estrutura elevada, a mesma considerada no “caso geral”. No andar térreo da estrutura, observa-se, à primeira vista, uma similaridade bastante grande entre os envoltórios dos perfis do campo magnético, sendo que as diferenças são evidenciadas ao se representar os valores correspondentes às diferenças numéricas entre os valores instantâneos do campo magnético calculados através dos métodos anteriormente propostos.

Nos casos relacionados às avaliações das tensões induzidas nota-se um comportamento parecido com o do campo magnético do andar térreo, mesmo para os pontos do andar superior da estrutura.

Este comportamento geral permite-nos concluir que a precisão na determinação dos valores das impedâncias características pode ser importante, já que, dependendo da configuração e da região da

estrutura considerada, os perfis dos campos magnéticos e das tensões induzidas podem apresentar diferenças significativas devido à alteração do comportamento associado ao fenômeno de propagação dos pulsos das tensões e das correntes na estrutura.

Menciona-se que, embora nos resultados apresentados os efeitos majoritários estão relacionados ao fenômeno de propagação, mesmo para os casos em que as diferenças nos valores dos envoltórios das correntes ou do campo magnético não são pronunciadas, os valores resultantes das derivadas destes valores podem representar perfis de tensões induzidas e valores de energia associados bastante diferentes.

- A análise referente à influência da forma de onda do raio é bastante simples, podendo ser facilmente observada ao se realizar as comparações sugeridas no item 5.3. Desta forma, pode-se observar uma correlação direta entre os parâmetros " τ_1 ", constante de tempo frontal, e " τ_2 ", constante de decaimento, da corrente de descarga atmosférica com os perfis do campo magnético e da tensão induzida.

Com relação às formas de onda, observa-se que, enquanto o perfil do campo magnético depende, principalmente, dos valores instantâneos da corrente, fazendo-se com que, para os pontos próximos à queda do raio, este perfil acompanhe a forma de onda da corrente, o perfil da tensão induzida acompanha a derivada do campo magnético. Nota-se, portanto, uma proporcionalidade direta entre o valor máximo da tensão

induzida e os valores da constante de tempo frontal da corrente de descarga atmosférica.

- A relação entre os parâmetros de um sistema de aterramento pré-definido e os perfis do campo magnético e das tensões induzidas está exemplificada através dos resultados apresentados no item 5.4.

Os resultados associados aos diferentes valores de resistência de aterramento e resistividade do solo em um sistema de características geométricas constantes, não afetado pela ionização do solo, permitem concluir que a sensibilidade do campo magnético e da tensão induzida a esses parâmetros dependerá não só dos valores destes, mas, também, da região da estrutura sob análise.

Nota-se que, embora os valores máximos sejam afetados, as maiores alterações estão no comportamento da forma de onda, tanto do envoltório, quanto do nível de oscilações dos valores instantâneos do campo magnético e da tensão induzida. Quanto a este comportamento, percebe-se que, quanto maiores as diferenças existentes entre as impedâncias no ponto de conexão com o sistema de aterramento, maiores as alterações resultantes na forma de onda analisada, sendo, portanto, mais apreciável nos casos relacionados a baixos valores de resistência ou de resistividade do solo.

A Fig. 5.4.1.5 ilustra bem as correlações existentes entre os parâmetros do sistema de aterramento e o comportamento resultante na grandeza

elétrica considerada, bem como, através de comparações com as demais figuras do item 5.4.1, a dependência com a posição analisada.

Quanto aos aspectos referentes à ionização do solo, o efeito resultante já poderia ter sido estimado com base nos fatos anteriormente comentados, já que a ionização do solo está associada a uma redução do valor da resistência de aterramento.

Assim, conforme se previa, quanto antes se estabelecer o fenômeno de ionização do solo, mais perceptíveis serão as alterações resultantes no campo magnético e na tensão induzida. Este fato pode ser observado através de uma simples inspeção das figuras apresentadas no item 5.4.2, cujas alterações mais significativas referem-se ao sistema de aterramento com baixo valor de resistividade do solo, ou seja, com valor de corrente crítica menor.

Evidencia-se, desta forma, a importância da configuração geométrica e parâmetros associados do sistema de aterramento, bem como da posição ou região considerada na análise do campo magnético e da tensão induzida associada.

- O item 5.6 apresenta a definição do ambiente eletromagnético em uma estrutura metálica, cujos resultados poderão ser úteis nas aplicações relacionadas aos estudos de “coordenação de campo magnético”. Uma aplicação imediata deste tipo de estudo refere-se à otimização de

leiautes de sistemas elétricos, possibilitando a definição das posições “ótimas” dos equipamentos, do percurso dos condutores elétricos que minimize os eventuais problemas de interferências eletromagnéticas oriundos do acoplamento de campo com os meios condutores, bem como as especificações técnicas dos equipamentos mais adequadas.

Como exemplo, pode-se definir, através da inspeção da Fig. 5.6.3.3, os níveis de imunidade ou classes dos equipamentos eletro-eletrônicos compatíveis com os ambientes eletromagnéticos típicos definidos na norma IEC 1000-4-9 [7]. Para melhor entendimento, apresenta-se a seguir a Tabela 6.6.1 que mostra as classes e os correspondentes valores máximos do campo magnético pulsante (LEMP):

Tabela 6.1.1 Níveis de Imunidade

Classes	“LEMP” (μT)
1	Não Aplicável
2	Não Aplicável
3	126
4	378
5	1260
x	Especial: “Nível Aberto”

Fonte: [7]

Obs.: Adotou-se a relação $1 \text{ A/m} = 1,26 \mu\text{T}$

Numa primeira instância, poder-se-ia especificar a “classe 5” como a classe compatível com o ambiente eletromagnético da região estudada, já que o valor do campo magnético associado à classe escolhida é superior aos valores observados. Apenas como esclarecimento

adicional, pode-se mencionar que a classe 5 corresponde às instalações associadas a um ambiente industrial severo [7].

No que se refere a definição do “leiaute ótimo”, recomenda-se, como critério geral, a escolha de regiões onde os valores máximos do campo magnético sejam inferiores aos nível de imunidade anteriormente definido, admitindo-se, porém, uma certa margem de segurança. Conseqüentemente, as posições correspondentes às regiões mais claras da Fig. 5.6.3.3 devem ser prioritariamente escolhidas para a instalação dos equipamentos e dos cabos do sistema elétrico considerado.

Este estudo pode ser complementado se, além destes itens, considerar-se as posições nas quais o perfil do campo magnético não apresente um comportamento transitório pronunciado, procurando-se observar, sempre que possível, um máximo de homogeneidade.

- Neste tópico serão discutidos os aspectos principais relacionados ao cálculo do campo elétrico.

A experiência adquirida durante o processo de cálculo do campo elétrico permite-nos afirmar que o grau de precisão dos resultados dependem, em uma primeira instância, da menor distância entre os meios condutores do S.P.C.D.A. e o ponto considerado na determinação do campo elétrico.

Este fato se deve às eventuais diferenças que podem ocorrer nos

instantes iniciais do processo de cálculo, oriundas dos “tempos de retardo ou validação” associados aos valores do campo magnético nos pontos do arranjo utilizado na determinação dos componentes do campo elétrico. Desta forma, conforme previsto anteriormente, a precisão do cálculo dependerá, principalmente, do tamanho da célula escolhida, ou seja, da definição do parâmetro “ δT ”.

Diante disto, valores de “ δT ” iguais a um por cento (1%) da menor distância envolvida foram adotados, como critério prático, nos casos mais críticos.

Com relação ao parâmetro “ δ ”, embora não represente uma regra geral, quando a menor distância aos condutores for pequena, como no caso descrito no item 5.7.1 correspondente ao caso-teste, recomenda-se que a amostragem dos valores do campo magnético seja feita em intervalos com ordem de grandeza inferior a “ $\delta/2c$ ”. Assim, adotou-se um valor correspondente a uma ordem de grandeza inferior a “ $\delta/2c$ ”, ou seja, $\Delta t < 0,01/2c = 10^{-6} \mu s$ no caso-teste.

Desta forma, na análise comparativa realizada e representada através dos resultados mostrados na Fig. 5.7.1.2.1 e na Fig. 5.7.1.2.2, obtidos com o emprego das recomendações anteriores, percebe-se uma aproximação bastante satisfatória nas formas dos componentes do campo elétrico. Com relação aos valores instantâneos, nota-se uma concordância bastante satisfatória entre os valores relacionados ao

componente vertical do campo elétrico, observando-se, no entanto, um “erro” de aproximadamente vinte e cinco por cento (25%) no trecho correspondente ao valor máximo do componente horizontal.

Com relação ao caso geral, item 5.7.2, além da análise da influência dos parâmetros “ δl ” e “ δr ”, avaliou-se, também, a influência da forma de onda da descarga atmosférica, inclusive da sua intensidade máxima.

No que se refere aos parâmetros “ δl ” e “ δr ”, os resultados apresentados no item 5.7.2.2 revela-nos que a influência destes na determinação do campo elétrico não é tão elevada quanto a observada no caso-teste.

Esta tendência já era esperada, haja vista que as diferenças entre as distâncias e, conseqüentemente, entre os tempos de validação envolvidos são menores neste caso.

Nota-se, no entanto, ao se examinar as Fig. 5.7.2.2.3, Fig. 5.7.2.2.4 e Fig. 5.7.2.2.5, que a influência dos valores iniciais, embora pequena, ainda persiste. Admite-se que a ocorrência deste fato possa estar relacionado ao processo de interpolação utilizado no processo de amostragem dos valores do campo magnético [62].

Quanto aos aspectos referentes à influência da forma de onda e da intensidade da corrente de descarga atmosférica no perfil do campo elétrico resultante, uma simples comparação entre as Fig. 5.7.2.1.1, Fig. 5.7.2.1.2 e Fig. 5.7.2.1.3 permite-nos concluir sobre a importância dos parâmetros associados a estas variáveis.

Desta forma, observa-se nestas figuras uma proporcionalidade direta entre a intensidade da corrente de descarga atmosférica e a intensidade do campo elétrico, sendo que o mesmo pode ser observado ao se considerar a área da parte inferior do perfil do campo elétrico, grandeza associada às constantes de tempo " τ_1 " e " τ_2 ". Pode-se ressaltar, também, a relação direta entre a constante de tempo " τ_1 " e a taxa de crescimento inicial do campo elétrico.

Estas correlações podem ser explicadas com o auxílio das expressões apresentadas na página 313 da referência [37] na qual o campo elétrico total é considerado como resultante de três parcelas: o campo eletrostático, o campo de indução e o campo de radiação ou "turn-on field". Menciona-se que estas parcelas correspondem aos termos proporcionais à integral da corrente, à intensidade da corrente e à derivada da corrente de descarga atmosférica, respectivamente. Nota-se, também, que para os pontos próximos, a maior contribuição para o campo elétrico total corresponde à parcela do campo eletrostático.

Diante destas observações, as proporcionalidades diretas descritas anteriormente podem ser justificadas, permitindo-nos entender, principalmente, que, diferentemente do campo magnético, o perfil resultante do campo elétrico nos pontos próximos aos condutores do S.P.C.D.A não acompanha a forma das correntes resultantes da distribuição da corrente do raio.

Pode-se afirmar, portanto, que no modelo proposto, ao se considerar os “pontos próximos”, os perfis correspondentes aos campos magnético e elétrico não apresentam similaridade quanto às suas formas.

As observações anteriormente descritas, principalmente a relacionada ao perfil resultante dos campos elétrico e magnético, são ressaltadas nos trabalhos nos quais analisam-se os valores medidos e calculados devido a um canal vertical de descarga atmosférica [58,63,64].

Por outro lado, deve-se destacar que, dependendo do modelo escolhido na representação da distribuição da corrente ao longo do canal do raio, resultam diferenças marcantes na forma do campo elétrico. Como exemplo, nos comentários descritos por Nucci e seus colaboradores na referência [58], são mencionados diversos estudos realizados em que, apesar de se notarem algumas concordâncias, são muitas as diferenças, tanto no que se refere à intensidade, quanto na forma dos resultados relacionados à determinação do campo elétrico e seus efeitos resultantes, devido aos diferentes tipos de modelos considerados.

Desta forma, devido aos aspectos relacionados à indisponibilidade de resultados que nos garantam uma escolha adequada de parâmetros e modelos utilizados, bem como da geometria considerada, não foi possível avaliar, com segurança, o grau de precisão dos valores do campo elétrico devido à distribuição de corrente nos condutores da estrutura considerada.

A presença de valores elevados para o campo elétrico, normalmente atribuída à parcela de campo eletrostático, representa uma preocupação bastante grande para diversos autores, fazendo-se com que muitos não a considerem de forma direta nas expressões resultantes das equações de Maxwell. Nestes casos, utilizam-se de subterfúgios ou de hipóteses para se representar a distribuição das cargas elétricas ao longo dos condutores, nem sempre fiéis ao fenômeno físico considerado [56].

Nota-se, portanto, que esta preocupação não é privilégio das pesquisas associadas às avaliações de desempenho de S.P.C.D.A., nas quais os arranjos dos condutores representam uma complicação adicional, podendo-se observar, também, com destaque em trabalhos relacionados exclusivamente à distribuição da corrente no canal do raio.

Numa primeira tentativa de se obter uma ordem de grandeza aproximada destes valores, lançou-se mão de algumas informações e de uma relação normalmente utilizada para se avaliar o componente vertical da parcela de radiação do campo elétrico, parcela não predominante nos casos de “pontos próximos” [63,64].

Assim, com base nos resultados apresentados na referência [63], na proporcionalidade direta entre o componente vertical, componente predominante no nosso caso, e a velocidade do pulso da corrente, e na proporcionalidade inversa com a distância do ponto avaliado, destacadas na referência [64], inferiu-se para o componente vertical de radiação do campo elétrico, nos pontos internos à estrutura e ao nível do

solo, valores da ordem de "MV/m".

Observa-se, portanto, que os valores inferidos, embora da ordem de grandeza de MV/m, são bastante inferiores aos valores obtidos pelo processo de cálculo proposto, ressaltando-se que estes valores referem-se ao componente vertical da parcela de campo de radiação, parcela não predominante para os pontos próximos ao canal do raio.

Por outro lado, deve-se destacar que os perfis das figuras apresentadas no item 5.7.2.1 são similares àqueles calculados para os "campos próximos", de acordo com modelo proposto em [63], e aos obtidos através de medições a uma distância de 50,0m do canal do raio, apresentados em [64].

- Finalmente, gostaríamos de mencionar que os resultados apresentados não levaram em consideração o canal do raio e as impedâncias mútuas dos condutores. Os eventuais efeitos decorrentes da implementação destes aspectos na análise de desempenho dos S.P.C.D.A. são considerados, por exemplo, nas referências [22] e [65].

Nota-se que existe uma tendência em se afirmar que a consideração do canal do raio pode ser importante na determinação das distribuições de corrente na estrutura, não exercendo influência significativa a consideração das impedâncias mútuas.

6.2 Aplicabilidade do método, principais contribuições e restrições

A metodologia desenvolvida mostrou-se adequada às aplicações relacionadas à avaliação das grandezas elétricas associadas à proteção de equipamentos e sistemas eletro-eletrônicos, de tal forma que os aspectos atuais, principalmente os que dizem respeito à área de compatibilidade eletromagnética, possam ser contemplados nas avaliações de desempenho dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

Numa primeira instância, pode-se considerar como principais vantagens deste método o fato de não existir a necessidade de se inverter matrizes e de não se resolver sistemas de equações, constituindo-se em um método analítico-numérico bastante estável e capaz de avaliar estruturas complexas envolvendo, no entanto, esforços computacionais relativamente modestos, principalmente no que se refere ao tempo de processamento que são pequenos quando confrontados com aqueles resultantes das principais metodologias atualmente empregadas.

As principais dificuldades relativas aos recursos computacionais advêm da adequação do código em desenvolvimento à necessidade de se armazenar resultados, característica intrínseca das metodologias aplicáveis às simulações de fenômenos no espaço e no tempo.

Outro aspecto importante refere-se ao processo de entrada de dados e de geração dos elementos tridimensionais que, principalmente nos casos em que as estruturas ou sistemas de proteção são complexos, pode ser exaustivo

ou resultar em erros, mostrando-se, assim, a conveniência de se trabalhar com rotinas gráficas na etapa de pré-processamento.

Desta forma, no estágio atual de implementação da metodologia proposta, a principal restrição refere-se à "locação de memória" necessária nos casos mais complexos. Observa-se, no entanto, que, diante do grau de prioridade elevado atribuído à etapa de obtenção de resultados e dos recursos atuais disponíveis, abdicou-se, neste momento, da aplicação de algumas técnicas que poderiam ser úteis na otimização deste recurso.

O código atual permite-nos determinar, com um grau de precisão bastante satisfatório, a distribuição das correntes, o campo magnético e as tensões induzidas associadas nas regiões internas às estruturas, considerando-se os condutores envoltos em ar. Com relação ao cálculo do campo elétrico, considera-se que alguns tópicos adicionais da metodologia apresentada precisam ser investigados, destacando-se que a maior preocupação refere-se aos elevados valores observados.

Ao considerar-se a sua abrangência ou o potencial de obtenção de resultados, ressalta-se a capacidade de se realizar estudos que envolvam diversas combinações de parâmetros no desempenho geral dos S.P.C.D.A.

É notório, ao se analisar os resultados apresentados, o grau de importância das características arquitetônicas, das dimensões e características elétricas dos condutores, bem como das características do solo e do sistema de aterramento, já que estão estritamente relacionadas à determinação da configuração e arranjo ótimo dos sistemas eletro-eletrônicos e de proteção.

Além disto, destacam-se, entre as principais contribuições, o desenvolvimento analítico das expressões de campo magnético devido a dipolos de corrente que se deslocam em condutores horizontais ou verticais, não importando o sentido de deslocamento e a posição do pulso em relação ao observador; a implementação de um modelo de cálculo das impedâncias características horizontais e verticais adequado ao fenômeno avaliado, cujas restrições à geometria dos condutores são mínimas quando se considera, concomitantemente, o conceito de condutor equivalente; um modelo de sistema de aterramento que, embora admita a ocorrência de fenômenos não lineares, é simples e de fácil implementação computacional.

Outra contribuição a se destacar refere-se à característica da parte numérica do método em que possibilita a utilização de células distintas e não idênticas, sem a necessidade de se “malhar” ou de se implementar elementos ou células em toda região considerada, recomendando-se a utilização de células pequenas, vinculadas à amostragem do campo magnético em intervalos menores, só para os pontos próximos às partes metálicas. Deve-se observar, também, que a determinação dos campos magnético e elétrico é feita de uma maneira pontual e desvinculada, respeitando-se, apenas, a ordem de obtenção destes.

Conforme comentado anteriormente, a não consideração do canal do raio, inclusive a possibilidade de descargas sucessivas, a consideração da velocidade de propagação constante e igual a da luz, o desenvolvimento insipiente das rotinas de entrada de dados e geração automática das células, e

a não consolidação dos aspectos referentes ao modelo de cálculo do campo elétrico constituem-se as principais restrições deste método.

Considera-se, no entanto, que estas restrições possam encorajar-nos a continuar o desenvolvimento dos nossos trabalhos de pesquisa, bem como incentivar a busca de outras aplicações que possam consolidar e estender a aplicação deste método.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

São vários os tópicos que ainda deverão ser explorados, resultando, não necessariamente em função da ordem de importância destes, nas seguintes atividades:

- Implementação de técnicas com o objetivo de otimizar a “locação de memória”, tanto na etapa de aquisição e tratamento dos dados de entrada e saída, quanto no processo de cálculo;
- Desenvolvimento e incorporação no código em desenvolvimento de rotinas gráficas de entrada e saída visando introduzir facilidades e garantir a precisão destes processos, destacando-se aquelas aplicáveis à geração automática das células tridimensionais e à exploração pontual de resultados;
- Consideração do canal do raio, inclusive com descargas sucessivas, e do acoplamento mútuo entre condutores na metodologia de cálculo;

- Consideração de velocidades de propagação diferentes da velocidade da luz, tanto para o canal do raio, quanto para os pulsos de corrente e tensão na estrutura e sistema de aterramento;
- Consolidação do método de cálculo do campo elétrico, principalmente dos aspectos referentes aos valores máximos;
- Incrementar a busca de aplicações para este método, visando satisfazer a análise de outros fenômenos além daqueles resultantes dos efeitos de descargas atmosféricas, e
- Com o intuito de se dar um caráter mais abrangente a esta linha de pesquisa, e em razão das dificuldades encontradas no decorrer deste trabalho quando da obtenção de resultados experimentais, sugere-se o desenvolvimento de algumas atividades específicas a fim de que se possa adquirir a tecnologia de medição, bem como o controle adequado dos parâmetros necessários à realização de estudos comparativos.

7. CONCLUSÃO

O estágio atual de desenvolvimento deste trabalho permite-nos afirmar que os objetivos inicialmente propostos foram plenamente atingidos.

A metodologia apresentada constitui-se em uma alternativa atraente e bastante útil nos processos de tomadas de decisões desencadeados nas diversas etapas dos projetos dos S.P.C.D.A., agregando-se aos requisitos tradicionais as necessidades atuais dos sistemas eletro-eletrônicos, tais como as vinculadas à área de compatibilidade eletromagnética.

Em função de algumas características intrínsecas do método, é possível desenvolver ferramentas que apresentam diversas vantagens se comparadas com as tradicionais, principalmente sob o ponto de vista computacional na qual a possibilidade de se obter diretamente as grandezas elétricas necessárias à avaliação de desempenho dos S.P.C.D.A. deve ser mencionada. Além disto, alguns aspectos inovadores podem ser enfatizados, tais como os resultantes do desenvolvimento analítico das expressões do campo magnético e da abordagem híbrida de avaliação do campo elétrico.

Assim, este trabalho representa uma etapa importante na consolidação das nossas pesquisas, desencadeando uma série de atividades, teóricas e práticas, que visam diminuir as restrições adotadas até o momento nas simulações de fenômenos resultantes das descargas atmosféricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LUNDQUIST, S. Lightning protection and lightning research - strategy 2000. In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Berlin, 1992. **Proceedings**. p.1-3.
- [2] LUNDQUIST, S. Effects on the society of an intense lightning storm. In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Berlin, 1992. **Proceedings**. p.445-6.
- [3] LUNDQUIST, S. Fires caused by lightning and electric wires. In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Berlin, 1992. **Proceedings**. p.475-8.
- [4] IEC 1024-1-1: Protection of structures against lightning. Section 1: Guide A - Selection of protective levels for lightning protection systems. Aug. 1993.
- [5] IEC 1024-1-2: Protection of structures against lightning. Application guide B. Project group draft report. July 1991.
- [6] IEC 1000-4-5: Electromagnetic compatibility (EMC) of electrical and electronic equipment. Part 4: Testing and measurement techniques - Section 5: Surge Immunity test. Feb. 1995.
- [7] IEC 1000-4-9: Electromagnetic Compatibility (EMC) of electrical and electronic equipment. Part 4: Testing and measurement techniques - Section 9: Pulse magnetic field Immunity test. Basic EMC Publication. July 1993.
- [8] IEC 1312-1: Protection against lightning electromagnetic Impulse (LEMP). Part 1: General Principles. Feb. 1995.
- [9] IEC 61312-3: Protection against lightning electromagnetic Impulse (LEMP). Part 3: Requirements of surge protective devices. Committee Draft 81/94/CD. May 1997.
- [10] NBR 5419 Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Jun. 1993.
- [11] NEDTWIG, J. "New lightning protection concept (NLPC)". In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Berlin, 1992. **Proceedings**. p.375-80.

- [12] HASSE, P.; WIESINGER, J. Lightning protection for information systems: A part of EMC. In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Berlin, 1992. **Proceedings**. p.375-80.
- [13] SARTORI, C.A.F. **Avaliação do ambiente eletromagnético em estruturas atingidas por descargas atmosféricas**. São Paulo, 1994. 102p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [14] SARTORI, C.A.F.; CARDOSO, J.R. Evaluation of electromagnetic environment around a structure during a lightning stroke. In: 1994 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMC, Roma, 1994. **Proceedings**. p.746-9.
- [15] SARTORI, C.A.F.; CARDOSO, J.R. EMC aspects in a steel structure struck by lightning. In: 1995 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMC, Atlanta, 1995. **Proceedings**. p.248-52.
- [16] SARTORI, C.A.F.; CARDOSO, J.R. Consideration of a pulse magnetic field modeling as a helpful tool on EMC design. In: CBmag'96: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, Ouro Preto, 1996. **Proceedings**. p.165-8.
- [17] SARTORI, C.A.F.; CARDOSO, J.R., ORLANDI, A. Transient Induced Voltage Computation in a high building struck by lightning. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.34, n.5, p.2815-18, Sept. 1998.
- [18] CASINOVI, G.; GERI A.; VECA G. M. Magnetic field map around a wall with a complete lightning protection system. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.25, n.4, p.2980-2, July 1989.
- [19] DEL VECHIO, P.; GERI A.; VECA G. M. Magnetic field near a concrete wall during a lightning stroke. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.25, n.5, p.4006-8, Sept. 1989.
- [20] GERI, A.; VECA, G. M. A complete lightning protection system simulation in the EMI analysis. In: 1991 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Cherry Hill - N.J, 1991. **Proceedings**. p.90-5.
- [21] CRISTINA, S.; ORLANDI, A. Currents distribution calculation in lightning stroked struture in presence of non-linear ground impedance. In: 20th INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Interlaken, 1990. **Proceedings**. p.3.11(1-6).

- [22] CRISTINA, S.; ORLANDI, A. Circuit modeling for lightning protection systems: EMI evaluation in presence of lightning Channel. In: 7th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, Dresden, 1991. **Proceedings**. p.75-6.
- [23] CRISTINA, S.; ORLANDI, A. EMC effects of lightning protection system: shielding properties of roof grid. In: 1991 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Cherry Hill - N.J, 1991. **Proceedings**. p.78-83.
- [24] CRISTINA, S.; ORLANDI, A.; FELIZIANI, M. EMC condition in structures directly struck by lightning: Sensitivity analyses of the prediction model. In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Berlin, 1992. **Proceedings**. p.153-8.
- [25] CRISTINA, S.; ORLANDI, A. Calculation of the induced effects due to a lightning stroke. **IEE Proceedings - B**, v.139, n.4, p.374-80, July 1992.
- [26] ORLANDI, A.; LO PIPPARO, G. B.; MAZZETTI, C. Analytical expressions for current share in lightning protection systems. **European Transactions on Electrical Power Engineering**, v.5, n.2, p.107-14, March/April 1995.
- [27] ORLANDI, A.; SCHIETROMA, F. Attenuation by lightning protection system of induced voltages due to direct strikes to a building. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.38, n.1, p.43-50, Feb. 1996.
- [28] SOWA, A. Surge current distribution in building during a direct lightning stroke. In: 1991 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Cherry Hill - N.J, 1991. **Proceedings**. p.103-5.
- [29] SOWA, A. Lightning overvoltage in wires within buildings. In: 1991 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Cherry Hill - N.J, 1991. **Proceedings**. p.99-102.
- [30] SOWA, A. Calculation of lightning current distribution in buildings. In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Berlin, 1992. **Proceedings**. p.111-5.
- [31] SOWA, A. Lightning voltages induced inside the building during a direct stroke. In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Berlin, 1992. **Proceedings**. p.165-9.

- [32] JOHNS, P. B.; BEURLE, R. L. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission line matrix. *Proc. IEE*, v.118, n.9, p.1203-8, Sept. 1971.
- [33] HOEFER, W. J. R. The transmission line matrix method - Theory and application. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, v.33, n.10, p.882-93, Oct.1985.
- [34] WELLAUER, M. *Introdução à técnica das altas tensões*. São Paulo, Polígono, EDUSP, 1973.
- [35] MATTHEW; SADIKU, N. O. *Numerical techniques in electromagnetics*. Boca Raton, CRC Press. Inc., 1992. chap.7, p.501-69 : Transmission - line - matrix method.
- [36] PAUL, C. R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1992.
- [37] RUBINSTEIN, M.; UMAN, M. A. Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole, revised. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v.33, n.4, p.312-20, Nov. 1991.
- [38] YEE, K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. AP-14, n.8, 302-7, May 1966.
- [39] GAO, B. Q.; GANDHI, O. M. An expanding grid algorithm for the finite-difference time-domain method. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v.34, n.3, p. 75-86, Aug. 1992.
- [40] ANDREW, V. A. et al.. Finite-difference time-domain analysis of HF antennas on helicopter airframes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v.39, n.2, p. 100-13, May 1997.
- [41] ANDERSON, J. G. Lightning performance of EHV-UHV lines. In: ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *Transmission line reference book 345kV and above*. 2nd ed. Palo Alto, EPRI, 1982. chap.12, p.545-97.
- [42] LAT, M. V. et al. *Application guide for surge arrester on distribution systems*. Report for The Canadian Electrical Association. Toronto, Ontario Hydro, Sept. 1988.

- [43] SCHELKUNOFF, S. A.; FRIIS, H. T. **Antennas - Theory and practice.** New York, John Wiley, 1952. chap.8, p.213-69: Antenna current, e chap.10, p.303-31: Small antennas.
- [44] GROVER, F. W. **Inductance calculations - Working formulas and tables.** New York, D. Van Nostrand Company, Inc. 1946. chap.5, p.31-44: Parallel elements of equal length.
- [45] KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S. **High voltage engineering - Fundamentals.** Pergamon Press, 1970. chap.3, p.152-94: Measurement of high voltages.
- [46] AMETANI, A. et al. Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model. **IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.**, v.141, n.4, p.339-45, July 1994.
- [47] GUPTA, B. R.; THAPAR, B. Impulse impedance of grounding grids. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.99, n.6, p.2357-62, Nov./Dec. 1980.
- [48] CHISHOLM, W. A.; JANISCHEWSKYJ, W. Lightning surge response of ground electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.4, n.2, p.1329-37, April. 1989.
- [49] TESCHE, F. M. Topological concepts for internal EMP protection. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v.26, n.1, Jan. 1978.
- [50] BAKER, G.; CASTILLO, J. P.; VANCE, E. F. Potential for a unified topological approach to electromagnetic effects protection. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.34, n.3, p.267-74, Aug. 1992.
- [51] DOMMEL H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks. **IEEE Transactions Power Apparatus and Systems**, v.88, p.388-9, April 1969.
- [52] RUBINSTEIN M.; UMAN, M. A. Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: Application to lightning. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.31, n.2, p.183-9, Nov. 1989.
- [53] UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K.; KRIDER, E. P. The electromagnetic radiation from a finite antenna. **American Journal of Physics**, v.43, n.2, p.33-8, Jan. 1975.

- [54] MASTER, M. J., UMAN, M. A. Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole. **American Journal of Physics**, v.51, n.2, Feb. 1983.
- [55] ARI, N.; BLUDER, W. Transient Electromagnetic fields due to switching operations in electric power systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.29, n.3, p.233-7, Aug. 1987.
- [56] THOMAS, D. W. P.; CHRISTOPOULOS, C.; PEREIRA, F. T. Calculation of radiated electromagnetic fields from cables using time-domain simulation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.36, n.3, p. 201-5, Aug. 1994.
- [57] SHI, R. S.; DARCHERIF, A.; SABONNADIÈRE, J. C. Computation of transient electromagnetic field radiated by a transmission line: An exact model. **IEEE Transactions on Magnetics**, v.31, n.4, p. 2423-31, July 1995.
- [58] NUCCI, C. A.; RACHIDI, F; IANOZ, M. V.; MAZZETTI, C. Lightning-induced voltages on overhead lines. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.35, n.1, p. 75-86, Feb. 1993.
- [59] KORSUNCEV, A. V. Application on the theory of similarity to calculation of impulse characteristics of concentrated electrodes. **Electrichestvo**, n.5, p. 31-5, 1958.
- [60] SUNDE, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems**. New York, D. Van Nostrand Company Inc., 1949. Chap. III, p.66-97: Resistance conduction effects. Chap. VIII, p. 254-89: Surge characteristics of earth-return conductors.
- [61] RAMO, S; WHINNERY, J. R.; VAN DUZER, T. **Campos e ondas em eletrônica das comunicações**. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A., 1981. Cap. 4, p.194-8 : Equações de Maxwell.
- [62] DE BOOR; C. **A practical guide to spline**. New York, Springer-Verlag, 1978.
- [63] HEIDLER, F. Traveling current source model for LEMP calculation. In: 6th INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON EMC, Cherry Hill - N.J, 1985. **Proceedings**. p.157-62.

- [64] LETEINTURIERSTER, C.; WEIDMAN, C.; HAMFLIN, J. Current and electric field derivatives in triggered lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v.95, n.D1, p. 811-28, Jan. 1990.
- [65] KÖNIG, M. Lightning current distribution in typical buildings with natural components. In: 22nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, Budapest, 1994. **Proceedings**. p. R4-07 1-6.