



GRUPO X

SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)

DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INCIDENTES EM TORRES, EDIFÍCIOS E INSTALAÇÕES

Carlos Portela *

COPPE / UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

O artigo apresenta um método computacional para avaliar a distribuição estatística dos parâmetros dos impulsos de descargas atmosféricas em torres, estruturas, edifícios e antenas, e eventuais “conjuntos” ou estruturas complexas, tais como instalações de telecomunicações, subestações e usinas. Esse método é baseado num modelo eletrogeométrico (EGLM), que foi aplicado extensivamente, com bons resultados. A partir da geometria tridimensional do objeto (por exemplo, uma antena, uma torre, um edifício), e, eventualmente, de outros objetos na sua vizinhança, e considerando a distribuição estatística dos parâmetros das descargas atmosféricas, em solo plano, obtém-se o número de descargas atmosféricas no objeto (em sentido estatístico), e a distribuição estatística dos principais parâmetros desses impulsos. Apresentam-se alguns exemplos de aplicação prática.

PALAVRAS-CHAVE

Descarga atmosférica, parâmetros, distribuição estatística

1. - INTRODUÇÃO

O artigo apresenta um método computacional para avaliar a distribuição estatística dos parâmetros dos impulsos de descargas atmosféricas em torres, estruturas, edifícios e antenas, e eventuais “conjuntos” ou estruturas complexas, tais como instalações de telecomunicações, subestações e usinas. Esse método é baseado num modelo eletrogeométrico (EGLM, “electrogeometric lightning model”), que foi aplicado extensivamente, com bons resultados, avaliados a partir da concordância entre a experiência operacional e o comportamento previsto em fase de projeto, e está sendo aplicado, presentemente, em diversos projetos, em regiões com elevada incidência de descargas atmosféricas (talvez a maior incidência do mundo, em alguns dos locais em causa).

2. - MODELO ELETROGEOMÉTRICO (EGLM)

O modelo eletrogeométrico (EGLM) baseia-se no comportamento físico dominante dos fenômenos associados às descargas atmosféricas, considerando, nomeadamente:

- A fase de pré-descarga, em que ocorrem sucessivas descargas parciais, no ar, com disrupção ao longo de canais parciais. Após cada descarga parcial, flui carga elétrica através do canal previamente ionizado, formado durante a disrupção. Essa carga acumula-se na extremidade do canal, originando uma outra disrupção parcial, noutra canal parcial, de comprimento r , até se formar um canal completo, entre uma região eletricamente carregada da nuvem, e a terra ou “objeto”. Esta fase não é facilmente “visível”, a carga total no canal não é muito elevada, e a velocidade média de formação do canal é pequena (da ordem de 10^{-3} a velocidade da luz). Em consequência, os efeitos induzidos, durante esta fase, são bastante moderados.

- A fase de descarga principal, durante a qual uma corrente intensa flui através do canal ionizado formado na fase anterior. A parte do canal na qual flui corrente intensa tem “início” perto do solo ou de objeto aterrado, e o seu comprimento aumenta com uma velocidade da ordem de 0,3 vezes a velocidade da luz, até ser atingida a principal região (ou uma das principais regiões) carregada eletricamente, na nuvem. A corrente é muito elevada, e ocorrem efeitos luminosos e sonoros intensos. Esta fase é a normalmente detectada, e tem consequências importantes, associadas diretamente com a corrente do impulso da descarga, e com os seus efeitos induzidos.

O EGLM considera algumas aproximações do comportamento observado das descargas, nomeadamente:

- Considera-se uma relação funcional entre a amplitude do impulso de corrente de descarga, I , e a distância de salto, r , na fase de pré-descarga. Para maior rigor, r pode ser considerada relacionada, em sentido estatístico, com diversos parâmetros do impulso de descarga. Deve escolher-se um compromisso razoável, em virtude das limitações dos dados disponíveis, que não permitem estabelecer uma representação segura considerando um número elevado de parâmetros.

- A orientação espacial dos canais das pré-descargas parciais é considerada com distribuição estatística, com parâmetros dependentes da distância ao solo. A orientação pode ser definida, por exemplo, por duas coordenadas angulares α , φ , num sistema de

coordenadas esféricas ρ , α , φ , com um eixo z vertical (sendo α o ângulo com o eixo z).

- Admite-se que o canal completo de pré-descarga é formado atingindo o primeiro objeto (ou solo) a distância inferior a r do canal incompleto formado anteriormente.

- Devem ser considerados alguns aspectos estatísticos adicionais, como, por exemplo, o campo elétrico próximo de objetos cuja tensão em relação ao solo seja importante (por exemplo, condutores de fase de linhas de muito alta tensão).

Considerando a distribuição estatística dos parâmetros das descargas atmosféricas, com diferentes distribuições para os impulsos positivos, para os primeiros impulsos negativos, e para os impulsos negativos subsequentes (sendo cada um desses três grupos estatisticamente homogêneo, mas sendo os três grupos muito diferentes entre si), pode obter-se, com o EGLM, a distribuição estatística de descargas atmosféricas, e o número de descargas atmosféricas de cada tipo, por ano (em sentido estatístico), em diversos objetos, nomeadamente antenas, torres, edifícios, e “conjuntos” complexos, como, por exemplo, instalações de telecomunicações, subestações, usinas, instalações industriais e residenciais.

A metodologia computacional, apresentada no artigo, tem dois importantes aspectos, ambos essenciais para aplicação concreta:

- Permitir aplicação fácil para condições genéricas, incluindo diversos tipos de estruturas, torres e edifícios, e instalações complexas.
- Considerar relações funcionais e parâmetros de distribuições estatísticas escolhidos adequadamente, de maneira a assegurar resultados confiáveis.

Para processamento computacional, o EGLM considera, para cada objeto individualizado, uma superfície envolvente, dependente da distância de salto, r . A orientação de uma descarga parcial é definida por α , φ . A probabilidade de uma descarga incidir no objeto, para esses valores de r , α , φ , é igual à probabilidade de a descarga, com solo plano e na ausência do objeto, ocorrer numa área específica do solo igual à área da sombra dessa superfície envolvente (num plano horizontal por baixo dessa superfície).

Na Figura 1, representa-se, tridimensionalmente (3D), o caso de uma torre, com a geometria da Figura 1-a. A superfície envolvente, para três valores diferentes de r , é representada nas Figuras 1-b, 1-c, 1-d. Para um conjunto particular de ângulos α , φ , a área de sombra é a área representada pela superfície cinza escura, assinalada com **S**. Neste exemplo, a superfície, **S**, da área de sombra, é função de r , α , e independente de φ .

Na Figura 2, representa-se, em 3D, o caso de uma estrutura estaiada (com a geometria da Figura 2-a). A superfície envolvente, para três valores diferentes de r , é representada nas Figuras 2-b, 2-c, 2-d. Neste exemplo, a superfície, **S**, da área de sombra, é função de r , α , φ .

Escolhemos os parâmetros do EGLM a partir de uma análise extensa e cuidadosa de medidas publicadas relacionadas com descargas atmosféricas. Esses parâmetros foram

aplicados a um elevado número de linhas de transmissão, com um comprimento total muito elevado, e a um número razoável de torres de telecomunicações, com muito bons resultados, avaliados pelo comportamento real, durante vários anos, dessas linhas e torres.

A informação estatística disponível baseia-se, não nos ângulos α , φ , mas no ângulo, θ , do canal de descarga, com uma reta vertical, como visto por um observador localizado num ponto muito afastado.

Para o caso de linhas de transmissão, essencialmente bidimensional, a distribuição estatística do ângulo θ pode ser usada diretamente. Para geometria tridimensional (3D), é necessário considerar a distribuição estatística de α , φ . Como, com terreno plano, a densidade de probabilidade é independente de φ , a distribuição de probabilidade de θ permite obter a distribuição de probabilidade de α , φ .

Na Figura 3 indicam-se algumas relações funcionais usadas no EGLM. Nas Figuras 3-a e 3-b representa-se as distribuições de probabilidade de θ , α . Essas distribuições têm um parâmetro ξ , que é função da altura do objeto ao solo, **H**, conforme indicado na Figura 3-c. Na Figura 3-d representa-se a relação entre a amplitude, **I**, de um impulso de descarga atmosférica, e o valor médio (em sentido estatístico) da distância de salto, r , para os primeiros impulsos negativos.

Na Figura 3-e representa-se a probabilidade, **P**, de a amplitude da descarga atmosférica ser superior a **I** (em abcissa), segundo as medidas de Berger, para os primeiros impulsos das descargas negativas (curva **F**). Medidas cuidadosas recentes confirmam, aproximadamente, as distribuições obtidas por Berger para as descargas negativas, mas não para as descargas positivas. A curva **V** é uma distribuição obtida a partir de [3], para análise de validade.

A Figura 3-f representa a relação, média, entre o nível querúnico, em dias de trovoada por ano, **N**, e o número médio de descargas no solo, por quilómetro quadrado e por ano, **D**.

Na Figura 4 apresentam-se parâmetros exemplificativos, relativos a uma torre, do tipo da da Figura 1, com altura 100 m, numa região com **D** = 25. Em 4-a, representa-se a superfície, **S**, da área de sombra, em função de r , para alguns valores de α . Em 4-b, representa-se **S** (valor médio estatístico) em função de **I**, considerando a distribuição estatística de α . Em 4-c representa-se o número médio, **M**, de descargas atmosféricas por ano, de amplitude superior a **I**, incidentes na torre, em função de **I**.

Nas distribuições estatísticas apresentadas, descargas com mais de um impulso (caso típico de descargas negativas, que podem ter um primeiro impulso negativo e nenhum, um ou vários impulsos negativos subsequentes), são contadas como uma descarga, independentemente do número de impulsos numa mesma descarga.

O procedimento computacional que desenvolvemos manipula a geometria das superfícies envolventes e as respectivas sombras, e as distribuições estatísticas dos parâmetros das descargas atmosféricas, permitindo obter as distribuições estatísticas dos impulsos das descargas atmosféricas

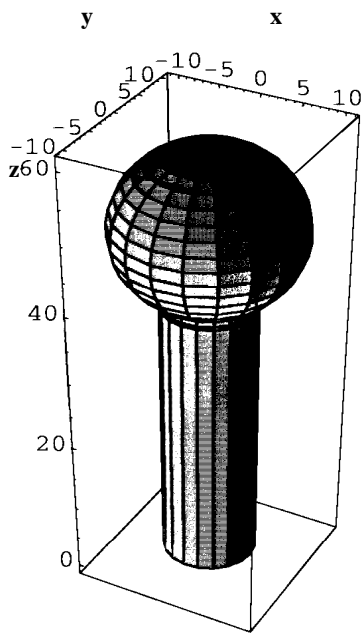


FIGURA 1-(a)

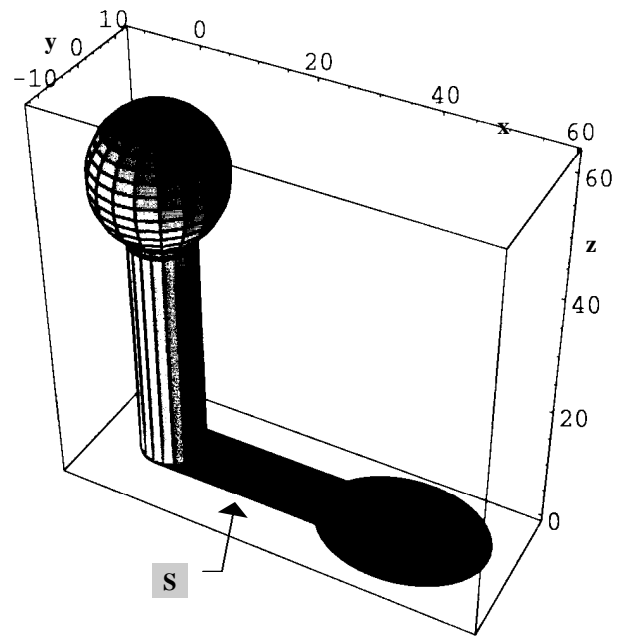


FIGURA 1-(b)

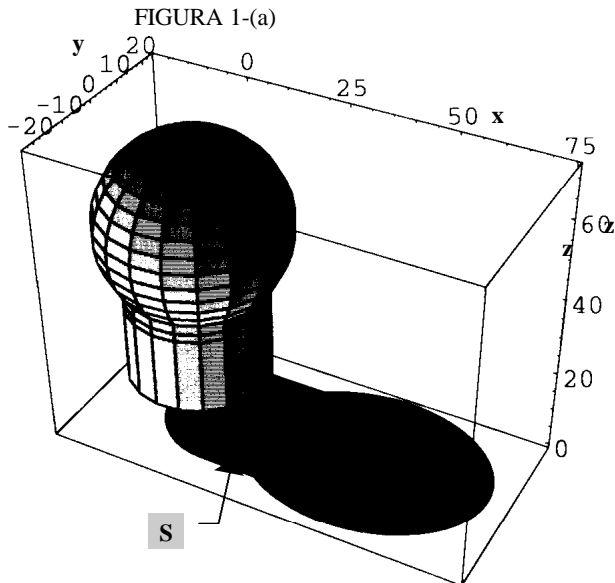


FIGURA 1-(c)

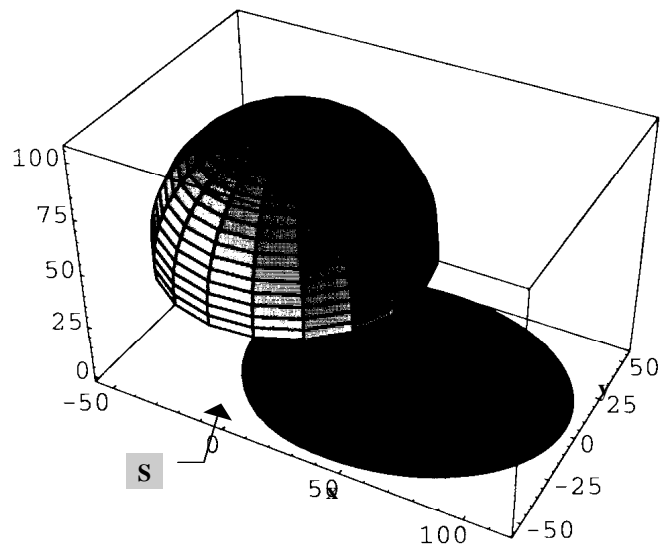


FIGURA 1-(d)

FIGURA 1 - Representação esquemática tridimensional da aplicação do EGLM a uma torre, com a geometria da Figura 1-a . Nas Figuras 1-b, 1-c, 1-d, representa-se a superfície envolvente, para três valores diferentes de r . A área de sombra, para um conjunto concreto de valores dos ângulos α , φ , é representada pela superfície escura, sinalizada **S** om . Neste exemplo, a superfície, **S** , da área de sombra, é função de r , α , e independente de φ . As coordenadas espaciais ortogonais, x , y , z , estão expressas em metro.

incidentes em um ou mais objetos (por exemplo, estruturas, torres, edifícios, pára-raios, instalações de telecomunicações, subestações, usinas). Esta informação é essencial para avaliar as consequências das descargas atmosféricas, quanto a segurança de pessoas e equipamentos, diversos tipos de efeitos induzidos, procedimentos para obter parâmetros de risco adequados, e projeto otimizado de equipamento, instalação, cablagem e aterramento. Por exemplo:

-Numa torre estaiada as distribuições estatísticas das amplitudes das descargas incidentes nos estais, ou no topo

da torre, e em equipamentos próximos, de altura moderada, são completamente diferentes.

-No caso de subestações com redes adequadas de cabos pára-raios, as distribuições estatísticas de descargas incidentes nos cabos pára-raios, nos barramentos, nos equipamentos e no solo, são, também, completamente diferentes.

Nos dois exemplos anteriores, as diferenças em causa afetam o aterramento, as formas de ligação ao aterramento, os condicionamentos de blindagem de cabos e de

aterramento dessas blindagens, a coordenação de isolamento e a confiabilidade.

Cabe ressaltar que as descargas atmosféricas podem originar tensões muito elevadas entre pontos da malha de

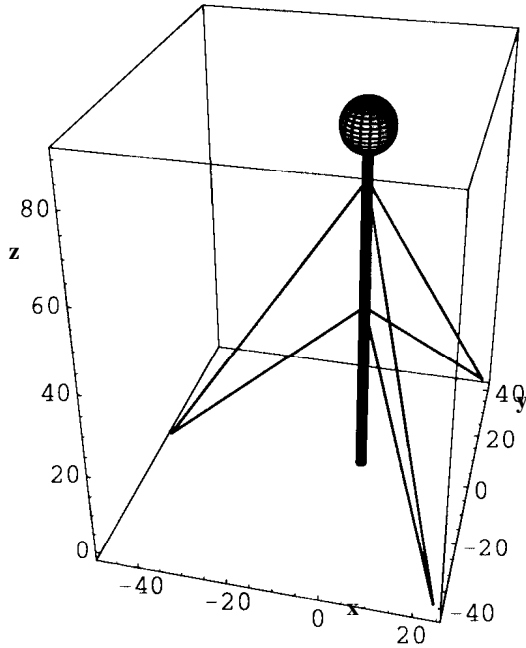


FIGURA 2-(a)

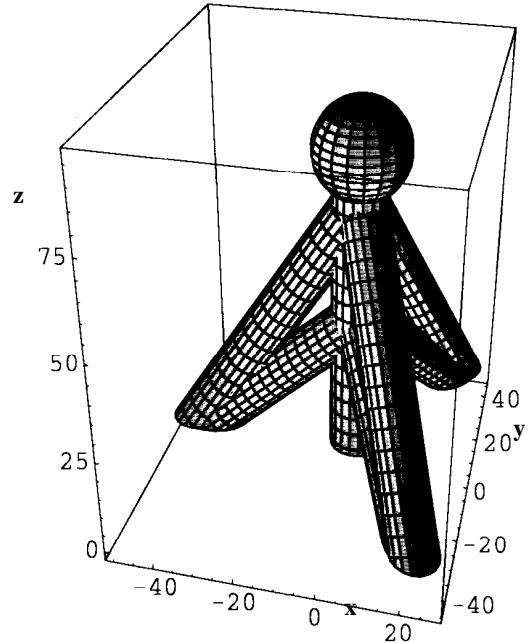


FIGURA 2-(b)

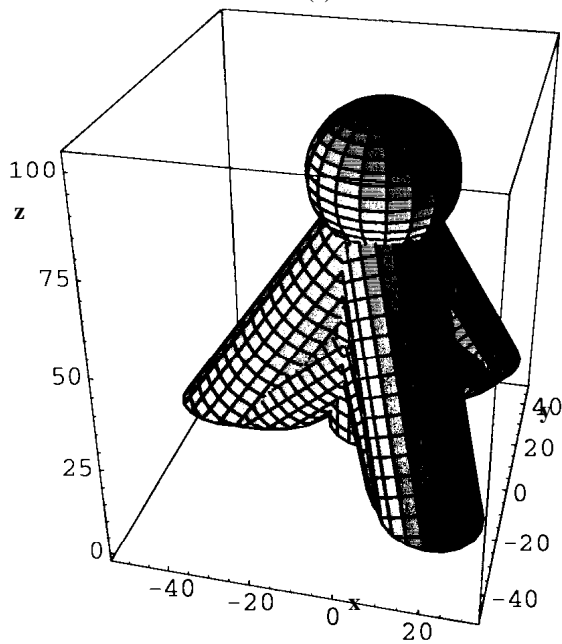


FIGURA 2-(c)

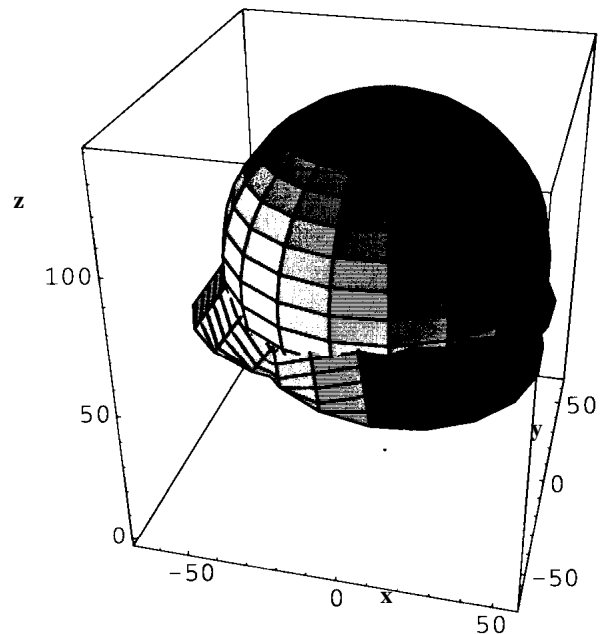


FIGURA 2-(d)

FIGURA 2 - Representação esquemática tridimensional da aplicação do EGLM a uma torre estaiada, com a geometria da Figura 2-a . Nas Figuras 2-b, 2-c, 2-d, representa-se a superfície envolvente, para três valores de r . Neste exemplo, a superfície, S , da área de sombra, é função de r , α , φ . As coordenadas espaciais ortogonais, x , y , z , estão expressas em metro.

terra, entre pontos de elementos metálicos aterrados, e entre pontos do solo na área da malha de terra, bem com efeitos induzidos muito intensos, nomeadamente em circuitos e cabos, mesmo que não aterrados.

3. - EXEMPLOS DE RESULTADOS

Para ilustrar ordens de grandeza e resultados globais relativos a incidência de descargas atmosféricas, escolheram-se diversos casos de aplicação, por meio do programa *TRANSMATER* (*Transitórios em malhas de terra*), que usa o EGLM, em diversos estudos concretos de aterramento, considerando descargas atmosféricas.

Os exemplos considerados referem-se a diversas instalações, com áreas variando de cerca de 25 000 m² a 160 000 m², em locais com incidência média de descargas atmosféricas, em solo plano, variando de 8 a 42 descargas por quilômetro quadrado e por ano, e com equipamentos com alturas diversas, até cerca de 50 m (em algumas das instalações em causa).

Na Figura 5 representam-se curvas, traduzindo, cada uma delas, para uma instalação e configuração de equipamento, o número médio, M , de descargas atmosféricas por ano, de amplitude superior a I , incidindo na instalação (incluindo equipamento, estruturas e solo) em função de I .

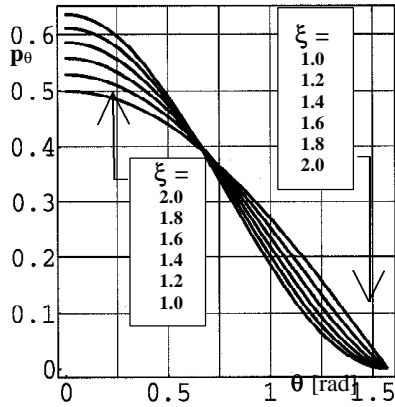


FIGURA 3-(a)

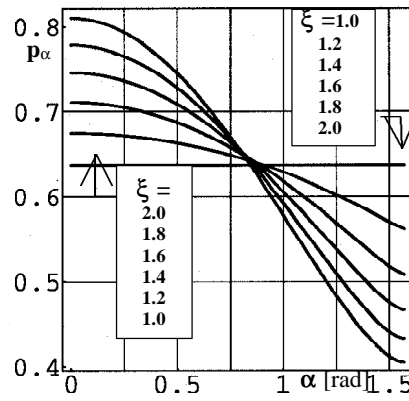


FIGURA 3-(b)

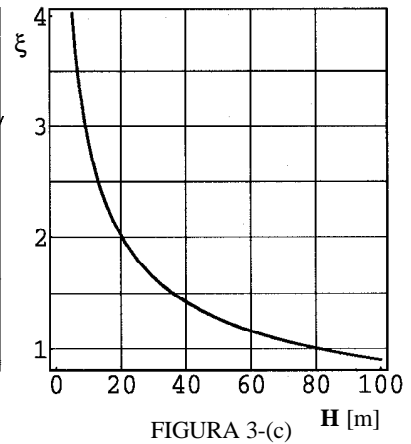


FIGURA 3-(c)

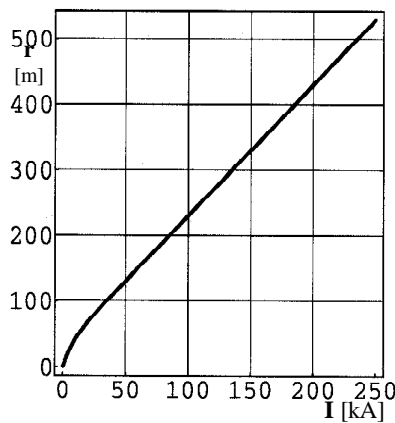


FIGURA 3-(d)

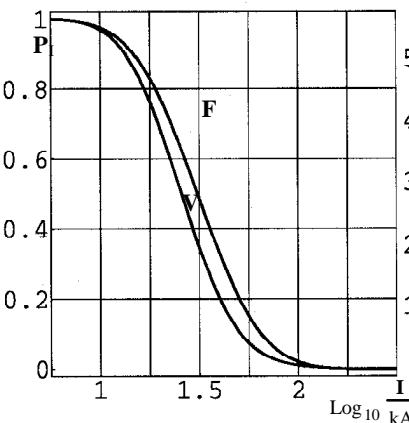


FIGURA 3-(e)

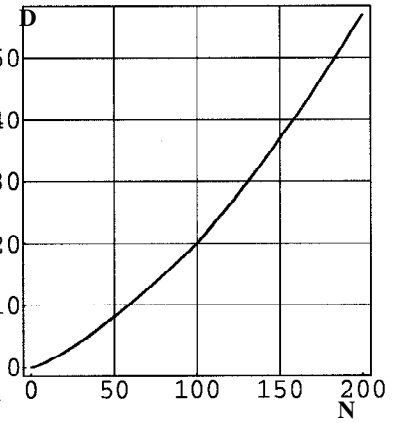


FIGURA 3-(f)

FIGURA 3 - Representação gráfica de algumas relações funcionais usadas no EGLM. Nas Figuras 3-a e 3-b representa-se a distribuição de probabilidade de θ , α , (em radiano), sendo p_θ a densidade de probabilidade de θ , em função de θ , e p_α a densidade de probabilidade de α , em função de α . Essas distribuições têm um parâmetro, ξ , que depende da altura do objeto ao solo, H , conforme representado na Figura 3-c. Na Figura 3-d representa-se a relação entre a amplitude, I , do impulso de descarga atmosférica (em sentido estatístico) e o valor médio (em sentido estatístico) da distância de salto, r , para os primeiros impulsos. Na Figura 3-e representa-se, pela curva F , a probabilidade, P_1 , de a amplitude, I , do impulso da descarga atmosférica ser excedida, para os primeiros impulsos (positivos ou negativos); a curva V é uma distribuição obtida a partir de [3], para análise de validade. A Figura 3-f representa a relação média entre N (nível querânico, em dias de trovoada por ano) e D (número médio de descargas no solo, por quilômetro quadrado e por ano).

Naturalmente, a amplitude da descarga é apenas um dos indicadores de severidade da descarga. Interessam, também, o ponto de incidência, a forma do impulso da descarga atmosférica (ou do conjunto de impulsos, no caso de a descarga ter sucessivos impulsos), avaliada por diversos parâmetros de severidade, as características do solo, a concepção e características do sistema de aterramento e das ligações ao mesmo, quer de estruturas e elementos aterrados, quer de circuitos, a disposição e condicionamentos de blindagem e aterramento de equipamentos e cabos, as características de suportabilidade de equipamentos e cabos. A discussão destes aspectos está fora do âmbito deste artigo. Em [1-2, 4-9] apresentam-se alguns condicio-

mentos e formas de tratar o assunto. Para uma análise básica, em termos de severidade, para alguns aspectos de suportabilidade de equipamentos, é viável considerar formas específicas dos impulsos das descargas, e, neste sentido e para alguns efeitos, associar uma "severidade equivalente" da descarga à amplitude da mesma. Dentro desta concepção e para os efeitos em que a mesma é válida, há que estimar, como critério orientativo de proteção contra descargas atmosféricas, uma amplitude "limite" de referência, associada a um risco ou probabilidade de ocorrer uma descarga excedendo esse limite. Como ordem de grandeza genérica, e salvo condicionamentos específicos eventuais que justifiquem outro critério, considero o seguinte:

- Para conseqüências de gravidade moderada, por exemplo danificação de partes de equipamento de custo moderado, e cuja indisponibilidade, durante o tempo necessário para substituição ou reparação, não tenha conseqüências muito graves, considerar, como critério de projeto, a amplitude da descarga atmosférica (no sentido precisado acima) com probabilidade de ser excedida, em média, uma vez em cerca de trinta anos.

- Para conseqüências de elevada gravidade, por exemplo danificação de partes de equipamento de custo muito elevado, ou cuja indisponibilidade durante o tempo necessário para substituição ou reparação tenha conseqüências muito graves, considerar, como critério de projeto, a amplitude da descarga atmosférica (no sentido precisado acima) com probabilidade de ser excedida, em média, uma vez em cerca de cem anos.

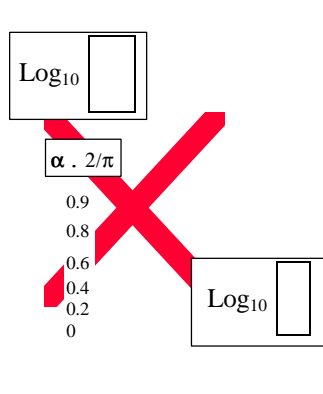


FIGURA 4-(a)

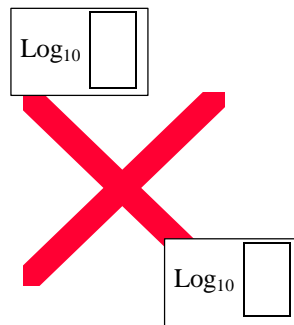


FIGURA 4-(b)

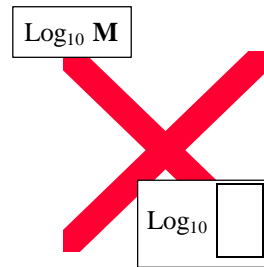


FIGURA 4-(c)

FIGURA 4 - Exemplo de parâmetros relativos a uma torre, do tipo da da Figura 1, com altura 100 m. Em 4-a, representa-se a superfície, S , da área de sombra, em função de r , para alguns valores de α . Em 4-b, representa-se S (valor médio estatístico) em função de I , considerando a distribuição estatística de α . Em 4-c representa-se o número médio, M , de descargas atmosféricas por ano, de amplitude superior a I , incidentes na torre, em função de I .

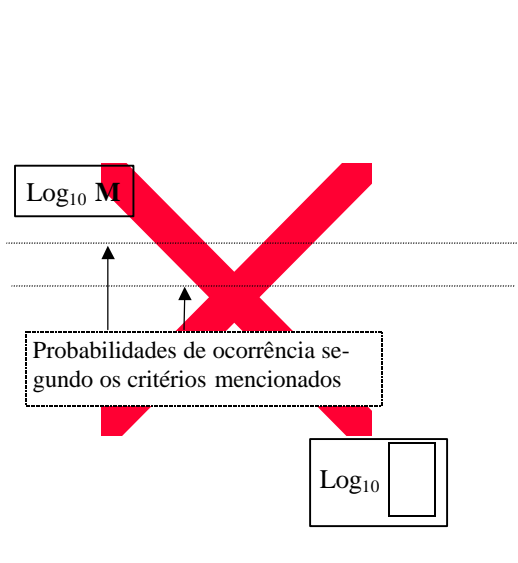


FIGURA 5 - Relação entre M e I , em diversas instalações concretas.

Para os exemplos da Figura 5, estes dois critérios, correspondem a amplitudes de descarga atmosférica básica, para efeitos de projeto, variando, respectivamente, de 95 kA a 170 kA, e de 130 kA a 210 kA.

4. - CONCLUSÕES

A metodologia apresentada, conjuntamente com metodologias, existentes, para simular corretamente o

comportamento de sistemas de aterramento, na ocorrência de descargas atmosféricas, e os efeitos induzidos conseqüentes, permite considerar, de forma adequada, as descargas atmosféricas, no projeto e otimização de instalações, incluindo subestações, usinas, instalações de telecomunicações e industriais, e edifícios.

Esse conjunto de metodologias, bastante diferente dos procedimentos tradicionais, está em nível operacional e foi submetido a verificações de validade, quanto aos diversos aspectos pertinentes [1-2, 4-9].

Os procedimentos tradicionais têm importantes restrições de validade, quanto às conseqüências de descargas atmosféricas.

A consideração, adequada, das descargas atmosféricas, afeta, de forma muito importante, a concepção e o projeto otimizados de subestações, usinas e instalações de telecomunicações, especialmente em regiões com elevada incidência de descargas, como sucede na maior parte do Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] Portela, C. - Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems - I Physical and Methodological Aspects, *Proceedings IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 380-384, Agosto de 1997, Austin, Estados Unidos
- [2] Portela, C. - Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems - II Practical Application Examples, *Proceedings IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 385-390, Agosto de 1997, Austin, Estados Unidos
- [3] Chai, J., Montegut, J., Russy, S. - Survey of CGLSS/SLC40 Lightning Data and Retest, *Proceedings 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 391-396, Agosto de 1997, Austin, Estados Unidos

- [4] Portela, C. - Comportamento de Sistemas de Aterramento para Descargas Atmosféricas . Determinação de Efeitos Relativos a Segurança de Pessoas e Equipamentos e a Interferência em Sistemas de Proteção e Controle - *XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, FL/GSI/17 pp. 1-6, Outubro de 1997 , Belém, Brasil
- [5] Portela, C. - Soil Electromagnetic Behavior - *Ground'98 International Conference on Grounding and Earthing, Proceedings*, pp. 53-58 - Abril de 1998, Belo Horizonte, Brasil
- [6] Portela, C. - Statistical Distribution of Parameters of Lightning Impulses in Antennas, Towers and Buildings - Methodological Aspects - *Proceedings IEEE 1998 International Symposium on Electromagnetic Compatibility* - pp. 1018-1023, Agosto de 1998, Denver, Estados Unidos
- [7] Portela, C. - Statistical Distribution of Parameters of Lightning Impulses in Antennas and Radar Towers - Practical Application Examples - *Proceedings IEEE 1998 International Symposium on Electromagnetic Compatibility* - pp. 259-264, Agosto de 1998, Denver, Estados Unidos
- [8] Portela, C. - *TRANSMATER Transitórios em Malhas de Terra* - Fundação COPPETEC, Outubro de 1998 , Rio de Janeiro, Brasil
- [9] Portela, C. - Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior - *Proceedings IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility* - Agosto de 1999, Seattle, Estados Unidos