



**SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC 08
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

MODELAGEM DA ESPERANÇA MATEMÁTICA DE CURTOS-CIRCUITOS NUMA LINHA DE TRANSMISSÃO ORIGINADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA LINHA OU NO SOLO PRÓXIMO

João Clávio Salari *
CEPEL

Carlos Portela
COPPE/UFRJ

RESUMO

Este artigo é dividido em duas partes principais. Na primeira parte apresenta-se uma metodologia para o cálculo do número de descargas atmosféricas que atingem diretamente os cabos de uma linha de transmissão e que atingem pontos da superfície do solo próximos da linha e que podem provocar sobretensões importantes na mesma. Na segunda parte apresenta-se e exemplifica-se um processo para a modelagem da esperança matemática dos curtos-circuitos na linha originados por tais tipos de incidência da descarga. O processo de cálculo global foi implementado na segunda versão do programa computacional DATMOS [1].

PALAVRAS-CHAVE

Descargas Atmosféricas, Domínio da Frequência, Transitórios Eletromagnéticos

1.0 - INTRODUÇÃO

Quando uma descarga atmosférica atinge uma linha de transmissão ou um ponto da superfície do solo próximo da linha, surge um fenômeno eletromagnético transitório, que depende dos parâmetros e da geometria da linha, e dos parâmetros da descarga, sendo que muitos destes elementos apresentam uma grande dispersão estatística. Em geral, o primeiro impulso da descarga atmosférica pode ser seguido de um ou mais impulsos, sendo que cada impulso subsequente é caracterizado por diferentes parâmetros e pode atingir um ponto diferente. Além disso, basicamente, dois tipos de incidência podem ser estabelecidos, nomeadamente:

- Incidência direta: em uma torre, cabo pára-raios ou cabo de fase.
- Incidência indireta: em um ponto na superfície do solo próximo da linha.

Em ambas as incidências, devido ao acoplamento eletromagnético entre todos os componentes da linha e entre o canal da descarga atmosférica, o fenômeno eletromagnético se propagará pelos cabos pára-raios, cabos de fase, torres (incluindo eventuais estais) e sistemas de aterramento. Por causa de tal propagação, ocorrerão sobretensões, e.g. entre um ponto de uma torre e um cabo de fase, e entre um cabo de fase e um cabo pára-raios. Se alguma dessas sobretensões exceder a tensão suportável do isolamento em questão, um curto-circuito ocorre, sendo este tipicamente entre fase e terra.

Portanto, para o cálculo do desempenho de uma linha de transmissão no seguimento da incidência de descargas atmosféricas, dois passos básicos devem ser considerados. Inicialmente, com base em modelos do tipo eletrogeométrico, calcula-se o número de descargas atmosféricas diretas na linha e o número de descargas indiretas no solo (que podem provocar sobretensões importantes na linha), em um sentido estatístico, e.g., expressos em termos do número médio estatístico por 100 km de comprimento da linha e por ano, e da distribuição estatística de parâmetros importantes, com relação a: forma de onda do impulso de corrente da descarga, ponto de incidência, vãos da linha, parâmetros do aterramento de estruturas próximas e parâmetros do associado canal da descarga atmosférica, incluindo correlações importantes de tais distribuições estatísticas de tais parâmetros pertinentes. Então, em função de parâmetros pertinentes e da sua distribuição estatística, para cada combinação de parâmetros, calcula-se a consequente propagação de surtos ao longo da linha, e, assim, em função da suportabilidade dos isolamentos fase-fase e fase-terra e das características desta propagação, o efeito da incidência da descarga, nomeadamente o número e o tipo dos consequentes curtos-circuitos na linha, em sentido estatístico, que define o desempenho da linha para o estudo em causa. No caso dos impulsos negativos da descarga atmosférica, nota-se o seguinte quanto aos impulsos negativos subsequentes:

- Os impulsos subseqüentes estão associados a uma velocidade de propagação, ao longo do canal de descarga, em termos estatísticos, superior à velocidade de propagação associada ao primeiro impulso negativo, e a carga da nuvem escoada por meio do impulso, através do canal, em termos estatísticos, é inferior à carga da nuvem escoada por meio do primeiro impulso. Conseqüentemente, em termos estatísticos, a amplitude dos impulsos negativos subseqüentes é inferior à amplitude do primeiro impulso, e o tempo de frente dos impulsos subseqüentes é inferior ao tempo de frente dos primeiros impulsos.
- Como resultado, em termos estatísticos, os primeiros impulsos são tipicamente mais severos que os impulsos subseqüentes, especialmente para descargas incidindo nas estruturas ou nos cabos pára-raios próximo das estruturas. Todavia, para descargas incidindo na região central do vão, para as quais a probabilidade de interrupção a meio do vão é muito afetada pelo tempo de frente do impulso e comprimento do vão, os impulsos subseqüentes podem ter influência importante no número de curtos-circuitos, e devem ser explicitamente consideradas no cálculo do número de curtos-circuitos originados por descargas atmosféricas, em termos estatísticos.

Cumpra mencionar que a proposta desse procedimento computacional é um resultado em um sentido estatístico considerando-se a distribuição estatística de vários parâmetros, sendo muitos destes com distribuição contínua. Conseqüentemente, se for usado um procedimento de análise probabilística baseado em distribuições discretas, necessita-se inúmeros e distintos cálculos de propagação de surtos pela linha, podendo-se atingir facilmente a quantidade de milhares de simulações, como ocorre em processos tradicionais baseados no sorteio aleatório de variáveis (e.g. o Método de Monte Carlo). Assim, devido ao grande número de parâmetros e à complexidade relativa da simulação de aspectos importantes, sem uma otimização computacional todo o processo pode ser proibitivo para muitos computadores. Portanto, é basicamente vantajoso considerar apenas um limitado número de parâmetros, escolhidos cuidadosamente, e definir a partir de resultados discretos obtidos as respectivas funções de distribuição.

Cita-se ainda que, muitos dos programas computacionais de uso corrente, durante os últimos anos, para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão no seguimento da incidência de descargas atmosféricas, no mundo (e.g. FLASH) e no Brasil, consideram simplificações não justificadas, as quais, em casos concretos, têm levado a erros importantes de projeto no que respeita ao número de curtos-circuitos associados a descargas atmosféricas. Essa situação infeliz tem sido confirmada pela experiência operacional.

Com vistas a reduzir tais dificuldades numéricas, os autores têm trabalhado no desenvolvimento de vários modelos matemáticos. Por exemplo, para o cálculo da propagação de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, torres e sistemas de aterramento, cita-se as referências [1-7], as quais apresentam procedimentos elaborados nos domínios do tempo e da frequência, sendo que no domínio da frequência se encontram os modelos mais precisos. Para o cálculo do correspondente desempenho das linhas, elaborou-se inicialmente a metodologia apresentada em [1], a partir do conteúdo exposto em [2], culminando em um processo expedito, embora suficiente para várias análises, e que foi implementado na primeira versão do programa computacional DATMOS – *Desempenho de Linhas de Transmissão à Incidência de Descargas Atmosféricas* –, utilizando-se a linguagem de programação Fortran 90. Recentemente, buscou-se a generalização e a otimização do cálculo implementado no programa DATMOS, além da inclusão da viabilidade de se acessar externamente o cálculo de cada propagação de descargas atmosféricas pela linha.

Esse novo processo é apresentado e exemplificado neste artigo. A partir dos resultados apresentados, enfocando linhas de transmissão de 138 e 230 kV, e obtidos com um tempo computacional total moderado e elevada precisão numérica, ficará clara a efetividade do processo elaborado, inclusive para análises não-lineares, e.g. quando são instalados pára-raios na linha. Vários outros exemplos de aplicação assim como uma descrição completa do método podem ser encontrados em [7].

2.0 – NÚMERO DE DESCARGAS->DESCARGAS DIRETAS E INDIRETAS

Mostra-se na Figura 1 um cabo de uma linha de transmissão, de índice k , paralelo a superfície do solo. O ângulo θ é o ângulo do precursor da descarga em relação a uma direção vertical, em um plano perpendicular à direção da linha. Conforme as bases do Modelo Eletrogeométrico (MEG), $r_{s,k}$ e $r_{s,solo}$ são as “distâncias críticas” para o cabo e para o solo, respectivamente. Supõe-se que, após uma distância lateral R_{lim} , em princípio variável ao longo do comprimento da linha, uma descarga que incide na superfície do solo não provocará sobretensões que causem um curto-circuito na linha. Essa distância R_{lim} pode ser estimada considerando-se o MEG e um elevado valor da amplitude da corrente da descarga, I_o , tipicamente em torno de 200 kA, o qual é um valor com baixa probabilidade de ser excedido.

Para cada valor da distância crítica $r_{s,k}$ e para cada valor do ângulo θ , incidirá no cabo de índice k uma descarga que, na ausência do cabo, incidiria na superfície do solo, em uma faixa paralela à linha, de largura $D_{d,k}$, sendo $D_{d,k}$ função de $r_{s,k}$, $r_{s,solo}$ e θ . Além disso, há uma relação aproximada entre as distâncias críticas médias $\bar{r}_{s,k}$ e $\bar{r}_{s,solo}$ e a amplitude da corrente I_o . Uma forma assumida para tal relação é do tipo

$$\bar{r}_s = a I_o + b_1 \left(1 - e^{-\frac{I_o}{b_2}} \right), \quad (1)$$

sendo a , b_1 e b_2 parâmetros escolhidos a partir de resultados de medições de campo. Outra forma usada é do tipo

$$\bar{r}_s = c I_o^d, \quad (2)$$

sendo c e d ou valores constantes ou dependentes da altura do cabo e do ponto de incidência (fase: c_{fase} e d_{fase} ; cabo pára-raios: c_{pr} e d_{pr} ; ou solo: c_{solo} e d_{solo}).

Supondo-se que o ângulo θ tem uma densidade de probabilidade dada por $p_\theta(\theta)$, $p_\theta(\theta) d\theta$ é a probabilidade do ângulo θ na faixa $(\theta, \theta + d\theta)$. Portanto, empregando-se a equação (1) ou (2) obtém-se para cada valor de r_{sk} um valor médio do parâmetro D_{dk} , \bar{D}_{dk} , considerando-se todos os valores de θ , i.e.:

$$\bar{D}_{dk} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_{dk}(l_o, \theta) p_\theta(\theta) d\theta. \quad (3)$$

Supondo-se agora que as descargas que, na ausência do cabo, incidiriam no solo, têm uma densidade de probabilidade de l_o igual a $p_{l_o}(l_o)$, e sendo N_g a densidade de descargas para o solo por km^2 e por ano, $N_g p_{l_o}(l_o) dl_o$ é o número de descargas por km^2 e por ano com amplitudes de corrente na faixa $(l_o, l_o + dl_o)$. Portanto, em termos probabilísticos, o número de descargas diretas no cabo, por um comprimento do cabo igual a l_{LT} quilômetros e por ano, Nd_{dk} , é igual a:

$$Nd_{dk} = N_g \int_0^{l_{LT}} \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_{dk}(\theta, l_o, x) p_\theta(\theta, x) p_{l_o}(l_o, x) d\theta dl_o dx; \quad (4)$$

onde D_{dk} deve ser dado em km .

Por outro lado, se l_{LT} é curto (e.g. igual a alguns vãos da linha) ou efeitos de orografia ao longo deste comprimento podem ser desprezados, pode-se desprezar a variação de D_{dk} , θ e l_o com a coordenada x , culminando em uma expressão aproximada, porém muito mais simples, para Nd_{dk} , i.e.:

$$Nd_{dk} = K_g \bar{D}_{dk}; \quad (5)$$

sendo

$$K_g = N_g l_{LT} \quad (6)$$

e

$$\bar{D}_{dk} = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_k(\theta, l_o) p_\theta(\theta) p_{l_o}(l_o) d\theta dl_o. \quad (7)$$

Cumprir observar que, no exemplo da Figura 1, posto que r_{sk} é pequeno, não há interseção entre a linha horizontal à altura $r_{s\text{ solo}}$ com o círculo de raio r_{sk} centrado no cabo k . Entretanto, para valores elevados de r_{sk} (e, conseqüentemente, valores elevados de $r_{s\text{ solo}}$), tal interseção ocorrerá, e imporá uma redução em D_{dk} , já que parte das descargas incidirão diretamente na superfície do solo. Nesse caso, requer-se o cálculo inicial de tal interseção para então se calcular o valor correto de D_{dk} .

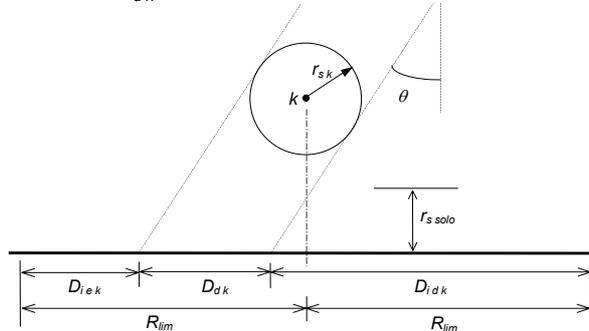


FIGURA 1 – Largura de faixa D_{dk} na superfície do solo onde incidiriam as descargas que incidem no cabo k , na ausência do cabo, e larguras de faixa D_{iek} e D_{idk} na superfície do solo onde atingem as descargas que podem provocar sobretensões importantes no cabo, em função de r_{sk} , $r_{s\text{ solo}}$ e θ

Para a consideração das descargas em pontos do solo próximo ao cabo (indiretas), sejam as larguras D_{iek} e D_{idk} , também dadas na Figura 1. Essas distâncias correspondem respectivamente às larguras de faixa na superfície do solo à esquerda e à direita, onde incidem as descargas que podem provocar sobretensões importantes na linha, em função de r_s , $r_{s\text{ solo}}$ e θ . Além disso, por simplicidade, considere-se a largura de faixa total D_{ik} como a soma entre ambas as larguras à esquerda e à direita, i.e.:

$$D_{ik} = D_{iek} + D_{idk}. \quad (8)$$

Logo, procedendo-se similarmente ao feito anteriormente para a incidência direta das descargas atmosféricas, tem-se o número total de descargas que incidem na superfície do solo e que podem provocar sobretensões importantes na linha:

$$Nd_{ik} = N_g \int_0^{l_{LT}} \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_{ik}(\theta, l_o, x) p_\theta(\theta, x) p_{l_o}(l_o, x) d\theta dl_o dx. \quad (9)$$

Tem-se também, assumindo-se um comprimento pequeno do cabo, igual a l_{LT} :

$$Nd_{i,k} = K_g \overline{\overline{D}}_{i,k}; \quad (10)$$

onde:

$$\overline{\overline{D}}_{i,k} = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_{i,k}(\theta, l_o) p_{\theta}(\theta) p_{l_o}(l_o) d\theta dl_o = 2 R_{lim} - \overline{\overline{D}}_{d,k}. \quad (11)$$

Deve-se ainda mencionar que a precisão desta metodologia de cálculo bidimensional depende da orografia do terreno e da presença de estruturas, construções ou árvores na vizinhança da linha, que eventualmente “capturariam” algumas descargas na região da linha. Quando tais efeitos são importantes, é adequado usar uma metodologia de cálculo tridimensional do tipo apresentada em [8].

Além disso, para a consideração dos demais cabos da linha, a aplicação do procedimento anterior é direta. Por exemplo, para as descargas diretas em uma linha trifásica, cujas três fases são designadas pelos índices 1, 2 e 3, e com dois cabos pára-raios, designados pelos índices 4 e 5 (Figura 2), obtém-se a largura de faixa total para as fases, $D_{d\text{ fases}}$, e a largura de faixa total para os cabos pára-raios, $D_{d\text{ pr}}$, por:

$$D_{d\text{ fases}} = \sum_{k=1}^3 D_{d,k}; \quad D_{d\text{ pr}} = \sum_{k=4}^5 D_{d,k}. \quad (12)$$

Logo, os números de descargas diretas para todas as fases e para todos os cabos pára-raios da linha, $Nd_{d\text{ fases}}$ e $Nd_{d\text{ pr}}$, respectivamente, em um sentido probabilístico, são dados por:

$$Nd_{d\text{ fases}} = \sum_{k=1}^3 Nd_{d,k}; \quad Nd_{d\text{ pr}} = \sum_{k=4}^5 Nd_{d,k}. \quad (13)$$

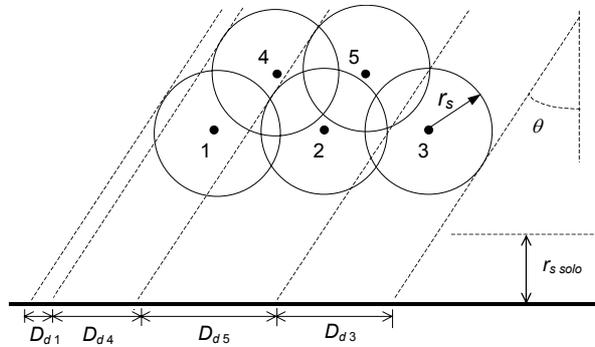


FIGURA 2 – Larguras de faixa D_d na superfície do solo onde incidiriam as descargas que incidem nos cabos da linha, na ausência dos cabos, em função de r_s , $r_{s\text{ solo}}$ e θ

Similar procedimento se aplica para as descargas indiretas e, naturalmente, para uma linha com um número genérico de fases, nf , e de cabos pára-raios, npr , faz-se um somatório análogo ao anterior. Um desenvolvimento similar também pode ser feito para o caso de uma fase de índice k formada por um feixe de condutores, tendo cada subcondutor um índice j e uma respectiva largura de faixa $\overline{\overline{D}}_{d,k,j}$. Essa estratégia é particularmente útil para a modelagem de linhas de transmissão não tradicionais do tipo com feixes de condutores assimétricos e irregulares, cujo formato pode distanciar-se substancialmente do circular tradicional, como, e.g., certas linhas com potência característica elevada, designadas por LNC e LPNE [9], [10].

3.0 – NÚMERO DE CURTOS-CIRCUITOS ORIGINADOS POR DESCARGAS DIRETAS E INDIRETAS

Para o cálculo do número de curtos-circuitos ao longo do comprimento l_{LT} da linha e originados por descargas diretas, mesmo fixando-se a geometria das torres da linha, a geometria dos sistemas de aterramento das torres, a tensão de operação da linha e a geometria dos cabos da linha, tem-se que considerar a distribuição estatística de muitos parâmetros dominantes para o fenômeno em análise, sendo, entre estes parâmetros:

1. Ângulo do precursor da descarga (θ).
2. Amplitude da corrente da descarga (I_o).
3. Tempo de frente da corrente da descarga (t_f).
4. Tempo de meia onda da corrente da descarga (t_{mo}).
5. Parâmetros do solo, basicamente suas condutividade elétrica (σ) e permissividade dielétrica (ϵ) em função da frequência.
6. Tensão nos cabos à frequência industrial no instante de incidência da descarga (u_{fi}).
7. Ponto de incidência ao longo do comprimento l_{LT} da linha (x).

Portanto, sejam as funções f , g_d e h , em princípio função de alguns ou todos esses sete parâmetros, e definidas por:

- f – largura de faixa total na superfície do solo onde incidiriam as descargas que incidem em todos os cabos da linha, na ausência destes cabos ($D_{d\text{ fases}}$ e $D_{d\text{ pr}}$).

- g_d – probabilidade de um certo grupo desses sete parâmetros ocasionar um curto-circuito na linha, também incluindo, no caso de haver pára-raios instalados na linha, a probabilidade de falha destes pára-raios.
- h – densidade de probabilidade da ocorrência simultânea de um grupo destes sete parâmetros.

Então, em um sentido estatístico, o número de curtos-circuitos na linha em função da incidência direta de descargas atmosféricas, considerando-se toda a gama desses sete parâmetros, Ncc_d , pode ser dado por:

$$Ncc_d = N_g \int_0^{l_{LT}} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{(\sigma, \varepsilon) \min}^{(\sigma, \varepsilon) \max} \int_{u_{fi} \min}^{u_{fi} \max} f g_d h du_{fi} d(\sigma, \varepsilon) d\theta dt_f dt_{mo} dl_o dx; \quad (14)$$

sendo:

$$f = f[(\sigma, \varepsilon), \theta, t_f, t_{mo}, l_o, u_{fi}, x]; \quad g_d = g_d[(\sigma, \varepsilon), \theta, t_f, t_{mo}, l_o, u_{fi}, x]; \quad h = h[(\sigma, \varepsilon), \theta, t_f, t_{mo}, l_o, u_{fi}, x]. \quad (15)$$

Entretanto, para cálculos práticos e para o respectivo cálculo do número de curtos-circuitos na linha, pode-se assumir aproximadamente, e com a conseqüente precisão:

- A função f somente varia com os parâmetros l_o , θ e x .
- A função g_d somente varia com os parâmetros (σ, ε) , t_f , l_o , u_{fi} e x .
- Os parâmetros t_f e l_o somente têm correlação entre si e variam somente com o parâmetro x .
- A variação do parâmetro t_{mo} somente precisa ser incluída em estudos específicos, como, e.g., em estudos de capacidade de absorção de energia de pára-raios. Logo, em geral, pode-se assumir um valor elevado de t_{mo} ou mesmo um valor infinito.
- A tensão u_{fi} não é correlacionada com os outros parâmetros e a sua variação pode ser incluída implicitamente na função g_d , tal como feito em [1], [7].
- O ângulo θ não é correlacionado com os outros parâmetros.

Ainda, é conveniente desprezar-se outras correlações menos importantes entre parâmetros e adotar-se algumas estratégias computacionais, sobretudo em função de imprecisões típicas para quantificar estes elementos, nomeadamente:

- Como uma primeira aproximação, considera-se que os parâmetros do solo (σ, ε) são constantes ao longo do comprimento da linha, ou ao menos ao longo de um curto comprimento de linha representativo para o presente estudo, tal que para o cálculo do respectivo número de curtos-circuitos possam ser assumidos valores de σ e ε independentes da localização ao longo da linha ou do trecho de linha considerado, embora se considerando a variação de σ e ε com a frequência.
- O cálculo é feito somente para um vão ou alguns vãos, com um comprimento total igual a l_{VT} , sendo $l_{LT} = m \cdot l_{VT}$, e os resultados para este comprimento são assumidos representativos para toda a linha. Naturalmente, neste pequeno comprimento a variação dos parâmetros t_f e l_o com o parâmetro x é mínima.
- Assume-se representativas duas incidências distintas da descarga atmosférica nos cabos pára-raios ao longo do vão, designadamente no meio do vão e junto à torre, com probabilidades iguais a c_1 e $1 - c_1$, respectivamente, separadamente de eventuais incidências de descargas nos cabos de fase.

Portanto, combinando-se as equações (7) e (14), vem, aproximadamente:

$$Ncc_d = Ncc_{d \text{ fases}} + Ncc_{d \text{ pr to}} + Ncc_{d \text{ pr mv}}; \quad (16)$$

sendo:

$$\begin{cases} Ncc_{d \text{ fases}} = K_g \int_0^\infty \int_0^\infty \bar{D}_{d \text{ fases}}(l_o) g_{d \text{ fases}}(l_o, t_f) h(l_o, t_f) dt_f dl_o \\ Ncc_{d \text{ pr to}} = K_g (1 - c_1) \int_0^\infty \int_0^\infty \bar{D}_{d \text{ pr}}(l_o) g_{d \text{ pr to}}(l_o, t_f) h(l_o, t_f) dt_f dl_o \\ Ncc_{d \text{ pr mv}} = K_g c_1 \int_0^\infty \int_0^\infty \bar{D}_{d \text{ pr}}(l_o) g_{d \text{ pr mv}}(l_o, t_f) h(l_o, t_f) dt_f dl_o \end{cases} \quad (17)$$

e

$$\begin{cases} \bar{D}_{d \text{ fases}}(l_o) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_{d \text{ fases}}(\theta, l_o) p_\theta(\theta) d\theta \\ \bar{D}_{d \text{ pr}}(l_o) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_{d \text{ pr}}(\theta, l_o) p_\theta(\theta) d\theta \end{cases}; \quad \begin{cases} K_g = N_g l_{LT} = N_g m l_{TV} \\ g_{d \text{ fases}}(l_o, t_f) = g_{d \text{ fases}}(l_o, t_f, u_{fi}) \\ g_{d \text{ mv}}(l_o, t_f) = g_{d \text{ pr mv}}(l_o, t_f, u_{fi}) \\ g_{d \text{ to}}(l_o, t_f) = g_{d \text{ pr to}}(l_o, t_f, u_{fi}) \end{cases} \quad (18)$$

Note-se ainda que, para alguns casos, especialmente no plano da análise linear, pode-se aplicar o conceito de “correntes críticas”, e as equações (17) e (18) degeneram para uma formulação bem mais simples, com semelhança ao processo de cálculo apresentado em [1], [2].

Para o cálculo do número de curtos-circuitos originados por descargas indiretas, N_{cc_i} , a solução também é similar à estabelecida anteriormente para as descargas diretas, contudo deve-se também incluir a variação do parâmetro r , considerando-se os limites inferior $-R_{lim}$ e superior $+R_{lim}$. Além disso, o parâmetro r , que é função de l_o , também é função do ângulo θ , o que demanda a consideração da distribuição estatística de r e θ , i.e.:

$$N_{cc_i} = K_g \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-R_{lim}}^{R_{lim}} g_i(r, \theta, t_f, l_o) p_{\theta}(\theta) h(t_f, l_o) dr d\theta dt_f dl_o; \quad (19)$$

onde a função g_i significa a probabilidade de uma combinação dos parâmetros (r, θ, t_f, l_o) originar um curto-circuito.

Note-se que todas as funções g_d e a função g_i são calculadas a partir da comparação entre as sobretensões induzidas em pontos específicos ao longo da linha e as correspondentes tensões de suportabilidade dos isolamentos; i.e., tensões de suportabilidade de cadeias de isoladores, respectivamente iguais a U_{e1} e U_{e3} para as incidências nos cabos de fase e nos cabos pára-raios, e tensões de suportabilidade do espaçamento de ar entre cabos no meio do vão, U_{e2} , para a incidência da descarga nos cabos pára-raios [1], [7]. Essas sobretensões induzidas na linha necessitam ser calculadas por um processo externo ao aqui descrito.

Finalmente, é importante observar dois aspectos, quais sejam:

- Utilizando-se um processo similar ao descrito acima, a contribuição das descargas atmosféricas subseqüentes que eventualmente possam ocorrer pode também ser incluída no processo de cálculo, i.e., empregando-se equações similares às equações (4), (9), (16) e (19), apenas utilizando-se adequados tempos de frente e amplitudes de corrente que caracterizem tais descargas, e as probabilidades de suas ocorrências.
- Nem todos os curtos-circuitos originados pela incidência de descargas atmosféricas implicam na necessidade de desligamento da linha. Por exemplo, postes e cruzetas de madeira apresentam capacidade de extinção do arco formado durante o curto-circuito, prevenindo a sua progressão [11]. Com um sentido semelhante atuam as estratégias de religamento monofásico e aterramento do neutro através de Bobinas de Petersen. Em geral, somente sob um ponto de vista conservativo deve-se considerar todos os curtos-circuitos como desligamentos, e, em muitas situações, seria incorreto, em termos econômicos e técnicos, fazer a suposição simplista de que todos os curtos-circuitos numa linha originam desligamentos de iguais conseqüências, e é necessário determinar, também em termos estatísticos, não só a proporção de curtos-circuitos que originam desligamentos, como a proporção de curtos-circuitos que originam diversos tipos de conseqüências diferentes, como, e.g., extinção do curto-circuito, sem necessidade de abertura, abertura e religamento monofásico rápido, com extinção do curto-circuito durante a abertura, abertura e religamento trifásico rápido, com extinção do curto-circuito durante a abertura, e abertura trifásica sem sucesso de eventual religamento rápido.

4.0 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Analisa-se neste exemplo duas linhas de transmissão. A primeira é uma linha trifásica de circuito simples de 138 kV, com um cabo CAA código *linnet* por fase, um cabo pára-raios de aço código 3/8" e o vão de 300 m. A outra linha, também trifásica, é de circuito duplo de 230 kV, com dois cabos CAA código *rail* por fase, dois cabos pára-raios de aço também código 3/8" e o vão de 400 m. Todos os dados básicos dessas linhas podem ser encontrados em [6], [7]. Em ambos os casos, considerou-se sete vãos da linha para a sua representação satisfatória para o estudo do fenômeno em causa e procedeu-se o casamento das impedâncias dos cabos nos dois pontos terminais do trecho das linhas, para a redução de efeitos de reflexão e refração nestes pontos.

Considerou-se apenas a incidência de descargas negativas (primeiros impulsos), e, para cada corrente de descarga direta ou indireta simulada, adotou-se a representação estilizada dada na Figura 8 da referência [10]. Para a linha de 230 kV e para as análises das incidências nos cabos pára-raios, considerou-se que apenas um cabo pára-raios é atingido por vez. Quando empregados, os pára-raios têm a característica tensão nominal / corrente nominal de 120 kV / 10 kA e 192 kV / 10 kA para as linhas de 138 e 230 kV, respectivamente. Para as análises das incidências junto à torre, os pára-raios foram incluídos somente na torre atingida, enquanto que para as incidências no meio do vão os pára-raios somente foram incluídos em ambas as torres adjacentes. Para este estudo, a probabilidade de falha dos pára-raios não foi investigada.

Cada cálculo de propagação de surtos pela linha foi feito externamente por intermédio do programa computacional FDETP (*F*requency *D*omain *E*lectromagnetic *T*ransients *P*rogram). O programa FDETP foi desenvolvido anteriormente pelos autores e proporciona uma extensa e otimizada combinação de vários elementos lineares e não-lineares tipicamente empregados em análises de circuitos e de redes elétricas, tais como elementos RLC lineares e não-lineares, quadripolos, transformadores, chaves, diodos, pára-raios, etc, e elementos tridimensionais com o formato de eletrodos cilíndricos, tipicamente empregados nas análises de campos eletromagnéticos [6], [7].

Portanto, para a modelagem de cabos e elementos das torres, o solo foi modelado com parâmetros função da frequência de acordo com [3], [4], considerando-se sua condutividade elétrica em baixa frequência σ_0 igual a 0,5 mS/m e usando-se um exemplo de valores medianos dos parâmetros α e Δ_i , iguais 0,706 e 11,71 mS/m, respectivamente. Para simplicidade de análise do efeito dos sistemas de aterramento das torres, cada sistema de aterramento foi representado por sua "impedância equivalente", a qual foi postulada igual a 5, 25 ou 100 Ω .

Para a adequada consideração do acoplamento eletromagnético entre o canal da descarga atmosférica, torres e cabos da linha, modelou-se estes elementos por eletrodos cilíndricos, exceto os cabos e as torres distantes do ponto de incidência, os quais foram modelados respectivamente por quadripolos e por adequadas combinações de elementos lineares concentrados, conforme detalhado a seguir.

Como primeira aproximação, o canal da descarga foi simulado por eletrodos cilíndricos de cobre, com o raio de 0,1 m, compreendendo 1500 m de comprimento total, reto e vertical, e com indutâncias e resistências distribuídas iguais a 4,5 $\mu\text{H/m}$ e 1,3 Ω/m , respectivamente. Esses parâmetros acarretaram uma velocidade média de propagação da descarga ao longo do canal em torno de 130 m/ μs . A corrente foi injetada na base do canal, junto à linha, sendo que também se fez um casamento aproximado da impedância equivalente “vista” da extremidade superior do canal.

Valendo-se da grande vantagem da gama de modelos disponíveis no programa FDETP, fez-se uma modelagem híbrida para cabos e torres, i.e.: para os cabos dos três vãos principais, próximos dos pontos de incidência das descargas, empregou-se os modelos de eletrodos cilíndricos, com os raios e as características elétricas dos cabos citados anteriormente, além de se representar adequadamente as catenárias dos cabos, enquanto que para os cabos dos demais quatro vãos usou-se conhecido modelo de quadripolo no domínio da frequência. Para as quatro torres desses três vãos principais também se empregou os modelos de eletrodos cilíndricos, de aço e com o raio de 0,1 m, e, para as demais quatro torres, usou-se uma adequada combinação série de linhas de transmissão ideais. Salienta-se que os parâmetros dessas linhas de transmissão ideais são associados a uma “impedância de onda equivalente” e a uma velocidade de propagação equivalente ao longo da torre. Esses parâmetros foram obtidos adequadamente modelando-se inicialmente cada torre por eletrodos cilíndricos [7]. É importante ressaltar que essa simples, porém eficiente, estratégia de modelagem, que é diferente da modelagem tradicional empregando-se somente eletrodos, levou à manipulação de matrizes com apenas centenas de elementos e a resultados suficientemente precisos, enquanto que a modelagem de todos os vãos por eletrodos levaria a matrizes com cerca de milhares de elementos, e, assim, a um tempo total de cálculo muito elevado.

Considerou-se a tensão nos cabos à frequência industrial no instante da incidência da descarga conforme feito em [1], [7]. Eventuais efeito coroa nas superfícies dos eletrodos e dos cabos e efeito de ionização do solo não foram considerados. Assumiu-se a densidade de descargas para o solo igual a 1 descarga/ km^2/ano . As distribuições de probabilidade de I_o e t_f foram assumidas log-normais, sendo, conforme [12]: $\mu_{I_o} = 30 \text{ kA}$, $\sigma_{\ln I_o} = 0,53$, $\mu_{t_f} = 5,5 \mu\text{s}$ e $\sigma_{\ln t_f} = 0,7$. Em primeira aproximação, considerou-se a correlação entre I_o e t_f também conforme dado em [12] e o cálculo das tensões de suportabilidade U_{e1} , U_{e2} e U_{e3} a partir de equações apresentadas em [9], [13], sendo assumida para as tensões U_{e1} e U_{e3} uma correlação inversa com o tempo até a disrupção do isolamento.

Finalmente, cada integral nas equações (17) a (19) foi resolvida numericamente, valendo-se do cálculo de cerca de 20 a 30 pontos iniciais, cuidadosamente escolhidos, e aplicando-se interpolação por *splines* cúbicas para a obtenção de resultados satisfatoriamente precisos para o estudo em questão.

Utilizando-se todos esses dados para a execução das várias simulações pelo programa FDETP, foram obtidos os resultados da Tabela 1. Os números entre parêntesis foram obtidos com o emprego de pára-raios nas linhas.

TABELA 1 – Números de curtos-circuitos nas linhas provocados por descargas atmosféricas diretas e indiretas

5 Ω		25 Ω		100 Ω	
LT de 138 kV					
$N_{cc\ d\ fases}$	$< 10^{-4}$	$N_{cc\ d\ fases}$	$< 10^{-4}$	$N_{cc\ d\ fases}$	$< 10^{-4}$
$N_{cc\ d\ pr\ to}$	0,95 ($< 10^{-3}$)	$N_{cc\ d\ pr\ to}$	3,7 ($< 10^{-3}$)	$N_{cc\ d\ pr\ to}$	7,0 ($< 10^{-3}$)
$N_{cc\ d\ pr\ mv}$	0,35 (0,27)	$N_{cc\ d\ pr\ mv}$	1,5 (0,27)	$N_{cc\ d\ pr\ mv}$	4,2 (0,28)
$N_{cc\ d}$	1,3 (0,27)	$N_{cc\ d}$	5,2 (0,27)	$N_{cc\ d}$	11,2 (0,28)
$N_{cc\ i}$	$< 10^{-4}$	$N_{cc\ i}$	$< 10^{-4}$	$N_{cc\ i}$	$< 10^{-4}$
LT de 230 kV					
$N_{cc\ d\ fases}$	$< 10^{-4}$	$N_{cc\ d\ fases}$	$< 10^{-4}$	$N_{cc\ d\ fases}$	$< 10^{-4}$
$N_{cc\ d\ pr\ to}$	0,10 ($< 10^{-3}$)	$N_{cc\ d\ pr\ to}$	1,2 ($< 10^{-3}$)	$N_{cc\ d\ pr\ to}$	5,2 ($< 10^{-3}$)
$N_{cc\ d\ pr\ mv}$	0,16 (0,14)	$N_{cc\ d\ pr\ mv}$	0,32 (0,16)	$N_{cc\ d\ pr\ mv}$	2,3 (0,16)
$N_{cc\ d}$	0,26 (0,14)	$N_{cc\ d}$	1,5 (0,16)	$N_{cc\ d}$	7,5 (0,16)
$N_{cc\ i}$	$< 10^{-5}$	$N_{cc\ i}$	$< 10^{-5}$	$N_{cc\ i}$	$< 10^{-5}$

Portanto, desses resultados, e para estes dois exemplos de linha de transmissão e características da descarga atmosférica adotadas, os seguintes comentários podem ser estabelecidos:

- Os valores de $N_{cc\ d\ fases}$ são mínimos, devido à blindagem dos cabos de fase oferecida pelo adequado posicionamento dos cabos pára-raios.
- Os valores de $N_{cc\ i}$, também são mínimos, devido ao relativo elevado nível de isolamento das linhas para as magnitudes das sobretensões induzidas na linha em função da incidência indireta de descargas atmosféricas.
- Para as impedâncias equivalentes de aterramento das torres iguais a 25 e 100 Ω , especialmente para o valor de 100 Ω , os valores do número total de curtos-circuitos ($N_{cc\ d}$) são realmente elevados, o que impõe, para estes casos, à necessidade de otimização das linhas.
- Diferentemente do estabelecido a partir de procedimentos de cálculo tradicionais, para estes exemplos de linhas de transmissão, os curtos-circuitos associados às descargas no meio do vão ($N_{cc\ d\ pr\ mv}$) são importantes, e estes devem ser incluídos no cálculo do número total de curtos-circuitos nas linhas. Algumas sugestões para a redução deste número de curtos-circuitos podem ser encontradas em [1].
- A aplicação de pára-raios na linha contribuiu consideravelmente para a redução do número total de curtos-

circuitos. Entretanto, análises adicionais considerando aspectos de capacidade de absorção de energia pelos pára-raios devem ser conduzidas, para assim determinar a sua segura faixa de operação.

5.0 - CONCLUSÕES

Pretendeu-se com a metodologia apresentada neste artigo, implementada no programa computacional DATMOS, proporcionar um processo que avaliasse, melhor do que vários processos tradicionais, a incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão e os efeitos subseqüentes de tal incidência, nomeadamente a avaliação do subseqüente número de curtos-circuitos na linha. A metodologia apresentada leva em conta os aspectos mais relevantes relacionados aos efeitos da descarga atmosférica, com algumas aproximações, razoavelmente precisas para muitas aplicações. Também se implementou o uso de feixes de condutores não tradicionais, como aqueles de linhas designadas como não-tradicionais e de linhas com potência característica elevada (designadas por LNC ou LPNE), as quais não seriam passíveis de avaliação por vários programas computacionais existentes no Setor. Esses aspectos denotam a ampla aplicabilidade do processo para análises técnicas-econômicas de linhas de transmissão, estudando-se várias alternativas de melhoria da linha, tais como, e.g., a redução das impedâncias equivalentes dos sistemas de aterramento das torres, o posicionamento adequado dos cabos pára-raios, a aplicação de pára-raios de linha e algumas alternativas construtivas não convencionais.

Esta metodologia tem também a vantagem de permitir a simulação de cada propagação de surtos na linha (associada a cada forma de onda da corrente da descarga atmosférica incidente na linha e do ponto de tal incidência simulados) por um programa computacional externo, como, e.g., por programas computacionais da Série EMTP. Uma outra grande vantagem é a capacidade de redução considerável do número total dessas simulações, em função da aplicação direta de integrais analíticos e numéricos, acelerando o processo, ao invés de processos tradicionais baseados no sorteio de variáveis, como, e.g., o Método de Monte Carlo, os quais usualmente demandam um número extenso de simulações. Essa providência é particularmente vantajosa quando cada simulação envolve a análise de elementos não-lineares, a qual é tipicamente de cálculo demorado.

Além disso, a partir dos resultados de vários exemplos de linhas de transmissão investigados, dois dos quais foram aqui apresentados e outros podem ser encontrados em [7], ficou claro que ambas as incidências da descarga no meio do vão e junto à torre devem ser consideradas nas análises de desempenho de linhas de transmissão. Também ficou claro que todo o espectro de amplitudes da corrente, tempos de frente da corrente e ângulos do precursor das descargas atmosféricas deve ser considerado em estudos dessa natureza.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SALARI, J. C., PORTELA, C., "A Methodology to the Calculation of Lightning Performance of Conventional and Non-Conventional Transmission Lines", *27th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 650-655, Avignon, França, Setembro, 2004
- [2] PORTELA, C., "Sobretensões e Coordenação de Isolamento, Vol. I, II, II – 1a. edição, 1977, Vol. I, 247 p., Vol. II, 344 p. – 2a. edição, 1982, Vol. I, 354 p., Vol. II, 302 p., Vol. III, 142 p. – edição da EEM (Escola de Engenharia Mauá), IMT (Instituto Mauá de Tecnologia), São Paulo, Brasil, 1977/1982
- [3] PORTELA, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems; I Physical and Methodological Aspects; II Practical Application Examples", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 379-390, Austin, E.U.A., 1997
- [4] PORTELA, C., "Soil Electromagnetic Behavior in Frequency Domain and its Influence in Lightning Effects", *Ground'2002 International Conference on Grounding and Earthing*, pp. 211-216, Rio de Janeiro, Brasil, Novembro, 2002
- [5] SALARI, J. C., PORTELA, C., "Frequency Dependent Behavior of Grounding Systems", *VII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, pp. 75-81, Curitiba, Brasil, Novembro, 2003
- [6] SALARI, J. C., PORTELA, C., "Uma Metodologia para o Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos – Aplicação ao Cálculo da Propagação de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão", *XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Curitiba, Brasil, 2005
- [7] SALARI, J. C., "Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Freqüência", Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006 (Disponível para cópia em: <http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2006120601.pdf>)
- [8] PORTELA, C., "Statistical Distribution of Parameters of Lightning Impulses in Antennas, Towers and Buildings - Methodological Aspects", *IEEE 1998 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1018-1023, Denver, E.U.A., 1998
- [9] SALARI, J. C., "Otimização da Geometria de Feixes de Condutores de Linhas de Transmissão", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1993
- [10] PORTELA, C., "Um Sistema Computacional de Otimização de Linhas de Transmissão Não Convencionais", *XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Belém, Pará, Brasil, 1997
- [11] DARVENIZA, M., "Electrical Properties of Wood and Line Design", Queensland, Austrália, University of Queensland Press, 1980
- [12] BERGER, K., ANDERSON, R. B., KRÖNINGER, H., "Parameters of Lightning Flashes", *Electra*, n. 41, pp. 23-37, 1975
- [13] DARVENIZA, M., POPOLANSKY, F., WHITEHEAD, E. R., "Lightning Protection of UHV Transmission Lines", *Electra*, n. 41 (July), pp. 39-69, 1975