

TESE

192



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

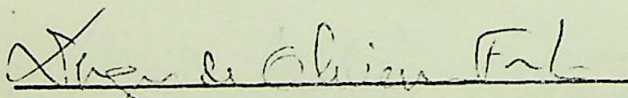
A N E X O I

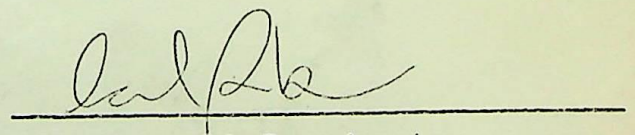
PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

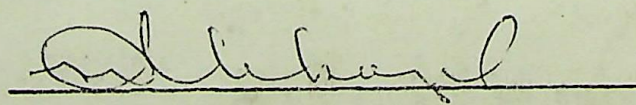
A Comissão Examinadora, abaixo assinado, nomeado por Portaria nº 510 de 14 / 12 / 78, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE EHV E UHV A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS"

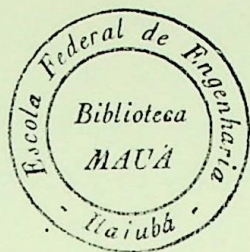
apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à MARCO POLO PEREIRA.

Itajubá, 16 de Dezembro de 1978.


1º Examinador
Engº SÉRGIO DE OLIVEIRA FRONTIN


2º Examinador
Prof. CARLOS RIBEIRO


3º Examinador
Prof. HÉLIO MOKARZEL



Desempenho de Linhas de Transmissão de EHV e UHV a Descargas Atmosféricas



À Daisi e Camila

PREFÁCIO

O projeto de uma linha de transmissão de extra-alta-tensão ou de ultra-alta-tensão, sob o ponto de vista de descargas atmosféricas, envolve estudos cuidadosos para a definição dos espaçamentos elétricos, quantidade de isoladores, posicionamento dos cabos pára-raios e sistema de aterramento das estruturas.

Para a análise do comportamento de uma linha de transmissão a solicitações atmosféricas é necessário verificar os mecanismos de falha de blindagem e da incidência de raios nas torres e nos pára-raios, sendo de fundamental importância o conhecimento dos parâmetros envolvidos na formação das descargas atmosféricas e o relacionamento entre estes parâmetros e a geometria da linha de transmissão.

Neste trabalho são apresentados uma análise dos principais parâmetros envolvidos no processo de formação das descargas atmosféricas, um programa digital desenvolvido para a determinação do índice de desligamentos por incidência de raios nos condutores e uma metodologia para a avaliação do número de desligamentos por queda indireta. Um caso específico de aplicação do programa desenvolvido também é apresentado.

Devido a natureza estatística dos principais parâmetros envolvidos no mecanismo de formação das descargas atmosféricas, foi utilizado o método de Monte Carlo para a simulação da incidência de raios sobre a linha de transmissão. Para a determinação do cabo atingido foi adotado o modelo eletrogeométrico na representação da linha de transmissão.

ABSTRACT

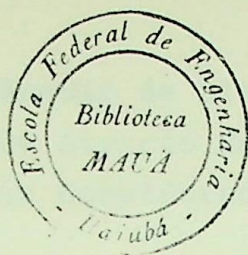
The design of a EHV or UHV transmission line from the point of view of lightning performance includes careful studies for the determination of clearances, number of insulators, shielding angle and tower grounding systems .

For the analysis of the lightning performance of a transmission line, it is necessary to verify the shielding failure mechanism and the incidence of strokes on the towers and overhead shield wires. Of fundamental importance is the knowledge of the parameters involved in the stroke formation and in the relationship between these parameters and the transmission line geometry.

An analysis of the main parameters of the stroke mechanism, a digital program developed for the calculation of the number of outages due to shielding failures and a methodology for the calculation of the number of outages due to backflashover, are presented in this work. A specific case of application of the digital program is also presented.

Due to the statistical origin of the main parameters of the stroke mechanism, the Monte Carlo method was used for the simulation of stroke incidence on the transmission line. For the determination of the point of incidence, the electrogeometrical model was adopted in the transmission line representation.

ÍNDICE



PÁG.

1. INTRODUÇÃO	1
2. ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LT's A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	5
2.1. Características das descargas atmosféricas	5
2.1.1. Nível Isocerâunico	5 e 6
2.1.2. Densidade de Raios para a Terra	6 e 7
2.1.3. Intensidade de Corrente e Polaridade	7 a 11
2.1.4. Taxa de Crescimento	12 a 14
2.1.5. Ângulo de Incidência	14 e 15
2.1.6. Incidência de raios ao longo dos Vãos	15 a 17
2.2. Modelo Eletrogeométrico	17 a 21
2.3. Suportabilidade dos Isolamentos de uma Linha de Transmissão a Surtos Atmosféricos.	21 a 25
2.4. Resistência de Pé-de-Torre	25 a 30
2.5. Impedância de Surto das Torres	30 a 32
2.6. Tensão de Topo-de-Torre	32 a 37
2.7. Método de Monte Carlo	38
3. DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA INCIDÊNCIAS NOS CABOS CONDUTORES	38 e 39
3.1. Blindagem Efetiva de Linhas de Transmissão	39 a 47

3.1.1.	Determinação do Ângulo de Blindagem Crítico para Distâncias de Atração Calculadas em Função de Elemento Considerado	47 e 48
3.1.2.	Exemplo de Cálculo para a Determinação do Ângulo de Blindagem para Proteção Efetiva.	48 a 51
3.1.3.	Programa Digital para Cálculo do Ângulo de Blindagem Crítico	51 a 53
3.2.	Blindagem Parcial de Linhas de Transmissão.	54 e 55
3.2.1.	Cálculo do Número de Desligamentos por Queda Direta de Raios nos Condutores	55 e 56
3.2.2.	Programa Digital para o Cálculo do Número de Desligamentos Provocados por Queda Direta de Raios nos Condutores.	56 a 66
3.2.3.	Aplicação do Programa para Estudos de Falha de Blindagem numa Linha de 500 kV	67 a 77
4.	DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA INCIDÊNCIA NOS CABOS PÁRA-RAIOS E NAS TORRES.	77 e 78
4.1.	Incidência de Raios nas Torres de uma Linha de Transmissão.	79 a 83
4.2.	Incidência de Raios nos Cabos Pára-raios de uma Linha de Transmissão.	84 e 85
4.3.	Solicitação ao Isolamento da Linha	86 a 88
4.4.	Metodologia Sugerida para Avaliação do Número de Desligamentos Devido a Incidência de Raios nas Torres e nos Cabos Pára-raios.	88 a 90
5.	CONCLUSÕES	90 a 94
6.	BIBLIOGRAFIA	96 a 97

7. ANEXOS

- 7.1. Listagem de Programa Digital para Determinação do ângulo de Blindagem - Crítico.
- 7.2. Listagem de Programa Digital para Determinação do Número de Desligamentos para Incidência de Raios nos Condutores de uma Linha de Transmissão.

1. INTRODUÇÃO

O projeto de uma linha de transmissão sob o ponto de vista de descargas atmosféricas envolve a determinação dos seguintes elementos:

- espaçamentos elétricos
- quantidade de isoladores
- ângulo de blindagem
- sistema de aterramento das estruturas

os quais são ajustados de modo a fornecer uma taxa de desligamentos pré-estabelecida nos critérios básicos de projeto.

A medida que o nível de tensão se eleva, as solicitações atmosféricas tem a sua importância diminuída na determinação dos espaçamentos elétricos, sendo a taxa de desligamentos automaticamente reduzida devido ao aumento do nível de isolamento das linhas de transmissão, como pode ser observado na tabela 1.1 (17).

Tabela 1.1 - Desempenho de Linhas de Transmissão do Sistema ESCOM, África do Sul, no Período 1960-1965 *

Tensão Nominal do Sistema (kV)	Nº de Desligamentos (/100 km/Ano)
11 - 22	20,3
42	21,9
88	11,9
132	5,0
275	1,9
400	0,6

* O desempenho das linhas de 400 kV se refere ao Período 1974-1975

No entanto, nos estudos de confiabilidade para o sistema de transmissão de 800 kV de Itaipu (15) foi verificada a grande importância do comportamento das linhas quanto a descargas de origem atmosférica, caracterizando então a necessidade de estudos extensos e cuidadosos para o projeto da cabeça de torre, de modo a garantir um desempenho compatível com os critérios de confiabilidade.

O comportamento de uma linha de transmissão para solicitações atmosféricas pode ser analisado sob três aspectos principais: falha de blindagem, incidência de raios nas torres ou nos cabos pára-raios e incidência de raios nas proximidades da linha.

Quando ocorre uma falha de blindagem, a incidência da descarga se faz diretamente no cabo condutor e pode haver ou não o desligamento da linha dependendo do valor da corrente do raio, da impedância de surto dos condutores, do isolamento da linha e do valor instantânea da tensão de fase.

A incidência de raios nas torres ou nos cabos pára-raios envolve uma grande quantidade de parâmetros, havendo desligamento ou não conforme a característica da corrente de descarga (intensidade de corrente e tempo de subida), o fator de acoplamento entre cabos, o isolamento da linha, o ponto de incidência do raio, a impedância de surto dos cabos pára-raios, o valor instantâneo da tensão de fase e a impedância de surto da torre e do sistema de aterramento.

De um modo geral pode ser estabelecido que o mecanismo de falha de blindagem está associado com raios de baixa intensidade de corrente, enquanto que os desligamentos para incidência nos pára-raios ou nas torres são provenientes de raios com correntes de alta intensidade. Esta conclusão está de acordo com medições efetuadas em linhas de transmissão (1).

Para as linhas de EHV e UHV a possibilidade de desligamentos por incidência de raios nas proximidades da linha pode ser considerada desprezível (19).

Deste modo serão analisados neste trabalho apenas os me

canismos de falha de blindagem e de incidência de raios nos pára-raios ou nas torres.

Para a análise destes mecanismos é de fundamental importância o estudo dos parâmetros envolvidos na formação das descargas atmosféricas e do relacionamento entre estes parâmetros e a geometria da linha de transmissão.

Os principais parâmetros das descargas atmosféricas são a intensidade máxima de corrente e o tempo necessário para alcançar este valor máximo. Estes parâmetros são de natureza estatística e obtidos através de medições em pontos estratégicos, em geral antenas, ou torres em locais elevados, de modo a facilitar a obtenção de uma grande quantidade de informações.

A qualidade dos dados obtidos é frequentemente discutida, acreditando-se que existam diferenças de região para região e que os valores medidos possam conter alguma característica peculiar ao próprio local de medição.

Considerando que a quantidade de pontos de medição de descargas atmosféricas é relativamente pequena, é comum a utilização de distribuições estatísticas obtidas a partir de dados de diversos locais de medição.

Um importante fator na análise do desempenho de linhas de transmissão a descargas atmosféricas é a quantidade de raios que incidem sobre a linha. A sua determinação é bastante empírica e normalmente realizada através do nível isocerâmico da região. Atualmente estão sendo realizados levantamentos com aparelhos contadores de descargas atmosféricas, os quais permitem obter diretamente a densidade de raios para a terra.

Uma vez conhecidas as características das descargas atmosféricas e a quantidade de raios que incidem sobre a linha é necessário verificar de que maneira a geometria da linha de transmissão interage com o meio ambiente, para que o seu comportamento possa ser estudado para este tipo de solicitação.

Pesquisas realizadas em linhas de transmissão monitoradas para permitir a identificação do cabo atingido pela descarga atmosférica, indicaram que este relacionamento poderia ser obtido pela utilização do modelo eletrogeométrico, o qual relaciona a geometria da linha de transmissão com o mecanismo de formação de raios através da distância crítica de atração (2), (4), (6), (18).

A determinação da solicitação no caso de incidência de raio nos cabos condutores é bastante simples, não sendo necessários cálculos sofisticados devido à pequena quantidade de fatores envolvidos.

No entanto, quando a incidência é nos cabos pára-raios ou nas torres, um processo de propagação envolvendo os cabos pára-raios, as torres e os sistemas de aterramento é estabelecido, havendo então a necessidade de se utilizarem técnicas de propagação de ondas para a correta determinação da solicitação impressa ao isolamento da linha.

Os mecanismos de incidências de raios nos condutores (falha de blindagem) e nos pára-raios e torres (backflashover) serão estudados neste trabalho, sendo analisado o caso de blindagem efetiva dos cabos condutores, isto é, posicionamento dos cabos pára-raios de modo que o número de desligamentos devido a incidência de raios nos condutores seja igual a zero.

Para os casos onde esta blindagem eficaz não possa ser obtida ou para linhas de transmissão projetadas conforme uma quantidade de desligamentos por falha de blindagem pré-estabelecida será desenvolvida uma metodologia de cálculo para a determinação do índice de desligamentos.

Um caso específico de aplicação desta metodologia será examinado em detalhes.

Uma metodologia para a avaliação do número de desligamentos devido a incidência de raios nos pára-raios ou nas torres é sugerida, sendo as principais fases discutidas, inclusive com modelos e parâmetros apresentados.

Devido a natureza estatística dos principais parâmetros envolvidos no mecanismo de formação de raios, foi utilizado o método de Monte Carlo para a simulação da incidência de raios sobre a linha de transmissão.

2. ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1. Características das Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas tem sido medidas ao longo dos anos em diversas partes do mundo, sendo as informações mais recentes fornecidas por Berger (8), Erikson (14), Popolansky (1) e Szpor (20).

Algumas das distribuições se referem ao local de medição, isto é, uma antena ou uma torre, e podem conter algum efeito inerente a própria estrutura onde são realizadas as medições, visto que estes locais estão geralmente situados em regiões de alto nível isocerâunico e de grande altitude para permitir a obtenção de uma grande quantidade de dados.

Por outro lado, alguns autores tem estudado as distribuições assim obtidas e promovido composições entre elas de modo a obter uma distribuição mais abrangente, considerando inclusive dados obtidos de medições em linhas de transmissão e a possibilidade de erros sistemáticos nas medições.

Estas distribuições obtidas pela análise e composição de dados provenientes de diversos pontos de medição tem sido utilizadas para a avaliação do comportamento de linhas de transmissão.

2.1.1. Nível Isocerâunico

O parâmetro mais tradicional para a indicação da atividade de cerâmica de uma região é o nível isocerâunico, o qual informa a quantidade de dias no ano com ocorrência de trovoadas. No entanto, dias com intensidade cerâmica diferentes são tratados do mesmo modo, sem indicação da quantidade de raios para a terra.

Os pontos de igual intensidade cerâmica são então mapeados para formar as curvas isocerâmicas, a partir das quais pode ser obtida a quantidade de raios para a terra pela consideração de um fator empírico.

Atualmente, estão sendo utilizados dados de densidade de raios para a terra obtidos diretamente de medições por aparelhos contadores de descargas atmosféricas.

2.1.2. Densidade de Raios para a Terra

Como foi mencionado no item 2.1.1 a densidade de raios para a terra pode ser obtida empiricamente a partir do nível isocerâmico e de um fator de proporcionalidade, como indicado na referência (11).

$$N = K I$$

sendo:

N = densidade de raios (raios/km²)

K = fator de proporcionalidade

I = nível isocerâmico

O fator K pode variar de 0,1 a 0,25 havendo uma tendência para a utilização de valores próximos a 0,1.

Uma medida mais correta desta grandeza pode ser obtida diretamente pela utilização de aparelhos contadores de descargas atmosféricas, que é um dispositivo que registra automaticamente o número de raios para uma área pré-determinada pela sensibilidade do aparelho para variações súbitas no campo eletrostático produzido por uma descarga atmosférica.

Determinados tipos de aparelhos podem discriminar se a descarga ocorreu entre nuvens ou para a terra. Para aqueles que não permitem a leitura da quantidade de raios para a terra diretamente, é necessário que uma correção seja aplicada ao número total de descargas indicado para a obtenção da quantidade de raios para a terra.

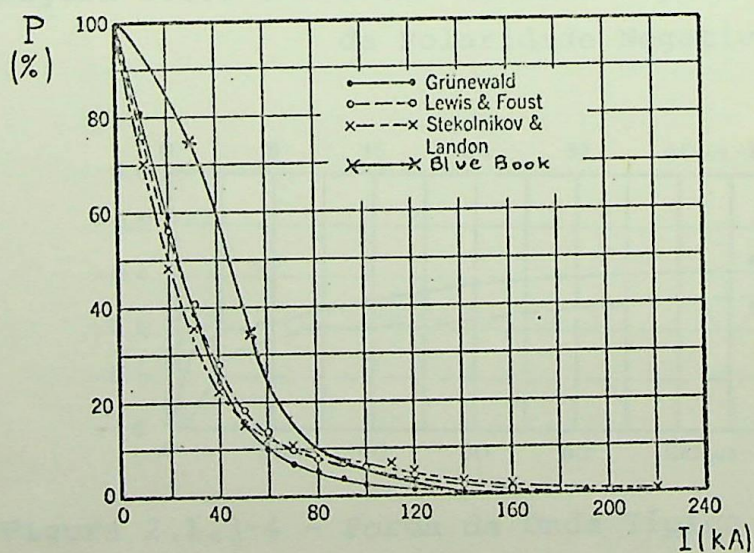
A tabela 2.1.2-1 mostra a densidade de raios em Pretoria, África do Sul, para o período de 1968 a 1975 (17).

Ano	Nível Isocerânico	Número de Registros	Densidade de raios/km ² /ano
1968/69	79	28611	5,1
69/70	65	31386	5,5
70/71	84	50449	8,9
71/72	54	26663	4,7
72/73	79	53959	9,6
73/74	84	33258	5,9
74/75	65	33866	6,0
Média	73	36851	6,5

Tabela 2.1.2-1 - Densidade, de Raios em Pretoria no Período de 1968 a 1975

2.1.3. Intensidade de Corrente e Polaridade

Na figura 2.1.3-1 são indicadas algumas das distribuições de intensidade de corrente existentes na literatura.



As formas de onda de corrente obtidas de medições no Monte San Salvatore, Suíça (8) são mostradas nas figuras 2.1.3-2 a 2.1.3-4.

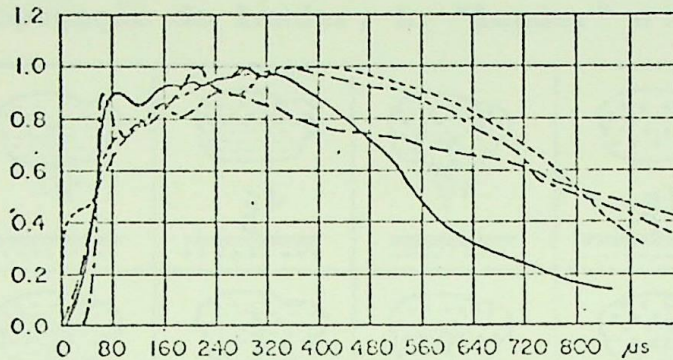


Figura 2.1.3-2 - Formas de Ondas Típicas para Raios de Polaridade Positiva

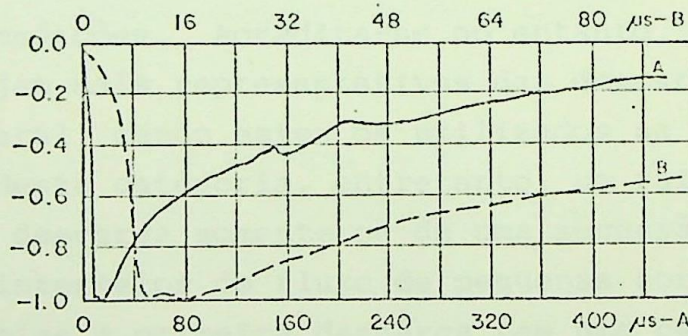


Figura 2.1.3-3 - Forma de Onda Típica para Raios de Polaridade Negativa (1^ª raios)

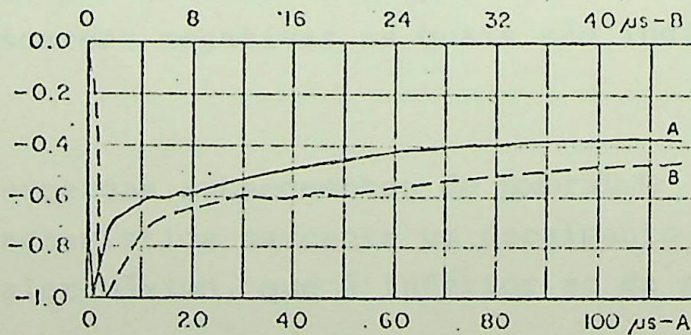
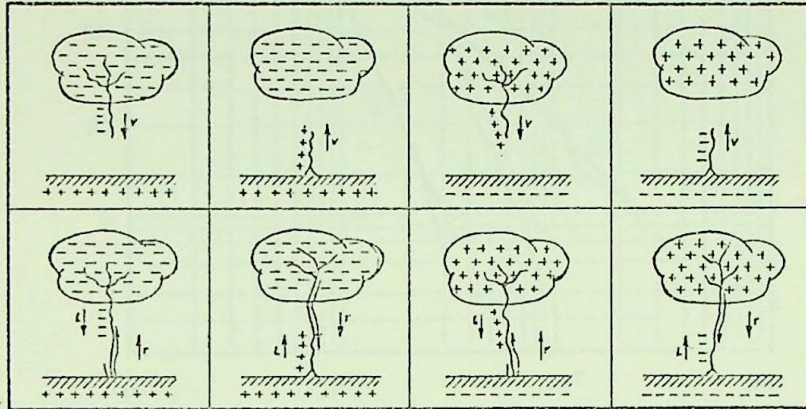


Figura 2.1.3-4 - Forma de Onda Típica para Raios de Polaridade Negativa (Raios subsequentes)

Nestas medições (8) foram observadas descargas atmosféricas ascendentes ou descendentes, e de polaridade positiva ou negativa, classificadas conforme a direção de propagação do "leader" e a polaridade da carga no "leader". A figura abaixo indica as 4 diferentes possibilidades para uma descarga atmosférica, sendo v : direção de propagação do leader, L: "leader" e r: corrente de retorno.



A maioria dos raios medidos no Monte San Salvatore é ascendente e creditada ao efeito das torres de televisão utilizadas para as medições. Acredita-se no entanto, que os raios descendentes sejam mais representativos das descargas atmosféricas de um modo geral, sendo estes os utilizados na análise apresentada em (8). Nesta categoria, entretanto, um raio pode ser constituído de uma descarga somente ou de uma sucessão de descargas separadas por intervalos de fluxo de pequenas correntes. Nas descargas múltiplas a primeira descarga tem uma característica marcadamente diferente das subsequentes.

A figura 2.1.3-2 mostra que as descargas positivas são caracterizadas por grandes cargas e frente de onda mais lentas do que as descargas negativas as quais são indicadas na figura 2.1.3-3.

As descargas subsequentes de polaridade negativa apresentam como característica marcante um decaimento brusco após a passagem pelo valor máximo, que é inferior ao da primeira descarga.

Ainda dos dados obtidos no Monte San Salvatore, é a figura 2.1.3-5, que indica a distribuição de intensidades de correntes máximas para descargas positivas, primeiras descargas negativas e descargas negativas subsequentes.

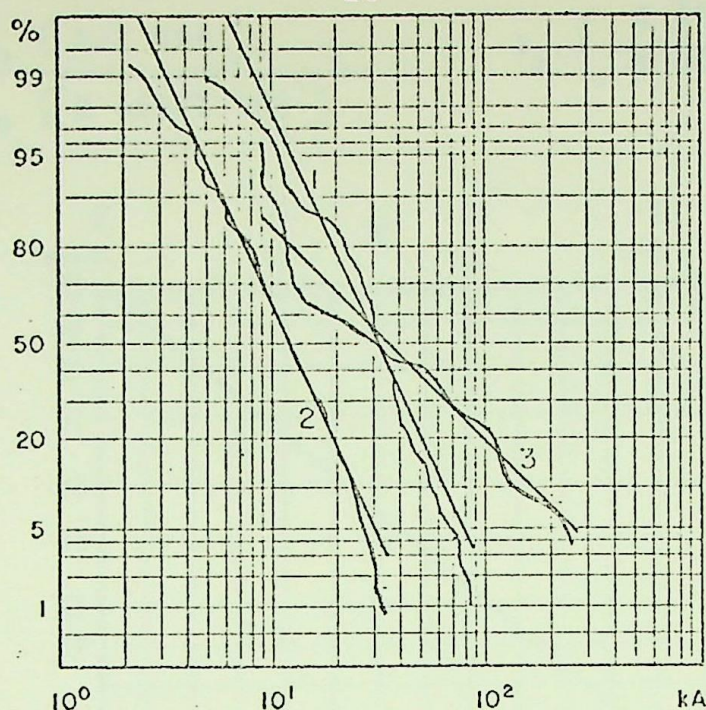


Figura 2.1.3-5 - Distribuição de Correntes Máximas

- 1 - primeiras descargas negativas
- 2 - descargas subsequentes negativas
- 3 - descargas positivas

Os raios de polaridade negativa constituem a grande maioria das descargas, sendo normalmente considerado um percentual igual ou maior do que 90%.

Após um exaustivo estudo sobre as distribuições estatísticas de intensidades de correntes de raios, Popolansky concluiu que o modelo matemático que melhor representava esta característica das descargas atmosféricas era a curva log - normal generalizada (1).

Uma grande vantagem deste modelo é que qualquer distribuição deste tipo pode ser representada por dois parâmetros: valor médio e desvio padrão.

A figura 2.1.3-6 mostra a curva log-normal generalizada, a qual pode ser reproduzida com facilidade com o auxílio de uma tabela de probabilidades da curva normal se o afastamento em relação ao valor médio, medido em quantidade de desvios padrões, for calculado pela seguinte expressão:

$$X = \frac{l_n \left[\frac{i}{I_{50\%}} \right]}{l_n \left[\frac{I_{16\%}}{I_{50\%}} \right]} = \sigma$$

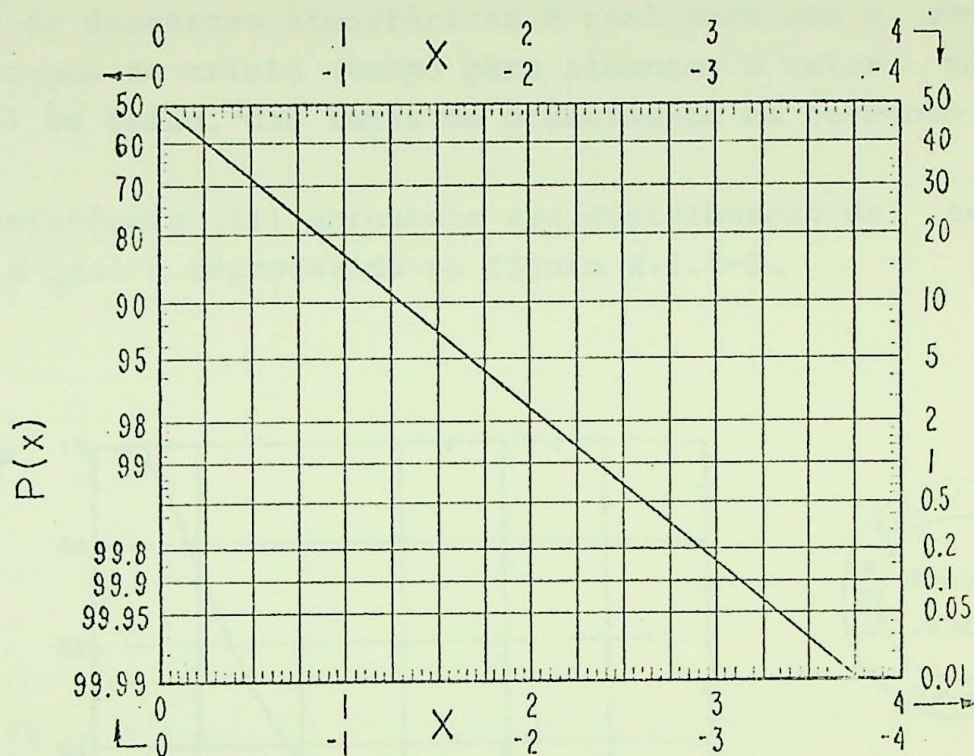


Figura 2.1.3-6 -- Distribuição Log-Normal Generalizada

A tabela 2.1.3-1 mostra os valores de corrente média, corrente a um desvio padrão e desvio padrão, de acordo com vários autores (1).

Parâmetros	I 50% (kA)	I 16% (kA)	$l_n \frac{I_{16\%}}{I_{50\%}}$	Percentagem de Valores Superiores a 200 kA
Origem				
SZPOR	25	66	0,97	1,7
POPOLANSKY	25	61	0,89	1,0
BERGER	28	60	0,76	0,5
CIANOS-PIERCE	20	50	0,92	0,7

Tabela 2.1.3-1 - Parâmetros Característicos da Distribuição Log-Normal Generalizada

2.1.4. Taxa de Crescimento

A complementação das características básicas das ondas de corrente de descargas atmosféricas é realizada com o conhecimento dos tempos de crista (tempo para alcançar o valor máximo de corrente) ou então, das taxas de crescimento da corrente.

A referência (11) apresenta uma distribuição de tempos de crista, a qual é reproduzida na figura 2.1.4-1.

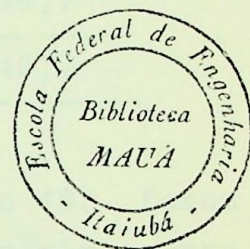
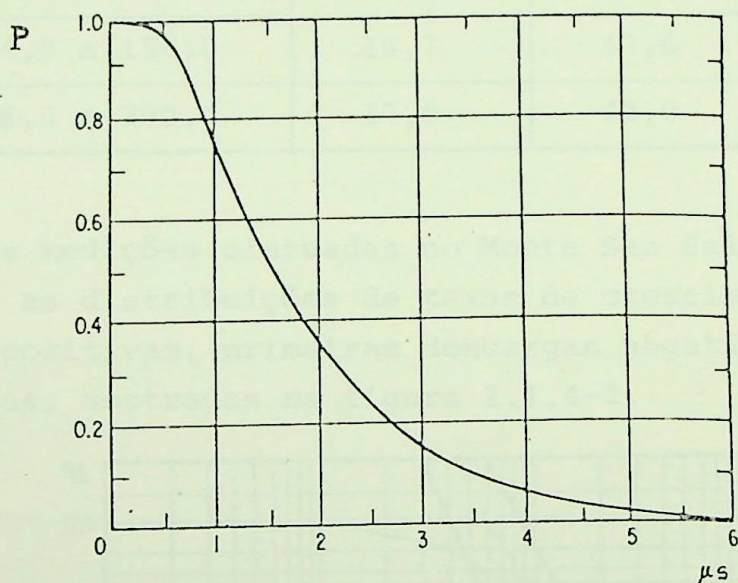


Figura 2.1.4-1 - Distribuição de Tempos de Crista

Esta distribuição é considerada independente da distribuição de intensidades de corrente.

Informações mais recentes sugerem a existência de um relacionamento entre a intensidade de corrente e o tempo para alcançar o valor máximo, considerando-se de probabilidade muito baixa a ocorrência de correntes de alta intensidade com tempos de crista muito reduzido, como também a ocorrência de correntes de pequena intensidade com tempos de crista elevados.

A tabela 2.1.4-1 mostra a probabilidade de ocorrerem determinados tempos de crista em função de faixas de intensidades de correntes (23).

Tabela 2.1.4-1

Faixa de Corrente (kA)	Porcentagem dos Raios para Várias Frentes de Onda		
	2 μ s	4 μ s	6 μ s
2,4 a 49,5	73,0	19,8	7,2
49,5 a 63,4	51,0	34,0	15,0
63,4 a 81,6	41,3	39,4	19,3
81,6 a 111,0	30,7	43,8	25,5
111,0 a 134,0	23,1	44,4	32,2
134,0 a 158,0	19,7	43,6	36,7
158,0 a 200,0	17,8	42,0	40,2

Das medições efetuadas no Monte San Salvatore (8) foram levantadas as distribuições de taxas de crescimento máximas para descargas positivas, primeiras descargas negativas e descargas subsequentes, mostradas na figura 2.1.4-2.

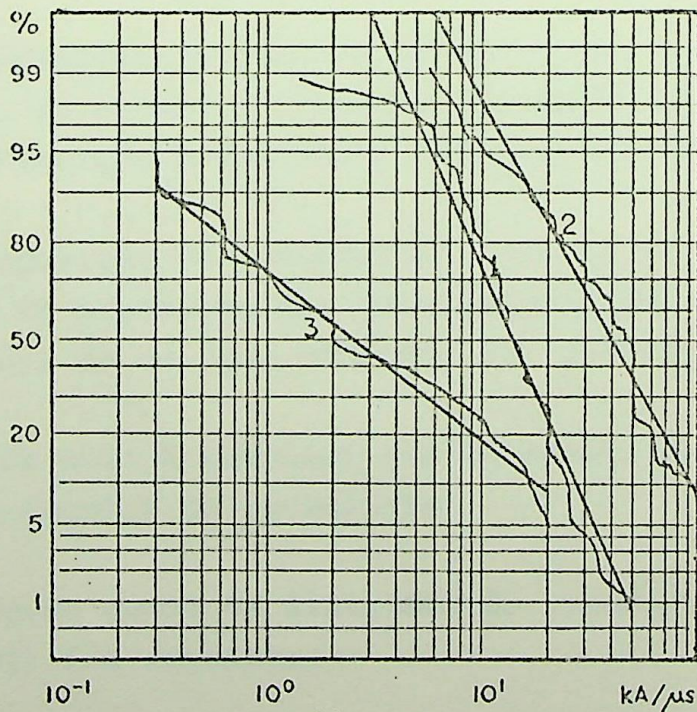


Figura 2.1.4-2 - Taxas de Crescimento Máximas

- 1 - primeiras descargas negativas
- 2 - descargas subsequentes negativas
- 3 - descargas positivas

A tabela 2.1.4-2 mostra os parâmetros característicos de distribuições log-normal generalizadas de taxas de crescimento (1).

Origem	Parâmetros (kA/μs)	S 50% (kA/μs)	S 16% (kA/μs)	$\ln \left[\frac{S\ 16\%}{S\ 50\%} \right]$	Percentagem de Valores Maiores que 50 kA/μs
Berger (1)	12	24	24	0,69	1,0
Berger (2)	40	80	80	0,69	35,0
Cianos-Pierce	22	44	44	0,69	14,0
Popolansky	5	34	34	1,93	12,0

Tabela 2.1.4-2 - Parâmetros Característicos de Taxas de Crescimento na forma Log-Normal Generalizada.

2.1.5. Ângulo de Incidência

A incidência de descargas atmosféricas se realiza com alguma inclinação em relação a vertical ou mesmo na vertical.

Observações visuais ou fotográficas podem confirmar este fato sem, no entanto, fornecer elementos para a determinação de uma distribuição estatística referente ao ângulo de incidência.

A suposição de incidências somente na vertical pode reduzir a área de exposição dos cabos condutores, fazendo com que a possibilidade de um cabo condutor ser atingido seja afetada.

Deste modo é razoável que se admita uma determinada distribuição de ângulos de incidência.

A forma geral da distribuição sugerida por Armstrong e Whitehead (21) é a seguinte:

$$F(\alpha, m) = K_m \cos^m \alpha$$

onde α é o ângulo de incidência do raio, medido em relação a vertical, e k_m e m são constantes a serem ajustadas.

É recomendado para os coeficientes km e m, os valores de $4/\pi$ e 2, respectivamente, baseado em estudos de blindagem de linhas de transmissão para descargas atmosféricas (1).

A distribuição de probabilidades cumulativas de ângulos de incidência assim obtida é indicada na tabela 2.1.5-1.

α	P (α)
0,0	1,0
5,625	0,875
11,250	0,753
16,875	0,635
22,500	0,525
28,125	0,433
33,750	0,331
39,375	0,250
45,000	0,182
50,625	0,125
56,250	0,081
61,875	0,048
67,500	0,025
73,125	0,011
78,750	0,003
84,375	0,0004
90,000	0,0

Tabela 2.1.5-1 - Distribuição de ângulos de Incidência

Pode-se verificar da tabela 2.1.5-1 que existe uma forte tendência para incidências próximas da vertical, sendo α o ângulo de incidência e P (α) a probabilidade de ocorrência de um ângulo maior do que o indicado na 1ª. coluna.

2.1.6. Incidência de Raios ao Longo dos Vãos

Os raios que incidem nos cabos pára-raios e torres são distribuídos de uma maneira quase que aleatória, com alguma tendência para as proximidades das torres, pelo fato de constituírem os pontos mais elevados da linha de transmissão.

Considerando que em linhas de EHV e UHV a probabilidade de descargas entre condutor e pára-raios é muito pequena, a quantidade de raios que incidem nas torres toma uma importância acentuada.

A percentagem de raios que incidem nas proximidades das torres depende do tipo da torre e de sua massa metálica.

Informações obtidas por Anderson (11) levaram a conclusão que, para torres de aço com grande massa e vãos de 300 metros, 60% dos raios incidem nas proximidades da torre, sendo os restantes 40% incidentes ao longo do vão.

Para torres metálicas leves em vãos de 270 m, 40% das descargas incidem nas proximidades das torres.

Considerando estes percentuais como ponto de partida, o autor sugere a expressão

$$NT = N_L e^{-Y S/S_0}$$

para o cálculo do número de incidências nas torres (NT).

sendo:

N_L - número de incidências na linha

S - comprimento do vão

S_0 - comprimento do vão do caso base

Y - constante

A constante é determinada considerando-se que para o caso base $S/S_0 = 1$ e, então:

$$NT/NL = e^{-Y}$$

Para a relação inicial assumida determina-se o valor da constante Y , a qual será utilizada para o cálculo do número de raios incidentes nas torres para vãos de comprimentos diferentes.

De um modo geral, são considerados apenas alguns pontos de incidência ao longo do vão, por exemplo meio do vão e 1/4 do vão, e uma relação bem simples deve ser utilizada para a distribuição de raios ao longo dos vãos.

2.2. Modelo Eletrogeométrico

A partir do trabalho inicial de Golde em 1961, estabelecendo uma relação entre a corrente do raio e a região de atração, diversos autores desenvolveram modelos analíticos na tentativa de consolidar o elo entre as características elétricas das descargas atmosféricas e os parâmetros geométricos das linhas de transmissão (1), (6), (21), (22).

Em 1968, Armstrong e Whitehead relataram o desenvolvimento de um modelo analítico envolvendo a geometria da linha de transmissão e o mecanismo das descargas atmosféricas, o qual foi calibrado tentativamente para os parâmetros de 50 linhas de transmissão efetivamente blindadas, correspondendo a 80000 km de linhas para o número de anos considerado (21).

No ano seguinte Brown e Whitehead procuraram estender a aplicação do modelo para linhas de transmissão parcialmente blindadas (6).

A base do modelo eletrogeométrico é o estabelecimento de uma relação entre a intensidade de corrente de raio e a região ao alcance da ponta do "leader", a qual permite então que o raio em sua trajetória para a terra tenha preferência em alcançar objetos mais próximos.

Estudos realizados por Love e Whitehead (1) permitiram o estabelecimento da curva indicada na figura 2.2-1, que relaciona a distância de atração com o valor da corrente do raio.

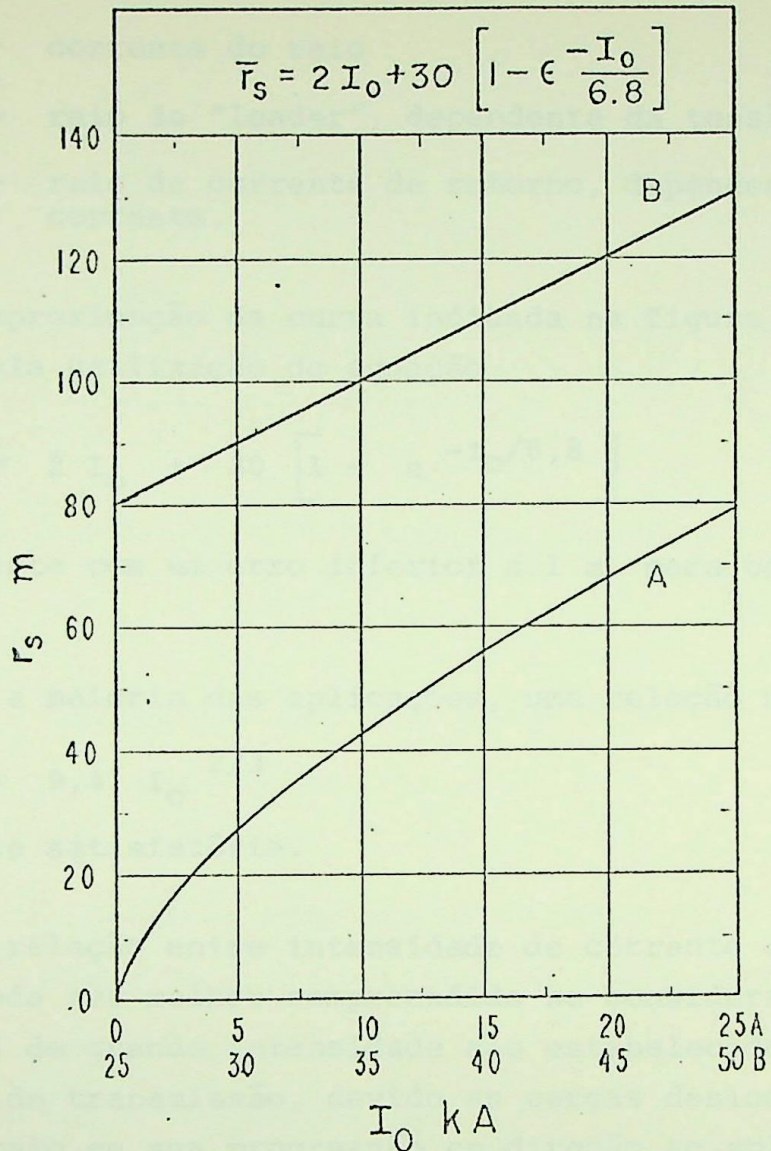


Figura 2.2-1 - Distância de Atração em Função da Corrente do Raio

Esta curva foi obtida a partir das equações desenvolvidas por Love e Whitehead para a distância de atração e tensão do leader, indicadas a seguir:

$$\bar{r}_s = 0,0513 \left[I_0 \ln(2 \bar{r}_s/b) \left[I_0 \ln(2 \bar{r}_s/a) + 2000 \right] \right]^{0,6}$$

$$V_s = 0,06 \left[I_0 \ln(2 \bar{r}_s/b) \left[I_0 \ln(2 \bar{r}_s/a) + 2000 \right] \right]^{0,5}$$

Sendo:

V_s - tensão do leader em MV para I_0 em kA

\bar{r}_s - distância de atração média em m para I_0 em kA

- I_0 - corrente do raio
 b - raio do "leader", dependente da tensão
 a - raio da corrente de retorno, dependente da corrente.

Uma aproximação da curva indicada na figura 2.2-1 pode ser obtida pela utilização da equação

$$\bar{r}_s = 2 I_0 + 30 \left[1 - e^{-I_0/6,8} \right]$$

que a representa com um erro inferior a 1 m, para correntes acima de 5 kA.

Para a maioria das aplicações, uma relação mais simples

$$\bar{r}_s = 9,4 I_0^{2/3}$$

é inteiramente satisfatória.

Esta relação entre intensidade de corrente e distância de atração pode ser melhor compreendida se considerarmos que campos elétricos de grande intensidade são estabelecidos ao redor de uma linha de transmissão, devido as cargas deslocadas pelo "leader" do raio em sua progressão em direção ao solo, provocando um movimento ascendente de cargas que vão em direção a ponta do "leader". Este movimento ascendente de cargas pode deslocar o raio de sua trajetória inicial, atraindo-o para a terra, condutor ou pára-raios, conforme as características elétricas do raio e a geometria da linha de transmissão.

Deste modo, pode-se afirmar que o ponto de impacto ao nível da linha é indefinido até que o "leader" descendente alcance uma determinada distância acima da terra, para a qual, devido a intensificação do campo elétrico e pela formação de canais ascendentes de cargas, vai então ocorrer a orientação definitiva para o ponto de impacto: solo, condutor ou pára-raios.

Estas três possibilidades para a incidência do raio podem ser mostradas na figura 2.2-2.

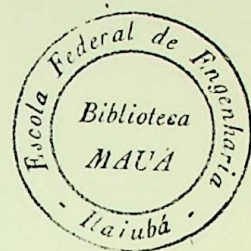
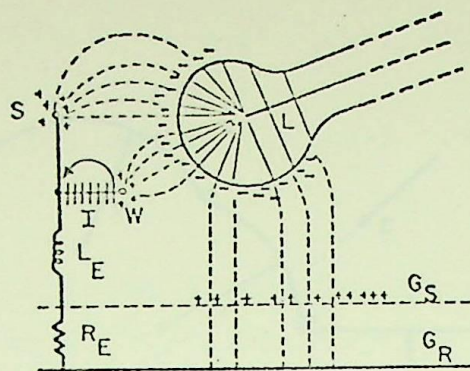


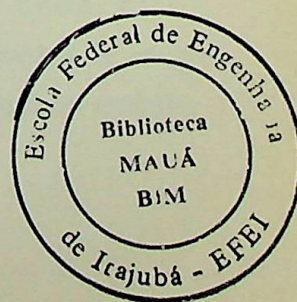
Figura 2.2-2 - Incidência de uma Descarga Atmosférica sobre uma Linha de Transmissão

Sendo:

- L - "leader" da descarga atmosférica
- S - cabo pára-raios
- W - cabo condutor
- LE - indutância equivalente da torre
- RE - resistência equivalente do aterramento
- GS - superfície do solo
- GR - terra de referência

Utilizando-se o conceito de distância de atração, o ponto de incidência seria aquele que primeiro se encontrasse afastado desta distância em relação a ponta do "leader", quando o raio estivesse se movimentando em direção a linha de transmissão.

A construção do modelo eletrogeométrico para uma determinada intensidade de corrente de descarga e com as distâncias de atração referenciadas a geometria da linha de transmissão, em vez de referenciada a ponta do "leader", é indicada na figura 2.2-3.



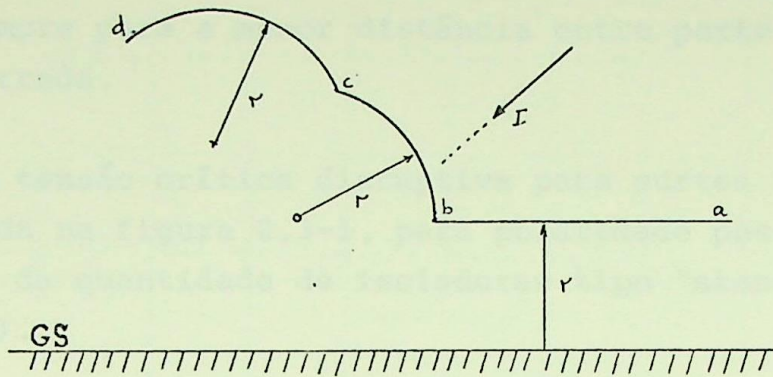


Figura 2.2-3 - Modelo Eletrogeométrico para um Raio de Intensidade de Corrente I.

Sendo:

- I - intensidade da corrente do raio
- W - cabo condutor
- S - cabo pára-raios
- GS - solo
- r - distância de atração

As regiões ab, bc e cd representam as áreas de exposição para o solo, condutor e pára-raios, respectivamente.

No modelo eletrogeométrico o raio é simulado pelo seu último "salto", ou seja, apenas pelo último segmento percorrido pelo "leader" em seu movimento descendente, não sendo de interesse o caminho percorrido desde a sua formação até as proximidades da linha de transmissão.

2.3. Suportabilidade dos Isolamentos de uma Linha de Transmissão a Surtos Atmosféricos

Uma linha de transmissão apresenta basicamente três tipos de configurações diferentes para análise do isolamento a surtos atmosféricos: "gap" condutor-estrutura, "gap" condutor-condutor e "gap" condutor-solo.

As informações de suportabilidade são obtidos de testes realizados em laboratórios, os quais comprovam que a descarga ocorre sempre para a menor distância entre parte energizada e parte aterrada.

A tensão crítica disruptiva para surtos atmosféricos está indicada na figura 2.3-1, para polaridade positiva e negativa, em função da quantidade de isoladores tipo "standard" ($5 \frac{3}{4}$ " x 10") (11).

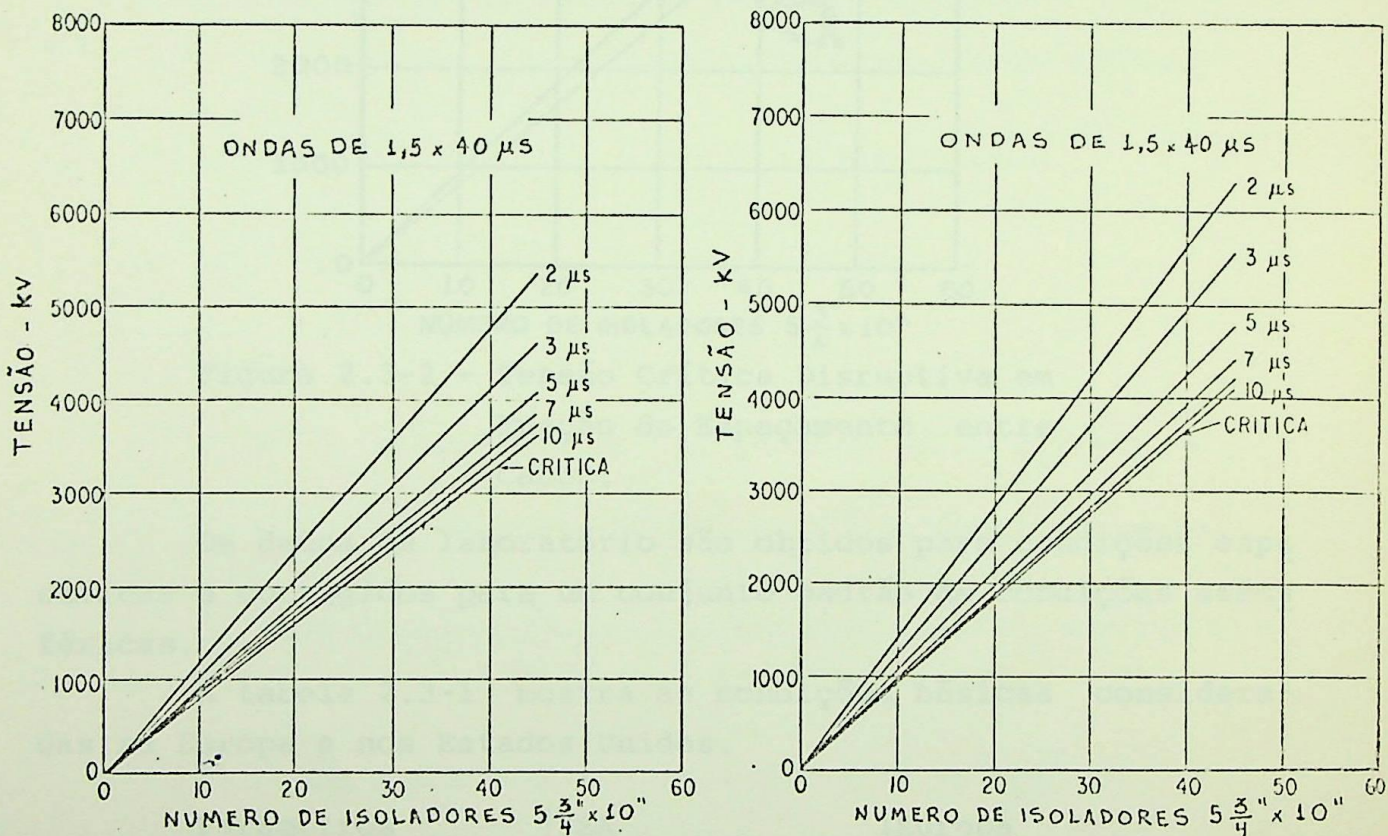


Figura 2.3-1 - Tensão Crítica Disruptiva em Função do Número de Isoladores

A figura 2.3-2 mostra a tensão crítica disruptiva entre dois condutores paralelos, para polaridade positiva e negativa, em função do espaçamento entre cabos (11).

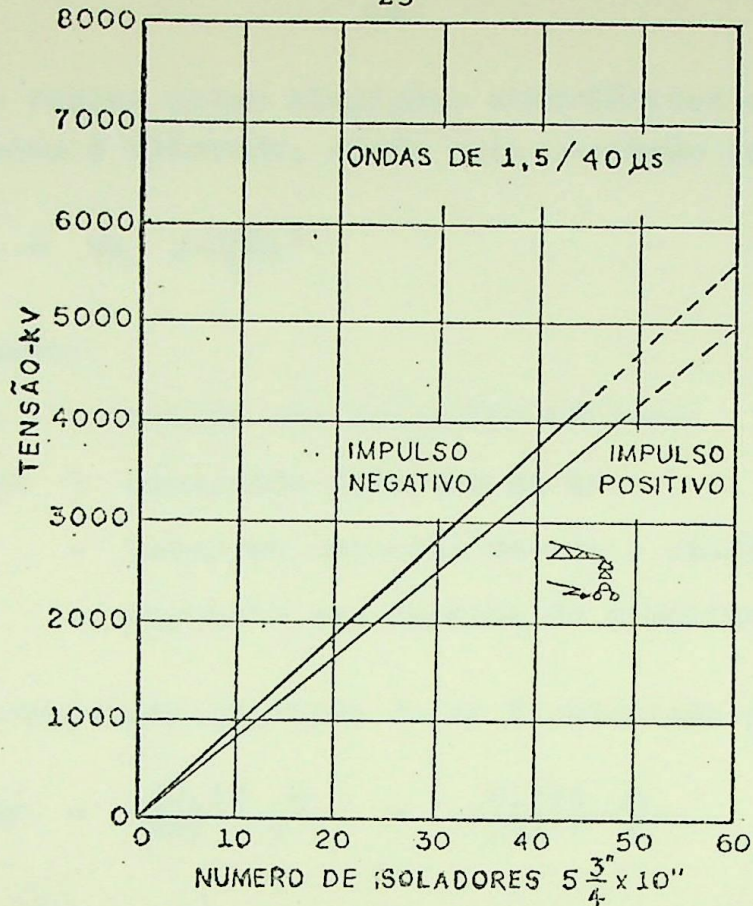


Figura 2.3-2 - Tensão Crítica Disruptiva em Função do Espaçamento entre Cabos.

Os dados de laboratório são obtidos para condições específicas e corrigidos para um conjunto padrão de condições atmosféricas.

A tabela 2.3-1 mostra as condições básicas consideradas na Europa e nos Estados Unidos.

Parâmetros	USA	Europa
Temperatura	25° C	20° C
Pressão	760 mm Hg	1013 mbar
Umidade	0,608 pol Hg	0,43 pol Hg

Tabela 2.3-1 - Condições Atmosféricas Básicas

Ao variar estas condições atmosféricas a suportabilidade do isolamento é alterada, sendo esta variação calculada por:

$$V = V_s \left(\frac{RAD}{H} \right)^n$$

Sendo:

V_s - tensão nas condições básicas

RAD - densidade relativa do ar

H - fator de correção devido a umidade

n - expoente que depende do comprimento do "gap"

A densidade relativa do ar é calculada por

$$RAD = \frac{17,93 B}{460 + T} = \frac{0,294 b}{273 + t}$$

Sendo:

B, b - pressão em pol Hg ou mbar, respectivamente.

T, t - temperatura em °F ou °C, respectivamente

O fator de correção para a umidade pode ser obtido através da pressão de vapor P , a qual é calculada por:

$$P = P_s - 0,000367 B (T - T') \left(1 + \frac{T' - 32}{157} \right)$$

Sendo:

B - pressão em pol Hg

T - temperatura em °F

P_s - pressão do vapor saturado em pol Hg

T' - temperatura de bulbo úmido em °F

Uma vez conhecido o valor de P , o fator de correção para a umidade (H) é obtido da figura 2.3-3, que relaciona o fator de correção com a pressão de vapor.

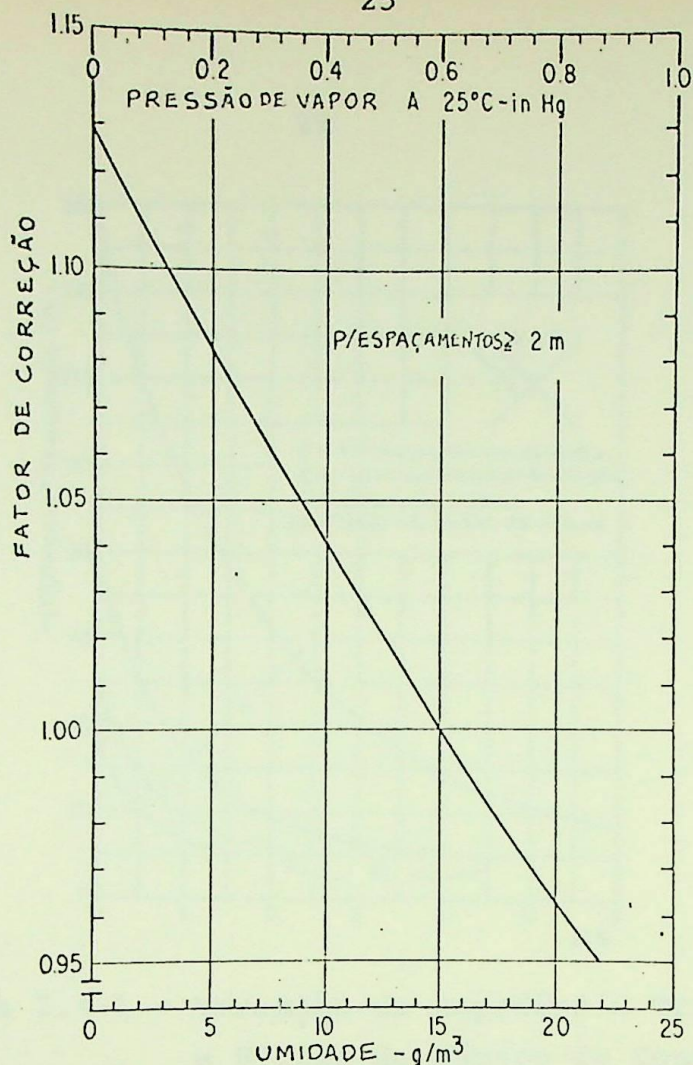


Figura 2.3-3 - Fator de Correção para a Umidade em Função da Pressão de Vapor

O isolamento é afetado também pela altitude, sendo recomendado uma redução de 2,5% para cada 300 metros de altitude (11).

A presença de chuva não altera o comportamento do isolamento quando submetido a surtos atmosféricos, não sendo portanto consideradas correções devido a este efeito.

2.4. Resistência de Pé-de-Torre

As torres de uma linha de transmissão são conectadas a um sistema de aterramento formado por hastes e contrapesos, para o escoamento da corrente do raio de uma maneira eficiente.

Este sistema de aterramento se comporta como uma impedância transitória, variando desde o seu valor inicial até o valor da resistência de dispersão. Na figura 2.4-1 estão indicadas curvas que mostram esta variação para uma determinada configuração de contrapesos (9).

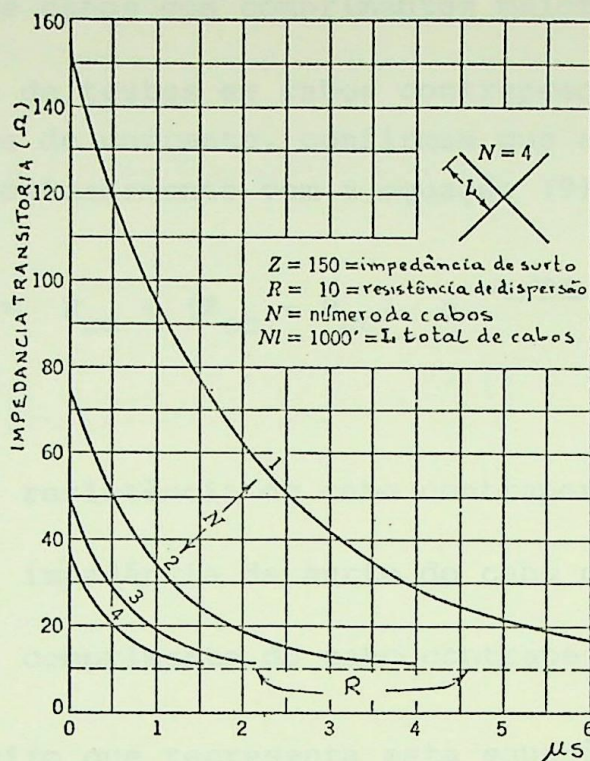


Figura 2.4-1 - Variação da Impedância Transitória e Efeito do Número de Contrapesos

Um cabo contrapeso tem uma impedância inicial de surto, dependendo das condições do solo, normalmente sendo da ordem de 150 a 200 ohms. Com a propagação da onda de corrente através do contrapeso, esta impedância de surto é reduzida a sua resistência de dispersão em um período de tempo dependente do comprimento do cabo e da velocidade de propagação do surto.

Em geral o surto se propaga em um contrapeso numa velocidade da ordem de $1/3$ da velocidade da luz de modo que num contrapeso de 305 metros, a impedância de surto é aproximadamente 150 ohms e ao fim de 6 microsegundos a resistência efetiva é a sua resistência de dispersão.

Do mesmo modo, um cabo contrapeso de 76 metros tem uma impedância inicial de 150 ohms, mas este valor é reduzido a sua resistência de dispersão em apenas 1,5 microsegundos.

O exposto acima serve para mostrar que, sob o ponto de vista de resposta transitória, é melhor a utilização de vários cabos contrapesos com comprimentos menores do que uma quantidade

dade reduzida de cabos com comprimentos maiores.

Análise de testes em cabos contrapesos submetidos a ondas retangulares de corrente, confirmam que a impedância transitória varia aproximadamente com a equação (9):

$$Z_{CC}(t) = R_{CC} + (Z_{CC} - R_{CC}) e^{-t/2L}$$

onde:

R_{CC} - resistência do cabo contrapeso

Z_{CC} - impedância de surto do cabo contrapeso

L - comprimento do cabo contrapeso

O circuito que representa esta equação é o indicado na figura 2.4-2.

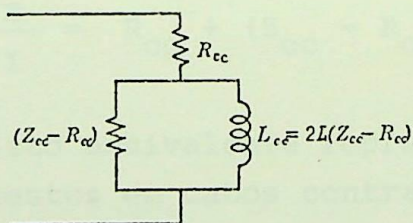


Figura 2.4-2 - Circuito Equivalente de um Cabo Contrapeso

O valor de L_{CC} é calculado de modo que a transição é 95% realizada num período de tempo igual a $6L/v$, o qual é obtido considerando que dos testes realizados foi estabelecido que a transição é praticamente completa para o tempo necessário para a onda retornar da extremidade remota do cabo contrapeso. Para uma velocidade de propagação igual a $1/3$ da velocidade da luz, o intervalo de tempo considerado é igual a

$$t = \frac{2L}{v_{CC}} = \frac{6L}{v}$$

sendo v a velocidade da luz.

A resposta do circuito indicado na figura 2.4-2 a uma on da retangular de corrente é fornecida por:

$$E = \left[R_{cc} + \frac{(Z_{cc} - R_{cc}) L_{cc} p}{Z_{cc} - R_{cc} + L_{cc} p} \right] I$$

$$E = \left[R_{cc} + (Z_{cc} - R_{cc}) e^{-\alpha t} \right] I$$

onde:

$$\alpha = \frac{Z_{cc} - R_{cc}}{L_{cc}} = \frac{Z_{cc} - R_{cc}}{2L (Z_{cc} - R_{cc})}$$

$$\alpha = \frac{1}{2L}$$

Portanto, podemos escrever que

$$Z_{cc}(t) = \frac{E}{I} = R_{cc} + (Z_{cc} - R_{cc}) e^{-\frac{t}{2L}}$$

sendo, então, o circuito equivalente representativo da equação inicial deduzida de testes em cabos contrapesos.

Alguns tipos de arranjos de cabos contrapesos utilizados em aterramento de linhas de transmissão são mostrados na figura 2.4-3.

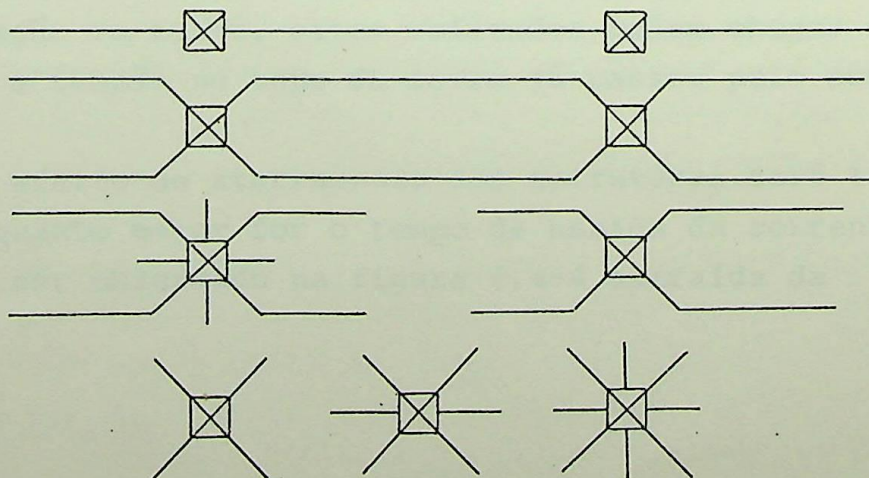


Figura 2.4-3 - Arranjos Básicos de Cabos Contrapesos

Com o conhecimento da resistividade do solo ao longo da rota da linha de transmissão, é projetado um sistema de aterramento para toda a linha utilizando-se vários dos arranjos básicos indicados na figura 2.4-3.

A partir do projeto do sistema de aterramento das estruturas é levantada a distribuição de resistências de pé-de-torre equivalentes, sendo esta distribuição a utilizada nos cálculos para a obtenção do número de desligamentos para incidência de raios nas torres ou nos cabos pára-raios.

Normalmente se utiliza um valor constante de resistência para representar o sistema de aterramento das estruturas, apesar de sua característica transitória, porque a impedância variável com o tempo pode ser substituída por uma resistência equivalente que forneça aproximadamente a mesma tensão de topo-de-torre.

A influência da resistência de pé-de-torre é bastante significativa para o desenvolvimento da tensão de topo-de-torre porque, sendo normalmente inferior a impedância de surto da torre, apresenta um coeficiente de reflexão negativo para as ondas que são refletidas na base da torre, fazendo com que o crescimento da tensão no topo da torre sofra uma acentuada redução num intervalo de tempo relativamente pequeno por causa da altura da torre.

As tensões refletidas nas torres próximas também o são com polaridade invertida mas, no entanto, como o tempo de propagação relativo ao vão é da ordem de 10 vezes superior ao tempo de propagação na torre, estas reflexões podem chegar num instante em que a tensão no topo da torre já passou pelo seu valor máximo.

O efeito do aterramento das estruturas será tanto mais sensível quanto maior for o tempo de subida da corrente do raio, como pode ser observado na figura 2.4-4 extraída da referência (15).

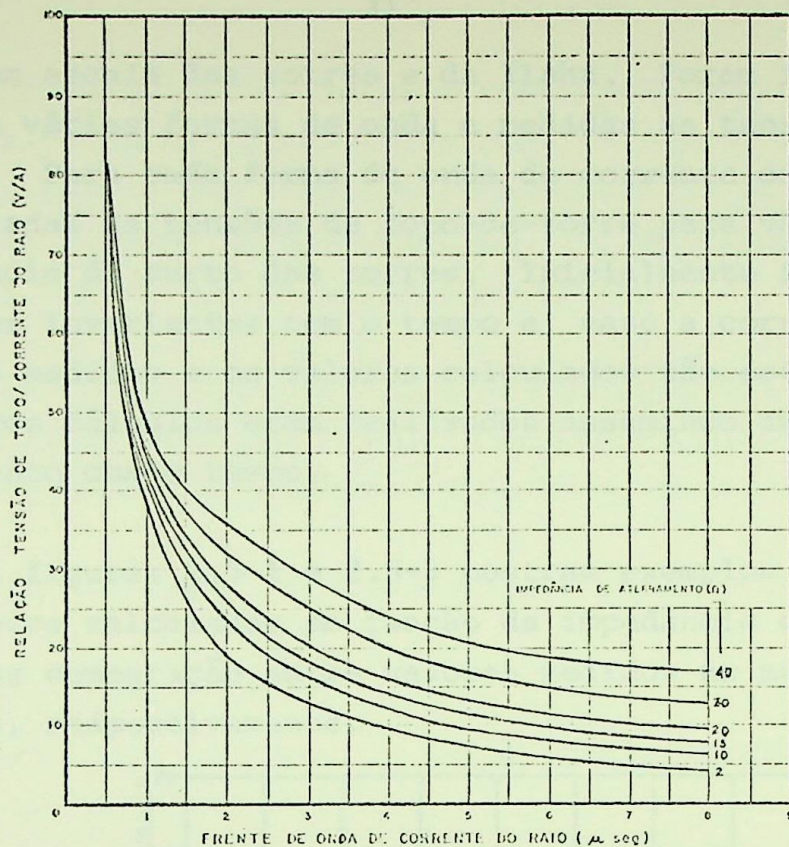


Figura 2.4-4 - Tensão de Topo-de-Torre em Função do Tempo de Crista da Corrente do Raio e da Resistência de Pê-de-torre Equivalente.

2.5. Impedância de Surto das Torres

A impedância de surto das torres de uma linha de transmissão varia ao longo da torre e com o tempo, mas é possível se estabelecer uma magnitude constante para a qual se obtém uma variação da tensão de topo-de-torre bastante próxima daquela que ocorreria na prática.

Um exame em modelos em escala reduzida, acompanhado de deduções analíticas, foi realizado para a determinação da impedância de surto de torres de linhas de transmissão (26).

A técnica utilizada foi determinar a impedância de surto das torres através de uma comparação das tensões de topo-de-torre medidas nos modelos em escala reduzida com os valores calculados por métodos de ondas trafegantes.

Para a realização deste objetivo foi construído um mode

lo exato em escala das torres e da linha. Foram injetadas correntes com várias formas de onda e medidas as tensões de topo-de-torre. Para cada forma de onda de corrente considerada foram calculadas as tensões de topo-de-torre para vários valores de impedância de surto das torres. Inicialmente foram considerados valores invariantes com o tempo e, caso a correlação entre os valores medidos e os valores calculados não estivesse satisfatória, novos cálculos eram realizados assumindo uma característica dependente com o tempo.

As figuras 2.5-1 e 2.5-2 mostram exemplos das tensões de topo-de-torre calculadas em função da impedância de surto da torre e de uma comparação entre valores medidos no modelo e valores calculados, respectivamente.

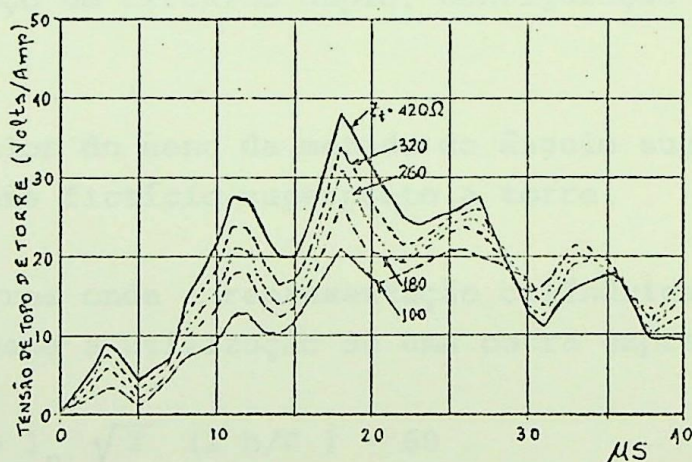


Figura 2.5-1 - Tensão de Topo-de-Torre para Diversos Valores de Impedância

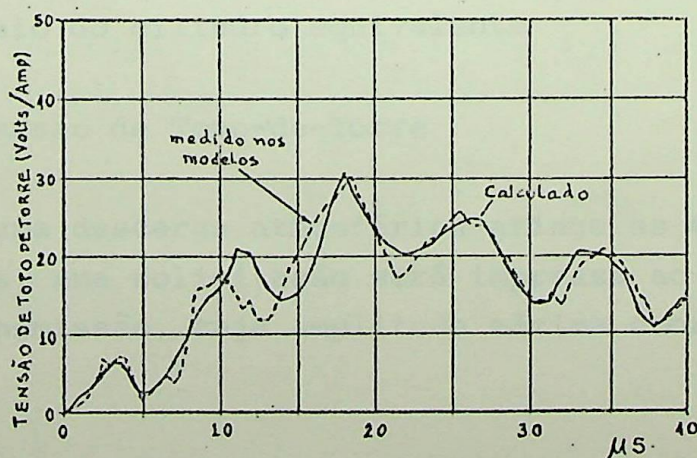


Figura 2.5-2 - Comparação entre Valores Calculados e Valores Medidos

Os resultados dos estudos realizados nos modelos em escala reduzida indicaram que a torre poderia ser corretamente representada através de uma linha de transmissão de impedância de surto constante e tempo de propagação obtido da altura da torre, considerando a velocidade de propagação da luz.

Para consolidar os resultados obtidos foi efetuada uma análise teórica, utilizando teoria de campos eletromagnéticos e configuração geométrica simplificada para as torres.

Como conclusão, é recomendada a utilização da expressão

$$Z = 60 \ln (\sqrt{2}/S)$$

para torres de aço de circuito duplo, configuração vertical, sendo:

S = valor do seno da metade do ângulo superior de um cone fictício superposto a torre.

Para torres onde a representação cilíndrica é a mais adequada, é recomendada a utilização de uma outra expressão:

$$Z = 60 \ln \sqrt{2} (2 h/r) - 60$$

onde:

h = altura do cilindro equivalente

r = raio do cilindro equivalente

2.6. Tensão de Topo-de-Torre

Quando uma descarga atmosférica atinge as torres ou os cabos pára-raios, uma solicitação será impressa ao isolamento da linha de transmissão, cuja amplitude máxima ocorre no ponto de incidência.

Esta solicitação é uma composição da tensão de topo-de-torre, da tensão induzida nos cabos condutores e da tensão ins

tantânea de cada fase.

A determinação da tensão de topo-de-torre pode ser efetuada através de uma simulação em modelos em escala reduzida (modelo nanosegundo), em analisadores de transitórios em redes ou em programas digitais de transitórios.

Qualquer que seja o processo utilizado, é necessário re apresentar uma determinada quantidade de torres e vãos que é função da taxa de crescimento da corrente do raio e dos comprimentos dos vãos.

Basicamente, quanto maior o tempo para a corrente alcançar o seu valor máximo, ou menores forem os comprimentos dos vãos, maior é a quantidade necessária de torres e vãos para uma correta determinação da tensão de topo-de-torre.

Uma configuração típica para a obtenção da tensão de topo-de-torre seria a indicada na figura 2.6-1.

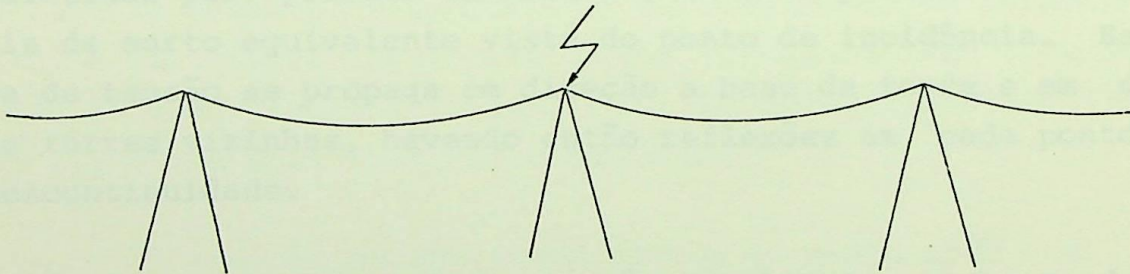


Figura 2.6-1 - Torres e Vãos Representados para Incidência de Raio na Torre

Para a quantidade de torres e vãos indicada na figura 2.6-1, o circuito equivalente seria o da figura 2.6-2.

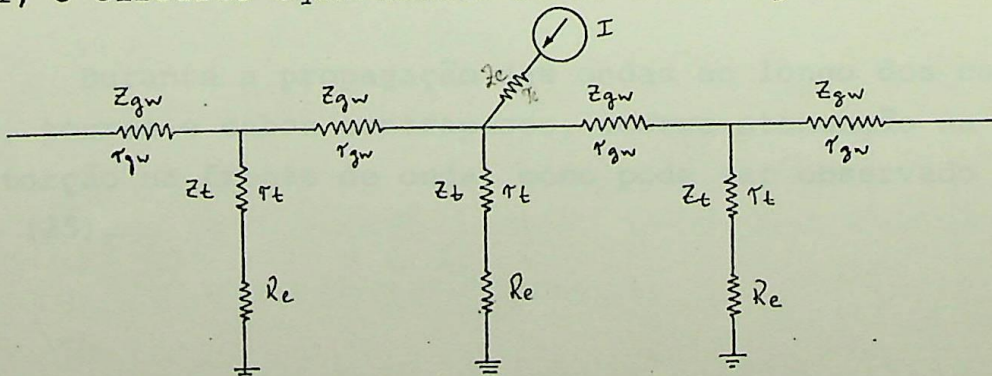


Figura 2.6-2 - Circuito Equivalente para a Determinação da Tensão de Topo-de-Torre

Sendo:

- Z_{gw} - impedância de surto dos cabos pára-raios
- Z_c - impedância de surto do canal do raio
- Z_t - impedância de surto das torres
- R_e - resistência de pé-de-torre equivalente
- τ_{gw} - tempo de propagação nos cabos pára-raios
- τ_t - tempo de propagação nas torres
- τ_c - tempo de propagação no canal do raio
- I - fonte de corrente

Os tempos de propagação são calculados em função dos comprimentos dos vãos e do canal do raio e das alturas das torres.

Para a incidência de um raio na torre como indicado na figura 2.6-1, existe uma onda de tensão associada, que pode ser calculada pelo produto da corrente do raio pelo valor da impedância de surto equivalente vista do ponto de incidência. Esta onda de tensão se propaga em direção a base da torre e em direção as torres vizinhas, havendo então reflexões em cada ponto de descontinuidade.

A forma da onda de tensão resultante, no ponto de incidência do raio, depende da forma da onda de corrente injetada e dos tempos de propagação na torre e nos vãos, sendo que o valor máximo da tensão ocorre nas proximidades do tempo de crista da corrente do raio. Este valor máximo da tensão é que se utiliza para o cálculo da solicitação ao isolamento da linha.

Durante a propagação das ondas ao longo dos cabos pára-raios, torres e cabos contrapesos, ocorre atenuação na amplitude e distorção na frente de onda, como pode ser observado na figura 2.6-3 (25).

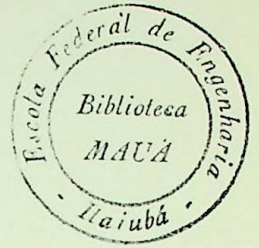
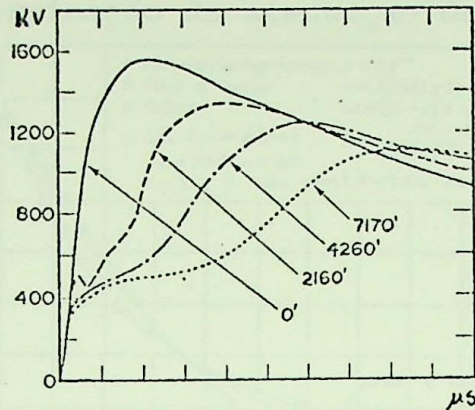


Figura 2.6-3 - Atenuação e Distorção da Forma da Onda

Para surtos que se propagam em distâncias curtas, como é o caso de solicitações ao isolamento de linhas de transmissão por incidência de raios, a consideração de forma de onda inalterada e redução exponencial na amplitude máxima é adequada (25). Uma descrição mais acurada da atenuação e da distorção é necessária para a análise de surtos que se propagam por vários vãos, como é o caso de estudos de coordenação de isolamento em subestações, onde é importante tirar partido das significativas reduções na taxa de crescimento e na amplitude dos surtos iniciados na faixa de 1 a 3 km distantes das subestações.

A redução na amplitude máxima do surto pode ser obtida considerando a seguinte expressão:

$$E = E_0 e^{-\alpha t}$$

onde:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right)$$

sendo:

R, L, G, C - parâmetros da linha de transmissão

E_0 - valor da tensão inicial

Outras expressões para o cálculo da atenuação de surtos

em linhas de transmissão são indicadas em (9), de onde foi extraída a figura 2.6-4, a qual mostra uma comparação entre 4 expressões para a determinação da atenuação de uma onda inicial de 2000 kV.

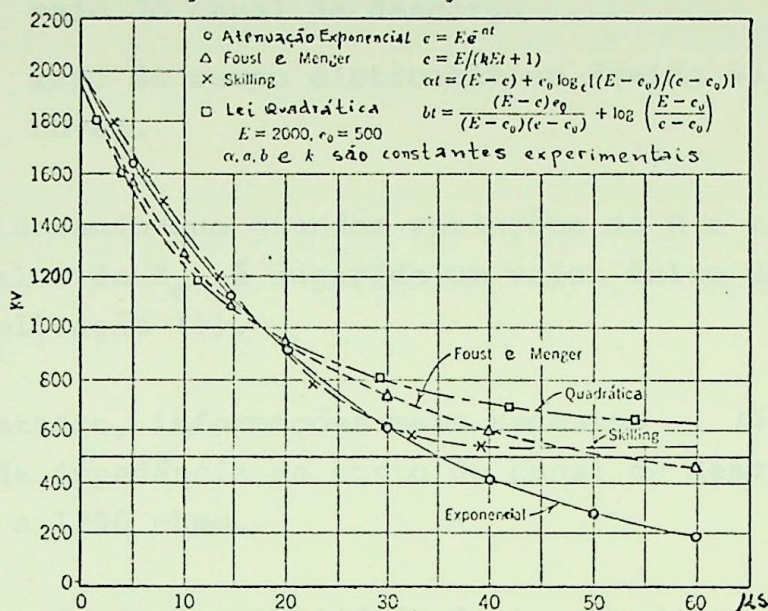


Figura 2.6-4 - Fórmulas de Atenuação de Surtos

Observa-se que existe um ponto comum, que é o ponto de 50% da tensão inicial, e que até este valor as 4 expressões fornecem praticamente os mesmos resultados. Como esta região é a de maior interesse, justifica-se a utilização da expressão mais conveniente sob todos os aspectos, que é a fórmula da atenuação exponencial.

Quando ocorre a descarga atmosférica, o fluxo de corrente que neutraliza o potencial da nuvem é feito através do canal de descarga, o qual tem um diâmetro e um comprimento definidos. Como existem campos elétricos e magnéticos associados com a corrente do raio, este canal de descarga deve ter a característica de uma impedância de surto, pelo menos até que o seu efeito tenha sido eliminado por reflexões sucessivas.

O cálculo desta impedância de surto, na ausência de dimensões conhecidas, deve ser baseado em aproximações para o valor do diâmetro do canal de descarga e na forma e extensão do campo eletromagnético.

A referência (9) apresenta a seguinte expressão para o cálculo da impedância de surto do canal de descarga:

$$Z_c = 60 \log \frac{R}{r} \quad (\text{ohms})$$

Sendo:

r - raio do canal de descarga

R - raio do campo eletrostático devido ao volume da nuvem.

Considerando que grandes variações de R e r não afetam em muito o valor de Z_c é sugerido um valor único de 400 ohms para fins de aplicação (9).

No entanto, informações mais recentes (12) indicam que o valor da impedância de surto do canal de descarga está na faixa de 800 a 1200 ohms.

Um estudo de sensibilidade da tensão de topo-de-torre em função da impedância de surto do canal de descarga e do tempo de crista da corrente do raio, mostrou que praticamente não existem alterações na tensão de topo-de-torre para uma grande faixa de variação deste parâmetro, conforme pode ser observado na figura 2.6-5 (15). Portanto, este parâmetro não é importante para a determinação da tensão de topo-de-torre.

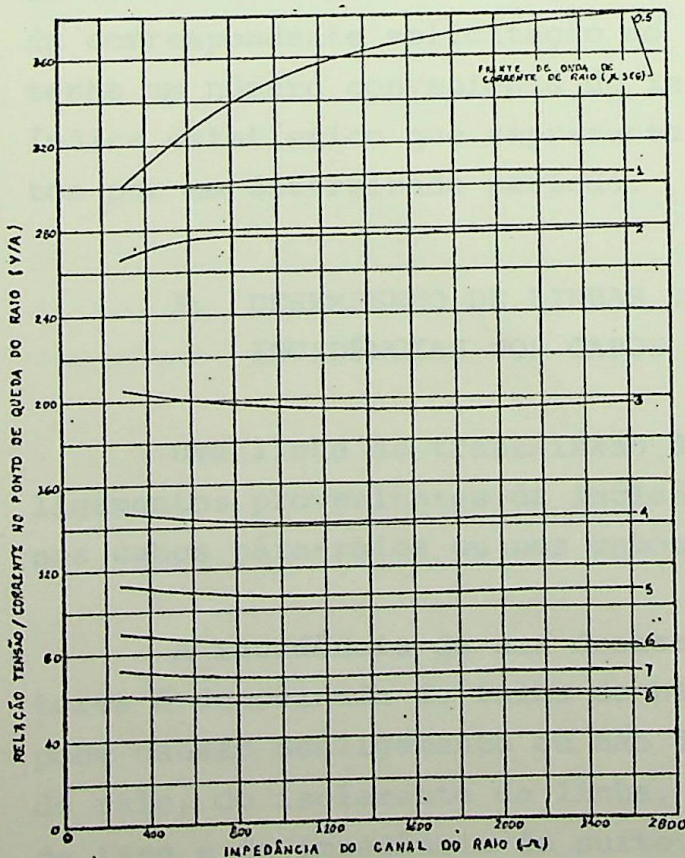


Figura 2.6-5 - Tensão de Topo-de-Torre em Função da Impedância de Surto do Canal de Descarga e do Tempo de Crista da Corrente do Raio

2.7. Método de Monte Carlo

A aplicação do método de Monte Carlo para estimar o desempenho a descargas atmosféricas de linhas de transmissão foi realizada inicialmente por Anderson (3).

Este método é adequado para esta finalidade por causa da natureza estatística dos principais parâmetros envolvidos no comportamento de uma linha de transmissão quando submetida à incidência de descargas atmosféricas. Por exemplo, a ocorrência de um desligamento vai depender dos seguintes fatores: da probabilidade da descarga atmosférica atingir a linha, da probabilidade de que a incidência seja num ponto vulnerável da linha, da probabilidade que as características do raio sejam iguais ou superiores às condições mínimas para causar desligamento e da probabilidade que a tensão, na frequência de operação, possa influenciar na ocorrência de falha de isolamento.

Com o conhecimento das distribuições estatísticas que caracterizam o mecanismo de descarga é possível, através do método de Monte Carlo, fazer uma previsão do comportamento de uma linha de transmissão pela simulação de cada raio, com a determinação da correspondente solicitação ao isolamento da linha, até que se tenha um número conveniente de incidências para a obtenção de um índice estatístico que represente o número médio de desligamentos por um determinado período.

3. DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA INCIDÊNCIAS NOS CABOS CONDUTORES

Uma linha de transmissão de EHV e UHV pode apresentar desligamentos provenientes da incidência de descargas atmosféricas nos cabos pára-raios ou nos cabos condutores.

A incidência de uma descarga atmosférica nos cabos condutores é denominada de falha de blindagem (shielding failure) e pode causar desligamento ou não dependendo do valor da corrente do raio, do isolamento da linha, do valor instantâneo da tensão de fase e da impedância de surto da linha.

A determinação dos parâmetros envolvidos no mecanismo de formação de raios é uma tarefa bastante complexa e se constitui no maior obstáculo para uma correta avaliação do desempenho de uma linha de transmissão a descargas atmosféricas. No entanto, através de levantamento de dados de campo e de estudos analíticos, foi estabelecido um modelo para a simulação do fenômeno, o qual tem sido aperfeiçoado por diversos autores com a finalidade de ajustá-lo ao desempenho real de linhas existentes. Este modelo recebeu a denominação de modelo eletrogeométrico porque relaciona a geometria da linha com o mecanismo de formação de raios através da distância crítica de atração.

Com base no modelo eletrogeométrico, e com a utilização do método de Monte Carlo para a representação dos parâmetros de natureza estatística, o comportamento de linhas de transmissão pode ser analisado para queda direta de raios nos cabos condutores.

Nesta parte do trabalho serão analisados os casos de blindagem efetiva, isto é, número de desligamentos igual a zero para queda de raios nos condutores, e de blindagem parcial.

Também será apresentado um estudo realizado para uma linha de transmissão de 500 kV, parcialmente blindada.

3.1. Blindagem Efetiva de Linhas de Transmissão

A solicitação ao isolamento de uma linha de transmissão, quando da incidência de um raio diretamente no cabo condutor, pode ser facilmente calculada se a intensidade da corrente do raio e a impedância de surto do condutor são conhecidas.

Como a corrente se divide em duas, no ponto de incidência serão geradas duas ondas de tensão que se afastam do ponto de incidência com amplitude igual a:

$$U = \frac{I}{2} \times Z$$

Sendo:

I - intensidade de corrente do raio

Z - impedância de surto do condutor

Portanto, se considerarmos o isolamento da linha de transmissão, é óbvio que somente raios com intensidade de corrente acima de um determinado valor poderão provocar falhas de isolamento, sendo esta corrente mínima para causar desligamento facilmente avaliada.

Deste modo podemos afirmar que existe um determinado valor mínimo, de intensidade de corrente de raio, necessário para provocar desligamentos por incidência nos cabos condutores.

Considerando-se o modelo eletrogeométrico descrito no item 2.2 do presente trabalho, pode ser facilmente verificado - através de sua construção gráfica, que existe uma região de exposição do cabo condutor, associada com cada intensidade de corrente do raio, como indicado na figura 3.1-1.

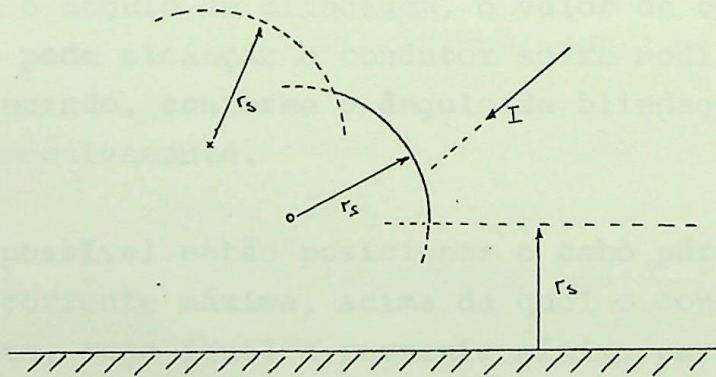


Figura 3.1-1 - Região de Exposição do Cabo condutor para um Raio de Intensidade de Corrente I

Para várias intensidades de correntes de raios diferentes, as regiões de exposição associadas se comportam como indicado na figura 3.1-2.

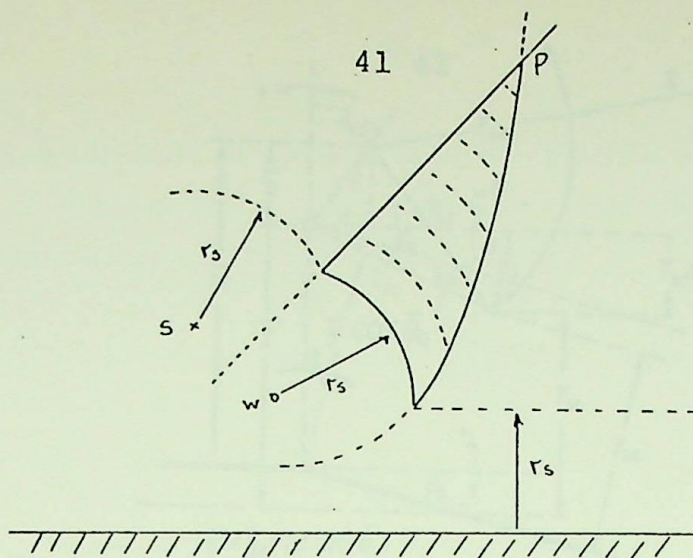


Figura 3,1-2 - Regiões de Exposição para Várias Intensidades de Corrente

O ponto P indicado na figura 3,1-2 mostra que existe uma blindagem natural do condutor para intensidades de corrente acima de um determinado valor. Esta blindagem é formada pela proteção oferecida pelos cabos pára-raios e pela região de atração do solo.

Alterando-se a posição do cabo pára-raios, isto é, modificando-se o ângulo de blindagem, o valor da corrente de raio máxima que pode alcançar o condutor sofre modificações, aumentando ou diminuindo, conforme o ângulo de blindagem aumente ou diminua, respectivamente.

É possível então posicionar o cabo pára-raios de um modo tal que a corrente máxima, acima da qual o condutor é protegido naturalmente, seja igual a corrente mínima para causar desligamento. Para esta situação somente raios com intensidade de corrente inferior a mínima necessária para causar desligamentos, poderão alcançar o condutor.

No entanto, como o posicionamento dos cabos pára-raios, para fornecer esta blindagem efetiva aos cabos condutores, depende da geometria da linha de transmissão e do perfil ao longo da rota, é possível que ocorram casos para os quais não exista uma solução analítica, ou que esta seja inviável economicamente.

O correto posicionamento dos cabos pára-raios, para uma proteção eficaz dos cabos condutores pode ser obtido através de uma análise trigonométrica sobre a figura 3,1-3.

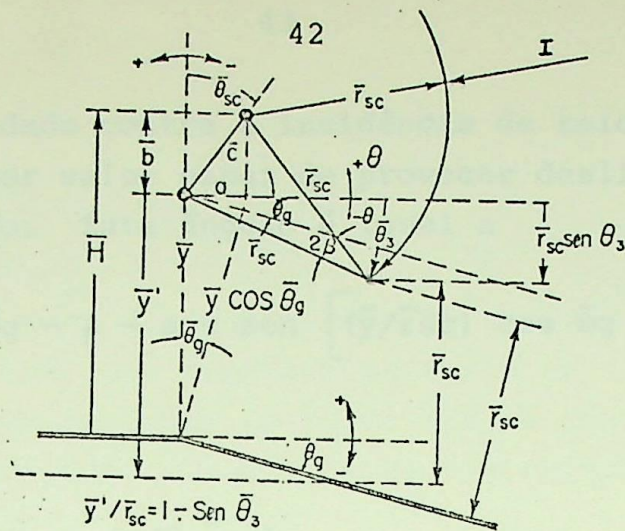


Figura 3.1-3 - Modelo Eletrogeométrico para um Caso de Blindagem Efetiva

Sendo:

- a - espaçamento horizontal entre condutor e cabo pára-raios.
- \bar{b} - espaçamento vertical médio entre condutor e cabo pára-raios.
- \bar{c} - espaçamento médio entre condutor e cabo pára-raios.
- \bar{y} - altura média do condutor.
- \bar{y}' - altura média equivalente do condutor considerando a inclinação do terreno.
- \bar{H} - altura média do cabo pára-raios.
- \bar{r}_{sc} - distância de atração média.
- $\bar{\theta}_g$ - ângulo médio de inclinação do terreno
- $\bar{\theta}_{sc}$ - ângulo de blindagem crítico médio

Para as referências e sentidos indicados na figura 3.1-3 para os ângulos de interesse, podemos escrever as seguintes relações básicas:

$$\bar{\theta}_{sc} + \beta = \bar{\theta}_3$$

$$\text{sen} (\bar{\theta}_3 - \bar{\theta}_g) = (\bar{y} \cos \bar{\theta}_g - \bar{r}_{sc}) / \bar{r}_{sc}$$

$$\text{sen} \beta = \bar{c} / 2 \bar{r}_{sc}$$

Estas equações podem ser trabalhadas para a determinação do ângulo de blindagem médio, para o qual o condutor se encontra

efetivamente blindado contra a incidência de raios com correntes superiores ao menor valor capaz de provocar desligamentos na linha de transmissão. Este ângulo é igual a

$$\bar{\theta}_{sc} = \bar{\theta}_g - \beta - \text{arc sen} \left[\left(\bar{y}/\bar{r}_{sc} \right) \cos \bar{\theta}_g - 1 \right]$$

onde:

$$\beta = \text{arc sen} \left(\bar{c}/2 \bar{r}_{sc} \right)$$

Como o valor de \bar{c} depende do ângulo $\bar{\theta}_{sc}$, estas duas equações devem ser resolvidas por um processo iterativo para a obtenção da solução.

O espaçamento horizontal entre o condutor e o cabo pára-raios pode então ser obtido a partir de

$$a = \bar{c} \text{ sen } \bar{\theta}_{sc}$$

Considerando, por exemplo, que as alturas médias dos cabos acima do solo foram obtidas por

$$\bar{H} = H - 2 S_g/3$$

$$\bar{y} = y - 2 S_c/3$$

onde:

H - altura do cabo pára-raios na torre

y - altura do condutor na torre

S_g - flecha do cabo pára-raios

S_c - flecha do cabo condutor

A altura média do cabo pára-raios acima do condutor pode ser obtida de

$$\bar{b} = \bar{H} - \bar{y}$$

Substituindo as expressões de \bar{H} e \bar{y} na expressão acima



temos:

$$\bar{b} = b + 2 (S_c - S_g)/3$$

Com os valores do espaçamento horizontal do cabo pára-raios em relação ao cabo condutor na torre (a) e da altura do pára-raios acima do condutor na torre (b), é possível então calcular o ângulo de blindagem crítico na torre (θ_{sc}).

$$\theta_{sc} = \text{arc tg } (a/b)$$

O efeito da inclinação do perfil pode ser levado em consideração de uma outra maneira, igualando-se o valor de $\bar{\theta}_g$ a zero na expressão para o cálculo do ângulo de blindagem crítico médio, e calculando uma altura média equivalente do condutor que inclua a inclinação média do terreno, como indicado a seguir.

$$\bar{y}' = \bar{r}_{sc} (1 - \text{sen } \bar{\theta} / 3)$$

Na prática este efeito é de difícil avaliação, para a sua inclusão no cálculo do ângulo de blindagem crítico, porque não se tem conhecimento do perfil transversal ao longo da linha de transmissão,

Os parâmetros envolvidos no cálculo do ângulo de blindagem crítico foram considerados como valores médios, devendo portanto, o resultado obtido ser interpretado também como uma aproximação do ângulo necessário para fornecer blindagem efetiva. Esta aproximação será tão melhor quanto mais representativos para a linha de transmissão, forem os parâmetros considerados, analisando-se unicamente sob o ponto de vista geométrico.

O exposto acima sugere uma divisão da linha de transmissão em trechos, para os quais seriam, então, determinados os ângulos de blindagem críticos associados.

A referência (4) recomenda como uma classificação inicial, a divisão do perfil da linha de transmissão em três classes diferentes: plano, ondulado e montanhoso.

As alturas médias para o condutor sendo definidas por

- perfil plano $\bar{y} = y - 2 Sc/3$
- perfil ondulado $\bar{y} = y$
- perfil montanhoso $\bar{y} \geq 2 y$

A partir desta classificação inicial, o percentual de cada classe poderia ser levantado e realizada uma composição, que resultaria na determinação de uma altura média para toda a linha de transmissão.

Este processo é o mais usual para a determinação do ângulo de blindagem de linhas de transmissão.

A sua utilização, no entanto, implica na adoção de um único ângulo de blindagem para toda a linha, não sendo avaliado o comportamento da linha em cada um dos trechos considerados. Este procedimento poderia eventualmente acusar anomalias, devido a uma possível intensificação de atividades cerâmicas em regiões de perfil montanhoso, por exemplo.

Um procedimento mais cuidadoso seria o de considerar uma divisão do perfil da linha de transmissão em várias classes, inclusive desmembrando a categoria montanhoso em sub-classes, e calcular o ângulo de blindagem necessário para cada classe de perfil. Com os ângulos de blindagem conhecidos poderiam ser realizados levantamentos para diversas alternativas de ângulos de blindagem, para a determinação do percentual de torres não efetivamente blindadas.

Eventualmente poderia ser adotado para a linha de transmissão mais de um ângulo de blindagem, para proteção de trechos com características de perfil acentuadamente diferentes.

Da figura 3.1-3 verifica-se que as alturas médias dos cabos pára-raios e dos condutores são parâmetros de grande influência na determinação do ângulo de blindagem crítico, uma vez que a blindagem efetiva dos condutores é obtida pela interseção da região de atração para os cabos pára-raios com a região de atração para o solo. Alterações nas alturas médias dos cabos provo

cam modificações no ângulo de blindagem, havendo sérias dificuldades na sua determinação para blindagem efetiva em terrenos montanhosos, onde a altura média do condutor ao solo é bem elevada.

A situação mencionada acima é decorrente do fato de que a proteção oferecida pela terra não é modificada, enquanto que a região de atração dos cabos pára-raios é levada mais para cima com o aumento na altura dos cabos, criando uma região de exposição para os condutores. Para neutralizar esta exposição dos condutores à incidência de raios, é necessário então posicionar os cabos pára-raios com ângulos de blindagem tanto menores quanto maiores forem as alturas consideradas. Em situações extremas de alturas do condutor ao solo poderia não haver uma solução satisfatória para o posicionamento dos cabos pára-raios, sendo previsto para estes casos a possibilidade de falhas de blindagem.

A tabela 3.1-1 mostra os ângulos de blindagem críticos, para uma linha de transmissão com isolamento a surtos atmosféricos de 1280 kV e 5 metros de altura dos cabos pára-raios acima dos cabos condutores, em função da altura do condutor ao solo na torre e da classe de perfil considerado.

y_t	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
28	28,98	14,92	0,25	-18,91	-36,89	-53,67	*
32	18,51	3,95	-10,79	-31,90	-51,29	*	*
36	7,63	-7,12	-21,57	-44,16	-66,42	*	*
40	-3,44	-18,02	-31,90	-56,07	*	*	*

* Sem solução possível

Tabela 3.1-1 - Ângulos de Blindagem Efetiva

Sendo:

y_t - altura do condutor na torre

P_1 - perfil plano ($\bar{y} = y_t - 2 sc/3$)

P_2 - perfil ondulado classe 1 ($\bar{y} = y_t - sc/3$)

P_3 - perfil ondulado classe 2 ($\bar{y} = y_t$)

P_4 - perfil montanhoso classe 1 ($\bar{y} = 1,25 y_t$)

- P₅ - perfil montanhoso classe 2 ($\bar{y} = 1,50$ yt)
 P₆ - perfil montanhoso classe 3 ($\bar{y} = 1,75$ yt)
 P₇ - perfil montanhoso classe 4 ($\bar{y} = 2,0$ yt)

3.1.1. Determinação do ângulo de blindagem crítico para distâncias de atração calculadas em função do elemento considerado.

Toda a análise efetuada no item 3.1 foi baseada no modelo eletrogeométrico considerando-se que as distâncias de atração para os condutores, pára-raios e solo são iguais.

No entanto, é possível que este procedimento possa ser revisto, caso sejam obtidas informações para a determinação das distâncias de atração referentes a estes elementos.

Supondo que o relacionamento possa ser efetuado através da aplicação de coeficientes referentes ao condutor e ao solo, a distância crítica de atração calculada para o cabo pára-raios, teríamos:

$$r_{sg} = K_{sg} \quad r_{sc} \qquad r_{sw} = K_{sw} \quad r_{sc}$$

Sendo:

- r_{sg} - distância crítica de atração para o solo
 r_{sw} - distância crítica de atração para o condutor
 r_{sc} - distância crítica de atração para o pára-raios
 K_{sg} - coeficiente relativo ao solo
 K_{sw} - coeficiente relativo ao condutor

Considerando estas novas distâncias críticas de atração, o ângulo médio para blindagem efetiva ($\bar{\theta}_{sc}$) seria obtido pela seguinte expressão:

$$\bar{\theta}_{sc} = \bar{\theta}_g + \arcsen \left[\frac{(K_{sg}/K_{sw}) - (\bar{y}/\bar{r}_{sc} K_{sw}) \cos \bar{\theta}_g}{(\bar{C}/\bar{r}_{sc})} \right] - \arccos \left(\frac{\bar{C}}{\bar{r}_{sc}} \right)$$

Onde:

$$2\beta = \arccos \left[\frac{1 + K_{sw}^2 - (\bar{C}/\bar{r}_{sc})^2}{2 K_{sw}} \right]$$

sendo os componentes das expressões acima, os mesmos já definidos

anteriormente nos itens 3.1 e 3.1.1.

3.1.2. Exemplo de cálculo para determinação do ângulo de blindagem para proteção efetiva

Neste item será verificado o procedimento para a obtenção do ângulo de blindagem para proteção efetiva, baseado no item 3.1 e considerando-se uma configuração hipotética para uma linha de transmissão de 500 kV.

a. Os dados referentes a linha em questão são os seguintes:

- composição do perfil

40% plano

40% ondulado

20% montanhoso

- altura do condutor na torre

$$y_t = 22 \text{ m}$$

- flecha do condutor

$$S_c = 12 \text{ m}$$

- altura do cabo pára-raios na torre

$$H_t = 31 \text{ m}$$

- flecha do cabo pára-raios

$$S_g = 6 \text{ m}$$

- tensão crítica disruptiva

$$ICFO = 2000 \text{ kV}$$

- impedância de surto do condutor

$$Z = 360 \text{ ohms}$$

b. As alturas médias dos cabos condutores e pára-raios, em função dos tipos de perfil, podem ser calculadas:

- perfil plano

$$\bar{y}_F = y_t - 2 S_c/3 = 14 \text{ m}$$

- perfil ondulado

$$\bar{y}_R = y_t = 22 \text{ m}$$

- perfil montanhoso

$$\bar{y}_n = 2 y_t = 44 \text{ m}$$

- altura média para o condutor

$$\bar{y} = 0,4 \times 14 + 0,4 \times 22 + 0,2 \times 44 = 23,2 \text{ m}$$

- espaçamento vertical médio

$$\bar{b} = (31 - 22) - 2 \times 6/3 + 2 \times 12/3 = 13 \text{ m}$$

- altura média do cabo pára-raios

$$\bar{H} = \bar{y} + \bar{b} = 36,2 \text{ m}$$

A impedância de surto poderia ser recalculada em função da altura média do condutor. Será assumido que o valor de 360 ohms não se modificará.

c. a corrente de raio crítica para o condutor será:

$$I_C = 2 E/Z = 2 \times 2000/360 = 11,1 \text{ kA}$$

d. a distância crítica de atração pode ser calculada pela expressão:

$$\bar{r}_s = 2 I_O + 30 \left[1 - e^{-\frac{I_O}{6,8}} \right]$$

$$\bar{r}_s = 46,34 \text{ m}$$

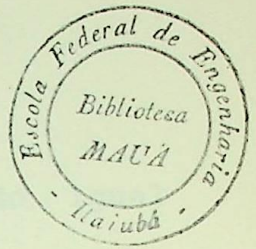
a qual será considerada igual para o condutor, pára-raios e solo.

e. considerando o perfil transversal como horizontal ($\bar{\theta}_g = 0^\circ$), o ângulo de blindagem crítico médio pode ser calculado por

$$\bar{\theta}_{sc} = -\beta - \text{arc sen} \left[\left(\bar{y}/\bar{r}_{sc} \right) - 1 \right]$$

Sendo:

$$\beta = \text{arc sen} (\bar{C}/2 \bar{r}_{sc})$$



Como um valor preliminar podemos assumir \bar{c} ligeiramente maior do que \bar{b} .

$$\bar{c} = 14 \text{ m}$$

Para este valor de \bar{c} β pode ser calculado, sendo igual a $8,69^\circ$.

Com este valor de β o valor de $\bar{\theta}_{sc}$ é igual a $21,31^\circ$.

Agora o valor de \bar{c} pode ser verificado de

$$\bar{c} = \bar{b} / \cos \bar{\theta}_{sc} = 13,95 \text{ m}$$

Considerando este novo valor de \bar{c} , o valor de β é igual a $8,66^\circ$.

Com este valor de β , $\bar{\theta}_{sc} = 21,34^\circ$

Verificando novamente o valor de \bar{c} , temos:

$$\bar{c} = 13,96 \text{ m}$$

Portanto, podemos concluir que, como o valor de \bar{c} é praticamente idêntico ao anterior, o ângulo crítico médio é igual a $21,34^\circ$.

f. o espaçamento horizontal entre condutor e pára-raios é fornecido por:

$$a = \bar{c} \sin \bar{\theta}_{sc} = 5,08 \text{ m}$$

g. conhecidos a e b, o ângulo na torre é

$$\theta_t = \text{arc tg } (a/b)$$

$$\theta_t = 29,4^\circ$$

Portanto, um ângulo de 29° na torre seria adequado para toda a linha, considerando o efeito do perfil em termos médios.

h. a influência do perfil montanhoso pode ser verificada, se analisarmos o ângulo de blindagem para este trecho da linha, com



$$\bar{y} = 44 \text{ m}$$

Assumindo $\bar{C} = 14 \text{ m}$, o valor de β é igual a $8,69^\circ$.

Para este valor de β , $\bar{\theta}_{sc}$ é igual a $-5,80^\circ$.

Recalculando \bar{C} , obtemos $\bar{C} = 9,05 \text{ m}$.

Para este valor de \bar{C} , o valor de β é $5,6^\circ$, e $\bar{\theta}_{sc}$ é igual a $-8,50^\circ$.

Recalculando \bar{C} , obtemos $\bar{C} = 9,10 \text{ m}$.

O valor de β é recalculado para $5,63^\circ$ e $\bar{\theta}_{sc}$ para $-8,52^\circ$.

Assumindo este valor como satisfatório para $\bar{\theta}_{sc}$, o espaçamento horizontal entre condutor e pára-raios é igual a $-1,35\text{m}$ e o ângulo na torre igual a $-8,52^\circ$.

Portanto, para o trecho montanhoso seria necessário um ângulo da ordem de -9° para uma blindagem efetiva nesta região.

Como em termos de perfil médio, um ângulo de 29° poderia ser utilizado para toda a linha é possível que ocorram falhas de blindagem nos trechos correspondentes as regiões montanhosas da linha de transmissão.

Os resultados obtidos acima servem para ilustrar a importância do perfil da linha de transmissão na determinação do ângulo de blindagem para proteção efetiva.

3.1.3. Programa digital para cálculo do ângulo de blindagem crítico

Um programa digital simples, em FORTRAN IV, foi desenvolvido para o cálculo do ângulo de blindagem crítico, utilizando-se as equações apresentadas no item 3.1.

Não se considerou o efeito do perfil transversal à linha de transmissão, sendo então, a equação básica reduzida a:

$$\bar{\theta}_{sc} = -\beta - \text{arc sen} \left[\frac{\bar{y}}{\bar{r}_{sc}} - 1 \right]$$

No entanto, este efeito poderia ser facilmente incluído se considerarmos que uma altura média equivalente do condutor ao solo, calculada pelas equações

$$\bar{y}' = \bar{r}_{sc} (1 - \text{sen } \bar{\theta}_3)$$

$$\bar{\theta}_3 = \bar{\theta}_g - \text{arc sen} \left[\frac{\bar{y}}{\bar{r}_{sc}} \cos \bar{\theta}_g - 1 \right]$$

for utilizada em substituição a altura média do condutor ao solo, tomando como referência um terreno plano.

Nas expressões acima, $\bar{\theta}_g$ é a inclinação média do terre no no sentido transversal a linha de transmissão.

O ângulo de blindagem na torre é determinado em função da altura do condutor ao solo na torre, e do isolamento da linha, para várias classes de perfil e diferentes alturas do pára-raios acima do condutor.

Os dados de entrada necessários são:

- valor mínimo da altura do condutor ao solo na torre.
- valor mínimo da altura do pára-raios acima do condutor
- valor mínimo do isolamento da linha
- impedância de surto do condutor
- passo de variação para a altura do condutor ao solo
- passo de variação para a altura do pára-raios acima do condutor
- passo de variação para o isolamento da linha
- quantidade de passos para variação na altura do condutor
- quantidade de passos para variação na altura do pára-raios acima do condutor
- quantidade de passos para variação no isolamento

A saída do programa apresenta tabelas do tipo das indicadas a seguir.

SUPPORTABILIDADE DO ISOLAMENTO DA LINHA (kV) 1350.0
 DIFERENÇA DE ALTURA ENTRE P.RAIO E CONDUTOR NA TORRE (M) 5.35
 ÂNGULOS DE BLINDAGEM PARA PROTEÇÃO TOTAL EM GRAUS

H	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
14.00	58.53	51.33	44.63	39.01	33.46	27.92	22.36
17.00	49.96	43.32	36.85	29.39	21.91	14.39	6.83
20.00	42.02	35.57	29.17	19.76	10.27	0.73	-8.81
23.00	34.29	27.88	21.46	10.05	-1.45	-12.94	-24.33
26.00	26.60	20.18	13.71	0.28	-13.16	-26.48	-39.72
29.00	18.89	12.42	5.91	-9.50	-24.78	-39.95	-55.88

SUPPORTABILIDADE DO ISOLAMENTO DA LINHA (kV) 1350.0
 DIFERENÇA DE ALTURA ENTRE P.RAIO E CONDUTOR NA TORRE (M) 6.35
 ÂNGULOS DE BLINDAGEM PARA PROTEÇÃO TOTAL EM GRAUS

H	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
15.00	56.49	49.23	42.52	36.92	31.43	25.98	20.56
18.00	47.85	41.21	34.79	27.43	20.12	12.81	5.49
21.00	39.91	33.52	27.21	18.02	8.82	-0.39	-9.60
24.00	32.25	25.95	19.68	8.60	-2.49	-13.58	-24.65
27.00	24.70	18.42	12.15	-0.83	-13.80	-26.76	-39.87
30.00	17.17	10.89	4.61	-10.25	-25.09	-40.09	-56.44

3.2. Blindagem Parcial de Linhas de Transmissão

A obtenção de um ângulo de blindagem que forneça um número de desligamentos por incidência de raios nos condutores igual a zero, nem sempre é possível, em razão das características do perfil ao longo da linha de transmissão ou por considerações econômicas.

As linhas de transmissão projetadas com um ângulo de blindagem maior do que o ângulo para proteção total do condutor, podem ser classificadas de parcialmente blindadas, apresentando uma determinada taxa de desligamentos devido a incidência de raios nos condutores. Esta taxa pode ser elevada caso o posicionamento dos cabos pára-raios não seja adequado.

A figura 3.2-1 mostra as regiões de exposição para o condutor de uma linha de transmissão parcialmente blindada, em função das intensidades de correntes de raios. Se a distância crítica de atração r_1 corresponde à corrente mínima para causar desligamento, os segmentos bc , $b'c'$ e $b''c''$ representam regiões de exposição à incidência de raios capazes de provocar desligamentos.

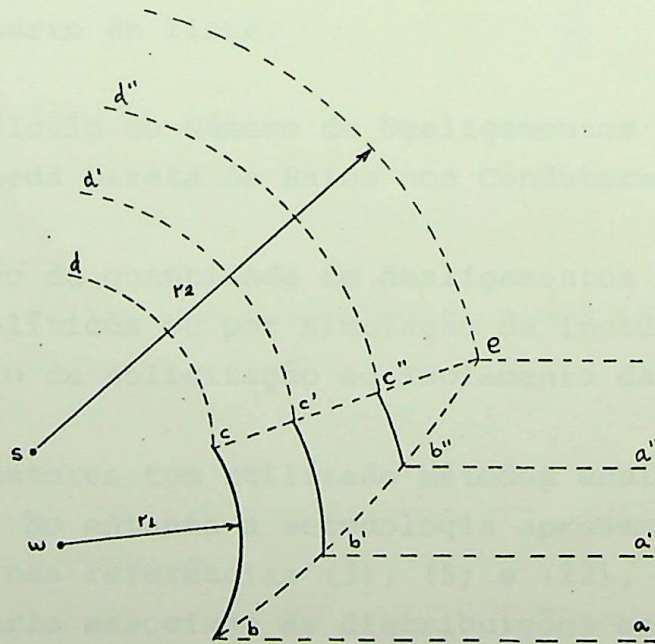


Figura 3.2-1

Portanto, raios compreendidos entre o valor mínimo para causar desligamento e o valor para o qual ocorre a blindagem natural do condutor, são aqueles que tem condições de atingir os condutores provocando desligamentos. A região total de exposição corresponde a área b c e na figura 3.2-1.

O cálculo da taxa de desligamentos por incidência de raios nos condutores consiste basicamente em determinar a proporção entre a área de exposição dos condutores à incidência direta e a área de exposição da linha considerando a distribuição de intensidades de correntes total.

Esta proporção pode ser obtida através da simulação da incidência de cada raio, até que se tenha um número conveniente de incidências para a obtenção de um índice estatístico que represente o número médio de desligamentos para um determinado período, ou então por considerações analíticas.

A incidência direta de um raio no condutor pode causar desligamento ou não dependendo do valor da corrente do raio, do isolamento da linha, do valor instantâneo da tensão de fase e da impedância de surto da linha.

3.2.1. Cálculo do Número de Desligamentos por Queda Direta de Raios nos Condutores

A avaliação da quantidade de desligamentos pode ser obtida por métodos analíticos ou por simulação da incidência de cada raio, com o cálculo da solicitação ao isolamento da linha.

Diversos autores tem utilizado métodos analíticos (6), (18), (21), (23). No entanto a metodologia apresentada neste item será baseada nas referências (3), (5) e (22), que aplicam o método de Monte Carlo associado às distribuições estatísticas que caracterizam as descargas atmosféricas.

O processo consiste basicamente em simular o fenômeno tal como ocorreria na natureza, utilizando-se as distribuições estatísticas conhecidas para as descargas atmosféricas e o modelo eletrogeométrico.

uma descrição sumária das principais considerações para a metodologia em análise, é realizada a seguir.

- a. O raio é representado pelo último salto, considerando-se que o seu objetivo final não é modificado pela presença da linha de transmissão e do solo até que se encontre na distância de atração, sendo então dirigido para o solo, cabos das fases ou pára-raios, e a linha de transmissão é considerada por um modelo bi-dimensional, representado num plano perpendicular a própria linha.
- b. Os elementos necessários para a simulação de uma descarga atmosférica são as distribuições estatísticas de intensidades de correntes e de ângulos de incidência, e a definição de um alvo para a descarga ao nível do solo.
- c. O ponto de incidência é determinado pela utilização do modelo eletrogeométrico, sendo de interesse, para o cálculo de desligamentos por queda direta, apenas os raios que incidem nos condutores.
- d. A solicitação ao isolamento da linha pode ser calculada considerando-se ou não a tensão instantânea da fase no momento da incidência.
- e. Como a utilização do método de Monte Carlo requer um número relativamente alto de incidências, para a obtenção de um índice estatístico representativo, a quantidade de raios gerados pode ser obtida em função de uma estabilização nos resultados, a medida que este parâmetro é aumentado.

3.2.2. Programa Digital para o Cálculo do Número de Desligamentos Provocados por Queda Direta de Raios nos Condutores

Em virtude da grande quantidade de simulações que são

necessárias para uma correta estimativa do número de desligamentos de uma linha de transmissão por descargas atmosféricas, quando se utiliza o método de Monte Carlo, foi desenvolvido um programa digital baseado na metodologia descrita no item 3.2-1.

O programa fornece o número de desligamentos provocados por queda direta de raios nos condutores, para uma determinada geometria da linha de transmissão e pode ser aplicado tanto na fase de planejamento da linha, com o objetivo de determinar o ângulo de blindagem e quantidade de desligamentos associada, quanto para linhas já em operação, para identificar as causas de desempenhos anormais, bem como as possíveis soluções para eliminar, ou mesmo atenuar, o problema.

As principais considerações aplicadas ao desenvolvimento do programa foram as seguintes:

- a. o método de Monte Carlo permite uma correta estimativa do número de desligamentos, desde que se utilize uma amostragem estatística suficientemente grande dos elementos que definem as características das descargas atmosféricas.
- b. as distâncias de atração necessárias para a construção do modelo eletrogeométrico podem ser conhecidas através de dados existentes.
- c. o ângulo de incidência do raio pode ser descrito por uma função de distribuição que é conhecida.
- d. o raio pode ser representado pelo último salto e o seu ponto de impacto é independente dos elementos ao nível da linha até que a descarga se encontre dentro da região de atração de um dos cabos ou do solo.
- e. a curva de distribuição de correntes é conhecida e pode ser representada na forma log-normal generalizada.

- f. a densidade de raios para a terra é conhecida ou pode ser obtida a partir do nível isocerâunico.
- g. a linha de transmissão pode ser representada por um modelo onde os condutores estão a uma determinada altura do solo, o qual é admitido plano e horizontal.

O programa, em FORTRAN IV, pode simular até 5 circuitos na mesma faixa de passagem, sem restrições quanto a geometria de cada circuito e com um máximo de 6 cabos por linha.

Os dados de entrada necessários são os seguintes:

- disposição dos condutores em relação a um sistema de referência cujo eixo horizontal é o solo e com o eixo vertical localizado no centro da faixa de estudo e perpendicular ao plano do solo.
- suportabilidade do isolamento da linha
- número de linhas na faixa de estudo
- número total de cabos de cada linha
- número de cabos pára-raios de cada linha
- impedância de surto
- tensão nominal da linha
- densidade de raios ou nível isocerâunico e fator de queda para a terra.
- largura da faixa de estudo
- número de pontos da curva de distribuição de ângulos de queda.
- número de raios, por faixa de corrente, a serem simulados.
- faixa de corrente para a geração de uma determinada quantidade de raios com a mesma intensidade de corrente.
- valores característicos da curva de distribuição de correntes.

Os passos utilizados para a determinação do número de desligamentos podem ser resumidos como indicado nos itens a seguir.

- a. Utilizando os valores de tensão da linha e da suportabilidade do isolamento é calculada a corrente mínima em condições de causar desligamento na linha. Com este valor de intensidade de corrente é estabelecida a faixa de corrente para a qual será simulada a quantidade de raios especificada.
- b. Os raios são simulados através do sorteio do ângulo de queda, de um alvo na faixa de estudo e da intensidade de corrente determinada pela faixa de corrente. Para cada raio simulado é determinado o ponto de incidência pela construção do modelo eletrogeométrico.
- c. Como é gerada uma determinada quantidade de raios por faixa de corrente há necessidade de se calcular o número total de raios que seriam necessários gerar na curva de distribuição de correntes para que naquela faixa se conseguisse a quantidade especificada. Isto é feito através da probabilidade de ocorrência de cada faixa considerada em relação à curva total.
- d. Considerando a densidade de raios e a largura da faixa de estudo é calculado o número de raios que incidem sobre a linha por ano. Fazendo proporção direta entre o número equivalente de raios simulados e o número de raios que incidem sobre a linha, é feita uma transformação da quantidade de incidências verificadas durante a simulação para quantidade de incidências por ano.
- e. Existe uma determinada faixa de correntes de descargas para a qual o valor da tensão instantânea de operação da linha tem influência para a ocorrência ou não de um desligamento. Este efeito é considerado calculando-se as probabilidades de ocorrência de desligamentos em função da tensão da linha, da impedân

cia de surto da linha, do isolamento da linha e da corrente do raio incidente.

- f. O número de desligamentos é obtido pelo produto do nº de raios que incidem nos condutores por 100km por ano pela probabilidade de ocorrência de desligamento.

A saída do programa é auto-explicativa, como pode ser observado a seguir:

Desempenho de Linhas de Transmissão a Descargas Diretas

Linha de Transmissão C.Paulista-Adrianópolis

Largura da Faixa de Estudo	400.0
Número de Linhas na Faixa de Passagem	1
Densidade de Raios por KM*KM por Ano	10.00
Raios Gerados por Faixa de 1 kA	10000
Corrente Mínima Considerada	8
Corrente Máxima Considerada	19
Curva de Distribuição de Raios	
Corrente de 16%	45.0
Corrente de 50%	20.0

Geração de Números Randômicos

IX1 = 23 IX2 = 91 IX3 = 37

Coefficientes Utilizados

ALFA = 1.000 BETA = 1.00

Dados da Linha 1

Coordenadas dos Condutores

Fase A	- 8.08	62.00
Fase B	0.0	65.00
Fase C	8.08	62.00
P.Raio 1	- 8.25	70.00
P.Raio 2	8.25	70.00

Tensão Nominal

Suportabilidade dos Gaps

Fase A	2030.0
Fase B	2030.0
Fase C	2030.0

Impedância de Surto 383.0

Desligamentos/100 KM/Ano (linha 1) 1.15

Distribuição de ângulos de Queda

Graus Probabilidade

0.0	1.0000
5.625	0.8754
11.250	0.7532
16.875	0.6357
22.500	0.5249
28.125	0.4228
33.750	0.3309
39.375	0.2503
45.000	0.1817
50.625	0.1253
56.250	0.0809
61.875	0.0478
67.500	0.0249
73.125	0.0107
78.750	0.0032
84.375	0.0004
90.000	0.0

Impressão dos Resultados

Faixas e Probabilidades Consideradas

Faixa (kA)	Probabilidade	Raios Equivalentes
8.0 A 9.0	0.0331364	301783.1
9.0 A 10.0	0.0339529	294525.6
10.0 A 11.0	0.0341499	292826.2
11.0 A 12.0	0.0338786	295171.8
12.0 A 13.0	0.0332612	300650.1
13.0 A 14.0	0.0323957	308683.1
14.0 A 15.0	0.0313578	318900.1

Cont.

Faixa (kA)	Probabilidade	Raios Equivalentes
15.0 A 16.0	0.0302065	331054.5
16.0 A 17.0	0.0289870	344982.2
17.0 A 18.0	0.0277329	360582.4
18.0 A 19.0	0.0264701	377785.1

Incidência de Raios nos Condutores e Pára-raios
(Linha 1)

<u>Faixa</u>	<u>Fase A</u>	<u>Fase B</u>	<u>Fase C</u>	<u>P.Raio 1</u>	<u>P.Raio 2</u>
8.0 A 9.0	107	0	134	1233	1281
9.0 A 10.0	101	0	117	1379	1339
10.0 A 11.0	118	0	86	1448	1417
11.0 A 12.0	86	0	85	1503	1459
12.0 A 13.0	91	0	80	1293	1572
13.0 A 14.0	71	0	70	1631	1624
14.0 A 15.0	71	0	71	1666	1685
15.0 A 16.0	33	0	49	1760	1692
16.0 A 17.0	24	0	36	1813	1802
17.0 A 18.0	14	0	12	1851	1866
18.0 A 19.0	0	0	0	1962	1930

Incidência de Raios nos Condutores por 100 km por
Ano (Linha 1)

<u>Faixa</u>	<u>Fase A</u>	<u>Fase B</u>	<u>Fase C</u>	<u>P.Raio 1</u>	<u>P.Raio 2</u>
8.0 A 9.0	0.14182	0.0	0.17761	1.6343	1.6979
9.0 A 10.0	0.13717	0.0	0.15890	1.8728	1.8185
10.0 A 11.0	0.16119	0.0	0.11748	1.9780	1.9356
11.0 A 12.0	0.11654	0.0	0.11519	2.0368	1.9772
12.0 A 13.0	0.12107	0.0	0.10644	2.1194	2.0915
13.0 A 14.0	0.09200	0.0	0.09071	2.1135	2.1044
14.0 A 15.0	0.08906	0.0	0.08906	2.0897	2.1135
15.0 A 16.0	0.03987	0.0	0.05920	2.1265	2.0444
16.0 A 17.0	0.02783	0.0	0.04174	2.1021	2.0894
17.0 A 18.0	0.01553	0.0	0.01331	2.0533	2.0700
18.0 A 19.0	0.0	0.0	0.0	2.0774	2.0435

Probabilidade de Ocorrência de Desligamento (Linha 1)

<u>Faixa</u>	<u>Fase A</u>	<u>Fase B</u>	<u>Fase C</u>
8.0 A 9.0	0,0546316	0,0546316	0,0546316
9.0 A 10.0	0,3273349	0,3273349	0,3273349
10.0 A 11.0	0,4849852	0,4849852	0,4849852
11.0 A 12.0	0,6386453	0,6386453	0,6386453
12.0 A 13.0	0,8499966	0,8499966	0,8499966
13.0 A 14.0	1,0000000	1,0000000	1,0000000
14.0 A 15.0	1,0000000	1,0000000	1,0000000
15.0 A 16.0	1,0000000	1,0000000	1,0000000
16.0 A 17.0	1,0000000	1,0000000	1,0000000
17.0 A 18.0	1,0000000	1,0000000	1,0000000
18.0 A 19.0	1,0000000	1,0000000	1,0000000

Número de Desligamentos por 100 km por Ano (Linha 1)

Fase A	0.57245
Fase B	0.0
Fase C	0.57675
Total	1.14920

Número de Raios que Atingiram a Terra

8.0 A 9.0	7245
9.0 A 10.0	7064
10.0 A 11.0	6931
11.0 A 12.0	6867
12.0 A 13.0	6664
13.0 A 14.0	6604
14.0 A 15.0	6507
15.0 A 16.0	6466
16.0 A 17.0	6325
17.0 A 18.0	6257
18.0 A 19.0	6108

Algumas observações complementares devem ser mencionadas sobre a Utilização do Programa:

a. Largura da Faixa de Estudo

A faixa de estudo utilizada na simulação não corresponde a faixa de passagem da linha de transmissão.

É um valor utilizado para a determinação de um alvo ao nível do solo, o qual é utilizado juntamente com o ângulo de queda para a caracterização da incidência do raio. A determinação deste valor pode ser realizada em função das correntes de raio e das probabilidades associadas aos ângulos de queda.

Nos estudos de falha de blindagem, a faixa de intensidades de correntes que podem alcançar os condutores, vai de 10 a 50 kA aproximadamente, sendo as intensidades mais altas correspondentes a casos bem extremos de altura dos condutores ao solo.

A distância de atração para 10 kA é 45 m e para 50 kA é 130 m. Supondo-se um afastamento entre fases externas da ordem de 20 m, a projeção das áreas de atração apresenta uma faixa sob a linha da ordem de 280 m para a maior corrente de interesse, no caso 50 kA.

A curva de distribuição de ângulos de queda apresenta uma tendência acentuada para a ocorrência de ângulos próximos à vertical, 50% dos ângulos de incidência são inferiores a 25 graus. Portanto, para que não haja uma concentração das incidências nos cabos da linha, é necessário que a faixa de estudo seja superior aos 280 m já mencionados. Uma distribuição de probabilidades iguais para a área de atração da linha e do solo levaria ao valor de 560 m.

No entanto, para os casos normais de altura do condutor ao solo as correntes extremas com condições de provocar falha de blindagem estão situadas abaixo de 30 kA. Para estas correntes a faixa escolhida pode

ria ser inferior a 300 m, se o mesmo critério fosse adotado.

Como conclusão é recomendado que seja adotado para a faixa de estudo um valor entre 300 e 600 m.

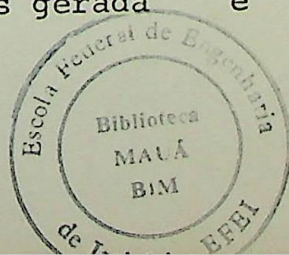
Para confirmar a validade da faixa adotada é recomendado que se faça um estudo paramétrico em torno do valor selecionado para verificar a variação do número de desligamentos.

b. Quantidade de Raios Gerados

Somente as intensidades de correntes de raios de baixo valor tem condições de causar falha de blindagem. Considerando que abaixo da corrente crítica não há possibilidade de ocorrência de desligamento e que acima de um determinado valor não há possibilidade de haver falha de blindagem, a faixa de intensidades de corrente de interesse é perfeitamente definida. Deste modo a simulação pode ser realizada apenas nesta faixa de interesse.

Para determinados valores de intensidade de corrente é simulado uma quantidade de raios pré-estabelecida. Como se trata de um processo estatístico é necessário que esta quantidade seja suficientemente grande para que o número de desligamentos possa ser obtido de maneira confiável. No entanto, o tempo de processamento aumenta acentuadamente com o aumento da quantidade de raios gerada, sendo conveniente portanto que seja realizado uma variação deste parâmetro para a sua seleção.

Resultados obtidos mostram que o número de desligamentos tende a convergir para um determinado valor, ou oscilar em torno deste valor com amplitude reduzida, a medida que a quantidade de raios gerada é aumentada.



Recomenda-se a utilização de uma quantidade de raios gerada por faixa de corrente estabelecida igual ou superior a 5000 raios.

c. Faixa de Corrente de Raio

A partir da corrente mínima com condições de provocar desligamento na linha são estabelecidas faixas de correntes até a corrente máxima capaz de provocar falha de blindagem. Em cada uma destas faixas é gerada uma determinada quantidade de raios.

O valor de 1 kA para esta faixa de correntes é considerado satisfatório.

Este procedimento foi adotado para minimizar o tempo de processamento, uma vez que somente uma região conhecida da curva de distribuição de intensidades de correntes interessa ao cálculo da taxa de desligamentos.

d. Coeficientes para o Cálculo da Distância de Atração

Podem ser utilizados dois coeficientes para o cálculo das distâncias de atração. O primeiro se aplica à distância de atração relativa à influência do solo e o segundo, para todas as distâncias de atração (cabos e solo).

A finalidade do primeiro é possibilitar uma penalização para a influência do terreno, através de uma redução desta influência. O número de desligamentos é bastante sensível a este coeficiente.

O segundo coeficiente pode ser utilizado quando se deseja reduzir as distâncias de atração calculadas, adotando-se, portanto, um valor conservativo para este parâmetro.

Medições de resistências de pé-de-torre foram efetuadas no período de abril a junho de 1977, não sendo encontradas anormalidades nos sistemas de contrapesos das estruturas. Estas medições apresentaram um valor máximo de resistência de pé-de-torre igual a 34 ohms, valor mínimo de 1 ohm e valor médio 9,4 ohms. Podemos considerar que a distribuição de resistências de pé-de-torre encontrada é bastante satisfatória, uma vez que um valor médio igual ou inferior a 20 ohms, foi o recomendado para manter o índice de desligamentos inferior a 1/100 km/ano.

Considerando que foram trocadas cadeias das fases externas em sua grande maioria, que alguns trechos da linha apresentam grandes distâncias dos condutores ao solo, que as medições de resistência de pé-de-torre apresentaram valores satisfatórios e que o desempenho da linha estava bem inferior ao esperado, resolveu-se investigar com detalhes o comportamento da blindagem da linha, com o objetivo de verificar se o excessivo número de desligamentos era proveniente de falhas de blindagem.

Foi realizada uma pesquisa nos desenhos de planta e perfil, e um sobrevôo ao longo da linha, resultando na distribuição de alturas do condutor ao solo, indicadas na tabela 3.2.3-1. Foram consideradas duas categorias de relevo da linha de transmissão em função do perfil transversal, isto é, trechos mais favoráveis ou não à incidência de descargas diretas nos condutores, conforme a existência ou não de condições naturais para blindagem dos condutores.

Altura do Conductor (m)	Trecho I (%)	Trecho II (%)	Total (%)
105	-	0,071	0,071
90	0,045	0,071	0,116
80	0,523	0,163	0,686
70	0,671	1,107	1,778
60	1,994	1,624	3,618
55	2,246	1,547	3,793
50	7,213	3,631	10,844
35	20,198	9,416	29,614
20	36,649	12,831	49,480
Total	69,539	30,461	100,00

Tabela 3.2.3-1 - Distribuição de Alturas do Conductor ao Solo

Na tabela acima o trecho II corresponde a região mais favorável para a ocorrência de descargas nos condutores, e o trecho I às regiões onde não são propícias as condições para descargas diretas.

Os cálculos para determinação dos índices de desligamentos por incidência de raios nos condutores, foram realizados utilizando-se o programa digital descrito no item 3.2.2, considerando-se os seguintes dados básicos:

- largura da faixa de estudo 400 m
- densidade de raios por km² 10
- curva de distribuição de intensidades de correntes
 - I 50% = 20 kA
 - I 16% = 45 kA
- suportabilidade de isolamento
 - c/26 isoladores 2030 kV
 - c/27 isoladores 2100 kV
 - c/28 isoladores 2180 kV
 - c/29 isoladores 2260 kV
 - c/30 isoladores 2340 kV
- impedância de surto do condutor 383 ohms

Para as coordenadas dos condutores e pára-raios, foram adotados os seguintes critérios:

- distâncias verticais - foram calculadas as taxas de desligamentos para as distâncias verticais indicadas na tabela 3.2.3-1, adotando-se para a fase central e cabos pára-raios valores compatíveis com a geometria das torres e a relação entre as flechas dos condutores e pára-raios.
- distâncias horizontais - foram adotados inicialmente os valores referentes a torre B5, em seguida foi modificada a posição do cabo pára-raios para fornecer um ângulo de blindagem de $\sim 7^\circ$, e finalmente o pára-raios foi mantido em sua posição original com a cadeia da fase lateral modificada para V-100 ϕ para fornecer um ângulo de blindagem de $\sim 0^\circ$. Nas figuras 3.2.3-1 a

3.2.3-4 estão indicadas as modificações sugeridas nas torres A51, A52 e B5.

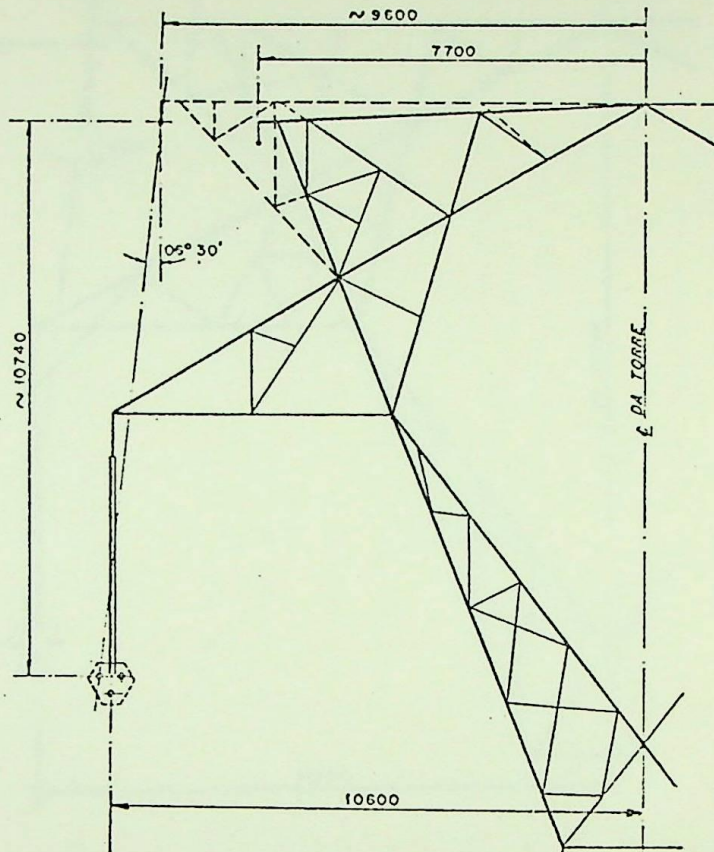


Figura 3.2.3-1 - Torres A51 e A52 Modificadas para $\alpha = 70^\circ$

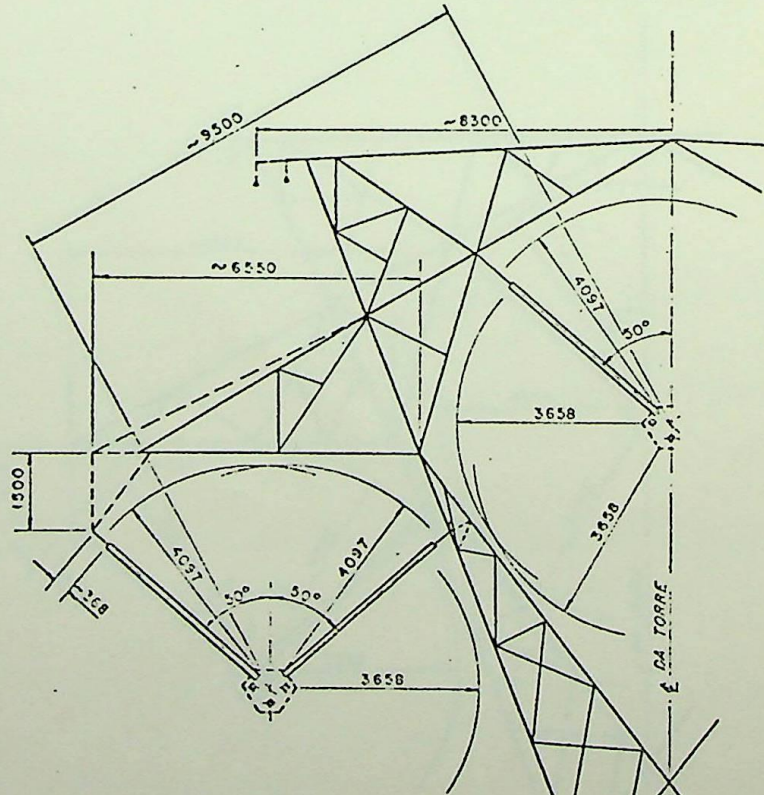


Figura 3.2.3-2 - Torres A51 e A52 Modificadas para $\alpha = 0^\circ$

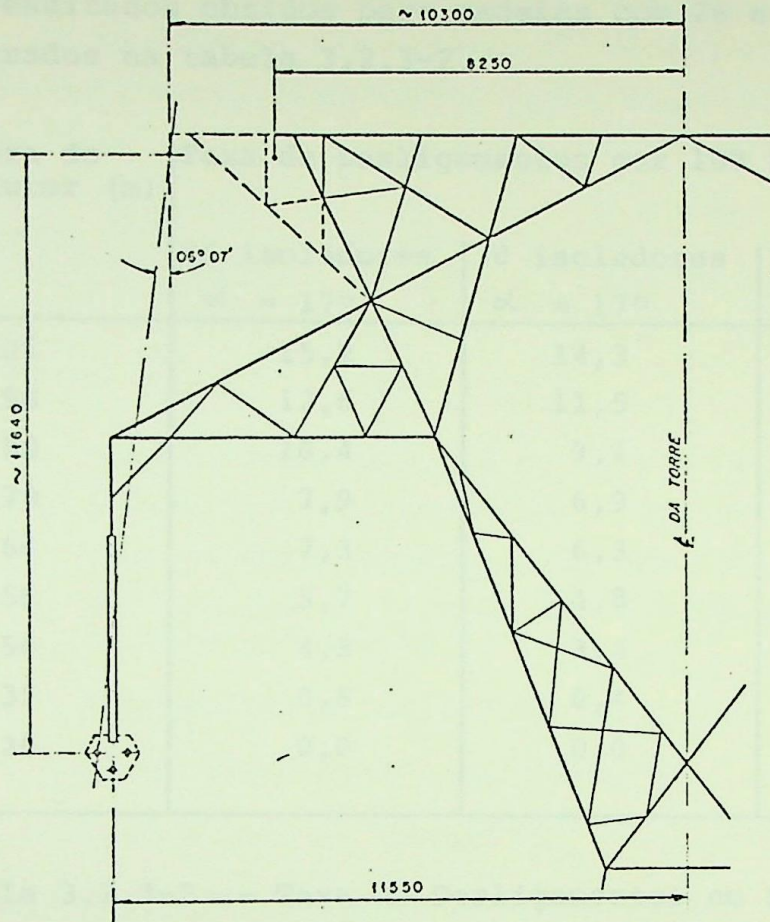


Figura 3.2.3-3 - Torre B5 Modificada para $\alpha = 70^\circ$

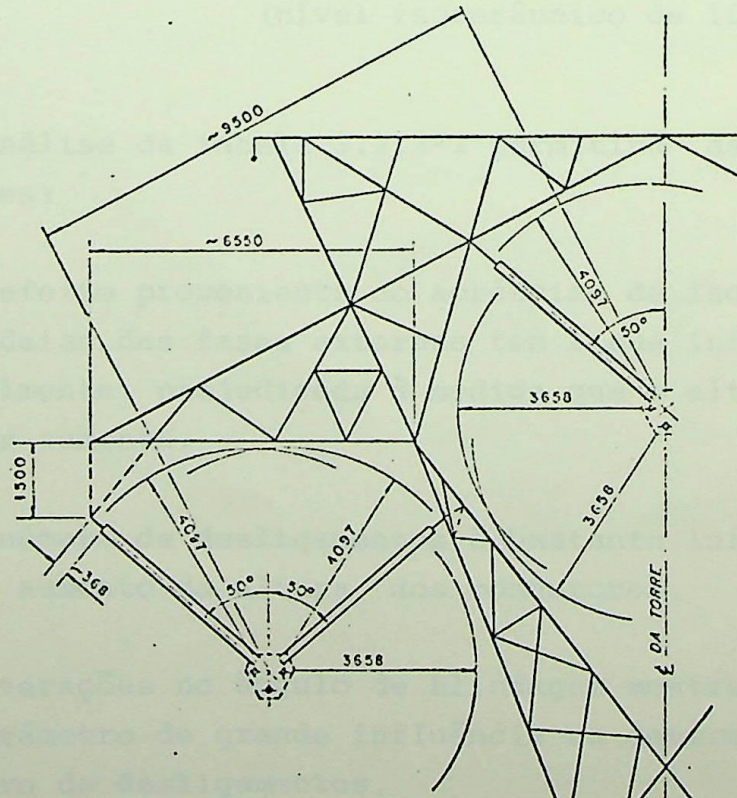


Figura 3.2.3-4 - Torre B5 Modificada para $\alpha = 0^\circ$

Os resultados obtidos para cadeias com 26 e 30 isoladores são mostrados na tabela 3.2.3-2.

Altura do Conductor (m)	Taxa de Desligamentos por 100 km/Ano			
	26 isoladores	30 isoladores	26 isoladores	
	$\alpha = 17^\circ$	$\alpha = 17^\circ$	$\alpha = 7^\circ$	$\alpha = 0^\circ$
105	15,2	14,3	10,0	7,1
90	12,6	11,5	8,0	5,5
80	10,4	9,4	6,2	4,2
70	7,9	6,9	4,4	2,9
60	7,3	6,3	2,7	1,1
55	5,7	4,8	1,9	0,7
50	4,3	3,4	1,2	0,3
35	0,8	0,4	0,05	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 3.2.3-2 - Taxa de Desligamentos em Função da Altura do Conductor para uma Densidade de Raios Igual a $10/\text{km}^2$ (nível isocerânico de 100)

Uma análise da tabela 3.2.3-2 permitirá as seguintes conclusões:

- o efeito proveniente do acréscimo de isoladores nas cadeias das fases externas tem a sua influência sensivelmente prejudicada à medida que a altura do condutor aumenta.
- o número de desligamentos é bastante influenciado pelo aumento da altura dos condutores.
- alterações no ângulo de blindagem mostraram ser este parâmetro de grande influência na determinação do número de desligamentos.

As taxas de desligamentos foram corrigidas em função dos percentuais de ocorrência das alturas do condutor e do nível isocerânico de cada trecho, de acordo com a seguinte expressão geral:

$$TD = \left(I_I \sum_{i=20}^{i=105} TD_i PI_i + I_{II} \sum_{i=20}^{i=105} TD_i PII_i \right) \frac{1}{I_0 \times 100}$$

onde:

- TD - taxa de desligamentos da LT por 100 km/Ano
 i - índice correspondente a altura do condutor
 TD_i - taxa de desligamentos para uma determinada altura
 PI_i - percentagem da LT para uma determinada altura do condutor no trecho I.
 PII_i - idem acima, no trecho II
 I_I - nível isocerânico do trecho I
 I_{II} - idem acima, do trecho II
 I₀ - nível isocerânico de referência

Para várias hipóteses consideradas, as taxas de desligamentos para toda a linha são apresentadas na tabela 3.2.3-3.

Alternativa	Número de Desligamentos/100 km/Ano	
	I _I = I _{II} = 60	I _I = 60, I _{II} = 90
LT sem alterações	0,85	1,02
LT com 30 isoladores no trecho II	0,78	0,92
LT c/α = 7° no trecho II	0,63	0,69
LT c/α = 0° no trecho II	0,57	0,59
LT c/α = 7°	0,27	0,33

Tabela 3.2.3-3 - Taxas de Desligamentos da LT para Várias Alternativas.

Os valores da tabela 3.2.3-3 foram recalculados considerando-se as impedâncias de surto específicas para cada altura do condutor. Os resultados obtidos foram levemente superiores como pode ser verificado na tabela 3.2.3-4.

Alternativa	Número de Saídas/100 km/Ano	
	$I_I = I_{II} = 60$	$I_I = 60, I_{II} = 90$
LT sem alterações	0,88	1,05
LT $c/\alpha = 7^\circ$ no trecho II	0,65	0,71
LT $c/\alpha = 0^\circ$ no trecho II	0,59	0,62
LT $c/\alpha = 7^\circ$	0,29	0,35

Tabela 3.2.3-4 - Taxas de Desligamentos da LT para Várias Alternativas, com Impedâncias de Surto Recalculadas em Função da Altura do Condutor

Para efeito de análise das alternativas estudadas, adotou-se a tabela 3.2.3-3, uma vez que a tabela 3.2.3-4 apresentou a mesma variação percentual entre alternativas.

As principais considerações a respeito das alternativas examinadas são as seguintes:

- a. Utilização de cadeias com 30 isoladores no trecho II.

Nas duas hipóteses consideradas para o nível isoce-râunico, esta alternativa resultou em uma melhora na taxa de desligamentos de 8% ($I_I = I_{II} = 60$) e 10% ($I_I = 60, I_{II} = 90$).

Tendo em vista a natureza dos elementos envolvidos no mecanismo de descargas atmosféricas, as reduções nas taxas de desligamentos para esta alternativa são muito pequenas para justificar a sua adoção.

- b. Modificação do ângulo de blindagem para 7° no trecho II.

Este ângulo de blindagem seria obtido, alterando-se o topo da torre de modo a deslocar o ponto de fixação do cabo pára-raios para fora, conforme mostrada nas figuras 3.2.3-1 e 3.2.3-3. Esta alteração poderia ser realizada sem grandes modificações no resto da estrutura, reduzindo-se o esforço longitudinal no pára-raios, de modo a manter constante o momento torçor aplicado na estrutura.

Esta alternativa, nas duas hipóteses consideradas, resultou em uma melhora na taxa de desligamentos de 26% ($I_I = I_{II} = 60$) e 32% ($I_I = 60, I_{II} = 90$).

A redução obtida é apreciável, porém a alteração no topo da estrutura só poderá ser executada com a LT energizada se forem utilizados métodos especiais de montagem.

- c. Modificações na cadeia de isoladores para obtenção de um ângulo de blindagem igual a 0° .

Seria possível a obtenção de um ângulo de blindagem de 0° caso fossem utilizadas nas fases laterais cadeias em V- 100° , como mostrado nas figuras 3.2.3-2 e 3.2.3-4.

No caso das estruturas A51 e A52, seria necessário alterar o projeto da mísula e do ponto de fixação do cabo pára-raios. Na torre B5 seria necessário apenas alterar o projeto do pêndulo. Em ambos os casos seriam necessárias pequenas alterações no delta da torre.

A melhoria da taxa de desligamentos foi de 33% ($I_I = I_{II} = 60$) e 42% ($I_I = 60, I_{II} = 90$).

As alterações propostas só poderão ser executadas com a LT em operação se forem utilizados métodos especiais de montagem, sendo mais complexa ainda do que a alternativa anterior ($\alpha = 7^\circ$) e acarretando um a crêscimo de 50% no número de isoladores utilizados.

- d. Modificação do ângulo de blindagem para 7° em toda a extensão da LT.

Esta alternativa corresponderia a modificação o topo de todas as estruturas da LT e resultaria em uma melhoria de 68% na taxa de desligamentos.

- e. Instalação do segundo circuito na mesma faixa de passagem.

A construção de uma segunda linha já projetada, na mesma faixa de passagem, reduzirá consideravelmente a quantidade de desligamentos em cada uma das linhas, devido a blindagem de uma sobre a outra.

A modificação do ângulo de blindagem desta segunda linha reduziria de forma apreciável a quantidade de desligamentos nesta linha, melhorando ainda mais o desempenho dos dois circuitos.

Com base nos resultados obtidos e nas considerações efetuadas, foram estabelecidas as seguintes recomendações e observações gerais:

- o índice de desligamentos calculado é bem inferior ao número real de desligamentos da LT, para a premissa adotada que a taxa de desligamentos por queda indireta não deve ser elevada.
- é possível que os anos 74, 75 e 76 não sejam representativos do comportamento futuro da LT e que parte das saídas atribuídas a descargas atmosféricas sejam devidas a outros problemas ,

principalmente se for considerado que este período corresponde ao estágio inicial de operação da LT. Deve ser investigada a possibilidade de poluição industrial nos isoladores, nas proximidades de Volta Redonda e Barra Mansa.

- a execução das alternativas analisadas para melhorar o desempenho da LT exigiriam investimentos consideráveis e desenvolvimento de técnicas de montagem pouco usuais.
- a quantidade de isoladores da LT existente não deve ser modificada por ser muito pouca a melhoria que seria conseguida na taxa de desligamentos.
- a segunda linha na mesma faixa de passagem deve ser construída com um ângulo de blindagem igual a 70° , não se executando modificações na LT existente.
- o período de observações (3 anos) ainda é pouco significativo em termos estatísticos para a caracterização de um desempenho totalmente insatisfatório.

4. DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA INCIDÊNCIA DE RAIOS NOS PÁRA-RAIOS E NAS TORRES

A incidência de uma descarga atmosférica nos pára-raios ou nas torres de uma linha de transmissão, pode ocasionar o seu desligamento, devido ao crescimento da tensão no ponto de incidência da descarga, sendo este processo normalmente denominado de "backflashover".

Os efeitos provenientes da incidência de raios nos pára-raios e nas torres, são praticamente impossíveis de serem eliminados, porque dependem principalmente das características das correntes de descarga, mas um projeto otimizado do aterramento

das estruturas e um ajuste adequado dos elementos de projeto da cabeça de torre, pode minimizar o número de desligamentos devido a estas incidências de raios.

O crescimento da tensão no ponto de incidência do raio é função da intensidade máxima e taxa de crescimento da corrente de descarga, do comportamento transitório da torre e do seu sistema de aterramento quando submetidos a corrente do raio, do próprio ponto de incidência da descarga e das características do canal de descarga.

A tensão que solicita o isolamento da linha depende da tensão da torre, no ponto de fixação das cadeias de isoladores, da tensão instantânea de cada fase e da tensão induzida em cada fase pela tensão nos cabos pára-raios, que é igual a tensão de topo-de-torre.

Portanto, a correta determinação do desempenho da linha, para queda de raios nos cabos pára-raios ou nas torres, depende do conhecimento das características das descargas atmosféricas e da resposta da linha quando da incidência de um raio sobre a mesma.

A determinação da tensão da torre no ponto de fixação das cadeias de isoladores pode ser obtida através de uma simulação em modelos em escala reduzida, em analisadores de transitórios em redes ou em programas digitais de transitórios.

Devido a natureza estatística da maioria dos elementos envolvidos, o processo mais adequado para a avaliação do número de desligamentos, provenientes da incidência de raios nos pára-raios e nas torres, seria uma simulação utilizando o método de Monte Carlo e o modelo eletrogeométrico.

Uma metodologia para avaliação da taxa de desligamentos devido a incidência de raios nos pára-raios e nas torres, será apresentada nesta parte do trabalho, com as principais fases discutidas e indicação de parâmetros e modelos adequados para este tipo de simulação.

4.1. Incidência de Raios nas Torres de uma Linha de Transmissão

Quando ocorre a incidência de uma descarga atmosférica numa das torres de uma linha de transmissão, é estabelecido um processo de propagação de ondas nos cabos pára-raios e nas torres, e respectivos sistemas de aterramento, o qual deve ser analisado para o estabelecimento da solicitação ao isolamento da linha.

Para a onda de corrente incidente existe uma onda de tensão associada, a qual pode ser calculada pelo produto da corrente do raio pelo valor da impedância de surto equivalente vista do ponto de incidência. No caso de incidência na própria torre, a impedância de surto equivalente é o paralelo entre as impedâncias de surto dos cabos pára-raios e a impedância de surto da torre. Esta onda de tensão se propaga em direção a base da torre e em direção às torres vizinhas havendo reflexões nos pontos de descontinuidade. A sua amplitude sofre atenuação e a frente de onda é distorcida, durante a propagação nos cabos e nas torres.

Devido a relação entre as alturas das torres e os comprimentos dos vãos, o que provoca uma quantidade muito maior de reflexões dentro da própria torre durante o período necessário para uma onda ir de uma para outra torre, e para os valores de impedâncias de surto dos elementos envolvidos, a influência da taxa de crescimento da corrente de descarga é bastante acentuada na determinação da tensão nos pontos de fixação das cadeias de isoladores.

A modelagem da linha de transmissão, para o cálculo das tensões nos pontos de interesse para a determinação das solicitações ao isolamento da linha, requer a representação de uma determinada quantidade de vãos e torres, sendo esta quantidade definida em função do tempo de crista da corrente de descarga e do comprimento dos vãos.

Por exemplo, para um tempo de crista de $1 \mu\text{s}$ e vãos de 300 m, as reflexões nas torres adjacentes retornariam no ponto de incidência em $2 \mu\text{s}$, tempo para o qual o valor máximo da tensão já teria sido estabelecido. Como o seu efeito é sentido so

mente após a ocorrência do valor máximo, não é necessário representar mais torres do que as torres adjacentes. Do mesmo modo, para um tempo de crista de $5\mu s$, haveria a necessidade de se considerar as 3 torres adjacentes.

Portanto, existe um compromisso entre a modelagem realizada e o tempo de crista da onda de corrente do raio, o qual precisa ser respeitado para a correta determinação da tensão de topo-de-torre, quando da incidência de uma descarga atmosférica em uma das torres de uma linha de transmissão.

No modelo utilizado para o cálculo da tensão de topo-de-torre, os vãos são considerados com comprimentos iguais entre si, e com valor igual ao comprimento do vão básico de projeto da linha de transmissão. Do mesmo modo, as impedâncias referentes aos sistemas de aterramento das estruturas são consideradas iguais em todas as torres representadas.

A consideração de diferentes comprimentos de vãos, e impedâncias de aterramento, representaria de forma mais real a linha de transmissão. No entanto esta representação não é utilizada porque implicaria na consideração de praticamente toda a linha de transmissão, onerando de forma substancial o processo computacional para avaliar o seu comportamento a descargas atmosféricas.

Além deste fato, é de se esperar que a resistividade do solo não sofra variações acentuadas no trecho correspondente as torres que estão sendo representadas, levando a projetos de sistemas de aterramento praticamente idênticos e conseqüentemente, com a mesma resposta transitória. Um outro ponto importante é que, para incidência nas torres, o efeito principal é decorrente do sistema de aterramento da torre alcançada pelo raio.

Com relação ao comprimento dos vãos, o mesmo raciocínio pode ser aplicado em relação ao perfil da linha, considerando-se que para uma determinada classe de perfil o comprimento dos vãos é aproximadamente uniforme.

A ocorrência de vãos com comprimentos elevados, como é

o caso de travessias de rios ou de vales extensos, deve ser considerada de maneira especial no projeto da linha de transmissão, principalmente sob o ponto de vista de incidência de raios nos cabos condutores. Este procedimento deve ser adotado porque em regiões planas há necessidade de se utilizarem torres mais altas, o que acarreta um tempo maior de trânsito das ondas nestas torres e nos vãos com comprimentos elevados, fazendo com que a influência do sistema de aterramento e das torres adjacentes seja minimizada. Em regiões de perfil montanhoso as torres não são necessariamente mais altas, sendo reduzida apenas a influência das torres adjacentes. No entanto, maiores dificuldades são encontradas para obter um bom aterramento das estruturas, principalmente em terrenos rochosos.

Justifica-se assim, a utilização de vãos de comprimentos iguais, e impedâncias dos sistemas de aterramento com valores - também iguais, para a representação de uma linha de transmissão quando submetida a descargas atmosféricas. No caso de vãos excepcionais, uma verificação mais cuidadosa deve ser efetuada.

A resposta transitória do sistema de aterramento das estruturas é de fundamental importância na redução do acréscimo da tensão de topo-de-torre.

O sistema de aterramento deve ser projetado de modo a fornecer uma resposta transitória conveniente para a faixa de tempos de crista das correntes dos raios que estão tendo maior influência no comportamento da linha. Isto pode ser verificado se o programa digital desenvolvido fornece as intensidades de corrente e tempos de crista dos raios que provocaram desligamentos durante a simulação.

De um modo geral, o sistema de aterramento deve ter uma resposta transitória adequada para os menores tempos de crista, uma vez que os raios com estes tempos de crista, e altas intensidades de corrente, são os que provocam a maioria dos desligamentos.

A utilização de uma grande quantidade de cabos, com comprimentos menores, é, portanto, mais conveniente para evitar o

crescimento da tensão de topo-de-torre, devido a melhor resposta transitória que fornecem.

Durante o estudo do comportamento das linhas de transmissão do sistema 800 kV de Itaipu (15), foi verificado que a impedância transitória do sistema de aterramento poderia ser substituída por uma impedância equivalente para a determinação da tensão de topo-de-torre. Este valor equivalente corresponde ao valor médio da impedância transitória, para um intervalo de tempo igual ao tempo de crista da corrente do raio.

Considerando-se o modelo indicado na figura 2.6-2 do item 2.6 deste trabalho, com comprimentos de vãos iguais ao comprimento do vão básico de projeto da linha, e impedâncias de surto dos cabos pára-raios e das torres, calculadas para as características elétricas dos cabos e altura de torre mais utilizada no perfil, respectivamente, a tensão de topo-de-torre pode ser calculada. Esta tensão de topo-de-torre é função somente da intensidade e tempo de crista da corrente do raio e da impedância equivalente do sistema de aterramento.

Como existe uma proporcionalidade direta entre a intensidade de corrente e a tensão de topo-de-torre, pode-se considerar a relação entre tensão e corrente para definir o crescimento da tensão no topo da torre. Para uma determinada impedância equivalente do sistema de aterramento e para um determinado tempo de crista esta relação é única. Conhecida esta relação a tensão no topo da torre é função somente da intensidade de corrente do raio.

Para as linhas de transmissão de 800 kV do sistema de Itaipu, considerando-se torres de 38 m de altura, vão básico de 450 m e distribuição de impedância de aterramento com valor mínimo, médio e máximo de 2, 15 e 40 ohms, respectivamente, a relação entre a tensão no topo da torre e a corrente do raio, em função do tempo de crista e da impedância de aterramento, é indicada na figura 4.1-1 (15).

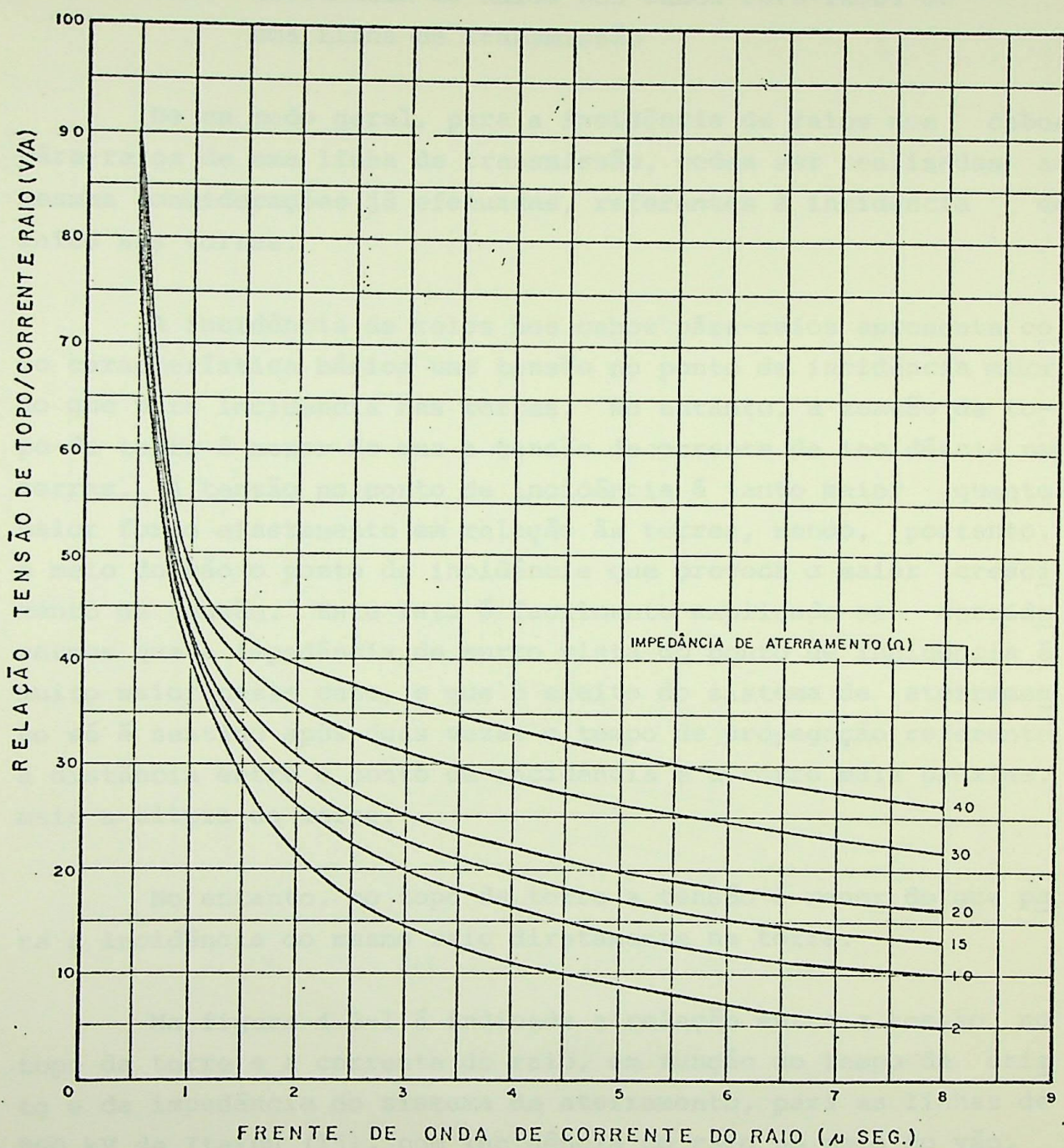


Figura 4.1-1 - Relação V/A em Função do Tempo de
Crista e da Impedância de Aterra
mento, Incidência na Torre.

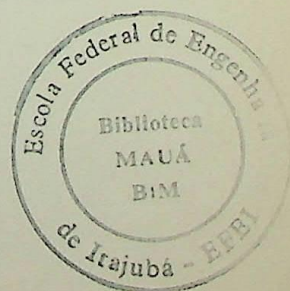
4.2. Incidência de Raios nos Cabos Pára-raios de uma Linha de Transmissão

De um modo geral, para a incidência de raios nos cabos pára-raios de uma linha de transmissão, podem ser realizadas as mesmas considerações já efetuadas, referentes à incidência de raios nas torres.

A incidência de raios nos cabos pára-raios apresenta como característica básica uma tensão no ponto de incidência maior do que para incidência nas torres. No entanto, a tensão de topo-de-torre é menor do que a tensão decorrente de incidência nas torres. A tensão no ponto de incidência é tanto maior quanto maior for o afastamento em relação às torres, sendo, portanto, o meio do vão o ponto de incidência que provoca o maior crescimento de tensão. Este fato é facilmente explicado se considerarmos que a impedância de surto vista do ponto de incidência é muito maior neste caso, e que o efeito do sistema de aterramento só é sentido após duas vezes o tempo de propagação referente a distância entre o ponto de incidência e a torre mais próxima, mais a altura da torre.

No entanto, no topo da torre a tensão é menor do que para a incidência do mesmo raio diretamente na torre.

Na figura 4.2-1 é indicada a relação entre a tensão no topo da torre e a corrente do raio, em função do tempo de crista e da impedância do sistema de aterramento, para as linhas de 800 kV de Itaipu (15), com incidência do raio no meio do vão.



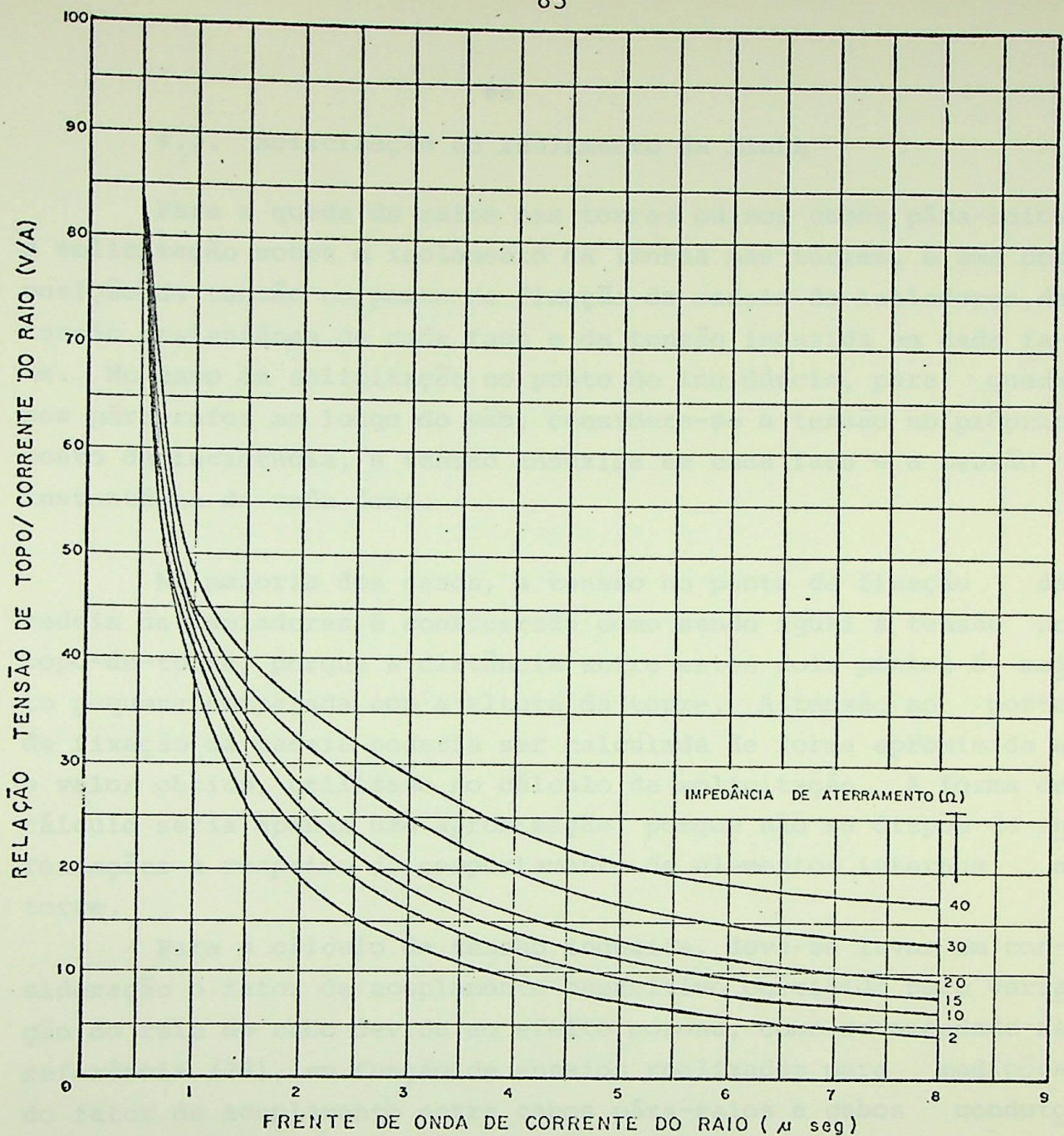


Figura 4.2-1 - Relação V/A em Função do Tempo de Crista e da Impedância de Aterramento, Incidência no Meio do Vão

A ruptura do isolamento, no caso de incidência de raios nos cabos pára-raios, pode ser ao longo da cadeia de isoladores, ou entre cabo condutor e cabo pára-raios no ponto de incidência.

Normalmente os cabos pára-raios estão suficientemente a fastados para prevenir a ocorrência de desligamentos devido a ruptura do isolamento entre cabos ao longo do vão.

4.3. Solicitação ao Isolamento da Linha

Para a queda de raios nas torres ou nos cabos pára-raios, a solicitação sobre o isolamento da linhas nas torres, é uma com posição da tensão no ponto de fixação da cadeia de isoladores, da tensão instantânea de cada fase e da tensão induzida em cada fase. No caso da solicitação no ponto de incidência, para queda nos pára-raios ao longo do vão, considera-se a tensão no próprio ponto de incidência, a tensão induzida em cada fase e a tensão instantânea de cada fase.

Na maioria dos casos, a tensão no ponto de fixação da cadeia de isoladores é considerada como sendo igual a tensão no topo-de-torre, porque a distância entre estes dois pontos é mui to pequena comparada com a altura da torre. A tensão no ponto de fixação da cadeia poderia ser calculada de forma aproximada e o valor obtido, utilizado no cálculo da solicitação. A forma de cálculo seria apenas uma aproximação, porque não se dispõe de in formações a respeito do comportamento de elementos internos a torre.

Para o cálculo da tensão induzida, deve-se levar em con sideração o fator de acoplamento capacitivo corrigido pela varia ção do raio do cabo devido ao efeito corona, como recomendado na referência (26), em função de ensaios realizados para mediç ões do fator de acoplamento entre cabos pára-raios e cabos conduto res.

O fator de acoplamento capacitivo entre um cabo pára-raios e um cabo condutor é calculado por

$$C = \frac{\log \frac{b}{a}}{\log \frac{2H}{r}}$$

onde a, b, r e H como indicados na figura 4.3-1.

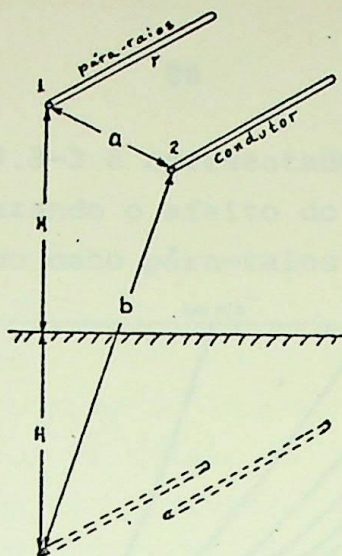


Figura 4.3-1 - Configuração Utilizada para o Cálculo do Fator de Acoplamento com 1 Cabo Pára-raios

No caso de dois cabos pára-raios, o fator de acoplamento é calculado por:

$$C = \frac{\log \frac{\sqrt{b_1 b_2}}{\sqrt{a_1 a_2}}}{\log \frac{2H}{\sqrt{ar}}}$$

onde a , a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , H e r como indicados na figura 4.3-2.

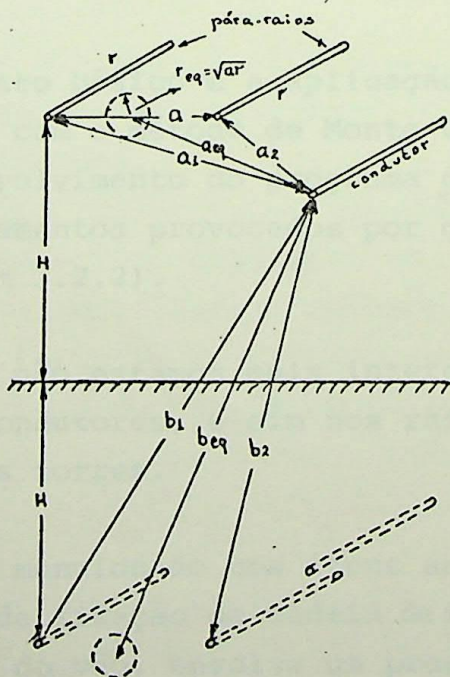


Figura 4.3-2 - Configuração Utilizada para o Cálculo do fator de Acoplamento com 2 Cabos Pára-raios

Na figura 4.3-3 é apresentado o raio equivalente do cabo pára-raios, considerando o efeito do corona, em função da tensão efetiva de corona no cabo pára-raios (27).

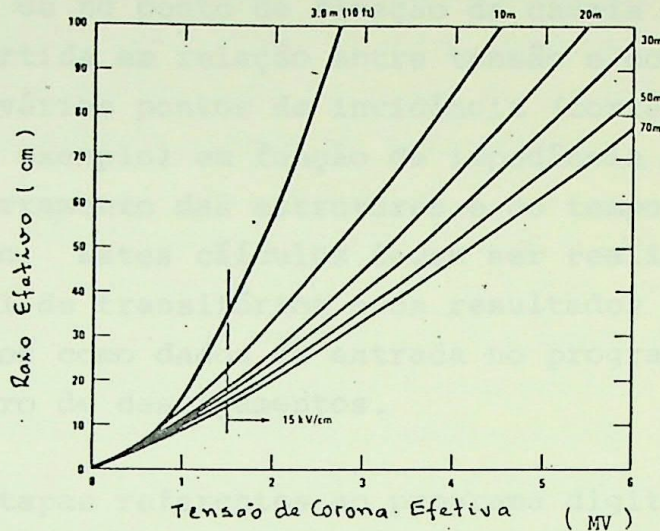


Figura 4.3-3 - Raio Equivalente do Cabo Pára-raios, Considerando Corona

4.4. Metodologia sugerida para avaliação do número de Desligamentos Devido à Incidência de Raios nas Torres e nos Cabos Pára-raios

O procedimento básico é a aplicação do modelo eletrogeométrico em conjunto com o método de Monte Carlo, tal como considerado para o desenvolvimento do programa digital para o cálculo do número de desligamentos provocados por queda direta de raios nos condutores (item 3.2.2).

No entanto, não estamos mais interessados nos raios que incidem nos cabos condutores, e sim nos raios que incidem nos cabos pára-raios e nas torres.

Como já foi mencionado nos itens anteriores, o cálculo da tensão no ponto de fixação da cadeia de isoladores, ou no cabo pára-raios ao longo do vão, envolve um processo de propagação de ondas relativamente complexo, o qual deve ser realizado por um programa digital de transitórios, fora da simulação para a determinação da quantidade de desligamentos propriamente dita, para que a amostra estatística desta simulação possa ser ampliada de

modo a obter um índice confiável em termos estatísticos.

Esta informação referente a tensão no ponto de incidência do raio, ou no ponto de fixação da cadeia de isoladores, pode ser convertida em relação entre tensão e corrente, sendo calculada para vários pontos de incidência (torre, 1/4 vão e meio do vão, por exemplo) em função da impedância equivalente do sistema de aterramento das estruturas e do tempo de crista da corrente do raio. Estes cálculos devem ser realizados com um programa digital de transitórios e os resultados tabelados, para serem utilizados como dados de entrada no programa digital de cálculo do número de desligamentos.

As etapas referentes ao programa digital para cálculo da taxa de desligamentos por incidência de raios nas torres ou nos cabos pára-raios, podem ser resumidas como a seguir:

- determina-se aleatoriamente, a partir de distribuições estatísticas conhecidas, um ponto ao longo de uma faixa transversal de estudo, uma intensidade de corrente e um ângulo de incidência do raio.
- com esses valores, verifica-se com a construção analítica do modelo eletrogeométrico se os cabos pára-raios foram atingidos.
- em caso positivo, determina-se, aleatoriamente de distribuições estatísticas conhecidas, a taxa de crescimento da corrente de raio, o ponto de incidência do raio ao longo do vão, a impedância de aterramento equivalente e o ângulo da tensão instantânea de operação.
- com a intensidade de corrente e a taxa de crescimento, obtém-se o tempo de crista, o qual juntamente com a intensidade de corrente, impedância de aterramento equivalente e ponto de incidência do raio ao longo do vão, é utilizado para a obtenção da tensão no ponto de incidência do raio (ou da fixação da cadeia de iso

ladores) através de tabelas da relação V/A.

- para a tensão obtida, a tensão induzida é calculada considerando-se o fator de acoplamento capacitivo corrigido pelo efeito corona, podendo então ser calculada a solicitação no ponto de incidência e no ponto de fixação da cadeia de isoladores.
- a solicitação é comparada com o isolamento entre cabos se a incidência foi ao longo do vão. Caso exceda este valor, é anotado um desligamento ao longo do vão e, em caso contrário, é comparada a solicitação com o isolamento na torre, sendo anotado um desligamento na torre se for o caso. Se a incidência é na torre é realizada a comparação com o isolamento na torre.
- o processo é repetido uma grande quantidade de vezes, e a quantidade de desligamentos anotados é ponderada em função da quantidade de raios que incidem sobre a linha de transmissão e da quantidade de raios gerados, resultando nas taxas de desligamentos na torre e ao longo do vão, por 100 km de linha por ano.

5. CONCLUSÕES

Uma análise geral dos elementos envolvidos no mecanismo de incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, foi realizada durante o desenvolvimento deste trabalho, objetivando-se a obtenção de subsídios para a avaliação da taxa de desligamentos.

Esta análise foi baseada em informações atuais existentes na literatura sobre o assunto, envolvendo considerações a respeito dos seguintes elementos:

- nível isocerânico
- densidade de raios para a terra
- intensidade, polaridade e taxa de crescimento da corrente do raio.

- ângulo de incidência do raio
- distribuição de raios ao longo do vão
- modelo eletrogeométrico
- suportabilidade dos isolamentos de uma linha de transmissão a surtos atmosféricos.
- impedância do sistema de aterramento das estruturas
- impedância de surto das torres
- tensão de topo-de-torre
- método de Monte Carlo

Foram considerados três mecanismos básicos relacionados com a ocorrência de desligamentos em linhas de transmissão EHV ou UHV.

- incidência de raios nos cabos condutores, denominada de falha de blindagem ("shielding failure").
- incidência de raios nos cabos pára-raios e nas torres ("backflashover").
- incidência de raios nas proximidades da linha de transmissão.

Este último mecanismo é considerado desprezível para os níveis de tensão de EHV ou UHV.

A incidência de raios nos cabos condutores e nas torres provoca solicitações ao isolamento da linha nas próprias torres, enquanto que a incidência de raios ao longo dos vãos provoca solicitações ao isolamento entre cabos pára-raios e condutores, e ao isolamento da torre. Em linhas de elevado nível de tensão, a ocorrência de ruptura do isolamento entre cabos é de baixa probabilidade de ocorrência devido ao grande afastamento existente entre pára-raios e condutores ao longo dos vãos.

O mecanismo de falha de blindagem pode ser teoricamente evitado se o posicionamento dos cabos pára-raios é realizado de modo conveniente. Este procedimento é referenciado como blindagem efetiva, sendo necessário um conhecimento detalhado do perfil da linha de transmissão para a sua correta aplicação na de

terminação dos ângulos de blindagem.

Foi demonstrada que a influência do perfil é de fundamental importância para a determinação do ângulo de blindagem, havendo casos para os quais esta proteção efetiva dos cabos condutores não pode ser realizada. Estes casos correspondem a regiões de perfil montanhoso, devendo então ser avaliada a influência destes trechos no comportamento da linha de transmissão.

Casos especiais, onde as alturas das torres e os comprimentos dos vãos são bastante elevados, requerem um exame à parte, devendo ser considerada a possibilidade de adoção de uma quantidade maior de cabos pára-raios para a sua blindagem.

Uma opção para a blindagem efetiva é o posicionamento dos cabos pára-raios para uma determinada taxa de desligamentos, estabelecida nos critérios de projeto da linha de transmissão. Este procedimento é reconhecido como blindagem parcial de linhas de transmissão.

Um programa digital para o cálculo da taxa de desligamentos por incidência nos cabos condutores foi desenvolvido, baseado no modelo eletrogeométrico e no método de Monte Carlo.

O desenvolvimento deste programa digital foi apresentado, bem como um caso de aplicação prática a uma linha de transmissão de 500 kV, para a qual o comportamento real não estava correspondendo ao previsto.

Uma análise detalhada do perfil foi realizada, sendo efetuado um levantamento das alturas dos cabos ao solo e calculadas as taxas de desligamentos correspondentes. A taxa de desligamentos para a linha foi calculada ponderando-se as taxas de desligamentos de cada trecho em relação ao percentual de ocorrência para toda a linha.

Os resultados obtidos revelaram-se superiores aos previstos, mas inferiores ao desempenho real da linha. Como a linha operou inicialmente em 345 kV, e o período de observações é rela

tivamente pequeno, acredita-se que tenham sido atribuídos a des cargas atmosféricas alguns desligamentos provocados por outras causas, indevidamente. Esta suposição foi reforçada pelo desempenho da linha no período correspondente ao primeiro trimestre de 1978.

Várias alternativas foram sugeridas para melhorar o de desempenho da linha de 500 kV, sendo recomendado, no entanto, manter a linha existente sem modificações e alterar o ângulo de blindagem da segunda linha já projetada para a mesma faixa de passagem.

Uma metodologia voltada para o desenvolvimento de um programa digital para calcular a taxa de desligamentos devido a incidência de raios nos cabos pára-raios e nas torres foi sugerida. Esta metodologia recomendada é baseada na utilização do modelo eletrogeométrico e do método de Monte Carlo. Um ponto crítico é o cálculo da tensão na torre e no ponto de incidência do raio, necessária à determinação da solicitação ao isolamento da linha, o qual deve ser realizado através de um programa digital de transitórios.

As considerações realizadas no escopo deste trabalho foram voltadas para linhas de transmissão de EHV e UHV de corrente alternada. No entanto, para linhas de corrente contínua as mesmas considerações básicas são válidas. Uma diferença importante é o fato de que em corrente contínua, a tensão operativa está sempre presente com um valor constante a uma determinada polaridade, modificando a suportabilidade do isolamento da linha.

Em subestações de EHV ou UHV são utilizados cabos pára-raios e mastros para a blindagem dos equipamentos, sendo que o seu posicionamento pode ser realizado com base nos mesmos conceitos de blindagem aplicados à linhas de transmissão. Uma modelagem tri-dimensional seria mais adequada mas, em virtude da complexidade que acarretaria, poderia ser utilizada uma representação em duas dimensões apenas, com resultados satisfatórios como indicado na literatura sobre o assunto.

De fundamental importância para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão e subestações a descargas atmosféricas, é a disponibilidade de informações confiáveis a respeito das características das descargas atmosféricas.

Como encerramento deste trabalho, recomenda-se a implementação de programas para pesquisas de características de raios, para serem utilizadas na avaliação do comportamento de linhas de transmissão e subestações sob o ponto de vista de descargas atmosféricas.

6. BIBLIOGRAFIA

1. M. Darveniza, F. Popolansky and E. R. Whitehead - "Lightning Protection of UHV Transmission Lines" Electra N^o 41.
2. E. R. Whitehead - "CIGRE Survey of the Lightning Performance of Extra-High-Voltage Transmission Lines" - Electra n^o 33 - March 1974 - pp. 63-89.
3. J. G. Anderson, "Monte Carlo Computer Calculations of Transmission Line Lightning Performance", PAS - Vol. 80, 1961, pp. 414-419.
4. D. W. Gilman, E. R. Whitehead, "The Mechanism of Lightning Flashover on High - Voltage and Extra-High-Voltage Transmission Lines" - Electra N^o 27, March 1973, pp. 65-96.
5. J. R. Currie, Liew Ah Choy, M. Darveniza - "Monte Carlo Determination of the Frequency of Lightning Strokes and Shielding Failures on Transmission Lines" - IEEE Transactions PAS - 90, 1971, pp. 2305-2312.
6. G. W. Brown, E. R. Whitehead - "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding - II" - IEEE PAS-80, 1969.
7. F. Popolansky - "Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents" - Electra N^o 22. May 1972, pp 139-147.
8. K. Berger, R. B. Anderson and H. Kroninger - "Parameters of Lightning Flashes" - Electra N^o 42, July 1975, pp 23-39.
9. L. V. Bewley - "Travelling waves on Transmission Systems" "Dover, New York; 1963.
10. Westinghouse Electric Corp. - "Transmission and Distribution Reference Book" - East Pittsburgh, 1950.

11. Edison Electric Institute - "EHV Transmission Line Reference Book", New York, 1968.
12. M. A. Sargent and M. Darveniza - "The Calculation of Double Circuit Outage Rates of Transmission Lines" - IEEE Trans. PAS Vol. 86, June 1967, pp. 665-678
13. M. A. Sargent and M. Darveniza, "Tower Surge Impedance" IEEE Trans. PAS Vol.88 Jan. 1969, pp 4754.
14. A. J. Eriksson - "Lightning Overvoltages on High Voltage Transmission Lines - Investigation of Wave-Shape Characteristics" - Electra Nº 47, July 1976, pp. 87-110.
15. M. P. Pereira, D. O. C. do Brasil, F.M. Resende, J. A. Jardini e A. Vian - "Comportamento a Descargas Atmosféricas das Linhas de Transmissão 800 kV de Itaipu" IV SNPTEE Rio de Janeiro, 1977.
16. M. P. Pereira, "Determinação do Desempenho de Linhas de Transmissão a Descargas Diretas pelo Método de Monte Carlo" 1º Encontro Pan-Americano em Engenharia Eletrotécnica e Eletrônica"; Salvador, 1978.
17. R. B. Anderson - "Lightning Research in South Africa" CSIR Special Report ELEK 80 Pretoria, October 1975.
18. F. S. Young, J. M. Clayton, A. R. Hileman - "Shielding of Transmission Lines", IEEE Trans. PAS Vol. 582, pp. 132-154, 1963.
19. E. R. Whitehead - "The Lightning Performance of EHV Lines" Appendix II of Progress Report of Study Committee Nº 8 CIGRE, Paris, June 1968.
20. Stanislaw Szpor - "Comparison of Polish Versus American Lightning Records", IEEE Trans. PAS Vol. 88, may 1969, pp. 646-652.

21. H. R. Armstrong E. R. Whitehead - "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding", IEEE Trans. PAS, Vol. 87, 1968, pp. 270-281.
22. M. A. Sargent, "Monte Carlo Simulation of the Lightning Performance of Overhead Shielding Networks of High Voltage Stations", IEEE Trans, PAS Vol. 91 pp 1651-1656, 1972
23. J. M. Clayton, F. S. Young, "Estimating Lightning Performance of Trabsmission Lines" IEEE Trans. PAS Vol. 83, November 1964, pp. 1102-1110.
24. S. Szpor, K. Miladowska, J. Wieckowski - "Lightning Current Records on Industrial Chimneys in Poland" CIGRE 1974 Session - August - Paris, N° 33 -10.
25. W. Diesendorf "Insulation Co-ordination in High-Voltage Electric Power Systems" Butterworths, London 1974.
26. G. D. MaCann, "The Effect of Corona on Coupling Factors, Between Ground Wires and Phase Conductors" AIEE Vol. 62-1949.
27. G. W. Brown, "Lightning Performance II - Updating Backflash Calculations" IEEE Trans., PAS Vol 97, n° 1 , Jan/Feb 1978.

ANEXO A

7.1 Listagem de Programa Digital para Determinação do Ângulo de Blindagem Crítico

```

DIMENSION HMIN(10),VMIN(10),HPMIN(10),H(7),CORR(10),RSC(10),TETA(1
10),TETAI(10,7),C(10),HTIN(10)
READ(5,5) HMINI,FCOND,FPARA,HPMINI,Z,VMINI
5 FORMAT(8F10.2)
READ(5,8) NHMIN,NHPMIN,NVMIN
READ(5,5) DELTAC,DELTAP,DELTAV
8 FORMAT(8I10)
LM=0
HMIN(1)=HMINI
IF(NHMIN.LE.1) GO TO 20
DO 10 I=2,NHMIN
J=I-1
HMIN(I)=HMIN(J)+DELTAC
10 CONTINUE
20 VMIN(1)=VMINI
IF(NVMIN.LE.1) GO TO 40
DO 30 I=2,NVMIN
J=I-1
VMIN(I)=VMIN(J)+DELTAV
30 CONTINUE
40 HPMIN(1)=HPMINI
IF(NHPMIN.LE.1) GO TO 50
DO 50 I=2,NHPMIN
J=I-1
HPMIN(I)=HPMIN(J)+DELTAP
50 CONTINUE
PRINT 160
160 FORMAT(23X,43HFURNAS - DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRICOS//28X,34H
1DIVISAO DE ESTUDOS DE EQUIPAMENTOS///22X,46HCALCULO DOS ANGULOS D
2E BLINDAGEM PARA PROTECAO/32X,26HTOTAL DOS CABOS CONDUTORES///10X
3,57HREFERENCIA : E.R.WHITEHEAD - D.W.GILMAN ELECTRA NO 27/23X,
456HTHE MECHANISM OF LIGHTNING FLASHOVER ON HIGH VOLTAGE AND/23X,36
SHEXTRA HIGH VOLTAGE TRASMISSION LINES////)
PRINT 170
170 FORMAT(///,10X,49HH - ALTURA DO CONDUTOR EXTERNO MAIS ALTO NA TORR
1E//10X,44HFC - FLECHA MAXIMA DO CONDUTOR NO VAO BASICO//10X,53HP1
2- ALTURA EQUIVALENTE DO CONDUTOR PARA PERFIL PLANO/49X,13HH(1)=H-2
3*FC/3//10X,65HP2 - ALTURA EQUIVALENTE DO CONDUTOR PARA PERFIL ONDU
4LADO CLASSE 1/64X,11HH(2)=H-FC/3//10X,65HP3 - ALTURA EQUIVALENTE D
5O CONDUTOR PARA PERFIL ONDULADO CLASSE 2/69X,6HH(3)=H)
PRINT 180
180 FORMAT(10X,67HP4 - ALTURA EQUIVALENTE DO CONDUTOR PARA PERFIL MONT
1ANHOSO CLASSE 1/66X,11HH(4)=1.25*H//10X,67HP5 - ALTURA EQUIVALENTE
2 DO CONDUTOR PARA PERFIL MONTANHOSO CLASSE 2/66X,11HH(5)=1.50*H//,
310X,67HP6 - ALTURA EQUIVALENTE DO CONDUTOR PARA PERFIL MONTANHOSO
4CLASSE 3/66X,11HH(6)=1.75*H//10X,67HP7 - ALTURA EQUIVALENTE DO CON
5DUTOR PARA PERFIL MONTANHOSO CLASSE 4/66X,11HH(7)=2.00*H//)
PRINT 190
190 FORMAT(15X,16HUNIDADE : METROS)
PRINT 125
60 DO 200 IV=1,NVMIN
CORR(IV)=2.0*VMIN(IV)/Z
CORRE=CORR(IV)*1.1
RSC(IV)=6.7*CORRE**0.8
DO 200 IP=1,NHPMIN
HPMED=HPMIN(IP)+2.0*(FCOND-FPARA)/3.0
DO 100 IH=1,NHMIN
H(1)=HMIN(IH)-2.0*FCOND/3.0
H(2)=HMIN(IH)-FCOND/3.0

```

```

H(3)=HMIN(IH)
H(4)=HMIN(IH)*1.25
H(5)=HMIN(IH)*1.50
H(6)=HMIN(IH)*1.75
H(7)=HMIN(IH)*2.00
DO 100 IT=1,7
TETA1=0.17453293
KM=0
XYZ=2.00*RSC(IV)-H(IT)-HPMED
IF(XYZ.LT.0.0) GO TO 90
70 C1=HPMED/COS(TETA1)
KM=KM+1
X1=C1/(2.0*RSC(IV))
IF(X1.GT.1.0.OR.X1.LE.-1.0) GO TO 95
BETA=ARSIN(X1)
X2=1.15*(H(IT)/RSC(IV))-1
IF(X2.GT.1.0.OR.X2.LE.-1.0) GO TO 90
ZETA=ARSIN(X2)
TETA2=-BETA-ZETA
X4=ABS(TETA2-TETA1)
IF(X4.LE.0.0001) GO TO 80
IF(KM.GT.9) GO TO 80
TETA1=TETA2
GO TO 70
80 TETA(IT)=TETA2
C(IT)=C1
AT=C(IT)*SIN(TETA(IT))
TETAT(IH,IT)=ATAN2(AT,HPMIN(IP))*57.29578
GO TO 100
90 TETAT(IH,IT)=99999.00
GO TO 100
93 TETAT(IH,IT)=96.00
GO TO 100
95 TETAT(IH,IT)=-85.00
100 CONTINUE
LM=LM+1
IF(LM.GT.2) GO TO 105
GO TO 115
105 LM=1
PRINT 125
125 FORMAT(1H1)
115 CONTINUE
PRINT 120,VMIN(IV),HPMIN(IP)
120 FORMAT(/,20X,43HSUPOORTABILIDADE DO ISOLAMENTO DA LINHA (KV)F6.1//
120X,56HDIFERENCA DE ALTURA ENTRE P.RAIO E CONDUITOR NA TORRE (M)F5.
22/)
PRINT 110
110 FORMAT(/,24X,49HANGULOS DE BLINDAGEM PARA PROTECAO TOTAL EM GRAUS/
1/)
PRINT 145
145 FORMAT(14X,1HH,10X,2HP1,7X,2HP2,7X,2HP3,7X,2HP4,7X,2HP5,7X,2HP6,7X
1,2HP7//)
DO 140 I=1,NHMIN
HTIN(I)=HMIN(I)+HPMIN(IP)
WRITE(6,150) HTIN(I),(TETAT(I,J),J=1,7)
140 CONTINUE
150 FORMAT(11X,F6.2,5X,7(F6.2,3X)/)
200 CONTINUE
END

```

ANEXO B

7.2 Listagem de Programa Digital para Determinação do Número de Desligamentos para Incidência de Raios nos Condutores de uma Linha de Transmissão



```

*****
*
* DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSAO A DESCARGAS DIRETAS *
*
* DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRICOS - DEFO.T - FURNAS *
*
*
* AERIL DE 1976 *
*
*****

```

```

-----
-
- ULTIMA MODIFICACAO REALIZADA EM 30 DE JUNHO DE 1976 -
-
-----

```

.....

- DADOS DE ENTRADA
- - GEOMETRIA DA LINHA NA TERRE OU NO MEIO DO VAO
- - 2 PONTOS DA CURVA DE DISTRIBUICAO DE CORRENTES DE DESCARCA
- - NUMERO DE PONTOS DA CURVA DE ANGULOS DE QUEDA
- - COEFICIENTE PARA CALCULO DA DISTANCIA DE ATRACAO DA TERRE
- - COEFICIENTE PARA CALCULO DAS DISTANCIAS DE ATRACAO
- - NUMERO DE LINHAS NA FAIXA DE ESTUDO
- - FAIXA DE CORRENTE ASPECIFICADA
- - NUMEROS PARA GERACAO DE SERIES DE NOS PSEUDO-RANDOMICOS
- - RESISTENCIA DO ISCLAMENTO DA LINHA (V50())
- - IMPEDANCIA DE SURTO DA LINHA
- - LARGURA DA FAIXA DE ESTUDO
- - NUMERO DE RAIOS POR FAIXA DE CORRENTE
- - NUMERO TOTAL DE CABOS E NUMERO DE CABOS PARA RAIOS
- - TENSAO DE OPERACAO DA LINHA
- - NIVEL ISOGERAUNICO E COEFICIENTE K OU DENSIDADE DE RAIOS

```

.....
DIMENSION X1(6,5),Y1(6,5),Y(6,5),DISC(6,5),XA(6,5),XB(6,5),YA(6,5)
1,Y3(6,5),DISK(6,5),PE(50),PK2(50),PI(50),PEI(50),NTOT(60),KZHS(5
20),NR(60,6,5),PROB(60,6,5),VAUX(3,5),GAMA(3,5),CFI(3,5),ANG(3,5),
3PROF(60),RAIOS(60),FACON(60,6,5),DESLI(60,6,5),TOTAL(3,5),CORREN(6
40),NC(5),NSW(5),ZOPH(5),VLINE(5),VMAX(5),NPH(5),YY(5),KN(6),DSTO(
55),VKA(5),VAUY(5),NT(5)

```

LEITURA DO NOME DA LINHA DE TRANSMISSAO

```

READ(5,904) OA,OB,OC,OD,OE,OF,OG,OH,OI,OJ
904 FORMAT(10A4)

```

LEITURA DO NO DE LINHAS, FAIXA DE CORRENTE, NO DE RAIOS POR FAIXA DE CORRENTE, NUMEROS PARA GERACAO DE SERIES PSEUDO-RANDOMICAS E CORRENTE A 16 (E 50 (DA CURVA LOG-NORMAL GENERALIZADA

```

READ(5,2) NUL1,ISTEP,NSTEP,IX1,IX2,IX3,CORR16,CORR50
2 FORMAT(6I10,2F10.2)

```

LEITURA DO NO DE CONDUTORES, NO DE FARA PAIOS, TENSAO DE OPERACAO E IMPEDANCIA DE SURTO DA LINHA

```

DO 3 I=1,NUL1
READ(5,10) NC(I),NSW(I),ZOPH(I),VLINE(I)

```

```

NP4(I)=NC(I)-MGW(I)
NP4I=NP4(I)
VMAX(I)=SORT(2.0/3.0)*VLINE(I)
3 CONTINUE
10 FORMAT(2I10,3F10.0)
C
C      LEITURA DO ISCLAMENTO DA LINHA
C
      DO 888 I=1,NUL1
      READ(5,290) (CFD(JX,I),JX=1,NP4I)
888 CONTINUE
290 FORMAT(8F10.0)
C
C      LEITURA DA FAIXA DE ESTUDO , NUMERO DE PONTOS DA CURVA DE ANGULOS
C      DE QUEDA , FATOR DE QUEDA PARA A TERRA , NIVEL ISOCERAUNICO ,
C      DENSIDADE DE RAIOS POR KM*KM E COEFICIENTES BETA E ALFA
C
      READ(5,30) FAIXA,NFA,COEF,CISO,DENSI,BETA,ALFA
30 FORMAT(F10.2,I10,5F10.3)
C
C      FORMACAO DA CURVA DE DISTRIBUICAO DE ANGULOS DE QUEDA
C
      IF(NFA.LE.0.0) NFA=16
      PI=3.141592
      FIA=0.0
      NFI=NFA+1
      FI(NFI)=90.0
      PFI(NFI)=0.0
      FI(1)=0.0
      PFI(1)=1.0
      FIST=90.0/NFA
      DO 981 I=2,NFI
      FIA=FIA+FIST
      FI(I)=FIA
      PFI(I)=1-2*FIA/180.0-SIN(2*FIA*PI/180.0)/PI
981 CONTINUE
C
C      LEITURA DAS COORDENADAS DOS CONDUTORES
C
      DO 19 J=1,NUL1
      NCJ=NC(J)
      READ(5,20) (X1(I,J),Y1(I,J),I=1,NCJ)
19 CONTINUE
20 FORMAT(8F10.2)
      DO 18 K=1,NFI
      PF(K)=0.0
      KZHS(K)=0
18 CONTINUE
      IF(IX1.LE.0) IX1=23
      IF(IX2.LE.0) IX2=91
      IF(IX3.LE.0) IX3=37
      IF(BETA.LE.0.0) BETA=1.0
      IF(ALFA.LE.0.0) ALFA=1.0
      IF(CORR16.LE.0.0) CORR16=45.0
      IF(CORR50.LE.0.0) CORR50=20.0
      IF(ISTEP.LE.0) ISTEP=1
      IY1=IX1
      IY2=IX2
      IY3=IX3
      INA=1
      NPT=0
      NRTA=0

```

```

NRC=0
NPGV=0
NDESL=0
DO 17 LM=1,60
NTERR(LM)=0
DO 17 LN=1,6
DO 17 LO=1,5
17 NR(LM, LN, LO)=0

```

```

C
C
C
CALCULO DA CORRENTE MINIMA

```

```

I1=0
K1=0
LCF=1
CFDA=CFD(1,1)
DO 34 L=1, NULI
NPHL=NPH(L)
DO 34 I=1, NPHL
IF(CFD(I,L).GE.CFDA) GO TO 34
CFDA=CFD(I,L)
LCF=L
34 CONTINUE
IMIN=2.0*(CFDA-VMAX(LCF))/ZORH(LCF)
CORR=IMIN+ISTEP/2.0

```

```

C
C
C
INICIO DA SIMULACAO DA INCIDENCIA DOS RAIOS

```

```

NCON=0
KM=1

```

```

C
C
C
CONTADOR DE RAIOS POR FAIXA DE CORRENTE

```

```

46 NCON=NCON+1
DO 23 IH=1,5
NT(IH)=0

```

```

23 CONTINUE
NTKX=0
I1=0
K1=0

```

```

C
C
C
TESTE PARA VERIFICAR SE O NO DE RAIOS SIMULADOS JA FOI ALCANCADO

```

```

IF(NCON-NSTEP) 49,49,51
51 CORR=CORR+ISTEP

```

```

IXA=0
DO 26 I=1, NULI
NPHI=NPH(I)
DO 26 J=1, NPHI
LAX=NR(KM, J, I)
IF(LAX.NE.0) IXA=1
26 CONTINUE

```

```

C
C
C
TESTE PARA VERIFICAR SE A SIMULACAO JA TERMINOU

```

```

IF(KM.GT.49) GO TO 53
IF(IXA.EQ.1) GO TO 52
IMAX=CORR-ISTEP/2.0
GO TO 53

```

```

52 NCON=0

```

C
C CONTADOR DE FAIXAS
C

KM=KM+1
GO TO 46

49 CONTINUE

C
C SORTEIO DA PROBABILIDADE PARA DETERMINACAO DO ANGULO DE QUEDA
C

CALL RANDUA (IX1, YFL)
IF (YFL.GE.PFI(1)) GO TO 77
I=1

111 IF (YFL.LT.PFI(I)) GO TO 88

ZETA=FI(I-1)
KZHIS(I-1)=KZHIS(I-1)+1
GO TO 99

88 I=I+1

GO TO 111

77 ZETA=FI(1)

KZHIS(1)=KZHIS(1)+1

99 CONTINUE

C
C TESTE PARA VERIFICAR SE O ANGULO DE INCIDENCIA E ZERO
C

IF (ZETA.LT.0.001) GO TO 102
GO TO 82

C
C CALCULO DO PONTO DE INCIDENCIA PARA QUEDA NA VERTICAL
C

102 CONTINUE

C
C SORTEIO DO ALVO NA FAIXA DE ESTUDO
C

CALL RANDUA (IX3, YFL)
ALVO=FAIXA*YFL-FAIXA/2.0

C
C CALCULO DA DISTANCIA DE ATRACAO
C

$R=2.0*CCRR+30.0*(1.0-EXP(-CCRR/6.8))$
R=R*ALFA
NZT=0

C
C LOOP PARA VERIFICAR INTERSECCOES COM TODAS AS LINHAS
C

DO 401 K=1, NUL1

I1=0

K1=0

91 I1=I1+1

C
C CALCULO DAS INTERSECCOES PARA DETERMINACAO DO PONTO DE INCIDENCIA
C

A2=1.0

B2=-2.0*Y1(I1,K)

$C2=(ALVO-X1(I1,K))*(ALVO-X1(I1,K))-R*R+Y1(I1,K)*Y1(I1,K)$

$DISC(I1,K)=B2*B2-4.0*A2*C2$

IF (DISC(I1,K)) 61,71,71

61 K1=K1+1

Y(I1,K)=0.0

C

TESTE PARA VERIFICAR SE HOUVE INTERSECCOES

IF(NC(K).LE.K1) GO TO 401
GO TO 31

ATINGIU A TERRA SOMENTE - NAO HOUVE INTERSECCOES

CALCULO DO PONTO DE INCIDENCIA

71 L1=L1+1
N2T=1
DISK(I1,K)=SQRT(DISC(I1,K))
YA(I1,K)=(-B2+DISK(I1,K))/(2.0*A2)
YB(I1,K)=(-B2-DISK(I1,K))/(2.0*A2)
Y(I1,K)=YA(I1,K)
IF(YB(I1,K).GT.YA(I1,K)) Y(I1,K)=YB(I1,K)
81 IF(I1.LT.NC(K)) GO TO 91
401 CONTINUE
GO TO 93

CALCULO DO PONTO DE INCIDENCIA PARA QUEDA FORA DA VERTICAL

82 CONTINUE

SORTEIO PARA DETERMINAR SE O ANGULO E POSITIVO OU NEGATIVO

CALL RANDUA(IY2,YEL)
IF(YEL.LT.0.5) ZETA=-ZETA

SORTEIO DO ALVO NA FAIXA DE ESTUDO

CALL RANDUA(IY3,YEL)
ALVO=FAIXA*YEL-FAIXA/2.0
TETA=ZETA*3.141592/180.0

CALCULO DOS COEFICIENTES DA RETA QUE DEFINE O RAIO

A1=-COTAN(TETA)
B1=-A1*ALVO

CALCULO DA DISTANCIA DE ATRACAC

R=2.0*CORR+30.0*(1.0-EXP(-CORR/6.8))
R=R*ALFA
N2T=0

LOOP PARA VERIFICAR INTERSECCOES COM TODAS AS LINHAS

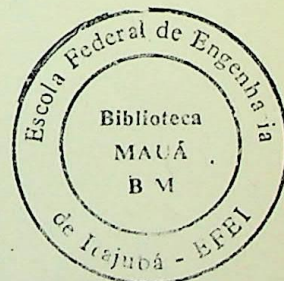
DO 402 K=1,NUL1

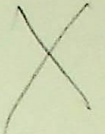
L1=0
I1=0
K1=0

50 I1=I1+1

CALCULO DAS INTERSECCOES PARA DETERMINACAO DO PONTO DE INCIDENCIA

A2=1+A1*A1
B2=2*(A1*(B1-Y1(I1,K))-X1(I1,K))
C2=(B1-Y1(I1,K))*(B1-Y1(I1,K))+X1(I1,K)*X1(I1,K)-R*R





```

DISC(I1,K)=B2*B2-4.0*A2*C2
IF(DISC(I1,K)) 60,70,70
60 K1=K1+1
Y(I1,K)=0.0

C
C
C
TESTE PARA VERIFICAR SE HOUVE INTERSECOES

IF(NC(K).LE.K1) GO TO 402
GO TO 80

C
C
C
C
C
ATINGIU A TERÇA SOMENTE - NAO HOUVE INTERSECOES

C
C
C
C
CALCULO DO PONTO DE INCIDENCIA
70 L1=L1+1
N7T=1
DISK(I1,K)=SQRT(DISC(I1,K))
XA(I1,K)=(-B2+DISK(I1,K))/(2.0*A2)
XB(I1,K)=(-B2-DISK(I1,K))/(2.0*A2)
YA(I1,K)=A1*XA(I1,K)+B1
YB(I1,K)=A1*XB(I1,K)+B1
Y(I1,K)=YA(I1,K)
IF(YB(I1,K).GT.YA(I1,K)) Y(I1,K)=YB(I1,K)
80 IF(I1.LT.NC(K)) GO TO 50
402 CONTINUE
93 CONTINUE

C
C
C
TESTE PARA VERIFICAR SE HOUVE ALGUMA INTERSECAO

IF(N7T.EQ.0) GO TO 75
GO TO 76
75 NTERR(KM)=NTEERR(KM)+1
GO TO 46
76 CONTINUE
DO 86 KX=1, NULL
IF(NT(KX).NE.1) NTKX=1
86 CONTINUE

C
C
C
TESTE PARA VERIFICAR SE NAO HOUVE INCIDENCIA NAS FASES

IF(NTKX.EQ.1) GO TO 94
GO TO 115
94 CONTINUE

C
C
C
DETERMINAÇÃO DA MAIOR ORDEMADA ENTRE AS INTERSECOES

DO 404 K=1, NULL
YY(K)=Y(1,K)
KN(K)=1
I=0
90 I=I+1
J=I+1
IF(Y(J,K).LE.YY(K)) GO TO 100
YY(K)=Y(J,K)
KN(K)=J
100 CONTINUE
IF(J.LT.NC(K)) GO TO 90
404 CONTINUE
KN1=1
KNN=KN(1)

```



```

YYY=YY(1)
DO 104 IJ=1,NUT
IF(YY(IJ).GT.YYY) GO TO 104
GO TO 104
104 YYY=YY(IJ)
KNL=KN(IJ)
KNL=IJJ
104 CONTINUE

TESTE PARA VERIFICAR SE A ORDENADA DO COMPUTOR ATEINGIU O LIMITE DO
REPETA
IF(D.LF.YYY) GO TO 125

ATINGIU A PROTECAO DA TIGERA ANTES
NTEPR(KM)=NTEPR(KM)+1
GO TO 115
125 CONTINUE

TESTE PARA VERIFICAR SE ATINGIU O PARA FAIR OU A FASE
IF(KNL.GT.NPH(KNL)) GO TO 105

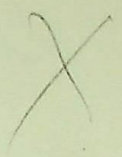
ATINGIU O CABO DA FASE
NPG=NPG+1
NF(KM,KNN,KNL)=NF(KM,KNN,KNL)+1
GO TO 115

ATINGIU O CABO PARA FAIR
105 NPGW=NPGW+1
NF(KM,KNN,KNL)=NF(KM,KNN,KNL)+1
115 CONTINUE
GO TO 46

IMPRESSAO DOS RESULTADOS
110 CONTINUE
57 CONTINUE

DETERMINACAO DAS DEFORMABILIDADES DAS FAIXAS DE COBERTAS
SQ2=1.4142135
CORR1=IMIN
AUX=CORR1/50
AUX=ALOG(AUX)
DO 280 I=1,KM
AUX=CORR1/50
CORR2=CORR1+1STEP
AUX=CORR2/50
X1=ALOG(AUX)/AUX
X2=ALOG(AUX)/AUX
DXY=0.5*(1.0+EXP(X1/SQ2))
DX2=0.5*(1.0+EXP(X2/SQ2))
DPR(I)=DX2-DX1
CORR1=CORR2
280 CONTINUE

```

C
C
C

```

DO 370 LH=1, NLI
  NDHLH=NDH(LH)
DO 370 LH=1, NDHLH
DO 370 LJ=1, NLI
  TOTAL(LH,LJ)=TOTAL(LH,LJ)+DESL(1,LJ,LH,LN)
370 CONTINUE

```

CALCULO DO NO TOTAL DE DESLIGAMENTOS

```

DO 375 LH=1, NLI
  DTST(1LH)=0.0
375 CONTINUE
DO 380 LK=1, NLIK
  NDHLK=NDH(LK)
DO 380 LJ=1, NDHLK
  DESTO(LK)=DESTO(LK)+TOTAL(LJ,LK)
380 CONTINUE
CORREN(1)=1 MIN
DO 301 J=1, KM
  L=J+1
301 CORREN(L)=CORREN(J)+1STEP
  PRINT 900
900 FORMAT(1H1)
  PRINT 901
901 FORMAT(15X,43HEURNAS - DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS///1RA. 34H
  10DIVISAO DE ESTUDOS DE EQUIPAMENTOS///2X,35HDESEMPENHO DE LINHAS O
  DE TRANSMISSAO A DESCARGAS DIRETAS///)
  WRITE(6,905) CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ
905 FORMAT(10X,20H LINHA DE TRANSMISSAO,1X,10A,/)
  PRINT 906, FAIXA, NLI
906 FORMAT(/,10X,20HE largura da faixa de estudo (M) em,1/10X,20H limite
  10E linhas na faixa de passagem)
  IF(CORR) 907,907,908
907 PRINT 908, DENSI
  GO TO 911
908 PRINT 910, COEF, CISO
909 FORMAT(/,10X,20H DENSIDADE DE FAIXAS POR KM/KM POR ANO em,0)
910 FORMAT(/,10X,20HNÍVEL ISOCORRUMICO DA LIGADA em,1/10X,20H NÍVEL DE
  10HE DA Onda e TERA em,1/10X,20H)
911 PRINT 913,1STEP,2STEP,3MIN,4MAX
912 FORMAT(/,10X,20H FAIXAS GERADAS POR FAIXA em,1/10X,20H NÍVEL em,1/10X,20H NÍVEL DE
  10HE MÍNIMA CONSIDERADA em,1/10X,20H CORRUMICO MÁXIMA CONSIDERADA em,1/10X,20H)
  PRINT 953,CORREN,CORREN
953 FORMAT(/,10X,20H CURVA DE DISTRIBUICAO DE DADOS em,1/10X,15HECORREN em,1/10X,20H
  15 (F30.1/10X,15HECORREN em,1/10X,20H)
  PRINT 954,IY1,IY2,IY3
954 FORMAT(/,10X,20H GERACAO DE NÚMEROS RANDÔMICOS em,1/10X,20H N1 em,1/10X,20H
  12 em,1/10X,20H N3 em,1/10X,20H)
  WRITE(6,873) ALFA,BETA
873 FORMAT(/,10X,20H COEFICIENTES UTILIZADOS em,1/10X,20H ALFA em,1/10X,20H BETA
  1 em,1/10X,20H)
  NLI=1
950 CONTINUE
  NDHLI=NDH(NLI)
  PRINT 914,NLI,(X1(J1,NLI),Y1(J1,NLI),J1=1,NDHLI)
914 FORMAT(1H1,14X,20H DADOS DA LINHA em,1/10X,20H CORRUMICO em,1/10X,20H
  10HE em,1/10X,20H NÍVEL em,1/10X,20H NÍVEL em,1/10X,20H)
  NDHLI=NDH(NLI)
  PRINT 915,VI LINE(NLI),(CFC(J4,NLI),J4=1,NDHLI),ZORN(NLI)
915 FORMAT(1H0,2X,14HE NOME NOMINAL em,1/10X,20H CORRUMICO em,1/10X,20H
  10HE em,1/10X,20H NÍVEL em,1/10X,20H NÍVEL em,1/10X,20H)
  10HE em,1/10X,20H NÍVEL em,1/10X,20H NÍVEL em,1/10X,20H)

```

```

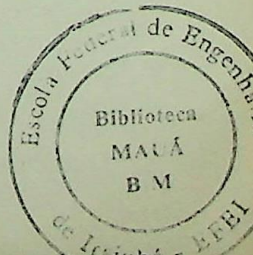
01 271 M=1, NUL1
PRINT 270, M, DEFTC(M)
271 CONTINUE
272 FORMAT(//, 9X, 15HDESLIGAMENTOS/100 KMZANO (LINHA, 12, 14)F10.0)
PRINT 200
NII=NI1+1
IF(NII.EF.NUL1) GO TO 250
PRINT 217

017 FORMAT(//, 15X, 12HDESTRIBUICAO DE ANGULOS DE QUEDA//22X, 5H516AUS17X,
113HDESTRIBUICAO DE /)
DO 277 I=1, NFI
037 PRINT 278, FI (I), DEI (I)
038 FORMAT(21X, F5.7, 22X, F6.4)
PRINT 243

042 FORMAT(//, 15X, 14HDESTRIBUICAO DE ANGULOS GERADA PELO DEGRAD//22X
1, 516AUS17X, 13HDESTRIBUICAO DE /)
FKM=KM*NSISTD
DO 241 I=1, NFI
PKZ(I)=KZHTS(I)/FKM
041 CONTINUE
DO 212 I=1, NFI
DO 212 J=1, NFI
DE (I)=DE (I)+EKZ (J)
012 CONTINUE
DO 233 I=1, NFI
WRITE (6, 242) FI (I), DE (I)
033 CONTINUE
042 FORMAT(21X, F5.7, 22X, F6.4)
PRINT 218

018 FORMAT(141, 14X, 24HDESTRIBUICAO DOS RESULTADOS//15X, 12HDESTRIBUICAO
13HDESTRIBUICAO DE /)
DO 219 J=1, KM
I=J+1
019 PRINT 220, COEFEN(J), COEFEN(I), DEFE(J), PAIS(J)
020 FORMAT(/F14.1, 1X, 1X, F5.1, 10X, F10.7, 14X, F10.1)
DO 239 M=1, NUL1
PRINT 221, M
021 FORMAT(15X, ///, 10X, 54HINCIDENCIA DE PAIS NOS CONDUTORES //22X, 5
1AIDS (LINHA, 12, 14)///10X, 5HDESTRIBUICAO DE /)
DO 222 J=1, KM
L=J+1
022 PRINT 223, COEFEN(J), COEFEN(L), (NO(J, K, L), K=1, NCM)
023 FORMAT(/, 7X, F4.1, 1X, 1X, F4.1, 7X, F5.4(5X, 15))
PRINT 224, M
024 FORMAT(141, 14X, 24HINCIDENCIA DE PAIS NOS CONDUTORES DE 100 KM DE
1 ANO (LINHA, 12, 14)///10X, 5HDESTRIBUICAO DE /)
DO 225 J=1, KM
L=J+1
025 PRINT 226, COEFEN(J), COEFEN(L), (LACON(J, K, L), K=1, NCM)
026 FORMAT(/, 7X, F4.1, 1X, 1X, F4.1, 9X, F7.5, 2(7X, F7.5), 7X, 2(F9.4))
PRINT 227, M
027 FORMAT(///, 10X, 54HDESTRIBUICAO DE COEFICIENTE DE RESISTIVIDADE (LIN
1A, 12, 14)///10X, 5HDESTRIBUICAO DE /)
NPHI=NDI(M)
DO 228 J=1, KM
I=J+1
028 PRINT 229, COEFEN(J), COEFEN(I), (RICE(J, K, M), K=1, ND(M))
029 FORMAT(/, 7X, F7.1, 1X, 1X, F4.1, 7(14.7)

```



```

PRINT 930,M
930 FORMAT(1H1,5X,40HNUMERO DE DESLIGAMENTOS POR 100 KM POR AÑO (LÍNEA
1,12,14)///,10X,5HEZ 1YARX,6HEASE ARX,6HEASE ARY,6HEASE AZ)
DO 931 J=1,KM
L=J+1
931 PRINT 932,CORREN(J),CORREN(L),(DESLI(J,K,M),K=1,NDEM)
932 FORMAT(/,7X,F4.1,' A ',F4.1,' RE 10.7)
PRINT 933,4,(TOTAL(J,M),J=1,NDEM),DISTO(M)
934 FORMAT(///,5X,40HNUMERO DE DESLIGAMENTOS POR 100 KM POR AÑO (LÍNEA
1,12,14)///,10X,6HEASE A,F15.5,/,10X,6HEASE B,F15.5,/,10X,6HEASE C,
2F15.5,///,10X,5HTOTAL,F16.5)
PRINT 939
939 CONTINUE
PRINT 944
944 FORMAT(///,5X,37HNUMERO DE RAÍCS QUE ATINGIRAN A TIERRA///)
DO 945 J=1,KM
L=J+1
945 PRINT 946,CORREN(J),CORREN(L),NTERR(J)
946 FORMAT(/,7X,F4.1,' A ',F4.1,114)
STOP
END

```

```

SUBROUTINE RANDUA(IY,YEL)
IY=IY*65532
IF(IY) 5,6,6
5 IY=IY+2147483647+1
6 YEL=IY
YEL=YEL*0.4656613E-02
IY=IY
RETURN
END

```