

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Antonio Varejão de Godoy e aprovada pela Comissão Julgadora em 21/07/1989

Ioshiaki Doi

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DEPT. MÁQUINAS COMPONENTES E SISTEMAS INTELIGENTES

SOBRETENSÕES EM CADEIA DE ISOLADORES
FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS :
UM ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO
E DO PARÂMETRO Z_t

Autor : Antônio Varejão de Godoy
Orientador : Prof. Dr. Ioshiaki Doi

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a três pessoas que durante toda a minha vida, deram: amor, apoio, carinho e incentivo, necessários para superar todas as dificuldades: meu pai, minha mãe e meu irmão.

A G R A D E C I M E N T O S

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador Ioshiaki Doi , pela paciência , pelas discussões, pelo apoio ;enfim por todo o trabalho de orientação.

Agradeço à CHESF , Companhia Hidrelétrica do São Francisco e à UNICAMP ,Universidade Estadual de Campinas por terem dado as condições necessárias para a realização deste curso.

Na CHESF ,agradeço em particular aos engenheiros :Luis de Moraes Guerra , Reive Barros dos Santos e Antônio Oliveira da Silva por terem permitido e apoiado um curso desta natureza .

Agradeço aos engenheiros: Paulo Cesar Esmeraldo de FURNAS , Víctor Hugo Gomes de Andrade e José Roberto Fonseca , do CEPEL pelas sugestões dadas durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos amigos: Diógenes Dutra ,pela ajuda na elaboração dos programas deste trabalho e Luciano Macedo Freire ,pelas discussões de alguns dos resultados obtidos .

Gostaria de agradecer ao ex-professor e amigo Hermano Gouveia pelo incentivo que sempre me deu para a realização deste curso.

Agradeço aos engenheiros da CHESF : Romero e Pessoa ,pelo fornecimento dos dados de torres utilizadas durante o trabalho de pesquisa.

Agradeço a Ana Maria pela datilografia deste trabalho.

Agradeço à amiga Helzeni Rolim e a Gilvan pelos desenhos deste trabalho.

Agradeço a Alba de Aquino Sales por ter intermediado o recebimento dos dados e desenhos .

Ao meu amigo Carlos Nelson ,faço um agradecimento pelo apoio nos momentos difíceis ,pelo incentivo e pela confiança.

Finalmente gostaria de agradecer a todos os meus amigos que direta e indiretamente ajudaram neste trabalho . Esta confiança e o incentivo demonstrado foram essenciais.

R E S U M O

Este trabalho estuda de uma forma determinística as sobretensões em cadeias de isoladores, que surgem quando uma descarga atmosférica atinge o topo de uma torre de transmissão.

São analisados e comparados os métodos de cálculo deste tipo de sobretensões: o método das reflexões sucessivas, elaborado por Jordan e o método de campo proposto inicialmente por Wagner. Para atingir este objetivo, desenvolve-se um programa computacional que calcula a sobretensão, quando a descarga atinge o topo da torre de um sistema de transmissão pelas duas abordagens.

Fundamentado nesta análise, escolhe-se o método mais simples e eficiente. Posteriormente, utilizando-se este método, é feita uma análise de sensibilidade simplificada para quatro parâmetros: impedância do canal da descarga, impedância de pé-de-torre, tempo de subida da forma de onda da descarga e impedância de surto de torre. Esta análise é feita com a finalidade de verificar a variação da magnitude da tensão na cadeia de isoladores. Finalmente destaca-se a impedância de surto de torre comparando os valores calculados pelos modelos convencionais (Jordan, Wagner, Wagner Modificado, Daverniza e Método Simplificado) com os valores medidos em ensaios com torres em escala reduzida.

A B S T R A C T

This work studies in a deterministic point of view a lightning discharges that strikes directly the transmission line tower top

The calculation methods of this kind of surges : the method of successive reflections ,introduced by Jordan and the method of field conceptions ,firstly developed by Wagner ,are reviewed ,analysed as well as compared with these purpose. Based on this two approaches a computacional program is developed to calculate the overvoltage on the insulator string and the required parameters.

Based on the results of this analysis, the simplest and most efficient method is chosen and where a simple sensitivity analysis is made for the following parameters: the impedance of lightning stroke channel , the tower foot impedance, time to crest of stroke shape function and tower surge impedance. This analysis is performed in order to verify the voltage variation on the insulator string. Finally, the last parameter , the tower surge impedance is emphasized comparing its calculated values with the measured values by geometrical model technique.

ÍNDICE

CAPÍTULO / NOME	PAG.
1. Introdução	1
2. Cálculo de Sobretensões de acordo com o método das Reflexões Sucessivas	3
Ilustrações	19
3. Cálculo de Sobretensões de acordo com a teoria de Campo	21
Ilustrações	49
4. Impedâncias de Surto de Torres de Transmissão	53
Ilustrações	58
5. Análise Comparativa entre as Metodologias de Cálculo de Sobretensões em linhas de transmissão frente a Descargas Atmosféricas	60
Ilustrações (e Resultados)	73
6. Estudo da Modelagem da Torre	78
Ilustrações (e Resultados)	99
7. Conclusões	105
8. Referências Bibliográficas	107

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores, quando uma descarga atmosférica atinge uma linha de transmissão é um ponto importantíssimo na coordenação de seus isolamentos. Caso esta sobretensão exceda a suportabilidade da isolação da linha ocorrerá uma descarga, com a conseqüente formação de um arco de potência e a possível perda de continuidade no atendimento aos consumidores.

O estudo do desempenho de linhas de transmissão quanto a descargas atmosféricas é portanto, de grande importância no projeto de sistemas de transmissão. De modo geral, nos sistemas de tensão até 230 kV é fator determinante do isolamento das linhas. Nos sistemas com tensão acima de 345 kV, o isolamento é normalmente ditado pelas sobretensões de manobra, desde que as linhas estejam adequadamente projetadas. Entretanto mesmo para estes níveis de tensão, a necessidade de estudos do comportamento da linha, quanto a descargas de origem atmosférica é evidente, para que se possa garantir um desempenho compatível com os critérios de confiabilidade.

O primeiro trabalho que focaliza o cálculo de sobretensões em cadeias de isoladores foi desenvolvido por Jordan em um conjunto de três artigos [ref 1,2,3]. Neste trabalho ele fundamenta o método das reflexões sucessivas, analisa alguns parâmetros e faz uma aplicação prática do mesmo.

Com a finalidade de discutir e confrontar o método anterior Wagner desenvolveu uma nova metodologia através da teoria de campos eletromagnéticos, para efetuar este cálculo. Nela, ele procurava tratar o assunto de forma mais rigorosa e incluía as características das descargas atmosféricas [ref 6]. Entretanto o resultado obtido não era de fácil aplicação computacional. Para melhorar este aspecto, novos trabalhos foram realizados, dos quais pode-se destacar aquele em que se introduz o método: "Loop Voltage" [ref 7]. Esta simplificação foi tão eficaz que Wagner reescreveu o método de campo em uma forma mais simplificada e computacionalmente mais eficiente [ref 8,9].

Como os resultados encontrados ainda não conseguissem explicar completamente os valores obtidos no campo ,novos esforços foram despendidos com esta finalidade. Pesquisava-se basicamente dois pontos : métodos experimentais que procurassem simular a situação real e novos modelos para os parâmetros envolvidos.

Dentro dos trabalhos experimentais pode-se destacar aqueles realizados por Kawai [ref 12] e por Anderson [ref 10,11] . Estes últimos estabelecendo as condições para os ensaios em modelos reduzidos.

Na linha de modelagem de parâmetros ,o trabalho mais importante foi desenvolvido por Sargent e Daverniza [ref 13] , que criaram o modelo cônico para torres e modificaram o modelo de Wagner .Além deste, merece destaque o trabalho elaborado pelo grupo de estudos do IEEE sobre o assunto , que procurava aplicar os modelos já existentes em alguns tipos comuns de torre de transmissão [ref 15,5].

Hoje ,ainda se observa muitos trabalhos sendo publicado neste assunto . A maior parte procurando analisar novos modelos de torre, onde sejam levados em consideração resultados experimentais [17,18,19].

No nosso trabalho, estudaremos o caso específico da descarga atmosférica atingido o topo da torre do sistema de transmissão. Enfocaremos o problema de forma teórica e determinística, ou seja, dado que a descarga atingiu o topo da torre ,analisaremos a tensão na cadeia de isoladores.

Inicialmente iremos comparar os dois métodos de cálculo da tensão na cadeia de isoladores para surtos atmosféricos.A fim de que pössamos efetuar tal análise, iremos elaborar um programa que calcula esta sobretensão pelos dois métodos :o de campo, desenvolvido por Wagner e o método das reflexões sucessivas na forma descrita originalmente por Jordan.

Após definir qual dos dois é melhor, desenvolveremos um novo programa que calcula esta sobretensão pelo método escolhido, permitindo analisar a variação da mesma com os parâmetros mais importantes do sistema. Em particular, procuraremos estudar a modelagem da torre pelos métodos tradicionais comparando com resultados experimentais obtidos no setor elétrico nacional.

CAPÍTULO 2

CÁLCULO DE SOBRETENSÕES DE ACORDO COM A TEORIA DAS REFLEXÕES SUCESSIVAS

2.1. Considerações Iniciais

Conforme foi descrito no capítulo 1 a preocupação principal deste estudo será as descargas atmosféricas indiretas, que atingem o topo das torres de um sistema de transmissão em alta, extra-alta ou ultra-alta tensão.

O objetivo deste capítulo é mostrar de forma resumida como são determinados os valores de corrente e tensão quando da incidência da descarga atmosférica na estrutura de uma linha de transmissão através da teoria das reflexões sucessivas.

Quando uma descarga atinge um objeto, ela inicia no mesmo, por condução direta, o desenvolvimento de séries de ondas viajantes de correntes e tensão, cujas formas e amplitudes são dependentes, tanto das características das descargas, como do objeto atingido. Sob certas condições, outros objetos na vizinhança do objeto atingido, podem produzir nele outra série de ondas. Estas têm formas e amplitudes que dependem, não apenas das características da descarga e do objeto atingido, mas também dos vizinhos.

O potencial (ou corrente) em qualquer ponto, em qualquer instante de tempo, no sistema de objetos atingidos pela descarga é igual à superposição de todas as ondas que chegam naquele ponto, até aquele instante de tempo, defasadas pelos tempos de chegada no local desejado. [ref. 1, 2, 3, 4, 5]

Apesar de as linhas de transmissão não apresentarem características elétricas simples, no curto espaço de tempo imediatamente seguinte ao contato da descarga com a linha, é possível determinar por métodos analíticos não complexos, todos os valores de tensão e corrente. Este período é por sua vez de importância fundamental, do ponto de vista prático. A maior preocupação será a determinação das tensões e correntes em certos pontos críticos, durante este período de tempo inicial.

Para a determinação dos valores destas correntes e tensões considera-se conhecidas as "constantes" da linha de transmissão e da terra a ela associada, sob condições de surtos de alta-tensão, além dos parâmetros que determinam as características e magnitude das descargas atmosféricas. Será visto adiante (itens 2.5 a 2.7) que alguns destes parâmetros não são suficientemente bem determinados de forma quantitativa, não permitindo portanto, uma grande exatidão no resultado final a ser obtido.

Uma outra hipótese simplificativa assumida, foi a de desprezar a atenuação e a deformação das ondas da descarga na linha de transmissão.

Considera-se também, que as correntes e tensões em pontos muito distantes do ponto de contato e em períodos de tempo muito longo, não são de grande importância para o objetivo deste trabalho (se observa que os valores de tensão para instantes muito longos se tornam muito pequenos). Ou seja, basta trabalhar com a torre atingida e as duas adjacentes a esta (uma de cada lado da atingida), sem prejuízo para os resultados finais a serem obtidos.

2.2. Notação e Cálculo dos Coeficientes

Além das considerações feitas no item 2.1. adota-se torre 1 como sendo aquela atingida diretamente pela descarga e a torre 2 como aquela imediatamente adjacente à anterior.

A tensão interna da descarga pode ser representada por uma função $f(t)$, com o tempo t , contado a partir do instante no qual a torre é atingida. Em todo o desenvolvimento deste trabalho é utilizado a seguinte denotação:

V_t = tensão no topo da torre 1 (kV.)

V_b = tensão na base da torre 1 (kV.)

V_u = tensão no topo da segunda torre (kV.)

Z_g = impedância de surto de todos os cabos guarda (Ω)

Z_t = mZ_g , impedância de surto da torre de transmissão (Ω)

Z_f = nZ_g , impedância de surto de pé de torre (Ω)

$Z_s = pZ_g$, impedância do canal da descarga (Ω)

s = comprimento do vão (m)

h = altura da torre sob a superfície da terra (m)

v = velocidade de propagação (m)

m, n, p = números reais obtidos das expressões acima

$B (B')$ = coeficiente de transmissão e reflexão, respectivamente nos topos de todas as torres exceto a torre 1, para ondas de tensão chegando dos cabos guarda.

$D (D')$ = coeficiente de transmissão e reflexão, respectivamente em qualquer pé de torre, para ondas de tensão descendo pela torre.

$F (F')$ = coeficiente de transmissão e reflexão, respectivamente em qualquer topo de torre exceto a torre 1, para ondas de tensão subindo pela torre

$G (G')$ = coeficiente de transmissão e reflexão, respectivamente no topo da torre 1, para ondas de tensão descendo pelo canal da descarga.

$H (H')$ = coeficiente de transmissão e reflexão, respectivamente no topo da torre 1, para ondas de tensão viajando para cima pela torre.

$J (J')$ = coeficiente de transmissão e reflexão, respectivamente no topo da torre 1, para ondas de tensão chegando pelos cabos guarda.

Estes coeficientes em função dos respectivos valores de impedância

valem:

$$B = \frac{2 \cdot Z_t}{Z_g + 2 \cdot Z_t} = \frac{2 \cdot m}{1 + 2 \cdot m} \quad B' = B - 1$$

$$D = \frac{2 \cdot Z_f}{Z_f + Z_t} = \frac{2 \cdot n}{n + m} \quad D' = D - 1$$

$$F = \frac{2 \cdot Z_g}{Z_g + 2 \cdot Z_t} = \frac{2}{1 + 2m} \quad F' = F - 1$$

$$G = \frac{2 \cdot Z_t \cdot Z_g}{Z_g \cdot Z_t + 2 \cdot Z_s \cdot Z_t + Z_s \cdot Z_g} = \frac{2p}{m + 2mp + p}$$

$$G' = G - 1$$

$$H = \frac{2 \cdot Z_g \cdot Z_s}{Z_t \cdot Z_g + 2 \cdot Z_s \cdot Z_t + Z_s \cdot Z_g} = \frac{2p}{m + 2mp + p}$$

$$H' = H - 1$$

$$J = \frac{4 \cdot Z_t \cdot Z_s}{Z_t \cdot Z_g + 2 \cdot Z_s \cdot Z_t + Z_s \cdot Z_g} = \frac{4mp}{m + 2mp + p}$$

$$J' = J - 1$$

OBS. Os coeficientes J e J' são derivados de tal maneira que é necessário considerar ondas se aproximando da torre 1 apenas ao longo de uma direção.

2.3. Determinação das Tensões de Interesse

Será analisado neste item o fenômeno da propagação de ondas na estrutura e condutores, determinando todas as tensões de interesse a este estudo:

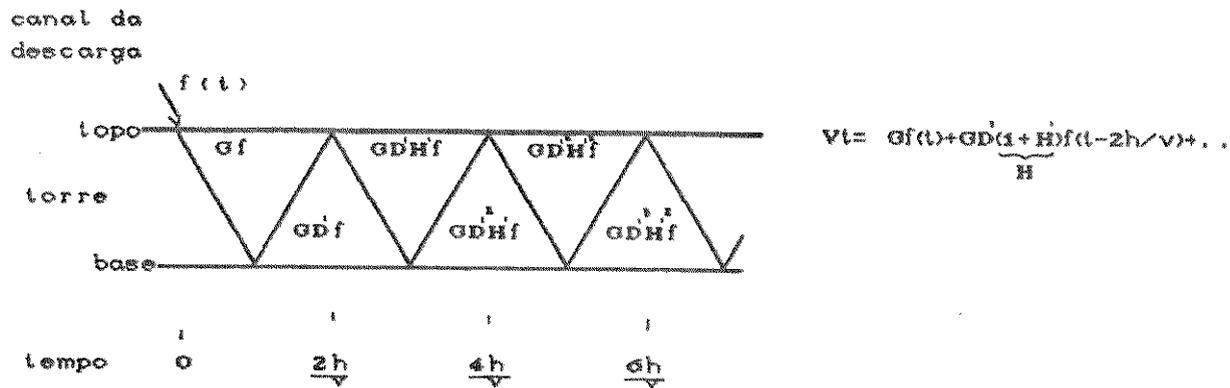
2.3.1 Tensão no topo da torre 1

A onda de tensão associada à descarga é $f(t)$. Quando a descarga atinge o topo da torre propaga-se, de maneira instantânea, seguindo uma série de percursos distintos. Cada um desses percursos, desde o momento, em que o topo da torre é atingido, até o instante em que a onda retorna a este ponto, corresponde a uma parcela do valor final desta tensão. Lembrando que o máximo defasamento no tempo, com o qual se trabalha, é $(2.s+6.h)/v$ (as componentes da tensão irão assumir valores muito pequenos a partir deste instante). Pode-se então destacar as seguintes parcelas:

A) A onda atinge a torre, penetra no seu interior, reflete na base da mesma, se propaga para o topo, reflete-se neste ponto e continua com sucessivas reflexões no topo e na base, até completar o tempo máximo de defasamento. A primeira onda a ser transmitida ao interior da torre é $G.f(t)$. A primeira parcela será dada por:

$$V_{11} = G f(t) + GD'H f(t - 2h/v) + GD'HCD'H f(t-4h/v) + GD'HCD'H^2 f(t-6h/v) + \dots + GD'HCD'H^k f(t-(2k+2)h/v) + \dots \quad (2.1)$$

Para que seja melhor compreendida a fórmula anterior, será apresentado o respectivo diagrama de treliças abaixo.



A2) A onda transmitida para dentro da torre 1, após atingir a base da torre e novamente o seu topo (contribuindo para a tensão V_{11}), é transmitida ao cabo guarda, atingindo assim o topo da torre adjacente. A onda é então transmitida para o seu interior, se propaga perfazendo o percurso topo-base-topo desta torre, para depois retornar ao topo da torre 1, contribuindo desta forma para a tensão final deste ponto. Logo se tem:

$$V_{12} = 2.(GD'^2 HBFJ). f(t - ((2s+4h)/v)) \quad (2.2)$$

A3) Se a onda de tensão V_{12} anterior, apenas refletir no topo da torre 2 e voltar para o topo da torre 1 contribuirá com a parcela:

$$V_{13} = 2.(GD'HB'J) f(t - (2s+2h)/v) \quad (2.3)$$

A4) Se a onda anterior (A3), após atingir o topo da torre 1, for mais uma vez transmitida ao interior desta e assim contribuir para a tensão V_{14} , ela será dada por:

$$\begin{aligned} V_{14} &= (GD'HB'JD'HD) f(t - (2s+4h)/v) \\ &= (GD')^2 J(B'HD) f(t - (2s+4h)/v) \end{aligned} \quad (2.4)$$

A5) Se a onda ao atingir a torre 1, fizer duas vezes o percurso, topo-base-topo, para só então alcançar e se propagar pelo cabo-guarda, seu valor será:

$$\begin{aligned} V_{15} &= GD'H'D'HB'J.2.f(t-(2s+4h)/v) \\ &= 2.(GD')^2J(B'HH')f(t-(2s+4h)/v) \end{aligned} \quad (2.5)$$

A6) Se a onda fizer inicialmente seu percurso pelo cabo guarda, a contribuição para V_1 da parcela que se propaga até o topo da torre 2 e retorna à torre 1 é dado por:

$$V_{16} = (GB'J)f(t-2s/v) \quad (2.6)$$

A7) Se a onda anterior (A6) se propagar uma vez dentro da torre 2, teremos:

$$V_{17} = (GBD'FJ)f(t-(2s+2h)/v) \quad (2.7)$$

A8) Se na onda anterior (A7), o percurso dentro da torre 2 for dobrado, a parcela final a ser adicionada a V_1 será:

$$\begin{aligned} V_{18} &= (GBD'B'F'FJ)f(t-(2s+4h)/v) \\ &= (GD')^2J[BF(F')]f(t-(2s+4h)/v) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Finalmente ,podemos observar que qualquer que seja um outro percurso a ser considerado ,este será idêntico a aqueles já descritos. Portanto a tensão no topo da torre atingida pela descarga será a soma de todas as parcelas anteriores (A1 a AB), ou seja:

$$V_t = \sum_{i=1}^B V_{1i} \quad (2.9)$$

2.3.2 Tensão na base da torre 1

De forma análoga à tensão no topo da torre1, a contribuição para a tensão na base desta torre , será a soma de diversas parcelas ,cada uma referente a um percurso desenvolvido pela onda , entre o momento em que a descarga atinge o sistema e o instante, no qual ela alcança o ponto onde se quer calcular a tensão. Pode-se então discriminar os seguintes termos:

B1)A primeira parcela que se considera é , como no item A, aquela referente à onda que se propaga várias vezes entre o topo e a base da torre atingida pela descarga. A diferença em relação ao item A1) é o ponto onde se calcula a tensão (neste caso a base da torre) e consequentemente o defasamento. Assim:

$$U_{11} = GD f(t-h/v) + (GDCH'D') f(t-(3h/v)) + (GDCH'D')^2 f(t-(5h/v)) + \dots + (GDCH'D')^k f(t-((2k+1)h/v)). \quad (2.10)$$

B2)Considerando-se que a onda ao atingir a torre ,se propaga uma vez no seu interior , é transmitida aos cabos guarda e posteriormente, faz o percurso de volta até a base da torre1, tem-se:

$$U_{12} = GD'HB'JD f(t-(2s+3h)/v) = (GD'JD)B'H f(t-(2s+3h)/v) \quad (2.11)$$

B3) Considerando-se que ela é transmitida ao cabo guarda, reflete no topo da torre 2, é transmitida ao interior da torre 1, e se propaga até a base desta, a tensão neste caso será dada por:

$$U_{13} = GB'JD f(t-(2s+h)/v) \quad (2.12)$$

B4) Se a onda anterior (B3), fizer ainda um percurso completo antes de contribuir para a tensão na base da torre atingida, seu valor será:

$$U_{14} = GB'JD'H'D f(t-(2s+3h)/v) = (GD'JD)B'H'f(t-(2s+3h)/v) \quad (2.13)$$

B5) Caso a onda seja transmitida ao cabo guarda, se propague por ele, penetre na torre adjacente, sofra uma reflexão na base desta, volte ao cabo guarda e finalmente seja transmitida à torre 1, esta onda contribuirá diretamente para o valor da tensão em sua base, sendo dada por:

$$U_{15} = GBD'FJD f(t-(2s+3h)/v) = (GD'JD)BF f(t-(2s+3h)/v) \quad (2.14)$$

B6) Caso a onda se propague por duas vezes pela torre 1, e seja transmitida ao cabo guarda, esta reflete no topo da torre 2 e volta para a torre 1, indo contribuir no valor final da tensão na base desta torre. Do ponto de vista de transmissão e reflexão de ondas, este percurso não sofrerá alteração mesmo que se intercale entre a ocorrência destas duas propagações de onda na torre 1, a propagação pelo cabo guarda. Logo a tensão na base da torre 1 será dada por:

$$\begin{aligned} U_{16} &= 2.GD'H'D'HB'JD f(t-(2h+5s)/v) \\ &= 2.(GD'JDD')(B'H'(H))f(t-(2h+5s)/v) \end{aligned} \quad (2.15)$$

OBS. O fator 2 multiplicando o termo acima é devido a existência de dois fenômenos distintos, que contribuem da mesma forma para a tensão na base da torre atingida.

B7) Considerando que a onda é transmitida diretamente ao cabo guarda, para depois realizar por duas vezes o percurso entre o topo e a base da torre atingida pela descarga, a contribuição para a tensão na sua base será de:

$$\begin{aligned}
 U_{17} &= GB'JD'H'D'H D f(t-(2s+5h)/v) \\
 &= (GD'JDD')(BH'H) f(t-(2s+5h)/v) \quad (2.16)
 \end{aligned}$$

B8) Se a onda anterior realizar somente um percurso na torre 2 e um outro na 1 ao invés de dois percursos pela torre 1 (considerando que o percurso é feito primeiramente na torre 1 e depois na 2, após o qual alcança a base da torre 1) a contribuição para a tensão na base da torre 1 será :

$$U_{18} = GD'JDD'(BFH') f(t-(2s+5h)/v) \quad (2.17)$$

B9) Se a onda anterior efetuar dois percursos na torre 2, então se tem:

$$U_{19} = GD'JDD'(BFF') f(t-(2s+5h)/v) \quad (2.18)$$

B10) Admitindo que a onda faça um percurso igual ao de B8) apenas invertendo a ordem na qual ela se propaga em cada torre, a parcela da sua contribuição será de:

$$U_{s, 10} = (GD'JDD')BFH f(t - (2s+6h)/v) \quad (2.19)$$

Portanto, seguindo o mesmo raciocínio aplicado à tensão no topo da torre atingida, o valor da tensão na base desta será o resultado da soma das parcelas anteriores (de B1) a B10), ou seja :

$$V_B = \sum_{s=1}^{10} U_{sk} \quad (2.20)$$

2.3.3 Tensão no topo da torre 2

Da mesma forma que nos itens anteriores, determina-se o valor da tensão no topo da torre 2, através da soma das várias componentes. Para esta tensão em especial, define-se o tempo máximo para cálculo do valor como sendo $t = (s+10h)/v$. Isto se explica pelo fato de que as ondas, que contribuem para a tensão no topo da torre 2 e que se propagam acima deste período de tempo são muito reduzidas. Tem-se então:

C1) Onda transmitida diretamente ao cabo guarda, se propagando depois até o topo da torre adjacente:

$$V_{21} = GB f(t-s/v) \quad (2.21)$$

C2) Se a onda anterior, também completar um percurso pelo interior da torre (topo-base-topo), tem-se duas parcelas, uma referente ao percurso pela torre 1 e outra ao percurso pela torre 2. Logo se tem:

$$V_{22} + V_{23} = [GBD'(F+H)] f(t - (s+2h)/v) \quad (2.22)$$

C3) Admitindo-se agora ,além do percurso anterior ,que a onda faz mais um percurso pelo interior da torre , tem-se então de distinguir três parcelas : uma referente a dois percursos dentro da torre 1, outra referente a dois percursos na torre 2 e uma terceira referente a um percurso em cada torre:

$$V_{24} + V_{25} + V_{26} = GBC(D')^2 [F(F')^2 + FH + H(H')^2] f(t - (s+4h)/v) \quad (2.23)$$

C4) Adicionando-se ao caso C3) mais um percurso completo na torre 2 ,tem-se então um defasamento de $6h/v$ em relação ao instante em que a descarga atinge a torre 1 e um acréscimo de mais quatro componentes à tensão no topo da torre 2 (duas referentes a três percursos dentro de cada torre , duas referentes a dois percursos dentro de cada torre e um percurso na outra). Logo :

$$V_{27} + V_{28} + V_{29} + V_{210} = GBC(D')^3 [F(F')^2 + FH(F'+H') + H(H')^2] f(t - (s+6h)/v) \quad (2.24)$$

C5) Admitindo que a onda efetue quatro percursos completos ao longo das torres ,além daquele ao longo do cabo guarda, tem-se neste caso de considerar as componentes da tensão no topo da torre 2 referentes às seguintes situações : quatro percursos na torre 1 , quatro na torre 2 , três percursos na torre 1 e um na torre 2, três na torre 1 e um na 2 e finalmente dois em cada uma das torres. Portanto:

$$V_{211} + V_{212} + V_{213} + V_{214} + V_{215} = GBC(D')^4 (F(F')^3 + FH [(F')^2 + F'H' + (H')^2] + HCH')^3 \quad (2.25)$$

Portanto analogamente aos casos descritos em A) e B) a tensão V_2 , no topo da torre adjacente àquela que foi atingida pela descarga será dada pela contribuição de todas as parcelas de C1) a C5), ou seja:

$$V_2 = \sum_{k=1}^{15} V_{2k} \quad (2.26)$$

Determinadas as tensões de interesse, pode-se agora calcular a diferença de potencial na cadeia de isoladores.

2.4. Diferença de Potencial entre cabo-guarda (no topo da torre) e condutor - (diferença de potencial sobre a cadeia de isoladores).

Até o item 2.3., trabalhou-se sempre com tensões para a terra, que surgem quando uma descarga atinge o topo de uma torre de uma linha de transmissão. Sempre se referindo a tensões entre estrutura aterradas e a terra. É entretanto de grande importância para o estudo, as tensões que surgem nos cabos condutores da linha devido ao efeito do acoplamento indutivo entre :cabo condutor - estrutura aterrada e cabo condutor - descarga atmosférica. O caminho descrito pela descarga é geralmente perpendicular ao do condutor explicando portanto o fato de tal acoplamento ser relativamente pequeno. Por conseguinte, o grande responsável pela tensão nos cabos condutores vem a ser o acoplamento cabo guarda - condutor, expresso através do coeficiente de acoplamento k_{gc} . Portanto a tensão para a terra no cabo condutor será dada por : $e_c - k_{gc} e_a$. Logo a diferença de potencial entre o cabo guarda e o condutor pode ser expressa por

$$DP = e_a - e_c = e_a \cdot (1 - k_{gc}) \quad (2.27)$$

Como neste caso específico, a descarga atinge o topo da torre tem-se : $e_a = V_i$, que substituindo em (2.27) resulta na diferença

de potencial entre o cabo guarda e o condutor em relação ao topo da torre (ou seja na diferença de potencial na cadeia de isoladores), pode ser determinada por:

$$DP = V_t \cdot (1 - k_{gc}) \quad (2.28)$$

Onde:

DP : diferença de potencial entre cabo guarda e condutor em relação ao topo da torre.

e_g : tensão em relação à terra ,do cabo guarda, medida no topo da torre atingida em kV.

e_c : tensão em relação à terra, do cabo condutor sob consideração, medida no mesmo ponto anterior em kV.

Para analisar os efeitos desta diferença é necessário o conhecimento prévio de alguns parâmetros fundamentais para a análise, tais como : impedância de surto de cabo guarda , impedância do canal da descarga, impedância de surto da torre, impedância de surto de pé de torre ,entre outros. Alguns destes parâmetros, serão vistos mais adiante (de 2.5 a 2.7), por serem fundamentais para o estudo proposto neste trabalho, independente da teoria que se empregue. Por exemplo, Jordan em seu trabalho clássico [ref 1,2,3] destaca sobretudo a importância das impedâncias de surto de cabo guarda e de torre de transmissão ,utilizando os valores e as metodologias até então consagradas.

2.5. Impedância de surto de cabo guarda [ref 3, 31]

Para um cabo guarda singelo ,tendo um raio efetivo r sob condições de surto , situado em uma posição horizontal h ,sob o plano de terra real (plano cujo potencial é zero), a impedância de surto será dada por :

$$Z_{ii} = 138.2 \cdot \log_{10} (2h/r_g) \Omega \quad (2.29)$$

Para dois cabos guarda usando a mesma notação anterior e considerando m ,como sendo a separação horizontal entre os cabos guarda,tem-se :

$$Z_{ii} = 138.2 \log_{10} (2h/\sqrt{m \cdot r_g}) \Omega \quad (2.30)$$

$$Z_{ij} = 138.2 \log_{10} (2h/m) \Omega \quad (2.31)$$

A primeira expressão refere-se à impedância própria e a segunda à mútua.

Expressões similares podem ser obtidas para mais de dois cabos guarda ,desde que seja desejado. Entretanto, foge ao objetivo deste estudo por não serem encontrados com frequência.

2.6. Impedância de surto de torres de transmissão

A impedância de surto de uma torre de transmissão pode ser obtida a partir de um modelo que representa a torre por um cilindro vertical, tendo como comprimento, a altura da torre real sobre a terra. Seu raio será igual ao raio equivalente de uma torre real. Ainda, para que esteja de acordo com a teoria das imagens, deve-se considerar no nosso sistema, um cilindro imagem, simétrico ao anterior em relação ao plano de terra real.

Fazendo-se estas considerações, a impedância de surto Z_t , será dada por [ref 3]:

$$Z_t = 138.2 \log_{10} (h/r_t) + 90.0 (r_t/h) - 60.0 \quad \Omega \quad (2.32)$$

É importante lembrar, que na expressão (2.32) se considera a altura do plano de terra como sendo zero, hipótese esta admitida nos estudos realizados por Jordan, sem o qual, teria de se utilizar uma formulação mais geral [ref 2].

Jordan definiu também o raio equivalente de uma estrutura complexa como sendo:

$$r_t = \frac{\text{perímetro da seção}}{2 \cdot \pi} \quad (2.33)$$

A determinação do raio equivalente de uma estrutura de linha de transmissão, embora seja um dos pontos bastante estudado, não há ainda um consenso a respeito, despertando uma certa polêmica, mesmo na aplicação da definição elaborada por Jordan.

Jordan sugere que ao dimensionar o perímetro da estrutura, deve-se esquecer os braços da torre e imaginá-la como inscrita em um tubo.

2.7. Impedância de surto do canal da descarga

O canal de uma descarga atmosférica que atinge a estrutura de uma linha de transmissão, pode ser considerado de forma grosseira, como sendo um condutor vertical, que carrega uma corrente de igual valor em todo o comprimento do flash. Utilizando-se deste raciocínio para determinar o valor da impedância de surto do canal da descarga, obtem-se [ref 3]:

$$Z_s = 69.1 \cdot \left(\log_{10} \left(4nh_s \cdot (h_s - nh_s)(nh_s + 2a) / [r^2 \cdot (h_s + nh_s + 2a)] \right) \right. \\ \left. + (1/n) \log_{10} \left((h_s + 2a) / [(1-n)(h_s + nh_s + 2a)] \right) \right. \\ \left. + (2a/nh_s) \cdot \log_{10} \left[(h_s + 2a)(nh_s + 2a) / (2a)(h_s + nh_s + 2a) \right] \right) \\ - 60.0$$

(2.34)

onde: h_s = comprimento do "flash"

r = raio efetivo do "flash"

n = parte do flash (na porção mais baixa)
sobre a qual se deseja calcular
a impedância de surto

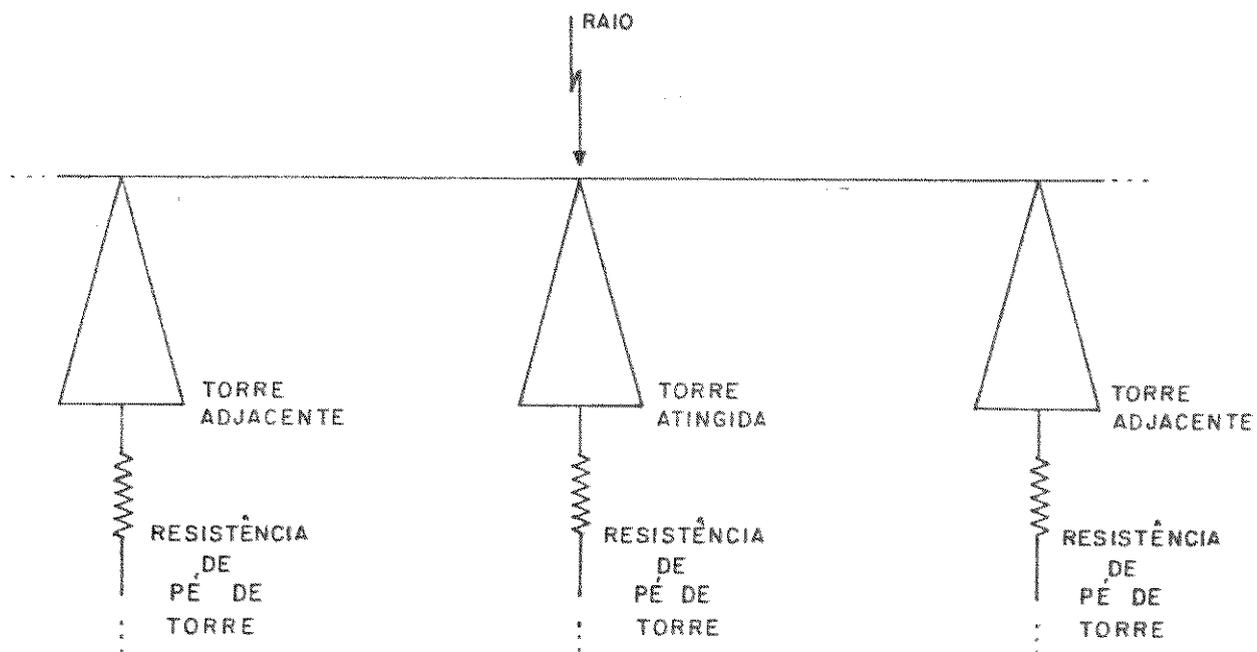
a = profundidade do plano de terra verdadeiro

Z_s = impedância de surto sobre a parte mais
baixa, selecionada do flash atmosférico.

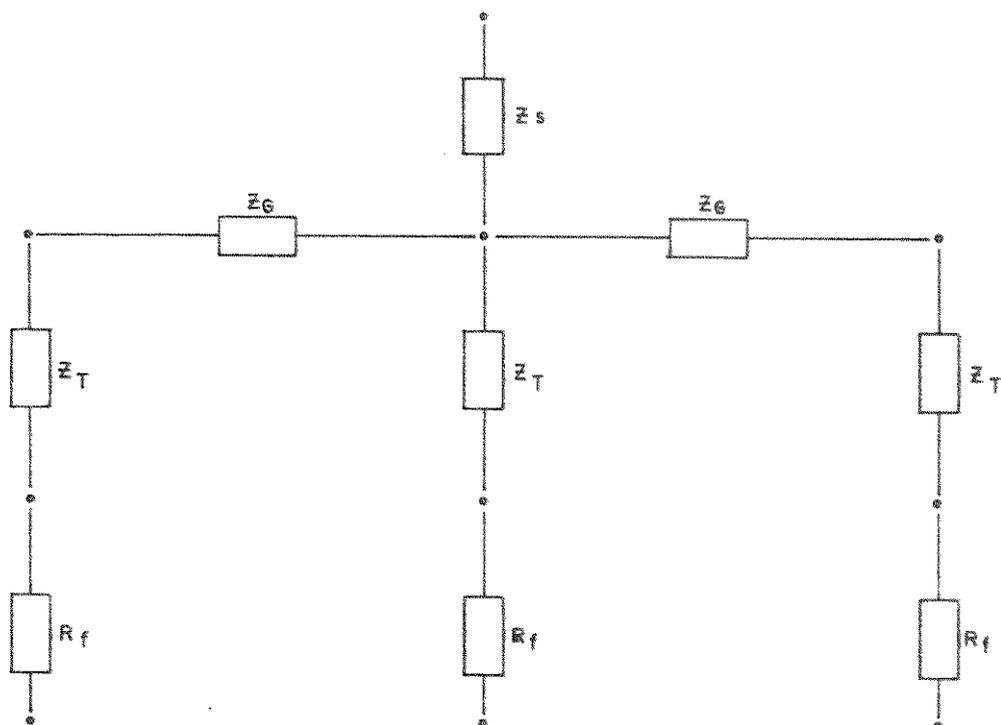
O valor de Z_s depende da região onde esteja fazendo o estudo, pois é comum se trabalhar com os parâmetros da descarga mais prováveis de ocorrer nesta localidade. Para isto, deve haver um banco de dados probabilístico, dos parâmetros da descarga para esta região. Jordan assumiu em seu trabalho um valor de 200 Ω [ref 3].

CAPÍTULO 2

ILUSTRAÇÕES



(FIG.2.1) SISTEMA CONSIDERADO NO CÁLCULO DA SOBRETENSÃO NA CADEIA DE ISOLADORES



(FIG.2.2) MODELO UTILIZADO PARA REPRESENTAR O SISTEMA

Z_s - IMPEDÂNCIA DE ONDA DO CANAL DE DESCARGA
 Z_T - IMPEDÂNCIA DE ONDA DE TORRE DE TRANSMISSÃO
 R_f - RESISTÊNCIA DE PÉ DE TORRE
 Z_G - IMPEDÂNCIA DE ONDA DO CABO-GUARDA

CAPÍTULO 3

CÁLCULO DE SOBRETENSÕES DE ACORDO COM A TEORIA DE CAMPO

3.1. Considerações Iniciais

Esta abordagem para o problema do desempenho de linhas de transmissão surgiu, como foi discutido no capítulo 1, a partir do questionamento da metodologia, apresentada no capítulo anterior. Foi observado que o número de flashovers em linhas de transmissão era muito superior, ao que deveria ser esperado, utilizando a teoria das reflexões sucessivas [ref. 6].

A intenção inicial era elaborar um trabalho que incluísse características das descargas atmosféricas e os fenômenos transitórios que ocorressem na torre, nos cabos guarda e nos condutores.

Esta teoria foi desenvolvida por Wagner, em um conjunto de três artigos [ref. 6, 8, 9], e por Lundholm [ref. 7], onde fundamentam as idéias básicas do método. Destaca-se entre os quatro trabalhos, o mais recente [ref. 9], por dar um tratamento mais objetivo e eficiente à teoria de campo.

Ao descrever a teoria, Wagner se opunha a dois fatos importantes do método anterior [ref. 8].

- i) Acreditava que o conceito da impedância de surto de torres de transmissão não pudesse ser aceito até que demonstrado teoricamente, através dos métodos mais rigorosos e precisos da teoria de campo.
- ii) Além do efeito da corrente injetada no topo da torre, deveria ser considerados o efeito causado pela carga e corrente no canal da descarga (fig. 3.9).

Para o desenvolvimento desta teoria numa forma computacionalmente aplicável, algumas hipóteses tiveram de ser admitidas por Wagner:

- 3.1.1. Toda a abordagem é feita, assumindo que o topo da torre foi atingido por uma descarga [ref. 6], e a análise feita a partir deste instante [ref. 6].
- 3.1.2. A torre e o cabo guarda são considerados como cilindros condutores com a carga fluindo pela sua linha de centro [ref. 7].
- 3.1.3. Antes que a descarga de retorno inicie seu percurso pelo canal, uma carga negativa será assumida como se distribuindo ao longo do caminho descrito pelo raio $i=v.c.q$ [ref. 7].
- 3.1.4. No instante inicial, a descarga de retorno começa o percurso a partir do ponto de contato. Esta parcela da descarga se desloca verticalmente no sentido ascendente pelo canal da descarga, cancelando a carga negativa ao canal [ref. 7]. (fig. 3.9B)
- 3.1.5. Neste mesmo instante, uma correspondente onda de carga negativa desloca-se para baixo, pela torre e cabos-guarda [ref. 7]. (fig. 3.9C)
- 3.1.6. A descarga de retorno tem uma velocidade de propagação, muito menor que a velocidade da luz no vácuo, c . Denotaremos a mesma por $v.c$. Assumindo v como 0.3 [ref. 7,8,9], (ou seja 30% da velocidade da luz no vácuo).
- 3.1.7. No desenvolvimento analítico do método admite-se um degrau para a forma de onda da descarga. [ref. 7].
- 3.1.8. A velocidade de todas as ondas de corrente e carga será constante, por hipótese, e nenhuma atenuação ou distorção da forma de onda será considerada. [ref. 7].

3.1.9. O caminho da descarga é assumido como tendo uma impedância infinita [ref. 7]. ($Z_g = \infty$)

3.1.10. A impedância de pé de torre será assumida como sendo zero. [ref. 8]. ($Z_f = 0$)

Dentro da abordagem de campo é necessário observar a existência de dois métodos independentes para efetuar a análise das consequências do fenômeno focalizado. O primeiro deles, conhecido como método do cancelamento de campo, oferece uma visão do deslocamento de cargas nos elementos condutores do sistema (consideração 3.1.2) [ref. 6]. O segundo Loop-voltage utiliza a formulação eletromagnética e a hipótese do item 3.1.2, para efetuar simplificações no equacionamento analítico, a fim de torná-lo eficiente [ref. 7].

De acordo com Wagner, devem ser consideradas tanto a componente da descarga injetada no sistema, quanto a de retorno, pois cada uma contribui com uma parcela na tensão sobre a cadeia de isoladores. [ref. 8] Apesar de em determinadas situações, uma das parcelas ser preponderante no valor total, a outra não deve ser desprezada. Sabe-se que para descargas com frentes de onda rápidas a tensão produzida pela corrente e carga injetada no sistema é dominante, enquanto que para frentes de onda mais lentas, a parcela de retorno da descarga contribui mais intensamente no resultado final [ref. 8]. Esta era a idéia de Wagner ao propor o novo método.

Assim como Wagner fez, será adotada neste trabalho a metodologia de "Loop Voltage" para a corrente injetada no sistema e a de "cancelamento de campo", para a parcela de retorno da descarga.

3.2. Tensão na Cadeia de Isoladores Produzida, pela Corrente e Carga Injetada na Torre e Cabo-Guarda.

Da teoria eletromagnética, sabe-se que o campo elétrico em regime, variável com o tempo vale [ref 37,38]:

$$E = - \nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3.1)$$

V : potencial elétrico

\vec{A} : vetor potencial magnético

Por outro lado, o potencial entre dois pontos A,B, é dado por:

$$V_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{ds} \quad (3.2)$$

Aplicando sucessivamente, as equações (3.1) e (3.2) aos pontos da cadeia de isoladores, teremos o potencial através da mesma. Entretanto, esta não é a forma mais simplificada de se calcular o potencial desejado.

Utiliza-se, o método "Loop Voltage", para simplificar a integração anterior. Assim o caminho de integração será de um percurso fechado, que envolve a cadeia de isoladores [ref. 6].

Com isso, se obtém o cancelamento de todos os efeitos das cargas, levando-se em consideração, apenas o efeito da corrente [ref. 6]. Na verdade, apesar de as cargas produzirem campos substanciais nas partes individuais do sistema, estes campos integrados ao longo de um caminho fechado, são sempre zero [ref. 7].

Em todo o desenvolvimento desta metodologia, a corrente na torre, representada por I_t e a corrente no cabo guarda, representada por I_g , serão chamadas de funções forçantes ("Forcing Functions") [ref. 6].

Um conceito muito importante neste método, é o da esfera de influência (fig. 3.1), definida como sendo aquela com centro no ponto onde a corrente se origina, e raio dado pelo produto da velocidade da luz pelo tempo t (medido a partir do momento que a descarga atinge a torre). Fisicamente, ela representa a região do espaço perturbada, ou

influenciada por este campo. Ou seja, o campo elétrico produzido pela corrente em questão, no instante t , fora da esfera, tem valor nulo. [ref. 7].

Também se deve lembrar que o campo elétrico tangencial em condutores vale zero. Este fato associado à consideração 3.1.2, resultam em um campo elétrico nulo no conjunto torre + cabo guarda + condutor. Entretanto, o conjunto em questão, é perturbado pelo campo elétrico provocado pela descarga. Portanto, sendo condição prévia, que o campo elétrico no conjunto seja zero, além do campo elétrico da descarga, outra componente deve estar presente para anular a resultante. Esta componente é gerada, pelo movimento de carga e corrente nos elementos do sistema [ref. 6,8].

Enfim se pode escrever o campo elétrico em qualquer ponto do sistema considerado como sendo a soma de quatro componentes [ref. 6,8].

$$\vec{E} = \vec{E}_c + \vec{E}_i \quad (3.3)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_{fc} + \vec{E}_{fi} + \vec{E}'_c + \vec{E}'_i \quad (3.4)$$

$$\vec{E}_c = \vec{E}_{fc} + \vec{E}'_c \quad (3.5)$$

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{fi} + \vec{E}'_i \quad (3.6)$$

\vec{E}_{fc} : campo instantâneo produzido pelas cargas forçantes.

\vec{E}_{fi} : campo instantâneo produzido pelas correntes forçantes.

\vec{E}'_c : campo produzido pelas cargas induzidas.

\vec{E}'_i : campo produzido pelas correntes induzidas.

\vec{E}'_c : campo total causado pelas cargas.

\vec{E}_t : campo total causado pelas correntes.

w : caminho fechado que inclui a cadeia de isoladores.

Aplicando-se pois a idéia do método (integrar o campo ao longo de um percurso fechado) à equação (3.4), tem-se:

$$\oint_V \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_V \vec{E}_{fc} \cdot d\vec{s} + \oint_V \vec{E}_{fi} \cdot d\vec{s} + \oint_V \vec{E}'_c \cdot d\vec{s} + \oint_V \vec{E}'_i \cdot d\vec{s} \quad (3.7)$$

Mas toda a parcela relacionada com a carga tem valor zero, daí:

$$\oint_V \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_V \vec{E}_{fi} \cdot d\vec{s} + \oint_V \vec{E}'_i \cdot d\vec{s} \quad (3.8)$$

Se na equação anterior for desprezada a parcela \vec{E}'_i ; por ser de pequena magnitude, por provocar uma grande simplificação nos cálculos e por produzir um resultado mais conservativo, tem-se:

$$\oint_V \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_V \vec{E}_{fi} \cdot d\vec{s} \quad (3.9)$$

Para integrar o campo elétrico, torna-se necessário o estabelecimento de algumas observações a cerca do caminho escolhido, w. Lundholm ao descrever inicialmente o método [ref. 7], estabeleceu duas premissas simplificadoras para este caminho de integração [ref. 7].

(A) Deve incluir o provável caminho de "flashover", neste caso: A cadeia de isoladores.

(B) Com exceção do caminho de "flashover", o restante do percurso de integração, deve ser formado por condutores (condição 3.1.3.), ou estar fora da esfera de influência. Por exemplo na fig. 3.2 (omn).

Antes que seja feita a aplicação da equação 3.9 ao problema, é importante distinguir dois objetivos para este método:

(A) Determinar a divisão de corrente entre torre e cabo guarda, pois estes valores são essenciais para o cálculo seguinte.

(B) Determinar o potencial através da cadeia de isoladores.

3.2.1. Divisão de Corrente

A determinação da divisão da corrente da descarga (fig. 3.2) é essencial, para que seja feito o cálculo da tensão ao longo da cadeia de isoladores.

Para resolver o problema da divisão de corrente, a solução mais prática é a proposta por Lundholm [ref. 7], que consiste em aplicar o método "Loop voltage".

Esta solução não é imediata, pois a cada período de $\tau_{T+I} = 2h/c$ do tempo de propagação da onda de corrente pela torre e sua imagem, surgem novas ondas de corrente no ponto de contato da descarga com o topo da torre. Portanto será feita a determinação da distribuição de corrente a cada período τ_{T+I} , como proposto por Lundholm e desenvolvido por Wagner [ref. 8].

3.2.1.1. Divisão de Corrente em $t = 0$

Assumindo todas as condições do item 3.1, assim como as apresentadas no item 3.2 como verdadeiras, e tomando na fig. 3.2 o percurso fechado \overline{omno} , ao aplicar o método "loop voltage", tem-se.

$$\oint_{\overline{omno}} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_0^m E_i \cdot ds + \int_m^n E_i \cdot ds + \int_n^o E_i \cdot ds$$

Porém, o campo ao longo do caminho mn é zero pois se encontra fora da esfera de influência e o campo elétrico total, ao longo de um

condutor é zero. Logo:

$$\oint_{\text{omno}} E \, ds = 0 \quad \text{e} \quad \int_m^n E_i \, ds = 0$$

assim, substituindo-se na equação anterior, tem-se:

$$\boxed{\int_0^m E_i \, ds + \int_n^0 E_i \, ds = 0} \quad (3.10)$$

Por outro lado, a integral de linha do campo elétrico de uma onda de corrente que se desloca ao longo de um eixo condutor à velocidade da luz c , é dada por; (fig. 3.1) [ref. 7,8].

$$\boxed{\int_{P_1}^{P_2} \vec{E}_i \cdot \vec{ds} = -30I \cdot \ln \frac{(ct-x_1)}{(ct-x_2)}} \quad (3.11)$$

Logo aplicando a equação (3.11) a cada parcela da equação (3.10) tem-se:

$$(A) \quad \int_0^m E_i \, ds = -30 I_g \ln \frac{(ct)-r_t}{(ct)-x} - 30 I_g \ln \frac{(ct)-(-r_t)}{(ct)-(-x)}$$

Associando as parcelas resulta em:

$$\int_0^m E_i \, ds = -30 I_g \ln \frac{(ct)^2 - r_t^2}{(ct)^2 - x^2}$$

Da fig. 3.2 tem-se:

- (i) $ct^2 = (x+r_t)^2 + r_g^2$ onde: x é a distância de o a m
- (ii) $ct \gg r_t$ r_t : raio da torre
- (iii) $x \gg r_t$ r_g : raio do cabo guarda

Aplicando (i), (ii) e (iii) na equação anterior obtem-se sucessivamente:

$$\int_0^m E_i \, ds = -30 I_g \ln \frac{(ct)^2 (1 - (r_t/ct)^2)}{(r_g)^2}$$

$$\int_0^m E_i ds = -I_g \left[60 \ln \frac{(ct)}{(r_g)} \right] \quad (3.12)$$

$$(B) \quad \int_0^n E_i ds = -30 I_t \ln \frac{(ct) - r_g}{(ct) - x}$$

Novamente a partir da fig 3.2 tem-se:

(i) $(ct)^2 = (x+r_g)^2 + r_t^2$ onde x é a distância de o a n

(ii) $(ct) \gg r_g$

(iii) $(x) \gg r_g$

(iv) $(x) = ct - 1/\sqrt{2} \cdot \frac{r_t^2}{(ct)}$

Assim a equação anterior transforma-se sucesivamente em:

$$\int_0^n E_i ds = -30 I_t \ln \frac{(ct) \cdot (1 - (r_g/ct))}{ct - (ct - 1/\sqrt{2} r_t^2 / (ct))}$$

$$\int_0^n E_i ds = -I_t \left[60 \ln \frac{\sqrt{2} \cdot (ct)}{(r_t)} \right] \quad (3.13)$$

(C) Aplicando a lei de Kirchoff das correntes, no ponto de contato da descarga com a torre, tem-se:

$$I_s = 2I_g + I_t \quad (3.14)$$

onde I_s é a corrente da descarga.

Definindo-se a impedância de surto transitória de cabo-guarda e de torre na forma abaixo:

$$Z'_g = 60 \ln \frac{(ct)}{r_g} \quad (3.15)$$

$$Z'_t = 60 \ln \frac{\sqrt{2} \cdot (c.t)}{r_t} \quad (3.16)$$

As expressões (3.12) e (3.13), podem ser reescritas como:

$$\int_0^m E_i \cdot ds = -I_g \cdot Z'_g \quad (3.17)$$

$$\int_0^n E_i \cdot ds = -I_t \cdot Z'_t \quad (3.18)$$

Finalmente substituindo (3.17) e (3.18) em (3.10) e resolvendo em conjunto com (3.14) resulta na equação (3.19) a seguir:

$$I_g = \frac{Z'_t}{Z'_g + 2Z'_t} \cdot I_* \quad (3.19)$$

É importante lembrar que nesta expressão está implícita a hipótese de que a forma de onda retangular permanece tanto na corrente que circula pela torre quanto na que circula pelo cabo-guarda.

3.2.1.2. Divisão de Corrente em $t = 2h/c$

A corrente I_g é variável com o tempo, pois Z'_t e Z'_g também o são. Além do que, após um tempo superior a duas vezes o tempo de propagação da onda pela torre e imagem ($2h/c$), a distribuição de ondas de corrente se altera, e a situação será a descrita na Fig. 3.3. Tem-se após este tempo, que a onda $-I_t$, originária no topo da torre imagem,

atinge o topo da torre real. No ponto de descontinuidade, essa onda dá

origem a : duas ondas I'_g que circulam nos cabos guarda e a uma onda I'_t (refletida), descendo pela torre e a uma nova onda I_t , que se soma a $-I_t$ zerando a corrente no canal da descarga (condição 3.1.9).

Aplicando-se pois o método da tensão de loop ao sistema da fig. 3.3, para que seja determinada a divisão de corrente neste tempo, tem-se:

$$\oint_{\text{omnpo}} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_0^m E_1 \cdot ds + \int_m^n E_1 ds + \int_n^p E_1 ds + \int_p^o E_1 ds$$

Portanto pelo mesmos motivos expostos no item 3.2.1.1., a expressão acima resulta em :

$$\int_0^m E_1 \cdot ds + \int_p^o E_1 ds = 0 \quad (3.20)$$

Utilizando as simplificações análogas àquelas do item 3.2.1.1. ,para a equação 3.10 obtém-se:

$$(A) \quad \int_0^m E_1 ds = -I_g 60 \ln \frac{2h}{r_g} - I'_g 60 \ln \frac{ct'}{r_g}$$

Onde de acordo com a fig. 3.3 e [ref. e] :

$$ct' = ct - 2h \quad e \quad Z_g = Z'_g \quad \text{para } ct = 2h \quad e \quad Z''_g = \ln \frac{ct'}{r_g}$$

Substituindo-se na equação anterior tem-se:

$$\int_0^m E_1 \cdot ds = -I_g Z_g - I'_g Z''_g \quad (3.21)$$

$$(B) \quad \int_0^p E_1 ds = -30 I_t \ln \frac{(ct - r_g)}{(ct - x)} - 30 I'_t \ln \frac{(ct' - r_g)}{(ct' - x)}$$

Fazendo as simplificações análogas às do item 3.2.1.1 para tem-se:

$$\int_0^P E_1 ds = -I_t \left[30 \ln \left(\frac{ct}{2ct'} \right) \right] - I'_t \left[60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct'}{r_t} \right) \right] \quad (3.22)$$

Definindo os valores entre colchetes anteriores, como:

$$Z'_{t0} = 30 \ln \left(\frac{ct}{2ct'} \right) \quad (3.23)$$

$$Z'_t = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct'}{r_t} \right) \quad (3.24)$$

A expressão (3.22) pode ser reescrita por:

$$\int_0^P E_1 ds = -I_t \cdot Z'_{t0} - I'_t \cdot Z'_t \quad (3.25)$$

Por outro lado, aplicando a lei das correntes de Kirchoff ao ponto de contato da descarga, para um instante de tempo posterior ao dobro do tempo de propagação na torre, tem-se:

$$I_t + 2I'_g + I'_t = 0 \quad , \text{ logo:}$$

$$\boxed{2I'_g + I'_t = -I_t} \quad (3.26)$$

A equação anterior (3.26), juntamente com a equação (3.20), após substituídas as equações (3.22), (3.23) e (3.24), permitem a determinação das correntes I'_g e I'_t , logo:

$$\begin{aligned} -I'_g Z'_g - I'_t Z'_t &= -I_t Z'_{t0} - I'_t Z'_t \quad , \\ -I'_g Z'_g - I'_t Z'_t &= -I_t Z'_{t0} - (-I_t - 2I'_g) Z'_t \quad , \\ (Z'_g + 2Z'_t) I'_g &= -I_t Z'_{t0} + I_t Z'_t + I'_g Z'_g \end{aligned}$$

Colocando I'_g em evidência:

$$-I'_a = \frac{I'_a Z'_a + I'_t (Z'_t - Z'_{t0})}{Z'_a + 2Z'_a} \quad (3.27)$$

3.2.1.3. Divisão de corrente em $t = 4h/c$

Pode-se determinar com as equações (3.14), (3.19), (3.27) e (3.26) completamente o sistema de ondas de corrente até qualquer instante menor que $4h/c$. Esta situação perdura até que estas novas ondas completem uma viagem pela torre e por sua imagem. Ocorrendo isto, novas ondas irão surgir a partir do ponto de contato da descarga com o topo da torre. Deve-se então, fazer um novo estudo das ondas de corrente que surgem neste ponto.

Sendo pois, análogo às situações dos itens 3.2.1.1 e 3.2.1.2., tem-se então para $t > 4h/c$:

$$I'_t = -2 I'_a - I'_t \quad (3.28)$$

$$I'_a = - \frac{(I'_a + I'_t) Z'_a + I'_t (Z'_t - Z'_{t0})}{Z'_a + 2Z'_t} \quad (3.29)$$

Onde:

$$Z'_{t0} = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r_t} \right) \quad (3.30)$$

$$Z'_a = 60 \ln \left(\frac{ct}{r_t} \right) \quad (3.31)$$

$$Z'_{i0} = 60 \ln \left(\frac{ct''}{r_g} \right) \quad (3.32)$$

$$ct'' = ct' - 2h \quad (3.33A)$$

Assim o sistema fica determinado até $t = 6h/c$, quando novas ondas de corrente surgirão a partir do ponto de contato da descarga com a torre. Este processo de reflexão e transmissão de novas ondas de corrente irá se repetir em intervalos de tempo iguais a $2h/c$, sempre de forma análoga ao que foi apresentado neste item.

É importante ressaltar que nas simulações e ensaios a observação do fenômeno é feita quase sempre para $t < 3\tau_{T+I}$ [ref.7,8,9,1].

Pode-se, então resumir o item 3.2.1 com a Tabela 3.1, a seguir:

TABELA 3.1 (DETERMINAÇÃO DE CORRENTES)

Δt e CORR. A DETERMINAR	EQUAÇÕES BÁSICAS	IMPEDÂNCIAS
$0 \leq t < \frac{2h}{c}$ I_t, I_a	$I_t + 2I_a = I_s$ $I_a = \frac{Z'_t}{Z'_a + 2 \cdot Z'_t} I_s$	$Z'_t = 60 \ln \left[\sqrt{2} \left(\frac{ct}{r_t} \right) \right]$ $Z'_a = 60 \ln \left(\frac{ct}{r_a} \right)$
$2h \leq t < \frac{4h}{c}$ $t' = t - \frac{2h}{c}$ I'_t, I'_a	$I'_t + 2I'_a = -I_t$ $-I'_a = \frac{I_a Z'_a + I_t (Z'_t - Z'_{t0})}{Z'_a + 2 \cdot Z'_t}$	$Z'_{t0} = 30 \ln \left(\frac{ct}{2ct'} \right)$ $Z'_t = 60 \ln \left[\sqrt{2} \left(\frac{ct'}{r_t} \right) \right]$ $Z'_a = 60 \ln \left(\frac{ct'}{r_a} \right)$
$4h \leq t < \frac{6h}{c}$ $t'' = t' - \frac{2h}{c}$ I''_t, I''_a	$I''_t + 2I''_a = -I'_t$ $-I''_a = \frac{(I_a + I'_a) Z'_a + I'_t (Z'_t - Z'_{t0})}{Z'_a + 2 \cdot Z'_t}$	$Z'_{t0} = 30 \ln \left(\frac{ct'}{2ct''} \right)$ $Z''_t = 60 \ln \left[\sqrt{2} \left(\frac{ct''}{r_t} \right) \right]$ $Z''_a = 60 \ln \left(\frac{ct''}{r_a} \right)$
$6h \leq t < \frac{8h}{c}$ $t''' = t'' - \frac{2h}{c}$ I'''_t, I'''_a	$I'''_t + 2I'''_a = -I''_t$ $I'''_a = \frac{(I_a + I'_a + I''_a) Z'_a + I''_t (Z'_t - Z'_{t0})}{Z'_a + 2 \cdot Z'_t}$	$Z'_{t0} = 30 \ln \left(\frac{ct''}{2ct'''} \right)$ $Z'''_t = 60 \ln \left[\sqrt{2} \left(\frac{ct'''}{r_t} \right) \right]$ $Z'''_a = 60 \ln \left(\frac{ct'''}{r_a} \right)$

3.2.2. Tensão Através da Cadeia de Isoladores

Determinadas as correntes em cada instante e em cada ponto do sistema atingido pela descarga, o passo seguinte do método "Loop Voltage" é o cálculo em cada instante de tempo, da tensão através da cadeia de isoladores.

Assim como no caso das correntes, a tensão na cadeia de isoladores dependerá substancialmente do tempo de propagação da onda ao longo da torre.

Seguindo portanto, as sugestões de Lundholm para a escolha do caminho de integração tem-se para a situação descrita na Fig. 3.4 que:

i) A tensão na cadeia de isoladores é dada por:

$$V_I = V_d - V_{c'} = - \int_{c'}^d \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.33)$$

Onde: V_I é tensão através da cadeia de isoladores.

ii) Aplicando a equação (3.9) e (3.3) à situação descrita na fig. (3.5) desprezando a parcela provocada por cargas, tem-se:

$$\oint_V \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_0^a \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_b^{c'} \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_{c'}^d \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_d^0 \vec{E} \cdot d\vec{s} = \\ \int_0^a \vec{E}_i \cdot d\vec{s} + \int_a^b \vec{E}_i \cdot d\vec{s} + \int_b^{c'} \vec{E}_i \cdot d\vec{s} + \int_{c'}^d \vec{E}_i \cdot d\vec{s} + \int_d^0 \vec{E}_i \cdot d\vec{s} \quad (3.34)$$

Mas na equação anterior, no membro do meio da igualdade, só a quarta parcela não é nula, pois as outras, ou são caminho condutores (torres e cabos guarda), ou estão fora da esfera de influência. Ainda com relação à equação anterior, no membro à direita do último sinal de igualdade, as integrais do campo elétrico, causados por corrente, são nulas ao longo do caminhos ab e c'd. No primeiro caso, por estar fora da esfera de influência. No segundo, por o caminho ser perpendicular à

direção de todas as correntes do sistema. Portanto, combinando (3.33) e (3.34) com as simplificações descritas anteriormente (item (ii) da página anterior), tem-se:

$$V_I = - \int_0^a \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} - \int_b^{c'} \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} - \int_d^0 \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} \quad (3.35)$$

Se a definição de tensão através da cadeia de isoladores fosse feita pela fig 3.4 o caminho \overline{cd} melhor representaria este valor. Entretanto, aplicando os conceitos de campo causado por corrente, e campo elétrico, em torno de um percurso fechado, é de fácil observação, a igualdade entre a integral do campo elétrico \overline{dc} e a integral do campo elétrico de \overline{ec} .

Assim como no caso da distribuição de correntes, torna-se necessário particionar os cálculos da tensão na cadeia de isoladores, de acordo com o decorrer do fenômeno no tempo.

3.2.2.1. Tensão na Cadeia de Isoladores para $0 < t \leq \frac{x_1}{c}$

De acordo com o que já foi mostrado para a tensão causada por um condutor percorrido por uma onda de carga e corrente, a tensão na cadeia de isoladores para $t < x_1/c$ (Fig. 3.5) é zero. Até este instante, a onda de carga e corrente ainda não atingiu o ponto d, necessário para perturbar o ponto c'.

$$V_I = 0 \quad / \quad 0 \leq t \leq (x_1/c) \quad (3.36)$$

3.2.2.2. Tensão na Cadeia de Isoladores para $x_1/c < t \leq \frac{2h-x_1}{c}$

Para este intervalo a onda de corrente I_1 , já iniciou a geração de uma diferença de potencial na cadeia de isoladores. Entretanto, ela não atingiu o ponto correspondente ao condutor na torre imagem. Então:

$$V_I = - \int_{c'}^d \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - \int_0^a \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} - \int_b^{c'} \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} - \int_d^0 \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} \quad (3.37)$$

Portanto por um raciocínio análogo àquele usado para se obter (3.12) e (3.13) e pela aplicação da equação (3.11) à figura 3.5, tem-se:

$$(A) \int_0^a \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - I_g \left[60 \ln \left| \frac{ct}{r_g} \right| \right],$$

$$\int_0^a \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - I_g Z'_g, \text{ onde } Z'_g = 60 \ln \left| \frac{ct}{r_g} \right| \quad (3.38)$$

$$(B) \int_{c'}^b \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - 30 I_g \left(\ln \left| \frac{ct - r_t}{ct - \sqrt{(ct)^2 - d^2}} \right| + \ln \left| \frac{ct + r_t}{ct - \sqrt{(ct)^2 - d^2}} \right| \right),$$

$$\int_{c'}^b \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - I_g \left[60 \ln \left| \frac{ct}{d} \right| \right],$$

$$\int_{c'}^b \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - I_g Z'_{gc}, \text{ onde } Z'_{gc} = 60 \ln \left| \frac{ct}{d} \right| \quad (3.39)$$

$$(C) \int_0^d \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - 30 I_t \left(\ln \left| \frac{ct + r_g}{ct - x_1} \right| \right), \text{ como } r_g \ll ct, \text{ então:}$$

$$\int_0^d \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - I_t \left[30 \ln \left| \frac{ct}{ct - x_1} \right| \right],$$

$$\int_0^d \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} = - I_t \Delta Z_t, \text{ onde } \Delta Z_t = 30 \ln \left| \frac{ct}{ct - x_1} \right| \quad (3.40)$$

Substituindo (3.38), (3.39) e (3.40) em (3.37) e usando (3.10).

$$V_I = I_t (Z'_t - \Delta Z'_t) - I'_g \cdot Z'_{gc} \text{ para } x_1/c < t \leq (2h - x_1)/c \quad (3.41)$$

3.2.2.3. Tensão na Cadeia de Isoladores para $\frac{(2h-x_1)}{c} < t \leq \frac{(2h+x_1)}{c}$

Neste intervalo, como pode ser visto na Fig. 3.6, começa a surgir a perturbação, provocada pela onda originada no topo da torre imagem ($-I_1$).

As ondas que surgem no sistema em $t=2h/c$, ainda não se propagaram o suficiente para perturbar o sistema, atingindo o ponto de sustentação da cadeia de isoladores (d , no modelo da figura 3.6). Sabe-se que:

$$V_I = - \int_{c'}^d \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} = - \int_0^a \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} - \int_b^{c'} \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} - \int_d^0 \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} \quad (3.35)$$

Mas, lembrando que:

$$(A) \int_0^a \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} = -I_a \left[60 \ln \left| \frac{ct}{r_a} \right| \right] = -I_a Z'_a \quad (3.42), \text{ com } Z'_a \text{ idêntico ao de (3.38)}$$

$$(B) \int_{c'}^b \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} = -30I_a \left\{ \ln \left| \frac{ct - r_t}{ct - \sqrt{(ct)^2 - d^2}} \right| + \ln \left| \frac{ct + r_t}{ct - \sqrt{(ct)^2 - d^2}} \right| \right\} +$$

$$-30(-I_a) \left\{ \ln \left| \frac{ct - r_t}{ct - \sqrt{(ct)^2 - d_1^2}} \right| + \ln \left| \frac{ct + r_t}{ct - \sqrt{(ct)^2 - d_1^2}} \right| \right\}$$

$$\int_{c'}^b \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} = -I_a \left[60 \ln \frac{(ct)}{d} \right] + I_a \left[60 \ln \frac{(ct)}{d_1} \right]$$

$$\int_{c'}^b \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} = -I_a Z'_{ac} + I_a Z'_{aci} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned}
(C) \int_d^0 \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} &= -30I_t \left\{ \ln \left| \frac{ct}{ct-x_1} \right| \right\} -30I_t \left\{ \ln \left| \frac{ct+r_g}{ct-x_1} \right| \right\} + \\
&+30I_t \left\{ \ln \left| \frac{ct}{ct-(2h-x_1)} \right| \right\} \quad , \text{reescrivendo:} \\
\int_d^0 \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} &= I_t \left\{ -30 \ln \left| \frac{ct}{ct-x_1} \right| \right\} + I_t \left\{ -30 \ln \left| \frac{ct+r_g}{ct-x_1} \right| \right\} + \\
&+ I_t \left\{ 30 \ln \left| \frac{ct}{ct-(2h-x_1)} \right| \right\} \\
\int_d^0 \vec{E}_1 \cdot d\vec{s} &= -I_t \Delta Z'_t - I_t \cdot Z'_t + I_t \Delta Z'_{ti} \quad (3.44)
\end{aligned}$$

onde: Z'_t e $\Delta Z'_t$ já foram definidos em (3.16) e em (3.40) e

$$\Delta Z'_{ti} = 30 \ln \left| \frac{ct}{ct-(2h-x_1)} \right|$$

logo substituindo (3.42), (3.43), (3.44) em V_I e usando (3.10), tem-se :

$$V_I = \left\{ I_t (Z'_t - \Delta Z'_t) - I_g Z'_{gc} \right\} - I_t (Z'_t - \Delta Z'_{ti}) + I_g Z'_{gci} \quad \text{para } \frac{(2h-x_1)}{c} < t < \frac{(2h+x_1)}{c}$$

(3.45)

3.2.2.4. Tensão na Cadeia de Isoladores para $\frac{(2h+x_1)}{c} < t < \frac{(4h-x_1)}{c}$

No item anterior, as ondas que surgem em $t=2h/c$, na extremidade da torre e de sua imagem, ainda não contribuíram para a tensão na cadeia de isoladores da torre.

A partir de $t' > x_1/c$, essas novas ondas passam a contribuir na tensão na cadeia de isoladores, (Fig. 3.7). A participação delas é semelhante à tensão V_I , gerada por I_t e I_g em $t > x_1/c$, só que substituindo t por t' .

Portanto combinando a equação do campo elétrico gerado por uma onda de carga e as equações: (3.20), (3.21), (3.22), (3.27) e (3.25), de forma análoga àquela dos itens: 3.2.2.1, 3.2.2.2 e 3.2.2.3 tem-se:

$$\begin{aligned}
V_I = & I_t (Z'_t - \Delta Z'_t) - I_g Z'_{gc} - I_t (Z'_t - \Delta Z'_{t1}) \\
& + I_g Z'_{gci} + I'_t (Z'_{t1} - \Delta Z'_{t1}) - I'_g Z'_{gci} - \\
& I_t (\Delta Z'_{t1} - Z'_{t0}) \quad , \quad \text{para } \frac{(2h+x_1)}{c} \leq t \leq \frac{(4h-x_1)}{c}
\end{aligned} \tag{3.48}$$

Onde: $\Delta Z'_t = 30 \ln \frac{ct'}{ct' - x_1}$

$$Z'_{gc} = 60 \ln \left(\frac{ct'}{d} \right)$$

estas equações foram obtidas substituindo t por t' em Z'_{gc} (3.39) e $\Delta Z'_t$ (3.40).

Pelo que foi mostrado nos itens 3.3.2.1 a 3.3.2.4, pode-se obter uma fórmula de cálculo para a tensão através da cadeia de isoladores, em qualquer instante t . Desta maneira, a tensão V_I , seria obtida como um somatório de várias parcelas:

$$V_I = \sum_{k=1}^{\infty} V_K \tag{3.48}$$

Cada uma destas parcelas é o resultado do potencial, provocado por um novo conjunto de ondas de correntes. Esse conjunto de ondas circularia pelo cabo guarda e pela torre e, em um instante específico geraria tensão. Assim poder-se-ia reescrever os itens de 3.2.2.1 a 3.2.2.4 e ampliá-los na tabela 3.2 a seguir.

TABELA 3.2 (DIFERENÇA DE POTENCIAL)

CORRENTE GERADORA DA TENSÃO	INSTANTE NO QUAL AS CORRENTES SURGEM NO SISTEMA	TENSÃO GERADA (COMPONENTE DE V_I)	V_I	DOMÍNIO DE TEMPO DA TENSÃO V_I
	$t=0$	$V_1=0$	V_1	$0 < t \leq x_1/c$
I_t, I_g	$t=0$ (topo da torre)	$V_2 = I_t (Z'_t - \Delta Z'_t) - I_g Z'_{gc}$	$V_1 + V_2$	$x_1/c < t \leq (2h-x_1)/c$
$-I_t, -I_g$	$t=0$ (topo da torre imagem)	$V_3 = -I_t (Z'_t - \Delta Z'_{ti}) - (-I_g) Z'_{gci}$	$\sum_1^3 V_i$	$\frac{(2h-x_1)}{c} < t \leq \frac{(2h+x_1)}{c}$
$-I'_t, I'_g$	$t=2h/c (t'=0)$ (topo da torre)	$V_4 = I'_t (Z'_{ti} - \Delta Z'_{ti}) - I'_g Z'_{gc} - I_t (\Delta Z'_{ti} - Z'_{to})$	$\sum_1^4 V_i$	$\frac{(2h+x_1)}{c} < t \leq \frac{(4h-x_1)}{c}$
$-I'_t, -I'_g$	$t=2h/c (t'=0)$ (topo da torre imagem)	$V_5 = -I'_t (Z'_{ti} - \Delta Z'_{ti}) - (-I'_g) Z'_{gci} + I_t (\Delta Z'_{ti} - Z'_{to})$	$\sum_1^5 V_i$	$\frac{(4h-x_1)}{c} < t \leq \frac{(4h+x_1)}{c}$
I''_t, I''_g	$t=4h/c (t''=0)$ (topo da torre)	$V_6 = I''_t (Z'_{ti} - \Delta Z'_{ti}) - (-I''_g) Z'_{gc} - I'_t (\Delta Z'_{ti} - Z'_{to})$	$\sum_1^6 V_i$	$\frac{(4h+x_1)}{c} < t \leq \frac{(6h-x_1)}{c}$
$-I''_t, -I''_g$	$t=4h/c (t''=0)$ (topo da torre imagem)	$V_7 = -I''_t (Z'_{ti} - \Delta Z'_{ti}) - (-I''_g) Z'_{gci} + I'_t (\Delta Z'_{ti} - Z'_{to})$	$\sum_1^7 V_i$	$\frac{(6h-x_1)}{c} < t \leq \frac{(6h+x_1)}{c}$
.
.
.

Com relação à tabela anterior é importante fazer algumas observações:

- A) A cada $t = \frac{2h}{c}$ surgem novas ondas de corrente na torre e cabo guarda ($I_t, I_g, -I_t, -I_g$).
- B) A quantidade de índices "linha" em cada corrente, refere-se ao número de períodos ($\tau=2h/c$), decorridos após $t=0$.
- C) Cada corrente que surge, no topo da torre real só contribui para V_I quando se desloca até o ponto de sustentação da cadeia (x_1 , abaixo do topo).
- D) Os sinais -, antes das ondas de corrente, referem-se às ondas que surgem no topo da torre imagem.
- E) Os valores de impedâncias transitórias de surto de:
Torre (Z'_t, Z''_t, \dots), de retardo de torre ($\Delta Z'_t, \Delta Z''_t, \dots$), de retardo de torre para ondas imagem ($\Delta Z'_{ti}, \Delta Z''_{ti}, \dots$), mútua entre torre e cabo guarda (Z'_{gc}, Z''_{gc}, \dots) e mútua entre torre e cabo guarda imagem ($Z'_{gci}, Z''_{gci}, \dots$) tem no índice "linha", a referência ao tempo a ser utilizado, t, t', t'' etc.

A continuidade da elaboração da tabela e a posterior substituição dos valores de tensão componentes (V_i) na fórmula (3.49), dão a tensão total através da cadeia de isoladores.

No cálculo da tensão V_I , a [ref. 9], básica para a elaboração da tabela, menciona o decréscimo acentuado de V_I , após $t = \frac{2h-x}{c}$. Assim o cálculo de V_1 até V_5 , para ondas de descargas com frentes até $4\mu s$ é suficiente.

3.3. Tensão Produzida na Cadeia de Isoladores, pela Carga e Corrente, que Compõe a Parcela de Retorno da Descarga Atmosférica

Esta parcela chegou a ser desprezada em alguns trabalhos, como no de Lundholm [ref.7], porém foi considerada por Wagner como essencial, sobretudo quando as frentes de onda tiverem um valor de mais de $2.0 \mu\text{s}$ [ref. 8]. Nestes casos, Wagner considera a descarga de retorno como a grande responsável pelas saídas no sistema de transmissão.

O método para analisar esta componente da tensão na cadeia de isoladores, será o método do "cancelamento de campo". O emprego da metodologia "Loop Voltage" não é muito vantajosa, pois a necessidade do prévio conhecimento da corrente induzida no condutor, torna os cálculos por este processo, um trabalho muito laborioso, e complicado [ref. 8].

A carga, que se desloca no sentido ascendente sobre o topo da torre, constituindo a descarga de retorno, gera um campo elétrico, e em consequência um potencial em todos os pontos dentro da esfera de influência em questão. A este campo, se atribui o nome de cortante (ou forçante). Por outro lado, em função da consideração 3.1.2, o campo elétrico tangencial ao longo da torre e cabo guarda deve ser zero. Logo, surge um campo que se opõe ao campo cortante, fazendo com que a resultante na direção tangencial seja nula. Este campo denomina-se de "campo de cancelamento" e é produzido por uma distribuição estática de carga. Esta distribuição estática, além do campo de cancelamento, gera um potencial na cadeia de isoladores, cujo cálculo é o objetivo principal deste item [ref. 8].

Na verdade, se deveria considerar o campo de cancelamento causado, não só por esta distribuição estática, mas também pela corrente resultante desta cargas. O erro ocasionado por desprezar tal corrente é muito pequeno, e o ganho em simplicidade é grande [ref. 8].

3.3.1. Considerações

Além de todas as considerações já feitas no item 3.1 e de se desprezar o efeito da corrente no cálculo de V_I , pelo método do cancelamento de campo, é necessário considerar como verdadeiras, as hipóteses abaixo:

3.3.1.1. O potencial, causado pela carga acima da torre, em cada elemento do sistema: torre, cabo-guarda e condutor é calculado, considerando cada parte isolada e independente das demais [ref. 8].

3.3.1.2. Cada elemento do sistema é admitido como tendo um potencial médio ao longo do seu comprimento. Considerando-se apenas o comprimento do elemento que esteja dentro da esfera de influência [ref. 8].

3.3.1.3. Em um momento posterior à formação da descarga de retorno, é admitida a conexão da torre com o cabo-guarda e deste com a terra. Ocorre então a neutralização dos dois elementos. Ou seja, o cabo-guarda e a torre assumem um potencial zero [ref. 8].

3.3.2. Potencial no Condutor, na Torre e Cabo-Guarda

A partir da equação do potencial provocado por uma onda de carga, [ref. 8] e da fig. 3.8, pode-se calcular o potencial causado pela descarga de retorno e por sua imagem sob o plano de potencial zero. Portanto, em um ponto (x,y,z) do sistema em estudo (fig. 3.8), tem-se:

$$\psi = \frac{30 I_s}{v} \left[- \operatorname{senh}^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{z^2 + y^2}} \right) + \operatorname{senh}^{-1} \left(\frac{vct + x}{\sqrt{(z^2 + y^2)(1 - v^2)}} \right) + \ln \left[\sqrt{\frac{1 - v}{1 + v}} \right] \right] \quad (3.49)$$

$$\psi' = \frac{30 I_s}{v} \left[\operatorname{senh}^{-1} \left(\frac{2h - x}{\sqrt{z^2 + y^2}} \right) - \operatorname{senh}^{-1} \left(\frac{vct + x}{\sqrt{(z^2 + y^2)(1 - v^2)}} \right) + \ln \left[\sqrt{\frac{1 - v}{1 + v}} \right] \right] \quad (3.50)$$

Onde: . $I_s = vc q_o$, e q_o é a onda de carga positiva que se desloca para cima, a partir do topo da torre e $-q_o$, é a onda de carga negativa, que se desloca para baixo, a partir do topo da torre imagem.

- . ψ provocado por q_o
- . ψ' provocado por $-q_o$

Usando portanto as equações (3.49) e (3.50) e a consideração (3.3.1.2), a determinação dos potenciais no condutor, na torre e no cabo-guarda é dado pelas integrais abaixo:

$$V_{Co} = \frac{1}{Z_3} \left[\int_0^{Z_2} (\psi + \psi') dz + \int_{Z_2}^{Z_3} (\psi) dz \right] \quad (3.51)$$

$$V_a = \frac{1}{ct} \left[\int_{r_t}^{Z_1} (\psi + \psi') dz + \int_{Z_1}^{ct} (\psi) dz \right] \quad (3.52)$$

$$V_t = \frac{1}{h} \left[\int_0^h (\psi + \psi') dz \right] \quad (3.53)$$

Onde:

V_{Co} : potencial no condutor

$$Z_1 = \sqrt{(ct)^2 - (2h)^2}$$

$$Z_2 = \sqrt{(ct)^2 - (di)^2}$$

$$Z_3 = \sqrt{(ct)^2 - (d)^2}$$

A partir das equações para V_{Co} , V_a , e V_t , observa-se que estes valores são funções do tempo. Isto é consequência, do fato destas grandezas serem valores médios ao longo do comprimento.

3.3.3. Acoplamento Cabo-Guarda/Condutor [ref 9]

Determinados os potenciais da torre e cabo-guarda ao longo dos seus comprimentos, o passo seguinte do método é o estudo do acoplamento do cabo-guarda com o condutor e da torre com o condutor.

Estes acoplamentos surgem no instante em que as cargas induzidas no cabo-guarda geram no condutor o potencial de neutralização $-V_{Co}$.

Portanto sendo C_{Coa} o coeficiente de acoplamento entre cabo-guarda e condutor, o novo potencial do condutor será:

$$V'_{Co} = V_{Co} - C_{Coa} \cdot V_a \quad (3.54)$$

3.3.4. Acoplamento Torre/Condutor [ref 9]

O acoplamento entre torre e condutor é feito de forma semelhante ao anterior, logo, chamando de C_{Cot} este acoplamento, o novo potencial do condutor será dado por:

$$V''_{Co} = V'_{Co} - C_{Cot} \cdot V_t \quad (3.55)$$

Este coeficiente diminui com o tempo, pois, quanto maior o tempo de estudo, maior será o comprimento do condutor incluído na esfera de influência, enquanto o comprimento da torre permanece constante. Assim pode-se reescrever (3.55), como:

$$V''_{Co} = V'_{Co} - \frac{k}{t} V_t \quad (3.56)$$

Onde: t é o tempo

$$K = 0.015 + 0.0009 \frac{hr}{d} \quad ,p/um \text{ cabo guarda}$$

$$K = 0.010 + 0.0005 \frac{hr}{d} \quad ,p/dois \text{ cabos guarda}$$

CAPÍTULO 3

ILUSTRAÇÕES

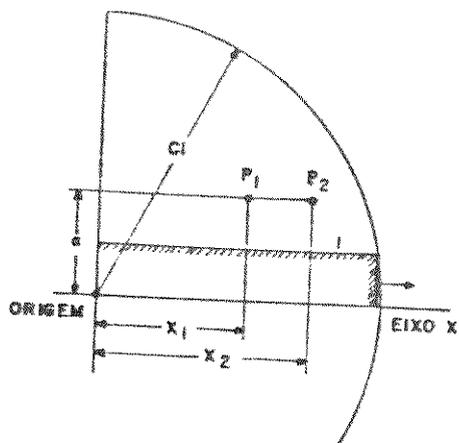


FIG. 3.1- ONDA DE CORRENTE SOBRE UM EIXO E A RESPECTIVA ESFERA DE INFLUÊNCIA

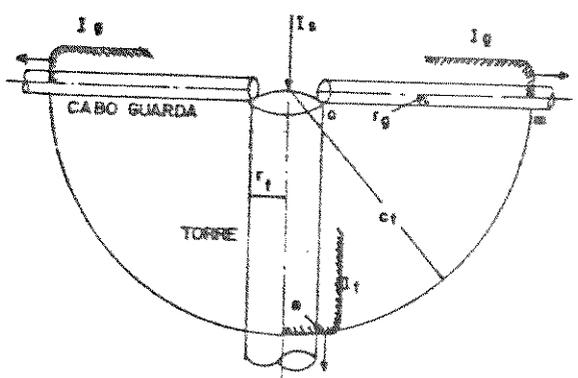


FIG. 3.2 - DIVISÃO DE CORRENTE EM $t=0$

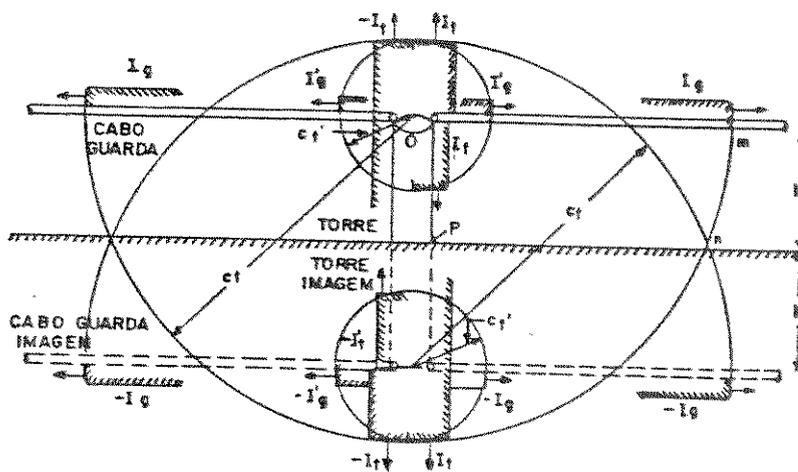


FIG. 3.3 - DIVISÃO DE CORRENTE EM $t=2h/c$

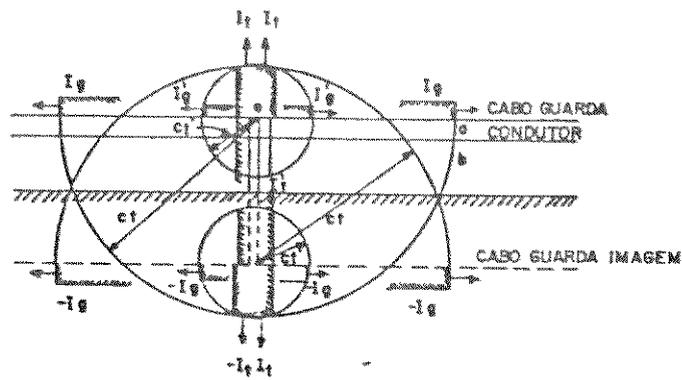


FIG. 3.7- TENSÃO NA CADEIA PARA $\frac{(2h+x_1)}{c} < f \ll \frac{(4h-x_1)}{c}$

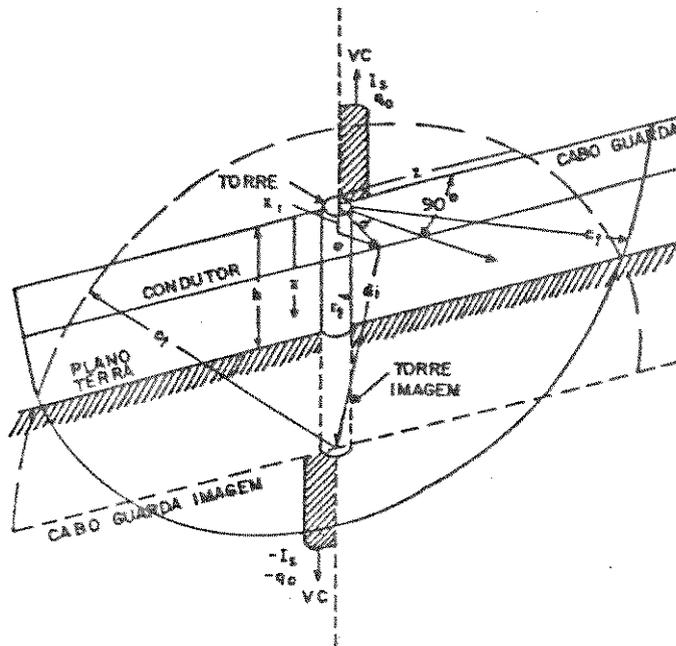


FIG. 3.8 - COMPONENTE DE RETORNO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

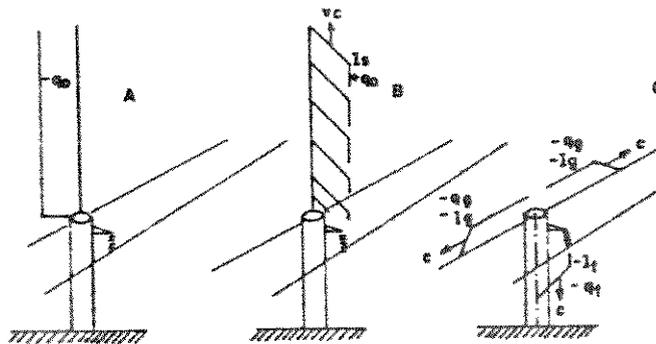


FIG 3.9 - DESCARGA ATMOSFÉRICA ANTES E DEPOIS DE ATINGIR O TOPO DA TORRE

CAPÍTULO 4

IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO

4.1. Considerações Iniciais

Em vista do exposto nos capítulos anteriores, tem-se a impedância de surto de torres de transmissão como um dos principais parâmetros no cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores.

Pode-se definir a impedância de surto de uma torre de transmissão em um sistema de potência, quando um degrau de corrente I_0 é injetado em seu topo [ref 18,20], como:

$$Z_t(t) \triangleq \frac{V_I(t)}{I_0} \quad (4.1)$$

onde:

$Z_t(t)$: impedância de surto de torre de transmissão

$V_I(t)$: tensão na cadeia de isoladores

I_0 : degrau de corrente, representando a descarga atmosférica

Esta definição (4.1), apesar de muito difundida: [ref. 18], [ref. 20], não consegue refletir todas as discussões e dificuldades no cálculo deste valor. Isto ocorre sobretudo, pelo fato de ser um conceito de origem experimental.

A sua forma de cálculo, sobretudo quanto ao modelamento ou mesmo medição, é um dos principais assuntos de estudos nesta área.

A determinação deste valor no cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores da torre pode ser feita de duas formas distintas:

- . Através de métodos experimentais
- . Através de métodos teóricos

A medição de $Z(t)$ por meios experimentais pode ser: por meio de ensaios em modelos de escala completa ou modelos em escala reduzida.

As técnicas experimentais em modelos de escala reduzida [ref. 10,11,20,26,27] foram muito exploradas em função do baixo custo e facilidade de execução. A idéia básica é a representação da linha de transmissão pela duplicação exata dos campos e geometrias associada com a torre real modelada. Esta precisão na modelagem é limitada pela representação dos fenômenos não lineares. A solução é assumir que a resposta da torre a um surto é independente da maioria dos fenômenos não lineares. Esta hipótese pode ser justificada pelo fato de as dimensões da torre serem suficientemente extensas para se desprezar o efeito corona. Portanto, as características e valores da impedância de surto da torre podem ser aplicadas com precisão à torre em escala reduzida. A determinação do valor da impedância é feita, comparando-se o valor da tensão na cadeia de isoladores com o valor calculado por um programa baseado na metodologia das reflexões sucessivas. Os estudos em modelos de escala completa, não apresentam as dificuldades de representação daqueles em escala reduzida entretanto as dificuldades operacionais e o custo limitaram o emprego de tais técnicas. [ref. 12,19].

Desta forma a definição do valor da impedância de surto de torre exigiria a construção de um modelo em escala da torre e linha. Só estas dificuldades justificam o empenho na determinação de modelos e fórmulas para os vários tipos de torres.

Nas concepções iniciais de ambas as metodologias, a modelagem da torre foi feita de forma diferente [ref. 2,9], resultando nas fórmulas (2.32) e (3.16), abaixo:

$$Z_t = 138,2 \log_{10} (h/r_t) + 90,0 (r_t/h) - 60$$

$$Z_t = 60 \ln \left[\sqrt{2} \cdot \left(\frac{ct}{r_t} \right) \right]$$

podendo nesta última, Z_t ser avaliada como seu valor de pico em $t=2h/c$ como:

$$Z_t = 60. \ln \left(\sqrt{2} \cdot \left(\frac{2h}{r_t} \right) \right) \quad (4.2)$$

M. Sargent e M. Daveniza desenvolveram um trabalho comparativo entre estes valores de impedância de torre e outros valores obtidos a partir de ensaios em modelos reduzidos [ref. 13] cujos resultados podem ser visto na tabela 4.1 a seguir:

TABELA 4.1

IMPEDÂNCIA DE SURTO DE UMA TORRE TÍPICA DE CIRCUITO DUPLO TRELIÇADA	
FONTE DO VALOR	IMPEDÂNCIA DE SURTO (Ω)
Jordan	125 Ω
Wagner-Hileman	240 Ω
Valores Medidos	80-160 Ω

Pelos resultados obtidos na tabela 4.1, pode-se concluir que há uma certa concordância entre os valores calculados pela fórmula de Jordan e aqueles medidos nos ensaios. Ao comparar com os resultados obtidos pela aplicação da fórmula de Wagner, observa-se que esta última produz valores bem acima dos medidos.

Entretanto o processo rigoroso, a partir do qual foi obtida a formulação de Wagner, a não concordância com os resultados obtidos nos ensaios, associados às observações constantes na ref. 13 proporciona as seguintes observações:

- . A resposta inicial da torre cilíndrica é variante com o tempo, logo a resposta a outras formas de onda, pode ocasionar resultados diferentes
- . A representação de uma torre treliçada por um cilindro equivalente pode não ser suficientemente precisa.

No entanto , apenas com estes resultados, não se pode ainda admitir o modelo de Jordan como sendo adequado para aquele tipo de estrutura (treliçada em circuito duplo), tendo em vista a extensão da faixa de valores medidos. Este fato levou Sargent & Daverniza à proposição de novos modelos [ref 13]

4.2. Resposta de uma Torre Cilíndrica a uma Corrente com Forma de Onda em Rampa

Conforme representada na [ref. 13] tem-se que, para um cilindro com uma rampa injetada , a resposta é calculada como:

$$Z_t = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r_t} \right) - 1 + \frac{r_t}{(2 ct)} + \left(\frac{r_t}{(2 ct)} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

para $ct \gg r_t$, tem-se:

$$Z_t = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r_t} \right) - 1 \right] \quad (4.4)$$

Como o ponto de máximo potencial no topo da torre ocorre em $t=2h/c$, tem-se:

$$Z_t = 60 \left[\ln \left[\sqrt{2} \frac{2h}{r_t} \right] - 1 + \frac{r_t}{4h} + \left(\frac{r_t}{4h} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

Quando $h \gg r_t$, tem-se:

$$Z_t = 60 \left[\ln \left[\sqrt{2} \frac{2h}{r_t} \right] - 1 \right] \quad (4.6)$$

Caso se deseje a resposta pela teoria eletromagnética a uma onda característica a solução pode ser obtida usando a integral de Duhamel. [ref. 12,14,20].

4.3. RESPOSTA DE UMA TORRE CÔNICA A UMA ONDA RETANGULAR DE CORRENTE

Como alternativa à modelagem cilíndrica, foi sugerida a modelagem cônica. Uma análise pela teoria de campo foi desenvolvida por Daverniza [ref. 13] resultando no equacionamento abaixo.

$$Z_t = 60 \left[\ln \left[\sqrt{2} / S \right] \right] \quad (4.7)$$

Onde: S é o seno da metade do ângulo do cone

Uma observação importante com relação a esta formulação é o fato de ela representar um valor constante independente do tempo, portanto da forma de onda aplicada.

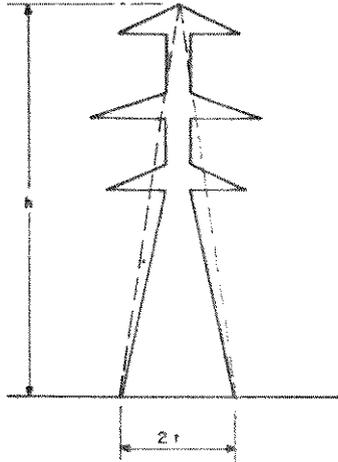
4.4. IMPEDANCIA DE SURTO DE TORRE CALCULADA PELA FORMULAÇÃO CLÁSSICA DE JORDAN E WAGNER, APLICADAS A ESTRUTURAS CONVENCIONAIS

Mais recentemente, o grupo de trabalho do IEEE desenvolveu um método simplificado para análise do desempenho de linhas de transmissão. Neste método se procura aplicar as fórmulas clássicas de Jordan e Wagner ((2.32) e (3.16)) e aquelas desenvolvidas por Daverniza ((4.6) e (4.7)), às estruturas convencionais de torres [ref. 13]. Este valores estão apresentados de forma resumida na fig. 4.1 no final deste capítulo.

CAPÍTULO 4

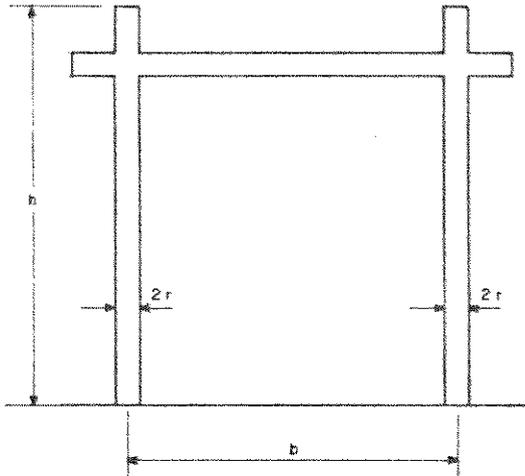
ILUSTRAÇÕES

CLASSE 1



$$Z_t = 30 \ln \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r} \right]$$

CLASSE 2

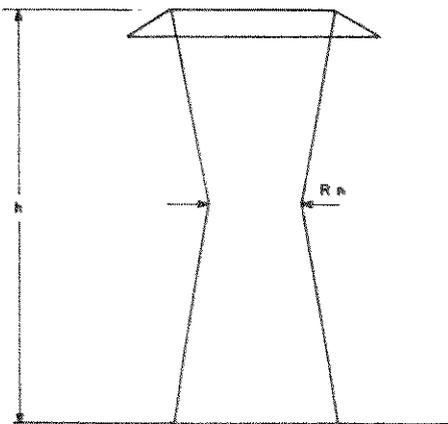


$$Z_t = 1/2 [Z_s + Z_m]$$

$$Z_s = 60 \left[\ln(h/r) + 80(r/h) - 60 \right]$$

$$Z_m = 60 \left[\ln(h/b) + 90(b/h) - 60 \right]$$

CLASSE 3



$$Z_t = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \left(\frac{2h}{r} \right) \right) - 1 \right]$$

FIG. 4.1- IMPEDÂNCIA DE SURTO PELO MÉTODO SIMPLIFICADO

CAPÍTULO 5

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS METODOLOGIAS FUNDAMENTAIS DE CÁLCULO DE SOBRETENSÕES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

5.1. Considerações Iniciais

Pelo que foi visto, existem basicamente dois métodos para analisar as consequências elétricas imediatas, quando uma descarga atinge o topo de uma torre de um sistema de transmissão de alta tensão.

O primeiro destes métodos é o das reflexões sucessivas, proposto inicialmente por Jordan e Bewley [ref. 1,2,3,4] e descrito no capítulo 2, deste trabalho. O segundo, propõe uma abordagem através da teoria de campos eletromagnéticos, proposto por Wagner & Hilleman e por Price & Lundholm, constituindo o capítulo 3 deste estudo [ref. 6,7,8,9].

Em qualquer análise, que seja feita hoje, sobre o fenômeno focalizado por este trabalho, utiliza-se obrigatoriamente uma destas duas metodologias. É comum, entretanto, serem encontradas modificações sempre no sentido de melhorar os resultados, aproximando-os dos obtidos em experimentos [ref. 10, 17, 18, 19].

Ao se estudar o fenômeno em questão, a primeira observação a ser feita, foi a grande quantidade de parâmetros e a diversidade de conceitos envolvidos.

Este fato obriga portanto, a uma melhor caracterização destes parâmetros e conceitos de uma e outra metodologia. Sendo importante, pois, destacar:

5.1.1. Instante Inicial de Observação do Fenômeno

Seja em um método ou no outro, o fenômeno aqui tratado, é estudado a partir do momento em que a descarga atinge o topo da torre do sistema de transmissão.

5.1.2. Componentes da Descarga que Atingem o Topo da Torre

Jordan, em seu trabalho, considera apenas a descarga que penetra dentro do conjunto (torre + cabo-guarda + torres vizinhas), desprezando portanto a descarga de retorno que se eleva a partir da torre, pelo canal da descarga.

Na abordagem do problema pela teoria de campo, inicialmente [ref. 6], considerou-se a descarga completa, ou seja uma parcela de retorno e outra que penetra no sistema. Esta consideração continuou a ser utilizada em quase todos os artigos posteriores que fundamentaram o método [ref. 8,9].

5.1.3. Velocidade da Descarga

Tanto em uma abordagem quanto na outra, a velocidade da descarga no conjunto torre + cabo guarda, é considerada como sendo a velocidade da luz. Recentemente, foram desenvolvidos alguns trabalhos com a finalidade de estudar melhor este problema da velocidade de propagação dentro da torre e cabos guarda. [ref. 17, 18, 19].

5.1.4. Forma de Onda da Descarga

Este constitui um dos parâmetros mais importantes e ainda muito discutido. Apesar de hoje, existir um conhecimento maior, resultante da grande quantidade de experimentos realizados, não é possível se chegar a uma conclusão determinística sobre o assunto.

Jordan em seu trabalho desenvolveu todo o cálculo de forma geral, através de uma função $f(t)$ que representasse a tensão associada à descarga [ref. 1]. Ao aplicar o resultado do seu trabalho [ref. 2], adotou porém como $f(t)$, a função $f(t) = (1 - e^{-3t})$.

Na abordagem através da teoria de campo a descarga é considerada como tendo uma forma de onda retangular, sendo a partir desta forma de

onda desenvolvido todo o seu equacionamento matemático. Posteriormente, [ref. 7] foi admitida que a hipótese de uma forma de onda retangular (taxa de crescimento infinita) é muito pouco provável. Sugeriu-se então a soma de muitos degraus defasados no tempo, como maneira de se encontrar a resposta à forma de onda desejada. [ref. 28, 24] Nos últimos trabalhos que constituem a base desta teoria foi feita inclusive uma análise de sensibilidade da resposta do sistema com o tempo da frente de onda da descarga [ref. 8,5]. A utilização de uma rampa com tempo de subida de $0.5 \mu s$ constitui uma hipótese conservativa e de uso relativamente comum do ponto de vista do projeto. [ref. 20].

5.1.5. Sistema Atingido pela Descarga

Tanto no trabalho desenvolvido pelas reflexões sucessivas, quanto na abordagem pela teoria de campo, foi considerado como sistema atingido, o conjunto: torre + condutor + cabo guarda. Apesar de que, na abordagem inicial da teoria de campo [ref. 6] os cabos-guardas foram desprezados.

5.1.6. Torre de Transmissão

É sem dúvida, um dos parâmetros importantes no cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores, tendo os aspectos teóricos de maior relevância sido descritos no capítulo anterior.

É importante destacar que no capítulo 2. Z_l é calculado de maneira independente do método, a partir do cálculo da indutância de um cilindro condutor, e l_{he} é atribuído um valor constante (equação 2.32). Por outro lado, na teoria de campo o valor de Z_l surge como uma consequência da formulação analítica do método e é uma função do tempo (equação 3.16); apesar de poder ser considerada como constante, desde que avaliada em seu valor máximo (equação 4.2).

5.1.7. Impedância de Pé-de-Torre

Este é outro parâmetro que tem sido objeto de muito estudo. Podendo-se destacar aquele desenvolvido na ref.4 por Bewley.

No trabalho através da consideração de reflexões sucessivas, a impedância de pé de torre é considerada como um parâmetro constante. Na aplicação desta teoria foi utilizada o valor de 10Ω .

Na abordagem pela teoria de campo, Wagner inicialmente deprezou o efeito da impedância de pé de torre, apesar de deixar claro a necessidade de nos estudos posteriores incorporar estes efeitos. No seu segundo trabalho [ref. 6], a presença deste parâmetro não é colocada no desenvolvimento analítico, porém é descrita uma maneira aproximada de analisá-lo. Existindo, desde aquele período, uma tentativa de se incorporar o efeito da impedância de pé de torre no desenvolvimento analítico desta teoria [ref. 6].

5.1.8. Impedância do Canal de Descarga

Pela teoria das reflexões sucessivas a impedância do canal da descarga é considerado como um parâmetro constante. É ainda descrito um método para determinar este parâmetro, que desta forma passa a ser uma função quantitativa de grandezas de difícil medição, como por exemplo comprimento do raio e raio efetivo da descarga [ref. 2]. Ainda em relação a este estudo é utilizado no exemplo um valor de 200Ω , resultado da aplicação da fórmula a valores observados com maior frequência para as descargas atmosféricas. [ref. 3]

Na abordagem pela teoria de campo não é dada uma atenção muito grande a este parâmetro. Apenas nos trabalhos iniciais é admitida como hipótese o valor infinito [ref. 7].

5.1.9. Corona e Distorção da Forma de Onda

Tanto uma abordagem quanto a outra consideram-nos importantes, mas como hipótese simplificativa optam por desprezá-los, sobretudo pela

dificuldade em implantá-la de forma precisa em um programa digital.

A partir dos parâmetros e conceitos descritos nos itens de 5.1.1 a 5.1.9, pode-se destacar que:

(A) Ambas as teorias permitem o uso da parcela da descarga que penetra no sistema. A utilização apenas desta componente da tensão na cadeia de isoladores não constitui um erro considerável sobretudo, quando as frentes de onda das descargas são inferiores a $2.0 \mu s$, como já foi dito no capítulo 2. M. Daverniza e Liew, ao desenvolverem um estudo sobre o assunto, concluíram que a parcela da tensão na cadeia de isoladores causada pela carga no canal da descarga é pequena, quando comparada com a provocada pela carga injetada no sistema. [ref. 16]

Ainda tratando deste assunto, as dúvidas com relação ao modelo físico da descarga, constituem um obstáculo ao estudo mais consistente sobre o tema. [ref. 25]

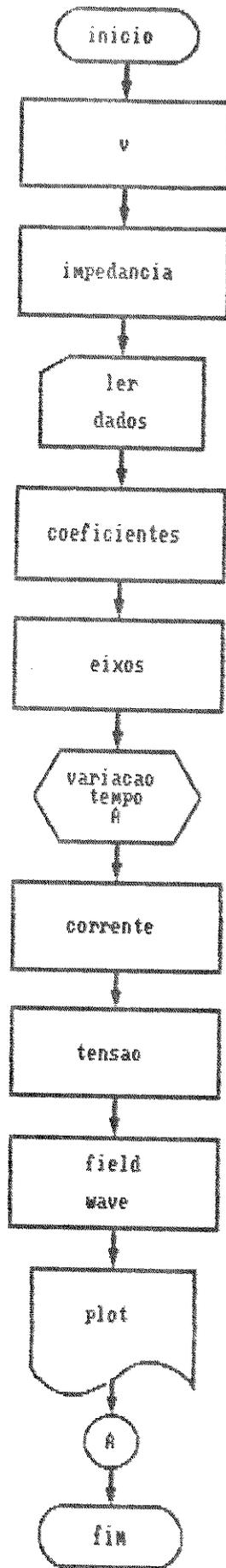
(B) Apesar de na teoria de campo a formulação analítica ser completamente desenvolvida para um degrau injetado, a utilização da integral de Duhamel soluciona esta limitação [ref. 28]

(C) Com relação aos parâmetros Z_s , Z_f , Z_t , a teoria das reflexões sucessivas os tem como valores (variáveis do equacionamento) constantes a serem determinados e modelados de acordo com a situação específica que se quer estudar. A teoria de campo os fixa em valores que permitam solucionar seus problemas de contorno ou o obtém como uma consequência do emprego da teoria de campos eletromagnéticos à torre.

Assim observa-se que a comparação entre os fundamentos dos dois métodos é possível, desde que sejam introduzidas na teoria das reflexões sucessivas as hipóteses admitidas na teoria de campo [ref. 9].

Para se analisar de maneira quantitativa esta comparação foi desenvolvido o programa, cujo fluxograma é apresentado a seguir:

5.2. Fluxograma



A partir deste algoritmo é importante destacar que:

5.2.1. Início

Procedimento que tem o objetivo de ativar o módulo gráfico e para inicializar o programa.

5.2.3. V.

Procedimento no qual se declaram todas as variáveis globais do nosso sistema.

5.2.4. Impedância

Na verdade não é um procedimento, mas uma série de funções para calcular as impedâncias do sistema, quando da aplicação da teoria de campo, e descritos no capítulo 3.

5.2.5. Ler Dados

Procedimento no qual são efetuadas as leituras dos dados da torre e da linha a ser estudadas.

5.2.6. Coeficiente

Procedimento para calcular os coeficientes de reflexão e de transmissão, e as impedâncias de surto nos seus valores máximos.

5.2.7. Eixos

Procedimento para plotar os eixos, títulos e especificar as escalas a serem utilizadas.

5.2.8. Corrente

Procedimento para calcular as correntes na torre e no cabo-guarda a cada período ($\tau_{(t+I)} = 2h/c$), de acordo com equacionamento descrito no item 3.2.1, e resumidos na tabela 3.1. [ref. 9]

5.2.9. Tensão

Procedimento para calcular a tensão na cadeia de isoladores provocada pelas correntes calculadas no procedimento anterior, de acordo com o equacionamento exposto no item 3.2.2 e na [ref. 9]. Resumidos, a tabela 3.2.

5.2.10. Field e Wave

Procedimentos para calcular a tensão na cadeia de isoladores por cada uma das teorias. Com relação à abordagem de campo foi calculada apenas a parcela provocada pela carga injetada no sistema.

Com relação a estes algoritmos, no cálculo da tensão na cadeia de isoladores pelo método de Jordan além das considerações feitas em A, B e C do item anterior, temos de destacar que o acoplamento cabo-guarda-condutor foi expresso através de uma impedância mútua e não como um coeficiente de acoplamento (capítulo 2), além do que foram desprezadas as reflexões nas torres adjacentes.

5.2.11. Plot

Procedimento para plotar em gráfico as tensões resultantes do procedimento anterior.

5.3. Dados Utilizados:

Para testar o programa e comparar numericamente a teoria, foram utilizados as torres dos trabalhos de Wagner [ref. 8] e de Jordan [ref. 3], cujas silhuetas se encontram nas fig's. 5.1 e 5.2.

De maneira geral, estas quatro torres representam uma boa amostragem de torres com estrutura convencional:

- . são linhas de circuito simples e de circuito duplo
- . são linhas com um e com dois cabos guarda
- . são linhas com disposição vertical e com disposição horizontal
- . são linhas de diferentes níveis de tensão.

5.4. Resultados

É importante lembrar que em todas as figuras referenciadas neste capítulo as funções constantes representam o resultado obtido pela teoria das reflexões sucessivas, e os gráficos com aspecto semelhante à soma de funções logarítmicas, representa o resultado conseguido pela teoria de campo.

5.4.1. Resultados para Torre de 345K - AEP-OVEC com 1 cabo-guarda (fig. 5.1.A)

Com relação a esta torre foram separadas as componentes da tensão na cadeia de isoladores, descritas na tabela 3.2. através da variável V_i . A cada uma das componentes foi atribuída a respectiva letra (V_1 , representada por A; V_2 por B e assim por diante).

Nesta situação tem-se:

fig. 5.3 A: Tensão de cada componente da cadeia calculada por Jordan e por Wagner

fig. 5.3 B: Tensão total na cadeia de isoladores

Pode-se destacar os valores da tabela a seguir, obtidos juntamente com os gráficos das figuras 5.3A e 5.3B.

TABELA 5.1 (TENSÃO TOTAL NA CADEIA DE ISOLADORES)

TEMPO (μ s)	TENSÃO CALCULADA P/MÉTODO DE CAMPO (V/A DA DESCARGA)	TENSÃO CALCULADA P/MÉTODO DAS REFLEXÕES SUCESSIVAS (V/A DA DESCARGA)
0.02	0	0
0.04	61.08	108.07
0.06	74.35	108,07
0.20	99,43	108.07
0.26	104.02	108.07
0.28	61.44	-33.70
0.30	6.98	-33.70
0.32	-2.29	-33.70
0.58	-1.52	-1.40
0.60	-0.14	0.46
0.66	0.06	0.46
.	.	.
.	.	.
.	.	.

5.4.2. Resultados para a Torre 345 KV-AEP-OVEC com 2 Cabos Guarda (fig. 5.1 C)

Neste caso será destacado apenas os valores da tensão total na cadeia de isoladores calculados por um e por outro método.

É importante lembrar que em todas as figuras referenciadas neste capítulo as funções constantes representam o resultado obtido pela teoria das reflexões sucessivas, e os gráficos com aspecto semelhante à soma de funções logarítmicas, representa o resultado conseguido pela teoria de campo.

O resultado está plotado na fig. 5.4, onde o valor máximo está mostrado na tabela 5.2:

TABELA 5.2 (TENSÃO TOTAL MÁXIMA NA CADEIA DE ISOLADORES)

t_{MAX} (μs)	TENSÃO CALCULADA P/MÉTODO DE CAMPO (V/A DA DESCARGA)	TENSÃO CALCULADA P/MÉTODO DAS REFLEXÕES SUCESSIVAS (V/A DA DESCARGA)
0.26	67.80	69.93

5.4.3. Resultados para a Torre 220-KV - OVEC com 2 Cabos Guarda
(fig. 5.1 B)

Nesta situação também será analisado apenas a tensão total e não as componentes, estando este resultado plotado na fig. 5.5, onde o valor máximo é dado por:

TABELA 5.3 (TENSÃO TOTAL MÁXIMA NA CADEIA DE ISOLADORES)

t_{MAX} (μs)	TENSÃO CALCULADA P/MÉTODO DE CAMPO (V/A DA DESCARGA)	TENSÃO CALCULADA P/MÉTODO DAS REFLEXÕES SUCESSIVAS (V/A DA DESCARGA)
0.14	57.89	61.38

5.4.4. Resultados para a Torre 220-KV - PWRD (fig. 5.2)

Também nesta situação está mostrado apenas a tensão total na cadeia de isoladores. O gráfico com o resultado correspondente a esta situação é aquele da figura 5.6. Na tabela abaixo é destacado o valor máximo da tensão na cadeia de isoladores.

TABELA 5.4 (TENSÃO TOTAL MÁXIMA NA CADEIA DE ISOLADORES)

t_{MAX} (μs)	TENSÃO CALCULADA P/MÉTODO DE CAMPO (V/A DA DESCARGA)	TENSÃO CALCULADA P/MÉTODO DAS REFLEXÕES SUCESSIVAS (V/A DA DESCARGA)
0.1	31.47	33.21

5.5. Discussão dos Resultados:

Com relação aos resultados do item 5.4, pode-se destacar, que:

5.5.1 Em todas as quatro respostas existe uma boa concordância entre o resultado pela teoria de campo e aquele obtido pela teoria das ondas viajantes, principalmente com relação ao valor máximo.

5.5.2 Ainda ressaltando esta concordância, tem-se que a maior diferença entre os valores de pico, por ambos os métodos ocorre em 5.4.3, e é de 6.03% do valor de pico pelo método de campo

5.5.3 Para todos os casos, o valor obtido pelo método das reflexões sucessivas está sempre acima daquele obtido pelo método de campo

5.5.4 Os pontos em que surgem novas componentes da tensão, por exemplo:

$$\frac{x}{c}, \frac{2h-x}{c}, \frac{2h+x}{c}, \frac{4h-x}{c}, \frac{4h+x}{c}, \text{ etc.},$$

estão em total concordância com os resultados obtidos.

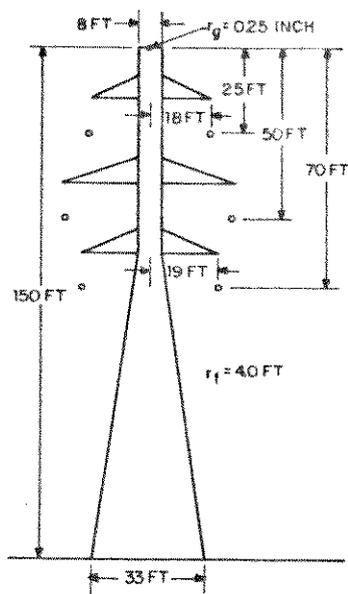
5.5.5 Justamente nestes pontos que há uma maior diferença entre os gráficos obtidos por cada um dos métodos. Entretanto com relação a este resultado é importante lembrar, que a descarga injetada é um degrau. O degrau representa a pior situação do ponto de vista de tempo de crista, e acarreta no método das reflexões sucessivas uma tensão total na cadeia de isoladores descontínua.

5.5.6 O gráfico apresentado na figura 5.3.A, destaca cada componente da tensão que compõe a cadeia de isoladores. A componente que surge em $t = \frac{x}{c}$, é designada por A, a que surge em $t = \frac{(2h-x)}{c}$, designada por B e assim por diante.

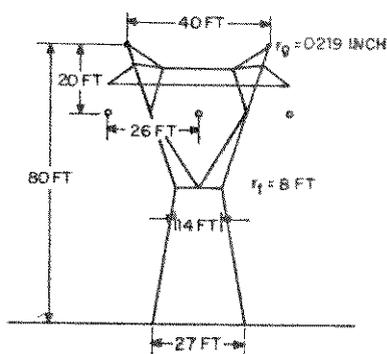
5.5.7 No gráfico anterior só são apresentadas as componentes até aquela que surge em $t = \frac{2h+x}{c}$. Isto foi feito porque a partir deste valor a componente apresenta um valor muito pequeno, sendo quase imperceptível e não representando acréscimo considerável à soma das componentes.

CAPÍTULO 5

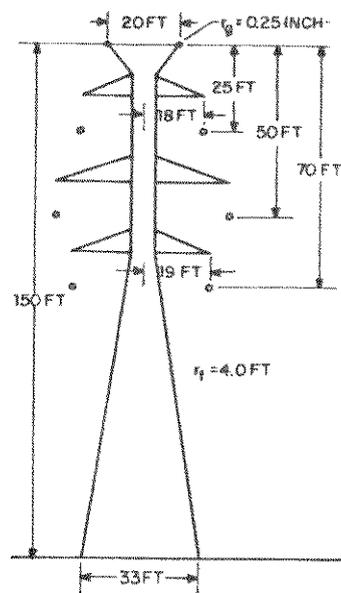
ILUSTRAÇÕES



(A) AEP-OVEC
345 kV
UM CABO GUARDA

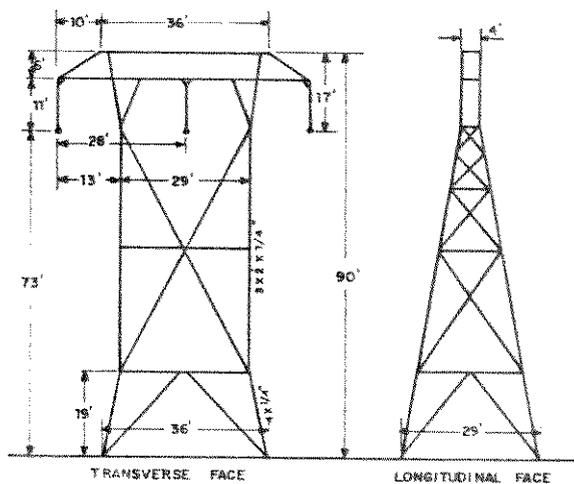


(B) PWSP OVEC
220 kV
DOIS CABOS GUARDAS



(C) AEP OVEC
345 kV
DOIS CABOS GUARDAS

FIG. 5.1- TORRES UTILIZADAS POR WAGNER



(D) 220 kV

FIG. 5.2- TORRE UTILIZADA POR JORDAN

OBS FT = PÉS
INCH . = POLEGADAS

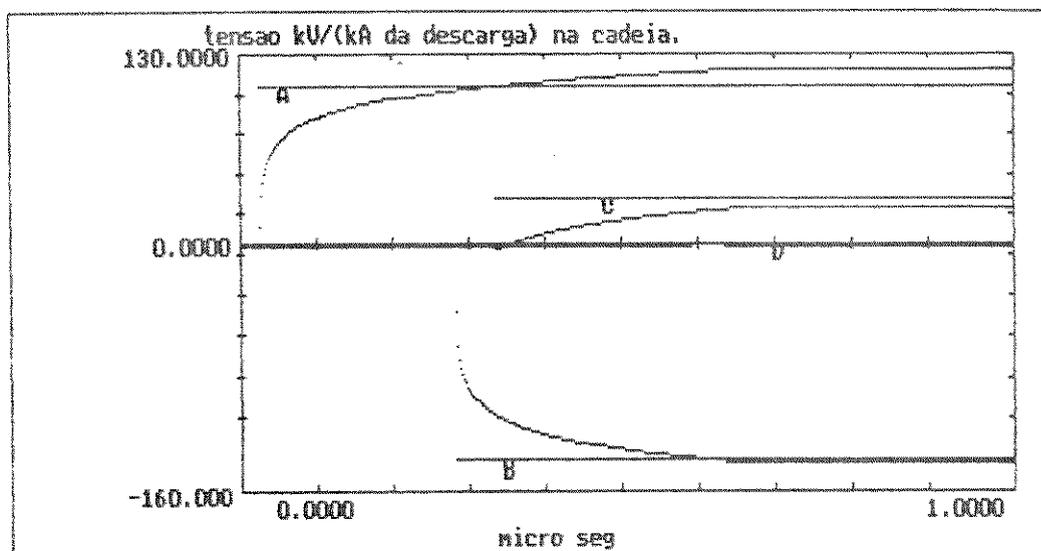


fig 5.3A : tensão de cada componente V_i (produzido pelas correntes em cada período de estudo) , torre 345kV (fig 5.1A).

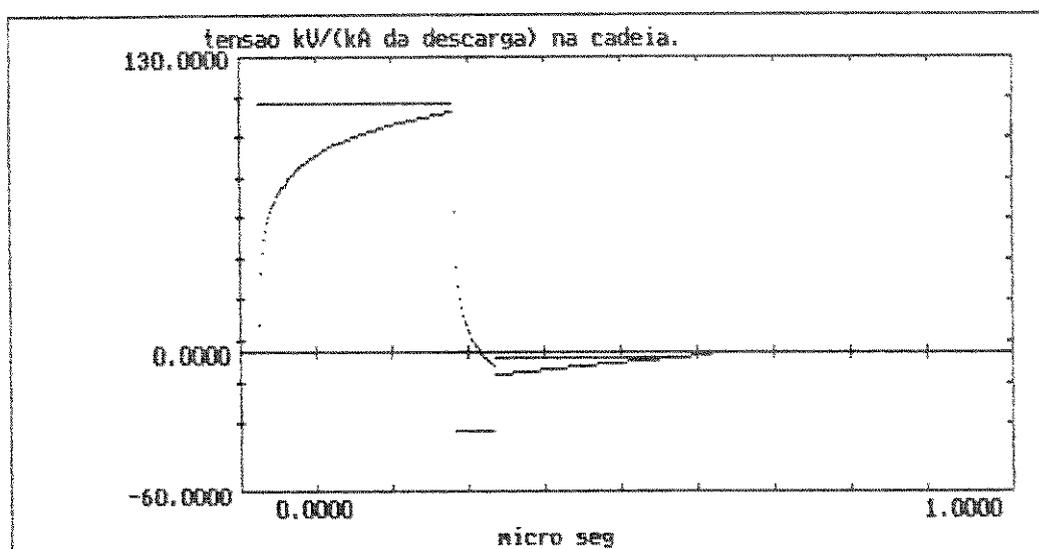


fig 5.3B : tensão total na cadeia de isoladores: V_I , torre 345kV (fig 5.1 A)

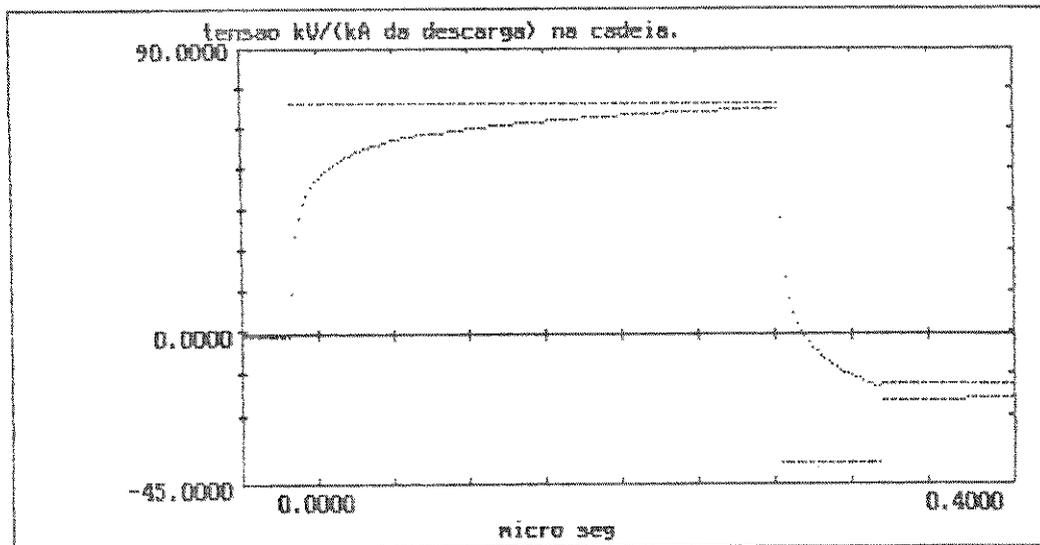


fig 5.4 : tensão total na cadeia de isoladores: V_I , torre 345 kV.
(fig 5.1 C)

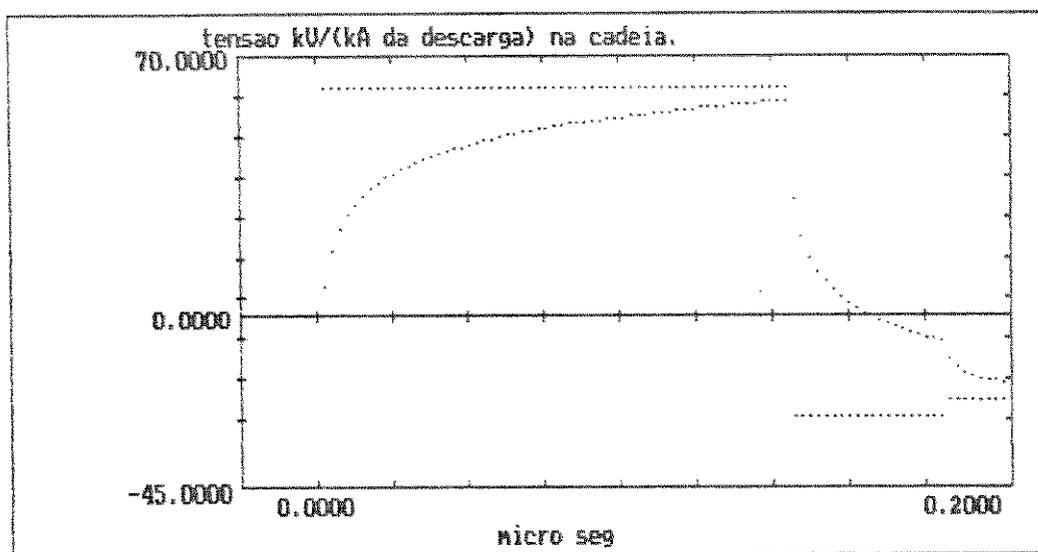


fig 5.5 : tensão total na cadeia de isoladores: V_I , torre 220 kV.
(fig 5.1 B)

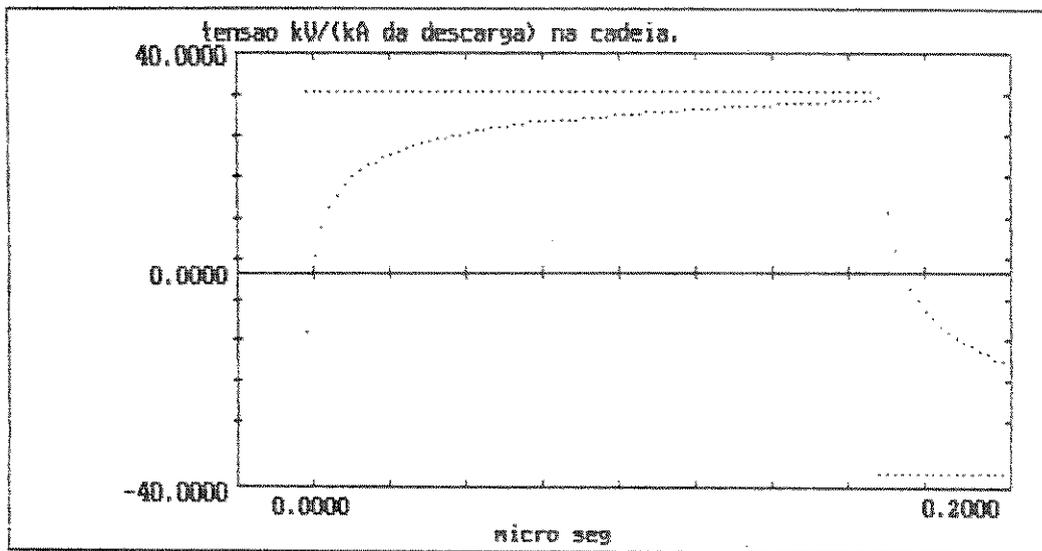


fig 5.6 : tensao total na cadeia de isoladores: V_x (fig 5.2)

CAPÍTULO 6

ESTUDO DA MODELAGEM DA TORRE DE TRANSMISSÃO

6.1. Considerações Iniciais

Os resultados obtidos no capítulo anterior associados ao método empregado no cálculo da sobretensão em outros trabalhos [refs:3,13,14,15,17,19,22], sugere a utilização do método das reflexões sucessivas.

Ao utilizar o método descrito no capítulo 2. A impedância de surto da torre de transmissão constitui-se num dos principais parâmetros para o cálculo da tensão na cadeia de isoladores e é um ponto, ainda muito estudado [ref. 19].

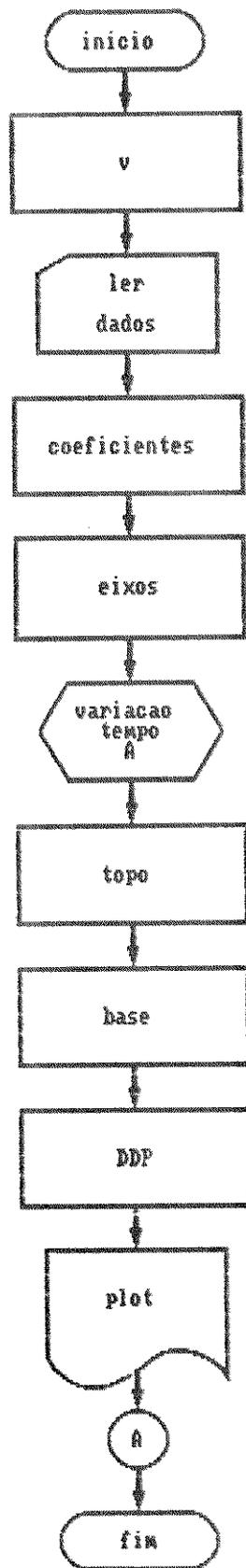
Para que seja possível verificar a importância da impedância de surto das torres de transmissão e os principais modelamentos, foi desenvolvido um programa digital, segundo o método das reflexões sucessivas, cujo fluxograma será discutido a seguir.

6.2. Fluxograma

Inicialmente é importante destacar que o programa aqui desenvolvido segue a filosofia básica dos procedimentos: corrente, tensão e wave, comentados no capítulo anterior.

Como o objetivo deste capítulo não é efetuar a comparação das metodologias, as simplificações estabelecidas no capítulo 5 para este método não foram consideradas e passou-se a trabalhar com o sistema formado pela torre atingida e adjacentes (uma de cada lado da torre atingida). O acoplamento foi utilizado da mesma forma que o descrito no trabalho de Jordan [ref. 3], ou seja uma constante obtida através dos coeficientes de Maxwell.

Com estas explicações pode-se descrever o fluxograma a seguir:



6.2.1. Início, V, Ler Dados, Coeficientes, Eixos e Plot

São procedimentos que têm a mesma finalidade que os procedimentos de mesmo nome do fluxograma descrito no capítulo anterior (item 5.2).

6.2.2. Topo

É um procedimento que tem o objetivo de calcular a tensão no topo da torre atingida pela descarga, de acordo com o método descrito no item 2.2.1. [ref. 1,2,3]

6.2.3. Base

É um procedimento cuja finalidade é a obtenção da tensão na base da torre atingida pela descarga, segundo a metodologia do item 2.2.2.

6.2.4. DDP

É o procedimento no qual é calculada a tensão na cadeia de isoladores, como está apresentado no item 2.3. (equação 2.28) . Em todo o programa é utilizado a variável DDPE para representar este valor.

6.3. Resultados

6.3.1. Resultados Iniciais

Com o objetivo de avaliar o programa desenvolvido, a primeira linha pesquisada como dado de entrada foi aquela descrita no artigo de Jordan [ref. 2]. A silhueta da torre atingida é a mostrada na figura 5.2 do capítulo anterior.

Para facilitar esta avaliação, a mesma situação é apresentada em dois gráficos:

(A) Um descrevendo a descarga atmosférica e as tensões no topo, na base e na cadeia de isoladores da torre atingida (fig. 6.2.(A)).

(B) O outro destacando apenas as três últimas tensões do item (A). (fig. 6.2(B)).

Na tabela 6.1 a seguir, destaca-se para esta situação os valores das tensões de interesse.

TABELA 6.1 (tensões (%) x t(μ s))

TEMPO	DESCARGA	v _t	v _b	DDPE
0.2	63.21	24.20	3.29	16.16
0.4	86.47	15.39	11.75	10.28
0.6	95.02	11.25	15.13	7.52
0.8	98.17	9.69	16.38	6.47
1.0	99.33	9.11	16.95	6.08
1.5	99.94	8.80	17.09	6.88
2.0	100.00	8.78	17.11	5.86
2.2	100.00	-0.76	15.82	-0.50
2.4	100.00	2.72	14.79	1.81
2.6	100.00	11.42	15.14	7.63
2.8	100.00	13.12	15.53	8.76
3.0	100.00	14.08	15.75	9.41
3.5	100.00	14.60	15.87	9.76
4.0	100.00	14.64	15.88	9.78

OBS.: Valores em percentagem do valor de crista da descarga atmosférica

O passo posterior deste trabalho foi o estudo de possíveis melhoramentos em alguns pontos do programa, sobretudo quanto:

(A) Ao número de termos dos somatórios de cada uma das tensões de interesse

(B) À terminação do circuito, que modela a linha em questão.

Neste particular foram analisadas as possibilidades de se incluir como terminação da linha: a torre adjacente isolada, um "ladder

infinito" ou em último caso a torre em paralelo com o cabo guarda.

Os resultados obtidos com esta modificação não justificam entretanto uma mudança no programa já desenvolvido, pois a diferença entre os resultados é desprezível.

6.3.2. Estudo simplificado de sensibilidade com os parâmetros:

tempo de subida da descarga atmosférica (T_g), impedância de surto do canal da descarga (Z_g), impedância de surto de pé-de-torre (Z_f) e impedância de surto de torre de transmissão (Z_t).

Com a finalidade de verificar a variação da tensão na cadeia de isoladores com os parâmetros acima mencionados, várias situações foram testadas.

Para estes testes foi executado o programa, cujo fluxograma está descrito no item 6.2. Sempre se procurou variar um parâmetro, deixando os demais fixos. Em todas as situações a torre utilizada foi a de 220 kV da OVEC (fig. 5.2). Pode-se então observar:

6.3.2.1. Sensibilidade com T_g

Com relação a este parâmetro há uma dependência total do tempo de subida com a forma de onda da descarga. Como neste caso não há necessidade de se trabalhar com a função degrau, usou-se:

A) Dupla Exponencial:

$$f(t) = 1 - e^{-t/T}, \text{ onde: } T \text{ é a constante de tempo da segunda exponencial}$$

B) Rampa:

$$f(t) = t/T_g, \text{ onde: } T_g \text{ é o tempo de crista (ou o tempo necessário para a descarga atingir 1 p.U.)}$$

Para o caso da dupla exponencial, pode-se destacar os valores de crista da tensão na cadeia de isoladores e as respectivas constantes de tempo da descarga atmosférica; descritas nas tabelas 6.2 e 6.3:

TABELA 6.2 (DDPE x 1/T)

t (μs)	vt (p. u.)	DDPE (p. u.)	1/T (μs^{-1})
0.25	0.123	0.083	2
0.25	0.191	0.012	4
0.25	0.224	0.015	6
0.25	0.238	0.015	8

Ainda com relação a esta situação tem-se a variação das tensões de interesse com o tempo na fig. 6.3(A).

Para o caso da função injetada ser uma rampa tem-se para os tempos de subida variando entre 1.0 e 2.5 (μs) os respectivos valores de pico:

TABELA 6.3 (DDPE x T_s)

t (μs)	vt (p. u.)	DDPE (p. u.)	T_s (μs)
1.0	0.149	0.100	1.0
1.5	0.129	0.086	1.5
2.0	0.118	0.079	2.0
2.5	0.100	0.067	2.5

Na figura 6.3B tem-se o comportamento da tensão na cadeia de isoladores em função do tempo de crista da descarga.

6.3.2.2. Sensibilidade com Z_s

Para analisar a sensibilidade da tensão na cadeia de isoladores com Z_s , foi calculada a diferença de potencial para Z_s variando de 100Ω até 600Ω, com um incremento de 100Ω.

É importante lembrar que em todas as situações, os valores dos demais parâmetros foram mantidos constantes e que a forma de onda assumida para a descarga foi a dupla exponencial. Isso, para possibilitar comparar os resultados com aqueles do artigo de Jordan [ref. 3].

A tabela 6.4. mostra os valores obtidos para DDPE e Z_s .

TABELA 6.4 (DDPE x Z_s)

t_{max} (μs)	DDPE (F.U.)	Z_s (Ω)
0.2	0.2948	100
0.2	0.1464	200
0.2	0.1035	300
0.2	0.0800	400
0.2	0.0653	500
0.2	0.0551	600

Os valores acima foram obtidos a partir do gráfico da figura 6.4 onde tem-se o comportamento da diferença de potencial (PUD x tempo (μs)), parametrizada por Z_s .

OBS : $Z_s = 100.NO$, onde NO é o número junto ao gráfico, obtido com aquele valor de Z_s (fig. 6.4).

6.3.2.3. Sensibilidade com Z_f

Neste caso, foi calculada a diferença de potencial, para vários valores de Z_f (de 10 a 100 Ω , com incremento de 10 Ω). O processo foi semelhante ao do item anterior sendo que o parâmetro variável foi a impedância de aterramento da torre.

Assim tem-se a tabela 6.5.

TABELA 6.5 (DDPE x Z_f)

z_f (Ω)	DDPE (PU)
10	0.1464
20	0.1498
30	0.1526
40	0.1718
50	0.1971
60	0.2185
70	0.2370
80	0.2531
90	0.2671
100	0.2795

Os valores acima foram obtidos a partir do gráfico (fig. 6.5) diferença de potencial (PU) x tempo (μ s), parametrizada por Z_f .

OBS. $Z_f = 10 \cdot NO$, onde NO é o número junto ao gráfico, obtido com aquele valor de Z_f .

6.3.2.4. Sensibilidade com Z_t

Apesar de o modelo da torre ser o assunto a ser destacado no item 6.5, é importante ter uma idéia da variação da tensão na cadeia de isoladores com Z_t . Para atingir este objetivo varia-se o valor de Z_t de 100Ω a 800Ω , utilizando 100Ω como incremento. Com cada valor de Z_t , é calculado a tensão na cadeia de isoladores em PU em cada instante t . Assim se pode destacar os valores da tabela 6.6 abaixo:

TABELA 6.6 (DDPE x Z_t)

$z_t (\Omega)$	DDPE (P. U.)	$t (\mu s)$
100	0.1611	0.2
200	0.2096	0.2
300	0.2390	0.3
400	0.2642	0.3
500	0.2846	0.4
600	0.3017	0.4
700	0.3148	0.4
800	0.3523	0.4

Tendo estes valores sido obtidos a partir do gráfico (fig. 6.6) tensão na cadeia de isoladores (PU) x tempo (μs) parametrizada por $Z_t(\Omega)$.

OBS. $Z_t=100.NO$, onde NO é o número junto ao gráfico obtido com aquele valor de Z_t .

6.4.1.6. A tensão na base da torre é diferente da tensão no topo, pois existe um tempo de defasagem $0.1 \mu\text{s}$, para a base da torre ser atingida (fig. 6.2A e 6.2B). Este tempo obtido da figura é exatamente igual à h/c , onde h é a altura da torre e c a velocidade da luz (no caso $h = 90$ pés e $c = 900$ pés/ μs , logo $t = 0.1 \mu\text{s}$).

6.4.2. Estudo simplificado de sensibilidade com os parâmetros tempo de subida da descarga atmosférica (t_s); impedância de surto do canal da descarga (Z_c), impedância de surto de pé de torre (Z_f) impedância de surto de torre de transmissão (Z_t).

6.4.2.1. Sensibilidade com o Tempo de Subida

Conforme foi mencionado no capítulo 5, há uma influência muito grande da forma de onda da descarga na sobretensão causada na cadeia de isoladores. Existe uma tendência para a utilização das formas de ondas aqui empregadas (cap6, item 6.3.2.1). A dupla exponencial foi utilizada também, para possibilitar comparações destes resultados com os de Jordan [ref. a]. A rampa, apesar do enfoque determinístico deste trabalho, é muito utilizado como forma de onda da descarga em outros artigos sobre o assunto [ref. 5,6,7,8,9,12,14,15,20,23].

Com relação à dupla exponencial se observa que quanto maior o inverso da constante de tempo da segunda exponencial ($1/T$ em $(1 - e^{-t/T})$), mais rápido será o crescimento da forma de onda da descarga. Da mesma forma, observando a tabela 6.2 se verifica que quanto maior o valor do inverso da constante de tempo ($1/T$), maior serão as tensões no topo da torre e na cadeia de isoladores.

Com relação à rampa, o crescimento da tensão no topo da torre e na cadeia de isoladores é consequência direta da diminuição do tempo de crista da descarga. Há uma tendência a se trabalhar com rampas, cujos tempos de subida variem de $0.5 \mu\text{s}$ a $2.0 \mu\text{s}$.

É importante observar que a partir do momento em que o tempo de subida for superior ao tempo de propagação dentro da torre, há a possibilidade de modificação da relação entre o valor máximo na tensão na cadeia de isoladores e T_0 anterior.

6.4.2.2. Sensibilidade Impedância de Surto do Canal da Descarga, Z_0 .

Fixadas as condições do item 6.3.2.2, se verifica uma tendência ao aumento do valor de pico, com a diminuição do valor de Z_0 (tabela 6.4 e fig. 6.4).

Este parâmetro, como visto no capítulo 2 (item 2.5) depende fundamentalmente do "raio" e do "comprimento do flash". Estes dois valores são resultados do modelo físico da descarga, um assunto, no qual estão ainda sendo despendidos grandes esforços nos mais variados lugares para a caracterização quantitativa mais precisa.

A definição de um valor de Z_0 , acarreta um erro inevitável. Neste trabalho a adoção dos valores foi feita sempre no sentido de utilizar valores fixados a partir de estudos mais detalhados [ref. 3,4,10,20].

6.4.2.3. Sensibilidade com a Impedância de Surto de Pé de Torre, Z_f .

Fixadas as condições do item 6.3.2.3, observa-se uma tendência muito forte ao crescimento da tensão na cadeia de isoladores e da tensão no topo da torre com o aumento do valor e Z_f (tabela 6.5 e fig. 6.5).

Há uma grande sensibilidade da tensão na cadeia de isoladores com o valor de Z_f . Este, infelizmente é não linear e normalmente não é muito bem definido. A resistência de pé de torre é geralmente medida com um megger apropriado [ref. 3] e é observado a baixas frequências e baixas correntes. Por causa dos efeitos capacitivos e da condutividade iônica na terra, esta resistência variará com a forma de onda e

magnitude da descarga e com a composição do solo. No entanto, para se evitar fazer todo tipo de correção nos valores de Z_t , a ser usado no cálculo e em função dos objetivos deste estudo, de certa forma simplificado, serão adotados os valores obtidos com as medições em baixa frequência.

6.4.2.4. Sensibilidade com a Impedância de Surto de Torres de Transmissão, Z_t

Utilizando-se as mesmas condições do item 6.3.2.4, observa-se uma tendência ao crescimento do valor da tensão na cadeia de isoladores com o aumento de Z_t [tabela 6.6 e fig. 6.8].

Entretanto alguns dos valores analisados para Z_t estão acima dos valores reais. Para poder detectar com maior exatidão estes valores, foram realizados os estudos para modelagem da torre a seguir.

6.5 MODELAGEM DA TORRE

6.5.1 Considerações Sobre os Dados e a Situação a Ser Estudada

Em função dos estudos resumidos sobre o assunto e descritos, de forma sucinta no capítulo 4, observa-se que há necessidade de se comparar os valores de impedância de surto de torre de transmissão com aqueles obtidos experimentalmente em laboratório. Desta forma, haverá condições, de saber se o modelo empregado para calcular a impedância de surto da torre é razoável ou não.

Inicialmente melhorou-se os estudos desenvolvidos no item 6.3.2.4. Para isto, o primeiro passo foi calcular a sobretensão com os quatro modelos tradicionais de torre (Jordan, Wagner, Wagner Modificado e Daverniza). Assim se teria condições de analisar a variação da sobretensão, dentro de uma faixa de valores mais limitada pois correspondem a resultados obtidos através de modelos existentes. Procurou-se neste caso utilizar também as torres do trabalho de Wagner (fig.5.2), apenas com a finalidade de se ter um espectro maior de resultados.

Posteriormente, se utilizou as torres mostradas na fig. 6.1, que também foram empregadas no trabalho experimental realizado pelo CEPEL em conjunto com outras empresas do setor elétrico. Ainda com relação a este objetivo, procurou-se simular as mesmas condições do ensaio deste artigo [ref. 20], para uma maior fundamentação da análise.

6.5.2. Sensibilidade da Tensão na Cadeia de Isoladores com o Valor da Impedância de Surto de Torre para Modelos Distintos

O objetivo neste item foi o cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores para vários valores de impedância de surto de torre. Para cada modelo estudado foi calculado a respectiva tensão na cadeia de isoladores, na situação descrita no artigo de Jordan, ou seja: $Z_e = 200\Omega$, $Z_f = 10\Omega$, vão de 900 pés. Apenas foi modificado a forma de onda da descarga, para representar uma rampa com tempo de crista de $0.5\mu s$, e os coeficientes de acoplamento que foram todos calculados para as distâncias na própria torre (foi portanto desprezado os efeitos das flechas nos cabos guardas e nos condutores).

Na tabela 6.7 são mostrados os resultados de tensão na cadeia de isoladores e a impedância de surto Z_t para cada um dos modelos de cálculo utilizados.

TABELA 6.7 (SOBRETENSÃO NA CADEIA DE ISOLADORES x Z_t
PARA OS MODELOS DO CAPÍTULO 5 (figs 5.1 e 5.2)

MODELO		JORDAN (CILÍNDRICA)		WAGNER (CILÍNDRICA)		WAGNER MODIFICADO		DAVERNIZA (CÔNICA)		MÉTODO SIMPLIF
TORRE	RAIO DA TORRE	Z_t	DDPE	Z_t	DDPE	Z_t	DDPE	Z_b	DDPE	Z_b DDPE
345KV	4.0	159.86	0.36	279.8	0.48	219.86	0.43	238.27	0.451	
fig. 5.1A	16.5									153.6 0.3513
345KV	4.0	159.86	0.286	279.8	0.375	219.86	0.338	238.27	0.351	
fig. 5.1B	16.5									153.6 0.2809
220KV	8.0	87.15	0.144	200.53	0.242	140.83	0.193	159.24	0.210	
fig. 5.1C	7.0									148.55 0.200
220KV	10.0	81.8	0.11	149.2	0.180	134.2	0.148	152.9	0.16	
fig. 5.2C	14.5									111.92 0.13

Com relação à tabela 6.7 é importante observar que para as torres de 345kV foi usado o modelo cônico com o raio sugerido na fig. 4.1, e para as de 220 kV foi utilizado os modelos da classe 3, também apresentados na fig. 4.1.

Pode-se verificar ainda as seguintes conclusões:

- 6.5.2.1. Os valores de Z_i obtidos para uma torre, não são alterados pela presença de cabo guarda adicional.
 - 6.5.2.2. A presença do segundo cabo guarda provoca uma redução da tensão na cadeia de isoladores de 21% (em média) em relação à tensão na cadeia de isoladores da torre com um cabo guarda.
 - 6.5.2.3. A utilização da modelagem de Wagner leva a valores maiores de sobretensão na cadeia de isoladores (fórmula 3.16).
 - 6.5.2.4. Os valores mínimos são obtidos ou no modelo de Jordan, ou mesmo no método simplificado. Neste último caso, os resultados dependem do valor sugerido para o raio. O artigo [ref. 19] sugere adotar o raio na base da torre.
 - 6.5.2.5. A diferença entre os valores por Z_i pelo método de Wagner modificado e pela fórmula cônica de Daverniza não são superiores a 15% do maior deles.
- 6.5.3. **Análise Comparativa entre os Valores Obtidos com Ensaios em Escala Reduzida e com os Modelos de Torre.**

Os resultados mostrados nos itens anteriores permitem uma verificação da relação entre a sobretensão na cadeia de isoladores e o valor da impedância de surto, calculada para os vários modelos. A fim de que se possa ter uma idéia da variação entre estes valores e um valor admitido como verdadeiro, foram utilizados os resultados de ensaios em modelos de escala reduzida, [ref. 20].

Para tanto foram utilizadas os dados da fig. 6.1, onde estão mostrados os modelos em escala reduzida de torres de transmissão do sistema brasileiro.

Procurou-se também analisar a relação entre o raio da torre e o valor medido, não se restringindo apenas aos valores obtidos por formulações empíricas (fórmulas 2.33 e aquelas da fig 4.1), mas procurando, em alguns casos outras aproximações.

Na tabela 6.8 são mostrados os resultados dos valores calculados e dos valores medidos para a impedância de surto de torre por cada um dos modelos estudados (fig 6.1 e ref 20).

TABELA 6.8 (IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRES:
VALORES CALCULADOS X VALOR MEDIDO)

MODELO		JORDAN	WAGNER	WAGNER MODIF.	DAVERNIZA	VALOR EXPERI.
TORRE	RAIO DA TORRE	$z_t (\Omega)$	$z_t (\Omega)$	$z_t (\Omega)$	$z_t (\Omega)$	$z_t (\Omega)$
CILINDRICA EM TORRE	0.082	134.80	253.49	193.5	211.9	200
TRELICADA EM ALUMINIO	0.066	147.13	256.52	206.52	225.0	206
	0.084	133.47	252.05	192.05	210.0	
	0.093	127.77	246.00	185.94	204.41	
AUTOPORTANTE TRELICADA (500KV)	0.351	80.94	193.14	133.14	151.93	130
	0.223	104.44	220.36	160.4	178.92	
AUTOPORTANTE CILINDRICA (500KV)	0.321	72.38	182.36	122.63	141.6	180
	0.161	107.74	224.04	164.04	182.60	
V. ESTAIADA (500KV)	0.246	77	189.23	128.23	147.1	162
	0.551	42	140	80	100.45	

A partir dos resultados da tabela 6.8 pode-se obter para cada torre e para cada método o respectivo desvio em relação ao valor medido.

É importante observar que na tabela 6.9, que a penúltima coluna (da esquerda p/direita) indica os desvios médios absolutos para cada torre e cada raio e a última coluna (de cima p/baixo) os desvios médios absolutos por método de modelamento empregado.

TABELA 6.9. (DESVIOS DA IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRE EM
 RELAÇÃO AO VALOR MEDIDO)
 (PARA CADA MÉTODO, PARA CADA TORRE, PARA CADA RAIOS)

MODELO		JORDAN	WAGNER	W. MODIF.	DAVERNIZA	$\sum_{i=1}^N \frac{ \Delta\% }{N}$
TORRE	R_t	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$	
CILIND. EM COBRE	0.082	-32.6	26.74	-3.25	5.95	17.13
TRELI. EM ALUMI. (500KV)	0.066	-28.6	29.37	0.25	9.2	16.94
	0.084	-35.2	22.35	-6.7	1.94	16.53
	0.093	-37.97	19.4	-9.73	0.76	17
AUTO. TRELI. (500KV)	0.351	-37.7	48.6	2.4	16.86	26.39
	0.223	-19.6	69.50	23.4	37.63	37.54
AUTO. CILIND. (500KV)	0.321	-59.78	1.461	-31.87	-21.33	29.6
	0.161	-40.14	24.46	-8.8	1.44	18.71
V. ESTAIADA	0.246	-52	16.8	-20.89	-9.2	24.7
	0.551	-74	-13.5	-51	-38	44
$\sum_{i=1}^N \frac{ \Delta\% }{N}$		41.7	27.2	15.9	14.20	

A partir da tabela 6.9 observa que:

- 6.5.3.1. A modelagem segundo Jordan apresenta um valor bastante reduzido, em média 40% abaixo do valor medido.
- 6.5.3.2. A modelagem segundo Wagner na sua forma original apresenta um valor, em média 30% acima do valor medido.
- 6.6.3.3. As torres cilíndricas em cobre, treliçada em alumínio e autoportante cilíndrica com raio de 0.161 pés (raio da torre em escala reduzida) apresentam um desvio sempre inferior a 10% do valor medido, utilizando-se a modelagem por Wagner modificado ou por Daverniza.
- 6.5.3.4. A torre em V estaiada com raio de 0.551 pés apresenta um valor de impedância cujos desvios em relação ao valor medido é de aproximadamente 45% .
- 6.5.3.5. A torre autoportante treliçada apresenta desvios que são de cerca de 30% em média. Entretanto , na avaliação deste resultado os autores da [ref. 20]. crêem que o valor medido tenha sido subestimado em função de falhas nas ligações das treliças do modelo reduzido.
- 6.5.3.6. Poder-se-ia tentar recalcular os desvios , retirando as linhas referentes às torre em V com raio de 0.351 pés , e as colunas referentes aos modelos de Jordan e de Wagner. Ao fazer isto a tabela 6.9 seria reescrita na forma atualizada abaixo (tabela 6.10).

TABELA 6.10

Desvios da Impedâncias de Surto de Torre com Relação
ao Valor Medido, na Forma Atualizada
(Para cada Método, para cada Raio, para cada Torre)

MODELO		WAGNER MODIFICADO	DAVERNIZA	$\sum \frac{ \Delta\% }{N}$
TORRE	RALO DA TORRE	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$
CILINDRICA EM COBRE	0.082	-3.25%	5.95%	4.6%
TRELICADA EM ALUMINIO	0.066	0.25%	9.2%	4.72%
	0.084	-6.7%	1.94%	5.32%
	0.093	9.73%	-0.76%	4.24%
AUTOPORTANTE CILINDRICA	0.161	8.8%	1.44%	5.12%
V ESTAIADA	0.246	-20.8%	-9.2 %	15%
$\sum \frac{ \Delta\% }{N}$		8.255%	4.74%	

Com relação à tabela 6.10, observa-se que:

6.5.3.7. De maneira geral todos os desvios médios absolutos diminuíram de valor. A exceção da torre em V estaiada todas as outras torres apresentam desvios inferiores ao medido.

6.5.3.8. Os valores de desvios estão dentro de uma faixa onde é impossível discutir qualquer valor referente ao raio para a torre treliçada em alumínio.

6.5.3.9. No tocante ao raio da torre autoportante cilíndrica o valor admitido pode ser considerado como bastante razoável. Se o raio admitido fosse de 0.321 pés seu desvio médio absoluto seria de 26,6%, cujo resultado é consideravelmente alto, tendo em vista os demais resultados da tabela 6.10.

CAPÍTULO 6

ILUSTRAÇÕES

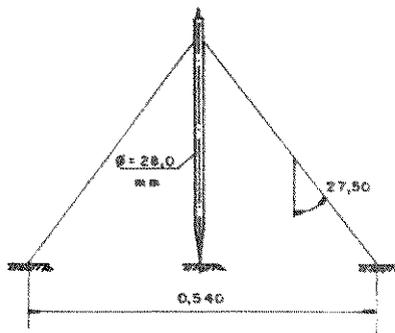
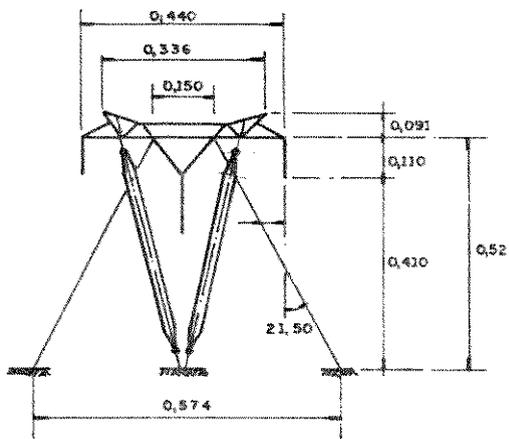
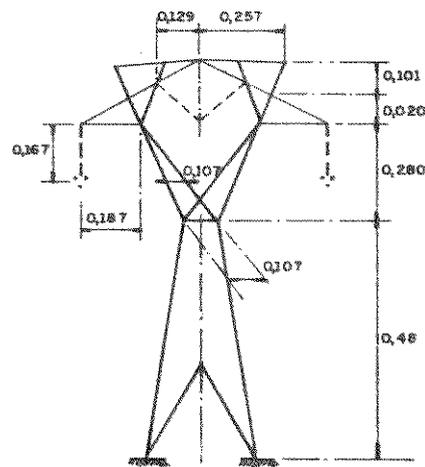
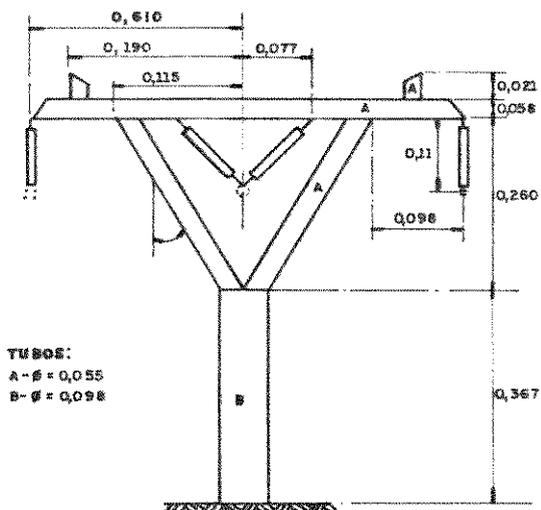
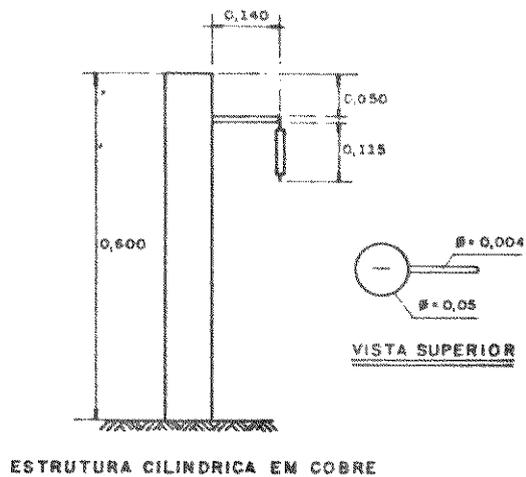
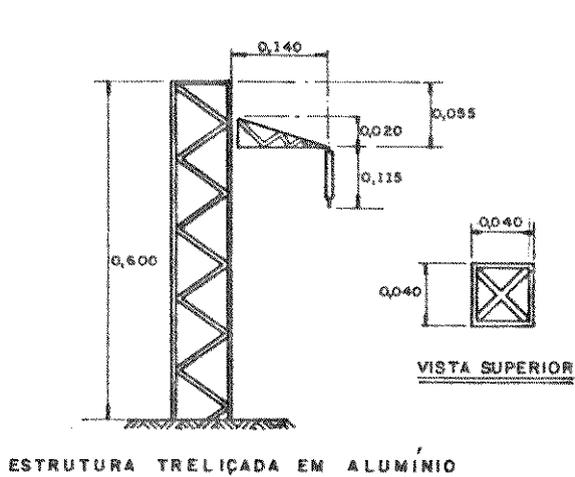


FIG.6.1 - DIMENSÕES DAS ESTRUTURAS ANALISADAS (TODAS AS COTAS EM METROS)

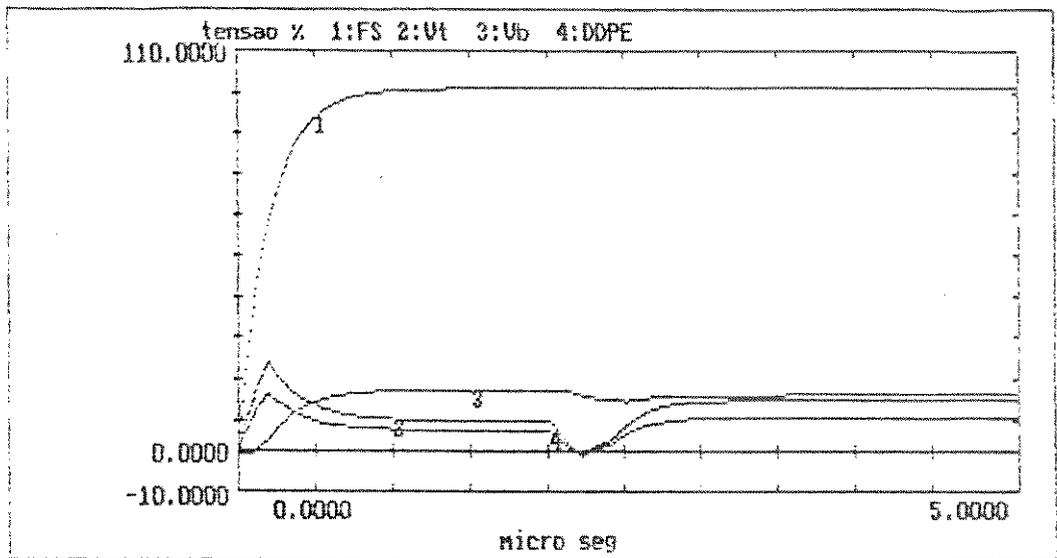


fig 6.2A : descarga e tensões de interesse (torre de Jordan /fig 5.2)

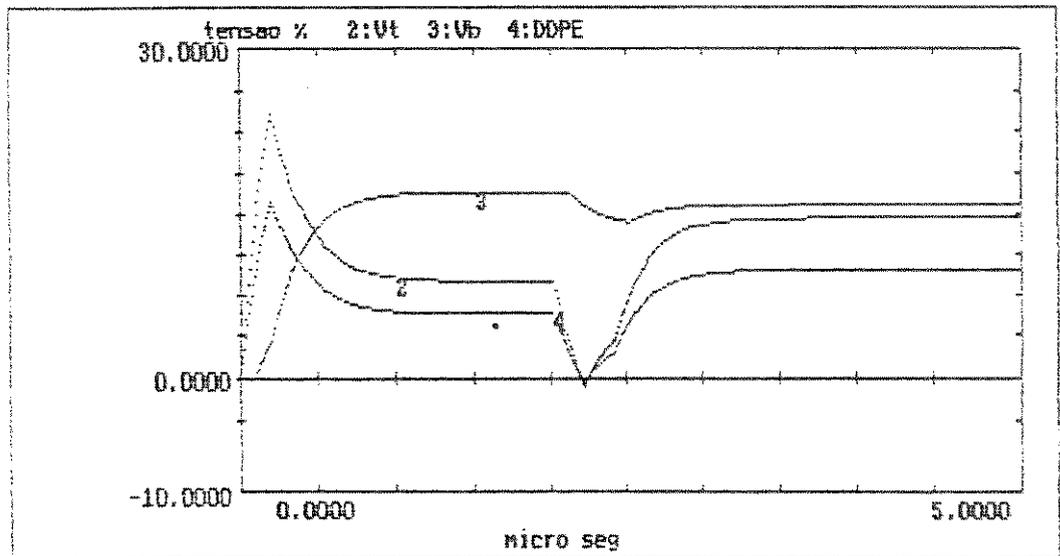


fig 6.2B : tensões de interesse (torre de Jordan/ fig 5.2)

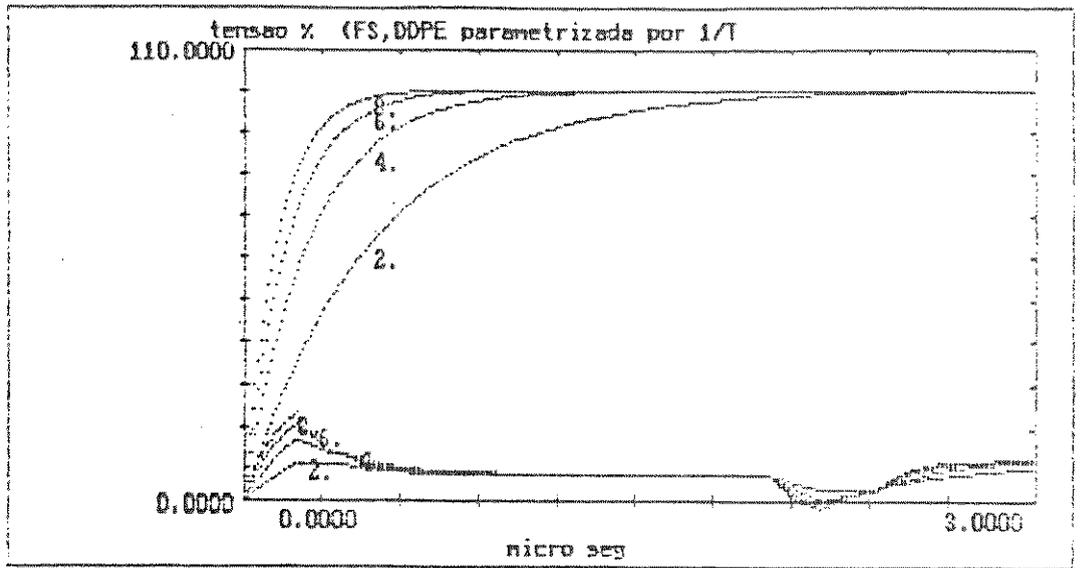


fig 6.3A: DDPE X t , para várias duplas exponenciais ,(torre Jordan /fig 5.2)

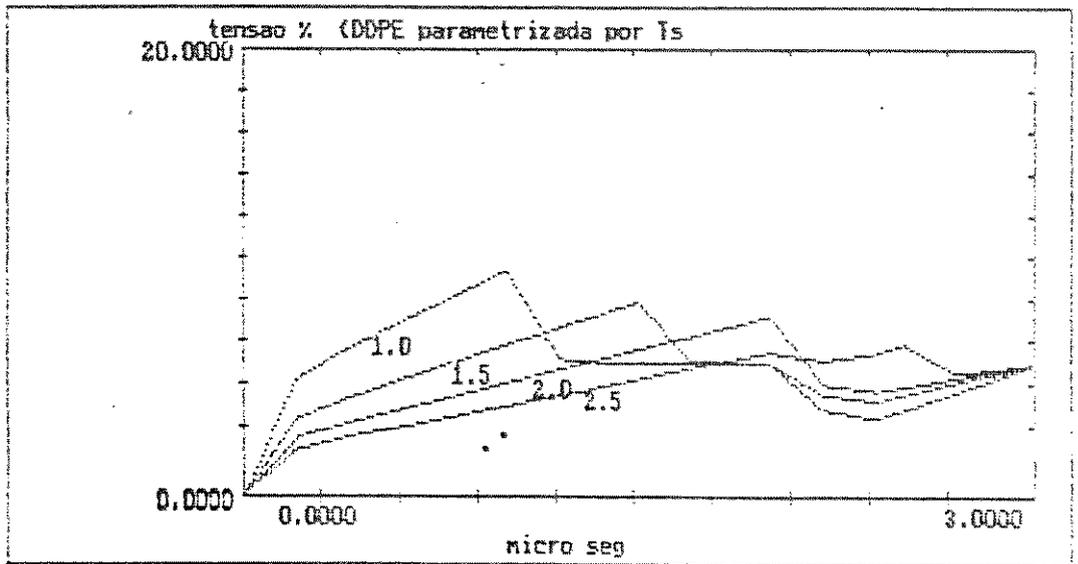


fig 6.3B: DDPE x t para várias rampas (torre de Jordan / fig 5.2)

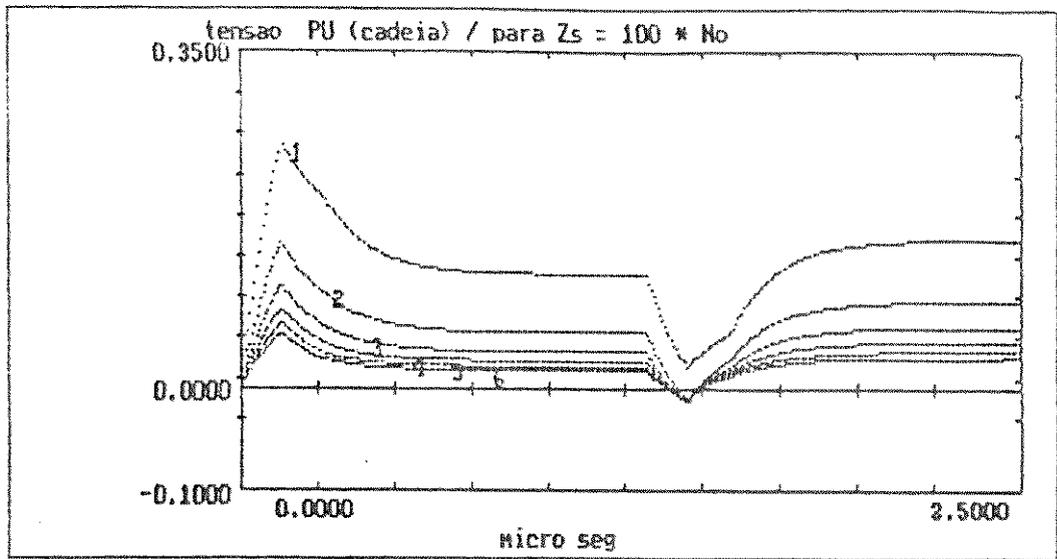


fig 6.4 : DDPE x t para vários Z_s (torre de Jordan / fig 5.2)

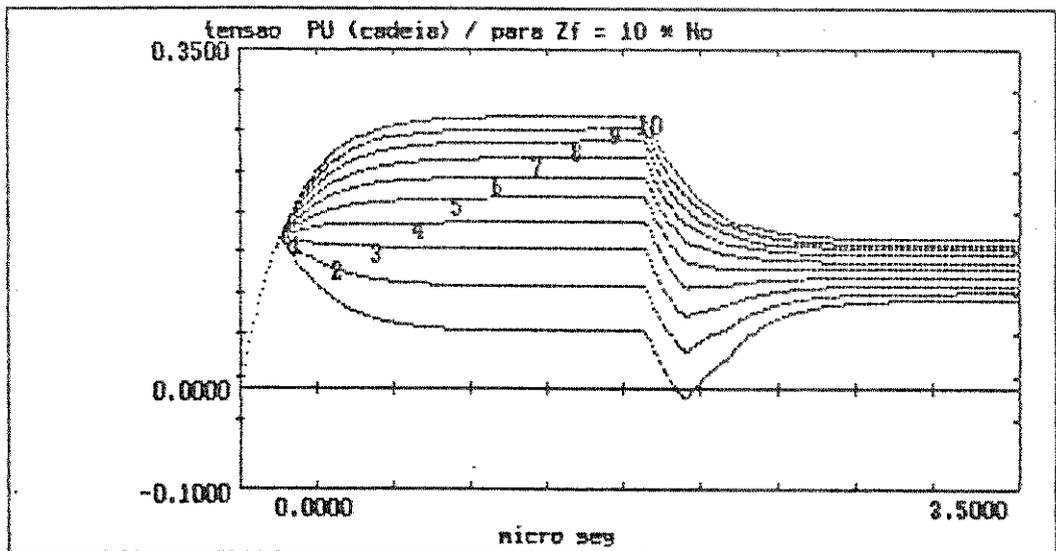


fig 6.5 DDPE x t para vários Z_f (torre de Jordan / fig 5.2)

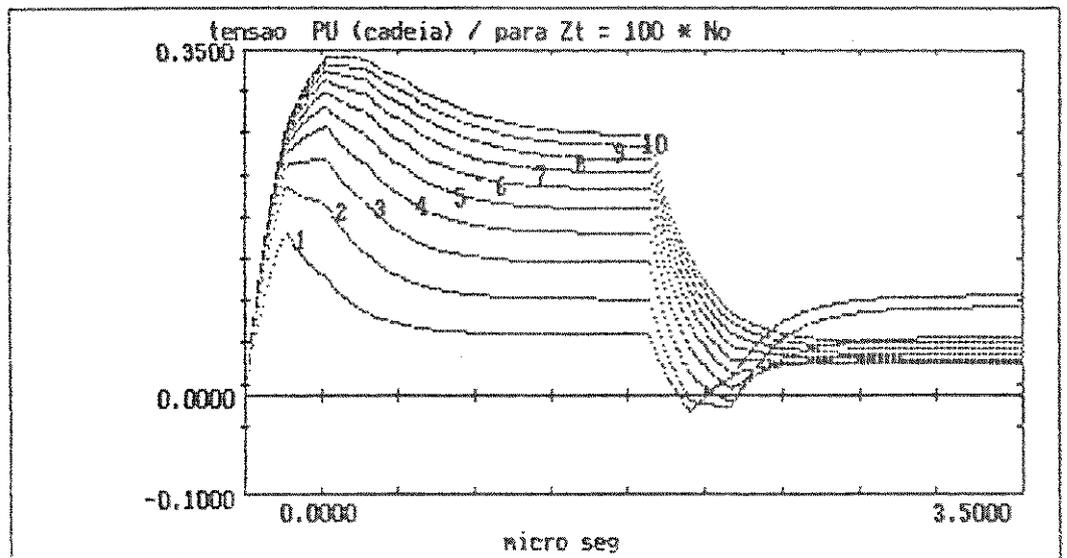


fig 6.6 : DDPE x t para vários Z_t (torre de Jordan / fig 5.2)

obs : em todas as figuras onde aparece % ou PU. na escala , a base ou o valor de 100% é o valor de pico da descarga

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho podemos destacar os seguintes pontos:

- 7.1. O cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores, na situação estudada, produz resultados semelhantes, tanto pela metodologia das reflexões sucessivas, quanto pela metodologia de campo. Em vista dos valores mais conservativos obtidos e da maior simplicidade para a implementação computacional, sugerimos a utilização do primeiro método.
- 7.2. Em estudos de novos modelos para torres de transmissão, aconselhamos a utilização do método da teoria de campo, associado a um cuidadoso trabalho experimental.
- 7.3. Um dos parâmetros mais importantes no cálculo da sobretensão na cadeia de isoladores é a impedância de surto do canal da descarga. Entretanto, a dependência desta impedância com o valor do comprimento do flash e do raio da descarga indicam a necessidade de um maior conhecimento do modelo físico da mesma.
- 7.4. Outro parâmetro de grande importância neste estudo é a impedância de surto de pé de torre. A implementação de um modelo que considere a dependência com: a resistividade do solo, forma de onda e amplitude da descarga, acoplamento cabo condutor - cabo contra-peso e cabo guarda - cabo contra peso é altamente recomendável e deve ser considerado objeto de pesquisas futuras.
- 7.5. A utilização das fórmulas de Wagner modificada ou de Daverniza conduz a resultados aceitáveis em torres convencionais (autoportantes, cilíndricas, etc.). O emprego destes modelos se adequa satisfatoriamente a um dimensionamento inicial deste tipo de torres.

- 7.6. Para torres não convencionais (V estaiada e trapézio) nenhum dos modelos vistos neste trabalho são diretamente aplicáveis, requerendo um estudo e modificações no desenvolvimento destas metodologias. Na ausência de um modelo adequado sugerimos a utilização de valores típicos obtidos em trabalhos experimentais, como aquelas realizadas pelo CEPEL [ref. 20].
- 7.7. O método simplificado proposto na ref. 15 precisa ser melhor analisado e avaliado principalmente quanto à sua aplicação, sobretudo no que se refere a qual valor de raio da torre a ser utilizado. Parece-nos que o valor proposto para torres de circuito duplo, em particular, deve ser reanalisado.
- 7.8. Em estudos futuros das metodologias de cálculo de sobretensões causadas por descargas atmosféricas nas torres, sugerimos a inclusão nestes modelos de uma forma para considerar os seguintes efeitos: presença dos braços de sustentação da torre, presença do treliçamento, velocidade de propagação em seu interior e as consequências destes efeitos.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jordan C.A., Lightning Computations for Transmission Lines with Overhead Ground Wires, Part I General Electric Review - Vol. 37, no. 3, Março/1934 pp 130-137
- [2] Jordan C.A., Lightning Computations for Transmission Lines with Overhead Ground Wires, Part II General Electric Review vol. 37, no. 4, Março/1934 pp 180-186
- [3] Jordan C.A., Lightning Computations for Transmission Lines with Overhead Ground Wires, Part III General Electric Review vol. 37, no. 5, Março/1934 pp 234-250
- [4] L.V. Bewley, Travelling Waves on Transmission Systems
2^o Edição Corrigida 1963 ,Dover Publicações CAPS:6,7,8,9
- [5] J.G. Anderson e Outros, Transmission Line Reference Book 345 KV and Above. EPRI (cap 12)
Electric Power Research Institute, Palo Alto, California
2^o Edição 1982
- [6] C.F. Wagner, A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines
AIEE-PAS- vol 69 Part III, 1950, pp 1187-1196
- [7] R. Lundholm, R.B.Finn Jr, W.S. Price, Calculations of Transmission Line Lightning Voltage by Fields Concepts
AIEE-PAS-vol 76, 1957, pp 1271-1283

- [8] C.F. Wagner, A.R. Hilleman, A New Approach to Calculation of Lightning Performance of Transmission Lines II
AIEE-PAS- vol. 78, 1959, pp 996-1021
- [9] C.F. Wagner, A.R. Hilleman, A New Approach to Calculation of Lightning Performance of Transmission Lines III
AIEE-PAS-vol 79, 1960, pp 589-603
- [10] J.G. Anderson, J.H.Hagenguth, Magnetic Field Around a Transmission Line Tower
AIEE-PAS-vol 78, 1959, pp 1644-1650
- [11] F.A. Fischer, J.G. Anderson, Hagenguth, J.H., Determination of a Lightning Response of Transmission Lines by Means of Geometrical Models
AIEE-PAS-vol 79, 1960, pp 1725-1736
- [12] M. Kawai, Studies of the Surge Response on a Transmission Line Tower
IEEE-PAS - vol 86, 1967, pp. 665-678
- [13] M.A. Sargent, M.Daverniza, Tower Surge Impedance
IEEE - PAS - vol. 88, 1969, pp 680-687
- [14] M.A. Sargent, M.Daverniza, G.J. Limborn, Liew Ah Choy e Outros Modelling for Lightning Performance Calculations
IEEE - PAS - vol 98, 1979, pp 1900-1908
- [15] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines
IEEE - PAS - vol. 104, 1985, pp 919-932
- [16] Liew Ah Choy, M.Daverniza, A Sensitivity Analysis of Lightning Performance Calculations for Transmission Lines
IEEE-PAS - vol. 90, 1971, pp 1443-1451

- [17] W. A. Chisholm e Y. L. Chow, Lightning Surge Response of Transmission Tower
IEEE-PAS - vol. 102, 1983, pp 3232-3342
- [18] Kohsi Okumura e Akira Kijima, A Method for Computing the Surge Impedance of Transmission Line Tower by Electromagnetic Field Theory
Electrical Engineering in Japan, Vol. 105, 1985 pp 66-68
- [19] Masaru Ishii, Tatsuo Kawamura, Teruya Kouno e Outros, Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis
IEEE - 103-3 - PWRD, Winter Meeting - 1989 - N. York
- [20] Victor Hugo Gomes de Andrade, José Roberto Fonseca, Mario José das Neves, Paulo Cesar Esmeraldo e Outros, Resposta de Linhas de Transmissão a Impulsos Atmosféricos Através da Utilização de Modelos Reduzidos.
VIII - SNTPEE - Grupo III - São Paulo - 1986
- [21] Walter c. Johnson, Linhas de Transmissão e Circuitos
Guanabara Dois - 1980 (CAP 1)
- [22] D. E. Hedman, Teoria das Linhas de Transmissão II
Volume 3 - 2ª Edição (CAP 8)
Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência - Série PTI Convênio Eletrobrás/UFSM - 1983
- [23] K. Berger, Surges in High-Voltage Networks / Edited by Klaus Regaller , Cap. 1, Lightning Surges
Plenum Press - New York and London
- [24] Allan Greenwood, Electrical Transients in Power Systems
Wiley - Interscience, of John Wiley Sons, Inc., 1971 (CAP 7)

- [25] J.P. Bickford, N. Mullineux and J.R. Reed, Computation of Power-System Transients
Peter Peregrinus Ltd, IEE Monograph Services, 1986
- [26] M.A. Sargent and M. Daverniza, The Calculation of Double Circuit Outage Rate of Transmission Lines
IEEE - PAS - vol. 86, 1967, pp. 665-678
- [27] J.R. Fonseca, V.H.G. Andrade, P.C.V. Esmeraldo, L.E.N. Dias, Lightning Impulse Tests on Tower Models
IEEE - PAS vol. 103, 1984, pp. 893-896
- [28] K.J. Cornick, and J.R. Lucas, Inclusion of Surge Diverters in System Overvoltage Calculations
Proc. IEE, vol. 126, no. 12, 1979, pp. 1263-1268
- [29] K. Berger, R.B. Anderson, Parameters of Lightning Flashes
Electra n^o 41 CIGRE, pp 23-39, 1975
- [30] Willian S. Dorn, E Daniel McCracken, Cálculo Numérico com Estudos de Casos em Fortran IV, Edt. Campus/USP
- [31] Westinghouse Electric Corporation, Transmission and Distribution Reference Book.
4^a Edição, 1960
- [32] Sunde, E.D., Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Pricenton, New York, Van Nostrand, 1948
- [33] Fortescue, C.M., Theoretical and Field Investigation of Lightning, AIEE - vol. 48, pp. 449-468, 1929
- [34] Fortescue, C.M., Conwel, R.N., Lightning Discharges and Line Protective Measures, AIEE - vol. 50, pp 1090-1100, 1931

- [35] Golde, R.H., Physics of Lightning, London Academic Press, vol 1 1977 .
- [36] Golde, R.H., Lightning Protection, London Academic Press, vol 2 1977
- [37] Willian H. Hait Jr., Eletromagnetismo
3^a Edição: Livros técnicos e Científicos Editora S.A., 1987
- [38] Ramo, Whinnery, Van Duzer, Campos e Ondas em Eletrônica das Comunicações
Editora Guanabara Dois, 1981