

MESTRADO ENGENHARIA ELÉTRICA

U F P E

ESTUDOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPACTAS
DE ALTA TENSÃO

MIGUEL OTÁVIO BARRETO CAMPELO DE MELO

ÁREA DE SISTEMAS

RECIFE - PE - BRASIL

JULHO 1997

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPACTAS
DE ALTA TENSÃO

Miguel Otávio Barreto Campelo de Melo
Orientador: Eduardo Fontana
Co-Orientador: Sreeramulu **Raghuram** Naidu

Tese apresentada à Coordenação do
Mestrado em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, em
julho 1997, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de estudos elétricos para avaliação dos efeitos de descargas atmosféricas sobre linhas de transmissão de energia elétrica compactas de alta tensão (230 kV e 500 kV). Neste contexto é apresentada uma metodologia de cálculo para a determinação do desempenho destas linhas obtendo-se, como **resultado**, um dimensionamento adequado das torres de transmissão.

A realização de estudos desta natureza é de suma importância durante a fase de projeto de uma linha de **transmissão**, por oferecer a possibilidade de redução dos altos custos de **implantação**, sem alteração do desempenho e confiabilidade do sistema de transmissão de energia elétrica. Ressalta-se que o custo da linha pode alcançar um percentual de até 85 % do custo total do **sistema**.

Os tópicos contidos neste trabalho tratam inicialmente do histórico de evolução e o estado da arte da tecnologia de linhas **compactas**, até o seu estágio atual de desenvolvimento. Descreve-se, em seguida, os fenômenos associados à descarga **atmosférica**, incluindo os mecanismos de sua formação com uma classificação de seus diversos tipos e **características**. Finalmente faz-se uma análise do efeito da descarga **atmosférica** na geração das ondas viajantes em sistemas de **transmissão**, incluindo-se os seguintes estudos :

- Modelagem das **torres**, cabos **pára-raios**, condutores e sistemas de **aterramento**
- Determinação do ângulo de blindagem entre os condutores e cabos pára-raios
- Estudos de ondas viajantes usando o programa EMTP (ATP) (**Electromagnetic transient program**)
- Análise paramétrica com respeito a duração da frente de onda, a localização da descarga a resistividade do solo, tipo do aterramento, estrutura e **topografia** da rota da linha.
- Estudo dos efeitos dos acoplamentos entre os cabos pára-raios e os condutores e análise do desempenho quanto a descargas atmosféricas usando simulação estatística.

SUMMARY

This work describes a study to evaluate the effects of atmospheric discharges on 230 and 500 kV compact transmission lines. The methodology presented herein allows selecting appropriate tower configurations for optimum performance of the electrical transmission system under lightning

Studies related to lightning **performance** of **transmission** lines are relevant during project **development**, due to the possibility of reducing the high costs involved in the implementation of the line without posing limitations on its performance and **reliability**. It should be pointed out that costs related to implementation of transmission lines can reach up to 85% of the total investment required to put together the entire electrical **system**

Topics included in this manuscript start with an overview of the development and state of the art of the compact transmission line **technology**. This is followed by a description of the electrical phenomena associated with lightning discharges, including mechanisms involved in their formation as well as a classification of the several lightning types and features. Finally, the analysis method to account for the effects of lightning strokes on compact transmission lines is described, and their performance is investigated by carrying out the following studies :

- Digital modelling of towers, ground wires, conductors and earthing systems.
- Determination of the shielding angle amongst conductors and ground **wires**
- Studies of travelling waves generated by lightning strokes on transmission lines using the electromagnetic transients program (**EMTP-ATP**)
- Sensitivity analysis relative to the lightning wavefront time, stroke localization on the line, earth resistivity, tower type and terrain profile along routes.
- Studies of electrical coupling effects amongst ground wires and conductors.
- Statistical simulation analysis of the performance of compact transmission lines under lightning.

A DEUS criador do dom da vida, aos meus pais, que me deram esse dom, a Cátia, que constrói comigo a árvore da vida, e a Murilo, Suzana e Débora, frutos dessa árvore.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a DEUS, a meus pais e a minha família, que muito **contribuíram** e me incentivaram para a **realização** deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Eduardo Fontana e ao Prof. S. R. Naidu pelos comentários e sugestões **apresentadas**, que muito auxiliaram para a melhoria da qualidade desta tese.

A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e ao engenheiro Murilo L. Pinto por me terem dado as condições para a realização deste mestrado. Em particular gostaria de agradecer ao engenheiro Fernando R. Alves que viabilizou essa minha participação.

Gostaria de dar um agradecimento especial ao engenheiro Luiz Carlos Fonseca pelas inúmeras contribuições e apoio dado tanto nas simulações computacionais **realizadas**, bem como na elaboração desta dissertação.

Aos colegas da CHESF, em especial da área de linhas de transmissão que me forneceram muitos dados utilizados neste trabalho.

Ao engenheiro José Rafael **Daconti** pelas discussões e fornecimento de material bibliográfico sobre os modelos de sistemas de **aterramento**, e também ao engenheiro Oswaldo Régis Jr pela colaboração nos estudos sobre linhas compactas.

Aos colegas e professores do mestrado de engenharia elétrica da UFPE, em especial a **Manfredo B. C. Lima** pelo apoio dado durante a realização deste mestrado.

Aos engenheiros Dalton O. C. Brasil e Weide Sato, pelos ensinamentos que muito **contribuíram** na minha formação nesta área específica da engenharia elétrica.

A Maria do Carmo Barreto Campelo de Melo, pelas sugestões gerais na forma de apresentação deste trabalho.

Finalmente gostaria de agradecer a todos os meus amigos que direta ou indiretamente ajudaram neste trabalho, em particular os do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL-RJ), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal da Paraíba (UFPB, C. Grande), de FURNAS Centrais Elétricas, da ELETROBRAS e da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)

*Escuta isto J6, pára e considera as maravilhas de DEUS.
Sabes como Ele as opera, e faz brilhar o relâmpago de sua nuvem ?
Sabes a lei do equilíbrio das nuvens, e o milagre daquele cuja ciência é infinita ?
Tua ordem fará os relâmpagos surgirem? (J6 37, 14-16^{38,34-35})*

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	2
2. ANÁLISE TEÓRICA	4
2.1. LINHAS COMPACTAS-Histórico e Estado da Arte	4
2.2. O RAIO	11
2.2.1. Histórico	11
2.2.2. Mecanismo de Formação de Cargas nas Nuvens	12
2.2.3. Formação da Descarga Atmosférica	14
2.2.4. Tipos de Raios e seus Efeitos	16
2.2.5. Características dos Raios	17
2.3. A DESCARGA ATMOSFÉRICA NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	23
2.4. ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	28
2.5. MODELAGEM ADOTADA	32
2.5.1. Modelo Eletrogeométrico da Linha	32
2.5.2. Onda de Corrente do Raio	34
2.5.3. Linha de Transmissão	34
2.5.4. Impedância de Surto da Torre	36
2.5.5. Impedância de Surto do Cabo Para-Raios	37
2.5.6. Aterramento	38
2.6. SUPORTABILIDADE DOS ISOLAMENTOS	41
3. CÁLCULO DO DESEMPENHO DAS LINHAS COMPACTAS	42
3.1. QUEDA DIRETA	44
3.2. QUEDA INDIRETA	46
3.2.1. Cálculo das Impedâncias de Surto do Modelo da Linha	46
3.2.2. Cálculo da Tensão Topo da Torre	53
3.2.3. Cálculo do Desempenho Quanto a Queda Indireta	60
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
7. ANEXOS	75
7.1. ANEXO 1-EMTP (ATP) - ONDAS VIAJANTES	75
7.2. ANEXO 2-CURVAS DAS TENSÕES TOPO DE TORRE	100
7.3. ANEXO 3-COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO	113

*Deus troveja com uma voz maravilhosa, faz
prodígios que nos são incomprensíveis.
(Jó 37,5)*

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
C TORRE 1
C
-1T1 T1-GND 0. 176. 3 0E08 31.00 1 2
C
C TORRE 2
C
-1T2 T2-GND 0. 176. 3 0E08 31.00 1 2
C
C TORRE 3
C
-1T3 T3-GND 0. 176. 3 0E08 31.00 1 2
C
C TORRE 4
C
-1T4 T4-GND 0. 176 3 0E08 31.00 1 2
C
C TORRE 5
C
-1T5 T5-GND 0. 176 3.0E08 31.00 1 2
C
C TORRE 6
C
-1T6 T6-GND 0. 176 3.0E08 31.00 1 2
C
C TORRE 7
C
-1T7 T7-GND 0. 176 3.0E08 31.00 1 2
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C
-1T1 T2 0 345 3.0E08 500.0 1 2
C
-1T2 T3 0 345 3.0E08 500.0 1 2
C
-1T3 T4 0 345 3.0E08 500.0 1 2
C
-1T4 T5 0. 557. 3.0E08 500.0 1 2
C
-1T4 M4 0 557. 3.0E08 250 0 1 2
C
-1M4 T5 0 557. 3.0E08 250.0 1 2
C
-1T5 T6 0 345 3 0E08 500.0 1 2
C
-1T6 T7 0 345. 3 0E08 500.0 1 2
c

c

C CARTOES DE FONTES

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
13M4 -1 1. 3.0E-6 0 5 50.E-6 0

C

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
T1 T2 M4 T4 T4-GND

C

```

BEGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
SCLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN. UNIT=4 FILE=EMTP42.PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15 0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 42 = TORRE AUTOPORTANTE ( 2 C P RAIOS)
C QUEDA NO MEIO DO VAO
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 3.5 OHM E XL= 0004 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRETE DE ONDA = 5 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 500 OHMMETRO
C
C
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345.0
T7 345.0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 20.0
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 3.5
T2GRND 3.5
T3GRND 3.5
T4GRND 3.5
T5GRND 3.5
T6GRND 3.5
T7GRND 3.5
T1GRND 0004
T2GRND 0004
T3GRND 0004
T4GRND 0004
T5GRND 0004
T6GRND 0004
T7GRND 0004

```

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C TORRE 1

C

-1T1 T1-GND 0. 176. 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 2

-1T2 T2-GND 0. 176 3 0E08 31.00 1

C

C TORRE 3

C

-1T3 T3-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 4

C

-1T4 T4-GND 0. 176 3.0E08 31.00 1

C

C TORRE 5

C

-1T5 T5-GND 0 176 3.0E08 31.00 1

C

C TORRE 6

-1T6 T6-GND 0. **176** 3.0E08 31.00 1

C

C TORRE 7

C

-1T7 T7-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1

C

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C

-1T1 T2 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2

C

-1T2 T3 0. **345** 3.0E08 500.0 1 2

C

-1T3 T4 0. **345** 3 0E08 500.0 1 2

C

-1T4 T5 0. 557. 3 0E08 500.0 1 2

C

-1T4 M4 0. 557 3 0E08 250 0 1 2

C

-1M4 T5 0 557. 3 0E08 250.0 1 2

C

-1T5 T6 0. 345 3 0E08 500 0 1 2

C

-1T6 T7 0. 345 3 0E08 500 0 1 2

C CARTOES DE FONTES

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
13M4 -1 1. **5.0E-6** 05 **50.E-6** 0.

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1 T2 M4 T4 T4-GND

```

BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN. UNIT=4 FILE=EMTP46 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15.0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C CASO 46 = TORRE AUTOPORTANTE ( 2 C P RAIOS)
C QUEDA NO MEIO DO VAO
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 57.1 OHM E XL= 0224 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 1 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 1500 OHMMETRO
C
C
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345 0
T7 345 0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 200
T4-GNDT4GRND 20 0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 20.0
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 57.1
T2GRND 57.1
T3GRND 57.1
T4GRND 57.1
T5GRND 57 1
T6GRND 57.1
T7GRND 57.1
T1GRND 0224
T2GRND 0224
T3GRND 0224
T4GRND 0224
T5GRND 0224
T6GRND 0224
T7GRND 0224
C

```

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C TORRE 1

-1T1 T1-GND 0 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 2

-1T2 T2-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 3

C

-1T3 T3-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 4

C

-1T4 T4-GND 0. 176 3 0E08 31.00 1

C TORRE 5

C

-1T5 T5-GND 0 176 3 0E08 31.00 1

C

C TORRE 6

-1T6 T6-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1

C

C TORRE 7

C

-1T7 T7-GND 0. 176 3 0E08 31.00 1

C

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C

-1T1 T2 0. 345 3 0E08 500.0 1

C

-1T2 T3 0. 345 3 0E08 500.0 1

C

-1T3 T4 0. 345. 3 0E08 500.0 1

C

-1T4 T5 0. 557 3.0E08 500.0 1

C

-1T4 M4 0. 557 3 0E08 250 0 1

C

-1M4 T5 0 557 3 0E08 250.0 1

C

-1T5 T6 0. 345 3 0E08 500 0 1

C

-1T6 T7 0. 345 3 0E08 500.0 1

C

C CARTOES DE FONTES

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

13M4 -1 1. 1 0E-6 0.5 50.E-6 0.

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1 T2 M4 T4 T4-GND

```

BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
$OPEN. UNIT=4 FILE=EMTP47 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1.020E-8 15.0E-6 60. 0
40000 : 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 47 = TORRE AUTOPORTANTE ( 2 C P RAIOS)
C QUEDA NO MEIO DO VAO
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 57.1 OHM E XL= 0224 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 3 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 1500 OHMMETRO
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345 0
T7 345.0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 200
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 20.0
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 57 1
T2GRND 57 1
T3GRND 57 1
T4GRND 57 1
T5GRND 57 1
T6GRND 57 1
T7GRND 57 1
T1GRND 0224
T2GRND 0224
T3GRND 0224
T4GRND 0224
T5GRND 0224
T6GRND 0224
T7GRND 0224
C
C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS
C

```

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C

C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C

C TORRE 1

C

-1T1 T1-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1

C

C TORRE 2

C

-1T2 T2-GND 0 176 3.0E08 31.00 1

C

C TORRE 3

C

-1T3 T3-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1

C

C TORRE 4

C

-1T4 T4-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1

C

C TORRE 5

C

-1T5 T5-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 6

C

-1T6 T6-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1 2

C

C TORRE 7

C

-1T7 T7-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1 2

C

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C

-1T1 T2 0. 345. 3.0E08 500.0 1

C

-1T2 T3 0 345. 3.0E08 500.0 1

C

-1T3 T4 0. 345. 3.0E08 500.0 1

C

-1T4 T5 0. 557. 3.0E08 500.0 1

C

-1T4 M4 0. 557 3.0E08 250.0 1

C

-1M4 T5 0. 557 3.0E08 250.0 1

C

-1T5 T6 0. 345 3 0E08 500.0 1

C

-1T6 T7 0. 345 3.0E08 500.0 1

C

C

C CARTOES DE FONTES

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

13M4 -1 1. 3.0E-6 0.5 50.E-6 0.

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1 T2 M4 T4 T4-GND

C

```

BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
$OPEN. UNIT=4 FILE=EMTP48 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15 0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 48 = TORRE AUTOPORTANTE ( 2 C P RAIOS)
C QUEDA NO MEIO DO VAO
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 57 1 OHM E XL= 0224 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 5 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 1500 OHMMETRO
C
C
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345.0
T7 345 0
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20 0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 200
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 57.1
T2GRND 57.1
T3GRND 57.1
T4GRND 57.1
T5GRND 57.1
T6GRND 57.1
T7GRND 57.1
T1GRND 0224
T2GRND 0224
T3GRND 0224
T4GRND 0224
T5GRND 0224
T6GRND 0224
T7GRND 0224

```

C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTOA/ELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C

C TORRE 1

-1T1 T1-GND 0 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 2

C

-1T2 T2-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 3

C

-1T3 T3-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 4

C

-1T4 T4-GND 0. 176 3.0E08 31.00 1

C

C TORRE 5

C

-1T5 T5-GND 0 176 3 0E08 31.00 1

C

C TORRE 6

C

-1T6 T6-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1

C

C TORRE 7

C

-1T7 T7-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1

C

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTOA/ELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C

-1T1 T2 0. 345 3 0E08 500.0 1 2

C

-1T2 T3 0. 345. 3 0E08 500.0 1 2

C

-1T3 T4 0 345 3 0E08 500.0 1 2

C

-1T4 T5 0. 557 3 0E08 500 0 1

C

-1T4 M4 0. 557 3 0E08 250.0 1 2

C

-1M4 T5 0. 557 3 0E08 250 0 1

C

-1T5 T6 0. 345 3 0E08 500.0 1 2

C

-1T6 T7 0 345 3 0E08 500 0 1 2

C

C CARTOES DE FONTES

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

13M4 -1 1 5 0E-6 0.5 50.E-6 0.

C

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1 T2 M4 T4 T4-GND

C DOIS CARTOES EM BRANCO NO FINAL DO CASO

7.2. ANEXO 2-CURVAS DAS TENSÕES TOPO DE TORRE

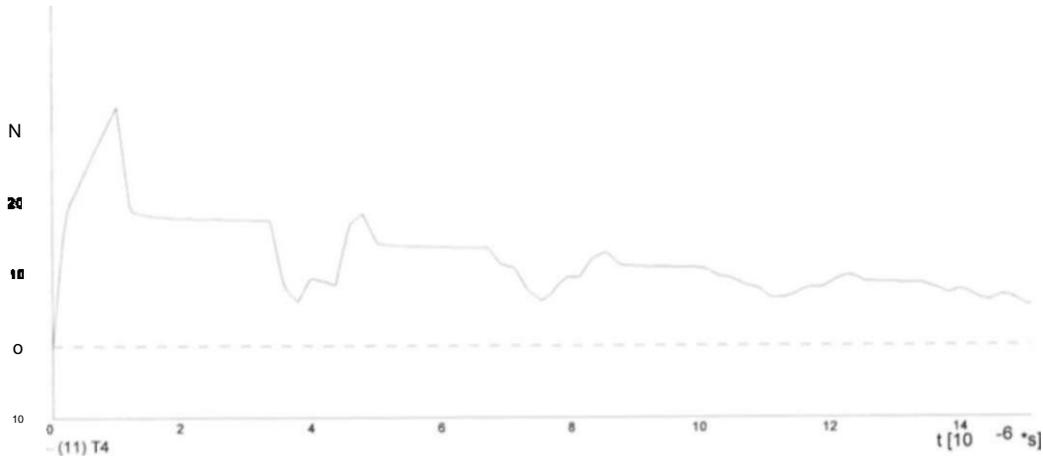
1. INTRODUÇÃO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de estudos elétricos para avaliação dos efeitos de descargas atmosféricas sobre linhas de transmissão de energia elétrica compactas de alta tensão (230 kV e 500 kV). Tem como objetivo determinar uma metodologia de cálculo para a determinação do desempenho destas linhas. Essa nova abordagem vem contribuir para aperfeiçoar esses estudos.

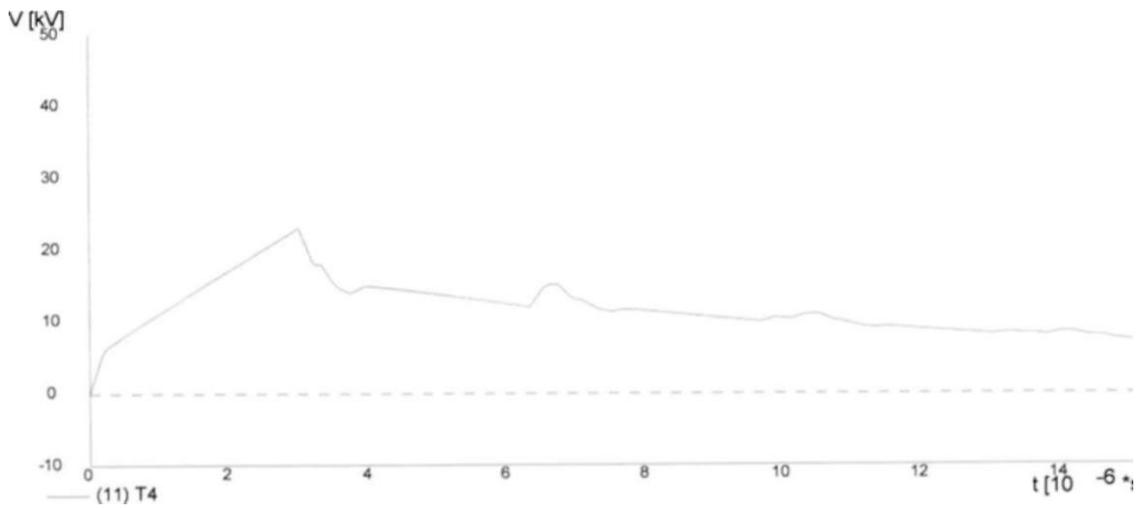
A realização desses estudos é de suma importância para o projeto da torre da linha de transmissão, pois pode-se reduzir os altos custos de implantação, sem comprometer o seu desempenho e a confiabilidade do sistema de transmissão. Ressalta-se que o custo da linha pode alcançar um percentual de até 85 % do custo total do sistema. Esse custo inclui todos os equipamentos das subestações envolvidas e todas as linhas. Por exemplo, uma linha típica de 500 kV com um comprimento de 200 km custa aproximadamente US\$ 40 milhões. Comparando-se os custos envolvidos no sistema de transmissão, verifica-se que um transformador, um disjuntor e um pára-raio equivalem a 5 km, 1 km e 0,4 km de linha, respectivamente.

No Capítulo 2, são apresentadas as principais considerações teóricas utilizadas neste estudo. O capítulo inicia com um histórico e uma análise do estado da arte de linhas compactas. Analisa-se também os fenômenos associados à descarga atmosférica, seu mecanismo de formação, com uma classificação dos tipos e suas características intrínsecas. Em seguida, trata-se do efeito da geração das ondas viajantes nos sistemas de transmissão. Finalmente, é definida a metodologia adotada no trabalho, descrevendo-se a modelagem de cada um dos dispositivos ou componentes do sistema em estudo.

O cálculo dos índices de desempenho de linhas compactas quanto a descargas atmosféricas é tratado no Capítulo 3, onde também são apresentados os dados da tensão topo de torre gerada pela descarga atmosférica.



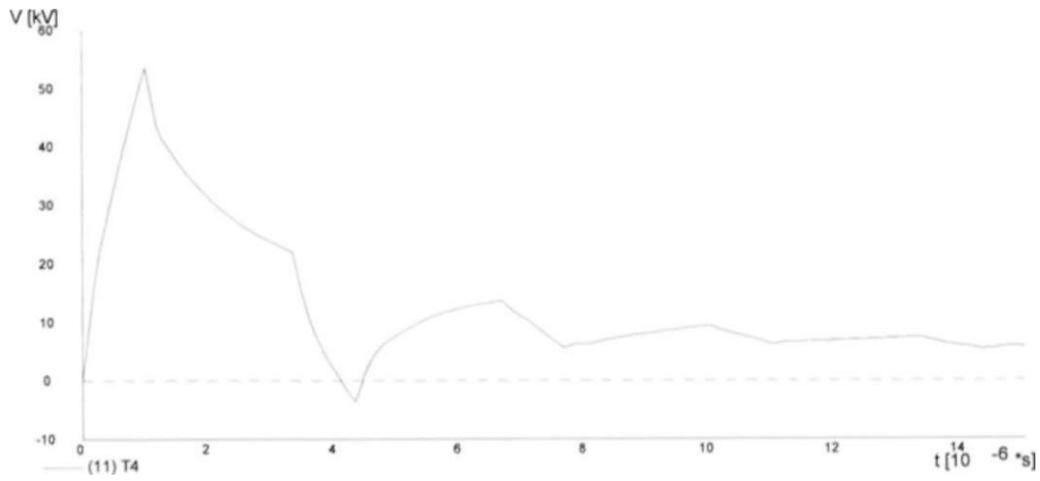
Torre **Autoportante** (dois c p raios)
 Queda na Torre
 Frente de onda = 1 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m



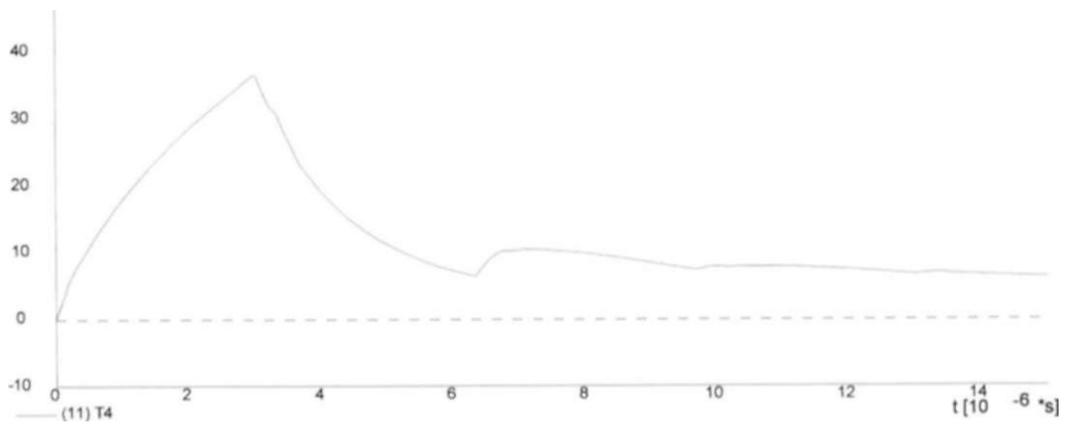
Torre Autoportante (dois c p raios)
 Queda na Torre
 Frente de onda = 3 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m



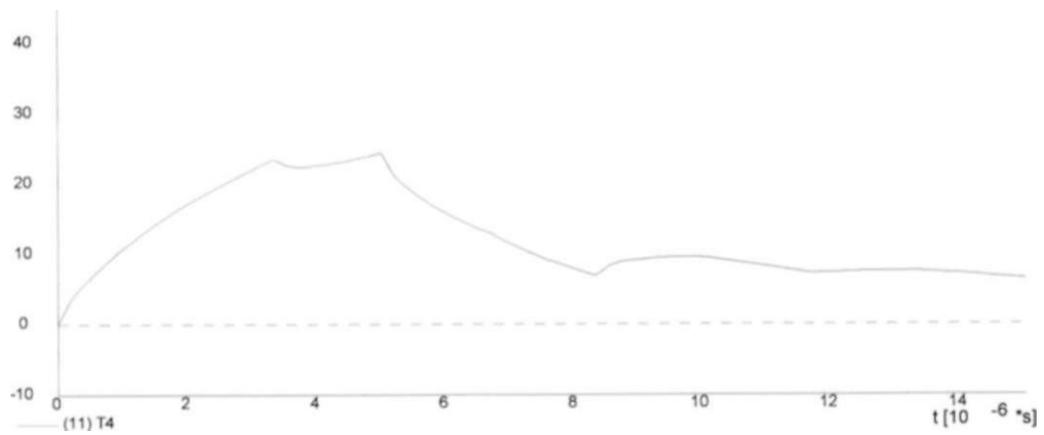
Torre Autoportante (dois c p raios)
 Queda na Torre
 Frente de onda = 5 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m



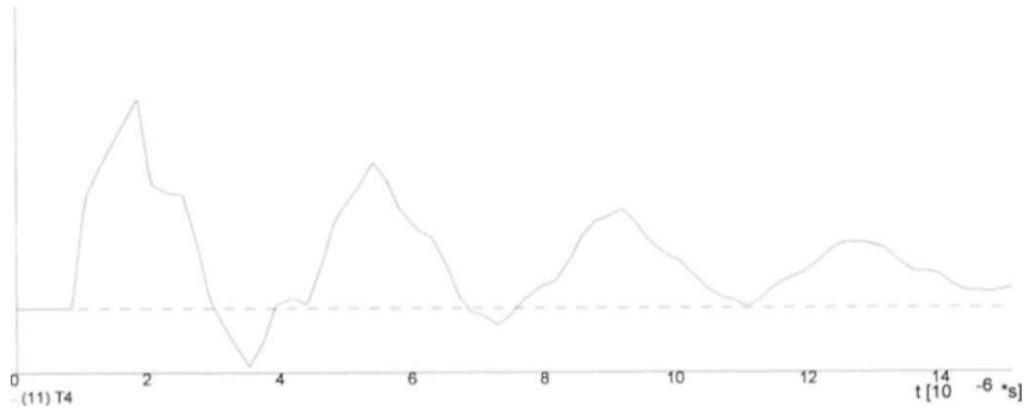
Torre Autoportante (dois c p raios)
 Queda na Torre
 Frente de onda = 1 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m



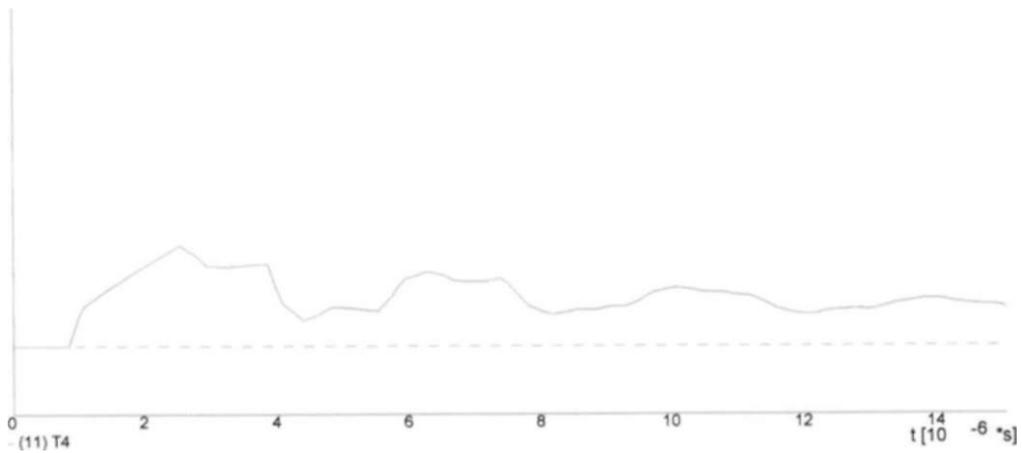
Torre Autoportante (dois c p raios)
 Queda na Torre
 Frente de onda = 3 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m



V [kV]
50

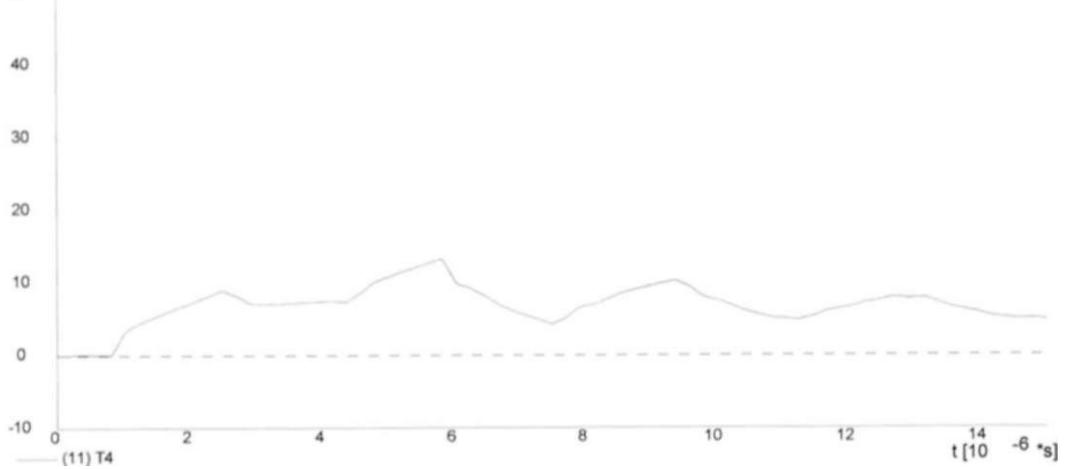


Torre Autoportante (2 c p raios)
Queda no Meio do Vão
Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m

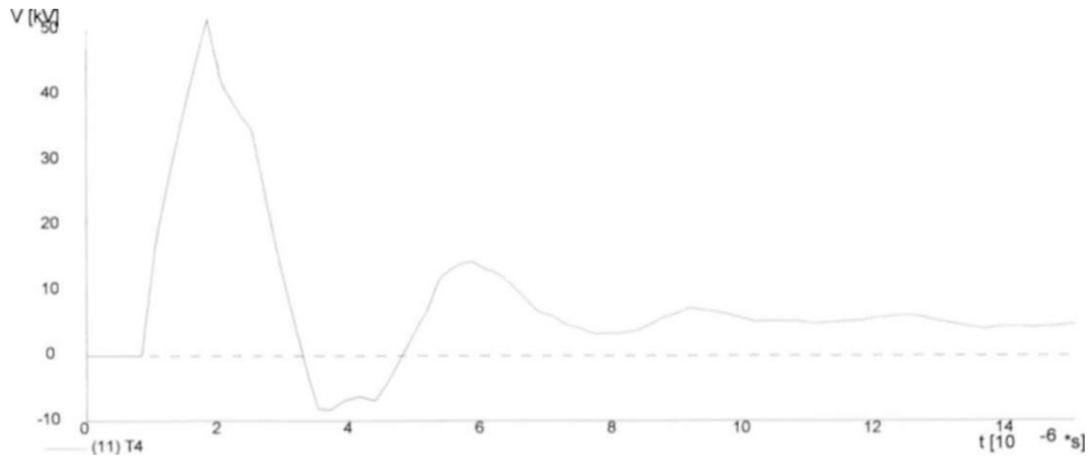


Torre Autoportante (2 c p raios)
Queda no Meio do Vão
Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m

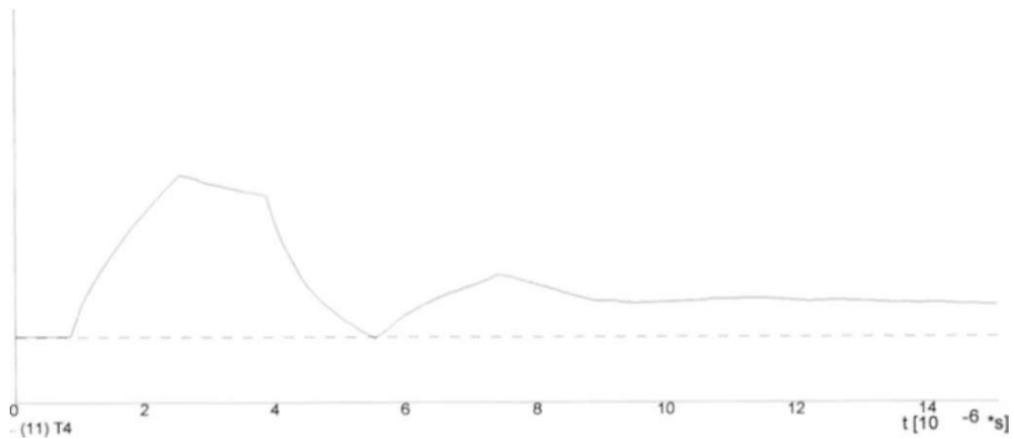
V [kV]
50



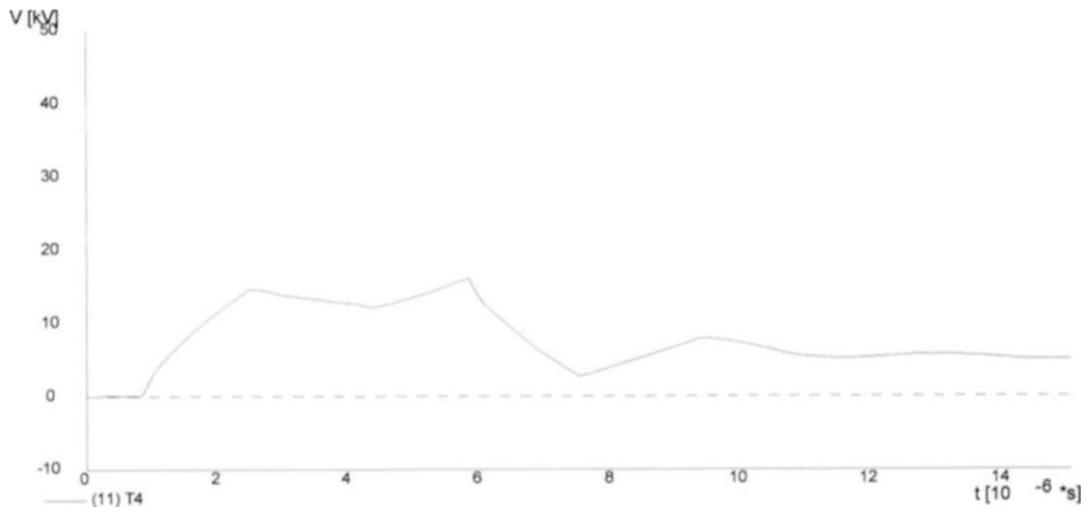
Torre Autoportante (2 c p raios)
Queda no Meio do Vão
Frente de Onda = 5 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m



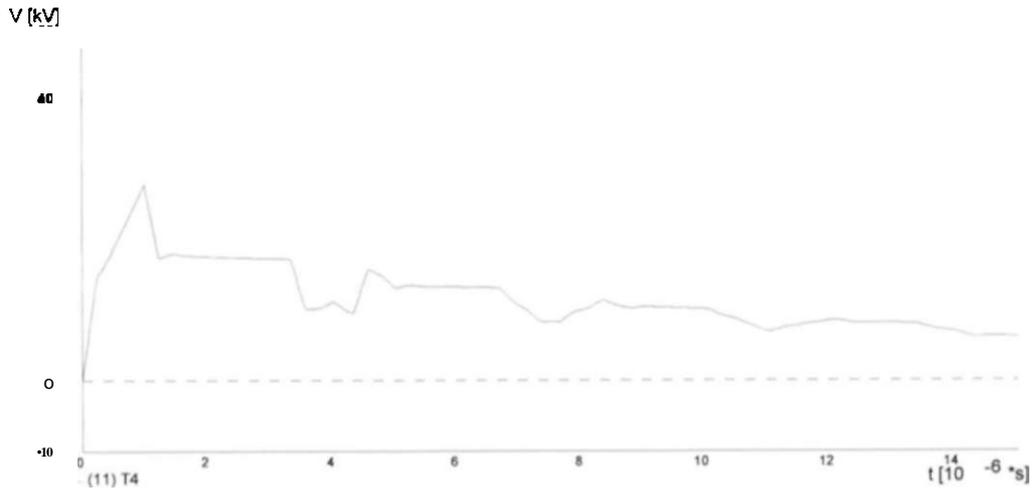
Torre Autoportante (2 c p raios)
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda - 1 microsegundo Resistividade = 1500 ohm m



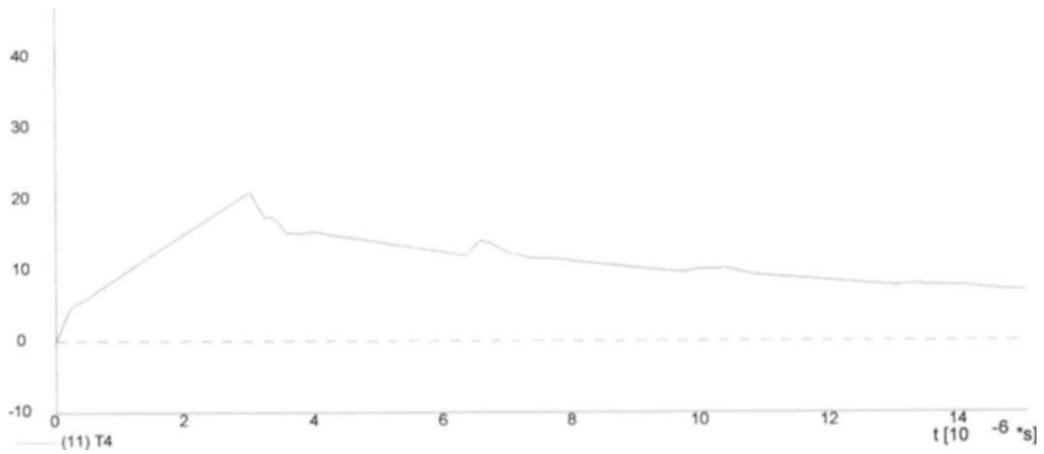
Torre Autoportante (2 c p raios)
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda - 3 microsegundo Resistividade = 1500 ohm m



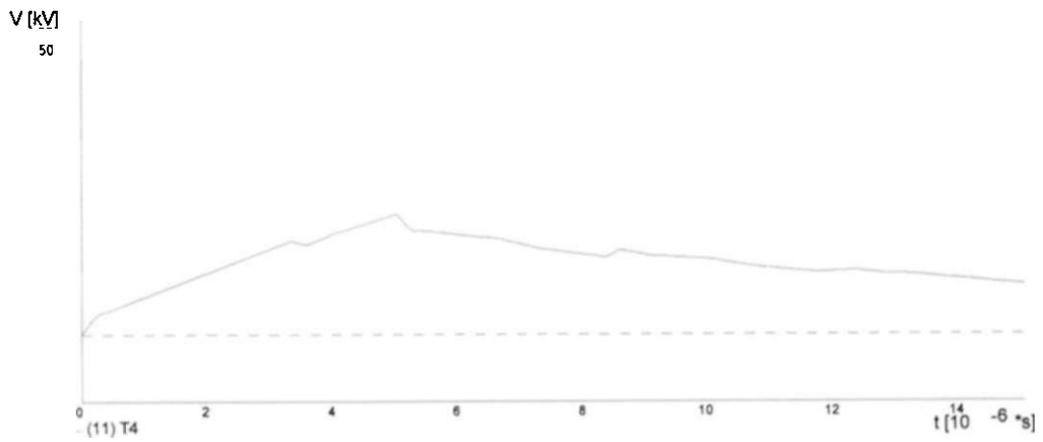
Torre Autoportante (2 c p raios)
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 5 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m

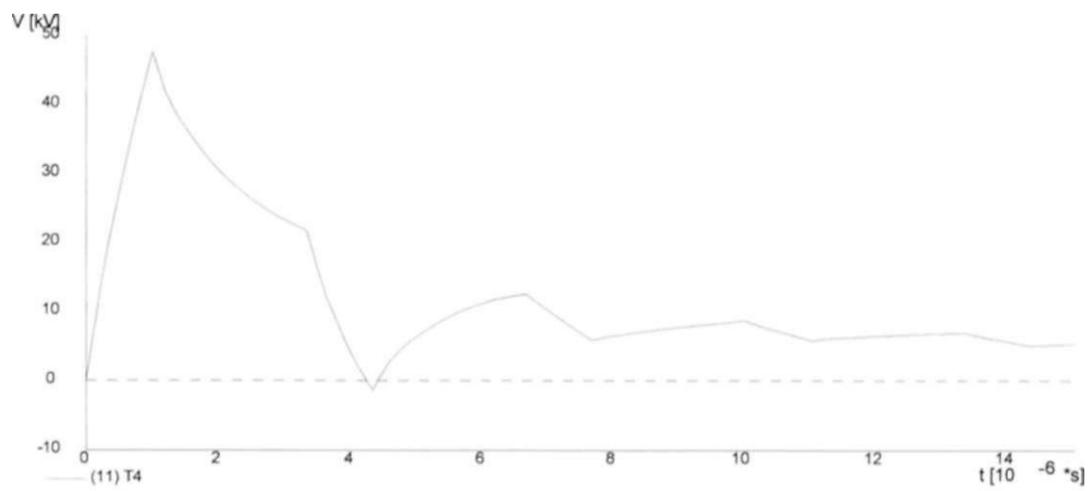


LT Trapézio
 Queda na Torre
 Frente de Onda - 1 microsegundo Resistividade = 500 ohm m

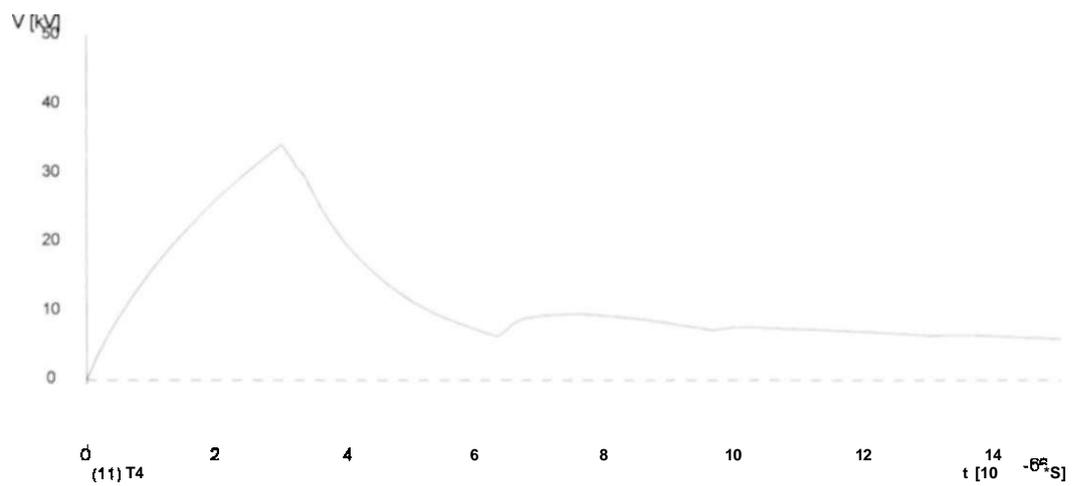


LT Trapézio
 Queda na Torre
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 500 ohm m

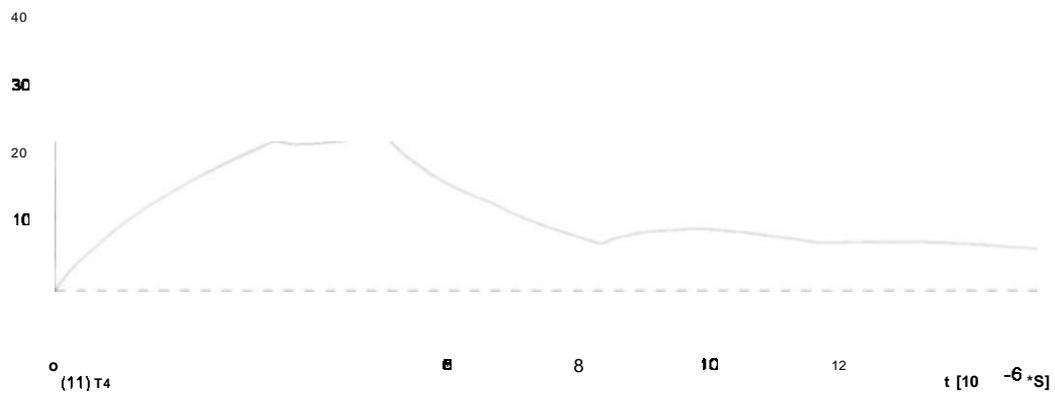


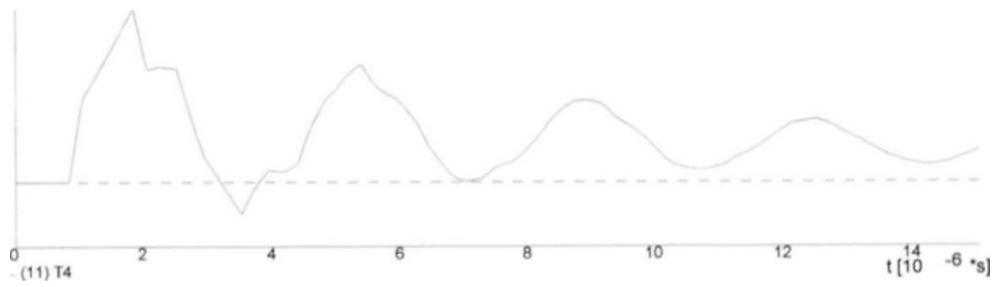


LT Trapézio
 Queda na Torre
 Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m

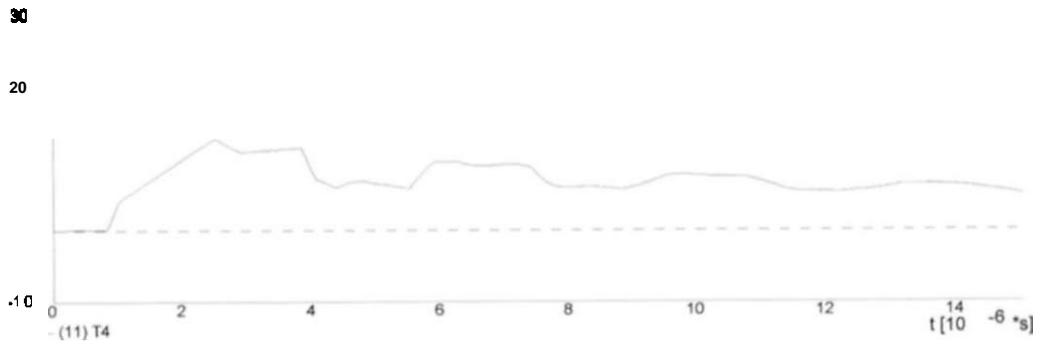


Torre Trapézio
 Queda na Torre
 Frente de onda = 3 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m

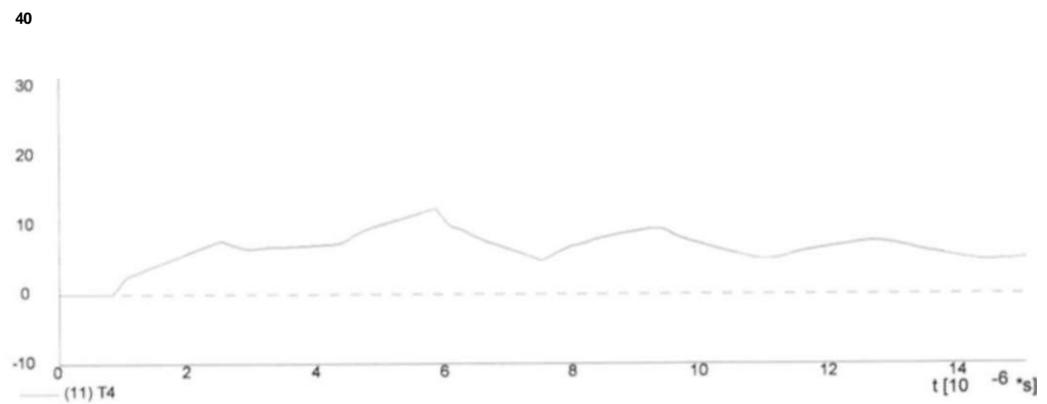




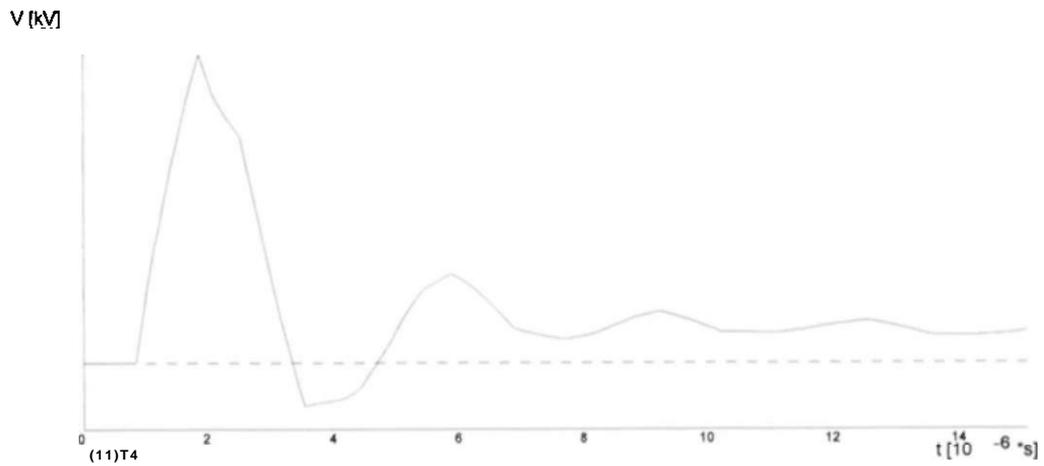
Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 500 ohm m



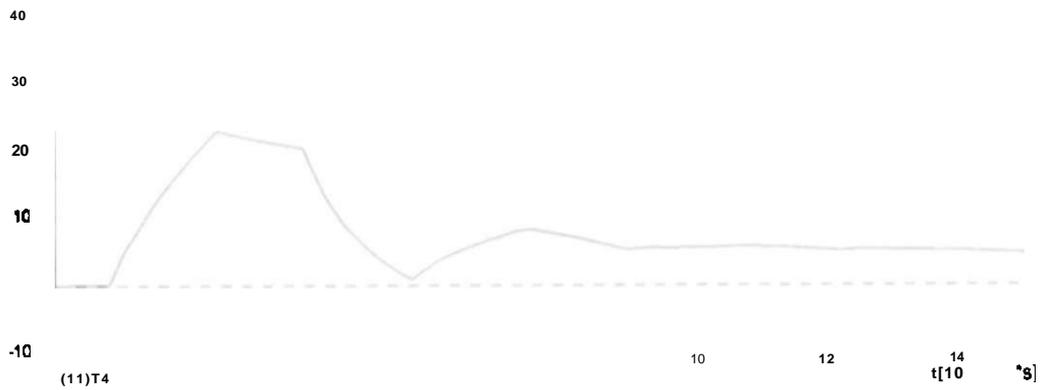
Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 500 ohm m



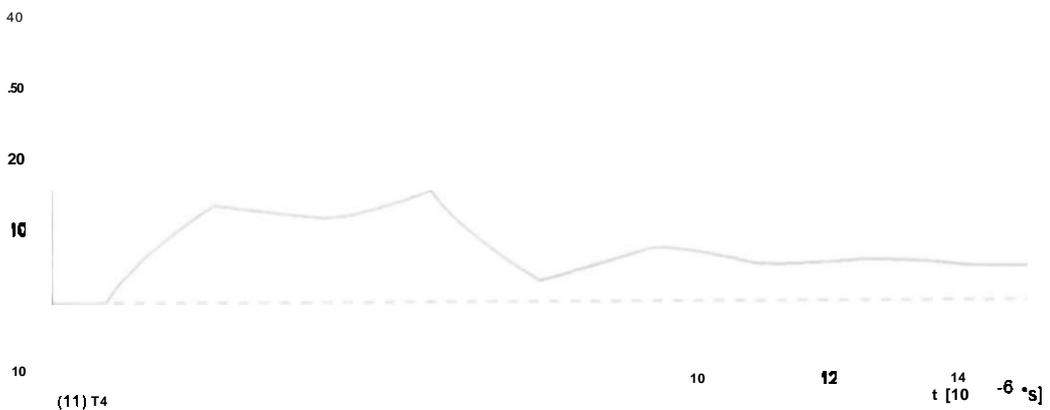
Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 5 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m



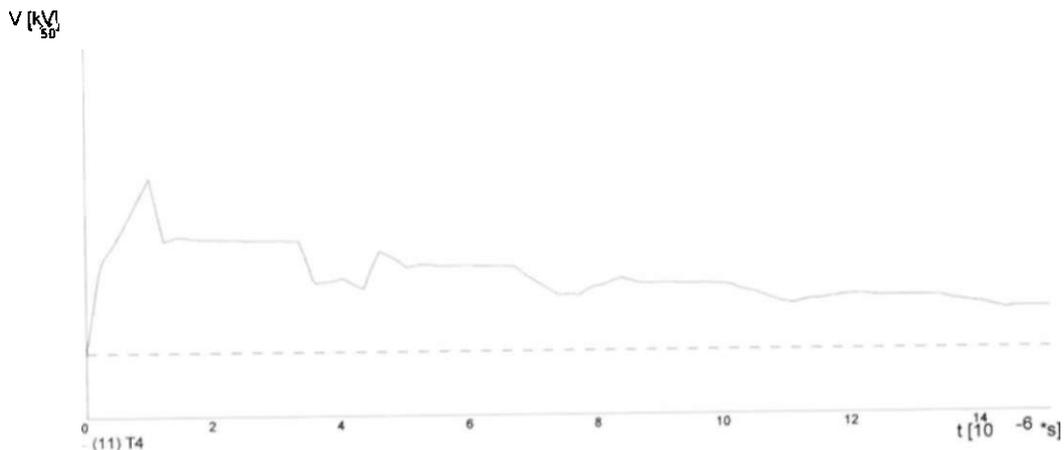
Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda - 1 microsegundo Resistividade =1500 ohm.m



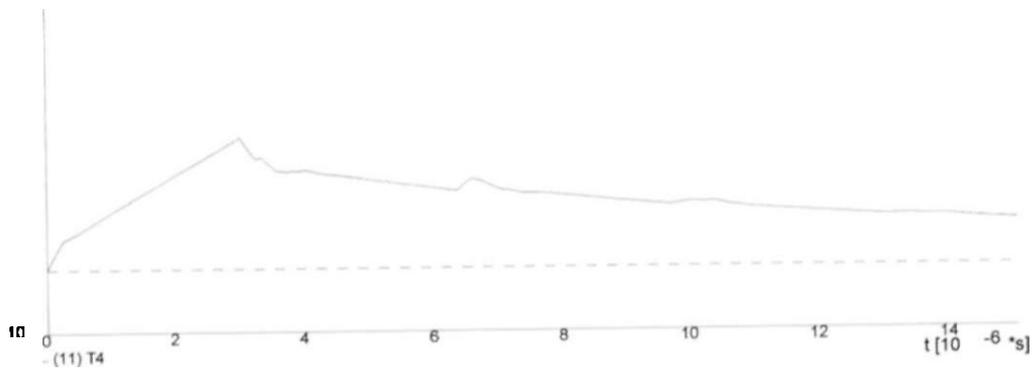
Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade =1500 ohm.m



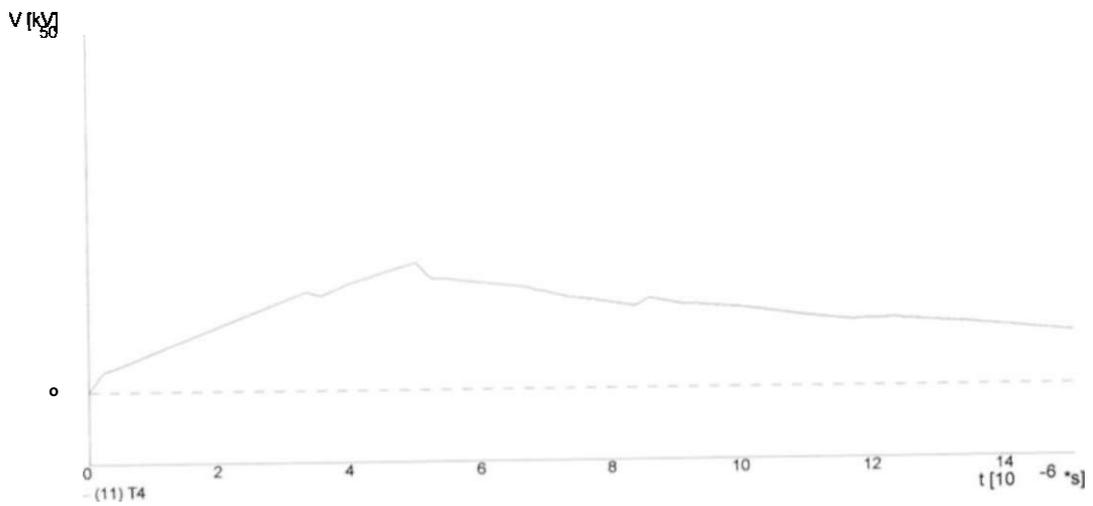
Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 5 microsegundo

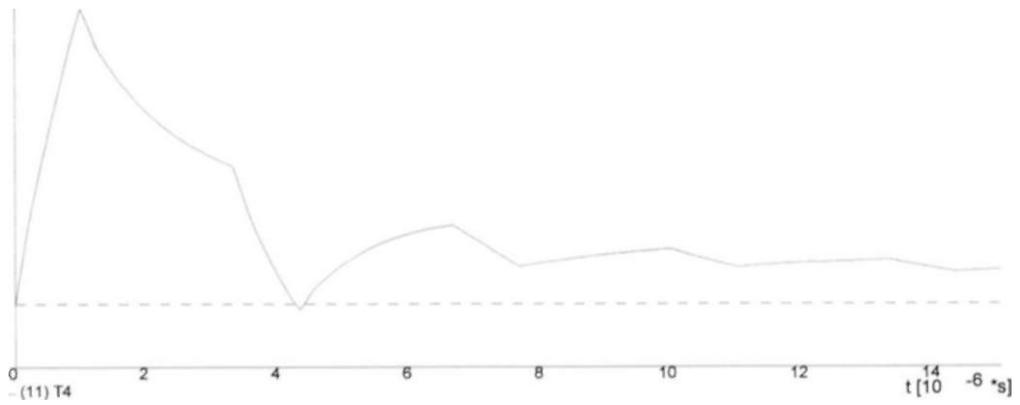


LT Trapézio LPNE
 Queda na Torre
 Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m

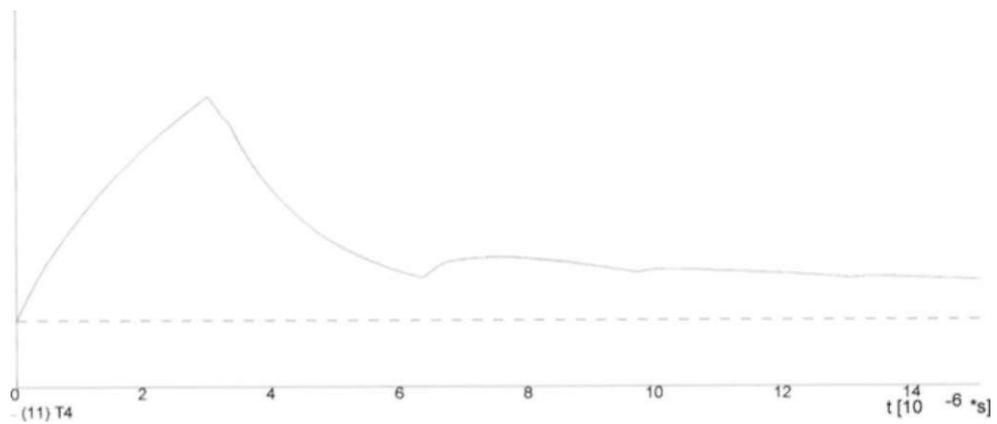


LT Trapézio LPNE
 Queda na Torre
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m

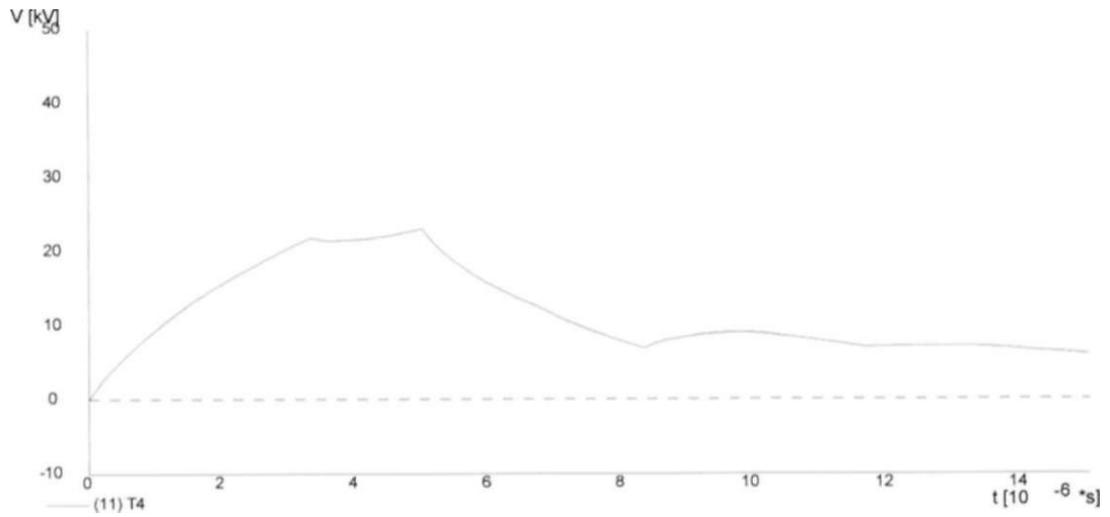




LT Trapézio LPNE
 Queda na Torre
 Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m



LT Trapézio LPNE
 Queda na Torre
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m

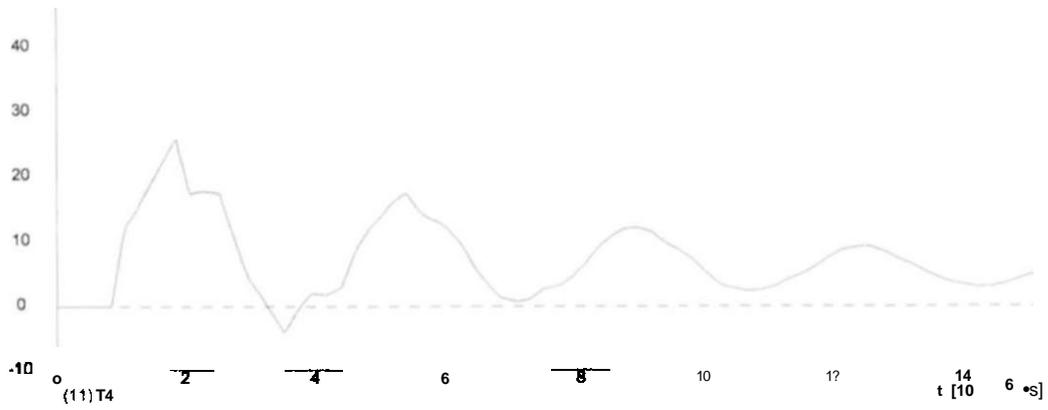


No Capítulo 4. e feita uma análise dos resultados obtidos e em seguida e feita uma análise paramétrica da dependência da tensão no topo de torre com respeito a vários parâmetros incluindo a resistividade do solo, tipo de torre, características da descarga, bem como sua localização ao longo da linha..

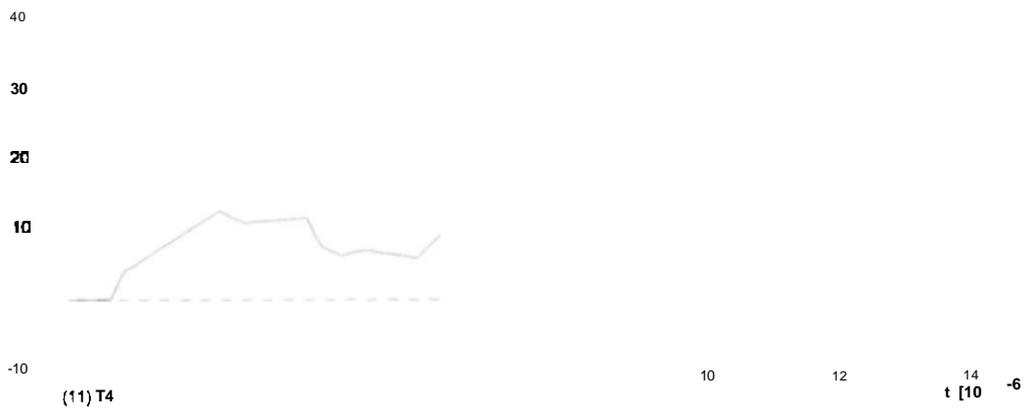
As conclusões e recomendações são apresentadas no Capítulo 5, onde são feitas sugestões para trabalhos futuros.

As indicações bibliográficas estão contidos no Capítulo 6 e no Capítulo 7 são apresentados os anexos, onde são mostrados os dados de entrada e resultados dos programas computacionais referente a simulação de um caso típico

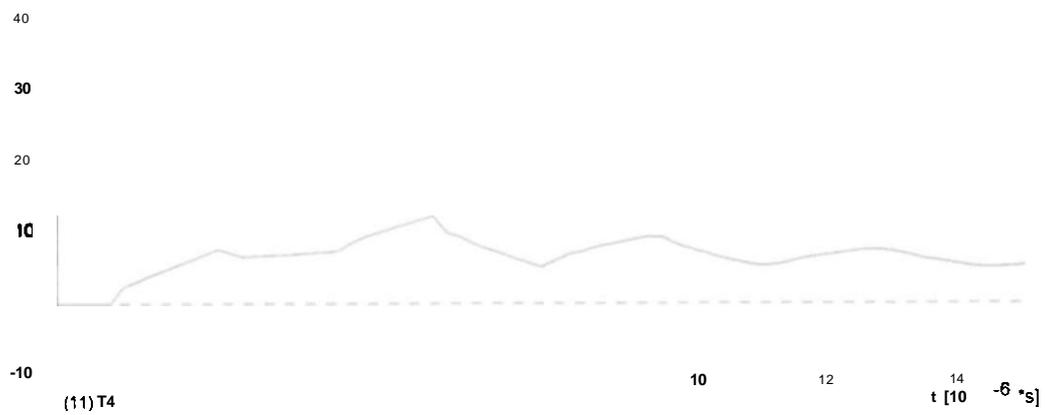
A metodologia proposta neste trabalho utiliza três programas computacionais: COEF, que calcula os coeficientes de acoplamento entre os cabos condutores e pára-raios, o EMTP(ATP) utilizado no cálculo das ondas viajantes e cálculos das tensões topo de torre, e o LIGHT que calcula o desempenho da linha quanto a descargas atmosféricas.



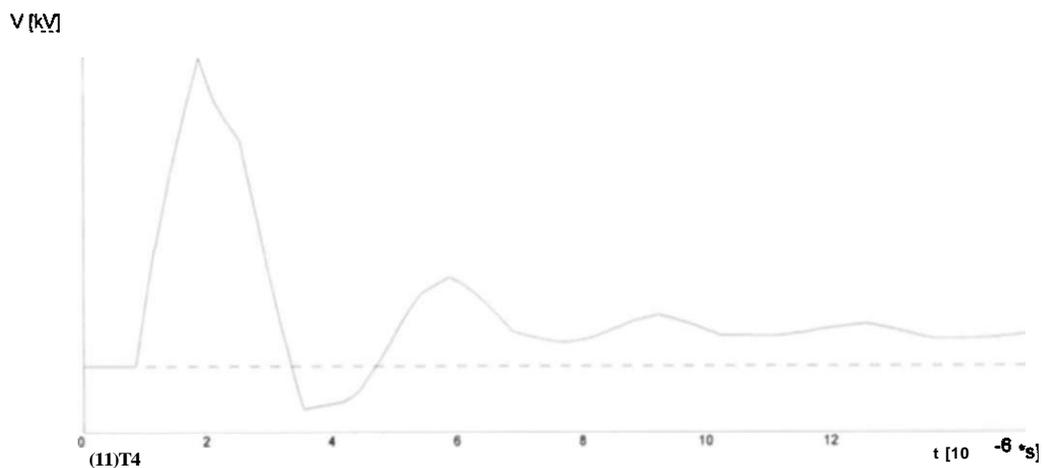
Torre Trapézio LPNE
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m



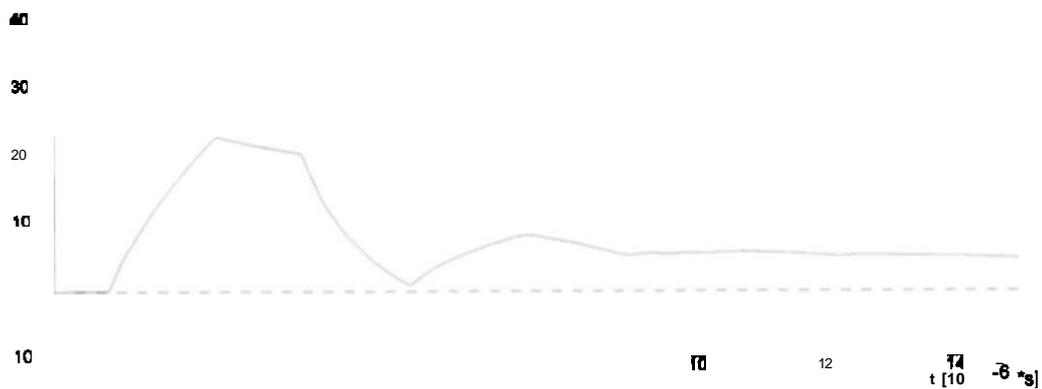
Torre Trapézio LPNE
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m



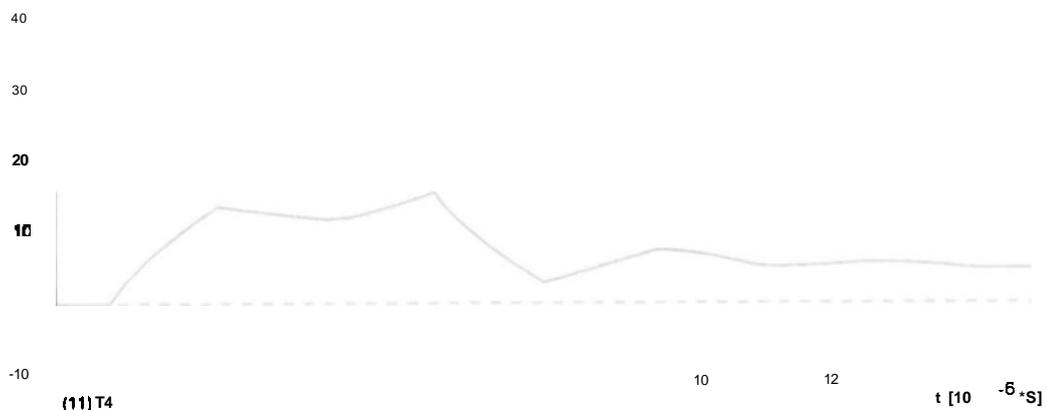
(11) T4



Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m



Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m



Torre Trapézio
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 5 microsegundo

7.3. ANEXO 3-COEFICIENTES DE ACOPLAMIENTO

TORRE AUTOPORTANTE-2 CABOS PARA-RAIOS TERRENO PLANO

NUMERO DE FEIXES
 NUMERO DE PARA-RAIOS 2
 CHAVES 1 1 1 1 0 0 0 0 0

CABO NO.	CIRC NO	ABCISSA (M)	ALTURA (M)	DIAMETRO (M)	ESP	SUBCON NO	SUBCON
1	1	-4 5000	15.8000	0 029600	0 450000	4	
2	1	0 0	19.8000	0 029600	0.450000	4	
3	1	4.5000	15.8000	0 029600	0 450000	4	
4	1	-3 2000	24 4000	0.009100	0 0	1	
5	1	3 2000	24.4000	0 009100	0.0	1	

CABOS PARA-RAIOS A SEREM ELIMINADOS
 SEQUENCIA DE ELIMINACAO

ELIMINACAO 1= 5 4

COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO HC(I,J)
 RELACAO ENTRE TENSAO INDUZIDA NO CABO DA LINHA I E TENSAO APLICADA NO CABO DA COLUNA J

CABOS	1	2	3	5
1	0.100E+01	0 340E+00	0.259E+00	0.247E+00
2	0 356E+00	0.100E+01	0 356E+00	0 365E+00
3	0.259E+00	0.340E+00	0.100E+01	0.247E+00
5	0.279E+00	0.394E+00	0.279E+00	0 100E+01

TORRE AUTOPORTANTE-2 CABOS PARA-RAIOS-TERRENO SEMI ONDULADO

NUMERO DE FEIXES 3
 NUMERO DE PARA-RAIOS 2
 CHAVES 1 1 1 1 0 0 0 0 0

CABO NO.	CIRC NO	ABCISSA (M)	ALTURA (M)	DIAMETRO (M)	ESP	SUBCON NO	SUBCON
1	1	-4 5000	21.9000	0 029600	0 450000	4	
2	1	0 0	25.9000	0 029600	0 450000	4	
3	1	4 5000	21.9000	0 029600	0 450000	4	
4	1	-3 2000	30.5000	0 009100	0.0	1	
5	1	3 2000	30.5000	0 009100	0 0	1	

CABOS PARA-RAIOS A SEREM ELIMINADOS
 SEQUENCIA DE ELIMINACAO

ELIMINACAO 1= 5 4

COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO HC(I,J)
 RELACAO ENTRE TENSAO INDUZIDA NO CABO DA LINHA I E TENSAO APLICADA NO CABO DA COLUNA J

CABOS	1	2	3	5
1	0.100E+01	0.377E+00	0 301E+00	0 282E+00
2	0 389E+00	0 100E+01	0 389E+00	0 393E+00
3	0 301E+00	0 377E+00	0 100E+01	0 282E+00
5	0 311E+00	0 419E+00	0 311E+00	0 100E+01

TORRE **AUTOPORTANTE-2** CABOS **PARA-RAIOS-TERRENO ONDULADO**

NUMERO DE FEIXES 3
 NUMERO DE **PARA-RAIOS** 2
 CHAVES 1 1 1 1 00 0 0 0 0

CABO NO.	CIRC NO.	ABCISSA (M)	ALTURA (M)	DIAMETRO (M)	ESP	SUBCON NO	SUBCON
1	1	-4 5000	28.0000	0029600	0 450000	4	
2	1	00	32.0000	0 029600	0 450000	4	
3	1	4 5000	28.0000	0029600	0 450000	4	
4	1	-3 2000	36.6000	0 009100	0.0	1	
5	1	3 2000	36 6000	0009100	0.0	1	

CABOS **PARA-RAIOSS** A SEREM ELIMINADOS
 SEQUENCIA DE **ELIMINACAO**

ELIMINACAO 1= 5 4

COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO HC(I,J)
RELACAO ENTRE **TENSAO** INDUZIDA NO CABO DA LINHA I E **TENSAO** APLICADA NO CABO DA COLUNA J

CABOS	1	2	3	5
1	0 100E+01	0 402E+00	0 331E+00	0 308E+00
2	0.412E+00	0 100E+01	0.412E+00	0 413E+00
3	0.331E+00	0.402E+00	0.100E+01	0.308E+00
5	0.334E+00	0.438E+00	0.334E+00	0.100E+01

TORRE **AUTOPORTANTE-2** CABOS **PARA-RAIOS-TERRENO MONTANHOSO**

NUMERO DE FEIXES 3
 NUMERO DE **PARA-RAIOS** 2
 CHAVES 1 1 1 1 00 0 0 0 0

CABO NO.	CIRC NO	ABCISSA (M)	ALTURA (M)	DIAMETRO (M)	ESP	SUBCON NO	SUBCON
1	1	-4 5000	56 0000	0 029600	0 450000	4	
2	1	00	60.0000	0.029600	0 450000	4	
3	1	4 5000	56.0000	0029600	0 450000	4	
4	1	-3 2000	64 6000	0 009100	0.0	1	
5	1	3 2000	64 6000	0 009100	0.0	1	

CABOS **PARA-RAIOSS** A SEREM ELIMINADOS
 SEQUENCIA DE **ELIMINACAO**

ELIMINACAO 1= 5 4

TORRE **AUTOPORTANTE-2** CABOS **PARA-RAIOSS-TERRENO MONTANHOSO**

COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO HC(I,J)
RELACAO ENTRE **TENSAO** INDUZIDA NO CABO DA LINHA I E **TENSAO** APLICADA NO CABO DA COLUNA J

CABOS	1	2	3	5
1	0 100E+01	0 466E+00	0 403E+00	0.375E+00
2	0 471E+00	0 100E+01	0 471E+00	0 468E+00
3	0 403E+00	0.466E+00	0 100E+01	0.375E+00
5	0.396E+00	0.488E+00	0.396E+00	0 100E+01

7.4. ANEXO 4-CÁLCULO DO DESEMPENHO

***** SUMARIO DOS DADOS UTILIZADOS *****

***** DADOS DOS CABOS *****

NUM	IDENT	LIN	TENSAO	ANG.FASE	V	RESIST	ISOL	RAIO	ABSCISSA	ORDENADAS	PI			
LOCALIZACAO	(M)	IH	IFA											
(KV)	(GRAUS)	V50	SIGMA	(CM)	(M)	1	2	3	4	5				
1	1	1	550.00	0.0	2150.00	3.00	20.89	4 50	280	90	0.0	0.0	0.0	0 0
2	2	1	550.00	120.00	2150.00	3.00	20.89	0 0	32.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0 0
3	3	1	55000	24000	2150.00	3.00	20.89	4 50	28.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0 0
4	4	1	00	0.0	0.0	0.0	0.46	-3.20	36 0	24 0	0.0	0.0	0.0	0 0
5	5	1	00	0.0	0.0	0.0	0.46	3.20	36 0	24.0	0 0	0 0	0 0	0 0

PÁRA-RAIOS EQUIVALENTE DA LINHA 1 17 10 0.0 36.0 24.0 0.0 0.0 0.0
 ** SDVC1 = 0.0 **SDVC2 = 0.0

COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO (MULTIPLICADOS POR 1000)

1	2	3	P.R.
11	0000	0 0 0	0 247
20.0	1 0000.0	0.365	
30.0	0.0 1 0000	247	
P R 0 0	0.0 0 0	1 000	

***** TENSOES NO TOPO DA TORRE EM KV/KA, MULTIPLICADAS POR 10

**** LINHA 1 LOCALIZACAO 1 (TORR) ****

T SUBIDA RESISTENCIAS DE ATERRAMENTO (OHMS)

500.0 1500.0

1 0	32.9	53.3
3 0	24.3	36.5
5 0	18.7	24.3

**** LINHA 1 LOCALIZACAO 2 (MVAO) ****

T SUBIDA RESISTENCIAS DE ATERRAMENTO (OHMS)

500.0 1500.0

1 0	32.1	51.3
3 0	15.6	24.5
5 0	13.1	16.1

***** CORRECAO NO RAO DOS CABOS DEVIDO AO EFEITO CORONA *****

RC = A*(V**2) + B*V + R ONDE - RC= RAO CORRIGIDO (M)

- R= RAO INICIAL (M.)

- V= TENSAO NO CABO (MV)

- A E B = COEFICIENTES QUE DEPENDEM DA ALTURA DO CABO (V TABELA)

3 0.1740 -0 0800
 g 0 0530 0 0980
 15 0 0440 0 0940
 20 0.0350 0 1240
 25 0 0300 0 1230
 30 0 0280 0 1290
 35 0 0290 0.1150
 45 0.0280 0 1070

FORMULAS UTILIZADAS—*

- STRIKE DISTANCE $R = F \cdot (1.80 \cdot (1.00 \cdot C)^{**} 1.000 + 27.00 \cdot (1 - \text{EXP}(-C/600)))$ (METROS)

ONDE F= 1.00 (CONDUTORES)
 1.00 (PARA-RAIOS)
 1.00 (TERRA)
 C= CORRENTE DE RAIOS EM KA

- FUNCAO DE PROBABILIDADE DO ANGULO DO RAIOS $D(P(FI))/D(FI) = (\text{COS}(FI))^{**} 2.000$

ONDE P(FI) E A PROBABILIDADE ACUMULADA
 FI E O ANGULO DO RAIOS COM A VERTICAL

DADOS GERAIS

LARGURA DA FAIXA A ESQUERDA -200.000 METROS
 LARGURA DA FAIXA A DIREITA 200.000 METROS
 NIVEL ISOCERAUNICO 50.000 DIAS DE TROVOADA POR ANO
 FATOR DE QUEDA *PI* A TERRA 0.100
 RAIOS MINIMO CONSIDERADO 10.000 KA
 RAIOS MAXIMO CONSIDERADO 220.000 KA
 PROBABILIDADE DE OCORRENCIA
 DE RAIOS ENTRE O MINIMO E
 O MAXIMO CONSIDERADOS 0.850
 HISTOGRAMA - TENSÃO MINIMA 1000 000 KV
 - PASSO DE TENSÃO 25.000 KV
 NUMERO DE RAIOS GERADOS 10000 RAIOS
 CHAVES DE IMPRESSAO 0 0 0 1 2 0

INCIDENCIAS E DESCARGAS (FLASHOVER) *****

CABO NUMERO INCIDENCIAS NUMERO DE DESCARGAS

NUM IDENT (*) - POR 10000 RAIOS GERADOS
 (**) - POR 100 KM DE LINHA. POR ANO

1	1	0	00	62	1 054
2	2	0	0 0	0	0 0
3	3	0	0.0	71	1 207
4	4	1670	28.390	0	0 0
5	5	1719	29.223	0	0 0

TERRA 6611 112.387
 NAO GERADOS 30.000

(***) - RAIOS ABAIXO DE 10 00 OU ACIMA
 DE 220.00 (15 00 PORCENTO)

TOTAL 10000 200 00C 133 2261

NUMERO GLOBAL DE DESLIGAMENTOS POR 100 KM POR ANO
 - LINHA 1 1.717

DESLIGAMENTOS **MULTIPLoS**

1 DESLIG. **UNICO**69 VEZES
 2 DESLIG. **SIMULTANEOS** 32 VEZES

CALCULOS FEITOS ATRAVES DA PROBABILIDADE DE OCORRER DESLIGAMENTO

NUMERO DE DESLIGAMENTOS POR FASE (POR 100 **KM** POR ANO)
 LINHA **CIRC** FASE IDENT

1	1	A	1	1.056
1	1	B	2	0.010
1	1	C	3	1.172

.....

NUMERO DE DESLIGAMENTOS **MULTIPLoS** (POR 100 KM POR ANO)

—————LINHA 1—————LINHA 2—————

****CIRC.1**** ****CIRC.2**** ****CIRC.1**** ****CIRC.2****

DUPLOS - A.B	0.010	0.0	0.0	0.0
- B.C	0.010	0.0	0.0	0.0
- A.C	0.527	0.0	0.0	0.0
-TOTAL	0.517	0.0	0.0	0.0
 TRIPLOS-A,B,C	 0.010	 0.0	 0.0	 0.0
 NO. GLOBAL DESLIG.	 1.702	 0.0	 0.0	 0.0
 POR LINHA	 1.702	 0.0	 0.0	 0.0

HISTOGRAMAS DOS **ANGULOS** (DA FASE A) NO INSTANTE DO DESLIGAMENTO **** CIRCUITO 1 DA LINHA 1 *****

ANGULO (GRAUS) — DESLIG SIMPLES ————— DESLIG DUPLOS ————— TRIPLOS

	FASE A	FASE B	FASE C	A B	A C	B C	A B C
0.0 A 100	0	0	5	0	0	0	0
100 A 20.0	0	0	5	0	0	0	0
20.0 A 30.0	0	0	4	0	2	0	0
30.0 A 40.0	0	0	4	0	0	0	0
40.0 A 50.0	0	0	5	0	0	0	0
50.0 A 60.0	0	0	2	0	0	0	0
60.0 A 70.0	0	0	4	0	0	0	0
70.0 A 80.0	0	0	1	0	0	0	0
80.0 A 90.0	0	0	0	0	0	0	0
90.0 A 100.0	0	0	0	0	0	0	0
100.0 A 110.0	0	0	4	0	0	0	0
110.0 A 120.0	0	0	1	0	0	0	0
120.0 A 130.0	0	0	2	0	0	0	0
130.0 A 140.0	0	0	0	0	0	0	0
140.0 A 150.0	0	0	0	0	0	0	0
150.0 A 160.0	0	0	0	0	0	0	0
160.0 A 170.0	0	0	0	0	1	0	0
170.0 A 180.0	1	0	0	0	0	0	0
180.0 A 190.0	0	0	0	0	0	0	0

2. ANÁLISE TEÓRICA

2.1. LINHAS COMPACTAS-Histórico e Estado da Arte

Existem diversas linhas de transmissão compactas em operação comercial no mundo. A opção de desenvolvimento desta nova tecnologia surgiu, a partir da década de 80, devido a necessidade de se reduzir o espaço ocupado pelas **linhas**, principalmente em regiões urbanas [1][2][3], pois umas das principais características das linhas compactas é a redução de suas **distâncias** em relação as **convencionais**, principalmente os espaçamentos entre os condutores das fases .

Posteriormente, foram verificadas outras vantagens, como o aumento da **potência característica** da linha, devido a **diminuição** da sua reatância **indutiva**. Este benefício, além de postergar a instalação de novas linhas [4][5][6], reduz consideravelmente o número de circuitos por corredor das faixas de **passagens**[7][8]. Outra vantagem verificada foi a viabilidade técnica e **econômica** de expansão do sistema sem haver a necessidade de adoção de um **nível** de tensão mais elevado, cuja solução foi mais evidenciada com o surgimento das linhas supercompactas não convencionais, denominadas linhas de **potência** natural elevada (LPNE) [9][10]. Essas linhas utilizam uma **técnica** baseada numa combinação da aproximação das **fases**, elevação do número de subcondutores por fase e uma nova disposição **geométrica** destes condutores no feixe, alterando a distribuição tradicional circular normalmente utilizada[11][12].

Na tabela 2.1 são mostradas as principais **características** de algumas linhas compactas existentes [13-17]. São apresentados os dados da tensão nominal, o seu **comprimento**, a **potência característica** e a sua situação. Em seguida são ilustradas nas Figs. 2.1 a 2.8 algumas dessas linhas, onde pode-se observar com mais detalhes a silhueta das torres com os principais distanciamentos como os espaçamentos condutor ao solo, entre fases, tipo e comprimento das cadeias de isoladores, **distâncias** entre os condutores e cabos **para-raios**, espaçamentos entre cabos para-raios e altura das torres.

190.0 A 200 0	1	0	ü	0	(J	G	0
200 0 A 210 0	0	0	0	0	0	0	0
210 0 A 220 0	1	0	0	0	0	0	0
220.0 A 230 0	0	0	0	0	0	0	0
230 0 A 240 0	6	0	0	0	0	0	0
240.0 A 250.0	2	0	0	0	0	ü	0
250.0 A 260.0	2	0	0	0	0	0	0
260 0 A 270 0	7	0	0	0	0	0	0
270.0 A 280 0	2	0	ü	0	0	0	0
280.0 A 290 0	3	0	0	0	2	0	0
290.0 A 300 0	2	0	0	ü	0	0	0
300 0 A 310 0	1	0	0	0	4	0	0
310.0 A 320.0	2	0	0	0	0	0	0
320.0 A 330.0	0	0	0	0	0	0	0
330.0 A 340 0	0	0	0	0	2	0	0
340 0 A 350.0	0	0	0	0	3	0	0
350 0 A 360 0	0	0	2	0	0	0	0
DESLIGA SEMPRE	0	0	0	0	18	0	0

TITU 0 -TORRE AUTOPORTANTE 2 C P RAIOS -TERR SEMI OND 0

CABO 5 0
1 1 0 0 20.89 550.00 0.0 2150.0 0 0 -4 50 28.00 11 00 0 0 0.0 0 0 3 00
2 1 0 0 20.89 550.00 120.00 2150 0 0 0 0.0 32.00 15 00 0 0 0 0 0.0 3 00
3 1 0 0 20 89 550 00 240 00 2150 0 0 0 4 50 28.00 11 00 0.0 0.0 0.0 3.00
4 1 0 0 0 46 0 0 0.0 0.0 0.0 -3 20 36 00 26 00 0 0 0.0 0 0 0 0
5 1 0 0 0 46 0.0 0 0 0.0 0 0 0.0 0 0 0.0 0 0

ACOP 4
1 0000.0 0 0 0.282
0.0 1.0000.0 0 393
0.0 0.0 1 0000 282
0.0 0.0 0.0 1.000
17.100 0 0 36 000 26.000 0 0 0 0 00 6400 0 0 0.0

CORR 20 0
220.000 00 200 000 0 0094100 170 000 0 0165000 150 000 0 0235000
130 000 0 0353000 120.000 0 0412000 110.000 0 0529000 100.000 0 0706000
90 000 0 0882000 80.000 0 1059000 70.000 0 1294000 60.000 0 1882000
50.000 0 2700000 45.000 0 3059000 40.000 0 4235000 30.000 0 5176000
25.00 0 5882000 20.000 0 7059000 15.000 0 8471000 10.000 1 0000000

ATER 2
1500.000 0 0 500 000 0 9000000

QUED 200
TORRO 6000MVA00 4000

VTOP 0
3 1.00 3 00 5 00
2 500.00 1500.00

1 1

* TENSOES NO TOPO EM KV/KA *

S 1 32.90 53.30
S 3 24 30 36.50
S 5 18 70 24 30

1 2

* TENSOES NO TOPO EM KV/KA *

S 1 32.10 51.30
S 3 15 60 24 50
S 5 13.10 16 10

9999 0

GERA 0 0
-200.00 200 00 50 00 0 100 0 850-1000 0 25 00 10000 0 0 0 1 2 0

EXEC 0 0

FORAM DESPREZADAS AS IMPEDANCIAS DE ATERRAMENTO INFERIORES A 0 0 OHMS *

SUMARIO DOS DADOS UTILIZADOS

***** DADOS DOS CABOS *****

NUM	IDENT	LIN	TENSAO	ANG	FASE	V	RESIST	ISOL	RAIO	ABSCISSA	ORDENADAS	PI	
LOCALIZACAO	(M)	IH	IFA										
(KV)	(GRAUS)	V50	SIGMA	(CM)	(M)	1	2	3	4	5			
1	1	1	550 00	0.0		2150 00	3.00	20 89	-4 50	28 0	11 0	0.0 0.0 0.0	0 0
2	2	1	550 00	120.00		2150 00	3 00	20.89	0 0	32.0	15 0	0 0 0.0 0.0	Q 0
3	3	1	550 00	240.00		2150 00	3 00	20 89	4 50	28.0	11.0	0 0 0.0 0.0	0 0
4	4	1	0.0	0.0		00	0.0	0 46	-320	360	26 0	0 0 0.0 0.0	0 0
5	5	1	00	0.0		00	0.0	0 46	3 20	360	260	0 0 0.0 0.0	0 0

PÁRA-RAIOS EQUIVALENTE DA LINHA 1 17 10 0 0 36.0 26 0 0.0 0.0 0.0
 ** SDVC1 = 0.0 ** SDVC2 = 0.0

COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO (MULTIPLICADOS POR 1000)

1	2	3	P.R
11	0000.0	0 0	0 282
20.0	1 0000	0 0	0 393
30.0	0.0 1 0000	282	
P.R.0.0	0.0 0 0	1 000	

**** TENSOES NO TOPO DA TORRE EM KV/KA, MULTIPLICADAS POR 10 *

**** LINHA 1 LOCALIZACAO 1 (TORR) ****

T SUBIDA RESISTENCIAS DE ATERRAMENTO (OHMS)

500 0 1500 0

1 0	32.9	53.3
3 0	24 3	36.5
5 0	18 7	24 3

**** LINHA 1 LOCALIZACAO 2 (MVAO) ****

T SUBIDA RESISTENCIAS DE ATERRAMENTO (OHMS)

500 0 1500 0

1 0	32.1	51.3
3 0	15 6	24.5
5 0	13 1	16.1

***** CORRECAO NO RAO DOS CABOS DEVIDO AO EFEITO CORONA *****

RC = A*(V**2) + B*V + R ONDE - RC= RAO CORRIGIDO (M)

- R= RAO INICIAL (M.)

- V= TENSAO NO CABO (MV)

- A E B = COEFICIENTES QUE DEPENDEM DA ALTURA DO CABO (V TABELA)

ALTURA(M) A E

3 0 1740 -0 0800
 9 0.0530 0 0980
 15 0.0440 0 0940
 20 0.0350 0 1240
 25 0.0300 0 1230
 30 0.0280 0 1290
 35 0 0290 0 1150
 45 0.0280 0 1070

FORMULAS UTILIZADAS *****

- STRIKE DISTANCE $R = F \cdot (1.80 \cdot (1.00 \cdot C)^{**} 1.000 + 27.00 \cdot (1 - \text{EXP}(-C/6.00)))$ (METROS)

ONDE F= 1.00 (CONDUTORES)
 1.00 (PARA-RAIOS)
 1.00 (TERRA)
 C= CORRENTE DE RAIOS EM KA

- FUNCAO DE PROBABILIDADE DO ANGULO DO RAIOS $D(P(FI))/D(FI) = (\text{COS}(FI))^{**} 2.000$

ONDE P(FI) E A PROBABILIDADE ACUMULADA
 FI E O ANGULO DO RAIOS COM A VERTICAL

DADOS GERAIS *****

LARGURA DA FAIXA A ESQUERDA -200.000 METROS
 LARGURA DA FAIXA A DIREITA.... 200.000 METROS
 NIVEL ISOCERAUNICO..... 50.000 DIAS DE TROVOADA POR ANO
 FATOR DE QUEDA PI A TERRA..... 0.100
 RAIOS MINIMO CONSIDERADO..... 10.000 KA
 RAIOS MAXIMO CONSIDERADO..... 220.000 KA
 PROBABILIDADE DE OCORRENCIA
 DE RAIOS ENTRE O MINIMO E
 O MAXIMO CONSIDERADOS..... 0.850
 HISTOGRAMA - TENSÃO MINIMA -1000.000 KV
 - PASSO DE TENSÃO ... 25.000 KV
 NUMERO DE RAIOS GERADOS 10000 RAIOS
 CHAVES DE IMPRESSAO.....0 0 0 1 2 0

***** INCIDENCIAS E DESCARGAS (FLASHOVER) ***

CABO NUMERO INCIDENCIAS NUMERO DE DESCARGAS

NUM IDENT (*) (**) (*) (**) (*) (*)
 (*) POR 10000 RAIOS GERADOS
 - POR 100 KM DE LINHA POR ANO

1	1	3	0.0	44	0.748
2	2	0	0.0	0	0.0
3	3	0	0.0	42	0.714
4	4	1666	28.322	0	0.0
5	5	1688	28.696	0	0.0

TERRA 6646 112.982

NAO GERADOS 30.000

(***) - RAIOS ABAIXO DE 10.00 OU ACIMA DE 220.00 (15.00 PORCENTO)

TOTAL 10000 200.000 86 1.462

NUMERO GLOBAL DE DESLIGAMENTOS POR 100 KM POR ANO
 - LINHA 1 1 258

DESLIGAMENTOS MULTIPLOS

1 DESLIG. UNICO62 VEZES
 2 DESLIG SIMULTANEOS 12 VEZES

CALCULOS FEITOS ATRAVES DA PROBABILIDADE DE OCORRER DESLIGAMENTO

NUMERO DE DESLIGAMENTOS POR FASE (POR 100 KM POR ANO)
 LINHA CIRC FASE IDENT

1	1	A	1	0.732
1	1	B	2	0.0
1	1	C	3	0.720

NUMERO DE DESLIGAMENTOS MULTIPLOS (POR 100 KM POR ANO)

	_____LINHA 1_____	_____LINHA 2_____		
	****CIRC.1****	****CIRC.2****	*CIRC v	****CIRC.2**
DUPLOS - A,B	0.0	0.0	0.0	0.0
- B,C	0.0	0.0	0.0	0.0
- A,C	0.215	0.0	0.0	0.0
-TOTAL	0.215	0.0	0.0	0.0
TRIPLOS -A,B,C	0.0	0.0	0.0	0.0
NO GLOBAL DESLIG.	1.237	0.0	0.0	0.0
POR LINHA	1.237		0.0	

**** HISTOGRAMAS DOS ANGULOS (DA FASE A) NO INSTANTE DO DESLIGAMENTO ****CIRCUITO 1 DA LINHA 1 ****

ANGULO (GRAUS) --- DESLIG SIMPLES --- DESLIG DUPLOS --- TRIPLOS

	FASE A	FASE B	FASE C	A B	A C	B C	A B C
00 A 10.0	0	0	1	0	1	0	0
10.0 A 20.0	0	0	1	0	0	0	0
20.0 A 30.0	0	0	1	0	2	0	0
30.0 A 40.0	0	0	4	0	0	0	0
40.0 A 50.0	0	0	3	0	0	0	0
50.0 A 60.0	0	0	4	0	0	0	0
60.0 A 70.0	0	0	4	0	0	0	0
70.0 A 80.0	0	0	2	0	0	0	0
80.0 A 90.0	0	0	3	0	0	0	0
90.0 A 100.0	0	0	2	0	0	0	0
100.0 A 110.0	0	0	0	0	0	0	0
110.0 A 120.0	0	0	0	0	0	0	0
120.0 A 130.0	0	0	1	0	0	0	0
130.0 A 140.0	0	0	0	0	0	0	0
140.0 A 150.0	0	0	0	0	0	0	0
150.0 A 160.0	1	0	0	0	0	0	0
160.0 A 170.0	1	0	0	0	0	0	0

170 0 A 180.0	1	0	0	0	1	0	0
180 0 A 190.0	0	0	0	0	0	0	0
190.0 A 200.0	1	0	0	0	0	0	0
200 0 A 2100	3	0	0	0	0	0	c
210.0 A 220 0	2	0	0	0	0	0	0
220.0 A 230.0	0	0	0	0	0	0	0
230 0 A 240.0	2	0	0	0	0	0	0
240 0 A 2500	3	0	0	0	0	0	0
250.0 A 260 0	2	0	0	0	0	0	0
260.0 A 270.0	4	0	0	0	0	0	0
270 0 A 280.0	4	0	0	0	0	0	0
280 0 A 2900	4	0	0	0	0	0	0
290.0 A 300.0	1	0	0	0	1	0	0
300.0 A 310.0	3	0	0	0	0	0	0
310 0 A 320.0	0	0	0	0	0	0	0
320.0 A 330.0	0	0	0	0	1	0	0
330 0 A 340 0	0	0	0	0	1	0	0
340.0 A 350 0	0	0	2	0	1	0	i)
350.0 A 3600	0	0	2	0	0	0	0
DESLIGA SEMPRE	0	0	0	0	4	0	0

TITU 0 TORRE AUTOPORTANTE 2 CABOS P RAIOS -TERR OND C

CABO 5 0
 1 1 0 0 2.96 550.00 0 0 2150.0 0.0 -4 50 28.00 14 00 0 0 0 0 0.0 3 00
 2 1 0 0 2.96 550.00 120.00 2150.0 0.0 0.0 32.00 18 00 0 0 0.0 0.0 3 00
 3 1 0 0 2.96 550 00 240 00 2150 0 0.0 4 50 28.00 14 00 0 0 0 0 0.0 3 00
 4 1 0 0 0.46 0.0 0.0 0.0 0.0 -3 20 36 00 29.00 0 0 0 0 0.0 0.0
 5 1 0 0 0 46 0 0 0 0 0 3 20 36.00 29.00 0 0 0 0 0 0 0.0

ACOP 4
 1 0000.0 0.0 0.308
 0.0 1 0000.0 0.413
 0.0 0.0 1 0000 308
 0.0 0.0 0.0 1 000
 17.100 00 36.000 29 000 0 0 0 0 0.0 6 400 0 0 0 0

CORR 20 0
 220.000 0.0 200 000 0 0094100 170.000 0 0165000 150.000 0 0235000
 130.000 0 0353000 120.000 0 0412000 110.000 0 0529000 100.000 0 0706000
 90.000 0 0882000 80 000 0 1059000 70.000 0 1294000 60.000 0 1882000
 50.000 0 2700000 45 000 0 3059000 40.000 0 4235000 30.000 0 5176000
 25.000 0 5882000 20000 0 7059000 15.000 0 8471000 10.000 1 0000000

ATER 2 0
 1500.000 0 0 500 000 0 9000000

QUED 200
 TORRO 6000MVA00 4000

VTOP 0
 3 1 00 300 500
 2 500 001500 00

1 1

* TENSOES NO TOPO EM KV/KA *

s 1 32.90 53 30
 s 3 24.30 36 50
 s 5 18.70 24 30

1 2

* TENSOES NO TOPO EM KV/KA *

s 1 32.10 51 30
 s 3 15.60 24 50
 s 5 13.10 16 10

9999 0

GERA 0 0
 -200.00 200.00 50 00 0 100 0 850-1000 0 25 00 10000 0 0 0 1 2 0

EXEC 0 0

FORAM DESPREZADAS AS IMPEDANCIAS DE ATERRAMENTO INFERIORES A 0 0 OHMS

ALTURA(M) A B

3 0 1740 -0 0800
9 0.0530 0 0980
15 0.0440 0 0940
20 0.0350 0 1240
25 0.0300 0 1230
30 0 0280 0 1290
35 0 0290 0 1150
45 0.0280 0 1070

FORMULAS UTILIZADAS *****

- STRIKE DISTANCE $R = F * (1.80 * (1.00 * C)^{**} 1.000 + 27.00 * (1 - \text{EXP}(-C/600)))$ (METROS)
ONDE F= 1 00 (CONDUTORES)
1 00 (PARA-RAIOS)
1 00 (TERRA)
C= CORRENTE DE RAI0 EM KA

- FUNCAO DE PROBABILIDADE DO ANGULO DO RAI0 $D(P(FI))/D(FI) = (\text{COS}(FI))^{**} 2.000$

ONDE P(FI) E A PROBABILIDADE ACUMULADA
FI E O ANGULO DO RAI0 COM A VERTICAL

DADOS GERAIS *****

LARGURA DA FAIXA A ESQUERDA -200.000 METROS
LARGURA DA FAIXA A DIREITA..... 200.000 METROS
NIVEL ISOCERAUNICO..... 50.000 DIAS DE TROVOADA POR ANO
FATOR DE QUEDA PI A TERRA..... 0.100
RAIO MINIMO CONSIDERADO..... 10.000 KA
RAIO MAXIMO CONSIDERADO..... 220 000 KA
PROBABILIDADE DE OCORRENCIA
DE RAIOS ENTRE O MINIMO E
O MAXIMO CONSIDERADOS..... 0.850
HISTOGRAMA - TENSAO MINIMA -1000 000 KV
- PASSO DE TENSAO ... 25.000 KV
NUMERO DE RAIOS GERADOS..... 10000 RAIOS
CHAVES DE IMPRESSAO..... 0 0 0 1 2 0

INCIDENCIAS E DESCARGAS (FLASHOVER) *

CABO NUMERO INCIDENCIAS NUMERO DE DESCARGAS

NUM IDENT (*) (**) (*) (**) (*) - POR 10000 RAIOS GERADOS
- POR 100 KM DE LINHA. POR ANO

1	1	0	0.0	19	0.323
2	2	0	0.0	0	0 0
3	3	0	0.0	14	0 238
4	4	1692	28.764	0	0 0
5	5	1698	28.866	0	0 0

TERRA 6610 112.370

NAO GERADOS 30 000 (***)

(***) - RAIOS ABAIXO DE 10 00 OU ACIMA
DE 220.00 (15 00 PORCENTO)

TOTAL 10000 200 000 33 0 561

NUMERO GLOBAL DE DESLIGAMENTOS POR 100 KM POR ANO
 - LINHA 1 0.459

DESLIGAMENTOS MULTIPLOS

1 DESLIG UNICO21 VEZES
 2 DESLIG SIMULTANEOS 6 VEZES

*** CALCULOS FEITOS ATRAVES DA PROBABILIDADE DE OCORRER DESLIGAMENTO

NUMERO DE DESLIGAMENTOS POR FASE (POR 100 KM POR ANO)
 LINHA CIRC FASE IDENT

1	1	A	1	0342
1	1	B	2	00
1	1	C	3	0240

NUMERO DE DESLIGAMENTOS MULTIPLOS (POR 100 KM POR ANO)

-----LINHA 1-----LINHA 2-----

	CIRC 1	**CIRC 2*	*CIRC.1*	*CIRC 2*
DUPLOS - A,B	0.0	0.0	0.0	0.0
- B,C	0.0	0 0	0 0	0.0
- A,C	0.096	0 0	0 0	0.0
- TOTAL	0.096	0.0	0 0	0.0
TRIPLOS -A,B,C	0 0	0 0	0.0	0.0
NO. GLOBAL DESLIG.	0 485	0 0	0.0	0.0
POR LINHA	0 485		00	

***** HISTOGRAMAS DOS ANGULOS (DA FASE A) NO INSTANTE DO DESLIGAMENTO ***** CIRCUITO 1 DA LINHA 1 *****

ANGULO (GRAUS) --- DESLIG SIMPLES --- DESLIG DUPLOS TRIPLOS

	FASE A	FASE B	FASE C	A B	A C	B C	A B C
0.0 A 10.0	0	0	1	0	1	ü	0
10.0 A 20.0	0	0	0	0	0	0	0
20.0 A 30.0	0	0	1	0	0	0	0
30.0 A 40.0	0	0	0	0	0	0	0
40.0 A 50.0	0	0	1	Ü	0	ü	0
50.0 A 60.0	0	0	2	0	0	0	0
60.0 A 70.0	0	0	0	0	0	0	0
70.0 A 80.0	0	0	2	0	0	0	0
80.0 A 90.0	0	0	0	0	0	0	0
90.0 A 100.0	0	0	0	0	0	0	0
100.0 A 110.0	0	0	0	0	0	0	0
110.0 A 120.0	Ü	0	0	0	0	0	0
120.0 A 130.0	0	0	0	0	0	0	0
130.0 A 140.0	0	0	1	0	1	0	0

Tabela.2.1 - Dados característicos das principais linhas compactas existentes

Tensão Nominal (kV)	Linha de Transmissão	Comprimento (km)	Número de Circuitos	Potência (MW)	Situação
110	Roslavi. Rússia	6	Simple	37	Operação-1987
110/220	Alemanha	—	Seis	—	Projeto
132	Espanha	—	Duplo	—	Operação
220	Havana, Cuba	3	Simple	190	Operação-1986
220	Manakan/Vacha, Rússia	150	Simple	190	Operação-1990
230	Fortaleza/Tauape, Brasil	10	Duplo	880	Operação-1984
330	Pskov/Novosokolnic, Rússia	150	Simple	605	Operação-1993
400	Eletricité de France, França	42	Duplo	—	Operação-1988
420	Itália	—	Duplo	—	Projeto
420	Swedish State Power Board. Suécia	—	Simple	800	Projeto
500	Tucuruí/P. Dutra/São Luís, Brasil	973	Simple	1200	Operação-1988
550	Baguchansk/Kansk, Rússia	400	Simple	1800	Projeto
735	Hydro-Quebec, Canadá	376	Simple	1700	Operação-1964
765	Itaipu, Brasil	5	Simple	1700	Operação-1982

140 0 A 150.0	0	0	0	0	0	0	0
150.0 A 160.0	0	0	0	0	0	0	0
160 0 A 170.0	0	0	0	0	0	0	0
170 0 A 180.0	0	Ü	0	0	0	ü	c
180.0 A 190.0	0	0	0	0	0	0	0
190.0 A 200 0	1	0	0	0	0	0	0
200 0 A 2100	0	0	0	ü	0	0	0
210 0 A 2200	1	0	0	0	0	0	0
220.0 A 230.0	1	0	0	0	0	0	0
230 0 A 2400	0	0	0	0	0	0	0
240.0 A 250 0	3	0	0	0	0	0	0
250.0 A 260.0	1	0	ü	0	0	0	0
260 0 A 2700	2	0	0	0	0	0	0
270 0 A 280.0	1	0	0	0	0	0	0
280.0 A 290.0	0	0	0	0	0	0	0
290.0 A 300.0	2	0	0	0	0	0	0
300 0 A 3100	1	0	0	0	2	0	0
3100 A 320.0	0	0	0	0	1	0	0
320.0 A 330.0	0	0	Ü	0	0	0	0
330 0 A 340.0	0	0	0	0	0	0	0
340 0 A 350 0	0	0	0	0	0	0	0
350 0 A 360.0	0	0	0	Ü	0	0	c
DESLIGA SEMPRE	0	0	0	0	1	0	0

TITU 0 TORRE AUTOPORTANTE 2 C P RAIOS-TERR MONTANHOSO 0

CABO 5 0
1 1 0 0 20.89 550.00 0 0 2150 0 0 0 -4 50 28.00 28 00 0 0 0 0 0 0 3.00
2 1 0 0 20.89 550.00 120.00 2150.0 0 0 0 0 32.00 32.00 0 0 0.0 0 0 0 3 00
3 1 0 0 20.89 550.00 240 00 2150 0 0 0 4 50 28.00 28.00 0 0 0.0 0 0 3 00
4 1 0 0 0 46 00 0 0 00 0 0 -3 20 36 00 43 00 0 0 00 00 0 0
5 1 0 0 0 46 0 0 0 0 0 0 3 20 36 00 43 00 0 0 0 0 0 0 0 0

ACOP 4
1 0000.0 0.0 0.375
0 0 1 0000.0 0.468
0.0 0 0 1 0000.375
0 0 0 0 0 1 000
17 100 0 0 36.000 43 000 0 0 0 0 0 6 400 0 0 0 0

CORR 20 0
220.000 0.0 200.000 0 0094100 170.000 0 0165000 150.000 0.0235000
130 000 0 0353000 120.000 0 0412000 110 000 0 0529000 100 000 0 0706000
90 000 0 0882000 80.000 0.1059000 70 000 0 1294000 60.000 0 1882000
50.000 0 2700000 45.000 0 3059000 40.000 0 4235000 30.000 0 5176000
25.000 0 5882000 20 000 0 7059000 15 000 0 8471000 10.000 1 0000000

ATER 2
1500.000 0.0 500.000 0 9000000

QUED 200
TORRO 6000MVA00 4000

VTOP 0
3 1 00 3.00 5.00
2 500.001500.00

1 1

* TENSOES NO TOPO EM KV/KA *

S 1 32.90 53.30
3 3 24 30 36.50
S 5 18 70 24 30

1 2

* TENSOES NO TOPO EM KV/KA *

S 1 32.10 51.30
S 3 15 60 24 50
S 5 13 10 16 10

9999 0

GERA 0 0
-200.00 200.00 50.00 0 100 0.850 -1000.0 25.00 10000 0 0 0 1 2 0

EXEC 0 0
***FORAM DESPREZADAS AS IMPEDANCIAS DE ATERRAMENTO INFERIORES A 0 0 OHMS

***** SUMARIO DOS DADOS UTILIZADOS *****

DADOS DOS CABOS *****

NUM	IDENT	LIN	TENSAO	ANG	FASE	V	RESIST	ISOL.	RAIO	ABSCISSA	ORDENADAS	PI
LOCALIZACAO	(M)		IH	IFA								
(KV)	(GRAUS)	V50	SIGMA	(CM)	(M)	1	2	3	4	5		
1	1	1	550.00	0 0	2150.00	3 00	20 89	-4 50	28.0	28 0	0 0	0.0
2	2	1	550 00	120.00	2150.00	3 00	20.89	0 0	32.0	32.0	0 0	00
3	3	1	550 00	240.00	2150.00	3 00	20.89	4 50	28.0	28.0	00	00
4	4	1	0 0	0.0	0.0	0.0	0 46	-3 20	36.0	43 0	0.0	0.0
5	5	1	0 0	0.0	0.0	0.0	0 46	3 20	36.0	43.0	0 0	0 0

PARA-RAIOS EQUIVALENTE DA LINHA 1 17 10 0 0 36 0 43 0 0 0 0 0 0
 ** SDVC1 = 0.0 ** SDVC2 = 0.0

***** COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO (MULTIPLICADOS POR 1000) **

1	2	3	P.R
11	0000	0 0 0	0.375
20.0	1 0000	0 0	0.468
30.0	0 0 1	0000	0.375
P R	0 0 0 0 0 0	1 000	

**** TENSOES NO TOPO DA TORRE EM KV/KA. MULTIPLICADAS POR 10

**** LINHA 1 LOCALIZACAO 1 (TORR) ****

T SUBIDA RESISTENCIAS DE ATERRAMENTO (OHMS)

500.0 1500 0

1 0	32 9	53.3
3 0	24 3	36.5
5 0	18 7	24.3

**** LINHA 1 LOCALIZACAO 2 (MVAO) ****

T SUBIDA RESISTENCIAS DE ATERRAMENTO (OHMS)

500 0 1500 0

1 0	32.1	51.3
3.0	156	24 5
5.0	13.1	16.1

* CORRECAO NO RAO DOS CABOS DEVIDO AO EFEITO CORONA *****

RC = A*(V**2) + B*V + R ONDE - RC= RAO CORRIGIDO (M)

- R= RAO INICIAL (M)

- V= TENSAO NO CABO (MV)

- A E B = COEFICIENTES QUE DEPENDEM DA ALTURA DO CABO (V TABELA)

ALTURA(M) A B

3 0 1740 -0.0800
9 0 0530 0 0980
15 0.0440 0 0940
20 0 0350 0 1240
25 0 0300 0 1230
30 0.0280 0 1290
35 0 0290 0 1150
45 0 0280 0 1070

FORMULAS UTILIZADAS *****

- STRIKE DISTANCE $R = F * (1.80 * (1.00 * C) ** 1.000 + 27.00 * (1 - EXP (- C / 6.00)))$ (METROS)

ONDE F= 1.00 (CONDUTORES)
1.00 (PARA-RAIOS)
1.00 (TERRA)
C= CORRENTE DE RAI0 EM KA

- FUNCAO DE PROBABILIDADE DO ANGULO DO RAI0 $D(P(FI))/D(FI) = (COS(FI)) ** 2.000$

ONDE P(FI) E A PROBABILIDADE ACUMULADA
FI E 0 ANGULO DO RAI0 COM A VERTICAL

DADOS GERAIS *****

LARGURA DA FAIXA A ESQUERDA -200.000 METROS
LARGURA DA FAIXA A DIREITA..... 200.000 METROS
NIVEL ISOCERAUNICO..... 50.000 DIAS DE TROVOADA POR ANO
FATOR DE QUEDA PI A TERRA..... 0.100
RAIO MINIMO CONSIDERADO..... 10.000 KA
RAIO MAXIMO CONSIDERADO..... 220 000 KA
PROBABILIDADE DE OCORRENCIA
DE RAIOS ENTRE 0 MINIMO E
0 MAXIMO CONSIDERADOS..... 0.850
HISTOGRAMA - TENSAO MINIMA -1000 000 KV
- PASSO DE TENSAO ... 25.000 KV
NUMERO DE RAIOS GERADOS..... 10000 RAIOS
CHAVES DE IMPRESSAO..... 0 } 0 1 2 0

INCIDENCIAS E DESCARGAS (FLASHOVER) *

CABO	NUMERO	INCIDENCIAS	NUMERO DE	DESCARGAS
NUM IDENT		(*)		(*) - POR 10000 RAIOS GERADOS (**) - POR 100 KM DE LINHA POR ANO
1	3	0 0	0	0 0
2	3	0 0	0	0 0
3	0	0.0	0	0.0
4	1771	30.107	0	0.0
5	1862	31.654	0	0.0

TERRA 6367 108 239

NAO GERADOS 30.000 (****)

(****) - RAIOS ABAIXO DE 10 00 OU ACIMA
DE 220.00 (15 00 PORCENTO)

NUMERO GLOBAL DE DESLIGAMENTOS POR 100 KM POR ANO
 - LINHA 1 0 0

DESLIGAMENTOS MULTIPLOS

1 DESLIG. UNICO 0 VEZES

CALCULOS FEITOS ATRAVES DA PROBABILIDADE DE OCORRER DESLIGAMENTO

NUMERO DE DESLIGAMENTOS POR FASE (POR 100 KM POR ANO)
 LINHA CIRC FASE IDENT

1	1	A	1	0.001
1	1	B	2	0.0
1	1	C	3	0.013

NUMERO DE DESLIGAMENTOS MULTIPLOS (POR 100 KM POR ANO)

	LINHA 1		LINHA 2	
	CIRC.1	*CIRC.2*	*CIRC.1**	*CIRC.2****
DUPLOS - A.B	0.0	0 0	0 0	0 0
- B.C	0.0	0 0	0 0	0 0
- A.C	0.0	0.0	0 0	0.0
-TOTAL	0.0	0.0	0 0	0 0
TRIPLOS -A,B,C	0.0	0.0	0 0	0.0
NO GLOBAL DESLIG	0 014	0 0	0 0	0 0
POR LINHA	0.014		0 0	

HISTOGRAMAS DOS ANGULOS (DA FASE A) NO INSTANTE DO DESLIGAMENTO **** CIRCUITO
 1 DA LINHA 1 *****

ANGULO (GRAUS)	— DESLIG SIMPLES				— DESLIG			TRIPLOS
	FASE A	FASE B	FASE C	A B	AC	BC		
0.0 A 100	0	0	0	0	0	0	0	
10.0 A 20.0	0	0	0	0	0	0	0	
20.0 A 30 0	0	0	0	0	0	0	0	
30 0 A 40.0	0	0	0	0	0	0	0	
40 0 A 50.0	0	0	0	0	0	0	0	
50.0 A 60 0	0	0	0	0	0	0	0	
60.0 A 70 0	0	0	0	0	0	0	0	
70 0 A 80 0	0	0	0	0	0	0	0	
80.0 A 90.0	0	0	0	0	0	0	0	
90 0 A 100.0	0	0	0	0	0	0	0	
100.0 A 110.0	0	0	0	0	3	0	0	
110 0 A 120.0	0	0	0	0	0	0	0	
120.0 A 130.0	ü	0	0	0	0	0	ü	

130.0 A 140.0	0	0	0	0	0	0	0
140.0 A 150.0	0	0	0	0	0	0	0
150.0 A 160.0	0	0	0	0	0	0	0
160.0 A 170.0	0	0	0	0	0	0	0
170.0 A 180.0	0	0	0	0	0	0	0
180.0 A 190.0	0	0	0	0	0	0	0
190.0 A 200.0	0	0	0	0	0	0	0
200.0 A 210.0	0	0	0	0	0	0	0
210.0 A 220.0	0	0	0	0	0	0	0
220.0 A 230.0	0	0	0	0	0	0	0
230.0 A 240.0	0	0	0	0	0	0	0
240.0 A 250.0	0	0	0	0	0	0	0
250.0 A 260.0	0	0	0	0	0	0	0
260.0 A 270.0	0	0	0	0	0	0	0
270.0 A 280.0	0	0	0	0	0	0	0
280.0 A 290.0	0	0	0	0	0	0	0
290.0 A 300.0	0	0	0	0	0	0	0
300.0 A 310.0	0	0	0	0	0	0	0
310.0 A 320.0	0	0	0	0	0	0	0
320.0 A 330.0	0	0	0	0	0	0	0
330.0 A 340.0	0	0	0	0	0	0	0
340.0 A 350.0	0	0	0	0	0	0	0
350.0 A 360.0	0	0	0	0	0	0	0
DESLIGA SEMPRE	0	0	0	0	0	0	0

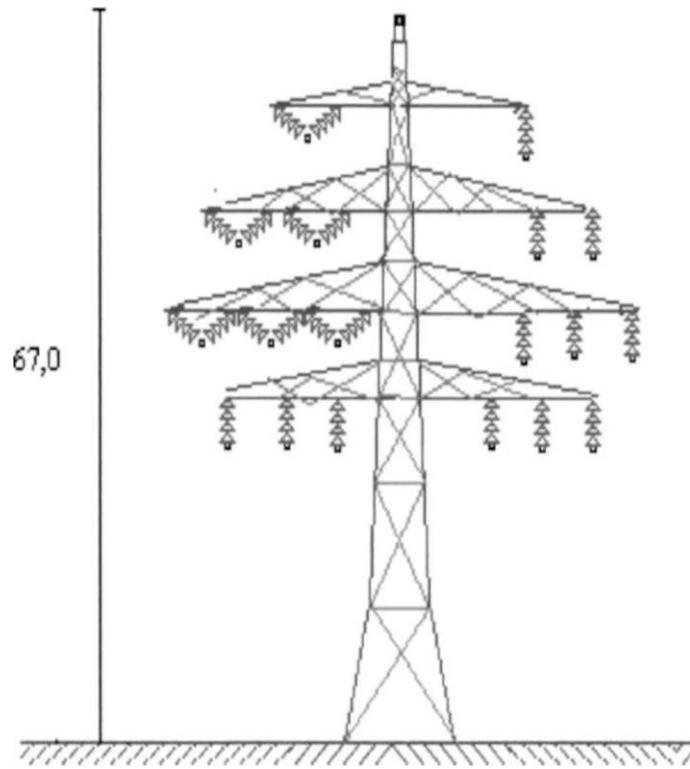


Fig.2.1. Torre compacta na Alemanha, 220 kV/110 kV

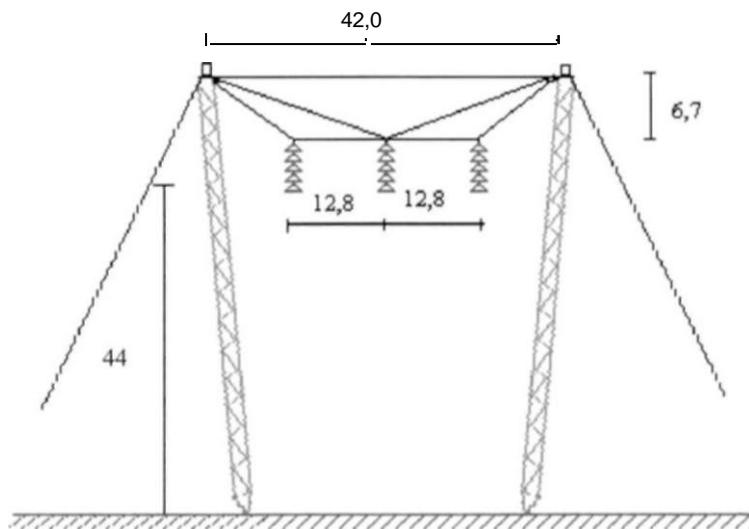


Fig.2.2. Torre compacta 735 kV da Hydro Quebec, Canadá

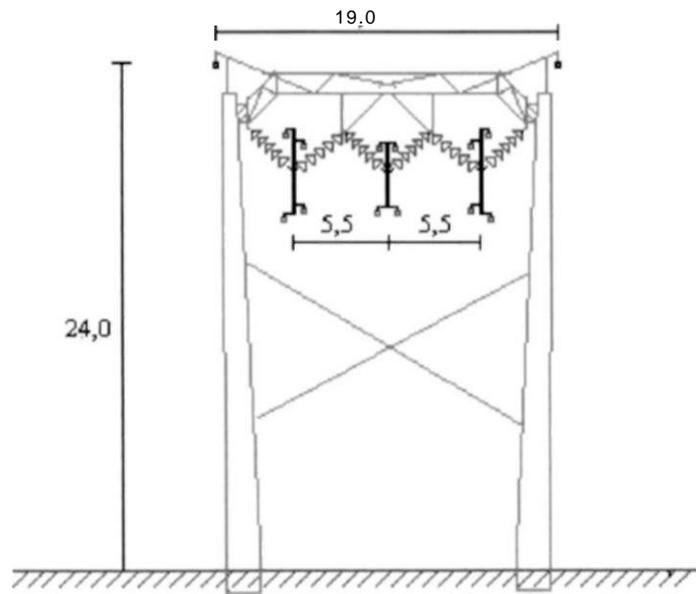


Fig.2.3. Torre super compacta LPNE 330 kV. Pskov / Novosolkonic. Rússia

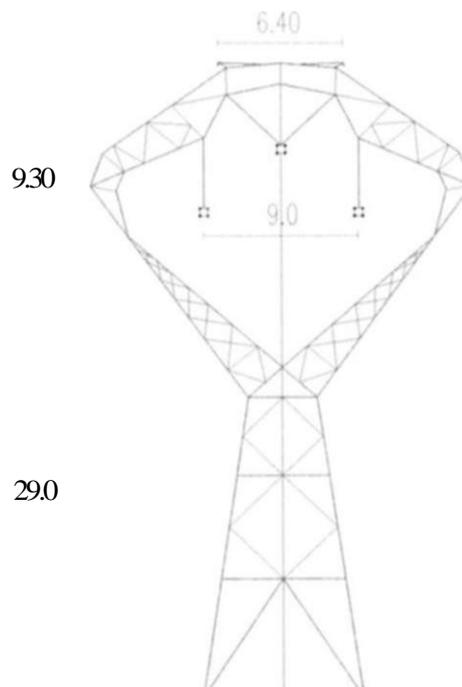


Fig.2.4. Torre compacta **autoportante** 500 kV da Eletronorte, Tucuruí / Marabá / Presidente Dutra / São Luís. no Pará e Maranhão

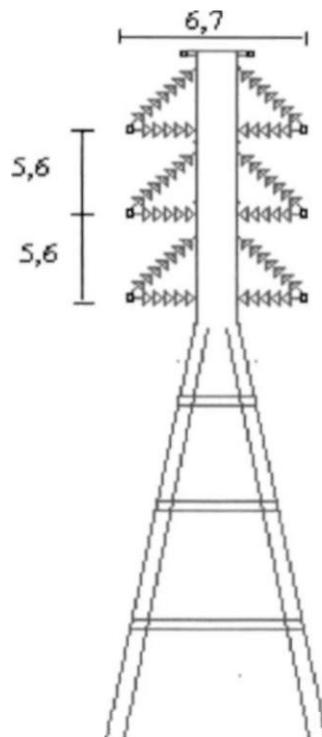
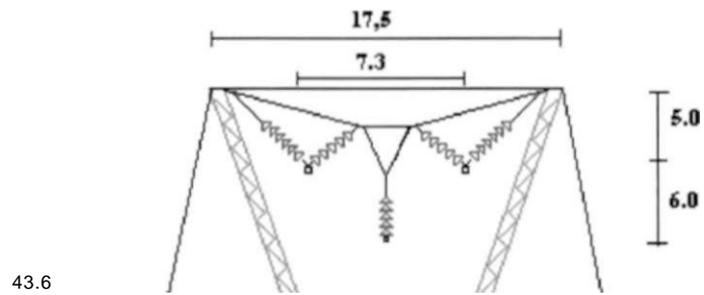


Fig.2.5. Torre compacta 420 kV, Itália



43.6

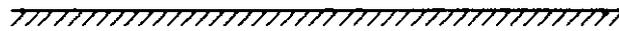


Fig.2.6. Torre compacta 420 kV da Swedish State Power Board. Suécia

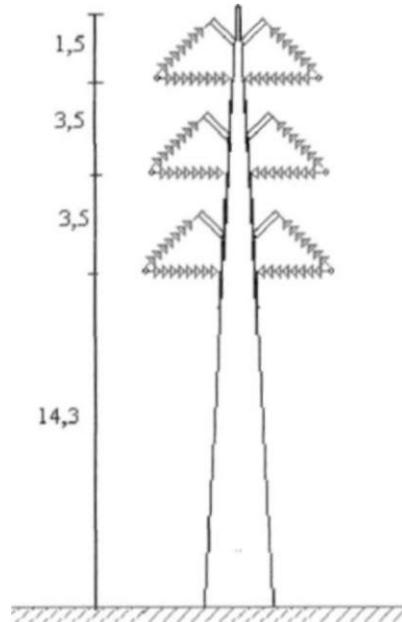


Fig.2.7. Torre compacta 132 kV circuito duplo, Espanha

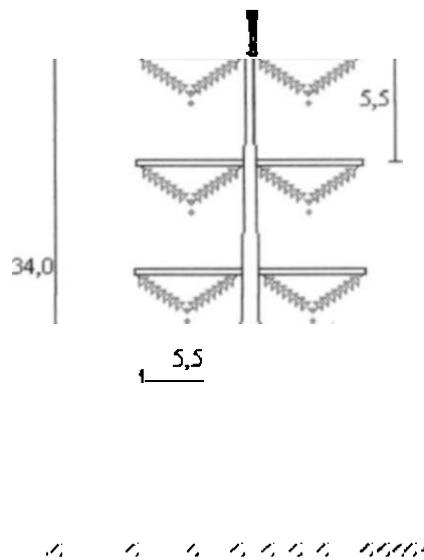


Fig.2.8. Torre compacta 230 kV circuito duplo da CHESF, Fortaleza/Tauape

O enfoque principal dos projetos da EdF (Electricité de France), Espanha, Alemanha e Suécia foi a questão da redução da ocupação do espaço e dos impactos ambientais, através da diminuição dos efeitos dos campos elétricos e magnéticos no solo produzidos pelas linhas de transmissão.

Quanto à linha de 500 kV da Eletronorte, além dos aspectos de redução do número de circuitos em paralelo, devido à diminuição da reatância indutiva e aumento da capacidade de transmissão, houve também uma sensível melhoria no desempenho operativo do sistema. Os estudos de viabilidade de implementação daquele sistema [4][6], indicaram menores requisitos de compensação reativa capacitiva série, além de uma redução dos custos globais ao se adotar esta alternativa.

Estudos realizados em FURNAS Centrais Elétricas [18] indicaram que a utilização de linhas de transmissão compactas produziria uma redução substancial na expansão do sistema de expansão da Usina Serra da Mesa no rio Tocantins.

Na Ref. [19] é apresentado um resumo sobre a torre compacta de 500 kV da CHESF, onde são analisados, com maiores detalhes, as premissas e critérios adotados nos estudos de viabilidade. Neste documento são apresentados os estudos técnico-econômicos que conduziram à alternativa escolhida, as primeiras hipóteses de estruturas seleccionadas, a evolução das características da compactação e aspectos construtivos, operação e manutenção.

A Ref.[20] relata com maior profundidade as outras linhas compactas em operação comercial no mundo referidas anteriormente. São analisados os aspectos técnicos considerados mais relevantes como : características básicas, critérios, premissas e outros aspectos de projeto e construção.

Na secção seguinte são tratados os principais aspectos relacionados ao mecanismo de formação dos raios, para então se proceder com a análise das descargas atmosféricas nas linhas de transmissão compactas.

2.2. O RAI0

2.2.1. Histórico

O raio é um fenômeno natural que ocorre devido ao rompimento da rigidez elétrica do ar entre a nuvem e a superfície da terra, quando estas estão eletrizadas com cargas de sinais opostos. Este fenômeno sempre impôs temor à humanidade, devido ao ruído do trovão e aos incêndios e destruição causados pela descarga elétrica [21] [22] [23]

Existem registros de raios através de gravuras no período de 2200 A.C. na Babilônia e na Mesopotâmia 900 A.C. e, posteriormente, na literatura da Grécia, 700 A.C. Existem também registros antigos na China e Japão. Na Bíblia Sagrada, tanto A.C. como D.C. existem diversas passagens referentes a trovões, relâmpagos e raios:

"Ele é precedido por um fogo que devora em redor os inimigos. Seus relâmpagos iluminam o mundo, a terra estremece ao vê-los (Salmos 96)"

Depois disto o anjo tomou o turíbulo, encheu-o de brasas do altar, e lançou-o por terra: e houve trovões, vozes, relâmpagos e terremoto (Ap 8)"

"Moisés estendeu sua vara para o céu, e o Senhor enviou trovões e chuva de pedras, e o fogo do céu caiu sobre a terra (Ex 9:23)"

Os efeitos destrutivos dos raios eram normalmente associados a uma pedra incandescente que caia dos céus juntamente com a frente do raio. Esta pedra que é realmente encontrada no local da queda, perto de animais mortos e árvores partidas, é formada pela fusão do material do solo. Existem diversas lendas e costumes sobre as tempestades, trovões e raios, alguns associados a festas e comemorações pois a chegada dos raios era associada às estações chuvosas que fertilizavam o solo. Um costume adotado por moradores do interior da França no Século XVIII, e do interior do Brasil para evitar ser atingido por um raio, era carregar uma "pedra de raio" no bolso ou enrolada em um lenço na cintura. Ora, esse costume normalmente da certo na prática, pois a probabilidade de alguém ser atingido por um raio é muito baixa. Existem, ainda em nossos dias, vários costumes para se proteger dos raios, além de se guardar a pedra do raio em casa para protegê-la, tais como :

- Não abanar para o raio durante a tempestade
- Ficar escondido
- Cobrir espelhos com panos grossos
- Não segurar talheres metálicos

Um fato interessante, relatado no livro do Prof. Duílio M. Leite [23], foi o achado de pedras do raio encontradas no interior de troncos de árvores **centenárias**, quando das suas derrubadas. Este episódio tem explicação através dos índios que, devido à dificuldade de carregar a pedra do raio na cintura, colocavam-na na junção dos troncos das árvores próximas às suas aldeias e, com o passar dos anos, o seu próprio **crescimento** se encarregava de escondê-la no seu interior.

Somente a partir do Séc XVIII, começaram os cientistas a associar o raio aos fenômenos de natureza elétrica que se observavam nos corpos que armazenavam eletricidade estática e posteriormente eram descarregados. Neste período, ocorreu a experiência mais famosa, a de Benjamin Franklin (1706-1790) que demonstrou, através de um papagaio quadrado (pipa, **pandorra**) içado por um condutor **metálico**, durante uma **tempestade**, que conseguia produzir faíscas elétricas entre o fio e objetos metálicos aterrados. O perigo dessa experiência foi constatada mais tarde com o pesquisador russo **G.W.Richman**, que faleceu quando tentava **repeti-la** e foi atingido por um raio.

As pesquisas científicas para explicar as descargas atmosféricas tiveram um grande avanço a partir do final do século XIX, após o desenvolvimento da fotografia com filme móvel de alta velocidade e, **posteriormente**, com os estudos da teoria de descargas nos gases. Hoje em dia, estas pesquisas utilizam processos sofisticados que empregam balões, foguetes e aparelhos de medição como oscilógrafos e máquinas fotográficas de altíssima velocidade.

2.2.2. Mecanismo de Formação de Cargas nas Nuvens

O mecanismo de formação das cargas nas **nuvens**, bem como de ocorrência da descarga **atmosférica**, é ainda muito pesquisado em diversos países do mundo. Existem diversas teorias sobre o processo de carregamento da nuvem. Todos os modelos reconhecem a ação dos

ventos sobre as gotas de água nas **nuvens**, como sendo equivalente ao mecanismo de produção de cargas em um gerador eletrostático [24], no **entanto**, eles diferem entre si, sobre a importância do papel de ionização da **atmosfera**, temperatura e outros efeitos.

O modelo adotado para explicar o carregamento elétrico das nuvens considera as correntes de ar úmidas ascendentes se propagando através da **nuvem**, conforme ilustrado na Fig 2.9 [22][24]. A medida que as correntes de ar **ascendem**, encontrando temperaturas cada vez menores, o vapor de água a elas associado começa a **condensar**, produzindo, como resultado, gotículas de água no interior da nuvem. A medida que cada gota cai no interior da **nuvem**, são induzidas cargas positiva e **negativa**, na parte **inferior** e superior da gota, respectivamente. Durante o processo de **descida**, cada gota aumenta de **tamanho**, tornando-se instável e fragmentando-se em gotículas menores ionizadas positivamente ou negativamente. Estes **íons** encontram **grande** quantidade de gotículas de água arrastadas pelo ar ascendente. As gotículas ascendentes perdem elétrons para os íons positivos **descendentes**, tornando-se positivas e neutralizando o íon. Devido à grande energia cinética das gotas ascendentes ionizadas **positivamente**, geralmente elas conseguem atingir a parte superior da nuvem. Os íons negativos, resultantes da **fragmentação** da gota, descem até a parte inferior da **nuvem**, subindo em **seguida**, também arrastados pelo ar ascendente. Como os íons negativos têm energia cinética menor do que aquelas associadas as gotículas **positivas**, é produzido um acúmulo de cargas negativas na parte inferior da nuvem.

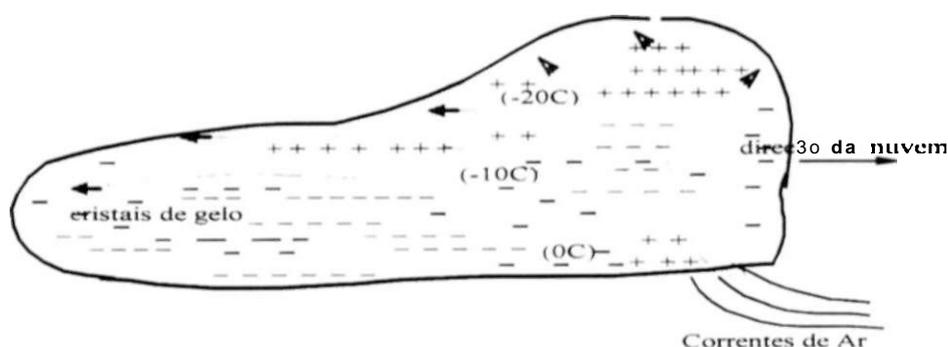


Fig.2.9. Mecanismo de formação de cargas nas nuvens

Durante **uma** tempestade, as **nuvens**, em **função** de suas grandes extensões exibem regiões de cargas elétricas distintas, podendo se fragmentar em nuvens **menores**, com diversas possibilidades de combinações de **cargas**, por **exemplo**, cargas totalmente positivas ou negativas e nuvens com cargas positivas e negativas não equilibradas.

2.2.3. *Formação da Descarga Atmosférica*

Estudos de descargas elétricas entre eletrodos imersos em um ambiente gasoso **isolado**, permitiram aos pesquisadores explicarem a formação e o desenvolvimento da descarga atmosférica. A nuvem carregada eletricamente em sua parte **inferior** conforme ilustrado na Fig.2.10, induz no solo uma mesma quantidade de carga de polaridade **oposta**, que ocupa uma área correspondente ao tamanho na nuvem. Devido ao fato de a nuvem estar se deslocando com uma velocidade " w_n ", a carga induzida no solo acompanha o movimento da nuvem com a mesma velocidade. Nesse deslocamento, as cargas **induzidas**, que são geralmente **positivas**, vão "escalando" montes, edifícios, construções, **pára-raios**, **árvores**, formando uma diferença de potencial que varia de 10 kV a 1000 kV, sendo que a nuvem se encontra entre 300 m e 5000 m de altura em relação ao **solo**.

O elevado campo elétrico na parte inferior da nuvem causa a **disrupção** dos primeiros trechos de ar, chamados também de túneis de ar **ionizado**, formando-se uma descarga de algumas centenas de metros chamada líder. Na ponta do líder de descarga tem-se novamente um campo elétrico **elevado**, resultando em uma nova descarga de outras centenas de metros. Dependendo das condições atmosféricas, a descarga pode se extinguir ou continuar em novos degraus até chegar a poucas centenas de metros da **terra**, quando então o campo na superfície desta se torna muito **intenso**, provocando a formação de uma descarga líder ascendente de polaridade oposta àquela da nuvem. A descarga ascendente sobe até se encontrar com a **descendente**, fechando portanto um caminho ionizado entre a nuvem e a **terra**, através do qual se forma uma descarga de grande intensidade, chamada de raio, que provoca um súbito aquecimento e conseqüente expansão do ar, produzindo o estrondo associado ao trovão. Esta

descarga atmosférica, em geral se repete várias vezes, provocando raios múltiplos, até o descarregamento e diminuição da diferença de potencial entre a nuvem e o solo.

Existem, também a ocorrência de raios entre nuvens, ou na mesma nuvem, formando descargas paralelas à superfície do solo. Isso ocorre durante a tempestade, onde a rigidez do ar é quebrada pelo alto campo elétrico, com a conseqüente formação do raio, ocorrendo a neutralização da nuvem.

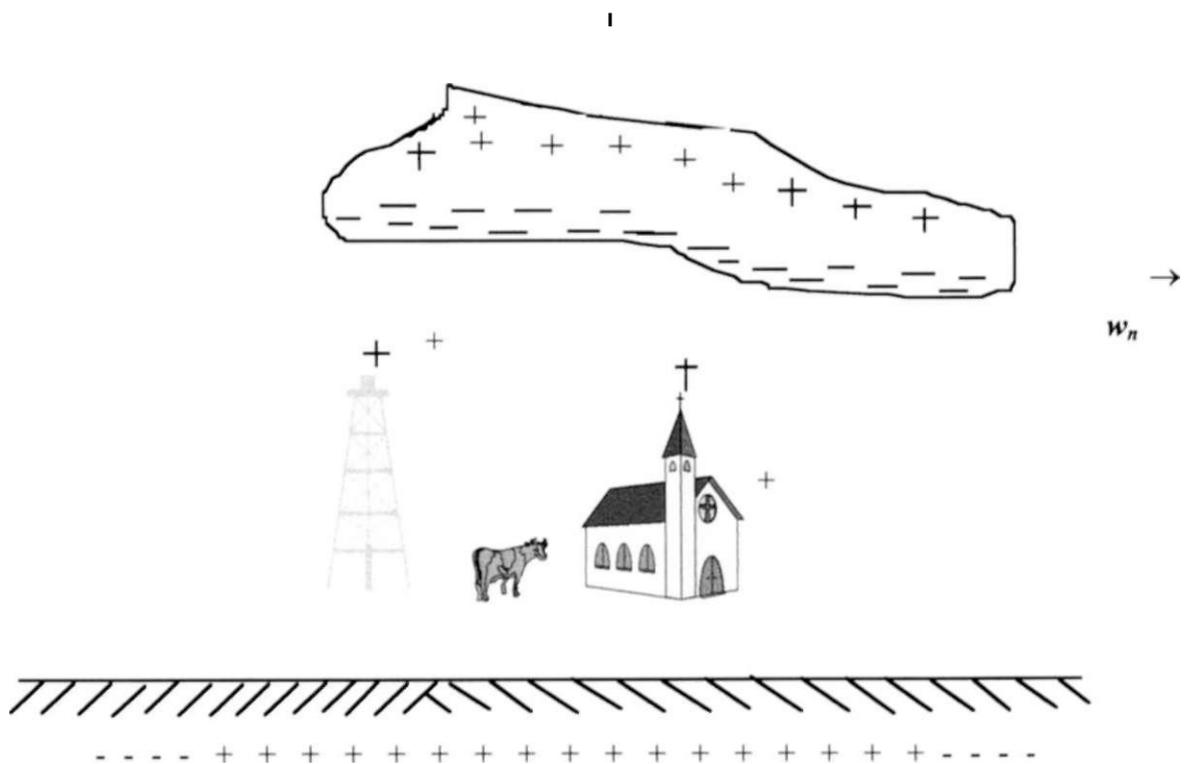


Fig.2.10. A nuvem carregada e a indução de cargas no solo

2.2.4. Tipos de Raios e seus Efeitos

A descarga atmosférica normalmente cairá nos pontos mais altos do solo, como nos topos de **morros**, montanhas, linhas de transmissão de energia elétrica, torres de rádio e TV, árvores **isoladas**, **pára-raios**, casas etc. Isto acontece devido à redução das distâncias quando a nuvem se localiza sobre estas partes mais altas do solo, bem como devido ao acúmulo de cargas induzidas em pontas metálicas.

Os raios podem ser **classificados** em quatro tipos: negativos ou positivos, descendentes e negativos ou positivos ascendentes conforme ilustrado na Fig.2.11 [25]. Raios **descendentes**, tipos 1 e 2 normalmente são encontrados em terrenos **planos**, enquanto os tipos 3 e 4 são observados em montanhas ou estruturas muito altas.

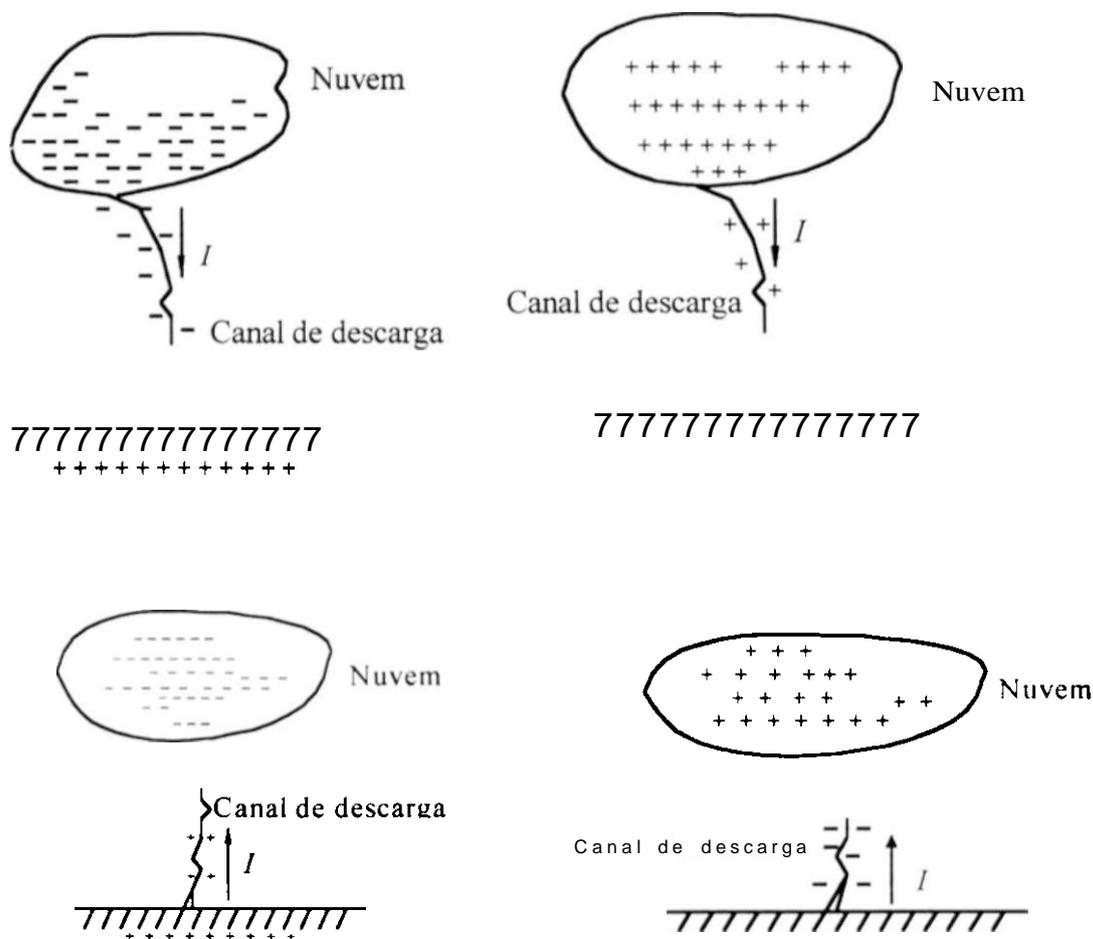


Fig.2.11. Tipos de descargas atmosféricas : Descendentes e ascendentes

Além dos **efeitos** normalmente associados aos raios como explosão e **incêndio**, efeitos diretos podem ser causados sobre pessoas e **animais**, mesmo quando estes não são atingidos diretamente. Isto ocorre devido às descargas **laterais**, à tensão de passo e à tensão de toque. As descargas laterais ocorrem normalmente em pessoas e animais que se abrigam sob árvores durante as tempestades devido a uma descarga **disruptiva** entre **ela** e a árvore. As tensões de passo aparecem entre os pés de um indivíduo ou entre as patas de um **animal**, devido a variação do potencial eletrostático produzida no solo, como resultado do escoamento da corrente do raio. A tensão de toque ocorre quando uma pessoa toca em uma estrutura atingida por um raio, dando origem a uma diferença de potencial entre as mãos e os pés. Estes efeitos produzem sobre pessoas e animais os mesmos efeitos decorrentes do choque elétrico convencional, como **queimaduras**, paralisia muscular e **fibrilação** ventricular.

2.2.5. *Características Raios*

As características mais relevantes dos raios são: Forma e amplitude da onda de corrente, ângulo de incidência no solo, taxa de ocorrência de trovoadas e densidade de raios numa **determinada** região.

A forma do impulso de corrente de um raio, consiste de uma frente de onda muito **rápida**, variando de $1\mu s$ a $5\mu s$ e uma cauda de aproximadamente $50\mu s$ conforme ilustrado na Fig.2.12 [26-27].

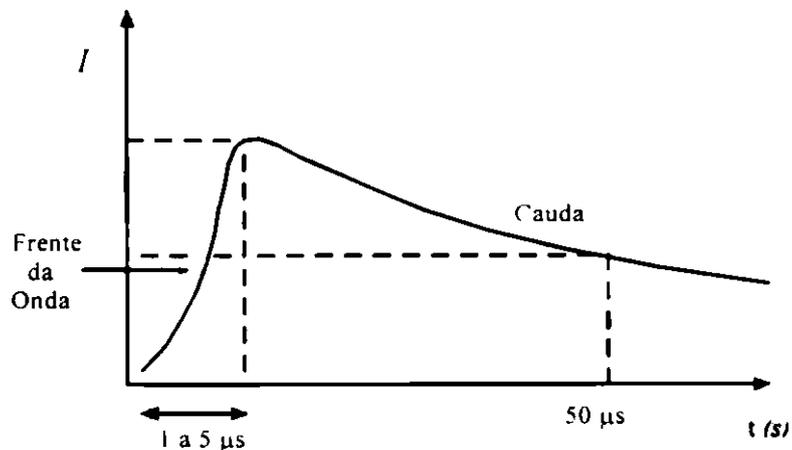


Fig.2.12 - Forma de onda de corrente do raio

A amplitude de pico da onda de corrente foi medida por pesquisadores e varia de 2 kA a 220 kA. A partir dos dados experimentais obtém-se uma função que fornece a probabilidade da amplitude de pico I exceder um valor I_0 , dentro da faixa de valores observados, dada pela seguinte expressão [26-27]:

$$\frac{I}{I + \left(\frac{I}{25}\right)} \quad (2.1)$$

onde: $P(I \geq I_0)$ = Probabilidade da corrente ser maior ou igual que I_0 (%)

I = Corrente associada ao raio (kA)

A Fig.2.13 a seguir ilustra a representação gráfica dessa função de probabilidade levantada pelo pesquisador F. Popolansky [26][27].

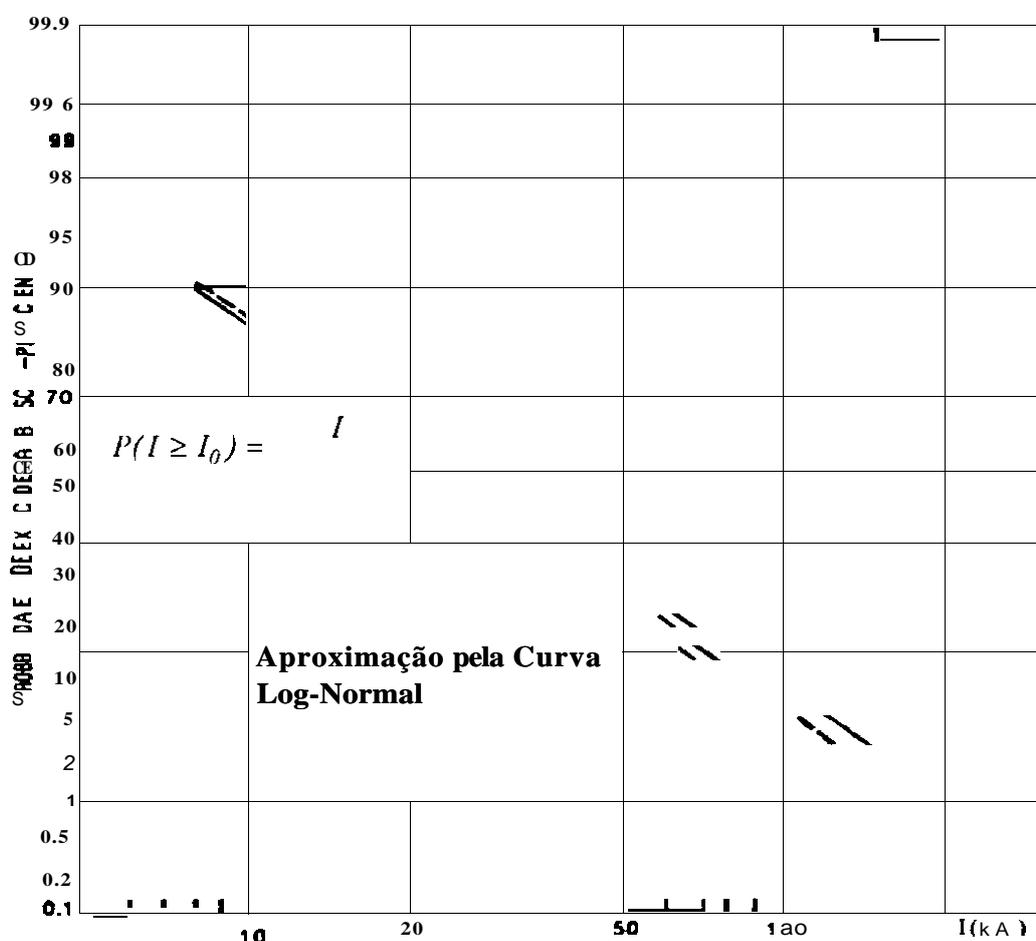


Fig.2.13 - Representação gráfica da função de probabilidade associada ao valor da corrente de raio

O ângulo de inclinação do raio em relação a direção perpendicular à superfície do solo, é também de natureza aleatória. A probabilidade $p(\phi)$ de ocorrência de um ângulo de inclinação do raio maior ou igual a ϕ_0 é expressa pela equação abaixo [28]:

$$p(\phi \geq \phi_0) = \frac{1}{\pi} \int_{\phi_0}^{\pi/2} \cos^2 \phi \, d\phi \quad (2.2)$$

A Fig 2.14 apresenta a curva de distribuição de probabilidade $p(\phi > \phi_0)$ (%) obtida através dessa expressão.

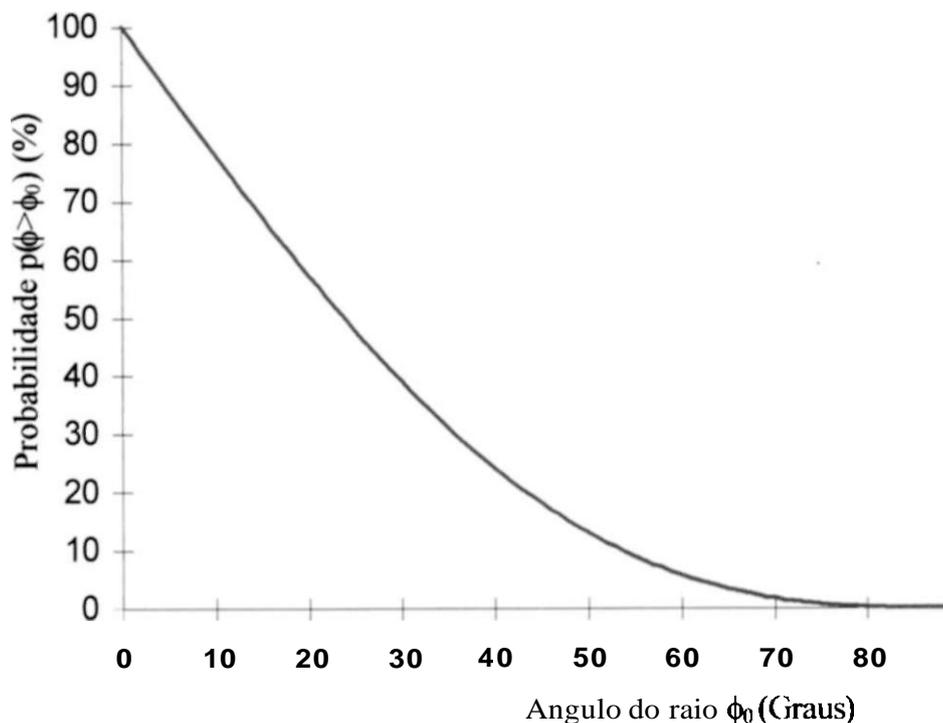


Fig.2.14 - Função de probabilidade associada ao ângulo de incidência do raio em relação a direção perpendicular ao solo

A trovoadas é definida como o conjunto de fenômenos e manifestações finais de uma nuvem cumulus-nimbus (CB) incluindo o trovão, o relâmpago (**luz**), o raio e as correntes descendentes acompanhadas de chuva.

o índice ceráunico é um parâmetro que indica o número de dias de trovoadas por ano em uma determinada região. Este parâmetro vem sendo usado há muitos anos pelos pesquisadores e meteorologistas para caracterizar as atividades de raios em determinada localidade. Ao se unir em um mapa as localidades de um mesmo índice ceráunico, **obtem-se** o mapa isoceráunico. Nas Figs. 2.15 e 2.16 são apresentados os mapas isoceráunicos do Brasil e do mundo.

Ao se analisar estes mapas **verifica-se** que existem regiões de elevados índices ceráunicos de 100 a 250, como na Colômbia, América Central e algumas áreas do **centro** da África e sul da Ásia. No Brasil, temos elevados índices em algumas localidades do Piauí, Maranhão, área amazônica e parte do estado de Minas Gerais e São Paulo.

A densidade dos raios N_g é a quantidade dos raios que caem em uma determinada área durante um período estipulado. Este índice é obtido através de medições utilizando contadores de descargas na região e sua unidade é o número de raios / km² por ano. Existem diversas expressões levantadas experimentalmente por pesquisadores nas últimas décadas que relacionam a densidade de raios de uma região e o índice ceráunico I [26-27]. Utilizou-se neste trabalho a expressão $N_g = 0,1 I$ obtida da Ref [27].

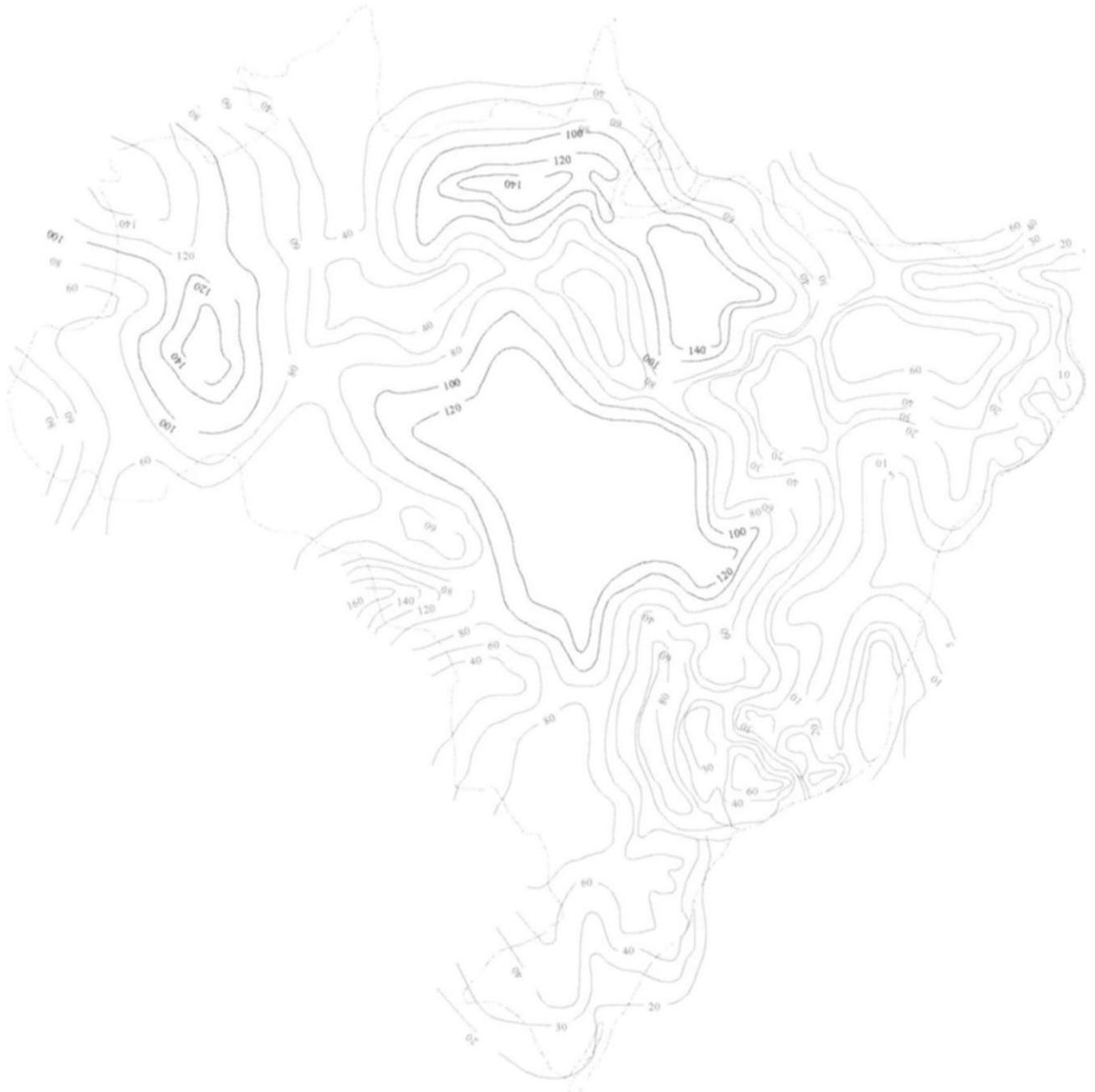


Fig.2.15 - Mapa isocerànico do Brasil

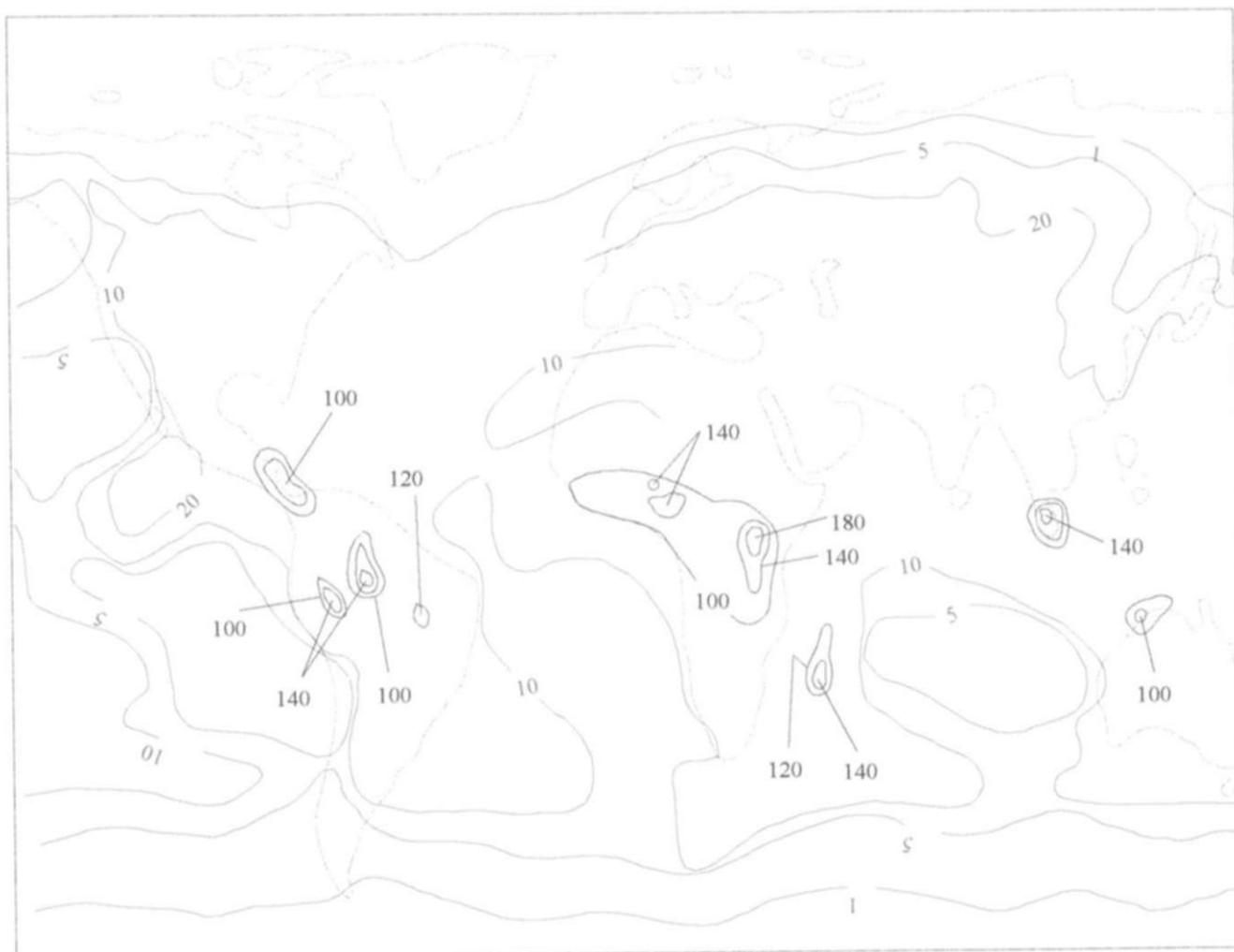


Fig.2.16 - Mapa isoceráunico mundial

2.3. A DESCARGA ATMOSFÉRICA NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A realização de estudos de desempenho quanto a descargas atmosféricas é de suma importância para o projeto adequado de uma torre. A localização imprópria de um cabo pára-raios numa **estrutura**, pode conduzir a índices elevados de desligamentos na **linha**, diminuindo consideravelmente a confiabilidade do sistema de transmissão.

Os primeiros estudos de determinação dos índices de desligamentos de uma linha provenientes das descargas atmosféricas tiveram início na década de 1940. Nesses primeiros **trabalhos**, foram feitas considerações relativas a descargas onde a probabilidade de falha era calculada tendo como premissas algumas fórmulas **empíricas** deduzidas a partir de poucos dados de campo. **Obtinha-se, portanto**, resultados de índices de falhas diferentes dos dados operativos, pois a determinação dos parâmetros envolvidos no mecanismo de formação de raios é bastante complexo e se constitui em um grande obstáculo para a correta avaliação do desempenho de uma linha.

Considerando-se as incertezas na determinação desses parâmetros e a dificuldade de se caracterizar corretamente o fenômeno, foi introduzido nos cálculos o método Monte Carlo. Este método foi desenvolvido para representar estatisticamente as variáveis de difícil **determinação**, já tendo sido aplicado em diversos problemas de natureza estatística como cálculo de equações **simultâneas**, difusão de neutrons através de **materiais**, limites térmicos probabilísticos de **linhas**, estudos de confiabilidade de sistemas de potência e outros.

Este método adaptado a descargas atmosféricas faz a modelagem através da simulação estatística dos parâmetros envolvidos a partir de dados coletados no **campo**, através de medições experimentais. Simulam-se, **portanto**, os valores da intensidade da corrente dos **raios**, a frente e a taxa de crescimento da onda, o ângulo de incidência da descarga do raio, a **suportabilidade** do isolamento e a localização da queda do raio.

Os estudos de desempenho quanto a descargas atmosféricas são divididos em dois tipos que diferem segundo a localização do ponto da **descarga**, queda direta ou indireta dos raios. Nos estudos de queda **direta**, é abordado o problema das ocorrências de descargas dos raios

atingindo diretamente um dos cabos **condutores**, elevando a tensão na fase. Se esta solicitação de tensão for superior à **suportabilidade** da cadeia de **isoladores**, poderá ocorrer uma descarga entre a fase e a torre. Este arco é alimentado pela tensão operativa do sistema que, **consequentemente**, provoca um curto-circuito e o desligamento da linha. Esse efeito é **denominado** de falha de blindagem. A partir dos estudos de queda direta é possível se fazer a otimização da posição dos cabos pára-raios em relação aos **condutores**, o que permite que se **obtenha**, na maioria dos **casos**, uma blindagem efetiva.

Nos estudos de queda indireta de raios, analisa-se o desempenho das linhas quando o raio atinge um dos cabos pára-raios, conforme ilustrado na Fig 2.17. Ao contrário da queda **direta**, a **ocorrência** de desligamentos em consequência desse **fenômeno**, dificilmente é totalmente eliminada. **Entretanto**, esses efeitos podem ser minimizados através da análise e adequação dos distanciamentos na **torre**, acoplamento entre os cabos condutores e pára-raios e o **aterramento** da LT, proporcionando um desempenho adequado. Ao atingir o cabo pára-raios, o raio provoca ondas de tensão e corrente que viajam ao longo da linha até atingir as torres mais **próximas**, com reflexões determinadas pelos valores das impedâncias de surto envolvidas [27].

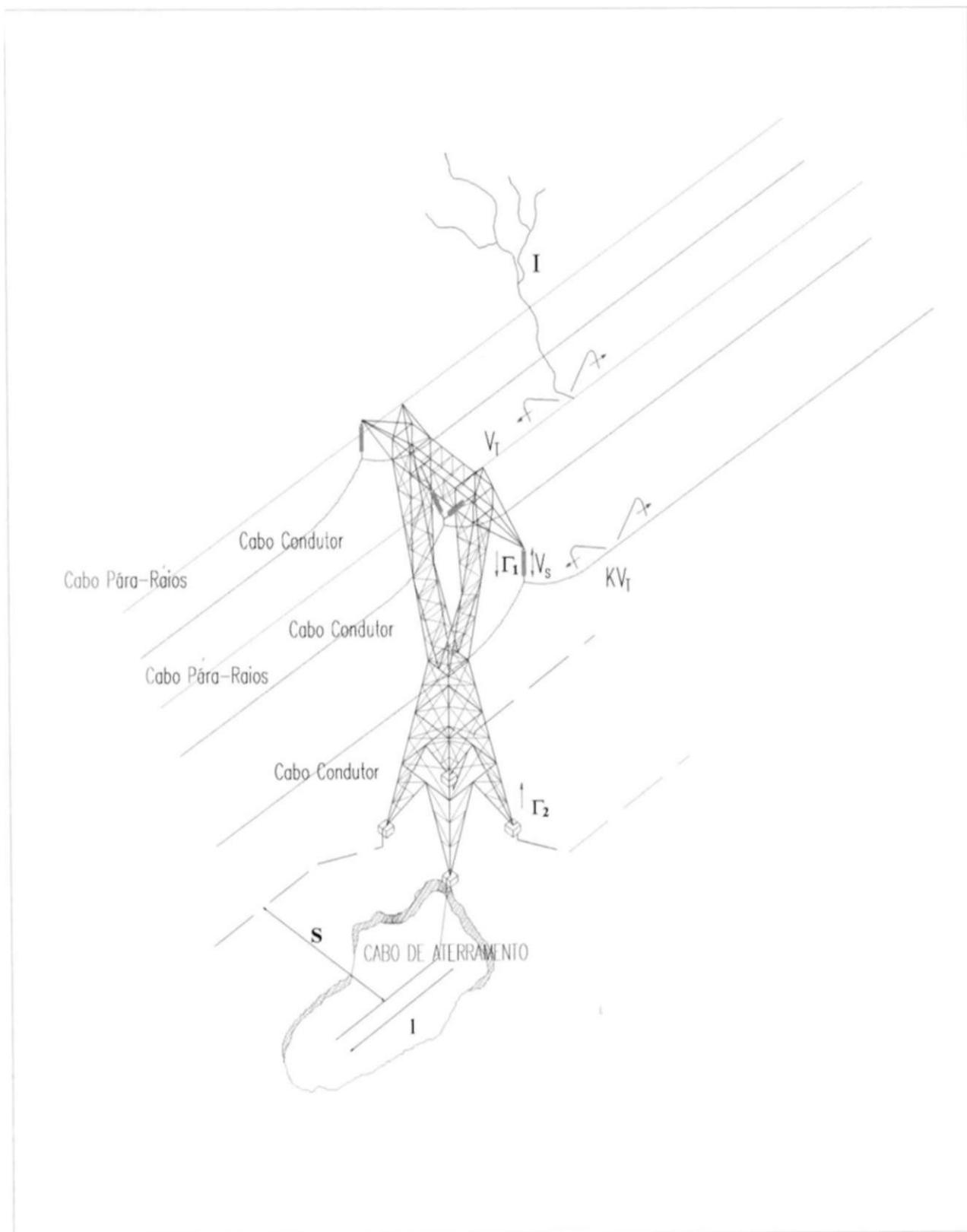


Fig.2.17 - Representação da queda de um raio no cabo pára-raio da linha de transmissão

Esta onda de tensão **propagando-se** no cabo **pára-raios** induz ondas de tensão em cada fase da linha numa relação que depende do acoplamento K entre as **capacitâncias** mútuas e próprias desses cabos. A diferença de potencial V_S entre o cabo pára-raios e os condutores solicita o isolamento entre esses **cabos**, que é menor na região perto da torre de transmissão que no meio do vão. Isto ocorre devido ao cabo pára-raios ter o mesmo potencial do braço da torre onde está conectada a cadeia de isoladores conforme ilustrado na Fig.2.17. Quando essa solitação de tensão atinge um valor superior ao da **suportabilidade** da **cadeia**, pode ocorrer uma descarga entre a fase e o braço da torre. A tensão no cabo **pára-raio** observada na torre V_T , é denominada de tensão topo de torre [27]. Ela é função das características da onda do raio (corrente e frente da **onda**), do local da queda do raio (na torre ou no meio do vão) e dos parâmetros da linha.

O coeficiente de acoplamento entre dois cabos i e j é dado pela relação entre a tensão induzida no cabo j quando se aplica uma tensão no cabo i . No caso de uma linha de transmissão, o coeficiente de acoplamento entre um cabo pára-raios e um condutor conforme

$$V_j = \frac{C_{ij}}{C_i + C_{ij}} V_i$$

ilustrado na Fig.2.18, é dado por $V_j \sim \frac{C_{ij}}{C_i + C_{ij}} V_i$. Para o caso de n condutores esta relação assume a forma matricial

$$[V'] = [K].[V] \tag{2.3}$$

onde V é um vetor n -dimensional cujos elementos representam as tensões induzidas, V' é um vetor n -dimensional cujos elementos representam as tensões externamente aplicadas que no nosso estudo é a própria tensão topo de torre V_T e $[K]$ é a matriz dos coeficientes de acoplamento. A expressão a seguir mostra os elementos dessa equação (2.3) para n condutores.

$$\begin{bmatrix} V'_1 \\ \vdots \\ V'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K_{12} & K_{13} \dots K_{1j} & K_{1n} \\ K_{21} & 1 & K_{23} \dots K_{2j} & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{j1} & K_{j2} & \dots 1 & K_{jn} \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{T1} \\ \vdots \\ V_{Tn} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

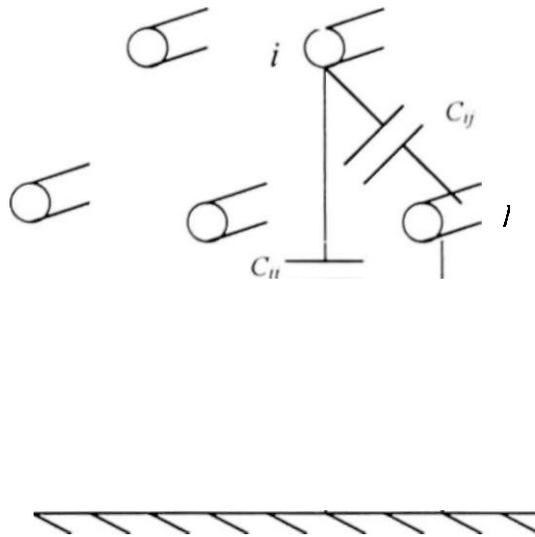


Fig.2.18 - Representação dos coeficientes de acoplamento entre os cabos pára-raios e condutores

A tensão de sollicitação do isolamento $V_s(t)$ será dada portanto pela seguinte expressão [27] :

$$[V_s(t)] = ([1] - [K]) \cdot [V_l(t)] - [V_n(t)] \quad (2.5)$$

Onde. $[V_s(t)]$ é o vetor de tensão de sollicitação da cadeia de isoladores e $[V_n(t)]$ é o vetor de tensão operativa instantânea.

Na secção **seguinte** são analisadas as ondas de tensão e corrente provocadas pelas descargas atmosféricas onde são apresentados o modelo **matemático** das linhas de transmissão e o desenvolvimento das equações de ondas viajantes de corrente e tensão na linha.

2.4. ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A análise do efeito de descargas atmosféricas sobre linhas de transmissão é realizada utilizando o modelo de parâmetros distribuídos[29-31]. De acordo com essa modelagem, os parâmetros elétricos da linha, definidos por unidade de comprimento, são representados pela resistência e reatância série, e pela condutância e capacitância paralela, conforme ilustrado na Fig.2.19, para um trecho de comprimento diferencial dx da linha.

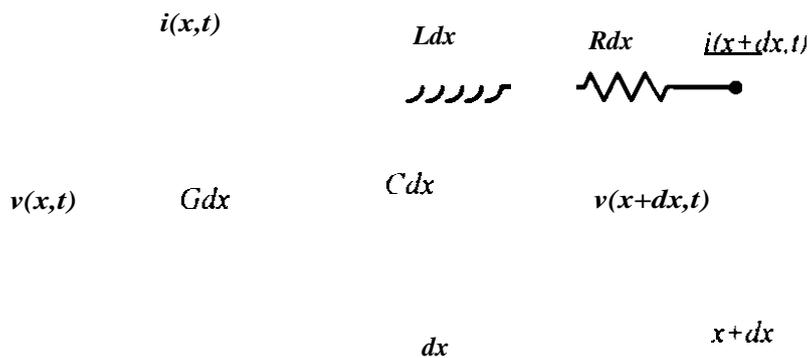


Fig.2.19 - Circuito equivalente de um trecho de comprimento diferencial dx da linha

As equações relacionando corrente e tensão no diagrama da Fig.2.19 são

$$i(x + dx, t) = i(x, t) - Gdx \cdot v(x, t) - C \cdot \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$v(x + dx, t) = v(x, t) - Ldx \frac{\partial i(x+dx, t)}{\partial t} - Rdx \cdot i(x + dx, t) \quad (2.7)$$

Onde L é a indutância (Henry/m), R a resistência (Q/m), C capacitância (F/m) e G a condutância (Ω^{-1}/m)

A corrente e a primeira derivada parcial da corrente podem ser expandidas em série de Taylor, de acordo com as expressões.

$$i(x+dx,t) = i(x,t) + \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} dx + \dots \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial i(x+dx,t)}{\partial t} = \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x \partial t} dx + \dots \quad (2.9)$$

Substituindo-se as equações (2.8) e (2.9) na equação (2.7), desprezando-se os termos de ordem superior, obtem-se a seguinte equação :

$$v(x+dx,t) - v(x,t) = -Ldx \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} - Rdx i(x,t) - Ldx^2 \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x \partial t} - Rdx^2 \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} \quad (2.10)$$

Desprezando-se os termos de segunda ordem na equação (2.10), obtem-se uma equação diferencial parcial para a tensão. De maneira similar, pode-se demonstrar uma segunda equação diferencial parcial de primeira ordem para a corrente, obtendo-se o seguinte par de equações :

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -Ri(x,t) - L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = Gv(x,t) - C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (2.12)$$

Desprezando-se o efeito de fuga de corrente através da condutância paralela na equação (2.12), ou seja fazendo-se $G=0$, verifica-se que estas duas equações mostram que a taxa diferencial da variação de tensão ao longo da linha resulta em uma queda resistiva e indutiva de tensão, e que a variação diferencial da corrente ao longo da linha de transmissão deriva praticamente da corrente de carga capacitiva.

Derivando-se novamente as equações (2.11) e (2.12) em relação a x e resolvendo-as simultaneamente, obtem-se as equações das linhas de transmissão:

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{LC}{2} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad \hat{a}t \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2}$$

No caso de surtos transitórios de curta duração, como o caso do impulso de corrente produzido por descargas atmosféricas em sistemas de potência, as linhas podem ser consideradas praticamente sem perdas, o que corresponde a fazer $R=0$ nas equações (2.13) e (2.14) resultando em

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

A solução da equação (2.13) pode ser escrita na forma [29],

$$v(x,t) = A(t - \sqrt{LC}x).u(t + \sqrt{LC}x) + B(t + \sqrt{LC}x).u(t - \sqrt{LC}x) \quad (2.17)$$

Onde A e B são funções arbitrárias e u é a função degrau unitário. Os argumentos destas funções são da forma $t - \frac{x}{w}$, e conseqüentemente a função $v(x,t)$ é composta por um par de ondas viajantes de tensão se propagando uma na direção $+x$ e a outra na direção $-x$ ao longo da linha, cada qual com a velocidade $w = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Uma solução semelhante é obtida para a corrente, a partir da equação 2.16 obtém-se a expressão para $i(x,t)$:

$$i(x,t) = D(t - \sqrt{LC}x).u(t - \sqrt{LC}x) + E(t + \sqrt{LC}x).u(t + \sqrt{LC}x) \quad (2.18)$$

Onde D e E são funções arbitrárias dos parâmetros x e t

Esta equação pode ser escrita em função de A e B de acordo com a seguinte seguinte relação :

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_s} \left[A(t - \sqrt{LC}x) - B(t + \sqrt{LC}x) \right]$$

Nesta expressão, o termo $\sqrt{\frac{L}{C}}$ é chamado de impedância de surto da linha de transmissão Z_s , e como L e C são funções somente da geometria da linha. Z_s também o será. Para um cabo condutor de raio r , localizado a uma altura h de um plano condutor, a impedância de surto é dada pela expressão

$$Z_s = \frac{2\pi \nu \epsilon}{c} \quad (2.20)$$

Onde ϵ e μ são respectivamente a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do cabo.

Ao se analisar as equações (2.17) e (2.19) verifica-se que as ondas da tensão e de corrente possuem, basicamente, a mesma forma a menos do fator $1/Z_s$ na equação (2.19). Na Fig 2.20 tem-se uma representação gráfica qualitativa das ondas de tensão e de corrente viajando ao longo da linha.

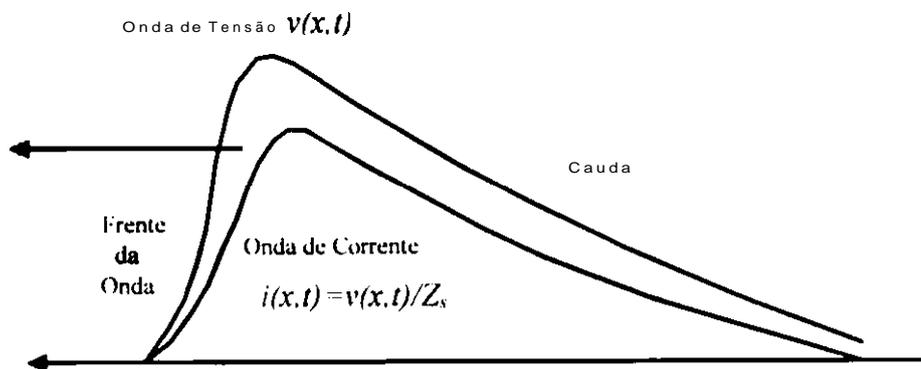


Fig.2.20 - Representação gráfica das ondas viajantes de tensão e corrente ao longo da linha

2.5. MODELAGEM ADOTADA

2.5.1. Modelo Eletrogeométrico da Linha

Quanto à **modelagem** da LT, utilizou-se o modelo eletrogeométrico desenvolvido por E.Whitehead [27], cujos procedimentos são largamente utilizados em diversas companhias e empresas do setor elétrico. Ele é baseado no desenvolvimento e na natureza do raio. A incidência de um raio numa linha de transmissão ocorre quando há a formação de uma trajetória condutora ionizada da nuvem até os cabos da linha.

Durante a formação dessa trajetória o raio pode ser considerado como um túnel de gás termicamente **ionizado**, conforme já explicitado na secção 2.2 e com a ponta inferior em forma de leque conforme ilustrado na **Fig.2.21**. O interior do leque é sujeito a uma ionização que provoca o aparecimento de uma nova **trajetória**, também termicamente ionizada que permite consequentemente a propagação do raio. Nesse desenvolvimento, o leque também se propaga **continuamente** até alcançar o cabo de uma linha de transmissão ou a terra. Nesse **instante**, ocorre a descarga da nuvem através do raio e de sua corrente elétrica.

A dimensão radial da região em leque, no instante em que ela atinge um objeto, e denominada de "distância crítica de **descarga**" R_s , que é função da carga da nuvem e, consequentemente, é o pico da corrente do raio I , donde se conclui que, para cada raio, haverá uma distância radial associada ao leque. Segundo a Ref [27] a relação entre I e R_s é da forma,

$$R_s = 10I^{16}, \text{ onde } R_s \text{ é medido em metros e } I \text{ em kA}$$

O modelo eletrogeométrico, com a região delimitada pela distância crítica de descarga e a linha de **transmissão**, é ilustrado na **Fig.2.22**.

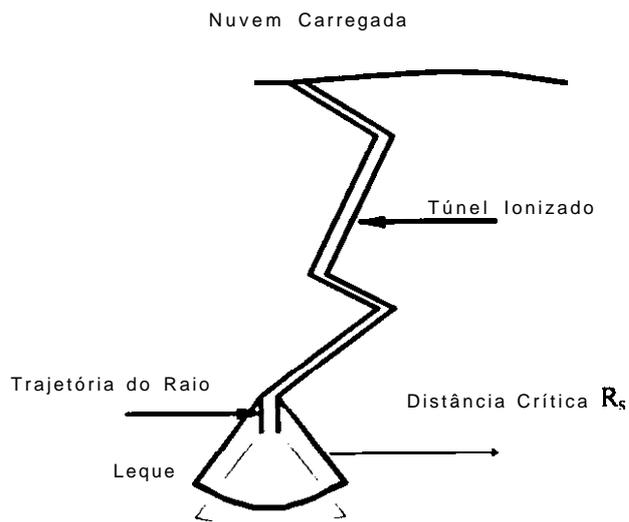


Fig.2.21 - Formação da descarga e distância crítica

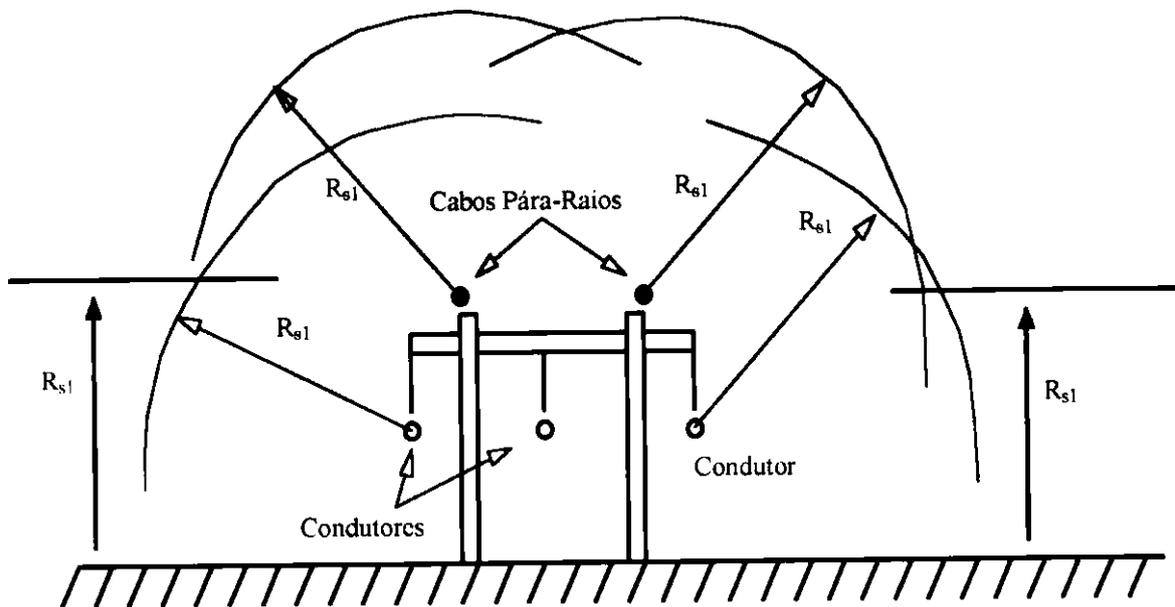


Fig.2.22 - Modelo eletrogeométrico da LT

2.5.2. Onda de Corrente do Raio

No presente trabalho a forma de onda de corrente ilustrada na Fig.2.12, é representada de acordo com o modelo mostrado na Fig.2.23, caracterizado pela amplitude de pico de corrente associada ao raio I_s e pelos tempos de subida T_s e de descida T_d da onda de corrente. O valor de I_s é associada à função de probabilidade dada pela equação (2.1), apresentado na secção 2.2.5.

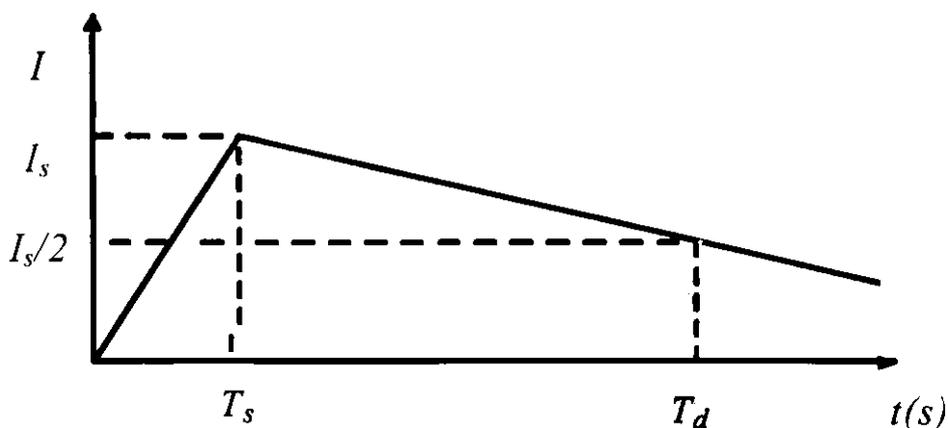


Fig.2.23 - Modelo adotado para a onda de corrente associada ao raio

2.5.3. Linha de Transmissão

Para representar o efeito da onda de corrente do raio ao longo da linha de transmissão é adotado o circuito equivalente ilustrado nas Figs.2.24 e 2.25 [27]. Nesta modelagem a fonte de corrente é localizada no ponto da linha atingido pelo raio, que poderá ser próxima a torre ou meio do vão, conforme ilustrado nas Figs.2.24 e 2.25, respectivamente. Os elementos dos circuitos são definidos como: I é a corrente da descarga (A), Z_{pr} impedância de surto do cabo pára-raios equivalente (ohm), Z_{prl} impedância de surto de um cabo pára-raios (ohm), Z_T , impedância de surto da torre (ohm) e Z_{at} impedância de surto do aterramento da torre (ohm). Ressalta-se que, no caso da torre autoportante com um cabo pára-raios, a impedância Z_{pr} será igual Z_{prl} .

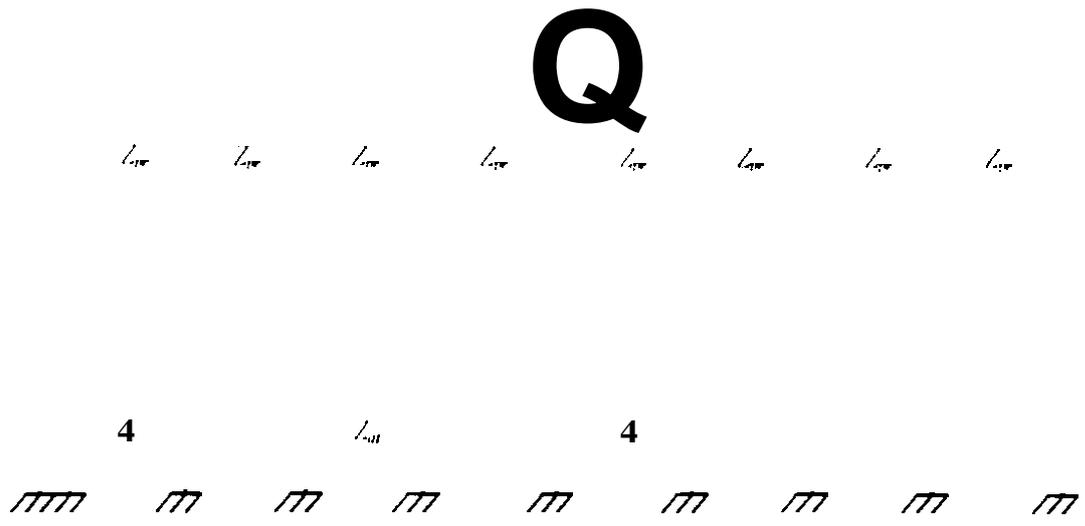


Fig.2.24 - Circuito equivalente da linha de transmissão para queda indireta na torre

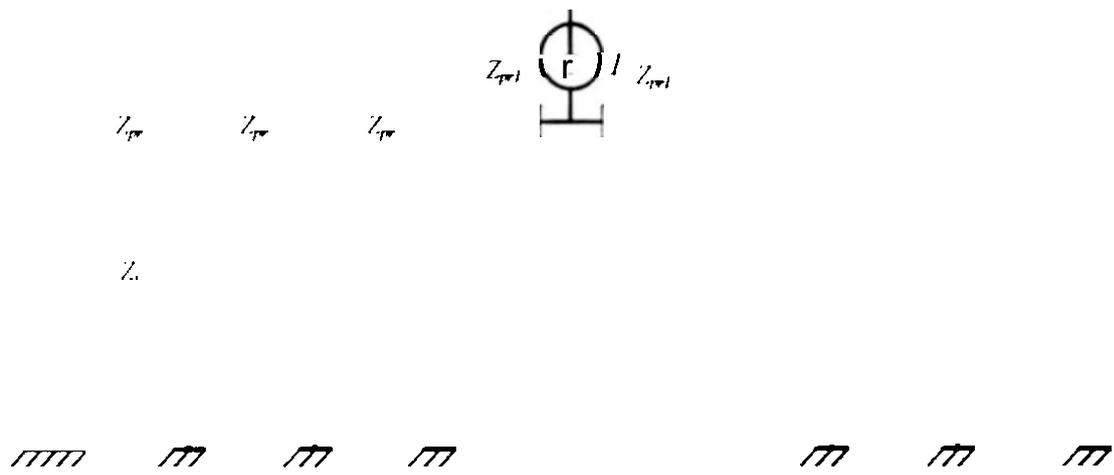


Fig.2 25 - Circuito equivalente da linha de transmissão para queda indireta no meio do vão

Nas secções seguintes são descritos os modelos adotados no cálculo das diversas impedâncias dos circuitos equivalentes, como as de surto da torre, cabos para-raios e a modelagem do aterramento

2.5.4. Impedância de Surto da Torre

Neste modelo, a torre será representada por uma impedância de surto constante

$$h$$

dependente apenas de um tempo de propagação $t = \frac{h}{w}$, com h representando a altura da torre e w , a velocidade de propagação da descarga ao longo da torre.

A impedância de surto pode ser calculada das mais variadas formas, das quais utilizaram-se os modelos cônico e o tipo H, ilustradas nas Figs.2.26 e 2.27, a seguir [32-33]

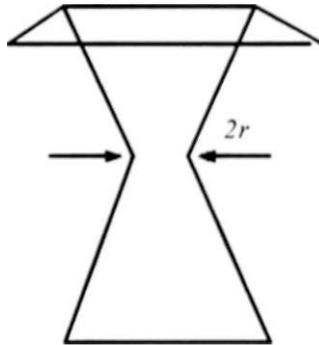


Fig.2.26 -Modelo cônico, torre tipo autoportante

$$Z_t = 60 \cdot \frac{L \ln \frac{2h}{r}}{J} - 1 \quad (2.21)$$

Fig.2.27 - Torre tipo trapézio e LPNE (modelo H)

(2.22)

$$Z_s = 60 \cdot L n \left(\frac{2h}{r_{eq}} \right) - 60 \quad (2.23)$$

$$Z_m = 60 \cdot L \left[\frac{h}{b} + 90 \left(\frac{h}{b} \right)^2 - 60 \right] \quad (2.24)$$

2.5.5. Impedância de Surto do Cabo Pára-Raios

A impedância de surto de um cabo pára-raios é dado por [32] :

$$Z_s = 60 L n \left(\frac{2h}{r_{eq}} \right) \quad (2.25)$$

Onde h é a altura média do cabo em relação ao solo, que é função da topografia do terreno e r_{eq} é o raio equivalente do cabo.

Para o caso de torres com dois cabos pára-raios, é necessário calcular a impedância de surto equivalente calculados pela seguinte expressão :

$$Z_s = Z_{11} + Z_{12} \quad (2.26)$$

$$Z_{11} = 60 \cdot L n \left(\frac{2h}{r_{eq}} \right) \quad (2.27)$$

$$Z_{12} = 60 \cdot L n \left(\frac{2h}{4h^2 + b^2} \right) \quad (2.28)$$

Ressalta-se que quando um cabo pára-raios é atingido por uma descarga atmosférica, a onda viajante de alta tensão provoca o aparecimento de um fenômeno denominado efeito corona ocasionando, em termos elétricos, um aumento do raio do cabo. Esse aumento efetivo do raio provoca um aumento nos coeficientes de acoplamento, variando portanto, as tensões nas cadeias de isoladores. Essa característica é considerada, ao se corrigir o raio através da seguinte expressão [24]:

$$R_{corr} = k_1 v^2 + k_2 v + r, \quad (2.29)$$

onde R_{corr} é o raio corrigido do cabo pelo efeito corona, k_1 e k_2 são coeficientes que dependem da altura do cabo em relação ao solo conforme mostrado na tabela 2.2. v é a tensão no cabo e r é o raio do cabo.

Tabela.2.2 - Coeficientes k_1 e k_2 em função da altura

Altura (m)	Coeficientes	
	k_1	k_2
9	0.053	0.098
15	0.044	0.094
20	0.035	0.124
25	0.030	0.123
30	0.028	0.129
35	0.029	0.115
45	0.028	0.107

2.5.6. Aterramento

Na modelagem do aterramento, utilizou-se o modelo de Bewley ilustrado na Fig.2.31 [24], composto de uma resistência em série com um circuito RL paralelo. Essa modelagem se baseia no fato de que a impedância representada por um fio horizontal enterrado, a exemplo de um fio de contrapeso conforme ilustrado na Fig.2.32, submetida a uma onda degrau unitário de tensão, varia ao longo do tempo entre o valor da impedância de surto do referido fio (valor inicial) e o valor da resistência de dispersão do mesmo (valor final). Nas Figs 2.33 e 2.34 são representados esse modelo para o caso de $t=0$ e $t=\infty$.

$$Z_c(t) = R_d + (Z_s - R_d) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.30)$$

Onde, R_d é a resistência de dispersão do fio de contrapeso. Z_s é a impedância de surto do fio de contrapeso. l é o comprimento do fio de contrapeso e w a velocidade de propagação do surto no fio de contrapeso que é definido como 1/3 da velocidade da luz.

$$(Z_s - R_d) \quad 1$$

$$r \quad w$$

Fig.2.31 - Modelo de aterramento de uma linha de transmissão

Fio de contrapeso

Fig.2.32- Configuração típica dos arranjos de aterramento de uma linha

A equação para se calcular $R_d l'$ em função de l' e p é dada por :

$$2\pi l \left[\ln \frac{2l}{a} + \frac{2l}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{l}{s} + 0.675 \frac{s^2}{l^2} - 0.145 \frac{s^3}{l^3} \right] \quad (2.31)$$

Onde:

a = Diâmetro do fio (m)

l – Comprimento de cada perna do arranjo (m)

s = Dobro da profundidade de enterramento do arranjo (m)

Fig.2.33- Modelo de aterramento para o caso de $t = 0$ e $Z_c(0) = Z_s$

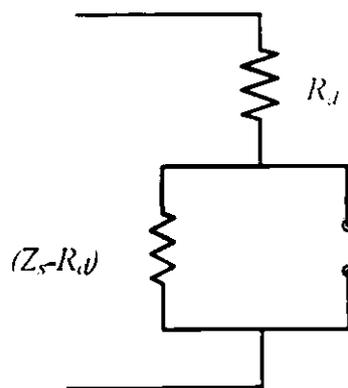


Fig.2.34 - Modelo de aterramento para o caso de $t = \infty$ e $Z_c(\infty) = R_d$

2.6. SUPORTABILIDADE DOS ISOLAMENTOS

A suportabilidade a impulso atmosférico dos isolamentos de uma linha de transmissão também é de natureza estatística podendo, portanto, ser representada por uma curva de probabilidade através de um valor médio ($V_{50\%}$) e um desvio padrão. A maneira mais precisa se medir a suportabilidade a impulso é através de ensaios em laboratórios de alta tensão, obtendo-se curvas padrão dos diversos tipos de gaps (condutor-estai, condutor-estrutura lateral, condutor-estrutura na janela e condutor-estrutura superior com a cadeia de isoladores) em função do distanciamento. Os valores da tensão de suportabilidade de algumas configurações em relação a "d" é ilustrada na Fig.2.35 [27][34], onde ressalta-se que o valor médio ($V_{50\%}$) é definido como aquele em que ao se aplicar um mesmo impulso repetidas vezes, não há o rompimento do arco em 50% da amostra.

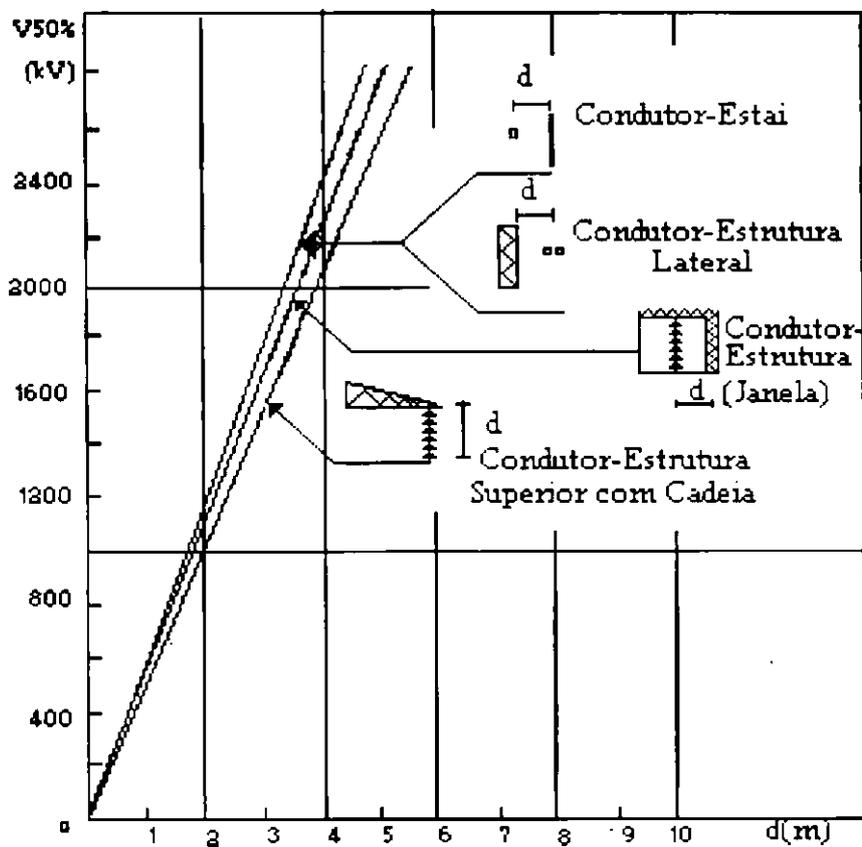


Fig.2.35 Suportabilidade dos gaps quanto ao impulso de descargas atmosféricas ($V_{50\%}$) em função da distância "d".

3. CÁLCULO DO DESEMPENHO DAS LINHAS COMPACTAS

Conforme já analisado nos itens anteriores o desempenho da linha de transmissão é determinado pelo número de desligamentos que uma LT terá em função da queda do raio nos cabos condutores ou cabos pára-raios. As etapas para a realização deste estudo estão descritas nas secções 3.1 e 3.2 a seguir. No diagrama da Fig.3.1 são ilustrados as etapas de análise bem como são apresentados os programas digitais que foram utilizados.

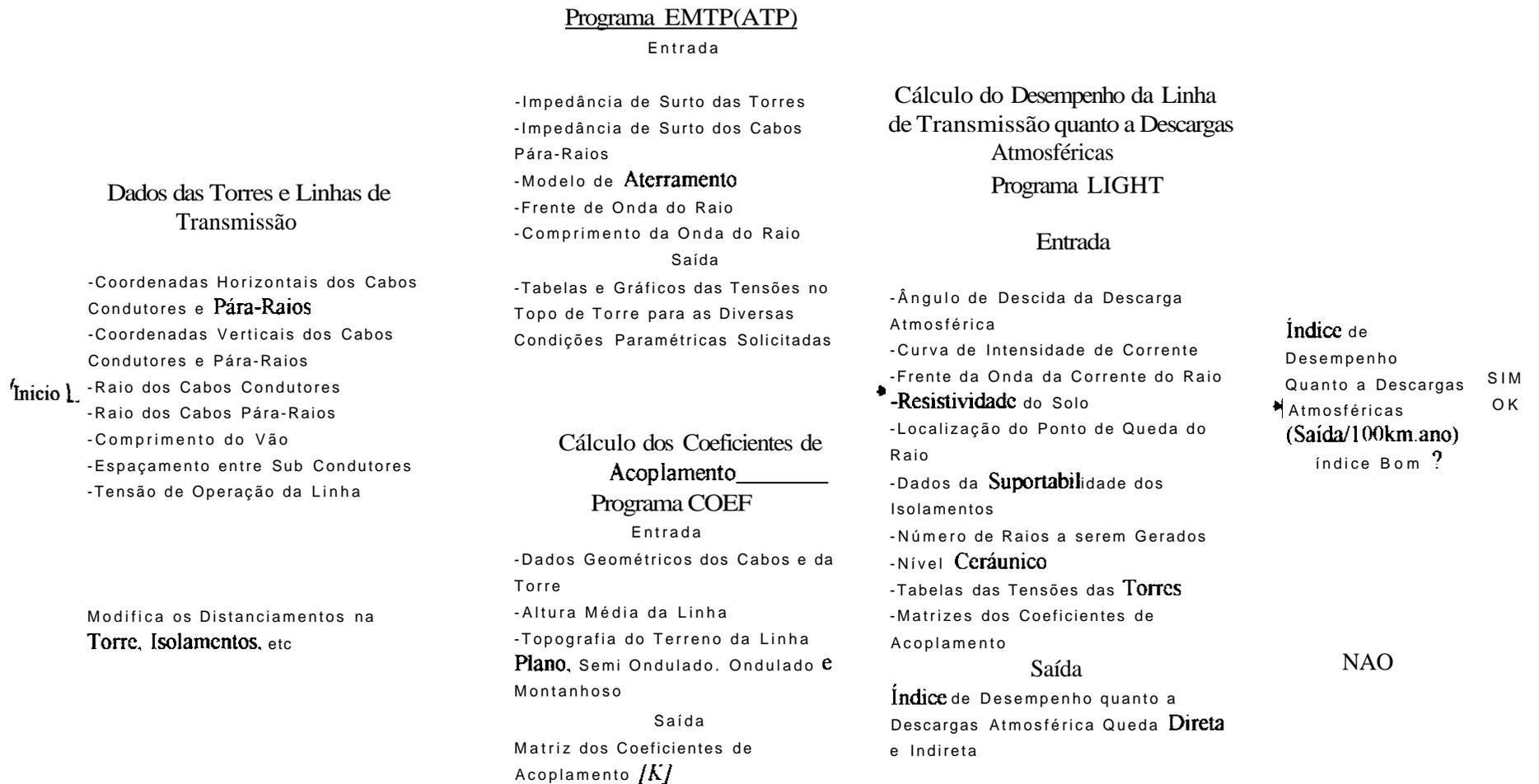


Fig 3.1-Diagrama das Etapas do Estudo

3.1. QUEDA DIRETA

O cálculo do desempenho de linhas de transmissão quanto à queda direta dos **raios**, conforme já analisado no item 2.3, aborda incidência das descargas diretamente nos cabos condutores da linha **de** transmissão. Procura-se obter um posicionamento adequado dos cabos **pára-raios**, do ângulo de blindagem e distância com o cabo **condutor**, evitando-se que haja uma falha de blindagem e o raio atinja diretamente os cabos condutores e, **consequentemente**, possa provocar uma descarga entre a fase e a torre. As etapas passo a passo do estudo são as seguintes [25]:

1- Define-se o modelo eletrogeométrico com todas as distâncias e coordenadas horizontais e verticais da linha em estudo.

2- **Fixa-se** um determinado valor de corrente de raio e sua correspondente probabilidade de ocorrência

3- Monta-se o modelo para essa corrente de raio, incluindo as regiões dos condutores e pára-raios.

4- Gera-se, em **seguida**, números aleatórios e associam-se a eles as variáveis do **fenômeno**, como o ângulo de incidência de queda do raio e o alvo atingido.

5- **Verifica-se** se o raio caiu no condutor ou no cabo **pára-raio**.

6- Caso ele tenha atingido o cabo **condutor**, calcula-se a probabilidade de ocorrência da corrente pré lixada e compara-se a tensão nos terminais da cadeia de isoladores com a sua suportabilidade a impulso atmosférico, conforme ilustrado na Fig.2.35. Se essa tensão for **superior**, haverá uma descarga e, **consequentemente**, um desligamento.

7- Esse procedimento é **repetido** até um número de **vezes**, normalmente em torno de 10000, até que seja suficientemente grande para reproduzir estatisticamente o fenômeno.

8- Efetua-se a soma dos números de desligamentos parciais e o resultado é ponderado com as condições reais da linha em **estudo**, estabelecendo o índice de desligamento total quanto à descarga atmosférica para a queda direta. No caso de se perseguir a blindagem **efetiva**, deve-se modificar os distanciamentos na torre e repetir o procedimento até se alcançar o **índice** nulo.

No caso das linhas em análise, a autoportante 500 kV com dois e um cabo para-raios, a trapecio 500 kV e a trapézio LPNE 230 kV, obteve-se a blindagem efetiva.

3.2. QUEDA INDIRETA

No caso do cálculo de desempenho quanto à queda indireta, é necessário se calcular inicialmente a tensão topo de torre para as linhas em estudo. Ao contrário da queda direta, a ocorrência de desligamentos em consequência desse fenômeno, dificilmente é eliminada em sua totalidade. Entretanto, esses efeitos podem ser minimizados através da análise e adequação dos distanciamentos, cabos pára-raios, condutores e isoladores. Os dados da tensão topo de torre foram calculados através do programa EMTP(ATP) e utilizando-se a modelagem descrita anteriormente. Na secção a seguir serão calculados os valores das impedâncias utilizados nessa modelagem para os tipos de torres compactas em estudo.

3.2.1. Cálculo das Impedâncias de Surto do Modelo da Linha

Nas Figs 3.2. 3.3 e 3.4 são mostradas as silhuetas com os dados de distanciamentos condutor-solo, fase-terra, entre fases dos três tipos de torres compactas analisadas.

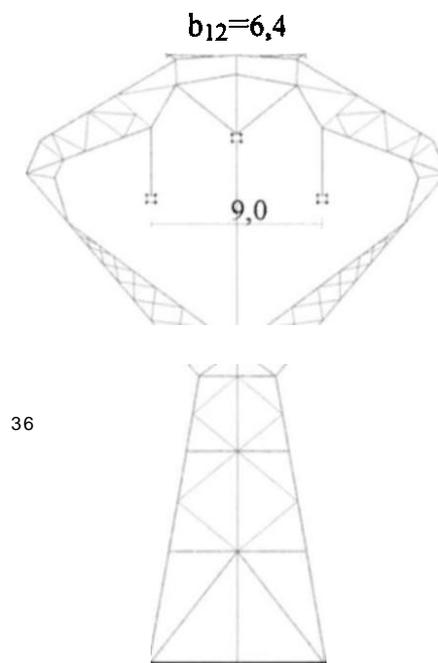


Fig.3.2- Torre autoportante 500 kV com um ou dois cabos pára-raios

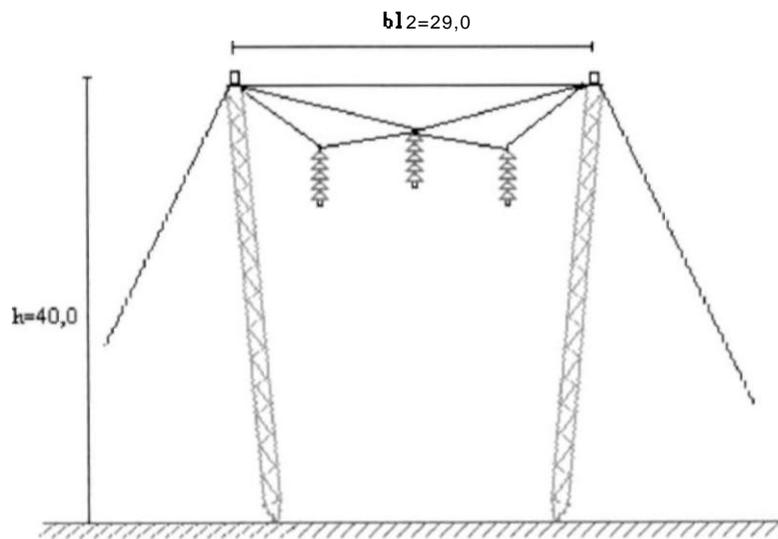


Fig.3.3 - Torre trapézio 500 kV

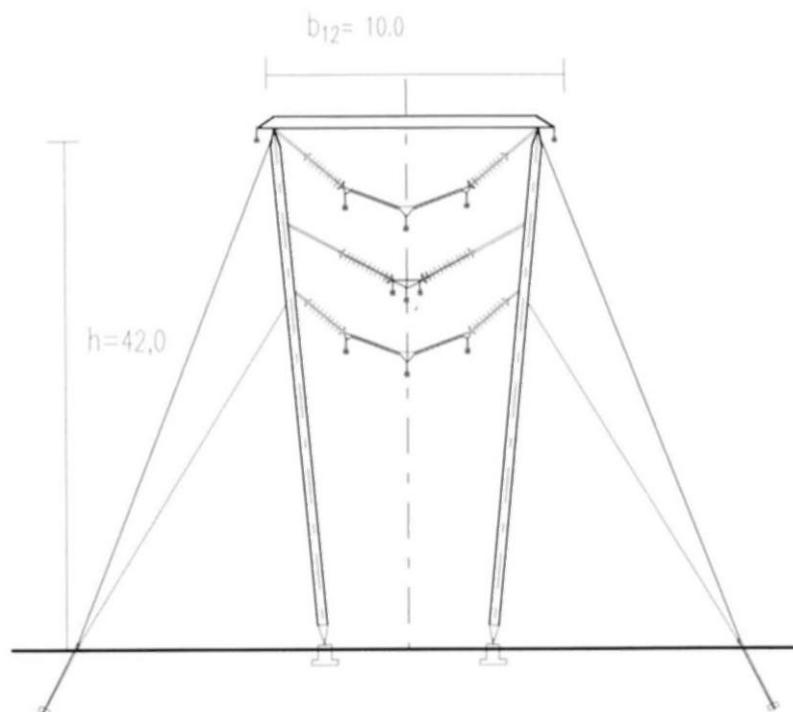


Fig.3.4 - Torre Trapézio LPNE 230 kV

Calculando-se as impedâncias de surto dos três tipos de torres analisadas, obtêm-se os seguintes valores ilustrados na tabela.3.1 a seguir

Tabela.3.1 - Dados das torres compactas analisadas

Tipo de Torre	Altura da torre (h)	Raio da Torre (r)	Largura da Torre (tipo H) (b)	Impedância Própria Z_p (Ω)	Impedância Mútua Z_m (Ω)	Impedância total Z_t (Ω)
Autoportante (dois cabos para-raios)	36.0	2.1	—	...	-	173
Autoportante (um cabo para-raio)	36.5	2.1	—	176
Trapezio-500 kV	40.0	0.6	29.0	192.0	24.0	108
LPNE-230 kV	42.0	0.5	10.0	172.0	28.0	100

Calculando-se as impedâncias de surto dos cabos para-raios para as torres em análise obtêm-se os valores da tabela.3.2.

Tabela 3.2 - Impedância de surto dos cabos para-raios para as torres analisadas

Tipo de Torre	Z_{11} (Ω)	Z_{12} (Ω)	Z_c (Ω)
Autoportante (dois cabos para-raios)	557	122	345
Trapezio	560	47	307
LPNE	522	87	304

No cálculo do modelo do aterramento utilizando-se a configuração da Fig.2.29 com o cabo 4 AWG de copperweld (aço revestido de cobre), e com os seguintes dados :

- Profundidade de enterramento = 0.5 m
- Diâmetro = 0.0052 m
- Resistividade elétrica do cobre = $0,18 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$
- Permeabilidade magnética relativa do cobre = 1
- Resistividade elétrica do aço = $0,15 \times 10^{-6} \Omega$
- Permeabilidade magnética relativa do aço = 100

Obtêm-se, portanto, as tabelas 3.3 e 3.4 onde são calculados os valores de R_d , $(Z_S - R_d)$ e $(Z, -R_d)$. Esses cálculos foram realizados variando-se os valores de resistividade do solo de 500 a 4500 $\Omega \cdot m$, e com os dois tipos de simulação do condutor, o maciço de aço e o casco de cobre.

Tabela 3.3 - Cabo simulado como casca de cobre

Resistividade do Solo	Comprimento do Fio de Contrapeso	Para Cada Perna de Arranjo						Arranjo Completo	Modelo de Bewley		
		R' <i>m</i>	V <i>m</i>	G' $10 \cdot \frac{\mu\text{ho}}{\text{m}}$	C' $10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$	R'_d			(Ω)	(Ω)	(μH)
500	4x15	4,01	1,37	0,99	167	67,1	90,5	22,6	20	2,6	0,78
1000	4x33	4,01	1,44	0,46	39,2	64,6	191,6	47,9	20	27,9	18,42
1500	4x52	4,01	1,48	0,30	16,9	63,4	295,9	74,0	20	54,0	56,16
2000	4x72	4,01	1,51	0,22	9,2	62,5	403,8	101,0	20	81,0	116,64
2500	4x92	4,01	1,54	0,17	5,8	62,1	514,8	128,7	20	108,7	200,01
3000	4x114	4,01	1,56	0,14	3,9	60,9	626,0	156,5	20	136,5	311,22
3500	4x136	4,01	1,58	0,12	2,8	60,2	739,4	184,8	20	164,8	448,26
4000	4x158	4,01	1,59	0,10	2,1	60,2	852,0	213,0	20	193,0	609,88
4500	4x180	4,01	1,60	0,09	1,7	59,7	967,3	241,8	20	221,8	798,48

Tabela 3.4 - Cabo simulado como maciço de aço

Resistividade do Solo	Comprimento do Fio de Contrapeso	Para Cada Perna de Arranjo						Arranjo Completo	Modelo de Bewley		
		R' $10^{-9} \frac{\Omega \cdot m}{m}$	V $10^{-6} \frac{H}{m}$	G' $10^{-3} \frac{mho}{m}$	C' m	R'_d Ω	Zs' \sqrt{C}		Z_s $= \frac{Z}{4} (\Omega)$	(Ω)	$Z_s - R'_d$ (Ω)
500	4x15	3,74	11,0	1,02	1156,5	65,3	97,5	24,4	20	4,4	1,32
1000	4x33	3,74	11,06	0,48	258,0	62,8	207,0	51,8	20	31,8	20,99
1500	4x52	3,74	11,11	0,31	107,6	61,8	321,2	80,3	20	60,3	62,71
2000	4x72	3,74	11,14	0,22	58,0	60,9	437,9	109,5	20	89,5	128,88
2500	4x92	3,74	11,17	0,17	35,8	60,7	558,5	139,6	20	119,6	220,06
3000	4x114	3,74	11,19	0,14	24,2	59,6	679,0	169,8	20	149,8	341,54
3500	4x136	3,74	11,19	0,12	17,4	58,8	800,7	200,2	20	180,2	490,14
4000	4x158	3,74	11,22	0,10	13,1	58,6	925,4	231,4	20	211,4	668,02
4500	4x180	3,74	11,22	0,09	10,1	58,4	1049,8	262,5	20	242,5	873,00

Como o cabo de **aterramento** simulado foi o copperweld (aço **revestido** de cobre), foram utilizados para os cálculos os valores médios entre o condutor simulado como uma casca de **cobre**, e outro como um condutor maciço de aço para representar este tipo de cabo. **Obtêm-se** portanto os valores da tabela 3.5 a seguir :

Tabela 3.5- Valores médios dos parâmetros utilizados no circuito equivalente do aterramento

Resistividade do Solo ρ ($\Omega.m$)	(Ω)	$\frac{2l'}{w}(Z_s - R_d)$ (μH)
500	3,5	1,05
1500	57,1	59,4

3.2.2. Cálculo da Tensão Topo da Torre

Calculando-se a tensão máxima no topo da torre, obtém-se os valores das tabelas a seguir. Ressalta-se que foram simulados 48 casos no EMTP-ATP, utilizando-se valores nas simulações descritos na tabela 3.6. Em seguida, são apresentadas as curvas dessa tensão para o caso da torre autoportante com um cabo pára-raio, onde pode-se observar com mais detalhes os seus valores, o crescimento e sua forma de onda para a corrente injetada padrão de 1 kA. As curvas dos outros 36 casos restantes são apresentados no Anexo 2. Ressalta-se que a apresentação de todos os gráficos das curvas nesse Anexo, tem por finalidade subsidiar simulações que poderiam ser feitas em futuros trabalhos de estudos transitórios de descargas atmosféricas e de ondas viajantes utilizando o EMTP-ATP.

Tabela.3.6 - Dados paramétricos utilizados nas simulações

Parâmetro	Variação Paramétrica
Resistividade do solo ($\Omega.m$)	500 e 1500
Tempo de subida	1 μ s, 3 μ s e 5 μ s
Localização da queda do raio	Torre e meio do vão
Tipos de torre	Autoportante um cabo pára-raio 500 kV Autoportante dois cabos pára-raios 500 kV Trapézio 500 kV LPNE 230 kV

Tabela.3.7-Tensão no topo da torre p/ corrente de raio de 1 kA. torre autop 1 cabo para- raio

Tipo de Torre	Local da Queda	Resistividade do Solo (Q.m)	Frente de Onda (µs)	Tensão Topo da Torre p/1kA (kV)
Autoport 1cpraio	Torre	500	1	35,1
Autoport 1cpraio	Torre	500	3	24,2
Autoport 1cpraio	Torre	500	5	20,4
Autoport 1cpraio	Torre	1500	1	60,0
Autoport 1cpraio	Torre	1500	3	39,4
Autoport 1cpraio	Torre	1500	5	27,3
Autoport 1cpraio	Meio do Vão	500	1	35,3
Autoport 1cpraio	Meio do Vão	500	3	15,8
Autoport 1cpraio	Meio do Vão	500	5	15,0
Autoport 1cpraio	Meio do Vão	1500	1	60,0
Autoport 1cpraio	Meio do Vão	1500	3	29,0
Autoport 1cpraio	Meio do Vão	1500	5	20,0

Tabela 3.8- Tensão no topo da torre p/ corrente de raio de 1 kA. torre autoport dois cabos para- raios-500 kV

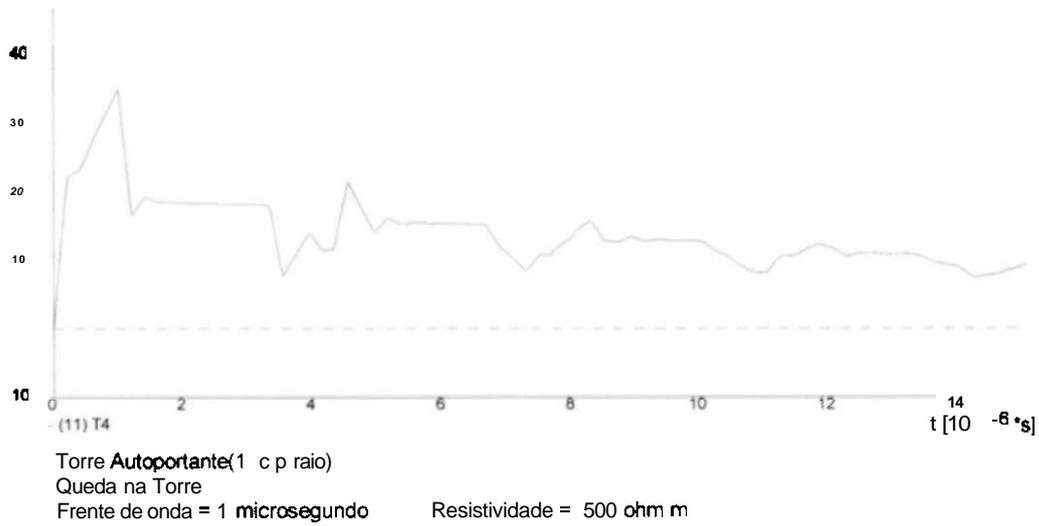
Tipo de Torre	Local da Queda	Resistividade do Solo (Q.m)	Frente de Onda (µs)	Tensão Topo da Torre p/1kA(kV)
Autoport 2cpraios	Torre	500	1	32,9
Autoport 2cpraios	Torre	500	3	24,3
Autoport 2cpraios	Torre	500	5	18,7
Autoport 2cpraios	Torre	1500	1	53,3
Autoport 2cpraios	Torre	1500	3	36,5
Autoport 2cpraios	Torre	1500	5	24,3
Autoport 2cpraios	Meio do Vão	500	1	32,1
Autoport 2cpraios	Meio do Vão	500	3	15,6
Autoport 2cpraios	Meio do Vão	500	5	13,1
Autoport 2cpraios	Meio do Vão	1500	1	51,3
Autoport 2cpraios	Meio do Vão	1500	3	24,5
Autoport 2cpraios	Meio do Vão	1500	5	16,1

Tabela 3.9- Tensão no topo da torre p/ corrente de raio de 1 kA torre trapezio-500 kV

Tipo de Torre	Local da Queda	Resistividade do Solo (Q.m)	Frente de Onda (μ s)	Tensão Topo da Torre p/1kA(kV)
Trapezio	Torre	500	1	26,9
Trapezio	Torre	500	3	22.1
Trapezio	Torre	500	5	17,6
Trapezio	Torre	1500	1	47.1
Trapezio	Torre	1500	3	34,0
Trapezio	Torre	1500	5	23,0
Trapezio	Meio do Vão	500	1	26,6
Trapezio	Meio do Vão	500	3	13,7
Trapezio	Meio do Vão	500	5	12,3
Trapezio	Meio do Vão	1500	1	46,5
Trapezio	Meio do Vão	1500	3	22,6
Trapezio	Meio do Vão	1500	5	15,5

Tabela 3.10 - Tensão no topo da torre p/ corrente de raio de 1 kA. torre LPNE-230kV

Tipo de Torre	Local da Queda	Resistividade do Solo (Ω .m)	Frente de Onda (μ s)	Tensão Topo da Torre p/1kA(kV)
LPNE 230 kV	Torre	500	1	26.9
LPNE 230 kV	Torre	500	3	20.8
LPNE 230 kV	Torre	500	5	17.6
LPNE 230 kV	Torre	1500	1	46,9
LPNE 230 kV	Torre	1500	3	34,0
LPNE 230 kV	Torre	1500	5	23,0
LPNE 230 kV	Meio do Vão	500	1	24.6
LPNE 230 kV	Meio do Vão	500		12,0
LPNE 230 kV	Meio do Vão	500	5	11.8
LPNE 230 kV	Meio do Vão	1500	1	44,0
LPNE 230 kV	Meio do Vão	1500	3	24.0
LPNE 230 kV	Meio do Vão	1500	5	14.8



V [kV]

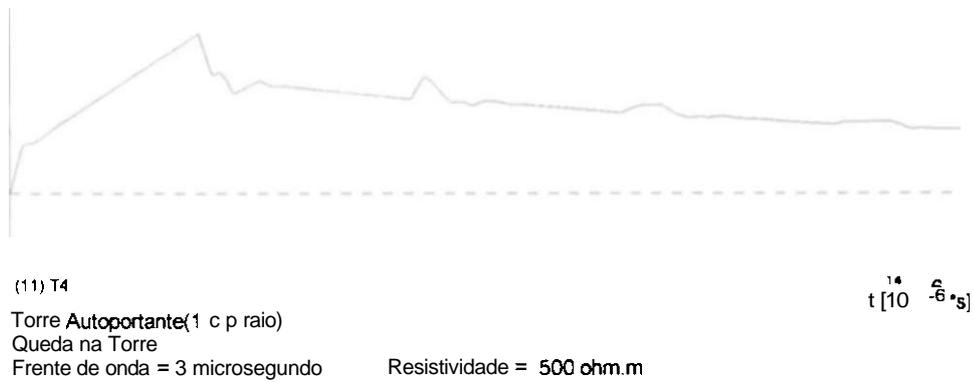
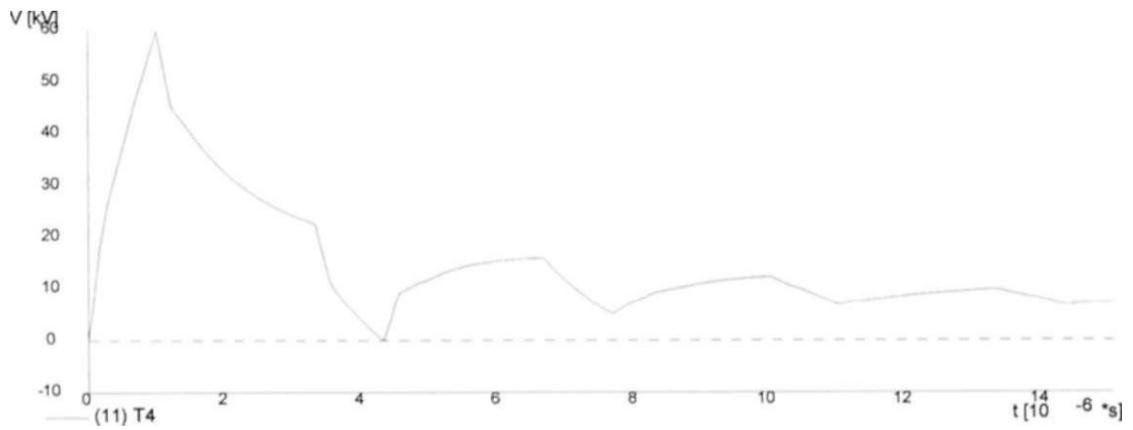
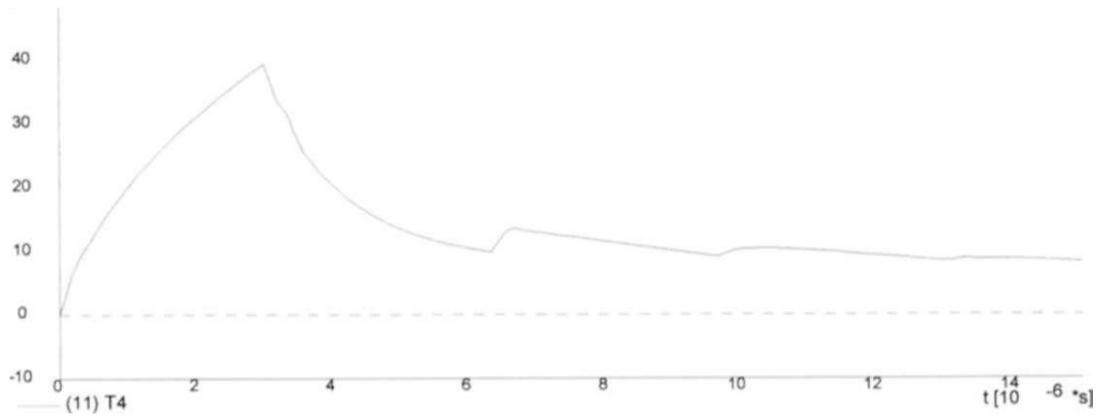


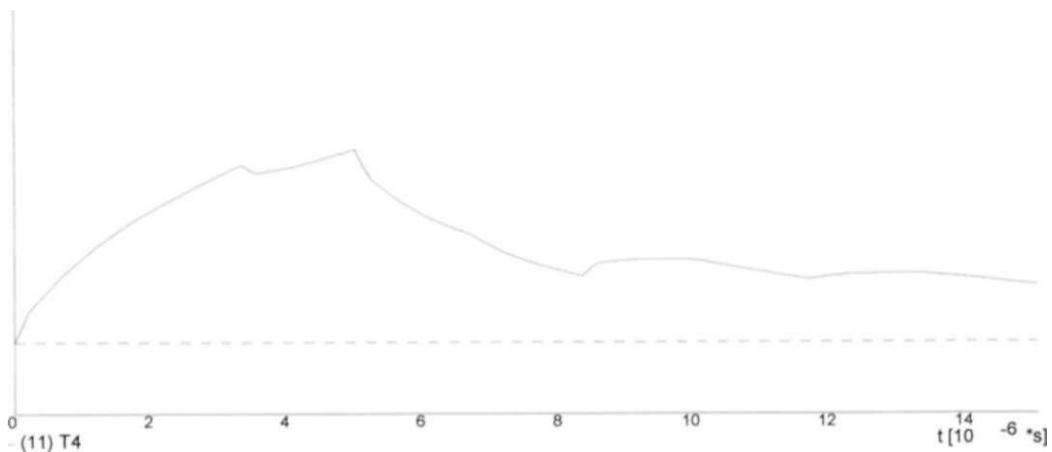
Fig.3.5-Curvas da tensão topo de torre **autoportante** 500 kV, um cabo pára-raio, 1, 3 e 5 μ s, queda na torre, resistividade do solo 500 Ω .m



Torre **Autoportante**(1 c p raio)
 Queda na Torre
 Frente de onda = 1 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m

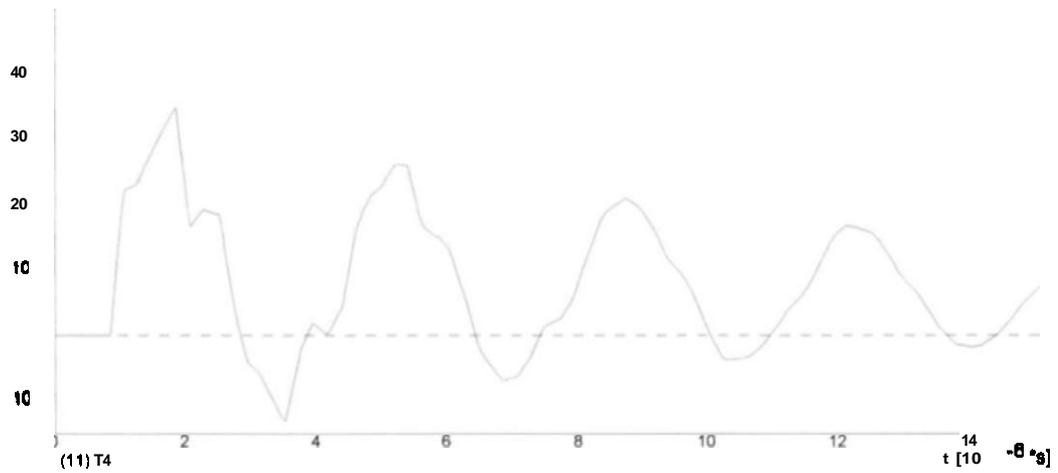


Torre **Autoportante**(1 c p raio)
 Queda na Torre
 Frente de onda = 3 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m

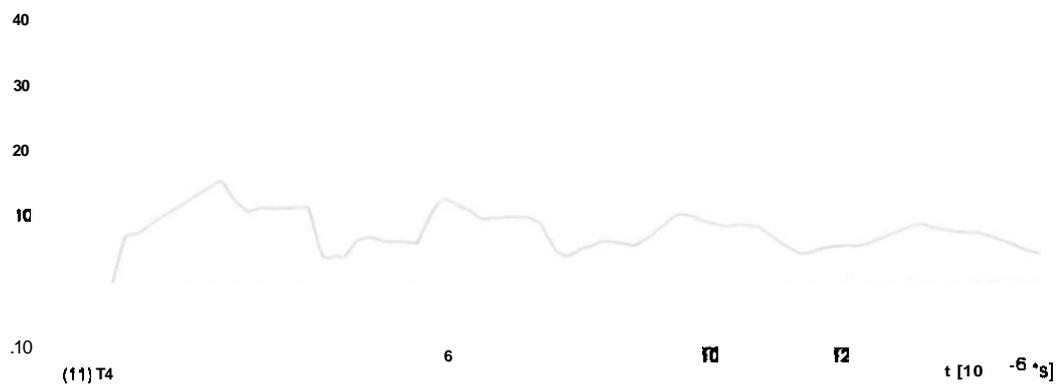


Torre **Autoportante** (1 c p raio)
 Queda na Torre
 Frente de Onda = 5 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m

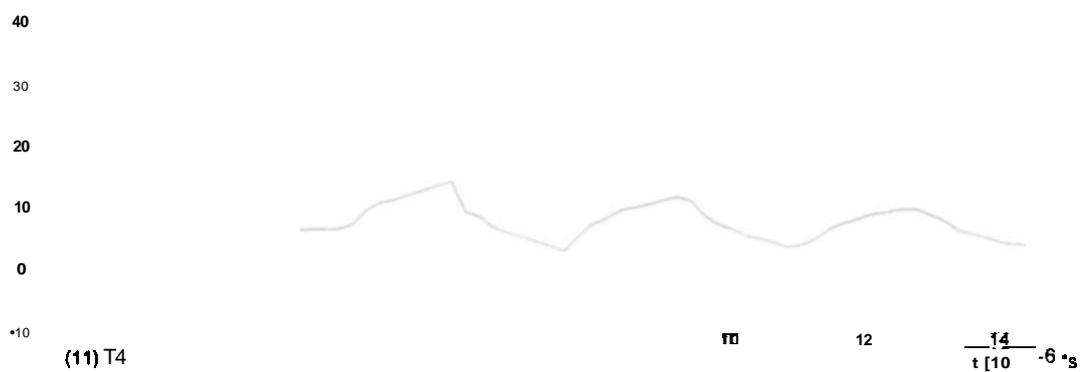
Fig.3.6-Curvas da tensão topo de torre autoportante 500 kV, um cabo pára-raio, 1, 3 e 5 queda na torre, resistividade do solo 1500Q . m



(11) T4
 Torre Autoportante (1 c p raio)
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m

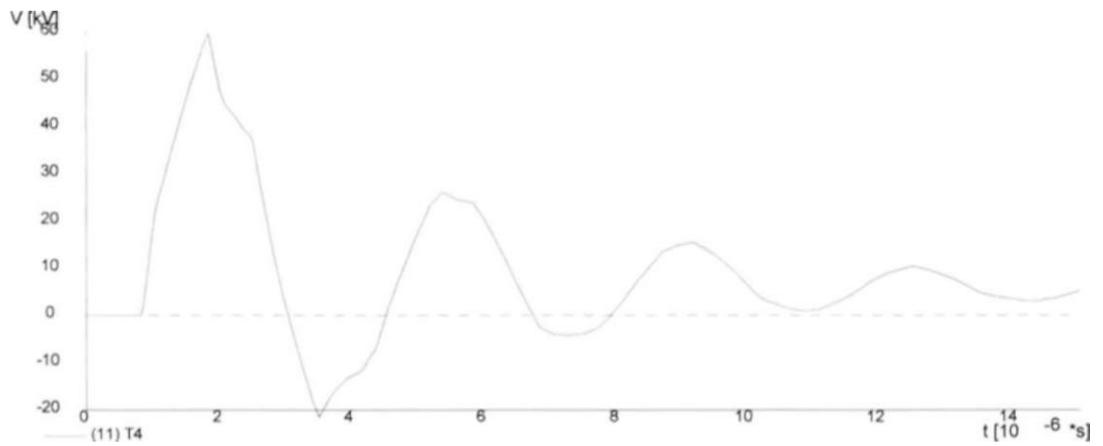


(11) T4
 Torre Autoportante (1 c p raio)
 Queda no meio do Vão
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m

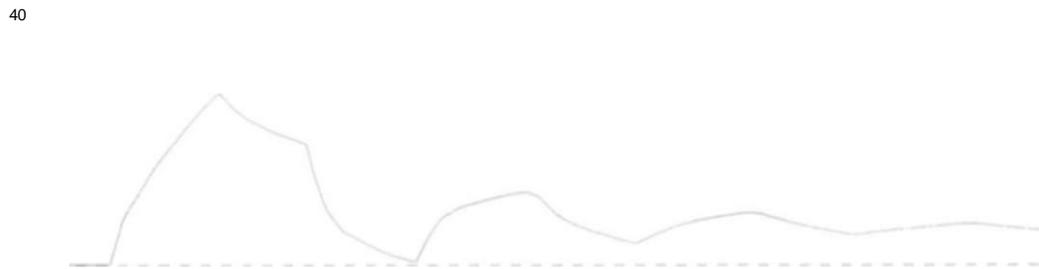


(11) T4
 Torre Autoportante (1 c p raio)
 Queda no Meio do Vão
 Frente da Onda = 5 microsegundo Resistividade = 500 ohm.m

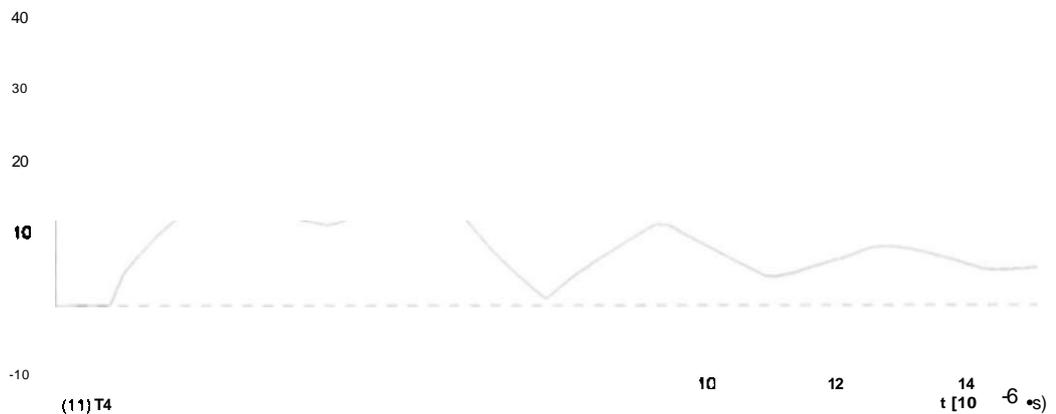
Fig.3.7-Curvas da tensão topo de torre autoportante 500 kV. um cabo pára-raio, 1, 3 e 5 queda no meio do vão, resistividade do solo 500 Ω.m



Torre Autoportante (1 c p raio)
 Queda no meio do Vão
 Frente de Onda = 1 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m



Torre Autoportante (3 c p raio)
 Queda no Meio do Vão
 Frente de Onda = 3 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m



Torre Autoportante (5 c p raio)
 Queda no meio do Vão
 Frente de Onda = 5 microsegundo Resistividade = 1500 ohm.m

Fig.3.8-Curvas da tensão topo de torre autoportante 500 kV, um cabo pára-raio, 1, 3 e 5 μ s, queda no meio do vão, resistividade do solo 1500 Ω .m

3.2.5. Cálculo do Desempenho Quanto a Queda Indireta

O cálculo do desempenho quanto a queda indireta é realizado de acordo com o seguinte procedimento [25]:

1-Define-se o modelo **eletrogeométrico** com todas as distâncias e coordenadas horizontais e verticais da linha em estudo para um determinado caso de tipo de torre e de perfil topográfico do terreno onde a linha irá atravessar.

2-**Fixa-se** um **determinado** valor de corrente de raio e sua correspondente probabilidade de **ocorrência**

3-Monta-se o modelo para essa corrente de raio, incluindo as regiões dos condutores, pára-raios.

4-Em **seguida**, são gerados números aleatórios e associa-se a eles as variáveis do fenômeno, como o ângulo de incidência de queda do raio e o alvo atingido do perfil lateral da LT

5-**Verifica-se** se o raio caiu no condutor ou cabo pára-raio.

6- Caso a descarga atmosférica tenha atingido o cabo **pára-raios**, associam-se outras variáveis de distribuição probabilística do estudo, como a localização da queda ao longo do vão. a resistividade do solo. o ângulo da tensão operativa e a frente de onda.

7-Em **seguida**, verifica-se o valor correspondente da tensão no topo de torre V_T já fornecido nos dados das tabelas da secção 3.2.2.

8-Efetua-se a correção devida ao efeito corona e calcula-se a **tensão** induzida nos cabos condutores $[KV_T]$, através dos coeficientes de acoplamento $[K]$.A diferença de potencial entre **terminais** da cadeia de isoladores $[Vs]$ é comparada com o valor da sua **suportabilidade** quanto a impulso atmosférico conforme ilustrado anteriormente na Fig 2.35 da secção 2.6.

9-Caso essa diferença seja **superior**, haverá uma descarga e. conseqüentemente, um desligamento.

10-Esse procedimento é repetido diversas vezes, normalmente em torno de 10000 **simulações**. até que haja um número em quantidade suficiente para reproduzir estatisticamente o fenômeno.

11-Finalmente, realiza-se o somatório dos desligamentos parciais e o resultado é ponderado de acordo com as condições reais da linha em estudo, estabelecendo-se o número total de desligamentos.

12-No caso de se perseguir um bom índice de desligamento, deve-se **modificar** os distanciamentos na torre e repetir o procedimento até se alcançar o índice desejado.

A utilização da variável do perfil topográfico nos estudos elétricos de desempenho de descargas atmosféricas de linhas é de suma importância, pois haverá para cada tipo de perfil de terreno uma modificação das distâncias condutor **pára-raios**. Conseqüentemente, haverá uma diferença na matriz de coeficientes de acoplamento $[K]$ na tensão de solicitação nas cadeias de isoladores $[V_s]$ que provocará uma diferença nos índices de desempenho. Na Fig.3.9 a seguir é ilustrada a localização dos cabos pára-raios, condutores, vão e a flecha, bem como os seus distanciamentos e no Anexo 3 são apresentados os valores calculados das matrizes dos coeficientes de acoplamento das torres analisadas, para os diversos tipos de perfis topográficos.

Ressalta-se que para a determinação das alturas e dos distanciamentos entre os cabos é necessário se calcular a altura média da linha. Esta consideração tem por finalidade se considerar nos cálculos a flecha dos cabos no vão de uma linha. A altura média de uma linha é definida como $H_m = H_t - 2/3f$ para terreno plano, $H_m = H_t - 1/3f$ para terreno semi ondulado, $H_m = H_t$ para terreno ondulado e $H_m = 2 H_t$ para terreno montanhoso, onde H_m é a altura média da linha, H_t é a altura do cabo na torre e f é a flecha.

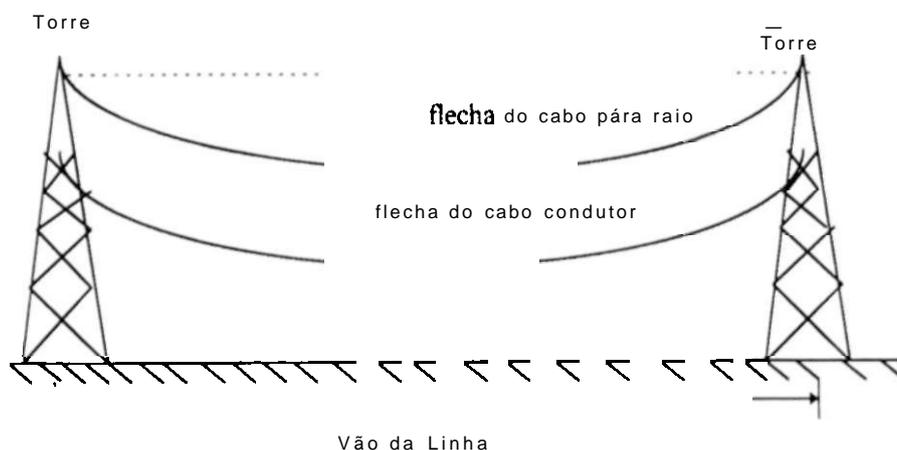


Fig.3.9-Perfil longitudinal de uma linha com a representação da flechas dos cabos e vão

Calculando-se os índices de **desligamentos/100 km ano** das linhas compactas em análise para as diversas condições do perfil de **terreno**, e para uma probabilidade de **ocorrência** de **0.6** de cair na torre e **0.4** no meio do vão **Ref [27]**, **obtem-se** os seguintes dados mostrados na tabela **3.11**. Ressalta-se que estes dados foram calculados considerando o **nível** ceráunico 20 que é o valor médio da região Nordeste.

Tabela.3.11- Desempenho da linha para as diversas condições de terreno

Tipo do perfil do Terreno	Autoportante (Um cabo para-raios)	Autoportante (Dois cabos pára-raios)	Trapézio 500 kV	Trapézio LPNE 230 kV
Plano	0,8	0,5	0,6	3,1
Semi ondulado	0,7	0,3	0,4	2,7
Ondulado	0,7	0.2	0,3	2,4
Montanhoso	0.2	0.0	0.0	1,8

Aplicando-se a esses valores os percentuais referentes a um perfil terreno típico atravessado pela linha, com a seguinte composição: 55 % de terreno plano. 20 % de terreno semi ondulado. 20 % de terreno ondulado e 5 % terreno montanhoso, **obtem-se** os índices de desligamentos mostrados na tabela **3.12**.

Tabela 3.12- Índices de desligamentos / (100 km x ano) para uma condição de terreno **típica**

Tipo do perfil do Terreno	Autoportante (Um cabo pára-raios)	Autoportante (Dois cabos pára-raios)	Trapézio 500 kV	Trapézio LPNE 230 kV
Típico	0.7	0.4	0.5	2.9

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Fazendo-se uma análise paramétrica com os resultados obtidos nos itens anteriores da tensão topo de torre, obtêm-se as curvas das Figs 4.1 a 4.4 a seguir. Estas curvas foram obtidas fixando-se um determinado parâmetro e variando-se os outros, como a frente de onda, resistividade do solo, tipo de torre e localização da queda. Os resultados foram realizados considerando-se uma corrente injetada tendo um valor de pico de 10 kA.

A Fig. 4.1 ilustra o comportamento da tensão topo de torre obtida, variando-se os valores do tempo de subida T_f . Observa-se que a tensão topo de torre segue basicamente a forma de onda da corrente do raio ilustrada na Fig.2.12, com algumas ondulações ocorrendo durante a fase de descida da onda de corrente. É importante observar uma variação de aproximadamente 40% a 60% nos valores máximos de tensão para as três situações ilustradas na Fig.4.1.

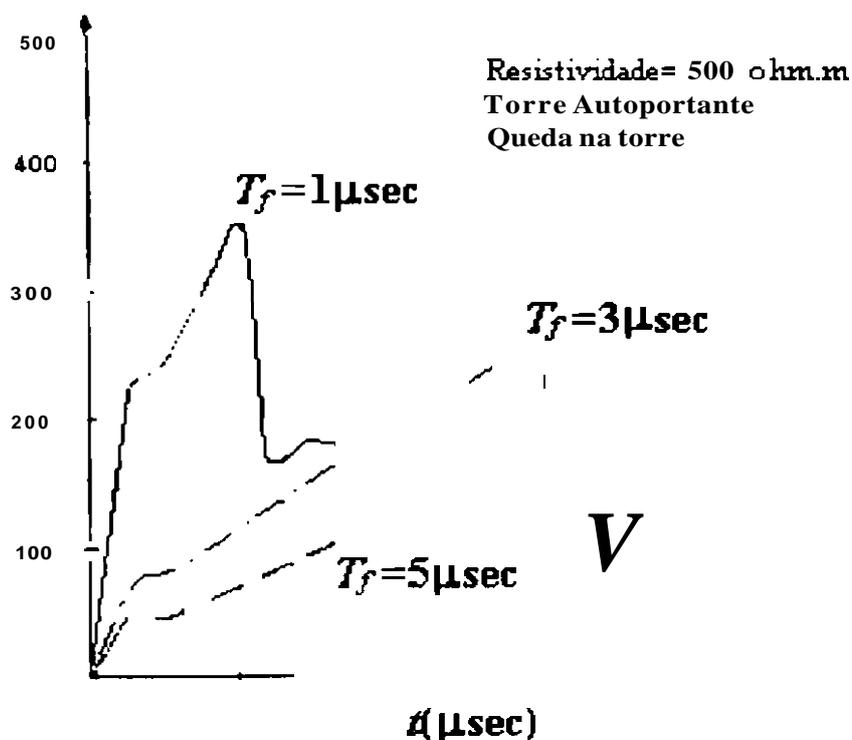


Fig. 4.1. Curvas representando a tensão topo de torre para os três valores do tempo de subida da onda de corrente associada ao raio

A Fig. 4.2 mostra a grande influência da resistividade do solo tanto na forma de onda como nos valores máximos da tensão topo de torre V_t . A variação na resistividade do solo de 500 para 1500 $\Omega.m$ aumenta a tensão máxima de aproximadamente 50%. donde se observa a grande importância de utilização de uma modelagem adequada do **aterramento** em estudos de desempenho quanto a descargas atmosféricas.

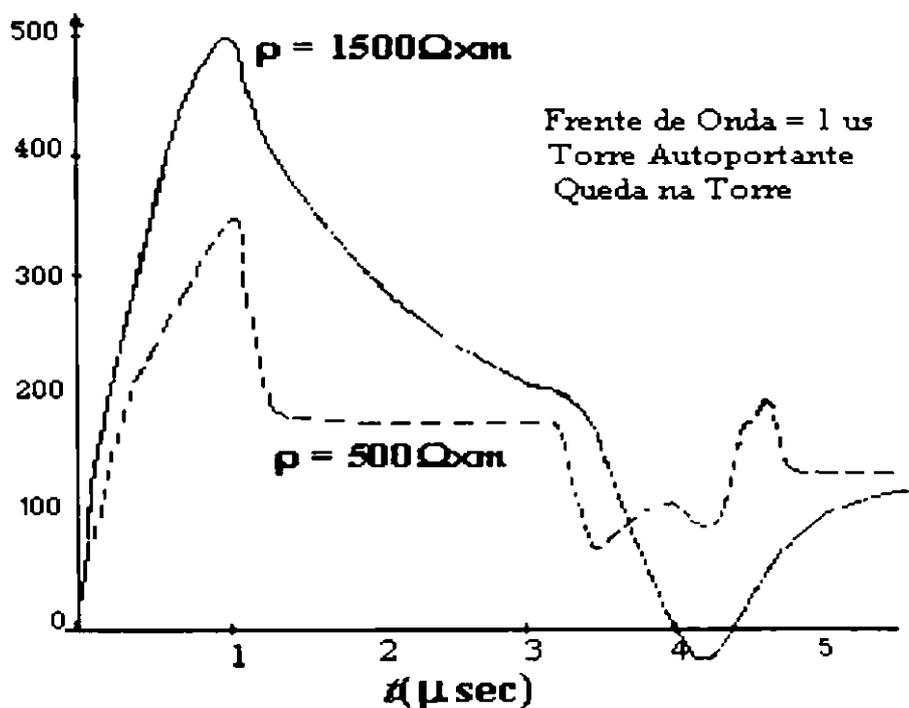


Fig. 4.2 Tensão topo de torre em função da resistividade do solo

As Figs. 4.3 e 4.4 ilustram a variação na tensão devido à influência do tipo de torre e localização da queda. Nas curvas mostradas na Fig. 4.3 **verifica-se** uma variação da tensão V_t de aproximadamente 25% ao se variar o tipo da torre. Quanto à influência da localização da **queda**, observa-se um deslocamento da curva no **tempo**, **embora** com os valores máximos de tensão praticamente inalterados.

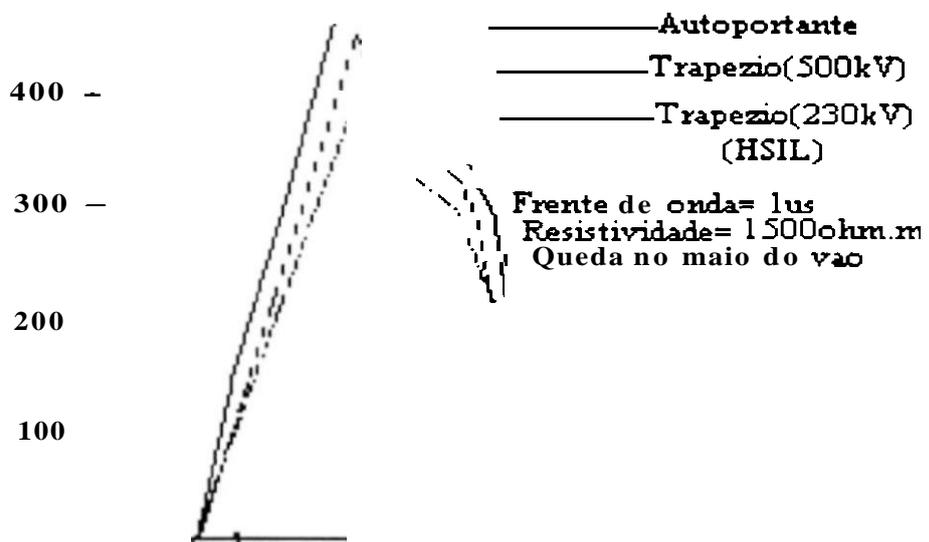


Fig. 4.3 Tensão topo de torre em função do tipo de torre.

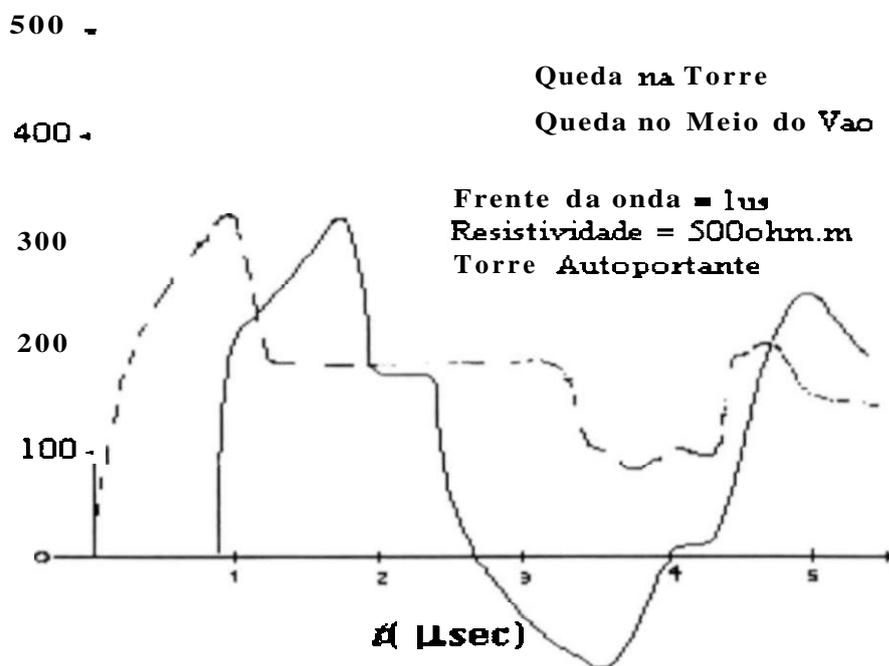


Fig. 4.4 Tensão topo de torre em função da localização da queda do raio

No que se refere aos resultados dos índices de desligamentos quanto a descargas atmosféricas, apresentados nas tabelas 3.11 e 3.12 observa-se que as taxas ficaram abaixo de 2,9 desligamentos / (100km x ano), para a condição de um perfil típico da linha. Este valor se situa na faixa de bom desempenho, pois os valores normalmente adotados pelas empresas do setor elétrico se situam na faixa de 3 desligamentos / (100km x ano)

Analisando-se a tabela 3.11 verifica-se a grande variação dos índices de desligamentos em função do perfil de terreno que a linha de transmissão atravessa. No caso da torre autoportante com um cabo pára raios os dados variam de 0,2 a 0,8 e na torre trapézio 230 kV (LPNE) os índices chegam a ter um variação de 1,8 a 3,1 ou seja mais de 70%. Donde se conclui que a utilização da variável perfil de terreno é de suma importância para os estudos de desempenho quanto a descargas atmosféricas.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia apresentada para determinação dos estudos de desempenho quanto a descargas atmosféricas mostrou-se ser tecnicamente viável, podendo ser aplicado às linhas de transmissão compactas de alta **tensão**.

Como resultado de aplicação desta metodologia proposta os resultados demonstraram uma viabilidade **técnica**, no que se refere aos estudos de descargas **atmosféricas**, dos tipos de torres compactas analisadas, a **autoportante** e trapézio 500 kV e a trapézio LPNE 230 kV. **Verificou-se** que elas apresentam um bom **desempenho**, recomendando a sua aplicação para serem utilizadas como uma das alternativas para os estudos de planejamento dos sistemas de transmissão das empresas de energia elétrica.

Os resultados também mostraram uma viabilidade técnica da utilização de linhas compactas **autoportantes** tipo raquete com a utilização de somente um cabo **pára-raios**. Este procedimento resultará numa redução nos custos da linha.

É de fundamental importância a inclusão do tipo de perfil de terreno que a linha **atravessa**, nos estudos de desempenho quanto a descargas **atmosféricas**, pois os resultados indicaram uma grande **variação**, conforme dados mostrados nas tabelas 3.11 e 3.12.

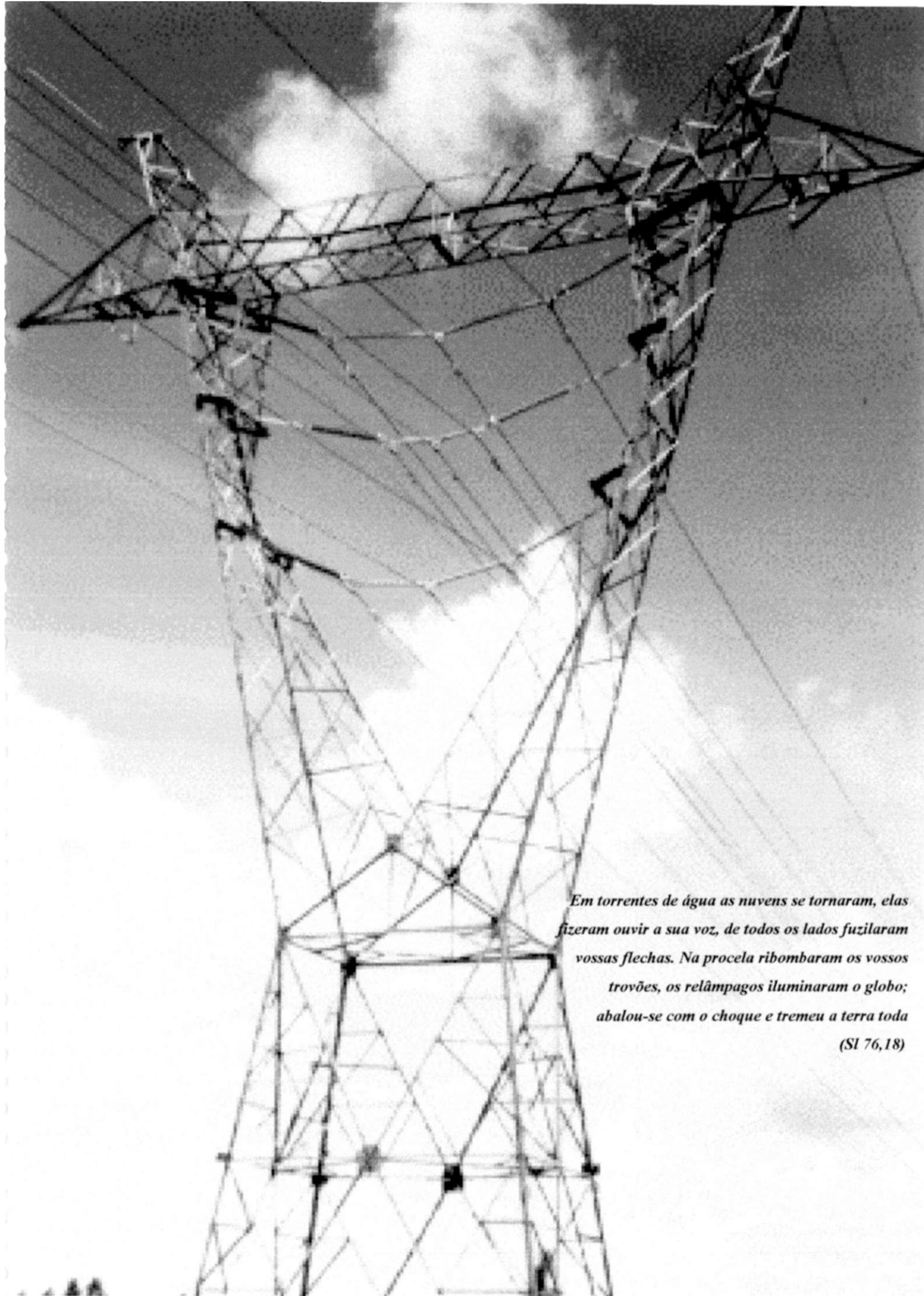
Verifica-se a necessidade de se ter um modelo adequado de **aterramento** da **linha**, pois essa variável tem grande **influência** nos resultados dos estudos de desempenho quanto a descargas atmosféricas conforme verificado nos resultados ilustrados na Fig. 4.2.

A tensão topo de torre é muito influenciada pela frente de onda da corrente do raio, bem como pela resistividade do solo e tipo da torre, como verificado nas Figs 4.1 a 4.4.

Ressalta-se que a metodologia proposta também pode ser utilizada em linhas com torres **convencionais**, necessitando de algumas modificações nos dados de **entrada**, principalmente aqueles referentes à impedância de surto das torres e dos cabos **pára-raios**.

No que se refere às recomendações e aos tópicos correlatos para futuros trabalhos que dariam continuidade a esta pesquisa poderiam ser citados :

- Levantamento da densidade de descargas atmosféricas ao longo das principais rotas de linhas de **transmissão** do **Brasil**, através da instalação de contadores de descargas. Este trabalho já se encontra em fase adiantada na região de Minas Gerais [35] através da **CEMIG** Companhia Energética de Minas Gerais e também em algumas rotas da linha de Itaipu, em São Paulo, através de **FURNAS** Centrais Elétricas. Com estes dados, poderia se determinar as equações e **curvas**, relacionando-se o índice **ceráunico** com a densidade de raios para a **região**, levando-se em consideração o relevo (plano, semi **ondulado**, ondulado e montanhoso). Ressalta-se algumas recentes pesquisas correlatas no México, realizadas pelo Instituto de Investigaciones Eléctricas [36].
- Prosseguimento das pesquisas sobre a curva de intensidade de corrente dos **raios**, a fim de serem obtidas características de ocorrência no Brasil. A CEMIG já dispõe de uma pesquisa em **andamento**, e instalou em certas torres de seu sistema de transmissão alguns anéis magnéticos que determinam a intensidade de corrente dos raios que caem nessas **torres**[35].
- Levantamento detalhado dos índices de desligamentos das linhas de transmissão compactas do Brasil quanto a descargas atmosféricas para comparação com dados teóricos através da modelagem apresentada neste trabalho. No caso de linhas **convencionais**, adaptar o modelo apresentado e comparar com os dados de índice de desligamento coletados.
- Continuação das pesquisas sobre modelos de **aterramento** mais **sofisticados**, pois, como já **mencionado**, esta variável tem muita influência nos resultados. Alguns trabalhos já estão sendo feitos nessa área específica como os trabalhos desenvolvidos pela UFMG [37].
- Prosseguimento dos estudos para a representação de um modelo mais sofisticado do efeito corona. Algumas pesquisas já estão sendo feitas como a da Universidade Federal do Rio de Janeiro realizado em conjunto com a Universidade de **Nottingham**, na Inglaterra e Universidade do **Toronto**, no Canadá [38].



*Em torrentes de água as nuvens se tornaram, elas
fizeram ouvir a sua voz, de todos os lados fuzilaram
vossas flechas. Na procela ribombaram os vossos
trovões, os relâmpagos iluminaram o globo;
abalou-se com o choque e tremeu a terra toda
(Sl 76,18)*

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Burguera. A L. Suero: J. M. Liberal. "132 kV Compacting Overhead Transmission Line." *Leningrad Symposium on Compact Overhead Lines*. CIGRE. 1991.
- [2] R. Gialioli. P. Pelacchi. P. Nicolini. P. Paoli. P. A. Canzilo. D. Dell'Olio. "Limits to the Compacting of EHV Lines imposed by Conductor Movement." *Leningrad Symposium on Compact Overhead Lines*, CIGRE, 1991.
- [3] Miguel O. B. C. Melo, Ronaldo H. Albuquerque, "Suprimento de Energia Elétrica a Área Metropolitana de Fortaleza, Uma Solução com Linhas Compactas." *VII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Brasília. 1984.
- [4] J. H. Fernandes, F. Sganzerla, J. G. Tannuri. D. B. Galiano. Weide Sato. T. Nakai. M. Massuda. "500 kV Compact Line of Eletronorte Brazil-Conception. Electrical and Mechanical Design," CIGRE Session 1990, Paper 22-304.
- [5] Miguel O. B. Melo, Vilma Andrade, V. Duarte. A. Pessoa, C. M. Tahan, D. O. C. Brasil. Weide Sato. "Estudos de Viabilidade da Aplicação de Torres Compactas de 500 kV no Sistema CHESF." *XII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Recife, 1993.
- [6] J. H. Fernandes. J. G. Tannuri. N. Kaba. Weide Sato, J. Arimori. "Eletronorte Brazil. 500 kV and 230 kV Compact Lines Design and Electric Aspects." *Leningrad Symposium on Compact Overhead Lines*, CIGRE. 1991.
- [7] J. H. Fernandes. F. Sganzerla. J. G. Tannuri. D. B. Galiano. Weide Sato. T. Nakai. M. Massuda. "Torre Compacta de 500kV Experiência da Eletronorte." *XII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Recife. 1993
- [8] Miguel O. B. C. Melo. A. Pessoa. Vinicius Queiroga, Vilma Andrade. C. Tahan. Dalton O. Brasil. Weide Sato. "Viability Studies of Application of Compact 500 kV Transmission Lines on the CHESF (BRAZIL) Systems." *Leningrad Symposium on Compact Overhead Lines*. CIGRE. 1991.
- [9] G. N. Alexandrov. "Novos Meios de Transmissão de Energia Elétrica em Sistemas de Potência." Ed. Universidade Leningrado. 1987

- [10] G. N. Alexandrov. "Scientific and Engineering Principles of Creating Compact Lines with Increased Natural Capacity." *Leningrad Symposium on Compact Overhead Lines*. CIGRE. 1991
- [11] Oswaldo Régis. Marcelo Maia. Antônio Pessoa. "Linhas Não Convencionais de Potência Natural Elevada (LPNE): Estudo Paramétrico para utilização em 69 kV e 138 kV." *XII SNPTEE Seminário Nacional de Produção Transmissãde Energia Elétrica*. Recife. 1993
- [12] Oswaldo Régis. Marcelo A. Maia. Antônio Pessoa. "Linhas Não Convencionais de Potência Natural Elevada. Um Exercício de Prospecção em 69 kV e 138 kV." *V ERLAC, Encontro Regional Latino Americano da CIGRE*, Foz de Iguaçu. 1993
- [13] K. V Boos et alli. "Experience Gained in the Operation of Multiple Circuit High Voltage Overhead Lines of Compact Design," CIGRE 22 12. Paris. 1986.
- [14] N Souchereau. "Validation of a Chainette Tower for a 735 kV Line." CIGRE 22 04, 1978
- [15] J Giolund et alli. "The T Tower Design for 420 kV Lines. Swedish State Power Board." CIGRE-Draft Studies Committee 22 88(WG 8) 13, Paris.
- [16] C. Gary et alli, "400kV Line of Reduced Size," CIGRE 22 12, Paris, 1984.
- [17] P. C. Esmeraldo et alli. "Uma Proposta Alternativa para as Linhas de Transmissão de Itaipu em 765 kV CA : A Torre Trapézio." *VI SNPTEE Seminário Nacional de Produção Transmissão de Energia Elétrica*, São Paulo. 1986
- [18] P. C. Esmeraldo et alli. "Alternativa de Linhas de Transmissão não Convencionais no Sistema de Transmissão de 500 kV do Alto Tocantins-Parte II Estudos Elétricos." *XII SNPTEE Seminário Nacional de Produção Transmissão de Energia Elétrica*. Recife. 1993
- [19] "LT Compacta 500 kV da CHESF, "Estudos para Determinação das Características da torre. Estudos da Segunda Fase." Relatório CHESF-DES-RT 07/03/09/93-Revisão 01, Set 1994
- [20] A. Clerici. M. Landonio, L. Paris, "EHV Compact Lines-A New Solution." *Leningrad Symposium on Compact Overhead Lines*, CIGRE. 1991
- [21] Duílio M Leite. *Proteção contra Descargas Atmosféricas* vol I. São Paulo, Oficina de Mydia Ed. , 1994
- [22] Geraldo Kindermann. *Descargas Atmosféricas*. Porto Alegre. Sagra DC-Luzzato Ed.. 1992.
- [23] Duílio M Leite. *Curso de Proteção contra Descargas Atmosféricas*, São Paulo.

- [25] Themag Engenharia, *Curso de Coordenação de Isolamentos*, Recife. 1980
- [26] Electric Power Research Institute. *Transmission Line Reference Book 115-138 kV Compact Line Design*, 1978.
- [27] Electric Power Research Institute (EPRI), *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, Second Edition. 1982.
- [28] G. W. Brown, E. R. Whitehead, Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding II, *IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems*, May 1969.
- [29] D. E. Hedman, *Teoria das Linhas de Transmissão*, Santa Maria, Ed. UFSM, 1983.
- [30] Sreeramulu R Naidu, *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, Ed. Grafset. 1985.
- [31] Allan Greenwood, *Electrical Transients in Power System*, Wiley Interscience, 1971.
- [32] M. Darveniza, M. A. Sargent, G. J. Limbourn, L. Ah Choy, R. O. Caldwell, J. R. Currie, B. C. Holcombe, R. H. Stillman, R. Frowd, "Modelling for Lightning Performance Calculations," *IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems*, Vol. PAS-98, no.6 Nov./Dec, 1979, pp.1900-1908.
- [33] Antônio Varejão; *Sobretensões em Cadeias de Isoladores Frente a Descargas Atmosféricas : Um Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo e do Parâmetro Zt*, Tese de Mestrado, Unicamp, São Paulo, 1989.
- [34] Ary D'Ajuz et alli, *Transitórios Eletromagnéticos e Coordenação de Isolamentos- Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*, Editora Universitária, UFFluminense, 1987.
- [35] A. Carvalho, L. Cherchiglia, J. Diniz. "Pesquisa de Descargas Atmosféricas em Minas Gerais. Principais Parâmetros Aplicáveis a Engenharia," *XIII SNPTES Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Camboriu, 1995.
- [36] F. de la Rosa, A. Galván, R. Velazquez. "Evaluation of Surge Arresters Protection of Electric Power Lines in Mexico." *Cigré International Workshop on Line Surge Arresters and Lightning*, Rio , 1996.

- [37] Silvério Visacro , Amilton Soares. “Representação Simplificada da Impedância de Pé de Torre de Linhas de Transmissão na Avaliação de Transitórios Associados a Descargas Atmosféricas.” *XIII SNTPEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Camboriu. 1995
- [38] Nelson Henrique Costa Santiago . “Atenuação de Surtos em Linhas de Transmissão Devido ao Efeito **Corona**”, Tese de Doutorado. **UFRJ**. Rio de Janeiro. 1987

ANEXOS

7.1. ANEXO 1-EMTP(ATP)- ONDAS VIAJANTES

```

BEGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
SCLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN. UNIT=4 FILE=EMTP37 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15.0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 37 = TORRE AUTOPORTANTE 2 CPRAIO
C QUEDA NA TORRE
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 3.5 OHM E XL= 0004 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 1 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 500 OHMMETRO
C
c
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345 0
T7 345 0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 20.0
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 3 5
T2GRND 3.5
T3GRND 3 5
T4GRND 3.5
T5GRND 3.5
T6GRND 3.5
T7GRND 3.5
T1GRND 0004
T2GRND 0004
T3GRND 0004
T4GRND 0004
T5GRND 0004
T6GRND 0004
T7GRND 0004
c
C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
C TORRE 1
C
-1T1 T1-GND 0. 176. 3.0E08 31 00 1 2
C TORRE 2

```

-1T2 T2-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1 c
C
C TORRE 2
C
-1T3 T3-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1 2
C
C TORRE 4
C
-1T4 T4-GND 0 176 3 0E08 31 00 1 2
C
C TORRE 5
C
-1T5 T5-GND 0. 176. 3.0E08 31 00 1 2
C
C TORRE 6
C
-1T6 T6-GND 0 176 3.0E08 31 00 1 2
C
C TORRE 7
C
-1T7 T7-GND 0 176. 3.0E08 31 00 1 2
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE
C
-1T1 T2 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2
C
-1T2 T3 0. 345. 3.0E08 500 0 1 2
C
-1T3 T4 0. 345 3.0E08 500.0 1 2
C
-1T4 T5 0. 345 3 0E08 500.0 1
C
-1T5 re 0. 345. 3 0E08 500.0 1 2
C
-1T6 T7 0. 345 3 0E08 500.0 1 2
C

c

C CARTOES DE FONTES

C

C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
13T4 -1 1 1 0E-6 0.5 50.E-6 0

C

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C

C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
T1 T2 T5 T4 T4-GND

C

C DOIS CARTOES EM BRANCO NO FINAL DO CASO

C

```

BEGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
SCLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN. UNIT=4 FILE=EMTP38.PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15 0E-6 60 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRECTA
C CASO 38 = TORRE AUTOPORTANTE 2 CPRAIO
C QUEDA NA TORRE
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 3.5 OHM E XL= 0004 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRETE DE ONDA = 3 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 500 OHMMETRO
C
c
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345 0
T7 345.0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 200
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 3 5
T2GRND 3 5
T3GRND 3.5
T4GRND 3 5
T5GRND 3 5
T6GRND 3 5
T7GRND 3 5
T1GRND 0004
T2GRND 0004
T3GRND 0004
T4GRND 0004
T5GRND 0004
T6GRND 0004
T7GRND 0004
c
C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
C TORRE 1
C
-1T1 T1-GND 0 176 3 0E08 31 00 1 2

```

C TORRE 2

-1T2 T2-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1 2

C

C TORRE 3

-1T3 T3-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1 2

C

C TORRE 4

C

-1T4 T4-GND 0. 176. 3.0E08 31 00 1 2

C TORRE 5

C

-1T5 T5-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1 2

C

C TORRE 6

C

-1T6 T6-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1 2

C

C TORRE 7

C

-1T7 T7-GND 0. 176 3.0E08 31.00 1 2

C

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C

-1T1 T2 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2

C

-1T2 T3 0. 345. 3 0E08 500.0 1 2

C

-1T3 T4 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2

C

-1T4 T5 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2

C

-1T5 T6 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2

C

-1T6 T7 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2

C

e

C CARTOES DE FONTES

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

13T4 -1 1 3.0E-6 0.5 50.E-6 0.

C

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1 T2 T5 T4 T4-GND

C

C DOIS CARTOES EM BRANCO NO FINAL DO CASO

C

```

BEGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
SCLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN. UNIT=4 FILE=EMTP39 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
* 020E-8 15 0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRECTA
C
C CASO 39 = TORRE AUTOPORTANTE 2 CPRAIO
C QUEDA NA TORRE
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 3 5 OHM E XL= 0004 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 5 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 500 OHMMETRO
C
c
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345 0
T7 345.0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 20.0
T7-GNDT7GRND 20.0

T1GRND 3.5
T2GRND 2 5
T3GRND 3.5
T4GRND 3 5
T5GRND 3 5
T6GRND 3 5
T7GRND 3 5

T1GRND 0004
T2GRND 0004
T3GRND 0004
T4GRND 0004
T5GRND 0004
T6GRND 0004
T7GRND 0004

c
C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
C TORRE 1
C

```

C TORRE 2
 C
 -1T2 T2-GND 0 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 3
 C
 -1T3 T3-GND 0 176 3 0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 4
 C
 -1T4 T4-GND 0 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 5
 C
 -1T5 T5-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1
 C
 C TORRE 6
 C
 -1T6 T6-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1
 C
 C TORRE 7
 C
 -1T7 T7-GND 0. 108. 3 0E08 31.00 1
 C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
 C
 -1T1 T2 0. 345. 3 0E08 500 0 1
 C
 -1T2 T3 0. 345. 3.0E08 500.0 1
 C
 -1T3 T4 0. 345. 3.0E08 500.0 1
 C
 -1T4 T5 0. 345 3.0E08 500.0 1
 C
 -1T5 T6 0. 345 3.0E08 500.0 1
 C
 -1T6 T7 0. 345 3.0E08 500.0 1
 C

 C
 C CARTOES DE FONTES
 C
 C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 13T4 -1 1 5.0E-6 0.5 50.E-6 0

 C
 C NOS DAS TENSOES DE SAIDA
 C
 C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 T1 T2 T5 T4 T4-GND

 C
 C DOIS CARTOES EM BRANCO NO FINAL DO CASO
 C

```

BEGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
SCLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN. UNIT=4 FILE=EMTP43.PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1.020E-8 15 0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
c
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 43 = TORRE AUTOPORTANTE 2 CPRAIO
C QUEDA NA TORRE
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 57 1 OHM E XL= 0224 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRETE DE ONDA = 1 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO =1500 OHMMETRO
C
c
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345 0
T7 345.0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 20.0
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 57.1
T2GRND 57.1
T3GRND 57 1
T4GRND 57.1
T5GRND 57 1
T6GRND 57.1
T7GRND 57 1
T1GRND 0224
T2GRND 0224
T3GRND 0224
T4GRND 0224
T5GRND 0224
T6GRND 0224
T7GRND 0224
c
C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C
C
C TORRE 1

```

```

-1T1  T1-GND      0 176 3.0E08 31 00 1
C
C TORRE 2
C
-1T2  T2-GND      0. 176 3 0E08 31 00 1
C
C TORRE 3

-1T3  T3-GND      0. 176 3.0E08 31 00 1
C
C TORRE 4
C
-1T4  T4-GND      0 176 3 0E08 31 00 1
C
C TORRE 5
C
-1T5  T5-GND      0. 176 3.0E08 31 00 1
C
C TORRE 6
C
-1T6  T6-GND      0 176. 3.0E08 31.00 1
C
C TORRE 7
C
-1T7  T7-GND      0. 176 3.0E08 31.00 1
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C
-1T1  T2          0. 345. 3.0E08 500.0 1          2
C
-1T2  T3          0. 345 3.0E08 500.0 1
C
-1T3  T4          0. 345 3.0E08 500.0 1
C
-1T4  T5          0. 345. 3.0E08 500.0 1
C
-1T5  T6          0. 345. 3.0E08 500.0 1
C
-1T6  77          0. 345 3.0E08 500.0 1

```

C CARTOES DE FONTES

```

C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
13T4 -1 1 1 0E-6 0 5 50.E-6 0.

```

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

```

C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
T1 T2 T5 T4 T4-GND

```

```

C
C DOIS CARTOES EM BRANCO NO FINAL DO CASO
C

```

```

BEGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
SCLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN. UNIT=4 FILE=EMTP44 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15.0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 44 = TORRE AUTOPORTANTE 2 CPRAIO
C QUEDA NA TORRE
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 57 1 OHM E XL= 0224 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 3 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO =1500 OHMMETRO
C
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345.0
T7 345.0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 200
T4-GNDT4GRND 200
T5-GNDT5GRND 20 0
T6-GNDT6GRND 20.0
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 57.1
T2GRND 57.1
T3GRND 57.1
T4GRND 57.1
T5GRND 57.1
T6GRND 57.1
T7GRND 57 1
T1GRND 0224
T2GRND 0224
T3GRND 0224
T4GRND 0224
T5GRND 0224
T6GRND 0224
T7GRND 0224
c
C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C

```

C TORRE 1
 C
 -1T1 T1-GND 0. 176. 3.0E08 31.00 1
 C
 C TORRE 2
 C
 -1T2 T2-GND 0 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 3
 C
 -1T3 T3-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 4
 C
 -1T4 T4-GND 0. 176 3.0E08 31.00 1
 C
 C TORRE 5
 C
 -1T5 T5-GND 0 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 6
 C
 -1T6 T6-GND 0. 176 3.0E08 31.00 1
 C
 C TORRE 7
 C
 -1T7 T7-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1
 C
 C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
 C
 -1T1 T2 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2
 C
 -1T2 T3 0. 345 3.0E08 500.0 1 2
 C
 -1T3 T4 0. 345 3.0E08 500.0 1 2
 C
 -1T4 T5 0. 345. 3.0E08 500.0 1
 C
 -1T5 T6 0. 345 3.0E08 500.0 1 2
 C
 -1T6 T7 0. 345 3.0E08 500.0 1 2
 C

 C CARTOES DE FONTES
 C
 C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 13T4 -1 1 3.0E-6 0 5 50.E-6 0.

 C NOS DAS TENSOES DE SAIDA
 C
 C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 T1 T2 T5 T4 T4-GND

 C
 C DOIS CARTOES EM BRANCO NO FINAL DO CASO

```

BEGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
$OPEN, UNIT=4 FILE=EMTP45 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15.0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 45 = TORRE AUTOPORTANTE 2 CPRAIO
C QUEDA NA TORRE
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 57 1 OHM E XL= 0224 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 5 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO =1500 OHMMETRO
C
C
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 3450
T7 345.0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 200
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 20 0
T6-GNDT6GRND 200
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 57 1
T2GRND 57 1
T3GRND 57 1
T4GRND 57 1
T5GRND 57 1
T6GRND 57 1
T7GRND 57 1
T1GRND 0224
T2GRND 0224
T3GRND 0224
T4GRND 0224
T5GRND 0224
T6GRND 0224
T7GRND 0224
C
C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

```

C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C

C TORRE 1

-1T1 T1-GND 0 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 2

C

-1T2 T2-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 3

C

-1T3 T3-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 4

C

-1T4 T4-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 5

C

-1T5 T5-GND 0. 176. 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 6

C

-1T6 T6-GND 0. 176. 3 0E08 31 00 1

C

C TORRE 7

C

-1T7 T7-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1

C

C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA

C

-1T1 T2 0. 345 3 0E08 500 0 1 2

C

-1T2 T3 0 345 3 0E08 500.0 1

C

-1T3 T4 0 345 3 0E08 500 0 1

C

-1T4 T5 0. 345 3 0E08 500.0 1

C

-1T5 T6 0 345 3 0E08 500.0 1

C

-1T6 T7 0 345 3 0E08 500 0 1

C

C CARTOES DE FONTES

C

C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

13T4 -1 1 5.0E-6 0 5 50.E-6 0

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C

C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

T1 T2 T5 T4 T4-GND

C DOIS CARTOES EM BRANCO NO FINAL DO CASO

C

```

BEGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
SCLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN. UNIT=4 FILE=EMTP40 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15 0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 40 = TORRE AUTOPORTANTE ( 2 C P RAIOS)
C QUEDA NO MEIO DO VAO
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 3.5 OHM E XL= 0004 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 1 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 500 OHMMETRO
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345 0
T7 3450
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1-GNDT1GRND 20 0
T2-GNDT2GRND 20.0
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 200
T6-GNDT6GRND 20 0
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 3 5
T2GRND 3.5
T3GRND 3.5
T4GRND 3 5
T5GRND 3.5
T6GRND 3.5
T7GRND 3.5
T1GRND 0004
T2GRND 0004
T3GRND 0004
T4GRND 0004
T5GRND 0004
T6GRND 0004
T7GRND 0004
C
C CARTOES DE RAMOS - PARAMETROS DISTRIBUIDOS
C
C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE DE PROPAGACAO/DISTANCIA
C

```

C TORRE 1
 C
 -1T1 T1-GND 0 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 2
 C
 -1T2 T2-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 2
 C
 -1T3 T3-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 4
 C
 -1T4 T4-GND 0 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 5
 C
 -1T5 T5-GND 0. 176 3 0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 6
 C
 -1T6 T6-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C TORRE 7
 C
 -1T7 T7-GND 0. 176 3.0E08 31 00 1
 C
 C REPRESENTACAO DAS TORRES - ZSURTO/VELOCIDADE
 C
 -1T1 T2 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2
 C
 -1T2 T3 0. 345. 3 0E08 500.0 1 2
 C
 -1T3 T4 0. 345. 3.0E08 500.0 1 2
 C
 -1T4 T5 0. 557. 3 0E08 500.0 1 2
 C
 -1T4 M4 0. 557. 3.0E08 250.0 1 2
 C
 -1M4 T5 0. 557. 3 0E08 250.0 1 2
 C
 -1T5 T6 0. 345 3 0E08 500.0 1 2
 C
 -1T6 T7 0 345. 3 0E08 500 0 1 2
 C

C CARTOES DE FONTES

C
 C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 13M4 -1 1 1 0E-6 0.5 50.E-6 0.

C NOS DAS TENSOES DE SAIDA

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 T1 T2 M4 T4 T4-GND

C

```

3EGIN NEW DATA CASE
DISK PLOT DATA
SCLOSE. UNIT=4 STATUS=DELETE
SOPEN UNIT=4 FILE=EMTP41 PL4 FORM=FORMATTED
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 020E-8 15 0E-6 60. 0
40000 1 1 1 1 1 1 2
C
C ESTUDO DE DESCARGA ATMOSFERICA INDIRETA
C
C CASO 41 = TORRE AUTOPORTANTE ( 2 C P RAIOS)
C QUEDA NO MEIO DO VAO
C TERRENO = PLANO
C ATERRAMENTO DO PE DA TORRE = R= 3.5 OHM E XL= 0004 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO DA TORRE = 176 OHM
C IMPEDANCIA DE SURTO EQUIVALENTE DO CABO PARA-RAIOS = 345 OHM
C FRENTE DE ONDA = 3 MICROSEC
C RESISTIVIDADE DO SOLO = 500 OHMMETRO
C
c
C PARAMETROS CONCENTRADOS
C
C TERMINACAO DOS CABOS PARA-RAIOS PELA SUA IMPEDANCIA DE SURTO
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
T1 345.0
T7 345.0
C
C ATERRAMENTO DO PE DE TORRE - MODELO BEWLEY
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
71-GNDT1GRND 20.0
T2-GNDT2GRND 20 0
T3-GNDT3GRND 20.0
T4-GNDT4GRND 20.0
T5-GNDT5GRND 20.0
T6-GNDT6GRND 20.0
T7-GNDT7GRND 20.0
T1GRND 3 5
T2GRND 3 5
T3GRND 3.5
T4GRND 3.5
T5GRND 3 5
T6GRND 3 5
T7GRND 3.5
T1GRND 0004
T2GRND 0004
T3GRND 0004
T4GRND 0004
T5GRND 0004
T6GRND 0004
T7GRND 0004
c

```