



Rádio Interferência Proveniente de Linhas de Alta Tensão

RICARDO MICHELETTO LEÃO



***RÁDIO INTERFERÊNCIA PROVENIENTE DE
LINHAS DE ALTA TENSÃO***



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Chanceler:

Dom Dadeus Grings

Reitor:

Joaquim Clotet

Vice-Reitor:

Evilázio Teixeira

Conselho Editorial:

Alice Therezinha Campos Moreira

Ana Maria Tramunt Ibaños

Antônio Carlos Hohlfeldt

Draiton Gonzaga de Souza

Francisco Ricardo Rüdiger

Gilberto Keller de Andrade

Jaderson Costa da Costa

Jerônimo Carlos Santos Braga

Jorge Campos da Costa

Jorge Luis Nicolas Audy (Presidente)

José Antônio Poli de Figueiredo

Lauro Kopper Filho

Maria Eunice Moreira

Maria Helena Menna B. Abrahão

Maria Waleska Cruz

Ney Laert Vilar Calazans

René Ernaini Gertz

Ricardo Timm de Souza

Ruth Maria Chittó Gauer

EDIPUCRS:

Jerônimo Carlos Santos Braga – Diretor

Jorge Campos da Costa – Editor-chefe

RICARDO MICHELETTO LEÃO

**RÁDIO INTERFERÊNCIA PROVENIENTE DE
LINHAS DE ALTA TENSÃO**



2008

© EDIPUCRS, 2008

Capa: Vinícius de Almeida Xavier

Diagramação: Gabriela Viale Pereira e Josianni dos Santos Nunes

Revisão Lingüística: Daniela Origem

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L437r Leão, Ricardo Micheletto.

Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão
[recurso eletrônico] / Ricardo Micheletto Leão. – Porto Alegre:
EDIPUCRS, 2008.

146 p.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader

Modo de Acesso: World Wide Web:

<<http://www.pucrs.br/orgaos/edipucrs/>>

ISBN 978-85-7430-779-4 (on-line)

1. Engenharia Elétrica. 2. Rádio (Engenharia) – Interferências.
3. Linhas de Transmissão. 4. Interferências Eletromagnéticas. 5.
Energia Elétrica – Alta Tensão. I. Título.

CDD 621.31

Ficha Catalográfica elaborada pelo
Setor de Tratamento da Informação da BC-PUCRS



Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 33

Caixa Postal 1429

90619-900 Porto Alegre, RS - BRASIL

Fone/Fax: (51) 3320-3523

E-mail: edipucrs@pucrs.br

<http://www.pucrs.br/edipucrs>

In memoriam:

Hélio Selistre Leão

...não desistas de teus objetivos, preserve a paz de espírito e a nobreza do pensamento.

Guardei esses ensinamentos, envolvidos de estímulos e da sinceridade do teu afeto.

Obrigado Pai.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer à minha esposa, **Angela**, pelo grande incentivo, pela compreensão e paciência das intermináveis horas na elaboração deste trabalho. Aos meus filhos **Alexandre** e **Letícia**, pelo apoio, pelo estímulo e porque, sem dúvida, são pessoas de um grande significado na minha vida.

Gostaria de expressar a minha gratidão ao meu companheiro e mestre **Virgilio Vescovi Filho**, pelo incentivo e pelo entusiasmo, sendo o principal incentivador no desenvolvimento deste estudo. Ao meu prezado orientador **Prof. Dr. Guilherme Dias**, pela presteza, pela competência e pela confiança no meu trabalho, bem como pelas oportunidades apresentadas no desenvolvimento deste estudo. Ao **Prof. Dr. Marcos Telló** pela sua grande ajuda na elaboração deste trabalho. Ao **Prof. Dr. Vicente Mariano Canalli** pela compreensão e pelo apoio no transcorrer de meu curso de mestrado, principalmente no desenvolvimento de sua disciplina. A todos os **amigos** e companheiros de mestrado que de alguma forma estiveram envolvidos e me apoiaram no desdobramento deste estudo. A todos gostaria de agradecer e dividir os méritos desta conquista que sem dúvida nenhuma foi para mim um grande desafio. Muito obrigado.

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC - Corrente Alternada
ACEC - Advisory Committee on Electromagnetic Compatibility (Comitê Consultivo de Compatibilidade Eletromagnética)
AGC - Controle Automático de Ganho
AM - Modulação em Amplitude
ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações
ANSI - American National Standards Institute
AVG - Valor Médio
C - Capacitor
CC - Corrente Contínua
CCITT - Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique
CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica
CEM - Compatibilidade Eletromagnética
CEN - Comité Européen de Normalisation
CENELEC - Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (Comitê Europeu de Padronização Eletrotécnica)
CIGRE - International Conference on Large High Voltage Electric Systems (Conselho Internacional para Sistemas Elétricos de Alta Tensão)
CISPR - Comité International Special des Perturbation Radioeetriques (Comitê Especial Internacional para Rádio Interferência)
COPANT - Pan American Standards Commission
DER - Direction des Études et Recherches
E - Compo Elétrico
EDF - Electricité de France
EEC - European Economic Community
EHF - Extremely High Frequency
Ek - Intensidade de Campo Elétrico Total de Rádio Interferência
ek - Intensidade de Campo Elétrico Pontual de Rádio Interferência
ELF - Extremely Low Frequency
Em - Intensidade de Campo Elétrico Final de Rádio Interferência

EMC - Eletromagnetic Compatibility
EMI - Interferência Eletromagnética
EPRI - Electric Power Research Institute
f - Frequência
FCC - Federal Communication Commission
FI - Frequência Intermediária
FM - Frequência Modulada
H - Campo magnético
HF - High Frequency
IEC - International Electrotechnical Commission
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF - Frequência Intermediária
ISM - Industrial, Scientific and Medical
ISSO - International Organization for Standardization (Organização Internacional de Padronização)
ITU - International Telecommunication Union (União Internacional de Telecomunicações)
LD - Linhas de Distribuição
LF - Low Frequency
L - Indutância
LOG - Logaritmo
LT - Linha de Transmissão
MATHCAD - Mathematic Computer Aided Design
MF - Medium Frequency
NBR - Normas Brasileiras
OIML - International Organization for Legal Metrology (Organização Internacional de Metrologia Legal)
PCS - Personal Communication Services
PEA - Valor de pico
QP - Valor de quase-pico
R - Resistência
Re - Resistência Equivalente
RA - Ruído Acústico
RC - Circuito com resistor e capacitor

RF - Radiofrequência
RFI - Radio Frequency Interference
RI - Rádio Interferência
RMS - Valor Eficaz
SEPA - Subestação Porto Alegre
SHF - Super High Frequency
SNR - Signal Noise Ratio (Relação Sinal/Ruído)
TC - Technical Committee (Comitê Técnico)
TV - Televisão
TVI - Televisão Interferência
UHF -Ultra High Frequency
VCCI - Voluntary Control Council for Interference
VDE - Verband Der Elektrotechnik
VHF - Very High Frequency
VLF - Very Low Frequency
W - Largura
Y - Admitância
Z - Impedância
Zo - Impedância Característica

LISTA DE SÍMBOLOS

α - Constante de Atenuação
 β - Constante de Fase
 λ - Constante de Propagação
 Γ - Gerador Corona
 π - número pi (3,141593)
 Ω - Ohms
 ϵ - Permissividade no Espaço Livre
 ρ - Resistividade do Solo
 δ - Profundidade de Penetração no Solo
 μV - Microvolts
A - Amper
C - Capacitância
dB - Decibel
EHZ - Extrahertz
GHz - Gigahertz
Hz - Hertz
kHz - Quilohertz
kV - Quilovolts
l - Comprimento
L - Indutância
m - Modal
MHz - Megahertz
mV - Milivolts
PHz - Picohertz
THz - Terahertz
t -Tempo
V - Volts

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 14 |
| 1 ORGANIZAÇÃO DA IEC | 17 |
| 2 NORMAS NACIONAIS | 18 |
| 3 NORMAS INTERNACIONAIS | 18 |
| 4 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA | 21 |
| 5 ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS | 23 |
| 6 AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO | 26 |
| 7 CAMPO ELETROMAGNÉTICO NO ESPAÇO | 26 |
| 8 RÁDIO INTERFERÊNCIA | 26 |
| 8.1 <i>RUÍDOS PROVOCADOS POR RÁDIO INTERFERÊNCIA</i> | 28 |
| 8.1.1 Ruídos causados por centelhamento | 31 |
| 8.1.2 Ruídos causados por corona | 32 |
| 9 MEDIÇÃO DO RUÍDO DE RÁDIO | 43 |
| 9.1 <i>MEDIDORES DE RUÍDO DE RÁDIO</i> | 43 |
| 9.2 <i>SISTEMA DE ANTENAS</i> | 47 |
| 9.3 <i>MEDIÇÃO DO RUÍDO DA LINHA DE TRANSMISSÃO</i> | 47 |
| 9.4 <i>NÍVEL DE INTERFERÊNCIA E QUALIDADE DE RECEPÇÃO</i> | 49 |
| 10 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO DA LINHA DE TRANSMISSÃO | 50 |
| 10.1 <i>CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO DE RÁDIO DA LINHA DE TRANSMISSÃO</i> | 50 |
| 10.2 <i>GEOMETRIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO</i> | 53 |

| | |
|---|-----------|
| 10.3 CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DOS CONDUTORES..... | 55 |
| 10.4 CRITÉRIOS DE RUÍDOS TOLERÁVEIS | 56 |
| 10.4.1 Relação Sinal/Ruído..... | 57 |
| 10.4.2 Tolerância da radiofrequência | 58 |
| | |
| 11 METODOLOGIA APLICADA | 60 |
| 11.1 MODELO ANALÍTICO PARA CÁLCULO DA RÁDIO INTERFERÊNCIA..... | 62 |
| 11.1.1 Geração da rádio interferência | 64 |
| 11.1.1.1 Função de geração da rádio interferência..... | 66 |
| 11.1.1.2 Condutor simples acima do solo..... | 66 |
| 11.1.1.3 Linhas de múltiplas fases | 70 |
| 11.1.1.4 Geração da rádio interferência para o caso de chuva forte..... | 78 |
| 11.1.1.5 Geração da rádio interferência para o caso de tempo bom..... | 81 |
| 11.1.2 Propagação da rádio interferência | 81 |
| 11.1.2.1 Constantes de atenuação..... | 81 |
| 11.1.2.2 Estatísticas da rádio interferência..... | 82 |
| 11.2 APLICAÇÃO DO CÁLCULO DA RÁDIO INTERFERÊNCIA | 84 |
| 11.2.1 Rádio interferência proveniente de uma linha de 230 kV trifásica | 85 |
| 11.2.1.1 Profundidade de penetração no solo..... | 86 |
| 11.2.1.2 Coeficientes de potencial de Maxwell..... | 86 |
| 11.2.1.3 Matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell..... | 87 |
| 11.2.1.4 Capacitâncias próprias e mútuas..... | 88 |
| 11.2.1.5 Impedâncias da linha de transmissão..... | 88 |
| 11.2.1.6 Cargas elétricas dos condutores | 91 |
| 11.2.1.7 Gradiente de superfície dos condutores | 93 |
| 11.2.1.8 Corrente de geração corona | 93 |
| 11.2.1.9 Corrente corona | 94 |
| 11.2.1.10 Tensão corona | 96 |
| 11.2.1.11 Matriz de transformação modal..... | 96 |
| 11.2.1.12 Constantes de propagação modal..... | 99 |
| 11.2.1.13 Transformada modal da tensão de geração corona | 102 |
| 11.2.1.14 Fatores de atenuação | 102 |
| 11.2.1.15 Campo elétrico da rádio interferência das três fases da linha de transmissão..... | 104 |

| | |
|--|------------|
| 11.2.1.16 Campo elétrico final da rádio interferência | 109 |
| 11.2.2 Rádio interferência proveniente de uma linha de 500 kV trifásica ... | 114 |
| 11.2.2.1 Campo elétrico final da rádio interferência | 115 |
| 12 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA | 121 |
| CONCLUSÃO..... | 131 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 134 |

INTRODUÇÃO

O presente estudo tem como objetivo desenvolver um método de cálculo para a rádio interferência provocada pelos campos eletromagnéticos presentes nas linhas de transmissão de alta tensão, de modo a preservar a qualidade do sinal recebido por equipamentos eletroeletrônicos e de comunicações utilizados nas imediações.

Com o crescimento das cidades, as subestações e as linhas de transmissão de alta tensão, que antes ficavam distantes dos centros populacionais, estão hoje muito próximas das edificações urbanas. Por outro lado, o desenvolvimento da indústria eletrônica e das comunicações provocou a presença de campos eletromagnéticos em todos os ambientes. Isto é, casas, edifícios, prédios comerciais e industriais estão sujeitos a irradiações eletromagnéticas provenientes das linhas de transmissão de alta tensão, quando construídos nas proximidades.

Por outro lado, devido ao crescimento da indústria eletrônica e das telecomunicações, muitos estudos estão sendo desenvolvidos para análise dos valores de campos eletromagnéticos originados pela rádio interferência e presentes em ambientes industriais, comerciais e residenciais.

As ondas eletromagnéticas provenientes de cargas elétricas aceleradas provocam a presença tanto de campos elétricos como de campos magnéticos. Estes campos são também conhecidos como radiações eletromagnéticas.

Os sistemas de alta tensão geram campos eletromagnéticos de baixa frequência, 60Hz, como também campos eletromagnéticos de alta frequência, a níveis de MHz, devido à existência, principalmente, do efeito corona nos cabos e equipamentos das linhas de alta tensão.

Todos estes fatores provocam não só problemas de segurança pessoal, como também problemas de interferência entre equipamentos: telefones que sintonizam rádios, celulares que alteram balanças eletrônicas, banco de dados alterados por pulsos de radar, etc, ocasionando uma quantidade enorme de interferências eletromagnéticas.

Este quadro de acontecimentos indica a necessidade de conhecimento dos níveis de radiação eletromagnética presentes nos ambientes públicos e privados.

A análise e a medição de campos eletromagnéticos gerados por equipamentos elétricos fazem parte da área de estudos conhecida como compatibilidade eletromagnética. Esta área vem sendo muito discutida nos grandes centros de pesquisas e universidades do mundo inteiro.

Devido a todos estes fatos, torna-se necessário apresentar uma metodologia que estabeleça medidas mínimas a serem seguidas na implantação de linhas de transmissão de alta tensão junto a centros urbanos, bem como estabelecer providências a serem adotadas na utilização de equipamentos eletrônicos próximos às linhas de transmissão e analisar os campos elétricos presentes nestas áreas.

Para o estudo dos campos elétricos é imprescindível estabelecer uma rotina de cálculos a ser seguida para que se possa obter valores essenciais para a tomada de decisão quanto ao tipo de geometria mais adequada da linha de transmissão a ser implantada, devido à presença da rádio interferência. Além disso, apontar recomendações a serem seguidas para utilização de equipamentos eletroeletrônicos utilizados nas imediações, de modo a garantir a qualidade do sinal de recepção destes equipamentos.

O desenvolvimento matemático empregado neste trabalho utiliza o ambiente do programa MATHCAD (Mathematic Computer Aided Design) com o propósito de obter valores de campo elétrico que venham contribuir para a análise final, de modo que o projetista possa avaliar a rádio interferência proveniente, principalmente, do efeito corona nas linhas de alta tensão.

A primeira parte deste estudo permite verificar a quantidade de fatores que de algum modo estão relacionados com a rádio interferência e são indiscutivelmente indispensáveis para um exame mais adequado do tipo de geometria da linha de transmissão a ser implantada perante valores de campo elétrico resultantes. Nesta etapa do trabalho já se percebe a complexidade do projeto em execução pelo grande número de variáveis que direta ou indiretamente influenciam ou estão relacionadas com as linhas de transmissão de alta tensão.

A segunda parte deste trabalho apresenta um método de cálculo matemático que mostra os valores de campo elétrico final na presença da rádio interferência de modo a permitir a análise do nível de interferência ou de ruído no sinal de recepção dos equipamentos eletrônicos nas imediações. Embora se observe a quantidade enorme de trabalhosas derivações matemáticas, este capítulo não tem como intuito fornecer um exaustivo desenvolvimento destes métodos.

A parte final do presente estudo estabelece conclusões de projeto e recomendações para o uso de equipamentos eletrônicos próximos às áreas das linhas de transmissão, correlacionando valores encontrados pela montagem de gráficos e valores recomendados pelas normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e normas internacionais: IEC (International Electrotechnical Commission), ANSI (American National Standards Institute), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique), VDE (Verband Der Elektrotechnik), VCCI (Voluntary Control Council for Interference) e CISPR (Comitê International Special des Perturbations Radioeletriques).

Importante salientar que esse trabalho descreve as providências que devem ser tomadas na implementação de linhas de transmissão de energia elétrica de forma a garantir a compatibilidade eletromagnética destes sistemas relacionados aos sistemas eletroeletrônicos e de comunicação nas imediações.

Com o desenvolvimento deste estudo é possível estabelecer um conjunto de informações para auxiliar ao projetista na escolha do tipo de linha de transmissão mais adequada a ser implantada junto aos centros urbanos.

A ênfase desta pesquisa é encontrar soluções práticas dos problemas que envolvem a geração, propagação e recepção dos sinais eletromagnéticos e ruídos.

Convém ressaltar que a presente pesquisa, por razões de delimitação de abordagem, não analisa a questão da rádio interferência provocada por outros equipamentos tais como: médicos; industriais e automotivos.

Ademais, convém ressaltar que o uso da metodologia desenvolvida neste trabalho está limitada a linhas de configurações verticais, horizontais e delta para qualquer tensão. Não é possível a aplicação a linhas em bifurcação, bem como

linhas transpostas. Para estes casos outras formulações matemáticas serão necessárias.

São inúmeros os sistemas de comunicação, incluindo radiotelescópios, instrumentos de aviação, transmissão de dados de telecomunicações, serviços públicos de comunicação como: polícia, ambulância e bombeiros e rádios amadores. Para estes casos os medidores de quase-pico utilizados para medir a RI, descritos neste trabalho, podem não ser aplicados devido aos efeitos pulsativos do ruído nas faixas de recepção em AM.

Uma ampla referência bibliográfica é fornecida com propósito de trazer ao conhecimento de todos uma quantidade melhor de informações sobre a matéria aqui apresentada.

1 ORGANIZAÇÃO DA IEC

A International Electrotechnical Commission (IEC) é um organismo mundial de normalização que prepara e publica padrões internacionais para a área elétrica, eletrônica e de tecnologia relacionada. É uma organização não-governamental internacional criada em 1906. No Brasil a IEC é representada pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

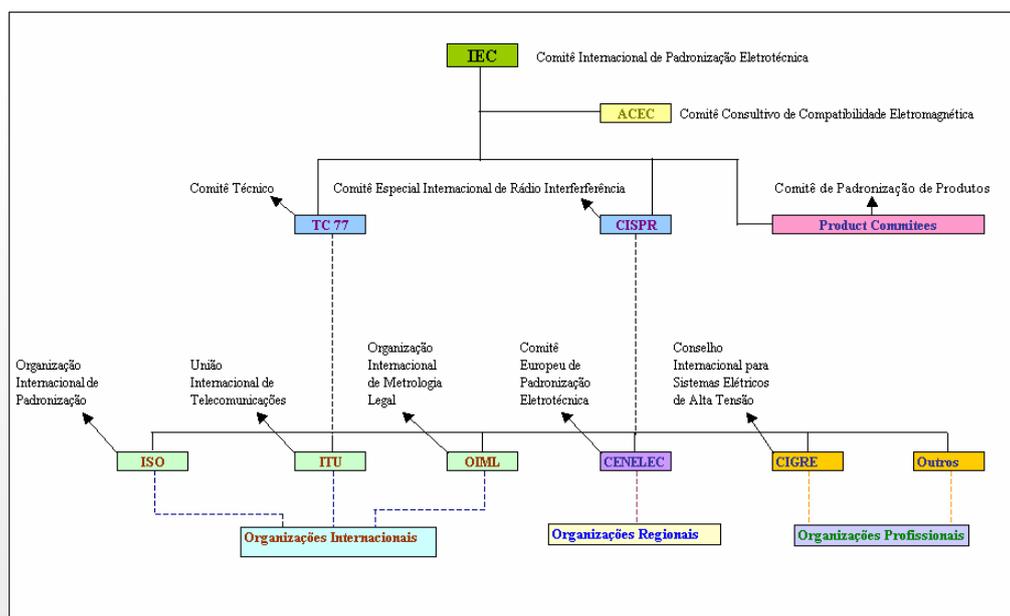


Figura 1.1 - Organização do Comitê Internacional de Padronização Eletrotécnica

2 NORMAS NACIONAIS

No Brasil o órgão responsável pela elaboração de normas sobre utilização de equipamentos eletroeletrônicos e de telecomunicações é a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

As normas nacionais que tratam dos sistemas da rádio interferência proveniente das linhas de alta tensão, objeto deste trabalho, estão relacionadas abaixo.

ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações): Resolução nº 237-Regulamento para Certificação de Equipamentos de Telecomunicações, Novembro 2000.

NBR 7876: Medição da Rádio Interferência na faixa de 0,15 a 30 MHz em linhas e equipamentos de alta tensão, 1983.

NBR 7875: Instrumentos de medição da rádio interferência na faixa de 0,15 a 30 MHz, 1983.

NBR 12304: Limites e métodos de medição da rádio perturbação em equipamentos de tecnologia da informação, 1992.

NBR-9890: Localização e remoção de focos de rádio interferência em linhas aéreas de alta tensão. Junho 1987.

3 NORMAS INTERNACIONAIS

As normas internacionais que regulam o uso de equipamentos eletroeletrônicos e de comunicações utilizados próximos a linhas de alta tensão e especificam métodos e recomendações a serem seguidos sobre a rádio interferência, objeto deste estudo, estão relacionadas abaixo.

IEC 437 - Radio interference test on high voltage insulators, 1973. Testes sobre rádio interferência em isoladores de alta tensão.

IEC 61.000-1-1: Eletromagnetic Compatibility (EMC) - Application and interpretation of fundamental definitions and terms, April 1992. Aplicação e interpretação de termos e definições consideradas básicas para o CEM.

IEC 61.000-6-3: 61000-6-3/PRAA: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 6 - 3: Generic Standards - Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments. Recomendações para emissão de equipamentos elétricos e eletrônicos utilizados em ambientes residenciais, comerciais e industriais de pequeno porte. Set 2001.

IEC/CISPR-13: Sound and television broadcast receivers and associated equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement. Especificações sobre limites e métodos de medida de equipamentos de som, televisores e receptores de rádio. Nov.2003.

IEC/CISPR-15: Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment. Nov. 1998. Limites e métodos de medida das características de rádio perturbação dos equipamentos de iluminação e similares.

IEC/CISPR-16: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antenna calibration test sites for 30 MHz to 1000 MHz .Out 1999. Métodos e especificações de equipamentos de medição de perturbações de rádio e imunidade, com testes para calibração de antenas de 30 a 1000 MHz.

CISPR-1: Specification for Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range 0.15 to 30 MHz. Genova, Suíça, Rev. 2003. Especificações para equipamentos de medida de rádio interferência na faixa de 0,15 a 30 MHz.

CISPR-2: Specification for Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range 25 to 300 MHz. Genova, Suíça, 1966. Especificações para equipamentos de medida de rádio interferência na faixa de 25 a 300 MHz.

ANSI C63.022: Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics of Information Technology Equipment. Out 2002. Limites e métodos de medida das características de distúrbios de rádio para equipamentos de tecnologia da informação.

VDE 0875-11: Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment - Radio disturbance characteristics; limits and methods of measurement (IEC/CISPR 11:1997, modified); German version EN 55011:1998. Limites e métodos de medidas das características de rádio interferência em equipamentos industriais, científicos e médicos.

VDE 0872-13: Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of broadcast receivers and associated equipment; German version EN 55013: Alemanha, 1999. Limites e métodos de medida das características de rádio interferência para receptores de rádio e equipamentos associados.

IEEE C-95. 1:1991 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz - Description. Especificações de níveis de segurança com respeito à exposição humana dos campos eletromagnéticos da rádio interferência, 3 kHz a 300GHz, USA, 1991.

IEC 62040/ED.1: Uninterruptible compatibility (EMC) requirements (IEC Document 22B/107/CD). Requerimentos para compatibilidade eletromagnética ininterrupta. Rev. Out. 1993.

IEEE 430-197: Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Lines. Procedimentos padrões para medidas de ruído de rádio proveniente de linhas aéreas. New York, USA, 1976.

ANSI C 63.2: Specifications for Radio - Noise and Field - Strength Meters 0.015 to 30 MHz. Especificações para ruídos de rádio e medidores de intensidade de campo da rádio interferência na faixa de 0.015 a 30 MHz. New York, USA, 1969.

ANSI C 63.3: Specifications for Radio - Noise and Field - Strength Meters 20 to 1000 MHz. Especificações para ruídos de rádio e medidores de intensidade de campo de RI na faixa de 20 a 1000 MHz. New York, USA, 1964.

BS EN 55011: Specification for limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment. British Standard/European Standard 15-Sep-1998. Especificações para limites e métodos de medida da rádio interferência de equipamentos industriais, científicos e médicos.

4 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

Por conceito, compatibilidade eletromagnética (CEM) vem a ser a capacidade de um dispositivo, unidade de equipamento ou sistema, funcionar satisfatoriamente no meio eletromagnético sem introduzir, ele próprio, perturbações eletromagnéticas intoleráveis no ambiente.

Uma configuração CEM pode ser assegurada com certa facilidade na instalação de um sistema eletrônico, desde que cada unidade de equipamento utilizado cumpra com as normas da compatibilidade eletromagnética, as quais definem não somente os aspectos de emissão, isto é, os equipamentos atuam como fontes de perturbação eletromagnéticas, como também de imunidade, isto é, os equipamentos não são afetados por perturbações eletromagnéticas no ambiente.

Muitos organismos de normalização, tanto nacionais como internacionais, têm elaborado especificações técnicas CEM em diferentes domínios, como por exemplo, CISPR¹ no âmbito do IEC². As normas CISPR/A (16-1, 16-2, 16-3, 16-4) referem-se à rádio interferências (RI). Todas respeitam o organismo internacional de normas, denominado Organização Internacional de Normalização (ISO)³.

¹ CISPR (Comitê Internacional Special des Perturbations Radioelectriques) possui a denominação americana de **International Special Committee on Radio Interference**.

² IEC (International Electrotechnical Commission) é uma organização padrão para todas as áreas da eletrotécnica.

³ ISO (International Organization for Standardization). ISO 9000 tem se tornado uma referência internacional para qualidade dos requerimentos de gestão na comercialização de produtos.

A Comissão Europeia⁴ tornou obrigatório desde janeiro de 1996 o cumprimento da diretiva 89/336/EEC (Diretiva Europeia sobre Compatibilidade Eletromagnética)⁵ para comercialização e ou utilização de equipamentos eletroeletrônicos. Esta diretiva constitui a mais ampla e moderna abordagem em vigor. As especificações técnicas definidas pelo CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique)⁶ no âmbito do CEN (Comité Européen de Normalisation) constituem a referência mundial para CEM.

A nível Pan-Americano, a norma do COPANT (Pan American Standard Commission) normaliza toda a comercialização de equipamentos eletroeletrônicos na região das Américas, envolvendo América do Norte, América do Sul, América Central e Caribe.

Os fenômenos eletromagnéticos para os quais a Diretiva CEM vem exigir um nível de proteção adequado foram identificados pelo IEC e passaram a ser adotados pelo CENELEC, e correspondem aos seguintes fenômenos:

- Fenômenos conduzidos de baixa frequência.
- Fenômenos de campos radiados de baixa frequência.
- Fenômenos conduzidos de alta frequência.
- Fenômenos de campos radiados de alta frequência.
- Fenômenos de descargas eletrostáticas.

De uma forma geral, nos domínios do CEM comercial são englobados todos os fenômenos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, na faixa de frequência de zero Hz até 400GHz, para avaliação do comportamento de equipamentos eletroeletrônicos, tanto no aspecto de emissão como de imunidade radiada e conduzida⁷.

⁴ Comissão Europeia (European Commission) é uma das instituições europeias que participa do processo de tomada de decisões da União. A Comissão Europeia foi criada para representar o interesse europeu comum a todos os Estados-Membros da União Europeia.

⁵ A Diretiva Europeia sobre Compatibilidade Eletromagnética também é denominada de Diretiva EMC.

⁶ CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) tem como missão preparar padrões eletrotécnicos que ajudam a desenvolver o Mercado Europeu e a Economia Europeia na área elétrica e eletrônica.

⁷ BARRETO, R.M.: **Influência de Linhas de Transmissão/Distribuição Em Sistemas Eletrônicos de Telecomunicações e de Automação**, Rio de Janeiro, 2004.

Desta forma, pode-se concluir que equipamentos eletrônicos que respeitam as normas CEM comerciais estão naturalmente protegidos contra as perturbações eletromagnéticas.

Outrossim, vale lembrar que para instalações específicas, como por exemplo em subestações elétricas, é de se esperar medidas de proteção complementares.

5 ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS

A faixa de frequência utilizada pelos diversos equipamentos, hoje em dia comercializados para comunicação, indústria, subestações, receptores de rádio, etc, se estende de zero Hz (corrente contínua) a mais de 10 PHz (raio x). A Figura 5.1 mostra o espectro eletromagnético de frequências.

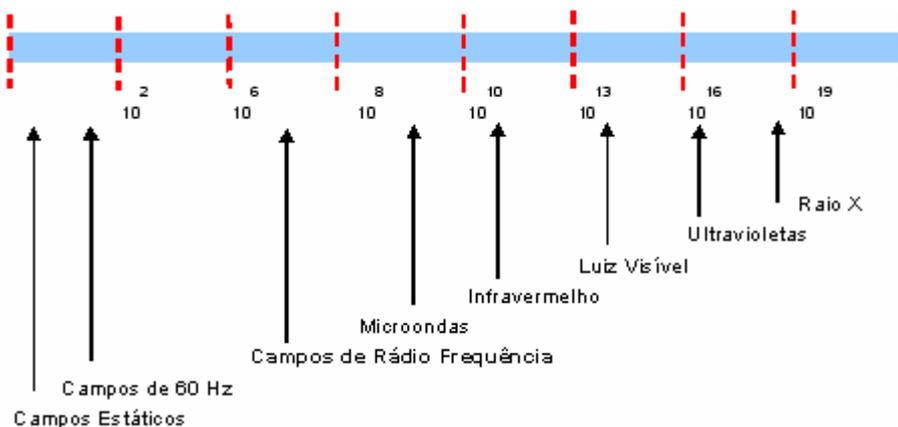


Figura 5.1 - Espectro eletromagnético de frequências

O instrumental disponível no mercado permite a medição de campos e de ondas eletromagnéticas na faixa de 5 Hz a 3GHz. Essa faixa cobre as principais tecnologias, eletroeletrônicas e de comunicação, presentes nos ambientes urbanos.

A faixa de frequência de rádio se estende de 3 kHz a 30.000 MHz.

Um guia adequado de utilização do espectro eletromagnético de frequências⁸ foi publicado pela IEEE e mostra os mais importantes aspectos de

⁸ IEEE, **Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines**. New York, NY.: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1976. Std. 430-197.

medida dos ruídos de rádio em linhas de transmissão na faixa de 15 kHz a 1 GHz.

A Figura 5.2 apresenta a faixa da radiofrequência utilizada na operação de rádios na faixa AM (modulação em amplitude) e na faixa FM (modulação em frequência), telefone sem fio e telefone celular, bem como as bandas destinadas à TV (televisão) em VHF e UHF, e ainda a faixa de frequência utilizada para os fornos de microondas.

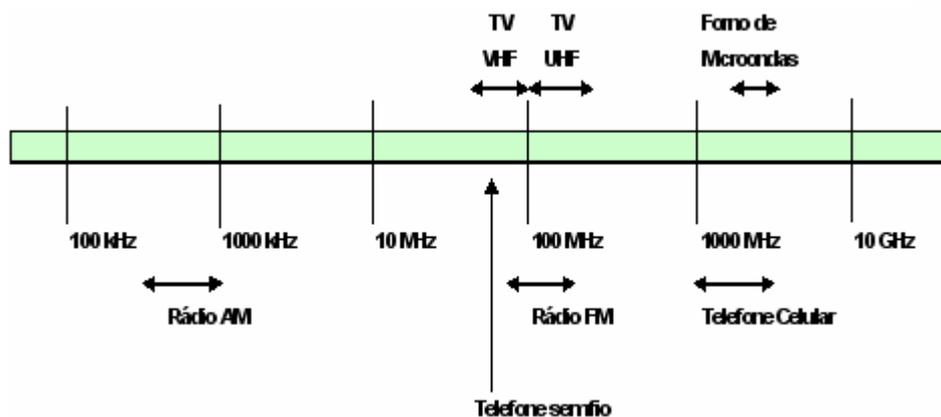


Figura 5.2 – Espectro eletromagnético da radiofrequência

Ondas de rádio é um termo arbitrariamente aplicado para as ondas eletromagnéticas na faixa de frequência de 0,001 a 10^{16} hertz.

Em termos de comprimento de onda, o limite mais baixo das ondas de rádio propagadas no espaço livre é de 3×10^{11} metros, sendo que o limite superior é de 3×10^{-8} metros.

A denominação das bandas de frequência normalmente utilizadas é apresentada na Tabela 5.1, bem como a faixa de frequência correspondente.

A luz visível está na faixa de frequências de 430 THz até 750 THz e vem a ser a luz perceptível pelos nossos olhos.

Segundo Dolukhnov⁹, é relevante notar que os limites do espectro de frequência das ondas de rádio são consideravelmente amplos. Do lado das baixas frequências, era costume fixar o limite da frequência de áudio em 10^3 hertz. A propósito, este é o limite para as frequências utilizadas por transmissores. Recentes pesquisas têm mostrado, entretanto, que alguns

⁹ Dolukhanov, M. **Propagation of Radio Waves**. Moscow, Mir Publishers. Moscou, 1971.,pp. 9-18

fenômenos naturais envolvem ondas de rádio com frequências abaixo de alguns milhares de um hertz. Tais frequências são, por exemplo, geradas por flutuações de fluxos solares de elétrons e prótons tal como eles penetram na atmosfera da terra.

Tabela 5.1 - Utilização do Espectro de Frequências

| Descrição da Banda de Frequência | Faixa de Frequência |
|--|----------------------------|
| Frequências Extremamente Baixas (ELF) | 0 até 3 kHz |
| Frequências Muito Baixas (VLF) | 3 até 30 kHz |
| Rádio Navegação Marítima | 9 até 540 kHz |
| Frequências Baixas (LF) | 30 até 300 kHz |
| Frequências Médias (MF) | 300 até 3000 kHz |
| Banda de Rádio Difusão em AM | 540 até 1630 kHz |
| Serviço de Informações para Viajantes | 1610 kHz |
| Frequências Altas (HF) | 3 até 30 MHz |
| Banda de Rádio Difusão de Ondas Curtas | 5.95 até 26.1 MHz |
| Frequências Muito Altas (VHF) | 30 até 300 MHz |
| Banda Baixa para TV (Banda 1) - Canais 2 - 6 | 54 até 88 MHz |
| Banda de Rádio Difusão em FM | 88 até 174 MHz |
| High Band: TV Band 2 - Canais 7 - 13 | 174 até 216 MHz |
| Super Banda (Rádio móvel, fixo e TV). | 216 até 600 MHz |
| Frequências Muito Altas (UHF) | 300 até 3000 MHz |
| Canais 14 - 70 | 470 até 806 MHz |
| L-banda | 500 até 1500 MHz |
| Serviços de Comunicação Pessoal (PCS) | 1850 até 1990 MHz |
| Dispositivos Não Licenciados de PCS | 1910 até 1930 MHz |
| Frequências Super Altas (SHF) (Microondas) | 3 até 30 GHz |
| C - banda | 3600 até 7025 MHz |
| X - banda | 7.25 até 8.4 GHz |
| Ku - banda | 10.7 até 14.5 GHz |
| Ka - banda | 17.3 até 31 GHz |
| Frequências Extremamente Altas (EHF) | 30.0 até 300 Ghz |
| Comunicação por Satélite | 38.6 até 275 GHz |
| Radiações Infravermelhas | 300 GHz até 430 THz |
| Luz Visível | 430 THz até 750 THz |
| Radiações Ultravioletas | 1.62 PHz até 30 PHz |
| Raios X | 30 PHz até 30 EHz |
| Raios Gama | 30 EHz até 3000 EHz |

Fonte: DOLUKHANOV, M. **Propagation of Radio Waves**. Mir Publishers. Moscou, 1971, pp. 9-18

6 AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO

Por ambiente eletromagnético entende-se um ambiente onde o propósito é a identificação das diferentes fontes de perturbações eletromagnéticas que poderiam ocasionar problemas de interferência eletromagnética (EMI) e a determinação dos níveis destas perturbações identificadas através de medições e ou previsões.

7 CAMPO ELETROMAGNÉTICO NO ESPAÇO

A radiação de campos eletromagnéticos no espaço é a forma mais eficiente de transmissão da informação, através da modulação de onda portadora. O alcance e a capacidade de transportar energia e ou a informação depende da frequência do campo eletromagnético, da sua potência e da eficiência de acoplamento entre o emissor e o receptor do sinal.

A transmissão de energia eletromagnética pode se dar também por condução direta, isto é, através de fios e cabos elétricos. É a chamada interferência conduzida, que depende do meio físico para se propagar e por isso é mais fácil de ser contida.

8 RÁDIO INTERFERÊNCIA

A rádio interferência (RI) é a degradação da recepção de um sinal desejado causada por perturbações de radiofrequência.

A interferência nas frequências de rádio, RFI (Radio Frequency Interference), é caracterizada por radiações eletromagnéticas emitidas por circuitos elétricos que geram sinais indesejados. A interrupção, obstrução ou degradação do sinal limita o efetivo desempenho dos equipamentos eletroeletrônicos e de comunicação. A RFI pode ser induzida intencionalmente, como em algumas formas de conflitos eletrônicos, ou não propositalmente, como um resultado de emissões espúrias e produtos de intermodulação.

A RFI também é conhecida como interferência eletromagnética.

As interferências são emissões eletromagnéticas que podem afetar a qualidade de recepção de um equipamento, dispositivo ou sistema e são divididas em dois tipos, de acordo com o meio de propagação: interferências irradiadas e interferências conduzidas.

As interferências irradiadas são as que se propagam através de campos eletromagnéticos, enquanto que as conduzidas propagam-se por cabos de alimentação, por interligações físicas entre equipamentos, por dispositivos ou por sistemas.

A maneira mais eficiente para reduzir os efeitos da RFI é usar capacitores de desvios ou de desacoplamento em cada dispositivo ativo, ou utilizar resistores sérios e filtros para controle do tempo de elevação dos sinais muito rápidos¹⁰.

Segundo Maruvada¹¹, a rádio interferência das linhas de corrente alternada é geralmente definida por três características básicas que são: o espectro de frequência, contorno lateral da linha, onde a rádio interferência é relacionada com a distância ao ponto de recepção do sinal e a distribuição estatística, na qual se deseja saber qual é o comportamento da rádio interferência durante um determinado período.

Muitas cidades possuem normas de operação de equipamentos eletroeletrônicos para que operem corretamente quando sujeitos a quantidades de RFI, evitando, com isto, causar interferência em outros equipamentos.

As perturbações eletromagnéticas têm produzido, hoje em dia, influências consistentes em sistemas de alta densidade e alta velocidade. A CEM tem interferido nos projetos de sistemas eletrônicos, embora, muitas vezes, devido a acoplamentos incorretos de sinais não se perceba alterações nestes sistemas¹².

A radiação de campos eletromagnéticos no espaço é a forma mais eficiente de transmissão de energia e informação. Sendo que, no caso da transmissão da informação, utiliza-se a técnica da modulação da onda portadora. O alcance e a capacidade de transportar a energia e/ou a informação depende da

¹⁰ Wikipedia, **The Free Encyclopedia**. Disponível em [http://em.wikipedia.org/wiki/Radio Frequency Interference](http://em.wikipedia.org/wiki/Radio_Frequency_Interference). Acesso em 05 de setembro 2005.

¹¹ MARUVADA, **Sarma: AC and DC Transmission Line - Corona Effects**. Orlando, Flórida, USA, Fev. 2004.

¹² CLAYTON, R.Paul. **Electromagnetics for Engineers with Applications to Digital Systems and Electromagnetic Interference**. John Wiley & Sons .INC, 2004, p. 207.

freqüência do campo eletromagnético, da sua potência e da eficiência do acoplamento entre o emissor e receptor¹³.

Segundo Gary e Cladé¹⁴, é possível que equipamentos em subestações, acessórios de linhas e isoladores também sejam fontes de rádio interferência, como descreve em seus estudos sobre perturbações rádio elétricas em linhas de transporte de energia:

L'appareillage de poste, les accessoires de ligne, les chaines d'isolateurs sont également des sources de perturbations radioélectriques, dont le spectre peut, dans certaines conditions, s'étendre jusqu'aux fréquences utilisées en télévision.¹⁵

8.1 RUÍDOS PROVOCADOS POR RÁDIO INTERFERÊNCIA

Por ruído entende-se geralmente qualquer perturbação espúria ou indesejável que tende a mascarar o sinal de transmissão. Pode-se distinguir vários tipos de ruído: ruídos artificiais, ruídos provenientes de distúrbios erráticos que se apresentam fora de nosso controle, ocorrendo irregularmente e os ruídos oriundos de flutuações espontâneas.

Os ruídos de origem artificial podem ser originados da captação eletromagnética de sinais interferentes e são captados através de fontes de alimentação, como também podem ser sinais espúrios originados de moduladores balanceados, etc.

Os distúrbios erráticos que não têm origem na atividade do homem podem ser devidos a tormentas atmosféricas elétricas e a outras causas naturais.

Os ruídos provenientes de flutuações espontâneas de tensão e correntes ocorrem de uma maneira geral no mundo físico e são devidos, em última

¹³ MÜHLEN, Sérgio Santos. **Interferência e Compatibilidade Eletromagnética**. Alemanha 2002.

¹⁴ GARY,C; CLADÉ, J. **Les Perturbations Radio-Électriques Engendrées Par les Lignes de Transport d'Énergie**. Revue Générale de Electricité, Vol. 75, No 5, ,pp. 659-681. Rew. Agosto 2001.

¹⁵ Equipamentos de subestações, filtros de linha e isoladores são igualmente fontes de rádio interferência, cujo espectro pode, em certas condições, se estender até as freqüências usadas na televisão. GARY,C e CLADÉ, J. **Lês Perturbations Radio-Électriques Engendrées Par lãs Lignes de Transport d'Énergie**. Revue Générale de Electricité, Vol. 75, No 5, pp. 659-681. 2001.

instância, à natureza descontínua ou granular dos sistemas básicos. Estes ruídos representam uma limitação básica para a transmissão da informação¹⁶.

Ruídos eletromagnéticos limitam o desempenho de todo o sistema de comunicações. Isto é, os níveis mínimos de sinais que podem ser detectados são limitados por fontes de ruído externas e internas. O ruído eletromagnético externo ou do meio ambiente é composto por fontes naturais e fontes feitas pelo homem. Fontes de ruído interno em sistemas de recepção incluem perdas de sinais em antenas e em linhas de transmissão. O ruído é completamente descrito pelas suas características espacial, espectral e temporal¹⁷.

A interferência na recepção de sistemas de rádio e perturbações geradas em LT (linhas de transmissão) ou em LD (linhas de distribuição) na faixa de 0,15 MHz a 300 MHz, chamada de radiodifusão sonora em AM (amplitude modulada), na faixa de 15 MHz a 30 MHz, denominada de radiodifusão sonora em FM (frequência modulada) e TV na faixa de 30 MHz a 300 MHz. Acima de 300 MHz o nível de ruído é extremamente baixo, de forma que não é normalmente passível de causar interferência.

O ruído em radiofrequência gerado por LT e LD, acima 1 kV, é causado principalmente pelo efeito corona, isoladores defeituosos ou contatos frouxos, permitindo a existência de descargas elétricas, que variam conforme as condições atmosféricas.

Para a recepção de sinais de rádio e televisão livres de interferência é necessário existir uma elevada relação SNR (relação sinal/ruído) na entrada do receptor, a qual poderá ficar comprometida caso o nível de recepção dos sinais de rádio e TV sejam baixos e as condições atmosféricas sejam propícias à geração de ruído em RF por LT e LD.

De modo a garantir que os níveis dos diferentes tipos de ruído gerado por uma LT, LD e equipamentos associados sejam mantidos abaixo dos limites aceitáveis, são desenvolvidas técnicas de medição e predição baseadas no conceito de nível de referência de uma LT e LD. O nível de referência de uma LT e LD é determinado pelo projeto, instalação e manutenção da linha.

¹⁶ SCHWARTZ, Mischa. **Transmisión de la información, modulación y ruido**. Buenos Aires: Alsina 731, 1968. p.217.

¹⁷ SMITH, Albert A. **Radio Frequency, Principles and Applications**. New York, NY: IEEE Press, 1998. p. 111.

Sistemas de transmissão em CC (corrente contínua) também são passíveis de produzirem ruído em alta frequência, principalmente pelos conversores a válvula que, por estarem acoplados às linhas de energia, permitem que o ruído gerado na comutação seja propagado para os demais componentes do sistema.

Há necessidade que se estabeleçam normas para que os sinais de recepção não sejam prejudicados por perturbações eletromagnéticas e caiam a um nível tal que venham a desqualificar a boa recepção pelos equipamentos eletrônicos.

Sobre este assunto, Roberto Menna Barreto descreve a questão reguladora dos níveis de recepção da seguinte maneira:

Compete aos órgãos reguladores a determinação dos limites mínimos do sinal a ser protegido e a relação sinal/ruído que permita a recepção de sinais de radiodifusão satisfatória.

Estes fatores determinam então a “distância protegida”, qual seja, a distância mínima da linha de forma a proteger o sinal de radiodifusão para uma certa percentagem do tempo (normalmente inferior a 100 metros)¹⁸.

O ruído de linha de transmissão pode ser transmitido por condução, indução ou radiação. A interferência pode ser conduzida através da transmissão para a fonte de alimentação do rádio. Pode viajar por indução quando a LT está suficientemente próxima à antena ou à alguma parte do receptor, ou até perto de outra LT. Também pode viajar através de irradiação, isto é, as linhas de potência se tornam uma antena. A condução e a indução são geralmente responsáveis pelas interferências de baixa frequência porque a corrente conduzida decresce rapidamente com a frequência¹⁹.

Nas subestações se estabeleceram regras técnicas que garantem o ruído máximo a ser produzido pelos transformadores ou outros equipamentos. Os mesmos devem respeitar as exigências da norma IEC 651(1987) sobre a

¹⁸ BARRETO, Roberto Menna. **Influência de Linhas de Transmissão/Distribuição Em Sistemas Eletrônicos, de Telecomunicações e de Automação**, Rio de Janeiro, 2004.

¹⁹ Wikipedia, The Free Encyclopedia. Disponível em http://em.wikipedia.org/wiki/Radio_Frequency_Interference. Acesso em 08 de setembro 2005.

medição dos níveis de pressão sonora²⁰, bem como da NBR-10151 da ABNT (Junho 2000), que especifica um método para a medição de ruído, a aplicação de correções nos níveis medidos e leva em conta vários fatores, quando se pretende avaliar o ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade. Este método também pode ser utilizado para outras medições de ruído em outros locais e com outros objetivos²¹.

Ademais, para atender os efeitos das linhas de transmissão aéreas sobre circuitos de comunicações nas proximidades de instalações de alta tensão, deve-se seguir as diretrizes da CCITT (Comitê Consultivo Internacional Telegráfico e Telefônico). Por outro lado, para definição da banda perturbadora sobre os níveis de sinais recebidos nas comunicações, são utilizados os procedimentos indicados pelo CISPR (Comitê Internacional Especial de Perturbações Radioelétricas), n.º.18 - 1, 2 e 3, para as construções de instalações de transporte de energia elétrica²².

Assim sendo, pode-se identificar dois tipos de ruídos de linhas de transmissão: o intervalo de centelha em isoladores, *spark-gap*, e a descarga de corona, *corona discharge*.

8.1.1 Ruídos causados por centelhamento

Os ruídos causados por falhas em isoladores causam a maioria das interferências de LT. O centelhamento ocorre sempre que uma diferença de potencial é produzida entre dois condutores, ionizando o ar. A ionização diminui a resistência do ar que, ao atingir determinado valor, proporciona a condução, provocando assim o centelhamento, e uma corrente flui através do ar ionizado. A resistência do ar ionizado varia consideravelmente, causando variações de corrente que podem ser induzidas nas linhas de transmissão e propagadas. A centelha também irradia o ruído ao longo de um espectro largo de frequências.

²⁰ RESOLUCIÓN 77/98, **Manual de Gestión Ambiental del Sistema de Transporte Eléctrico de Extra Alta Tensión**. República Argentina, 12 março 1998.

²¹ ABEL, Engenharia de Segurança do Trabalho. **Projetos de Acústica Ambiental e Controle do Ruído**. Disponível em <http://www.abel-acústica.com.br/Pauta/01-Medir NPS.htm>. Acessado em setembro 2005.

²² DESARROLLO SOSTENIBLE, **Desarrollo Económico Respetuoso del Ambiente Natural Y Social**. República Argentina, 12 de março 1998.

Sob determinadas situações, as centelhas podem originar trens sucessivos de pulso fracos. As ondas resultantes contêm energia harmônica forte e podem causar interferência severa até a região de VHF. O ruído de centelhamento geralmente diminui com a frequência. É uma característica que pode ser muito útil quando se rastreia a interferência. Uma exceção a esta regra ocorre quando as linhas de potência conectadas à fonte de ruído se tornam ressonantes em uma ou mais frequências em particular. O ruído pode apresentar picos justamente nestas frequências.

Diferente do efeito corona, o ruído de centelhamento é geralmente um fenômeno relacionado às boas condições de tempo, podendo desaparecer durante a chuva porque a precipitação curto-circuita os intervalos entre isoladores e peças usadas no suporte de sustentação dos cabos, transformadores e outros equipamentos fixados nos postes. Sendo, normalmente, de 60 Hz a frequência das linhas de transmissão de corrente alternada, a tensão passa através de dois picos (positivo e negativo) duas vezes a cada ciclo. O ruído de centelhamento e de corona seguem este padrão, geralmente se iniciando e parando 120 vezes por segundo. Isto apresenta os ruídos característicos de zumbido.²³

8.1.2 Ruídos causados por corona

O estudo do efeito corona já vem sendo realizado há muito tempo, especialmente com trabalhos desenvolvidos por Peek²⁴ nos Estados Unidos da América do Norte, sobre o comportamento dos fenômenos dielétricos na técnica das altas tensões.

Quando um condutor aéreo é percorrido por uma corrente elétrica, cria em torno de si um campo elétrico. Quando o valor do gradiente de potencial ali existente excede o valor do gradiente crítico, os átomos do ar se ionizam e quanto maior for o seu potencial, maior será o efeito que se manifestará sob forma de uma luminescência envolvendo o condutor como uma coroa azul violeta, denominada de efeito corona. A intensidade do campo eletrostático tem

²³ TONIOLO, Marcelo. **Artigos Técnicos e Informações para Dixistas**. Osasco, S.Paulo, 6 de maio 2002.

²⁴ PEEK, F.W, Jr. **Law of Corona** .AIEE, Transactions Power Apparatus and Systems, vol. 30, 31, 32. 1912-1929.

seu valor maior na superfície do condutor e tem a sua intensidade diminuída inversamente com a distância ao centro do condutor. Ao aumentar o diâmetro do condutor este efeito se decompõe sob forma de cristas localizadas, cujo fator contribuinte é a própria aspereza do condutor, a sua poluição, bem com insetos e partículas vegetais nele depositadas. No campo não uniforme em torno de um condutor, a divergência do campo exerce influência adicional, e qualquer partícula contaminadora, como poeira, por exemplo, transforma-se em fonte pontual de descargas.

Outro estudo sobre o efeito corona foi desenvolvido pela Quelle Automação Industrial²⁵ em seu artigo sobre descargas elétricas nos gases, no qual menciona que o aumento da tensão entre dois eletrodos provoca um aumento da intensidade do campo elétrico resultante, produzindo a movimentação dos íons entre os eletrodos. A velocidade deste deslocamento depende principalmente da pressão do gás e da intensidade do campo elétrico. Desta forma, é cada vez maior a quantidade de íons que na unidade de tempo conseguem chegar até os eletrodos, ou seja, a corrente elétrica que circula pelo gás vai aumentando sua intensidade. A partir de um determinado momento, todos os íons produzidos pelo agente ionizador, o campo elétrico, chegam até os eletrodos. Então, embora a tensão possa ser aumentada, a corrente elétrica que circula pelo gás não aumentará seu valor, isto é, haverá saturação do gás.

Quanto menor for a densidade do gás, menores serão as intensidades de campo elétrico necessárias para atingir a saturação do gás. Para aumentar a intensidade da corrente elétrica além do valor de saturação se faz necessário elevar consideravelmente a tensão entre os eletrodos. Feito isto, a intensidade da corrente elétrica novamente vai aumentar. Nestas condições aparece a ionização por choque eletrônico e, neste momento, a recombinação dos átomos e moléculas ionizados que voltam ao seu nível energético base, produz a emissão de radiações eletromagnéticas, que no caso luz torna o gás luminoso. A partir desta situação, um aumento do valor da tensão entre eletrodos produz o chamado efeito de avalanche, ou seja, um elétron qualquer produz um íon e um novo elétron, o qual novamente reinicia o processo.

²⁵ **Quelle Automação Industrial Ltda.** Rua Igati, 47, Vila Anhanguera. S.Paulo, SP. Disponível em <http://www.quelle.com.br/Artigos/EfeitoCorona.html> . Acesso em 20 de setembro 2005.

Se a ionização for ainda maior, o gás começa a se iluminar e, nos pontos onde o raio de curvatura é muito pequeno, aparece uma luminosidade. Este é o efeito corona. A zona do gás adjacente à superfície iluminada é chamada de camada do efeito corona, o restante da região de descarga se denomina região da corrente negra. No caso da corona se manifestar no eletrodo catódico, chama-se corona catódica ou corona negativa. No caso deste efeito se produzir no eletrodo anódico, denomina-se corona anódico ou positivo, e nela os elétrons surgem junto ao ânodo pela foto-ionização do gás, devido à radiação emitida pela camada do efeito corona²⁶.

Muitos laboratórios científicos vêm trabalhando em projetos sobre o efeito corona. Entre eles destacam-se Edison Electric Institute, na América do Norte e o Centro de Recherches de Lês Renardières, na França.

Ensaio foram realizados sobre o corona por Adams²⁷, Loeb²⁸, Trinh e Jordan²⁹, LaForest³⁰, entre outros³¹. É importante salientar os trabalhos sobre o corona em tensões alternativas das linhas de alta tensão realizados por Cladé³², Gary e Moreau³³ na França.

A presença do efeito corona em condutores de linhas de alta tensão pode dar origem a sons audíveis ou ruídos audíveis. A intensidade do ruído depende do gradiente superficial do campo elétrico nos condutores, de seu estado superficial e das condições atmosféricas.

²⁶ Quelle Automação Industrial. **O Efeito Corona e as Descargas Elétricas nos Gases**. S.Paulo,SP.Disponível em <http://www.quelle.com.br/Artigos/EfeitoCorona.html> .Acesso em 20 de setembro 2005.

²⁷ ADAMS,G.E.,**The Calculations of the Radio Interference Level of Transmission Lines Caused by Corona Discharges**. AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol 75, pt III, p. 411 - 418, Rew 1991.

²⁸ LOEB,L.B.**Electrical Coronas - Their Basic Physical Mechanism**. Berkeley: University of California Press, 1963.

²⁹ TRINH,G.; JORDAN, J.G., **Modes of Corona Discharges in Air**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol. PAS - 87, nº 5, p.1217 - 1215. USA 2001.

³⁰ LAFOREST,J.J.,**Seasonal Variation of Fair-Weather Radio Noise**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems,PAS - 87, p.928-931, Rew 2002.

³¹ COSTA, Gilberto José Corrêa da. **Contribuição ao Estudo de Rádio Interferência**. P.Alegre. CEEE, outubro, 1987.

³² CLADÉ, J.J.; GARY C.H., **Predetermination of Corona Losses Under Rain. Influence of Radio Intensity and Utilization of a Universal Chart**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, v.PAS-89, p.1179 - 1185.July/August 1970.

³³ GARY, C.; MOREAU. **L'effect de Couronne em Tension Alternative**. Collection de la Direction dês Etudes et Recherches d'Électricité de France. França, 1976.

Os níveis de perturbações do ruído audíveis aumentam junto com o nível de tensão de operação dos sistemas de transmissão, e começam a tomar importância nas tensões superiores a 300 kV³⁴.

O efeito corona é aplicado a todos os fenômenos relacionados com a presença da condutividade de um gás que circula em um condutor nas altas tensões. Esta condutividade é devido ao fenômeno de ionização.

Descargas de corona aparecem na superfície de um condutor de uma LT quando a intensidade do campo elétrico na superfície deste condutor excede a capacidade de disruptiva do ar³⁵.

Mesmo em um campo elétrico uniforme, entre dois eletrodos planos paralelos no ar, uma série de condições controla a tensão disruptiva do ar tais como: a pressão do ar, a presença do vapor d'água, o tipo de tensão aplicada e a foto-ionização incidente. No campo não uniforme em torno de um condutor, a divergência do campo exerce influência adicional, e assim, qualquer partícula contaminadora como poeira, transforma-se em fonte pontual de descargas.

Outra característica do efeito corona é observada pelas descargas elétricas em gases que são geralmente iniciadas por um campo elétrico que acelera elétrons livres ali existentes. Quando esses elétrons adquirem energia suficiente do campo elétrico, podem produzir novos elétrons por choque com outros átomos. É o processo de ionização por impacto. Durante a sua aceleração no campo elétrico, cada elétron livre colide com átomos de oxigênio, nitrogênio e outros gases presentes, perdendo, nessa colisão, parte de sua energia cinética. Ocasionalmente um elétron pode atingir um átomo com força suficiente, de forma a excitá-lo. Nessas condições, o átomo atingido passa a um estado de energia mais elevado. O estado orbital de um ou mais elétrons muda e o elétron que colidiu com o átomo perde parte de sua energia para criar esse estado. Posteriormente, o átomo atingido pode reverter ao seu estado inicial, liberando o excesso de energia em forma de calor, luz, energia acústica e radiações eletromagnéticas. Um elétron pode igualmente colidir com um íon positivo,

³⁴ DESARROLLO SOSTENIBLE, **Desarrollo Económico Respetuoso del Ambiente Natural Y Social**. República Argentina, 12 de março 1998.

³⁵ No ar, quando a intensidade de campo elétrico atinge 30 kV/cm, sob pressão normal, com eletrodos de 20mm de diâmetro, a faísca de descarga é produzida. <http://www.altatensao2001.hpg.ig.com.br>. Acesso em 10 de janeiro 2006.

convertendo-o em átomo neutro. Esse processo, denominado recombinação, também libera excesso de energia³⁶.

Sobre os aspectos do efeito corona e suas características na superfície dos condutores, Comber, Deno e Zafanella³⁷, em seus trabalhos no EPRI (Electric Power Research Institute) sobre linhas de transmissão de 345 kV ou mais, salientam que:

Even in a uniform field between two parallel plane electrodes in air, a host of conditions controls this breakdown strength. Several of these conditions are air pressure, electrode material, presence of water vapor, incident photo ionization, and type of voltage³⁸.

Descargas individuais de corona provocam pulsos de tensão e corrente de curta duração que se propagam ao longo das linhas de transmissão, resultando em campos eletromagnéticos em suas imediações. Essas descargas ocorrem durante ambos os semiciclos da tensão aplicada, porém aquelas que ocorrem durante os semiciclos positivos é que irradiam ruídos capazes de interferir na rádio recepção nas faixas de frequências das transmissões em AM, particularmente na faixa de ondas médias. Ocorre, portanto, nos ciclos positivos as maiores fontes de perturbações em rádio recepção.

As cargas elétricas geradas pela ionização do ar na vizinhança de um condutor e que se deslocam sob o efeito do campo elétrico, atuam como um gerador de corrente, ou seja, isto impõe ao condutor uma corrente que depende de suas próprias características e também de um fator que está ligado às capacidades próprias e mútuas dos condutores num sistema multifilar. Este fenômeno, inicialmente estudado por Adams³⁹, foi meticulosamente analisado pelos centros de pesquisas, sendo conhecido por função excitatriz.

³⁶ **Efeito Corona** - Engenharia Elétrica da UFES-Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em <http://www2.lcee.ele.ufes.br/x/professores/arquivos/45>. Acesso em 20 setembro 2005.

³⁷ COMBER, M.G. DENO, D.W. ; ZAFANELLA, L.E., **Corona Phenomena on AC Transmission Lines**. Electric Power Research Institute. Palo Alto, California, USA. Cap.4,p. 169, 1982.

³⁸ Mesmo em um campo uniforme entre dois eletrodos planos paralelos no ar, um grande número de condições controla esta intensidade de ruptura. Muitas destas condições são a pressão do ar, o material dos eletrodos, a presença do vapor de água, a foto ionização incidente, e o tipo de tensão. COMBER, M.G. DENO, D.W. e ZAFANELLA, L.E., **Corona Phenomena on AC Transmission Lines**. Electric Power Research Institute. Palo Alto, California, USA. Cap.4, p. 169, 1982.

³⁹ ADAMS, G.E. **The Calculations of the Radio Interference Level of Transmission Lines Caused by Corona Discharges**. AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol 75. pt.III., p 411-418. Rew 1991.

Os distúrbios causados pelo efeito corona nas LT se tornam muito evidentes, principalmente, quando se considera que a faixa de radiofrequência se estende de 3 kHz a 30 GHz.

O processo de descarga da corona é pulsatório, produzindo pulsos de corrente e tensão nos condutores da LT. Estes pulsos são caracterizados pelas constantes de tempo de subida e caída e podem estar na ordem de centenas de microssegundos e pela taxa de repetição, que pode estar na faixa de MHz. Conseqüentemente, o espectro de freqüência daqueles pulsos pode cobrir uma considerada porção de banda de freqüência de rádio. Os campos eletromagnéticos resultantes das descargas de corona podem criar distúrbios não desejados nos canais ou dispositivos de transmissão em operação em cima de uma faixa larga de freqüências. Em outras palavras, o efeito corona nas LT pode ser uma fonte de ruído de rádio.

Teoricamente, o ruído de rádio nas LT pode interferir em qualquer comunicação de rádio freqüência e depende de fatores como: distância da LT do dispositivo de recepção da comunicação, a orientação da antena de recepção, a geometria da linha de transmissão e as condições de tempo. O nível de interferência pode ser tal que a recepção da informação desejada é praticamente ininteligível. Um projeto particular de LT resulta num aceitável nível de ruído de rádio e deve ser expresso em termos quantitativos⁴⁰.

Eflúvios de corona também podem ocorrer em outros componentes das LT, tais como: ferragens e isoladores, porém a intensidade dos ruídos gerados, neste caso, é bastante inferior à do ruído gerado pelos condutores. Ferragens defeituosas, pinos e contrapinos mal ajustados ou soltos podem igualmente gerar pulsos eletromagnéticos.

A geração desses ruídos interfere nos equipamentos dos moradores das vizinhanças das LT, uma vez que os ruídos podem se propagar além das faixas de servidão das linhas.

Ainda não é possível projetar, economicamente, uma LT aérea em tensões acima de 100 kV e que não produza rádio interferência. Não obstante, critérios

⁴⁰ Comber, M.G ; Nigbor, R.J. **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA.1982.

corretos e atenção aos aspectos relevantes do projeto podem produzir um sistema que resulte, pelo menos, em níveis aceitáveis de perturbações.

O estudo do comportamento das linhas no que se refere à rádio interferência é bastante complicado em virtude dos inúmeros fatores que afetam seu comportamento, muitos dos quais ainda são indefinidos e nem mesmo totalmente entendidos.

As múltiplas manifestações do efeito corona têm implicações diretas com a economia das empresas concessionárias e com o meio ambiente no qual as linhas de transmissão se encontram. Todas estas manifestações são importantes e devem merecer dos projetistas a devida atenção.

As perdas de energia devido ao efeito corona e suas conseqüências econômicas têm sido objeto de pesquisas e estudos, mas só recentemente foram alcançados meios que permitem determinar, com razoável segurança, qual o desempenho que se poderá obter para as diversas soluções possíveis para uma LT, no que diz respeito a essas perdas. De um modo geral, elas se relacionam com a geometria dos condutores, tensões de operação, gradientes de potencial nas superfícies dos condutores e, principalmente, com as condições meteorológicas locais. Constatou-se, por exemplo, que as perdas por efeito corona em linhas de tensões extra-elevadas podem variar de alguns quilowatts por quilômetro até algumas centenas de quilowatts por quilômetro, sob condições adversas de chuva ou garoa. As perdas médias, como se verificou, podem constituir apenas pequenas partes de perdas por efeito joule, porém as perdas máximas podem ter influência significativa nas demandas do sistema, pois a capacidade geradora para atender a essa demanda adicional deverá ser prevista ou a diferença de energia ser importada.

Estudos sobre rádio interferência proveniente de linhas de transmissão comprovam que, geralmente, quanto maior a tensão, maior será o efeito da corona e que este efeito aumenta com a umidade e chuva porque tornam o ar mais condutivo. O ruído corona induzido é, quase sempre, pior durante a chuva, quando a precipitação cai em forma de gotas nas bordas inferiores das linhas de transmissão. A Figura 8.1.2.1 mostra a presença do efeito corona num condutor energizado úmido com a superfície suja.

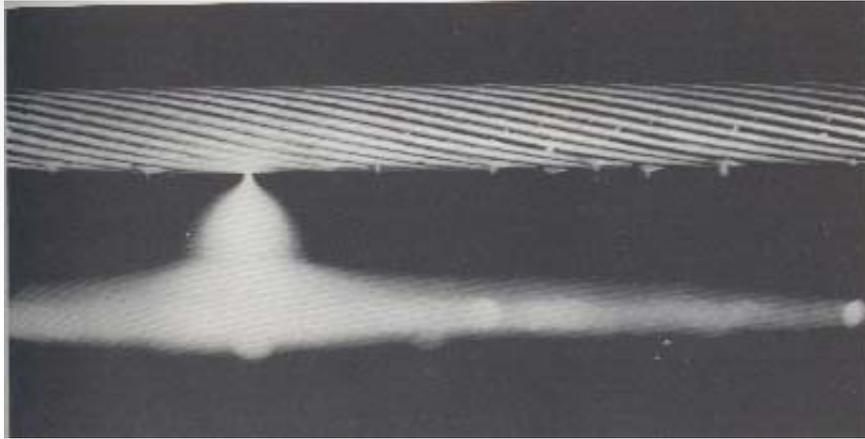


Figura 8.1.2.1-Conductor energizado úmido com a superfície suja.

Estudos desenvolvidos por Gross⁴¹ apresentam informações do tempo de duração do efeito corona para diferentes tensões e tipos de condutores. As curvas mostram um decréscimo das perdas de corona depois de aproximadamente seis meses. Os valores apresentados são representativos para todos os tipos de tempo e para diferentes tensões de LT.

As imperfeições das superfícies dos condutores são fatores determinantes na prática. Nas linhas em operação que apresentam irregularidade nos condutores, o gradiente de tensão superficial crítico é muito menor do que aqueles dos condutores perfeitos. Isto é devido às deficiências inevitáveis da superfície dos condutores produzidas durante a fabricação dos mesmos e quando são estirados sobre as estruturas de sustentação. Todos estes defeitos são conduzidos para os locais de concentração do campo elétrico e conseqüentemente para um gradiente de tensão mais baixo⁴².

O relatório do Electric Power Research Institute (EPRI) menciona que:

Corona and arcing activity may occur at numerous points in overhead transmission, substation, and distribution power systems. This activity may result in audio noise or radio interference complaints or indicate a defective component that may be close to failure.⁴³

⁴¹ I.W.Gross. **Corona Investigation on Extra High Voltage Lines- 500 kV**. Test Project of the American Gas and Electric Company. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 70, p. 75-94, 1986.

⁴² Gary, C.; Hirsch, F. **Interferences Procuced By Corona Effect of Electric Systems**. Description of Phonomena Pratical Guide For Calculation. Document prepared by Working Group 36.01.Set p. 1997.

⁴³ A atividade do efeito corona e do arco voltaico pode ocorrer em numerosos pontos sobre a linha de transmissão, subestação e sistemas de distribuição de potência. Esta atividade pode

O efeito corona pode ocorrer em numerosos pontos sobre a linha de alta tensão, bem como em subestações e em sistemas de distribuição de energia elétrica, este efeito pode resultar em ruído de áudio e em rádio interferência ou indicar um componente defeituoso da linha de transmissão que está preste a falhar. Observar Figura 8.1.2.2.



Figura 8.1.2.2 - Detecção do efeito corona em uma linha de 380 kV em tempo nebuloso.

Defeitos ocasionados nas linhas de transmissão devido ao efeito corona podem ser vistos na Figura 8.1.2.3, na qual partes do cabo elétrico que se soltam alteram as características da linha.



Figura 8.1.2.3 - Defeito ocasionado pelo efeito corona em uma linha de 345 kV.

São significativos os valores obtidos em medições realizadas na Rússia em linhas de 500 kV. Mediram-se perdas médias anuais da ordem de 12 kW/km de linha trifásica em tempo bom, perdas máximas da ordem de 313 kW/km sob chuva e 374 kW/km sob garoa.

Tanto as perdas com tempo bom como aquelas sob chuva dependem dos gradientes de potencial na superfície dos condutores. As perdas sob chuva dependem não só do índice de precipitações, como também do número de gotículas de água que conseguem aderir à superfície dos condutores. Esse número é maior nos condutores novos do que nos usados, nos quais as gotas d'água aderem mais facilmente à geratriz inferior dos condutores.

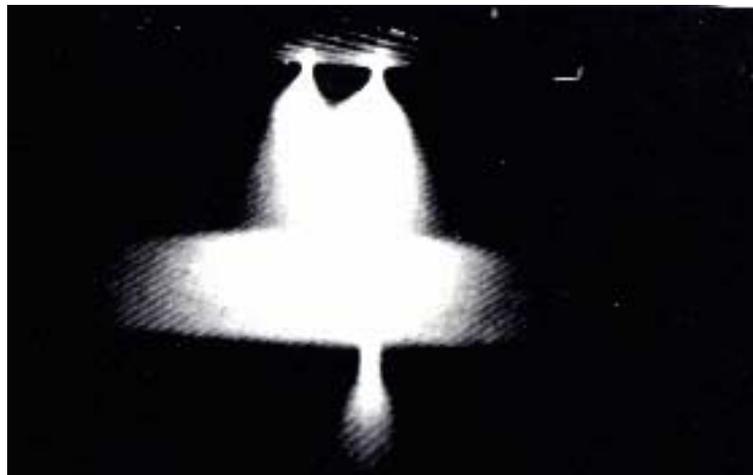


Figura 8.1.2.4 - Parte inferior de um feixe seco de condutores com um grande gradiente de potencial.

As linhas aéreas de transmissão de energia elétrica há muito têm sido consideradas como causadoras de impacto visual sobre o meio ambiente em que são construídas. Uma espécie de poluição visual que os conservadores e urbanistas há muito vêm combatendo. O advento da transmissão em tensões extra-elevadas e as perspectivas de transmissão em tensões ultra-elevadas enfatizaram outros dois tipos de perturbação do meio, provocados pelo efeito corona, sendo lhes atribuído também caráter de poluição: a rádio interferência e o ruído acústico.

A presença de efeito corona nos condutores de linhas de alta tensão pode dar origem a ruídos acústicos. Do mesmo modo como no caso da RI, a

intensidade deste ruído depende do gradiente de superfície do campo elétrico nos condutores, do seu estado superficial e das condições atmosféricas.

A estes níveis de perturbações de RA se adicionam os níveis de tensão de operação dos sistemas de transmissão, cujos valores começam a se tornar importantes para tensões superiores a 300 kV, aproximadamente⁴⁴.

Nos projetos de pesquisa sobre corona em tensões extra e ultra-elevadas se verificou, outrossim, que manifestações de RI não mais poderiam ser desconsideradas, principalmente nas linhas de 500 kV ou tensões mais elevadas, dado o caráter de poluição ambiental que apresenta. A poluição acústica provocada pelo ruído característico e causada pelos eflúvios do efeito corona é uma das manifestações. Esse aspecto também vem merecendo crescente atenção no dimensionamento das linhas, a fim de que o grau de perturbação seja mantido em níveis aceitáveis. Tais estudos mostraram que o ruído auditivo é função dos máximos gradientes de potencial na superfície dos condutores.

Em vista do exposto, pode-se concluir que, para as linhas de transmissão em tensões extra e ultra-elevadas, o dimensionamento econômico das linhas está diretamente relacionado com a escolha do gradiente de potencial máximo admissível na superfície dos condutores das linhas de transmissão. Gradientes para uma mesma classe de tensão somente são reduzidos mediante o emprego dos condutores de diâmetros maiores, ou maior espaçamento entre fases, ou pelo emprego de condutores múltiplos, com número crescente de subcondutores, ou pela forma com que são distribuídos sobre o círculo tendo como centro o eixo do feixe.

Alternativamente, vem sendo pesquisado outro método para a redução da rádio interferência e ruídos audíveis, como a colocação de espinas ao longo dos condutores ou o seu envolvimento com capas de neoprene. A disposição dos subcondutores em forma de polígono irregular também vem sendo investigada como meio de reduzir os gradientes de potencial, e parece ser a forma mais promissora: é possível encontrar uma posição para cada subcondutor na periferia de um círculo, de forma que o gradiente em todos os subcondutores seja mínimo. O emprego dos condutores múltiplos assimétricos tem apresentado problemas de

⁴⁴ DESARROLLO SOSTENIBLE, **Desarrollo Económico Respetuoso del Ambiente Natural Y Social**. República Argentina, 12 de março 1998. Disponível em <http://www.dsostenible.com.ar/leyes/resolucion-orig77-98.html>. Acesso em 19 de setembro 2005.

estabilidade mecânica sob ação do vento, e a melhor solução para este caso poderá conflitar com a melhor solução para a distribuição de gradientes de potencial⁴⁵.

9 MEDIÇÃO DO RUÍDO DE RÁDIO

9.1 MEDIDORES DE RUÍDO DE RÁDIO

Para medir o verdadeiro nível de interferência em um dispositivo de comunicação, o sistema de medidas deverá ter as mesmas características de resposta do dispositivo de comunicação, com somente o estágio de sinal de saída final modificado para medir os termos quantitativos de ruído. Entretanto, como uma grande variedade de dispositivos de comunicação opera através da banda de radiofrequência, é praticamente impossível obter-se um caso ideal numa investigação de ruído de LT. Por outro lado, segundo Comber e Nigbor⁴⁶, é muito desejável que os diferentes analisadores de ruído de linha de transmissão usem instrumentos e técnicas similares. Desta maneira, pode-se obter resultados satisfatórios por comparação entre os diferentes investigadores, tornando-se valiosos para os projetistas de LT. Conseqüentemente, uma certa quantidade de padrões pode ser fixada em ambas as áreas de procedimentos: instrumentação e medição.

Um medidor de ruído de rádio é basicamente um receptor de rádio calibrado que funciona como um voltímetro de radiofrequência⁴⁷. A Figura 9.1.1 ilustra um diagrama de blocos do sinal processado por um medidor de ruído de rádio.

⁴⁵ **Efeito Corona** - Engenharia Elétrica da UFES-Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em <http://www2.lcee.ele.ufes.br/x/professores/arquivos/45>. Acesso em 10 setembro 2005.

⁴⁶ Comber, M.G.; Nigbor, R.J. Radio Noise. **Transmission Line Reference Book**. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.206

⁴⁷ IEC/CISPR-16; **Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antenna calibration test sites for 30 MHz to 1 000 MHz**. Out 1999. Métodos e especificações de equipamentos de medição de perturbações rádio e imunidade, com testes para calibração de antenas de 30 a 1000 MHz.

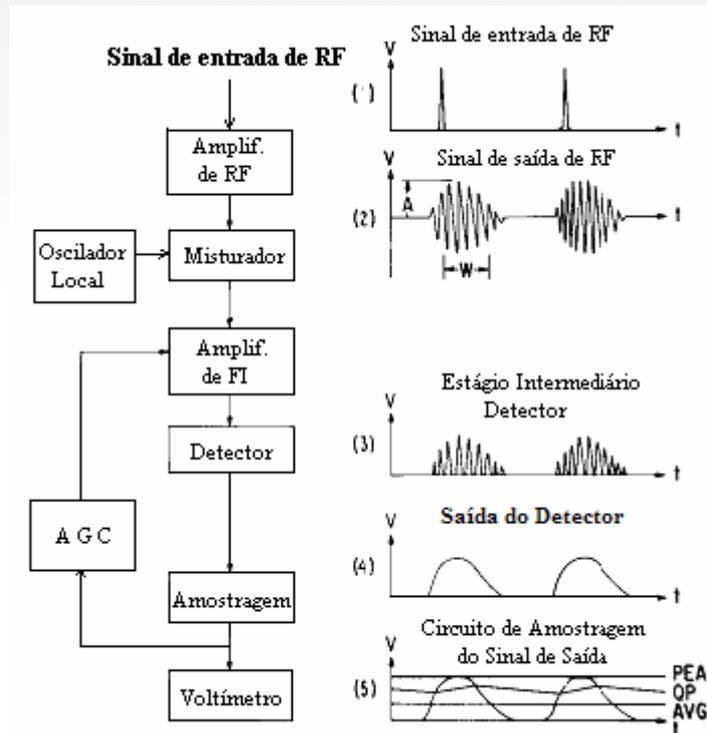


Figura 9.1.1 - Sinal processado por um medidor de ruído de rádio.

Desta maneira, os pulsos separados em largura de radiofrequência (1) entram pelo medidor de RF. Cada pulso pode ser considerado como um gerador de componentes de um espectro de frequência. O amplificador de RF amplifica a pequena porção deste espectro. O sinal de saída é um trem de pulsos modulado pelo oscilador local. O envelope de pulsos tem um pico de amplitude A que é proporcional à largura de banda do amplificador e uma largura W que é inversamente proporcional à largura de banda.

No misturador, a frequência do pulso oscilatório é convertida em uma frequência intermediária IF. Os pulsos, então, passam através do amplificador de IF, cujo sinal de saída é novamente um trem de pulsos oscilatórios (2). Neste estágio, a largura e a amplitude do pico são determinadas pela banda mais estreita do circuito. Os pulsos, assim, entram pelo detector (3), onde são retificados e os filtros de saída das componentes de frequência alta deixam o envelope monopolar de pulsos (4), os quais são aplicados em *weighting circuits* (circuitos de amostragem). Estes circuitos são considerados como parte do detector e determinam se o voltímetro lê o pico do envelope, a média do

envelope ou alguns valores intermediários de quase-pico (5). Geralmente um controle automático de ganho (AGC) é inserido no circuito, como mostra a Figura 8.1.1. Este dispositivo de AGC abaixa o ganho do amplificador de IF para sinais muito largos (níveis de ruído), neste caso a deflexão do voltímetro é proporcional ao logaritmo da amplitude do sinal de entrada. O voltímetro é calibrado para indicar valores *rms* (*root mean square*), valores eficazes, em microvolts ou decibel (dB), acima de 1 microvolt, de um sinal senoidal de entrada cuja frequência é igual à frequência de sintonização do medidor, por exemplo, 1 MHz.

Os circuitos de amostragem, *weighting circuits*, são considerados como parte do detector de sinais e são identificados pela seguinte terminologia: detector de valores médios, detector de valores de pico e detector de valores de quase-pico. Estes detectores são mostrados na Figura 8.1.2.

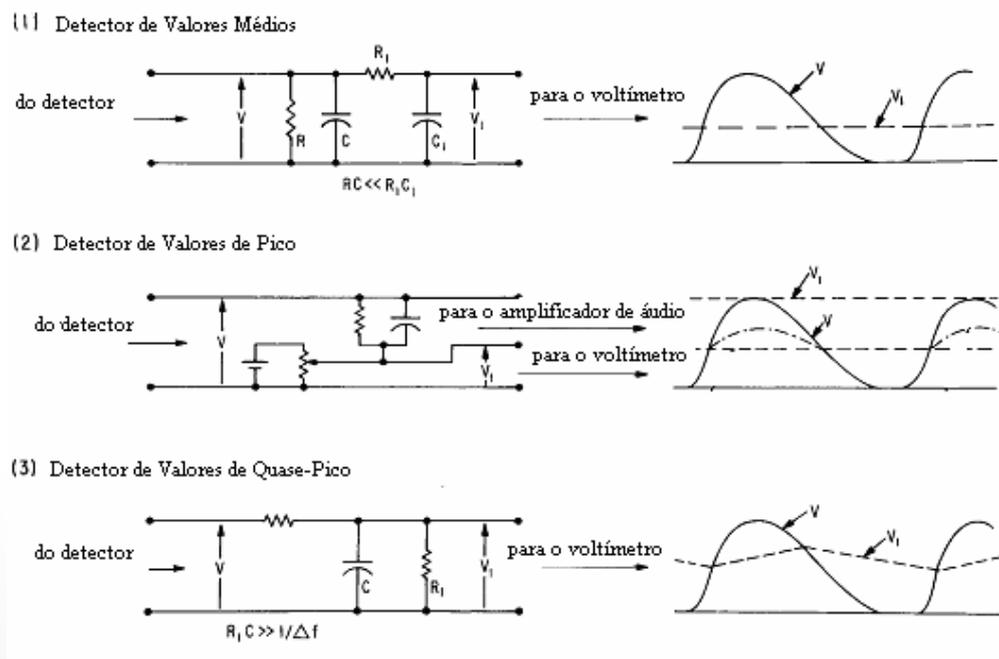


Figura 9.1.2 - Detectores de circuitos de amostragem.

Os detectores de valor médio, nos quais as medidas são obtidas ao longo de um tempo médio dos sinais de entrada, são praticamente capazes de medir a intensidade de campo das portadoras de radiofrequência e não dependem da modulação da portadora que, em média, ao longo do tempo, é zero. Por esta

razão estes detectores também conhecidos como detectores de intensidade de campo ou detectores de portadora⁴⁸.

Os detectores de valor de pico são particularmente aplicados para medições de ruídos repetitivos. Nestes casos a diferença entre a tensão do sinal de entrada, V , e a tensão lida no medidor, V_1 , é retificada e aplicada na entrada do amplificador de áudio. Neste caso, o sinal de saída é zero quando o V_1 é ajustado para o pico do sinal de entrada, V .

O detector de quase-pico é o mais comumente usado para medir o ruído de radiofrequência nas LT. A resposta do circuito é determinada pela constante tempo de carga e descarga, RC e R_1C , respectivamente. Se R_1 é infinito, então C pode se descarregar somente através da resistência R_1 , e o sinal de saída é o pico do trem de impulso de entrada. Valores incômodos de qualquer ruído não dependem somente do valor de pico, mas também da taxa de repetição dos pulsos de ruído. Este ensaio foi primeiramente aplicado a ruídos audíveis por Steudel⁴⁹ e relatado por Davis⁵⁰, o qual, analisando os medidores de níveis de som capazes de medir os ruídos repetitivos, relata que "*must have an appropriate leak, for the loudness of a slow series of repetitions is less than that of a rapid series*"⁵¹.

Por conseguinte, esse conceito de medidor de pico dos sinais de áudio foi levado para o projeto de medidores de ruídos de rádio, e o produto final foi a industrialização do circuito detector dos sinais quase-pico.

Por outro lado, pela revolução das comunicações devido à grande quantidade de formas de comunicações de rádio existentes hoje em dia, é improvável que o detector de quase-pico forneça dados de ruído apreciáveis para avaliar todas as interferências destes equipamentos. A indústria de telecomunicações atual está inclinada a adotar como padrão a medida de ruído em *rms*, uma medida mais universalmente aplicada para problemas de

⁴⁸ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J. **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.207.

⁴⁹ STEUDEL, U. **Hochfrequenztechnik und Elektroakustik**. Vol.41, p.15. Alemanha Rew 2002.

⁵⁰ DAVIS, A.H.. **An Objective Noise Meter for the Measurement of Moderate, Loud, Steady and Impulsive Noise**. Journal of the IEE. Londres, Inglaterra, Vol. 83, p.249-260. Rew 2003.

⁵¹ Deve ter um apropriado escoamento, para valores altos de ruído de uma série de repetições lentas é menor do que para uma série rápida. DAVIS, A.H. **An Objective Noise Meter for the Measurement of Moderate, Loud, Steady and Impulsive Noise**. Journal of the IEE. Londres, Inglaterra.

interferência nas comunicações. Nos últimos anos instrumentos em *rms* têm se tornado mais comercializados na concepção ou de medidores únicos ou de medidores modulados usados em conjugação com medidores de rádio ruído existentes.

9.2 SISTEMA DE ANTENAS

Como os medidores de ruído de rádio são voltímetros de radiofrequência muito sensíveis, estes são capazes de medir frações de um microvolt. Para medir campos de ruído de radiofrequência os medidores devem ser usados em conjunto com uma antena que é colocada na área do campo a ser medido. A tensão de saída da antena é proporcional à intensidade de campo. A relação entre estas duas quantidades vem a ser o fator da antena. Tipicamente, existe uma considerável impedância de casamento entre a antena e o medidor de ruído de rádio, e um circuito de acoplamento entre estes dois dispositivos, o qual é geralmente requerido para prover ou uma máxima resposta do sistema para a frequência de medição, ou uma resposta plana sobre toda a gama de frequências.

As curvas do fator da antena, que incluem o efeito do acoplamento da antena, são fornecidas pelo fabricante. Quando é requerida somente a detecção do ruído sem uma medida quantitativa, outros sistemas de antenas especiais podem ser usados. A antena Yagi e outras apresentam alta sensibilidade e bom direcionamento para as frequências utilizadas e, portanto, são muito usadas nestes casos.

9.3 MEDIÇÃO DO RUÍDO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Quando se mede o ruído de uma linha de transmissão uma particular atenção deverá ser dada na escolha do local de posicionamento do medidor, na calibração do instrumento de medição e no nível de ruído de fundo para garantir que o nível de ruído de fundo não seja medido, bem como o número de outros fatores que possam influenciar as medidas. Um bom guia para procedimento de

medidas foi publicado pela norma padrão IEEE - 213⁵². Este guia mostra os aspectos mais importantes da medição dos ruídos de rádio nas linhas de transmissão na faixa de 15 kHz até 1 GHz.

Existem alguns itens que não são cobertos pelas normas, mas para efeito de um bom programa de medição devem ser considerados⁵³:

- Campos elétricos são facilmente perturbados pela presença de objetos como: veículos, árvores, cercas e pessoas. Estes devem ser levados em consideração quando da escolha da localização da antena.
- Calibração de uma antena, isto é, a determinação de seu fator de antena, baseada em uma antena colocada acima de um perfeito plano condutor de terra. O solo pode ser ou não um bom condutor de terra.
- Testes deverão ser realizados para garantir que as antenas estão livres do efeito corona. Abaixo das linhas de alta tensão, o campo elétrico pode ser suficientemente alto para conduzir o efeito corona pela extremidade da antena. Uma caída abrupta do sinal no medidor quando uma pessoa se aproxima da antena ou quando a antena é deslocada para mais longe do seu local inicial é uma boa indicação da presença do corona na antena.
- O uso de fones de ouvido ou pequenos microfones, conectados nas saídas de áudio dos medidores de ruído de rádio, pode ajudar na determinação da leitura dos sinais de radiodifusão.
- Na faixa de radiodifusão de TV as freqüências dos sinais são bem estabelecidas e podem ser facilmente evitadas. Na faixa de freqüências de FM (88-108 MHz) pode ser mais difícil achar uma área limpa de ruídos. Portanto, é melhor, se possível, evitar a faixa de FM. Uma freqüência entre 73 e 76 MHz é uma boa escolha para monitorar TVI (television interference), desde que esteja em uma baixa faixa de VHF, entre os canais de TV 4 e 5 e dentro de uma faixa de freqüência reservada para rádio astronomia e navegação aeronáutica. Conseqüentemente, esta freqüência é geralmente livre de sinais de grande amplitude.

⁵² IEEE-213, **Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines**. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1976. Std. 430 - 197.

⁵³ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J. **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.211.

- Para 75 MHz, o comprimento de onda é somente de 4 metros. Uma pequena mudança na posição de uma antena pode resultar em significativa troca nos níveis de ruído indicados. Medidas devem ser feitas para diversas posições da antena, próximas de uma posição nominal para verificar os valores máximos. A melhor aproximação seria fixar a posição da antena e fazer medidas de ruído para diversas frequências próximas à frequência nominal para verificar os valores máximos.
- Uma comparação da leitura do valor de pico e quase-pico pode ajudar na determinação se o valor de ruído medido é ruído de corona, ou menor, ou ainda de ruído de centelhamento. Com o ruído corona, o valor de pico lido será somente levemente mais alto do que o de quase- pico (até cerca de 5 dB). Com o ruído de centelhamento grandes diferenças (até 15 dB ou mais) são típicas.

9.4 NÍVEL DE INTERFERÊNCIA E QUALIDADE DE RECEPÇÃO

Os campos eletromagnéticos, incluindo os campos interferentes, são geralmente expressos ou em $\mu\text{V}/\text{m}$ (micro volts por metro) ou em decibel de acordo com a seguinte relação:

$$\text{Campo em decibel} = 20 \log (\text{campo em } \mu\text{V}/\text{m}) \quad (1)$$

Quando a componente magnética H do campo é medida usando uma antena de loop, o campo eletromagnético é expresso em campo elétrico equivalente E, em razão da relação constante $E/H = 120 \pi$ ohms (impedância no vácuo) existente entre as duas componentes do campo eletromagnético.

Portanto, um nível de interferência expressa como 46 dB, por exemplo, corresponde a uma componente elétrica de 200 $\mu\text{V}/\text{m}$ quando medido por um receptor IEC/CISPR-16⁵⁴, mesmo que a medida atual possa ter sido feita com uma antena de loop⁵⁵.

⁵⁴ IEC/CISPR-16; **Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antenna calibration test sites for 30 MHz to 1 000 MHz** .Out 1999.

⁵⁵ GARY,C.; HIRSCH,F. **Interferences Produced By Corona Effect of Electric Systems**. Description of Phenomena Pratical Guide For Calculation. Grupo de trabalho 36.01.p.28.Set 1997.

10 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Nos Estados Unidos não existe regulamentação para níveis locais ou federais que expressam o limite do nível de ruído de rádio que as linhas de transmissão (LT) podem produzir. A FCC (Federal Communications Commission) coloca as linhas de transmissão na categoria de dispositivo de radiação acidental, definido como um dispositivo que irradia energia de radiofrequência durante o curso de sua operação, isto se o dispositivo não é designado para gerar energia de radiofrequência. Como tal a FCC⁵⁶ requer que o dispositivo opere de modo que a energia de radiofrequência emitida não cause qualquer emissão, radiação ou indução que venha prejudicar no funcionamento dos serviços de navegação de rádio ou de outros serviços de segurança ou seriamente degradar, obstruir ou interromper os serviços de radio comunicação. Se as companhias de serviço público são obrigadas a seguir estas diretivas em projeto e operação das suas linhas de transmissão, está bem claro que possuem uma grande liberdade para determinar qual poderá ser o projeto mais favorável a ser executado.

Muitos fatores estão envolvidos na determinação do projeto mais adequado para definir o melhor tipo de LT a ser implantado, incluindo a natureza e os diferentes modos de ruído, as diversas opções de projeto, de modo a reduzir os níveis de ruído, a evolução subjetiva dos efeitos de interferência do ruído, a densidade populacional das áreas envolvidas, através das quais as linhas de transmissão passam e ainda da avaliação da qualidade existente dos serviços de comunicação de rádio nas proximidades.

10.1 CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO DE RÁDIO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

O nível de ruído de rádio de uma linha de transmissão AC (corrente alternada) será mais alto durante o tempo de chuva forte, quando os condutores estão saturados com a queda de água sobre os mesmos, atuando como fontes de corona. Por outro lado, serão mais baixos em tempo bom, quando o número

⁵⁶ Federal Communications Commission. **Federal Communication Commission Rules and Regulations**. Vol. II.Part 15, revisado em Maio 1975.

de fontes de corona, tipicamente, insetos e partículas de vegetação, são relativamente poucas.

Condições atmosféricas, desta forma, apresentam um papel preponderante quando se estuda a característica de ruído de rádio nas LT. Nos tempos chuvosos, de nevoeiro, com precipitações de orvalho, gotículas de água se depositam na superfície dos condutores. Estes fatores são também responsáveis na redução dos valores de tensão da linha.

O nível de rádio ruído de uma linha é sempre expresso como um número referente a um particular conjunto de condições de medida, tais como: condições climáticas, localização da medição, características do detector do instrumento de medição e a frequência de medida. Se, por exemplo, o nível de ruído corresponde às condições de bom tempo, então a localização de um detector de quase-pico que utiliza uma frequência de medição de 1 MHz está colocado lateralmente a 15 metros de uma fase externa da LT. Entretanto, estes parâmetros são para uma simples medida de avaliação do ruído de linha como uma interferência no sistema de comunicações. Para uma avaliação mais criteriosa é necessário levar em consideração três outros fatores, tais como: espectro de frequência, perfil lateral da LT e a distribuição estatística das condições do tempo sobre a LT.

O espectro de frequência mostra a variação do nível de ruído como uma função da frequência de medição. A forma do espectro depende da forma dos pulsos da corrente de corona e a extensão na qual estes pulsos são atenuados por todo comprimento da linha. Assim sendo, a forma da corrente dos pulsos varia com a função modal do corona. Em adição, a forma do espectro de frequência depende da distância de localização do medidor da LT. O espectro de frequências provenientes das medidas publicadas por Pakala e Chartier⁵⁷ de um ruído corona para diferentes localizações de medidas é mostradas na Figura 10.1.1.

⁵⁷ PAKALA, W.E. ; CHARTIER, V.L.. **Radio Noise Measurements on Over Head Power Lines from 2.4 to 800 kV.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90. nº 3. Rew Maio 2003.

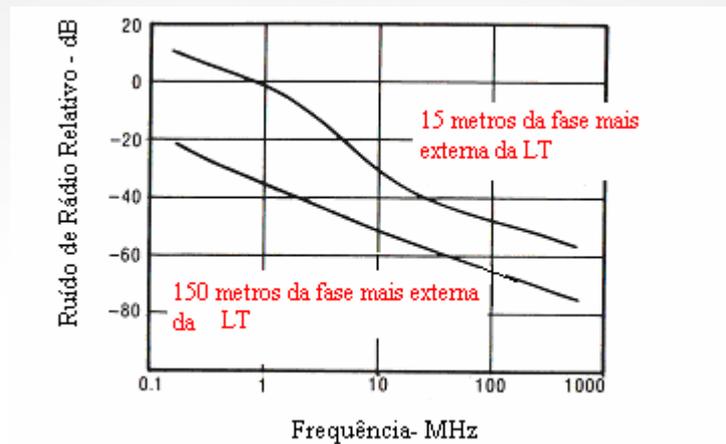


Figura 10.1.1 - Espectro de frequências típico da rádio interferência produzida pelo efeito corona.

O perfil lateral descreve como o nível de ruído cai com o aumento da distância da linha de transmissão. A geometria da linha representa uma importante parte na determinação da forma de como estudar o perfil lateral da LT. O perfil de um circuito simples de configuração horizontal, por exemplo, difere em forma de um circuito de configuração vertical. A uma distância moderada, todas as alturas da linha próximas do ponto de medição influenciam na taxa na qual o nível de ruído cai em relação à distância, a atenuação torna-se maior para linhas com alturas mais baixas. Para longas distâncias, a forma do perfil lateral é praticamente independente da geometria da linha. A frequência de medição é que definirá se a linha é de grande ou moderada distância. Para 1 MHz, por exemplo, a transição da distância moderada para uma de longa distância é de 40-60 metros, ao passo que, para 100 MHz todas as localizações podem ser consideradas como sendo de longa distância, “*long distance*”.

O nível de ruído de rádio varia com o tempo, principalmente com as condições próprias do tempo, isto é, se o tempo apresenta-se bom, seco e com baixa umidade ou se o tempo se caracteriza por um estado de chuvas fortes, grande umidade, precipitações de flocos de neve, etc. Das condições de chuva forte para as condições de tempo bom, os níveis podem variar de 25 a 30 dB. Mesmo dentro de uma particular categoria das condições de tempo, tempo bom, por exemplo, variações de 10 a 15 dB podem ocorrer simplesmente porque o número de fontes corona mudam com o tempo. É possível descrever as variações de ruído em termos estatísticos somente, por exemplo, pela curva de distribuição de frequência acumulativa. Estas curvas mostram a percentagem de

tempo que o nível de ruído está abaixo de um certo valor. O tempo total representado pode compreender todas as condições de tempo ou categorias particulares, tais como, chuva, neve ou bom tempo.

Todas as curvas de distribuição estatística de tempo exibem uma forma de um S invertido. Os pontos de inflexão aparecem como função do percentual de ocorrência das várias condições de tempo. A forma de S invertido pode ser sempre aproximada pelas combinações de duas distribuições Gaussianas, uma para tempo bom e outra para tempo ruim, como mostrado na Figura 10.1.2.⁵⁸

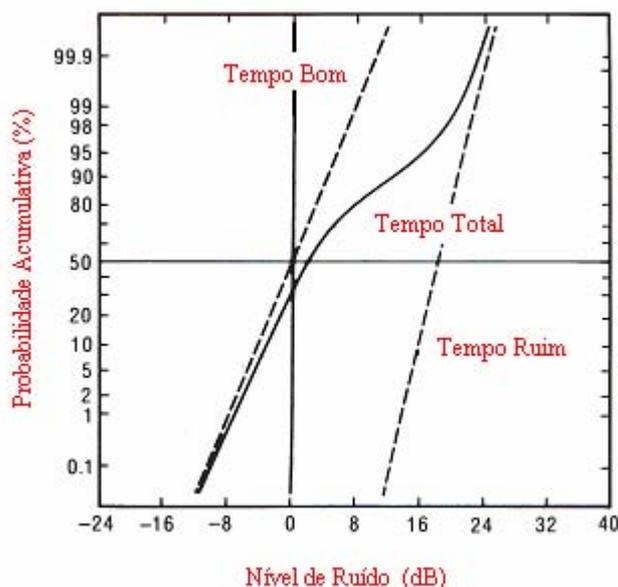


Figura 10.1.2 - Distribuição de frequência acumulativa do ruído de rádio em qualquer tempo e aproximações pela distribuição Gaussiana

10.2 GEOMETRIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Avaliando todas as opções possíveis para reduzir ou limitar todos os níveis de rádio ruído produzidos por uma linha de transmissão, o projetista deverá ter uma especial atenção na geometria da LT. Em termos gerais, qualquer modificação na geometria da linha que resulte na redução do gradiente de tensão na superfície dos condutores reduzirá os níveis de rádio ruído desta linha.

⁵⁸ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J. **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.212.

As configurações de uma LT são constituídas de circuitos simples e circuitos duplos. No caso de circuitos simples, estes podem ter uma configuração horizontal, vertical ou em delta, conforme mostra a Figura 10.2.1.

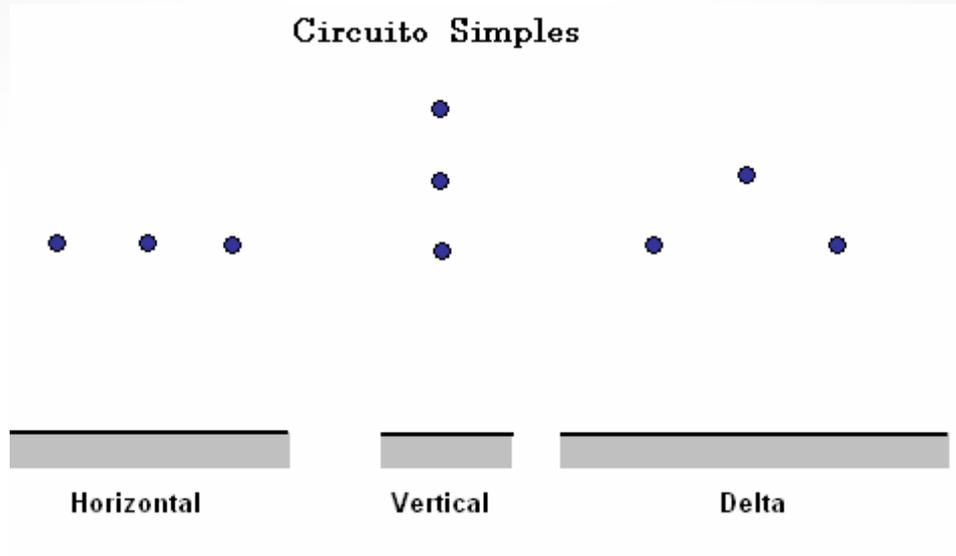


Figura 10.2.1 - Configuração dos condutores para caso de circuitos simples

Para o caso de circuitos duplos as configurações dos condutores são as apresentadas na Figura 10.2.2.

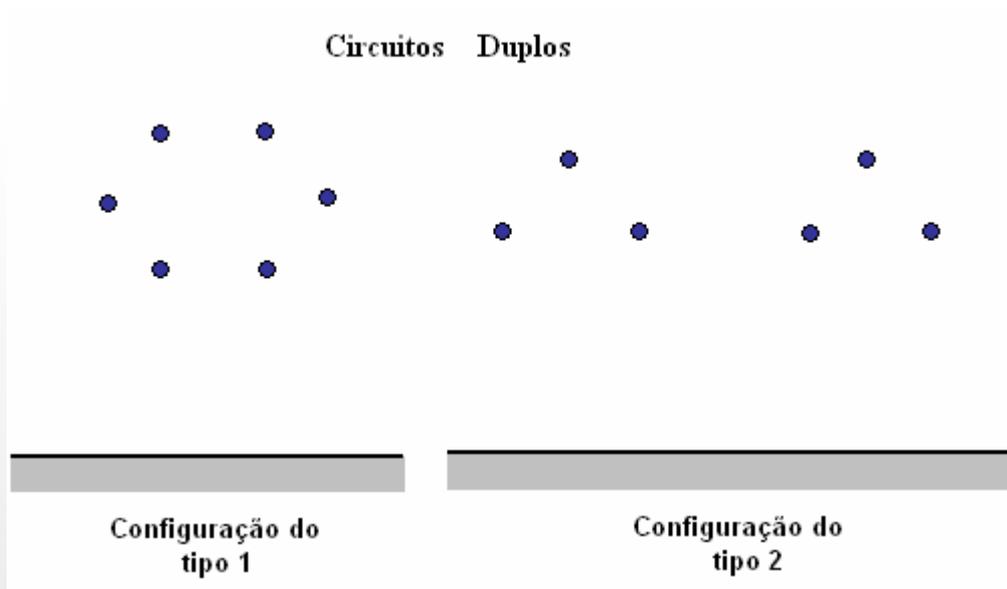


Figura 10.2.2 - Configuração dos condutores para caso de circuitos duplos

Os parâmetros que têm maior influência nos níveis de rádio ruído são:

- Número de condutores em um feixe da fase.
- Diâmetro dos condutores da fase.

Um aumento de um ou de outro parâmetro resultará na diminuição do rádio ruído. Por exemplo, um feixe de condutores de fase de 3 x 33 mm, o qual deve ser usado para uma linha de 500 kV, produzirá menor ruído que um feixe de condutores 2 x 41 mm, embora os dois feixes possuem a mesma quantidade de material. O espaçamento dos condutores dentro do feixe produz um efeito muito complexo nos níveis de ruído da LT. Qualquer conjunto de condutores tem um espaçamento otimizado, acima ou abaixo destes valores o nível de ruído tende a aumentar.

Aumentando o espaçamento entre as fases de um circuito simples de LT diminuirá o gradiente de tensão dos condutores. Entretanto, este método não é muito econômico, segundo Comber e Nigbor⁵⁹. Para um circuito duplo de uma LT, o conjunto resultante depende da extensão nas fases relativas dos dois circuitos. Aumentando a altura da linha tem-se somente um pequeno efeito no gradiente do condutor, mas pode ter, às vezes, efeito mais significativo no perfil lateral do ruído de rádio. Para distâncias muito grandes de linha, os níveis de ruído podem ser aumentados além dos seus níveis originais.

10.3 CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DOS CONDUTORES

Para orientação e controle do projetista de uma LT, as condições de superfície do condutor apresentam uma importante parte na determinação dos níveis de rádio ruído, tanto nas condições de tempo bom como de tempo de chuva forte. Os níveis de ruído mais baixos são provenientes de condutores limpos e secos. A acumulação de insetos e partículas de vegetais aumentará os níveis de ruído de rádio nas condições de tempo bom. Similarmente, a ação do ruído de rádio será prejudicada se a superfície dos condutores for arranhada ou riscada, desde que estas irregularidades atuem como fontes de corona.

⁵⁹ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J. Radio Noise. **Transmission Line Reference Book**. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982.

Entretanto, as condições de superfície de um condutor novo em tempo ruim são importantes por outro ponto de vista. Os novos condutores geralmente possuem uma parte da superfície gordurosa que devido à presença da água da chuva provocam formações de gotículas em torno da superfície. Conseqüentemente, nos condutores de feixe, as gotas de água, que são fontes de corona, estão presentes na região de gradiente máximo em todos os condutores do feixe. Em tempo ruim, os condutores energizados e expostos ao tempo por alguns meses exibem uma diferente propriedade causada pelas gotas de água, elas ficam localizadas no fundo dos condutores. Nestes casos, alguns condutores do feixe conservam gotas de água nos pontos de máximo gradiente, mas os níveis de ruído tendem a ser menores. Este efeito é particularmente notado nos casos de chuva fraca e gradientes de superfície moderados e são menos acentuados para os casos de gradientes altos ou chuvas fortes.

10.4 CRITÉRIOS DE RUÍDOS TOLERÁVEIS

Na prática não é correto dizer que um nível particular de ruído de uma linha de transmissão cause ou não interferências, porque níveis de ruído ambientais e intensidade de sinais recebidos representam importantes papéis em todos os problemas de interferências. Uma linha considerada ruidosa em uma área rural onde ambos, o ruído ambiental e a intensidade de sinais são baixos, pode ser considerada moderada em uma área urbana onde a intensidade dos sinais e o ruído ambiental são altos. Melhor do que usar níveis de ruído absolutos como critério para níveis de interferência, é mais lógico utilizar mediadas relativas, tais como relação sinal/ruído (SNR). Este parâmetro pode ser usado em diversos estudos para mostrar o efeito do ruído nas linhas de transmissão na faixa de rádio AM e na recepção da faixa de operação de TV. Embora o estudo aqui apresentado é referido à rádio interferência (RI), valores aproximados são utilizados para identificar as taxas de interferência de ruído em qualquer dispositivo de comunicação⁶⁰.

⁶⁰ COMBER, M.G. ; NIGBOR, R.J. **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.214.

10.4.1 Relação Sinal/Ruído

A relação sinal/ruído, embora seja auto-explicativa, é definida como sendo a relação entre a potência média do sinal, com uma dada largura de banda, e a potência média do ruído na mesma largura de banda. Entretanto, para o caso da RI, uma definição alternativa pode ser empregada: a relação da intensidade de sinal, medida por um instrumento particular, neste caso, antena e medidor, e a intensidade de campo do ruído na mesma localização.

A relação sinal/ruído é responsável pela inteligibilidade na recepção, determinando a qualidade dos sistemas eletroeletrônicos e de telecomunicação.

Se um sinal, por exemplo, é recebido com intensidade de 5 mV/m numa presença de ruído de 500 μ V/m, a relação sinal/ruído neste caso será:

$$\text{SNR} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \text{ V/m}}{500 \cdot 10^{-6} \text{ V/m}} \quad (2)$$

$$\text{SNR} = 10 \quad (3)$$

Sempre o SNR é expresso em termos de dB (decibel), portanto,

$$\text{SNR} = 20 \log (10) = 20 \text{ dB} \quad (4)$$

A intensidade do sinal e do ruído é comumente expressa em termos de decibel e referida a 1 μ V / m, isto é, dB acima de 1 μ V/m, neste caso o SNR é obtido pela subtração do nível de ruído (N) do nível do sinal (S), assim sendo:

$$S = 5 \text{ mV/m} \quad S = 20 \cdot \log \left(\frac{5 \cdot 10^3}{1} \right) \quad S = 74 \text{ dB acima de 1 mV/m} \quad (5)$$

(6)

$$N = 500 \text{ mV/m} \quad S = 20 \cdot \log\left(\frac{500}{1}\right) \quad S = 54 \text{ dB acima de } 1 \text{ mV/m}$$

Então o SNR é dado por:

(7)

$$\text{SNR} = S - N = 74 - 54 = 20 \text{ dB}$$

Para uma boa recepção de sinais de rádio, livres de interferências, é necessário haver uma elevada relação sinal/ruído na entrada do receptor, a qual pode ficar comprometida caso o nível de recepção dos sinais de rádio seja baixo e as condições atmosféricas sejam propícias à geração de ruído em RF na LT. De modo a garantir que os níveis dos diferentes tipos de ruído gerados por uma linha de transmissão e equipamentos associados sejam mantidos abaixo dos limites aceitáveis, são desenvolvidas técnicas de medição baseadas no conceito de nível de referência de uma LT, que é a intensidade de campo medida na frequência de 500 KHz a 20 metros do condutor mais próximo da linha.

10.4.2 Tolerância da radiofrequência

Os pesquisadores da rádio interferência em linhas de transmissão relatam que existe uma certa correlação entre a relação sinal/ruído investigada e medida com um instrumento de detecção de ondas quase de pico e a qualidade de recepção do sinal. Baseado em listas de testes, usando o ruído proveniente das linhas de transmissão, um comitê do IEEE apresentou uma curva de qualidade de recepção do sinal versus quase de pico sinal, em que a relação sinal/ruído, segundo Comberg e Nigbor, é definida como: “*a reasonably good evolution of effect of transmission-line radio noise on the quality of AM broadcast radio reception*”⁶¹. Esta curva é mostrada na Figura 10.4.2.1, onde o eixo das

⁶¹ Uma razoável boa evolução do efeito do ruído de rádio proveniente das linhas de transmissão na qualidade de recepção da faixa de frequência de rádio em AM. IEEE Committee Report. “Transmission System Radio Influence”. IEEE. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS - 84, Nº 8, pp. 714 - 724.

abscissas é graduado em decibel ajustado para SNRs de sinais médios para ruídos quase de pico, enquanto que o eixo das ordenadas é graduado pela a categoria dos níveis da qualidade de recepção do sinal. Normalmente, o valor médio de um sinal está 3 dB abaixo de seu valor quase de pico. Se o limite de tolerância é avaliado como sendo o ponto no qual a qualidade de recepção do sinal torna-se menor do que o seu valor satisfatório, então o nível de interferência de rádio quase de pico de uma LT deverá estar a 20 dB ou mais abaixo da intensidade média do sinal desejado.

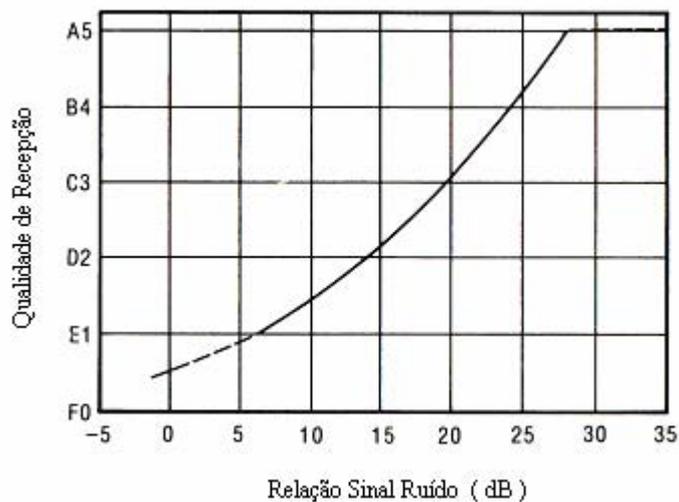


Figura 10.4.2.1 - Qualidade de recepção de rádio AM versus relação sinal/ruído.

Onde: A5 - Inteiramente satisfatório.

B4 - Muito bom.

C3 - Plenamente satisfatório.

D2 - Conversação fácil e inteligível.

E1 - Conversação inteligível com severa concentração.

F0 - Conversação ininteligível.

O problema de tolerância fica então restrito à percentagem da relação sinal/ruído, que originalmente poderia ter sido considerada aceitável, mas que pela introdução do ruído de linha torna-se inaceitável. Geralmente, somente são considerados os sinais das estações de rádio difusão que caem dentro da área

chamada de área primária de cobertura. A FCC (Federal Communications Commission)⁶² definiu três áreas de cobertura:

- Área de serviço primário: a área na qual a onda de superfície não é objeto de interferência contestável ou desvanecimento contestável.
- Área de serviço secundária: a área servida por ondas refletidas e não objeto de interferência contestável ou variações em intensidade.
- Área de serviço intermitente: a área de serviço de recepção das ondas de superfície, entretanto, além da área de serviço primário, e objeto de alguma interferência e desvanecimento.

Deve ser salientado que a determinação do nível de ruído da linha de transmissão depende de muitos fatores não menos importantes do que aqueles apresentados devido às condições de tempo.

Desta forma, todo o problema da determinação do ruído proveniente da LT e de evoluções perturbadoras deve ser estudado do ponto de vista estatístico⁶³.

11 METODOLOGIA APLICADA

Para a execução de cálculos e posteriormente implantação das linhas de transmissão de alta-tensão deve-se levar em consideração as influências que estas ocasionam em sistemas de rádio utilizados nas proximidades, bem como analisar os efeitos causadores de perturbações eletromagnéticas de modo a preservar as condições do meio ambiente.

O estudo da função excitatriz, parte fundamental no desenvolvimento matemático para o cálculo da RI, depende de dados como geometria da LT, diâmetros dos condutores, gradiente elétrico superficial, bem como das condições de superfície dos condutores e condições atmosféricas, como chuva e sol. Essa análise permitirá que o fenômeno perturbador seja instável e flutuante.

⁶² Federal Communications Commission. - **Federal Communications Commission Rules and Regulations**, Vol III. Rev. Abril 2001.

⁶³ MARUVADA, P.S.; TRINH, N.G. **A Basis for Setting Limits to Radio Interference from High Voltage Transmission Lines**. IEEE. Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, N° 5, Setembro de 1975, pp. 1714-1724.

Diversos exemplos analíticos são elaborados neste trabalho de modo a definir parâmetros mínimos que deverão ser seguidos para que se possa otimizar o procedimento de execução e implementação das linhas de transmissão.

A Electricité de France, no centro de pesquisas de Lês Renardières⁶⁴, concluiu que nas condições de chuva forte o nível de perturbação eletromagnética mantém-se estável, definido e reproduzível. Tal fato permitiu que fossem traçadas curvas fornecendo valores para a função excitatriz em função do gradiente superficial dos condutores, o que simplificou sobremaneira os cálculos analíticos. Assim sendo, a função excitatriz pode ser decomposta, numa primeira etapa, em três partes:

1. Gradiente superficial máximo dos condutores.
2. Raio dos condutores individuais.
3. Quantidade de condutores existentes no feixe.

A segunda etapa leva em consideração os estudos das modas de propagação de Clark⁶⁵.

Em um ponto qualquer da linha de transmissão, o campo perturbador é formado pela corrente total de alta frequência que circula nos condutores. Para tanto, esta corrente deve ser encontrada para que se possa prosseguir nos cálculos das rádios interferências.

Verificou-se que os cálculos poderiam ser simplificados se fosse adotada a matriz das modas normalizadas de Clark, bem como valores experimentais de atenuação das linhas.

Ademais, para se obter resultados mais rápidos na análise da rádio interferência e do estudo dos perfis laterais dos campos no solo, utiliza-se os valores equivalentes do campo elétrico, estabelecendo então um campo elétrico fictício situado numa certa profundidade do solo, que depende da resistividade do mesmo e da frequência dos testes.

A metodologia desenvolvida segue as normas nacionais e internacionais de cálculo e considera todos os fatores incidentes na construção de linhas que de

⁶⁴ Direction des Études et Recherches (DER) da EDF - Electricité de France, Estudo dos Serviços Sobre Matéria Eléctrico, situado em Clamart, e dos Laboratórios de Ensaio de Alta Tensão, situados nas Renardières.

⁶⁵ CLARK, C.F.; LOFTNESS, M.O. **Some Observations of Foul Weather EHV Television Interference.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-90, Nº 6, Rew Julho/Agosto 1989, pp 1157 - 1168.

alguma forma estão sujeitas a interferências de rádio, principalmente causadas pelo efeito corona⁶⁶.

A terceira e última etapa da metodologia utilizada determina o nível final de campo elétrico perturbador causado principalmente pelo efeito corona e resultante dos valores obtidos na determinação da função excitatriz, definida na primeira etapa deste trabalho, e pelo campo elétrico, segundo as modas de propagação de Clark.

Na parte final, o trabalho apresenta uma análise do comportamento da rádio interferência mediante o nível de recepção do sistema eletroeletrônico nas imediações, de modo a preservar a qualidade do sinal recebido.

11.1 MODELO ANALÍTICO PARA CÁLCULO DA RÁDIO INTERFERÊNCIA

Desde que foi reconhecido que o ruído de rádio, devido ao efeito corona nas linhas de transmissão, colocou um potencial ameaçador de modo a enfraquecer a recepção dos sinais de rádio difusão em AM, várias propostas têm sido formuladas para o cálculo dos níveis de rádio interferência. Talvez a melhor compilação dos métodos em uso foi a apresentada em 1973 pelo relatório do Comitê do IEEE⁶⁷. Este relatório identifica duas classificações gerais de técnicas de cálculo: métodos comparativos e métodos analíticos. Todos os métodos comparativos têm a mesma forma geral: compara-se os dados medidos de uma linha nova, com uma determinada geometria, com os dados medidos de uma linha tomada como referência, cuja geometria é conhecida e para a qual as medidas já foram avaliadas e os fatores de correção já foram aplicados. A fórmula geral para este caso será:

$$E = E_0 + E_g + E_d + E_n + E_D + E_f + E_w \quad (8)$$

Onde E é o nível de rádio interferência a ser determinado, E₀ é o nível de RI da linha de referência, e os demais termos são fatores de correção ou

⁶⁶ COSTA, G. J. C. **Contribuição ao Estudo de Rádio Interferência**. P. Alegre. CEEE, outubro, 1987.

⁶⁷ IEEE Committee Report. Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. Vol. PAS-92, nº 3. Rew Mai 2001. pp 1092 - 1042.

expressões de ajuste, em dB. Os ajustes dependem das seguintes variáveis correspondentes ao valor de referência:

- Gradiente de superfície do condutor, g .
- Diâmetro dos condutores, d .
- Número dos condutores do feixe, n .
- Distância da LT do medidor, d .
- Frequência de medição, f .
- Condições do tempo, w .

Os métodos analíticos são considerados mais trabalhosos. Eles requerem dados relativos à corrente injetada na unidade de comprimento da linha pelo efeito corona e usa teoria da onda de propagação para calcular as correntes e tensões de radiofrequência na LT. Para isto, os campos de ruído de rádio nas vizinhanças da linha são calculados. Os dados básicos de geração podem ser obtidos dos testes de curto nos condutores em laboratório ou em testes de curto nas linhas de transmissão.⁶⁸

Ambos os métodos possuem vantagens e desvantagens.

As maiores vantagens do método comparativo são:

- ❖ Simplicidade: fatores de correção podem ser avaliados por uma calculadora científica.
- ❖ Exatidão: se os dados de referência são bons e as suas variações são pequenas.

As maiores desvantagens do método comparativo são:

- ❖ Inexatidão: variações em relação ao caso de referência são grandes.
- ❖ Inflexibilidade: os métodos são geralmente aplicados somente para um tipo de linha para a qual os dados de referência são avaliados.

As maiores vantagens do método analítico são:

- ❖ Flexibilidade: os métodos podem ser usados para prognosticar o desempenho do ruído de qualquer geometria de linha, independente do número de circuitos.

⁶⁸ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J. **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.217

- ❖ Geração rápida de dados: geração de dados pode ser obtida por qualquer geometria do condutor ou por aceitação de um condutor que nunca foi testado.

A maior desvantagem do método analítico é a sua complexidade; detalhes computacionais são muito envolventes e trabalhosos.

O presente estudo foi desenvolvido levando em consideração o método analítico por ser mais flexível, mais consistente e mais dinâmico. Por outro lado, um grande número de testes, resultado de muitos anos de pesquisa, possibilita obter resultados com boa exatidão.

11.1.1 Geração da rádio interferência

A presença da rádio interferência proveniente de uma linha de transmissão é determinada por duas propriedades da linha: geração e propagação.

A geração de corona começa pelos efeitos observados de RI, causando pulsos de corrente que são injetados nos condutores. Estas correntes e as tensões associadas e ainda os campos eletromagnéticos se propagam pela linha, resultando em grandes distâncias sujeitas à rádio interferência a partir de um ponto de geração.

Correntes, tensões e campos de RI em qualquer ponto ao longo da linha são usualmente o resultado de contribuições de diferentes pontos desta linha. No caso da RI produzida por um condutor corona, as contribuições são provenientes de uma seção elementar da linha. Entretanto, a RI, resultante de centelhamentos nas ferragens, é composta de contribuições bem definidas de pontos discretos ao longo da linha. Portanto, o cálculo da RI envolve propagação de correntes e tensões ao longo de um sistema de condutores paralelos. A natureza do problema é mostrada na Figura 11.1.1. Uma fonte de RI que está em uma pequena seção da linha de transmissão provocada por corona ou por centelhamento do isolador é injetada em uma fase das três fases da linha de transmissão em relação a uma posição remota do ponto de medida, P. Esta fonte estabelece um conjunto de correntes e tensões de RI na linha, que por conveniência de análise são componentes senoidais de correntes e tensões pulsativas para frequências nas quais os instrumentos de recepção são

sintonizados. As correntes e tensões produzem um campo eletromagnético resultante que se propaga no espaço ao redor da linha e em particular apresenta algum valor para o ponto de medida P. Em geral, a determinação da intensidade de campo em P é complicada pelo fato que as gerações ocorrem não somente em uma fase, mas também em todas as três fases da linha, e não em um ponto simples ao longo da linha, mas ao longo de todas as seções da linha, em ambas as direções do ponto P.

Para frequências de RI ao redor de 1 MHz, os comprimentos das ondas de propagação são geralmente maiores do que as dimensões da linha, altura e espaçamento entre fases, e também maiores que a distância da linha ao ponto de medição. Conseqüentemente, o campo pode ser considerado quase estático e os cálculos dos campos de RI para qualquer localização dentro da vizinhança da linha pode ser determinado de maneira similar a das intensidades dos campos eletrostáticos, usando tensões de radiofrequência em condutores em lugar de tensões de potência de frequências. Assim sendo, para fontes de RI ao longo de todas as seções da linha, o problema é efetivamente reduzido para determinação das tensões de radiofrequência na linha em ponto oposto à localização da medição⁶⁹.

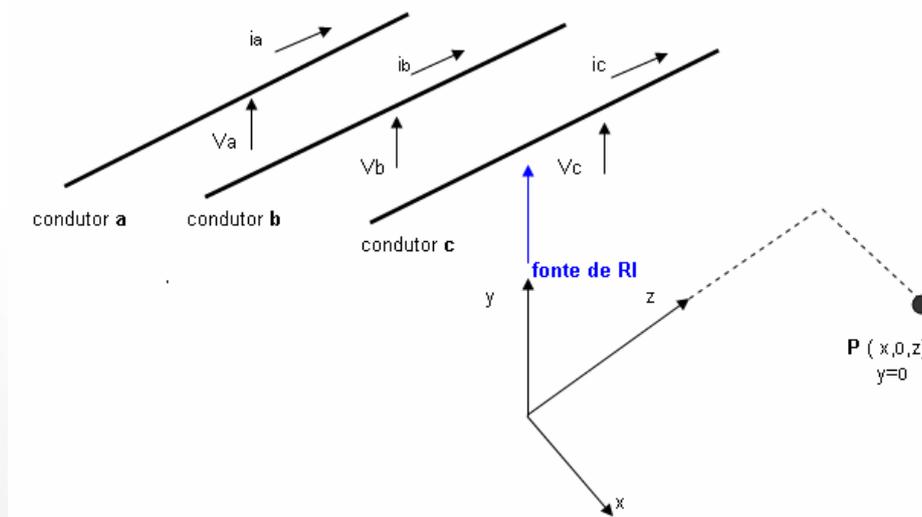


Figura 11.1.1 - Propagação de correntes de RI sobre um sistema de condutores paralelos.

⁶⁹ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J. **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.218.

11.1.1.1 Função de geração da rádio interferência

Para o cálculo da RI de uma linha de transmissão, o efeito corona é quantitativamente expresso em termos da função de geração de RI, Γ . Durante anos em que projetos de UHV eram essencialmente uma pesquisa em linhas de transmissão de uma única fase, um grande número de geometrias de diferentes condutores foi testado, tanto em linhas aéreas como em laboratórios de testes. Os dados de RI coletados durante testes foram usados para desenvolver uma fórmula geral que pudesse ser usada no cálculo das funções de geração para qualquer configuração de condutores de uma LT. A quantidade de geração independe da geometria do solo e depende somente das condições de campo elétrico na vizinhança imediata dos condutores sob teste. Se as condições de campo elétrico ao redor de um condutor em uma das três fases da linha são reproduzidas ao redor de um condutor similar sob teste em um laboratório ou em uma linha sob teste, então a geração de corona por unidade de comprimento é também reproduzida. Portanto, a função de geração determinada sobre uma simples fase pode ser usada como ponto de partida para o cálculo de RI nas três fases da LT.

11.1.1.2 Condutor simples acima do solo

A propagação de corrente e tensão é primeiramente demonstrada para o caso de um condutor simples. Isto é, um simples condutor acima do solo pode ser representado por uma impedância série, Z , por unidade de comprimento, e uma admitância paralela distribuída, Y , por unidade de comprimento da LT. A Figura 11.1.1.2.1 representa uma seção elementar de condutor simples acima do solo.

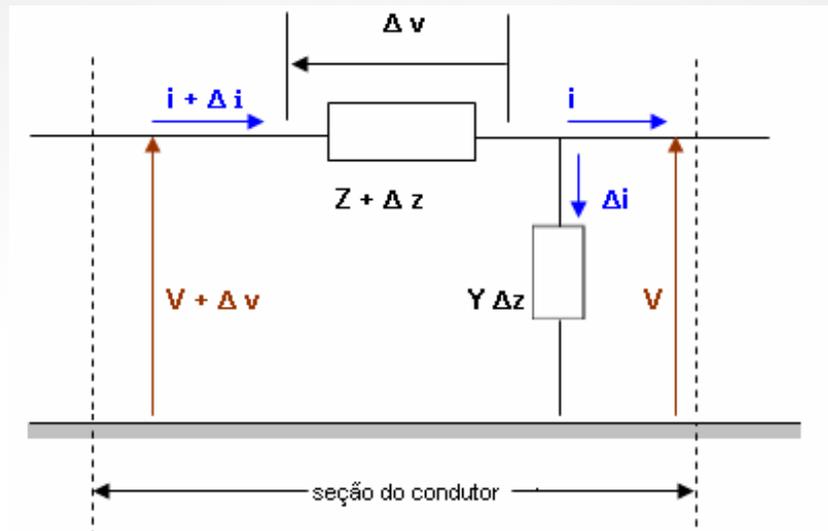


Figura 11.1.1.2.1 - Seção elementar de um condutor simples acima do solo.

A Figura 11.1.1.2.1 apresenta uma seção elementar de comprimento ΔZ do condutor. As equações para esta seção elementar são:

$$[v - (v + \Delta v)] = Z \cdot \Delta Z (i + \Delta i) \quad (9)$$

$$[i - (i + \Delta i)] = Y \Delta z \cdot v \quad (10)$$

No limite Δz se aproxima de zero e (10) torna-se equação diferencial:

$$\frac{di}{dz} = -Yv \quad \frac{dv}{dz} = -Zi \quad (11)$$

A equação diferencial de segunda ordem de (11) será:

$$\frac{d^2 \cdot i}{dz^2} = YZi \quad \frac{d^2 \cdot v}{dz^2} = ZYv \quad (12)$$

As equações (11) e (12) caracterizam a propagação de corrente e tensão ao longo da linha de transmissão. Segundo Comberg e Nigbor⁷⁰, os campos

⁷⁰ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.218.

proporcionados pela corrente e tensão como função da distância de propagação ao longo da linha z , podem ser definidos como:

$$V = V_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad e \quad i = i_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (13)$$

Onde a constante de atenuação da linha, α , é obtida pela relação:

$$\sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (14)$$

A equação (12) representa a tensão e corrente em um ponto, z , da linha de transmissão. Para $z = 0$, a tensão será V_0 e a corrente i_0 . Para uma geração de corona uniformemente distribuída sobre todo comprimento da linha, a corrente total de RI para qualquer ponto de uma linha infinitamente grande é dado por:

$$I = \frac{C}{4\pi \varepsilon \cdot \sqrt{\alpha}} \cdot \Gamma \quad (15)$$

Sendo C , a capacitância em relação ao solo da linha por unidade de comprimento e ε , a permissividade do espaço livre e, ainda, Γ , a função de geração de RI da linha. Então, a correspondente tensão de RI é dada por:

$$V = Z_0 \cdot I \quad (16)$$

Onde Z_0 é a impedância característica da linha. Assim sendo, a intensidade de campo de RI em relação ao solo para uma distância lateral, x , da linha de transmissão será dada por:

$$E = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon \alpha}} \cdot \frac{H}{\left(H^2 + x^2\right) \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{H}{r}\right)} \cdot \Gamma \quad (17)$$

Onde μ é permeabilidade do espaço livre, H , a altura da linha em relação ao solo e, r , o raio do condutor, que no caso de um feixe de condutores será o raio equivalente do feixe.

A intensidade de campo de RI de um feixe de condutores de uma linha infinita acima do solo é mostrada na Figura 11.1.1.2.2, em termos de dB, acima de $1\mu\text{V/m}$, por unidade de geração de RI e uma atenuação de linha, α , de 3,1 dB/km. A figura mostra as curvas de intensidade de campo de RI para alturas da linha em relação ao solo de $H = 15\text{ m}$, $H = 20\text{ m}$ e $H = 25\text{ m}$. A figura não leva em consideração os fatores de atenuação, α , e de geração, Γ , que variam até um certo ponto com a altura da linha. Entretanto, este efeito é pequeno e as curvas podem ser admitidas como representativas. Pode-se notar que existe uma distância lateral para a qual a intensidade de campo é praticamente independente da altura da linha.

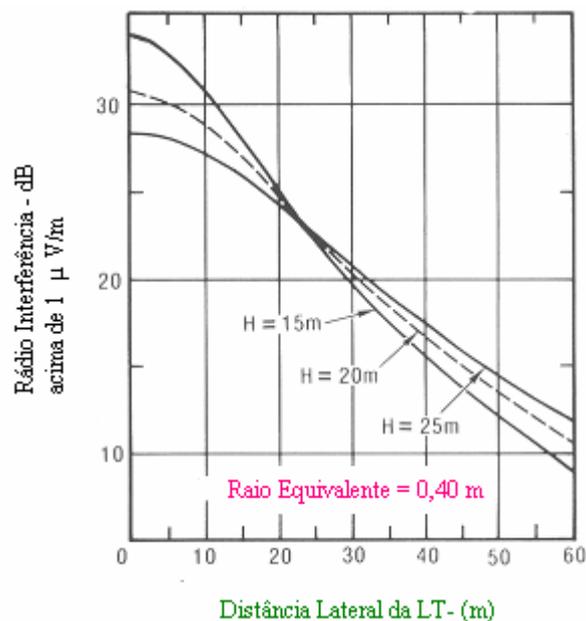


Figura 11.1.1.2.2 - Perfil lateral de RI por unidade de geração de um feixe de condutores em relação ao solo.

Esta análise adotou uma LT de altura uniforme e comprimento infinito. Na prática, a altura da linha varia com a flecha do condutor e com o nível do terreno. Estas variações são resolvidas com o emprego de algumas alturas equivalentes, usualmente considera-se uma altura média. Para fins de cálculos se admite a altura da linha mais um terço da flecha.

Praticamente uma linha pode ser considerada infinita se o ponto de medição está a 8 km ou mais de uma terminação ou troca brusca de direção, na qual os pontos de reflexão das ondas de propagação podem ser desprezíveis. A

contribuição para a intensidade de campo de fontes que estão a mais de 8 km de distância é insignificante⁷¹.

11.1.1.3 Linhas de múltiplas fases

A equação (12) pode ser reescrita para linhas de múltiplas fases, resultando em matrizes para corrente e tensão da forma:

$$\frac{d^2}{dz^2} \cdot |i| = Y \cdot |z| \cdot |i| \quad (18)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \cdot |V| = |Z| \cdot |Y| \cdot |V| \quad (19)$$

Para um sistema de n condutores [V] e [i] são matrizes coluna de ordem n, enquanto que [Y] e [Z] são matrizes quadradas (n x n). As equações diferenciais podem ser resolvidas de maneira similar a de um condutor simples.

Desta forma, as matrizes (18) e (19) podem ser escritas da seguinte maneira:

$$|V| = |V_0| \cdot e^{-|pv| \cdot z} \quad (20)$$

$$|i| = |i_0| \cdot e^{-|pi| \cdot z} \quad (21)$$

⁷¹ LAFOREST, J.J.: **The Effect of Station Radio Noise Sources on Transmission Line Noise Levels**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-84, N° 9, pp 833-838. Rev. Maio 1998.

Onde:

$$|p_v| = (|Z| \cdot |Y|)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$|p_i| = (|Y| \cdot |Z|)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

A determinação dos fatores exponenciais de atenuação e da subsequente extensão da análise para incluir gerações de RI sobre toda a linha faz estas aproximações muito abrangentes. Uma análise mais conveniente para o modo de propagação em múltiplas fases pode ser realizada usando a técnica de transformação modal.

Quando se analisa um circuito de potência de três fases, é comum considerar as correntes desbalanceadas das três fases da linha serem compostas de três conjuntos de componentes balanceadas, isto é, as componentes seqüenciais positivas, negativas e zero. A impedância e a atenuação presentes em cada um dos modos são diferentes. As correntes e tensões de propagação de RI são tratadas de maneira análoga, usando diferentes conjuntos de modos de propagação.

A teoria da análise modal com vários graus de simplicidade tem sido descrita por Hedmann⁷² e Perz⁷³. Análises mais complexas são estudadas para as perdas naturais dos condutores e da condutividade finita do solo e determinam como estes fatores afetam a atenuação das ondas de propagação ao longo da linha. Uma análise mais simples usa a técnica de transformação modal para casos de linhas de menores perdas e condutividade do solo infinita e levam em

⁷² HEDMANN, D.E.: **Propagation on Overhead Transmission Lines-Theory of Modal Analysis**, IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems. Vol PAS-84, pp 200-211. New Rew Abril 2000.

⁷³ PERZ, M.C.: **Natural Modes of Power Line Carrier on Horizontal Three Phase Lines**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-83, pp 679-686. New Rew Maio 2000.

consideração as constantes de atenuação determinadas ou por cálculo para uma certa classe de linha ou por medidas já realizadas⁷⁴.

Os modos pelos quais as correntes são resolvidas são mostrados na Figura 11.1.1.3.1. Ademais, existem diversas razões para se tratar as propagações por meio de modos. Os motivos mais evidentes para esta afirmação são:

- Os modos são independentes, isto é, eles não interagem;
- Cada modo tem a sua própria impedância;
- Cada modo tem a sua própria constante de atenuação;
- Cada modo pode ser tratado separadamente e após ser combinado com os demais através de uma transformação de retorno para as quantidades de fase iniciais.

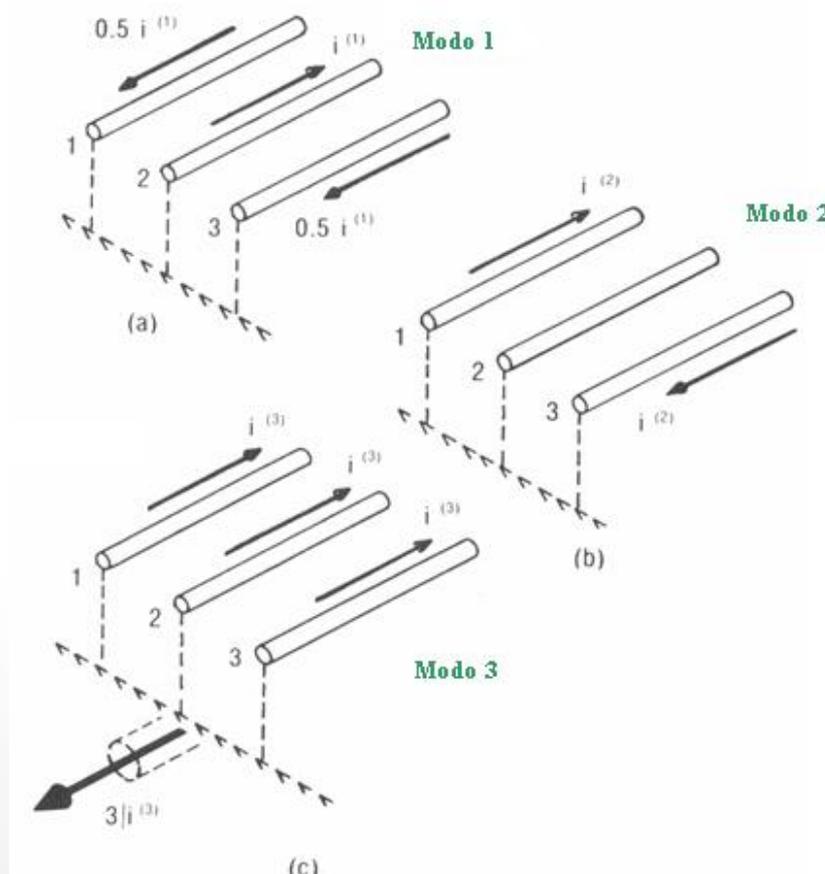


Figura 11.1.1.3.1 - Modos de propagação: (a) modo 1; (b) modo 2 e (c) modo 3.

⁷⁴ ADAMS, G.E., LIAO, T.W., POLAND M.G., TREBBY, F.J.: **Radio Noise Propagation and Attenuation on the Bonneville Power Administration McNary-Ross 345 kV line.** AIEE

A velocidade de propagação será diferente para os vários modos, mas para a análise de RI este efeito não é praticamente considerado.

Intuitivamente, pode-se suspeitar que a atenuação será baixa para o **modo 1**, desde que o sinal se propague em todos os três condutores. Será alta para o **modo 2**, desde que somente dois condutores sejam envolvidos e mais alta ainda para o **modo 3**, desde que a corrente de retorno flua através da resistência de solo. A atenuação será na ordem de 0,1, 1,0 e 5,0 dB/milha para os modos 1, 2 e 3 respectivamente.

Cada modo envolve um diferente conjunto de condutores e o solo.

Existirão tantos modos de propagação quantos condutores envolvidos. Com linhas de três fases e dois condutores terra, existirão 5 modos de propagação. Os modos que envolvem os condutores terra podem ser substituídos por um conjunto equivalente de condutores fase sem os condutores terra. Se cada condutor fase for composto de um feixe de subcondutores, haverá modos envolvendo todos os subcondutores. Estes modos não são importantes porque os subcondutores no feixe são interconectados em intervalos freqüentes, permitindo que todos os modos no feixe sejam equalizados.

As equações (18) e (19) podem ser escritas, segundo Barthold, La Forest e Schlomann⁷⁵ na seguinte forma:

$$\frac{d^2}{dz^2} \cdot |i^m| = |\lambda|^2 \cdot |i^m| \quad (24)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \cdot |V^m| = |\lambda|^2 \cdot |V^m| \quad (25)$$

Onde $|i^m|$ e $|V^m|$ são respectivamente vetores de tensão e corrente e $[\lambda]$ a matriz das constantes de atenuação. Para um circuito simples de um sistema de três fases pode se escrever que:

Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol 78, Par. III , pp 380-388. Rew. April 2002.

⁷⁵ BARTHOLD, L.O; LAFOREST, J.J.; SCHLOMANN: **Radio Frequency Propagation and Attenuation on The American Electric Power Dequine- Olive 345 kV Line**. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol 79, Par. III, Junho 1960, pp 303 - 309.

(26)

$$\frac{d^2}{dz^2} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix}$$

Isto representa três equações diferenciais independentes de segunda ordem, uma para cada modo de propagação. Cada equação tem uma solução da forma:

(27)

$$i_1^m = i_0^m \cdot e^{-\lambda^m z}$$

Onde o índice m refere-se ao número do modo. Equações similares existem para as tensões modais.

Para qualquer ponto em análise, quantidades de fase podem ser transformadas em quantidades modais⁷⁶, e vice-versa, pela aplicação de apropriada matriz de transformação. Por simplificação, a mesma matriz de transformação é aplicada para correntes e tensões. Então:

(28)

$$|P| = |S| \cdot |M| \quad \text{e} \quad |M| = |S|^{-1} \cdot |P|$$

Onde [P] e [M] representam as matrizes de fase e das quantidades modais, corrente e tensão, respectivamente e [S] é a matriz de transformação modal.

As etapas básicas para determinação do campo de RI devido ao efeito corona nas linhas de transmissão de múltiplas fases, supondo que a matriz de transformação modal e as constantes de atenuação da linha são conhecidas, são:

1 - Determinação da magnitude das três correntes geradoras de corona, Γ . Uma, para cada fase, o que resulta em uma matriz de fatores de geração por:

⁷⁶ CLARK, C.F.; LOFTNESS, M.O.: **Some Observations of Foul Weather EHV Television Interference**, IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems. Vol PAS-90, Julho e Agosto 1989.

(29)

$$|\Gamma| = \begin{pmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 \end{pmatrix}$$

2 - Determinação da corrente, i_o , em cada condutor em um ponto $z = 0$ da linha, ao longo da linha, devido à geração de corona no condutor, através de:

(30)

$$|i_o| = \frac{|C|}{2 \pi \cdot \epsilon} \cdot |\Gamma|$$

Onde $[C]$ é a matriz das capacitâncias, igual à matriz inversa dos coeficientes de potencial de Maxwell⁷⁷.

3-Determinação da tensão inicial de fase a partir da corrente inicial de fase por:

(31)

$$|V_o| = |Z_o| |i_o|$$

Onde $[Z_o]$ é a matriz impedância característica da LT.

Se não existem perdas, cada termo de $[Z_o]$ terá uma componente real e uma componente imaginária. A menos que as perdas ou a frequência sejam muito altas, a parte imaginária pode ser desconsiderada e impedância aproximada da matriz de impedâncias de menores perdas, dada por:

(32)

$$|Z_o| = 60 [A]$$

Onde $[A]$ é uma matriz quadrada ($n \times n$) dos coeficientes de potencial de Maxwell e definida pelas equações (43) e (44) e pela Figura 11.1.1.3.2.

⁷⁷ MAXWELL, J.C.: A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford University Press, New York, Rew 2003.

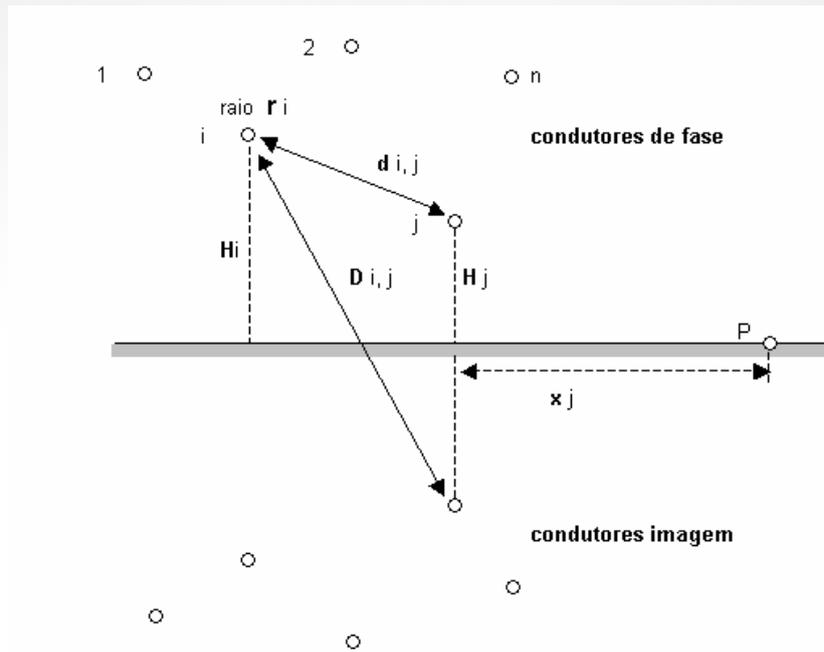


Figura 11.1.1.3 2 - Sistema de n fases com relação ao solo.

4 - Transformação da tensão de fase inicial para tensão modal inicial, V_o^m , através de:

(33)

$$|V_o^m| = |S|^{-1} \cdot |V_o|$$

Onde $|V_o^m|$ é a inversa da matriz de transformação modal de [S]. Determinar os termos da matriz de transformação [S] requer achar os autovetores da matriz [B], dado por:

(34)

$$[B] = [Y] [Z]$$

Onde [Z] é a impedância série da linha e [Y] é a admitância paralela da linha.

5 - Determinação da magnitude da tensão modal para um ponto z da linha, ao longo da linha, pela seguinte expressão:

(35)

$$V^m = V_o^m \cdot e^{-\alpha \cdot z}$$

Onde: α^m , é a constante de atenuação obtida de:

$$\lambda^m = \alpha^m \cdot j\beta^m \quad (36)$$

6 - Transformação para se voltar a ter a tensão de fase, V, por:

$$|V_o| = |S| \cdot |V_o^m| \quad (37)$$

7 - Determinação da intensidade de campo de RI, e_k , para uma distância lateral da linha, devido à tensão, V, por:

$$e_k = |F1F2F3| \cdot |A|^{-1} \cdot \begin{pmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{pmatrix} \quad (38)$$

Onde [F1 F2 F3] é a matriz de fatores de campo, a qual depende da geometria da linha e é definida pela expressão (42) e Figura 11.1.1.3.2.

8 - Integração sobre todo o comprimento da linha para determinar a intensidade de campo total, E_k , devido à distribuição uniforme da corona no condutor, pela seguinte expressão:

$$E_k = \sqrt{2 \int_0^{\infty} e_k^2 dz} \quad (39)$$

9 - Avaliação das contribuições de cada fase da linha E_a , E_b e E_c para achar a intensidade de campo final de RI, levando em consideração a seguinte regra do CISPR⁷⁸:

Sendo, $E_a \geq E_b \geq E_c$, se E_a for maior, igual à E_b , de um valor igual a + 3 dB, então:

$$E_m = E_a \quad (40)$$

⁷⁸ CISPR: Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range 0,15 MHz to 30 MHz. Genova, Suíça, Publicação 1, Rev 2003.

Caso contrário, fazer:

$$E_m = \frac{E_a + E_b}{2} + 1.5 \quad (41)$$

Onde E_a e E_b são os dois mais altos entre os três valores de campo elétrico da rádio interferência.

Para o cálculo das matrizes dos fatores de campo [F1], [F2] e [F3] e ainda da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell [A], segundo Comber e Nigbor,⁷⁹ utiliza-se a Figura 11.1.1.3. 2 e as seguintes expressões:

$$F = \frac{2 \cdot H}{(H^2 + z^2)} \quad (42)$$

$$A_{ii} = \ln\left(\frac{2H}{r}\right) \quad (43)$$

$$A_{ij} = \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right) \quad (44)$$

11.1.1.4 Geração da rádio interferência para o caso de chuva forte

Para o caso particular de um condutor com gradiente de tensão de superfície, a função de geração de RI no caso de chuva forte de um feixe de n condutores com diâmetro d (cm) é dada por:

$$\Gamma(n, d) = \Gamma_r + 38 \log(d/3,8) + Kn \quad (45)$$

⁷⁹ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 1982. p.221.

Onde Γ_r é a geração da RI no caso de chuva forte referida a um condutor com diâmetro de 3,8 cm e K_n o fator de ajuste que depende do número de condutores no feixe.

Na Figura 11.1.1.4.1 a geração de referência Γ_r é dada como uma função do gradiente de tensão do condutor. O gradiente referido é o gradiente máximo médio do feixe de condutores, que é definido como sendo a média aritmética de todos os gradientes máximos de cada condutor no feixe.

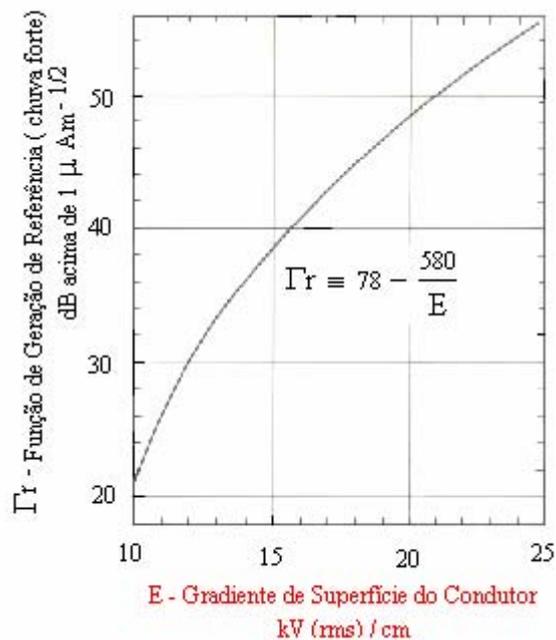


Figura 11.1.1.4.1 - Função de geração de RI no caso de chuva forte.

Como a função de geração de RI é obtida através dos dados medidos de RI, ela dependerá das características dos instrumentos de medição. Neste caso, a função de geração de RI se refere a um instrumento de medição, denominado de detector de quase- pico com largura de banda de 5 kHz e frequência de medição de 1 MHz.

Uma boa aproximação da curva da Figura 11.1.1.4.1 é dada por:

$$\Gamma_r = 78 - \frac{580}{E} \text{ dB acima de } 1 \mu\text{Am}^{-\frac{1}{2}} \quad (46)$$

Onde E é o gradiente de superfície do condutor.

A função de geração é virtualmente independente do número de condutores no feixe para até 8 condutores, de acordo com LaForest⁸⁰. Para mais do que 8 condutores, um fator de ajuste deverá ser aplicado. O fator de ajuste K_n assume os seguintes valores:

$$K_n = 0 \text{ dB para } n \text{ menor ou igual a } 8 \text{ condutores.} \quad (47)$$

$$K_n = 5 \text{ dB para } n \text{ maior do que } 8 \text{ condutores.} \quad (48)$$

As expressões (45) e (46) indicam que, para um feixe no qual o número e o diâmetro dos condutores são fixados, a função de geração varia somente com a média do gradiente máximo do feixe. Ainda que este valor seja bom para os feixes convencionais, nos quais o espaço entre os condutores está na ordem de 10 a 20 vezes o diâmetro do condutor, ele começa a perder sua validade quando o espaço torna-se maior ou menor. O maior erro ocorre para espaços muito pequenos. Isto acontece porque a geração de corona de um condutor em um feixe é função não somente do gradiente máximo do condutor, mas também da distribuição do gradiente em redor da superfície do condutor. Esta distribuição pode ser caracterizada muito bem pelo parâmetro k , que é a relação do gradiente máximo no condutor de superfície pela média dos gradientes no condutor. Para feixes, nos quais os condutores são igualmente espaçados, k é dado aproximadamente por:

$$K = 1 + (n - 1) \cdot d / D \quad (49)$$

Onde n e d são o número e o diâmetro dos condutores no feixe, e D é o diâmetro do feixe.

⁸⁰ LAFORREST, J.J. The Effect of Station Radio Noise Sources on Transmission Line Noise Levels, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-84, N^o. 9, Rew Mai 1998, pp 833-838.

11.1.1.5 Geração da rádio interferência para o caso de tempo bom

Observações foram feitas dos níveis de RI para o caso de tempo bom. O resultado da análise, em uma primeira edição, definiu como satisfatório os níveis de RI para tempo bom simplesmente subtraindo 22 dB dos níveis achados para o caso de chuva forte⁸¹. Mais tarde, entretanto, estes níveis foram considerados altos, principalmente, se forem adotados condutores de diâmetros maiores. Como conseqüência, uma outra aproximação foi admitida por ser considerada mais real, isto é, subtraindo 17 dB do cálculo realizado para níveis de RI com condutores úmidos. Outrossim, a IEEE concorda com valores entre 14 a 20 dB.⁸²

11.1.2 Propagação da rádio interferência

11.1.2.1 Constantes de atenuação

As constantes de atenuação modal são calculadas para cada tipo de geometria de linha. A constante de atenuação depende do número de subcondutores no feixe e do nível de tensão da linha.

A combinação de modificações dos parâmetros da LT, tais como, o aumento do número de subcondutores do feixe, a redução do diâmetro desses subcondutores e o aumento do diâmetro do feixe produzirá um conjunto de resultados que pode aumentar a atenuação modal e reduzir a impedância modal da linha. Estas trocas estão na ordem de 3 a 4 %, tanto para a atenuação como para impedância da linha. O efeito no campo da RI calculado é de magnitude menor do que aquele causado pela função de geração de rádio interferência.

Para o caso de linhas verticalmente dispostas e em configuração delta foram achados valores maiores de variação de suas constantes de atenuação,

⁸¹ KNUDSON, Niels: **Corona Power Losses on Bundle Conductors**. Elteknik, nº 4. New rew 2003.

⁸² IEEE Committee Report. Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-92, Nº 03, pp. 1029 - 1042. Rev. Mai 2001.

segundo Adams⁸³, em suas pesquisas sobre propagação e atenuação dos ruídos de rádio provenientes das linhas de alta tensão.

A variação das constantes de atenuação modal com a resistividade do solo foi estudada pelo cálculo de constantes de atenuação de 10 diferentes linhas de transmissão de configuração horizontal com resistividade de solo em torno de 50 a 1000 ohms. Condutores terra não foram considerados nos cálculos de modo a refletir somente a influência da resistividade do solo. As constantes de atenuação calculadas foram normalizadas para uma resistividade do solo de 100 ohms. O resultado é mostrado na Figura 11.1.2.1.1. As curvas normalizadas desta figura podem ser usadas, segundo Comber e Zaffanella⁸⁴, para corrigir constantes de atenuação modal por efeitos da resistividade do solo.

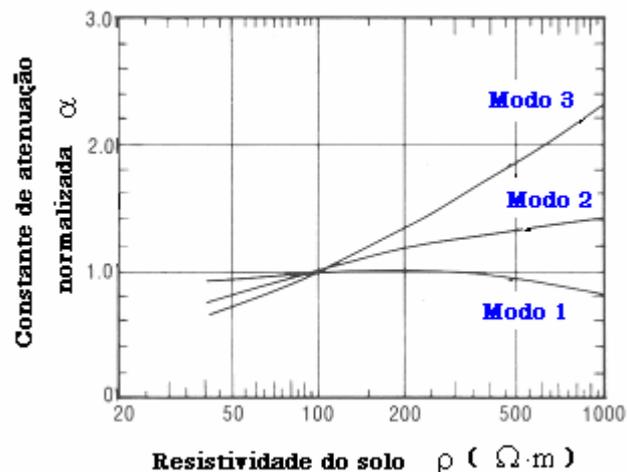


Figura 11.1.2.1.1 - Efeito da resistividade do solo sobre as constantes de atenuação.

11.1.2.2 Estatísticas da rádio interferência

Para a determinação das perturbações da RI provenientes de linhas de transmissão é necessário saber como a rádio interferência está presente em um período de tempo. Se algumas estatísticas da performance da RI nas três fases

⁸³ ADAMS, G.E.; LIAO, T.W., POLAND M.G.; TREBBY, F.J.: **Radio Noise Propagation and Attenuation on the Bonneville Power Administration McNary-Ross 345 kV line**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol 78, Par. III, pp 380-388. Rew Project 2002.

⁸⁴ COMBER, M.G.; ZAFFANELLA. **Audible Noise Reduction by Bundle Geometry Optimization**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS. 92, Outubro 1973.

da linha é avaliada, como é descrito no relatório CIGRE⁸⁵, computar os valores estatísticos da RI de um período muito pequeno de duração de testes está longe de ser satisfatório. Entretanto, uma distribuição estatística simplificada é proposta por Cortina, Serravalli e Sforzini⁸⁶ em seus relatos sobre rádio interferência.

Os valores estatísticos deverão levar em consideração as condições de tempo de uma região de interesse para análise. As amostras deverão passar pelas condições de tempo ruim e de tempo bom. Incluídos na categoria de tempo ruim estão os períodos de chuva, umidade, neve e cerração. Todas as outras condições podem ser consideradas de tempo bom.

O nível de chuva forte é definido, segundo Gary e Moreau⁸⁷, como sendo a média dos valores medidos nas condições de chuva forte, isto é, mais intenso do que precipitações de 1 mm por hora.

Segundo Moreau, não se deve confundir chuva forte com o máximo nível de perturbação da linha de transmissão, porque o nível de chuva forte não ultrapassa um por cento do tempo máximo de perturbação, como mostrou em seu documento preparado para o grupo de trabalho 36.01:

Le niveau fortes pluies ne doit pas être confondu le niveau perturbateur maximal de la ligne. Ce dernier qui peut être défini comme la valeur du niveau perturbateur qui n'est dépassée que pendant 1% du temps, est obtenu à partir de la distribution statistique tous-temps des niveaux⁸⁸

Para entender a relação entre o nível relativo às perturbações eletromagnéticas e o nível de precipitação, no caso de chuva forte deve-se observar a Figura 11.1.2.2.1.

⁸⁵ IEEE Committee Report. CIGRE/IEEE Survey on Extra High Voltage Transmission Line Noise. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-92, N° 3, pp 1019-1028. Rev. Maio 2001.

⁸⁶ CORTINA, R.; SERRAVALLI, W.; SFORZINI, M. Radio Interference Long Term Recording on an Operating 420-kV Line. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-89, pp 881-892. Rev Jan 1999.

⁸⁷ GARY, C.; MOREAU, M.: Predetermination of the RI level of high voltage transmission lines: Part II-Field calculating method. IEEE Summer Meeting, Portland, Oregon, N. Rev 2002.

⁸⁸ O nível de chuva forte não deve ser confundido com o nível máximo de perturbação da linha. Este definido como sendo o nível de perturbação no qual é somente excedido por 1% do tempo, é obtido a partir da distribuição estatística de todos os níveis de tempo. MOREAU, M. IEEE. Document établi par le Groupe de Travail: 36.01 (Perturbations). Summer Meeting Portland, Oregon, 1988.

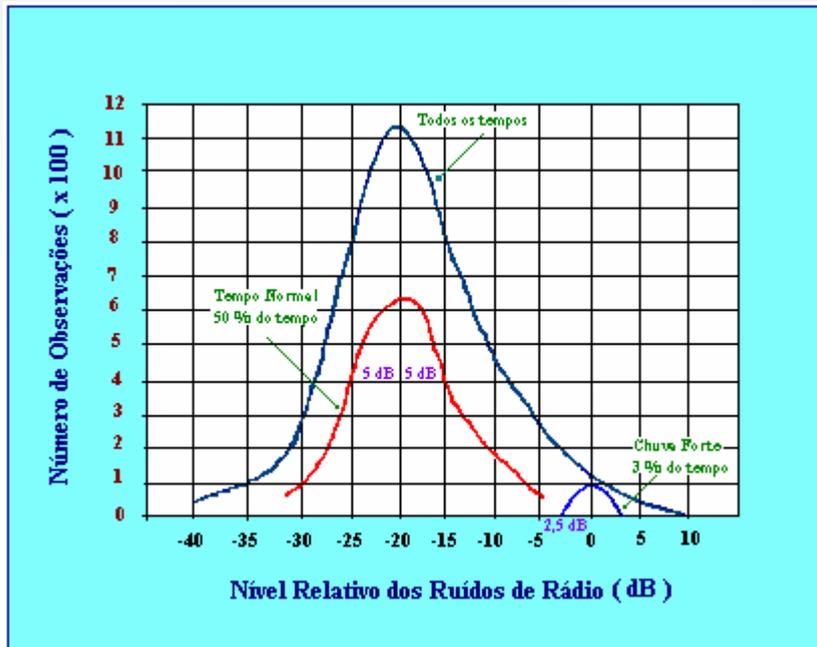


Figura 11.1.2.2.1 - Nível de ruído de rádio em relação ao nível de chuva forte.

11.2 APLICAÇÃO DO CÁLCULO DA RÁDIO INTERFERÊNCIA

Para melhor ilustrar a aplicação do cálculo da rádio interferência proveniente de uma linha de transmissão de três fases, desenvolveu-se um estudo analítico capaz de exemplificar o objetivo do presente trabalho e trazer um conteúdo apreciável na obtenção do campo elétrico final da rádio interferência principalmente oriundo do efeito corona.

Serão abordados dois exemplos práticos com diferentes configurações capazes de assegurar resultados importantes para as conclusões pertinentes à rádio interferência.

Primeiramente será considerada uma linha de transmissão de 230 kV de configuração vertical dos condutores de fase e após uma linha de transmissão de 500 kV de configuração horizontal.

Os exemplos aqui mencionados servirão de amostra para qualquer outra configuração que se fizer necessária para estudos de implantação de linhas de transmissão junto a áreas urbanas onde poderão estar presentes equipamentos eletroeletrônicos e equipamentos de telecomunicação nas proximidades.

11.2.1 Rádio interferência proveniente de uma linha de 230 kV trifásica

Para o cálculo do campo da rádio interferência proveniente da linha de três fases de 230 kV foi utilizado o programa MATHCAD de modo a tornar o desenvolvimento matemático mais dinâmico.

O procedimento analítico apresentado nesta etapa do trabalho para o cálculo do campo perturbador segue os desenvolvimentos descritos no capítulo anterior.

A simulação foi criada a partir de dados de uma linha de transmissão configurada abaixo e introduzida nas equações matemáticas estruturadas no MATHCAD.

Características da linha de transmissão de 230 kV trifásica:

- Conductor singelo do tipo magnólia de 954 MCM, flecha de 3,0 m;
- Condutores colocados verticalmente um em relação ao outro;
- Raio equivalente do feixe: 14,28 mm;
- Frequência de medição do detector de quase-pico: 1 MHz;
- Altura de fixação do primeiro condutor em relação ao solo: $h_1 = 15,10$ m;
- Altura de fixação do segundo condutor em relação ao solo: $h_2 = 19,60$ m;
- Altura de fixação do terceiro condutor em relação ao solo: $h_3 = 24,10$ m.

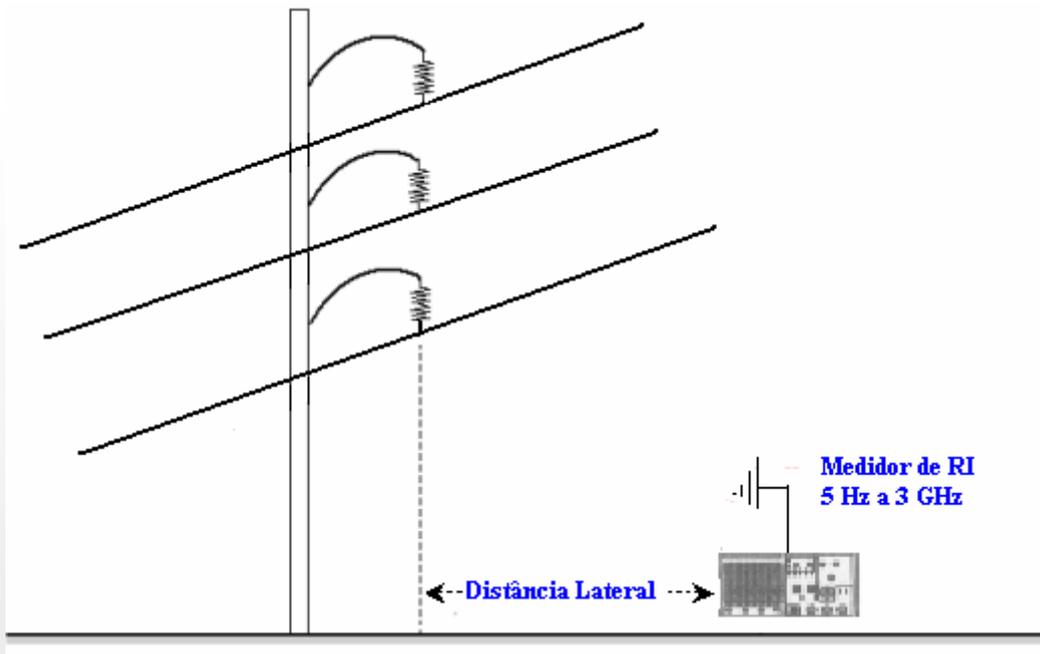


Figura 11.2.1 - Disposição da LT de 230 kV em relação ao ponto de medição.

11.2.1.1 Profundidade de penetração no solo

(50)

$$\rho = 100 \quad \text{ohms / m} \quad \text{resistividade do solo}$$

$$f = 10^6 \text{ Hz}$$

$$\pi = 3.141593$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot f}}$$

$$\delta = 8.921 \text{ m}$$

11.2.1.2 Coeficientes de potencial de Maxwell

(51)

$$h1 = 15.10 \text{ m}$$

$$h2 = 19.60 \text{ m}$$

$$h3 = 24.10 \text{ m}$$

$$Re_{\text{equiv}} = 14.28 \text{ mm} \quad \text{ou} \quad Re = 0.01428 \text{ m}$$

$$\pi = 3.142$$

permissividade do espaço livre

$$\epsilon = \frac{10^{-9}}{36\pi} \left(\frac{\text{F}}{\text{m}} \right) \quad \epsilon = 8.842 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{F}}{\text{m}} \right)$$

$$k = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon} \quad k = 18 \times 10^9$$

Os elementos da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell são calculados pelo programa MATHCAD e apresentados na Figuras 11.2.1.2.1. e 11.2.1.2.2.

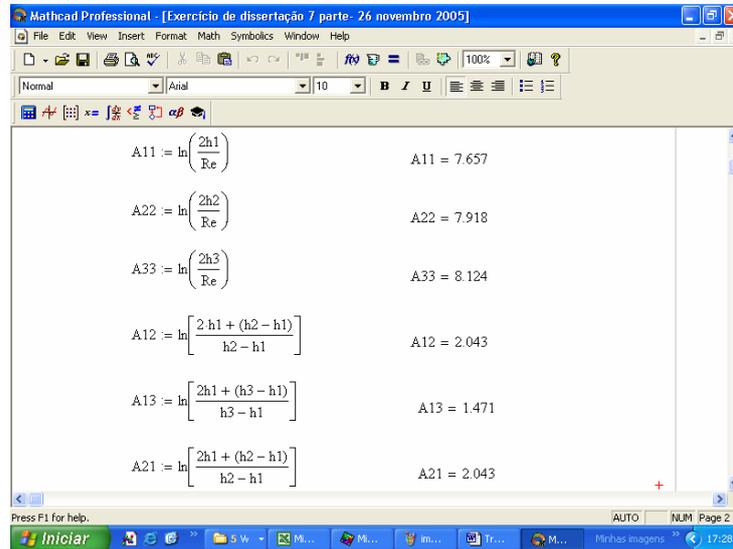


Figura 11.2.1.2.1 - Cálculo dos coeficientes de potencial de Maxwell.

11.2.1.3 Matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell

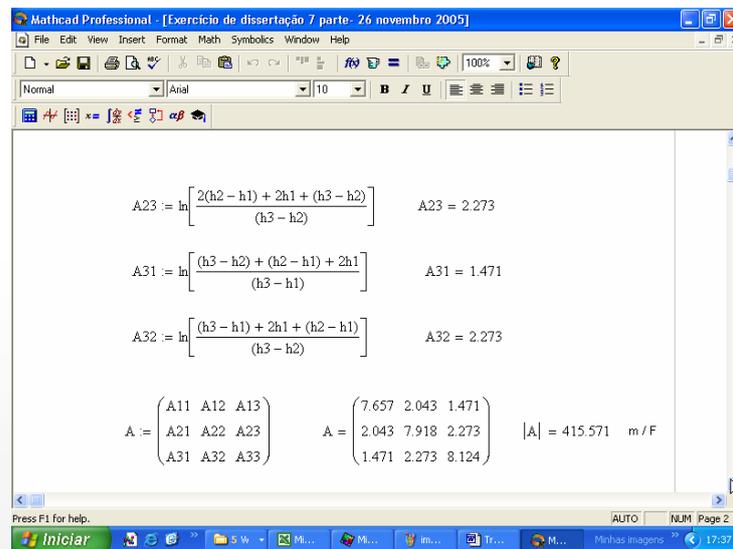


Figura 11.2.1.2.2 - Cálculo da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell.

11.2.1.4 Capacitâncias próprias e mútuas

A matriz das capacitâncias próprias e mútuas é uma matriz inversa dos coeficientes de potencial de Maxwell, mostrada na Figura 11.2.1.4.

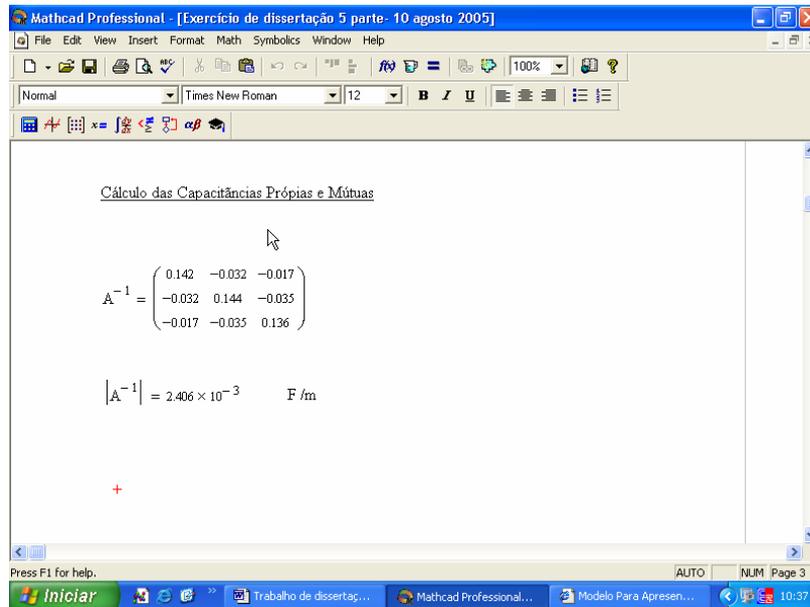


Figura 11.2.1.4 - Cálculo das capacitâncias próprias e mútuas.

11.2.1.5 Impedâncias da linha de transmissão

A permeabilidade μ e a permissividade do espaço livre ε são calculadas por:

(52)

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{H}}{\text{m}} \right) \quad \mu = 1.257 \times 10^{-6} \left(\frac{\text{H}}{\text{m}} \right)$$

(53)

$$\varepsilon = \frac{10^{-9}}{36\pi} \left(\frac{\text{F}}{\text{m}} \right) \quad \varepsilon = 8.842 \times 10^{-12} \left(\frac{\text{F}}{\text{m}} \right)$$

Para o cálculo da impedância série de uma linha de transmissão observa-se as seguintes expressões:

$$Z = |R| + |j\omega L| \quad Y = |G| + |j\omega C| \quad \text{onde} \quad \omega = 2\pi f \quad (54)$$

Onde L é a indutância (henrys) por unidade de comprimento, C a capacitância (farads) por unidade de comprimento e f a frequência (hertz) de medição da RI. Ademais, Z é a impedância série (ohms) por unidade de comprimento e Y a admitância paralela (siemens ou mhos) por unidade de comprimento, ωL a reatância indutiva e ωC a susceptância capacitiva, que valem respectivamente:

$$XL = \omega L = 2 \pi f L \quad \omega C = 2 \pi f C \quad (50)$$

Os elementos da matriz |R| (resistência série) são dependentes da frequência e resultam da soma da resistência de alta frequência dos condutores e dos termos de correção terra, *earth-correction*, que levam em consideração a perda natural de terra, segundo Hedman⁸⁹. Com a perda de terra aumentam os valores dos termos de correção da matriz indutância. Entretanto, para frequências de rádio na ordem de 1 MHz, estes valores são relativamente pequenos e podem ser desconsiderados com uma pequena perda de precisão. Para casos práticos, os elementos da condutância paralela, G, são também muito pequenos e podem ser desprezíveis. A matriz de transformação que resulta desta análise também contém termos complexos. Entretanto, a parte imaginária é, em geral, uma ou duas vezes menor em magnitude do que a parte real e pode ser praticamente ignorada. Portanto, pode-se escrever que:

$$Z = 2\pi f L \quad Y = 2\pi f C \quad (56)$$

Assim sendo, a matriz indutância e a matriz capacitância são calculadas pelo programa MATHCAD e apresentadas na Figura 11.2.1.5.1.

⁸⁹ HEDMAN, D.E.: Propagation on Overhead Transmission Lines - Theory of Modal Analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-84, Rew 2000, pp 200-211.

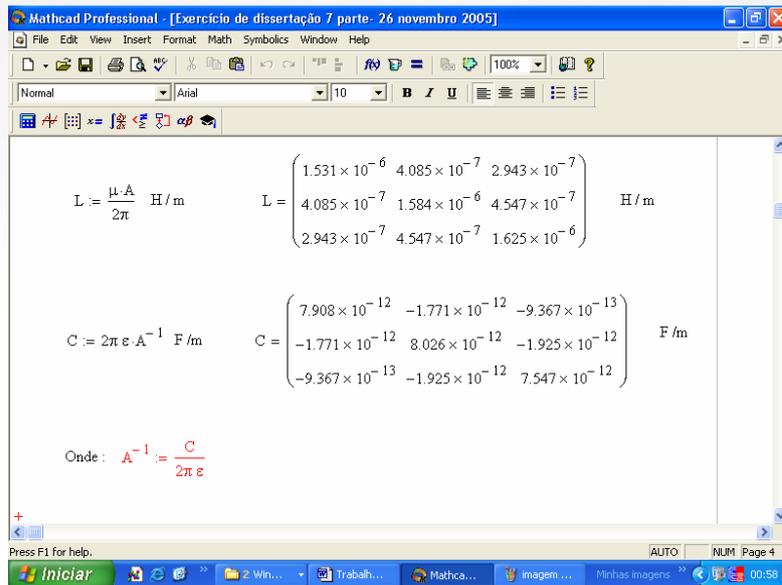


Figura 11.2.1.5.1 - Cálculo das matrizes indutância e capacitância.

Por outro lado, a impedância série e a admitância paralela da LT são calculadas e mostradas na Figura 11.2.1.5.2.

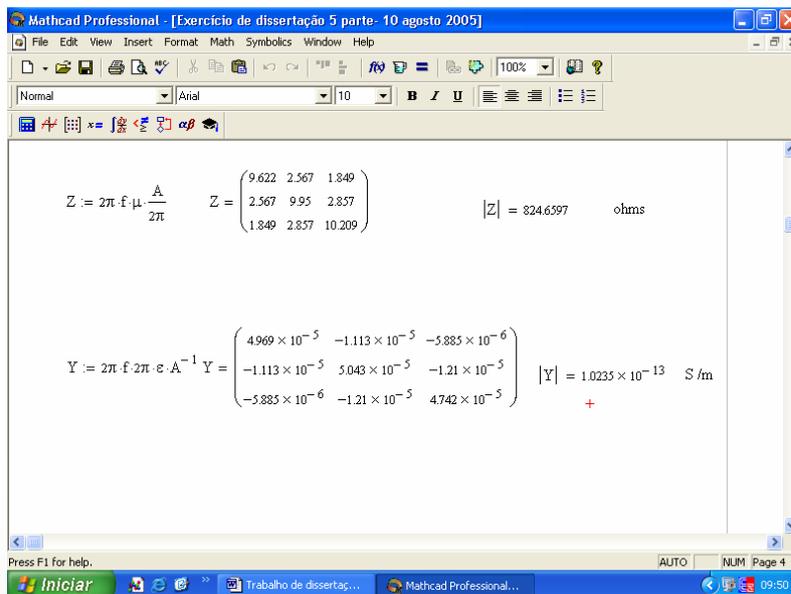


Figura 11.2.1.5.2 - Cálculo da impedância e da admitância da LT.

A impedância característica da LT deve ser calculada para se obter a tensão inicial presente na linha de transmissão, segundo Comber e Nigbor⁹⁰. O valor da impedância característica, Z_0 , é mostrado na Figura 11.2.1.5.3.

⁹⁰ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. p.221. Revised 1987.

Expressões de impedâncias características e suas finalidades são, também, apresentadas por Kraus⁹¹ em seu estudo sobre eletromagnetismo.

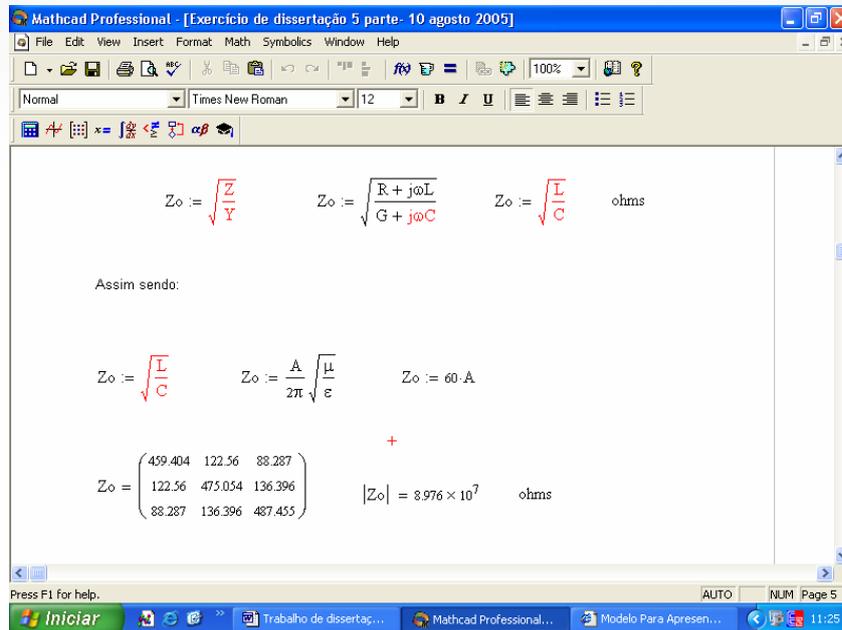


Figura 11.2.1.5.3 - Cálculo da impedância característica da LT.

11.2.1.6 Cargas elétricas dos condutores

A equação eletrostática em termos de tensões de fase e cargas tem sido apresentada na literatura de Clarke⁹², Calabrese⁹³ e Westinghouse⁹⁴ como sendo:

$$\begin{pmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q1 \\ q2 \\ q3 \end{pmatrix} \quad (57)$$

⁹¹ KRAUS, J.D.: **Electromagnetismo** - Ingeniería Eléctrica - El Ateneo, Buenos Aires, p 424. Fourth Edition, New York: MacGraw-Hill,1992.

⁹² CLARK, E.Circuit Analysis of AC Power Systems, vol 1 pp 373-375, 434- 442,New York: John Wiley and Sons, Jan./Feb. 2001, pp. 218 - 222. 7.

⁹³ CALABRESE, G.:Symmetrical Components.pp 289- 298, 371-380.New York:Ronald, Rew 1995.

⁹⁴ WESTINGHOUSE: Electrical Transmission and Distribution Reference Book, pp 749 - 752. East Pittsburgh, Pa. Rew 2002.

Onde q é a carga elétrica do condutor em coulombs por unidade de comprimento, V o potencial do condutor, em relação à terra, em volts e A o coeficiente de potencial de Maxwell, em metros por farad. Deste modo, as Figuras 11.2.1.6a e 11.2.1.6b mostram os valores das cargas nos três condutores de fase: q_1 , q_2 e q_3 .

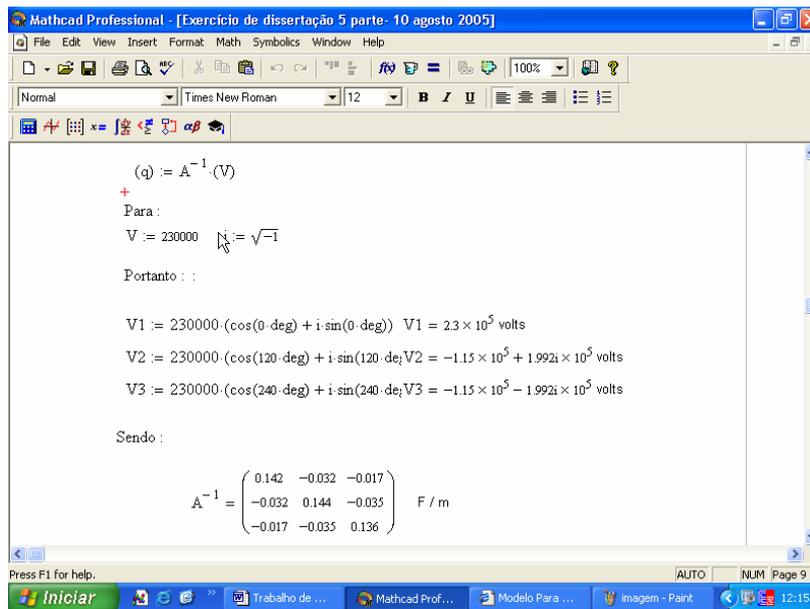


Figura 11.2.1.6a - Cálculo das cargas elétricas dos condutores.

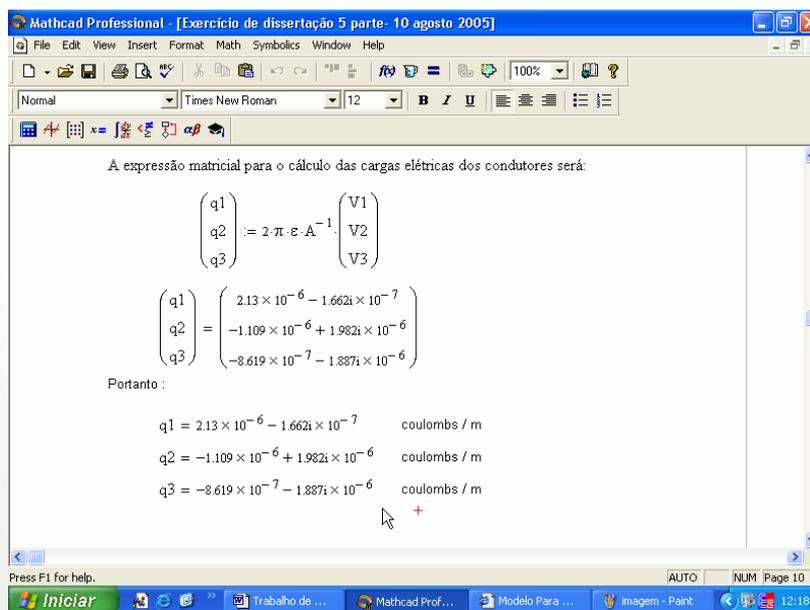


Figura 11.2.1.6b - Cálculo das cargas elétricas dos condutores.

11.2.1.7 Gradiente de superfície dos condutores

Os gradientes de superfície dos condutores nas três fases são demonstrados na Figura 11.2.1.7.

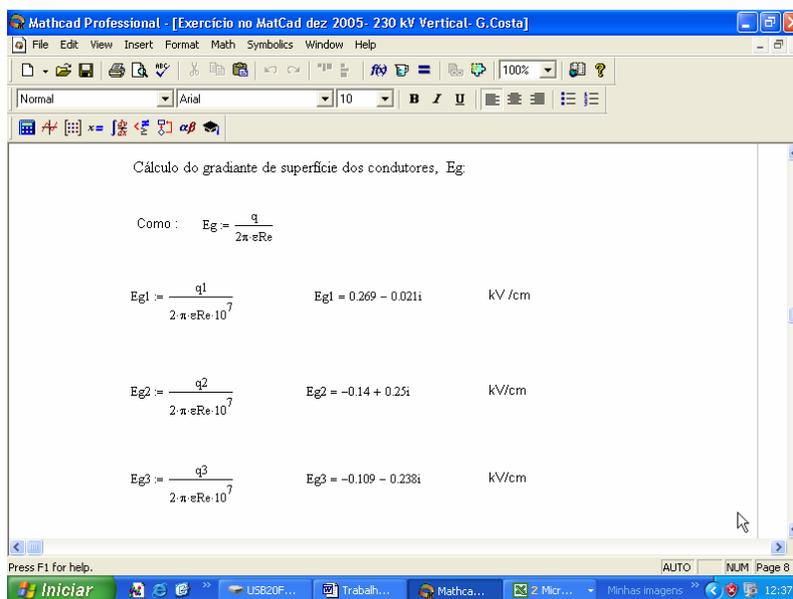


Figura 11.2.1.7 - Cálculo do gradiente de superfície dos condutores.

11.2.1.8 Corrente de geração corona

Determinando as magnitudes dos três geradores de corrente corona, Γ , uma para cada fase resulta em uma matriz diagonal dos fatores de geração, dado por (29), como já foi visto neste trabalho. Desta feita, utilizando a equação (46) definida anteriormente, pode-se calcular a geração corona nas três fases da linha, tomando como referência o gerador corona Γ_r , para o caso de chuva forte de um feixe de n condutores e diâmetro d (cm), como é demonstrado por Comberg e Nigor⁹⁵ e apresentado na Figura 11.2.1.8.

⁹⁵ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p. 223.

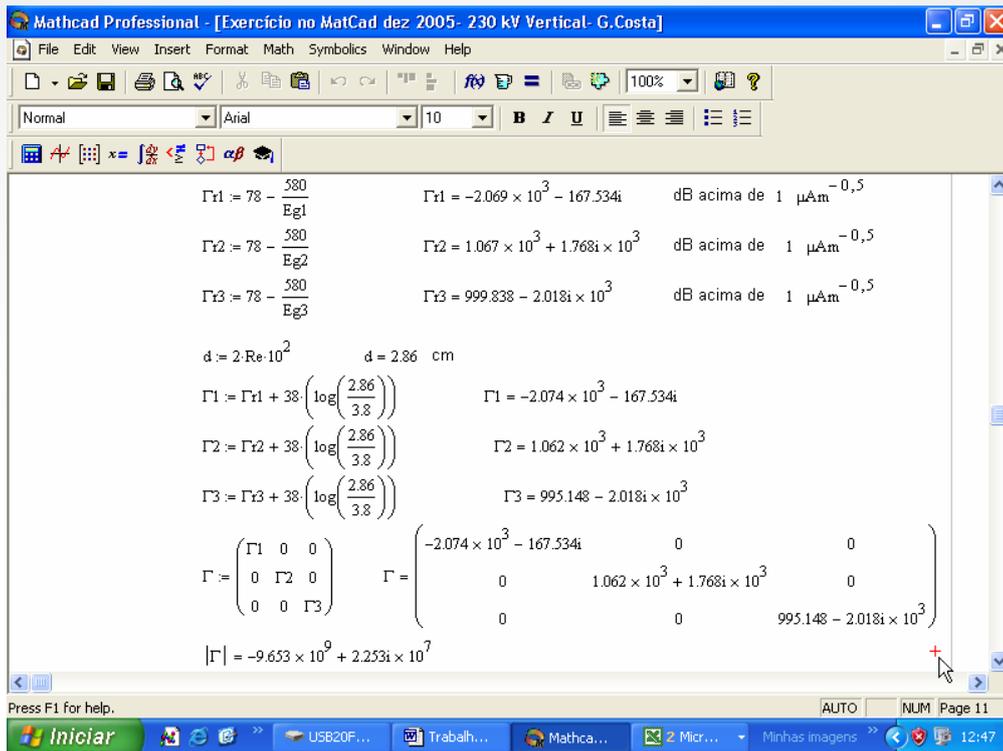


Figura 11.2.1.8 - Cálculo da geração de corona nas três fases da LT.

11.2.1.9 Corrente corona

A geração de corona em uma fase da LT produzirá correntes não somente naquela fase, mas também em todas as demais fases. Para o caso de um circuito simples, de uma linha de três fases, a densidade de corrente gerada é dada em termos de uma função de geração individual, por:

$$i_o = \begin{pmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} \\ i_{31} & i_{32} & i_{33} \end{pmatrix} \quad (58)$$

Onde, segundo Comber e Nigbor⁹⁶, pode ser escrita da seguinte maneira:

⁹⁶ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p.258.

(59)

$$i_o = \frac{C}{2 \pi \varepsilon} \begin{pmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 \end{pmatrix}$$

Como:

(60)

$$A^{-1} = \frac{C}{2 \pi \varepsilon} \quad \Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 \end{pmatrix}$$

Logo a corrente de corona, i_o , passará a ser:

(61)

$$i_o = A^{-1} \cdot \Gamma$$

Por conseguinte, pode-se calcular a corrente de corona como é mostrado na Figura 11.2.1.9.

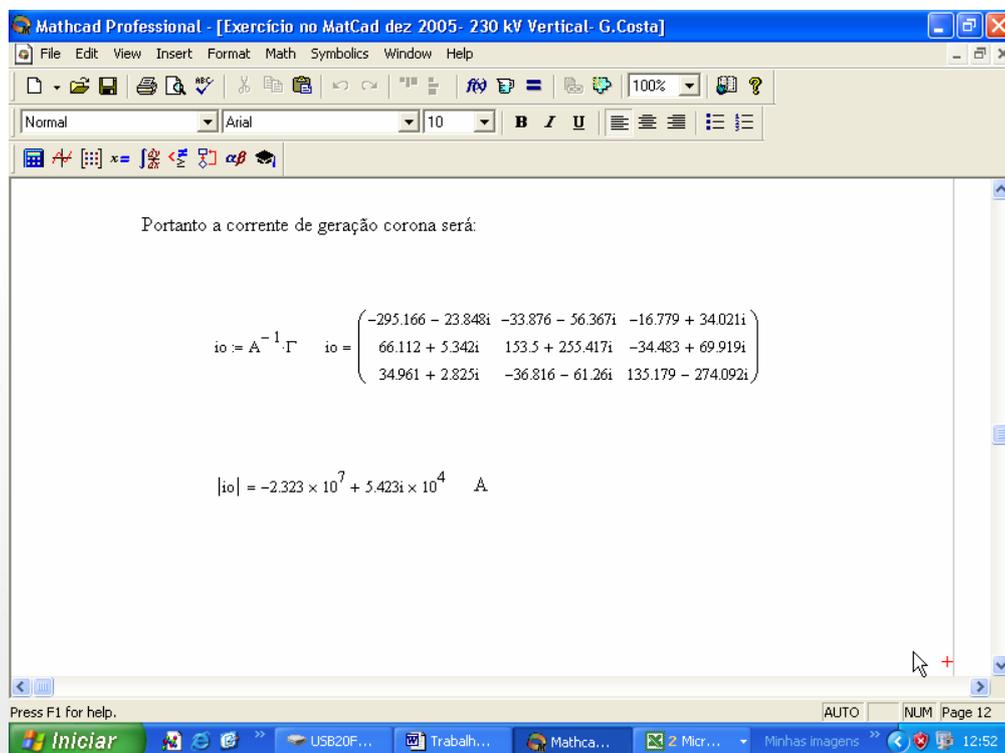


Figura 11.2.1.9 - Cálculo da corrente corona.

11.2.1.10 Tensão corona

Para o cálculo da tensão de rádio interferência produzida pelo efeito corona utiliza-se a expressão abaixo, em que estão relacionadas a corrente e a impedância característica da linha⁹⁷.

$$V_o = Z_o \cdot i_o \qquad Z_o = 60 \cdot A \qquad (62)$$

Assim sendo, a tensão de geração corona é calculada pelo MATHCAD e mostrada na Figura 11.2.1.10.

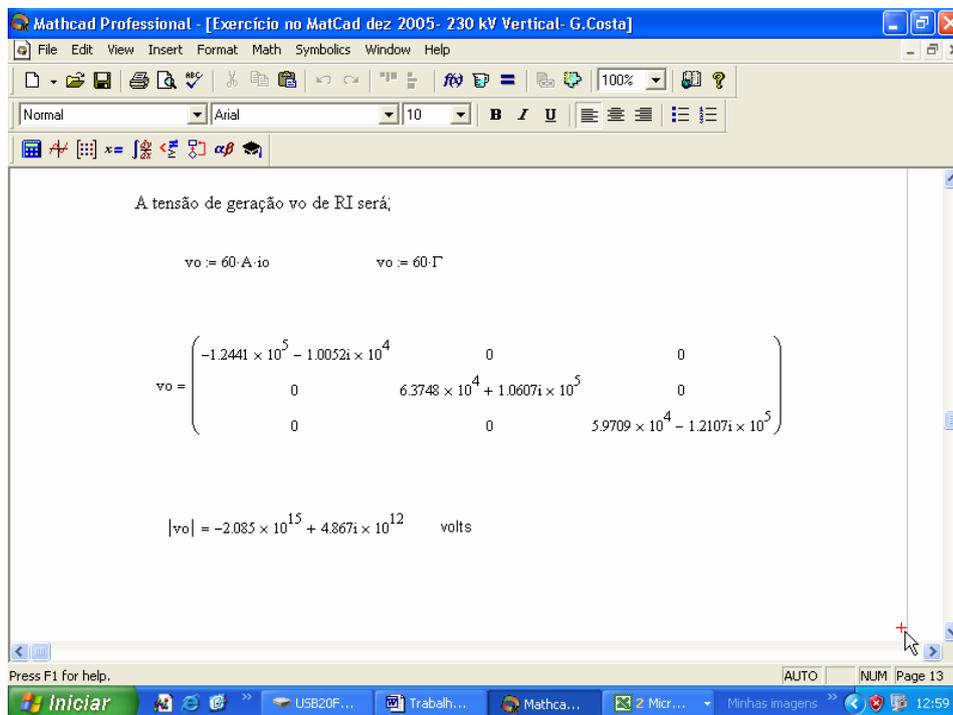


Figura 11.2.1.10 - Cálculo da tensão corona.

11.2.1.11 Matriz de transformação modal

Para calcular a matriz de transformação modal $|S|$ requer que se conheçam os autovalores e os autovetores da matriz $|B|$. A expressão (34) define que a matriz $|B|$ é o produto de duas matrizes: a da admitância e da

⁹⁷ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. p. 259. Rew 1987.

impedância da linha, isto é, $|B| = |Y| \cdot |Z|$. Os termos que constituem a matriz quadrada de B estão relacionados na Figura 11.2.1.11, os quais determinarão os autovetores desta matriz, segundo Coberg e Nigbor,⁹⁸.

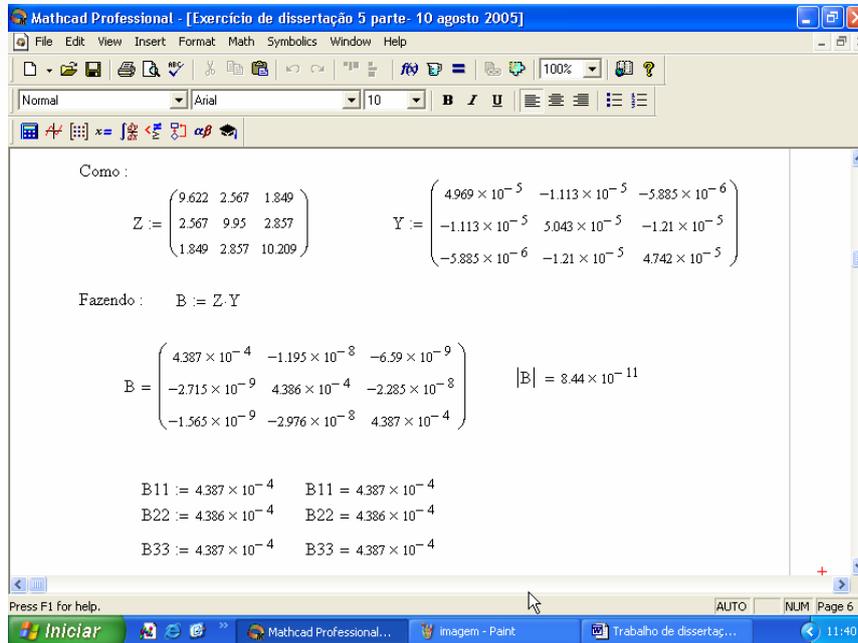


Figura 11.2.1.11.1 – Determinação dos elementos da matriz $|B|$.

Os autovalores da matriz produto $|Z| \cdot |Y|$, isto é, a matriz $|B|$, são apresentados na Figura 11.2.1.11.2.

⁹⁸ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p. 257.

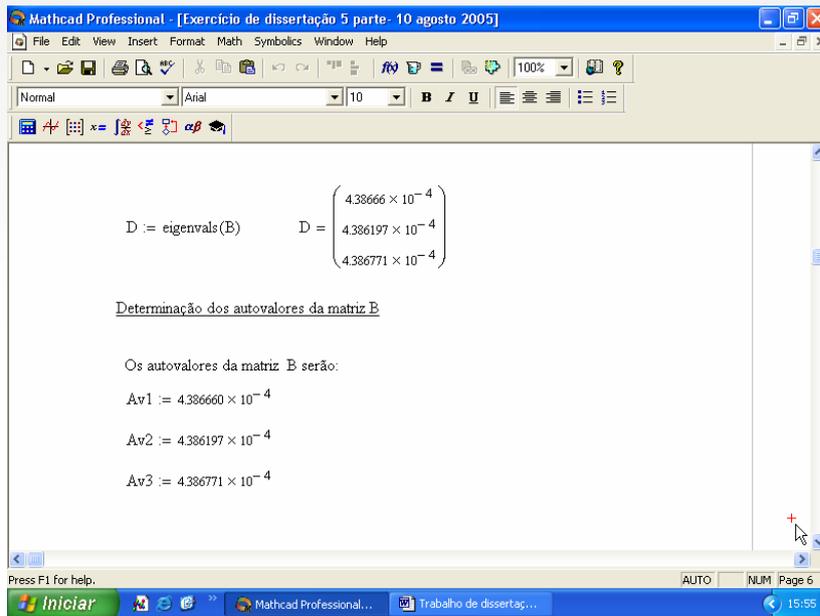


Figura 11.2.1.11.2 - Determinação dos autovalores da matriz | B |.

Os autovetores da matriz | B | são exibidos na Figura 11.2.1.11.3

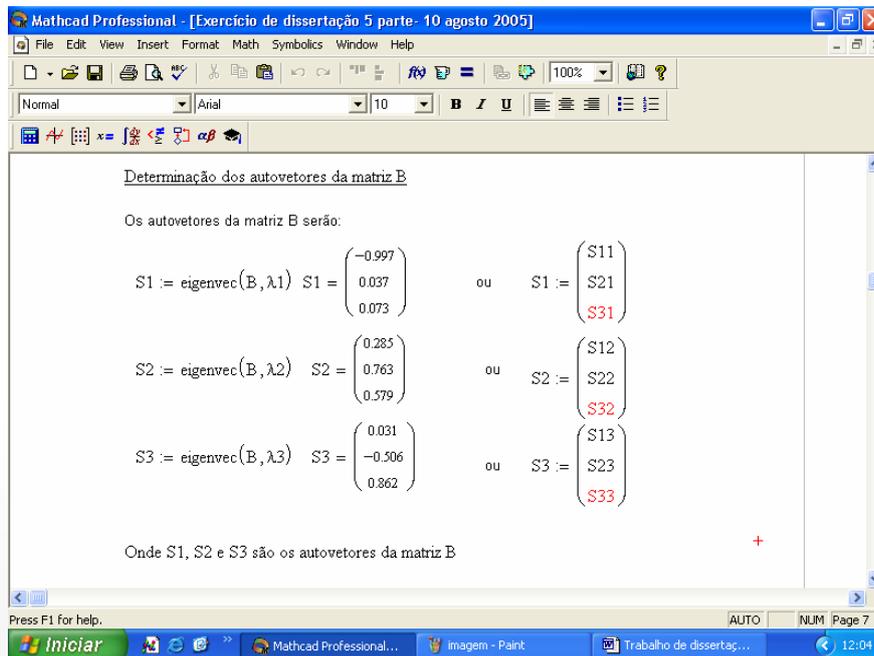


Figura 11.2.1.11.3 - Determinação dos autovetores da matriz | B |.

A composição dos elementos da matriz de transformação modal | S | é realizada tomando os valores resultantes para os três autovetores da matriz | B |

como foi definido por Comber e Nigbor⁹⁹. Os cálculos da matriz de transformação modal $|S|$ e da sua matriz inversa $|S^{-1}|$ são apresentados na Figura 11.2.1.11.4.

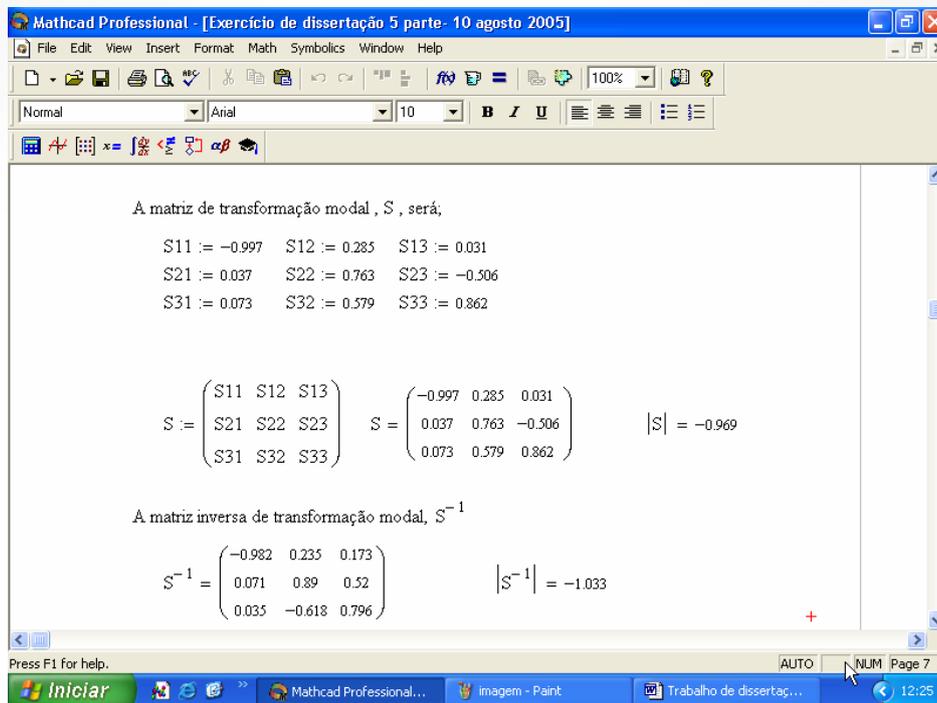


Figura 11.2.1.11.4 - Cálculo da matriz de transformação modal $|S|$.

11.2.1.12 Constantes de propagação modal

Os elementos diagonais da matriz $|B|$, ou seja, B_{11} , B_{22} e B_{33} , vão gerar a matriz das constantes de propagação modal, λ . Para se determinar os termos da matriz das constantes de propagação modal se considera a relação proposta por Comber e Nigbor¹⁰⁰ e apresentada na Figura 11.2.1.12.1.

⁹⁹ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p.257.

¹⁰⁰ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p.257.

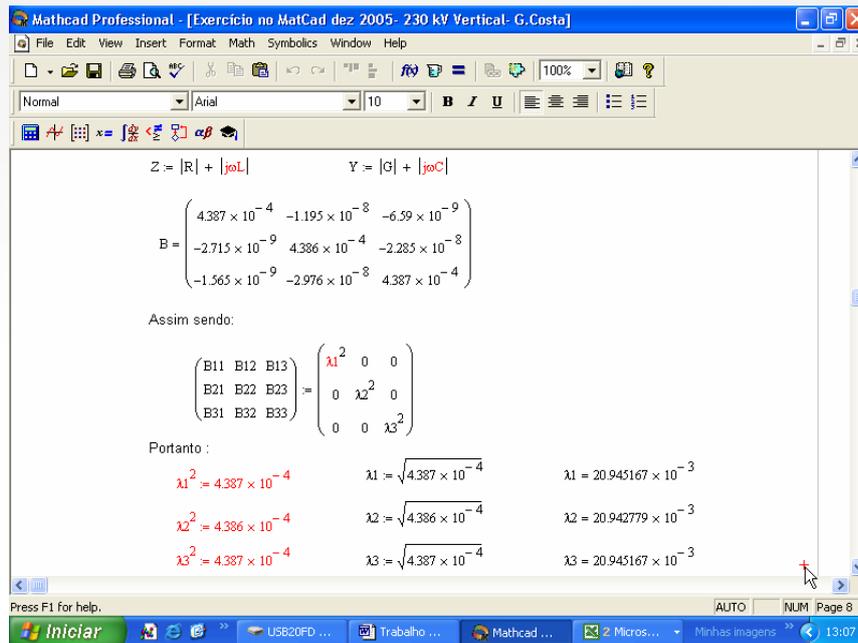


Figura 11.2.1.12.1 - Determinação dos termos da matriz das constantes de propagação modal.

Sabendo-se que, de acordo com estudos sobre RI de Comber e Nigbor¹⁰¹, a matriz das constantes de propagação modal possui a seguinte relação:

(63)

$$|\lambda|^2 = |S|^{-1} \cdot |Y| \cdot |Z| \cdot |S|$$

Então, utilizando o formulário já desenvolvido anteriormente se obtém:

(64)

$$\sqrt{Z \cdot Y} = \alpha + j\beta$$

Por outro lado, segundo Kraus¹⁰² em seu livro sobre eletromagnetismo, a raiz quadrada do produto Z.Y é a constante de propagação de uma linha de transmissão uniforme e infinita.

(65)

$$\lambda = \sqrt{Z \cdot Y}$$

¹⁰¹ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p .256.

¹⁰² KRAUS, J.D.: **Electromagnetismo**, Purcell. Ed. McGraw-Hill, México, 1986.

Outrossim, conhece-se, através de Clayton¹⁰³ em seus estudos sobre ondas planas uniformes, que a constante de propagação λ é um número complexo que possui uma parte real, α , denominada de constante de atenuação, e uma parte imaginária, β , definida como constante de fase. Portanto, a constante de propagação λ vale:

(66)

$$\lambda = \alpha + j\beta$$

A Figura 11.2.1.12.2 apresenta o cálculo da constante de propagação λ para as três fases da LT.

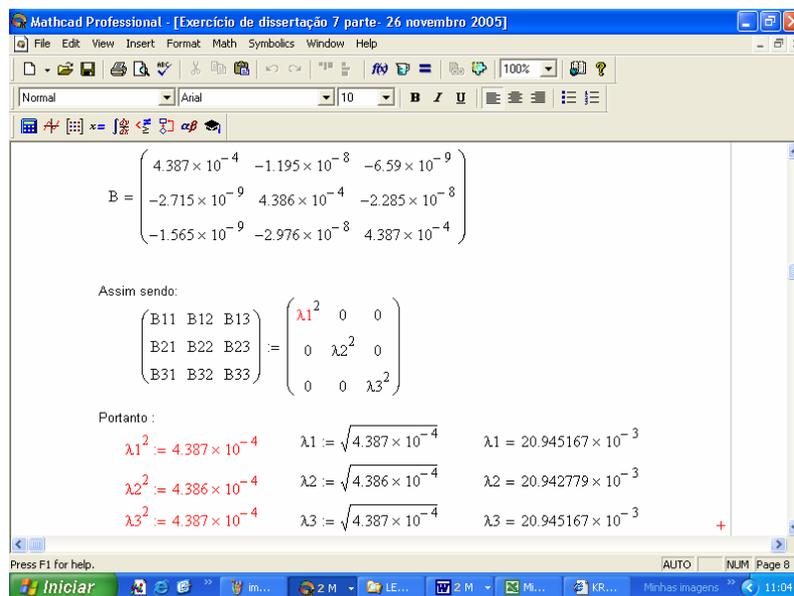


Figura 11.2.1.12.2 - Cálculo da constante de propagação λ para as três fases da LT.

Ademais, como a parte imaginária é geralmente uma ou duas vezes menor que a parte real, segundo conclusões de Comber e Nigbor¹⁰⁴, em suas análises sobre matrizes de transformação modal, esta parte pode ser desprezível, resultando para as constantes de atenuação os seguintes valores:

¹⁰³ CLAYTON, R.P: **Electromagnetics for Engineers with Applications to Digital Systems and Electromagnetic Interference**. John Wiley & Sons. INC, 2004, p. 207.

¹⁰⁴ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto , CA. Rew 1987. p. 258.

$$\alpha_1 = 20.945167 \times 10^{-3} \text{ nepers / m}$$

$$\alpha_2 = 20.942779 \times 10^{-3} \text{ nepers / m}$$

$$\alpha_3 = 20.945167 \times 10^{-3} \text{ nepers / m}$$

11.2.1.13 Transformada modal da tensão de geração corona

A transformada modal da tensão de geração corona vem da rádio interferência para um ponto do campo elétrico da linha de transmissão é definida por Comber e Nigbor¹⁰⁵ e apresentada na Figura 11.2.1.13.

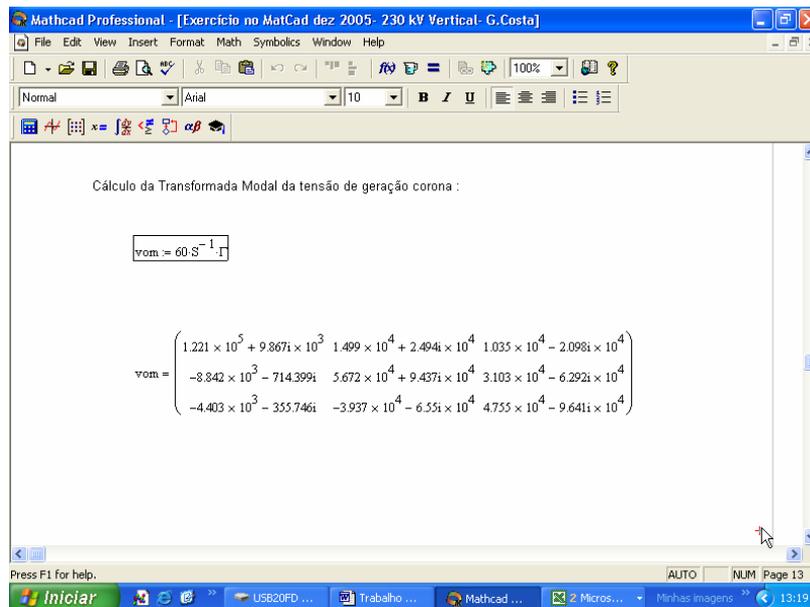


Figura 11.2.1.13 – Cálculo da transformada modal da tensão de geração corona.

11.2.1.14 Fatores de atenuação

Parte da tensão modal de geração corona se propagará em uma direção do ponto de geração e outra parte em outra direção ao longo da linha. Para uma

¹⁰⁵ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, Rew 1987.p. 259.

distância, z , cada componente modal terá sido atenuada de um valor de tensão modal de campo elétrico da LT, segundo Comber e Nigbor¹⁰⁶, valendo:

$$|v_m(z)| = \frac{1}{2} |e^{-\alpha_m(z)}| \cdot |v_{om}| \quad \text{ou} \quad |v_m(z)| = 30 |e^{-\alpha_m(z)}| |S^{-1}| \cdot |\Gamma| \quad (68)$$

Onde: $|e^{-\alpha_m(z)}|$ é a matriz diagonal dos fatores de atenuação e α_m é a parte real da constante de propagação complexa modal, denominada de constante de atenuação modal. A parte imaginária da expressão (69) é desconsiderada por ser muito menor do que a parte real.

$$\lambda_m = \alpha_m + j\beta_m \quad (69)$$

Os valores das tensões modais podem ser transformados novamente em tensões de fase, como mostra a expressão (70).

$$|v(z)| = 30 |S| |e^{-\alpha_m}| |S^{-1}| |\Gamma| \quad (70)$$

Ademais, para se determinar os elementos da matriz dos fatores da atenuação considera-se para os valores de atenuação modais da LT, em uma frequência de medição de 1 MHz, como sendo:

$$\alpha_{m1} = 20.945167 \times 10^{-3} \quad \text{nepers / m}$$

$$\alpha_{m2} = 20.942779 \times 10^{-3} \quad \text{nepers / m}$$

$$\alpha_{m3} = 20.945167 \times 10^{-3} \quad \text{nepers / m} \quad (71)$$

A matriz dos fatores de atenuação, AL, será formada e calculada, desta feita, e os resultados apresentados na Figura 11.2.1.14.

¹⁰⁶ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA, Rew 1987. p. 259

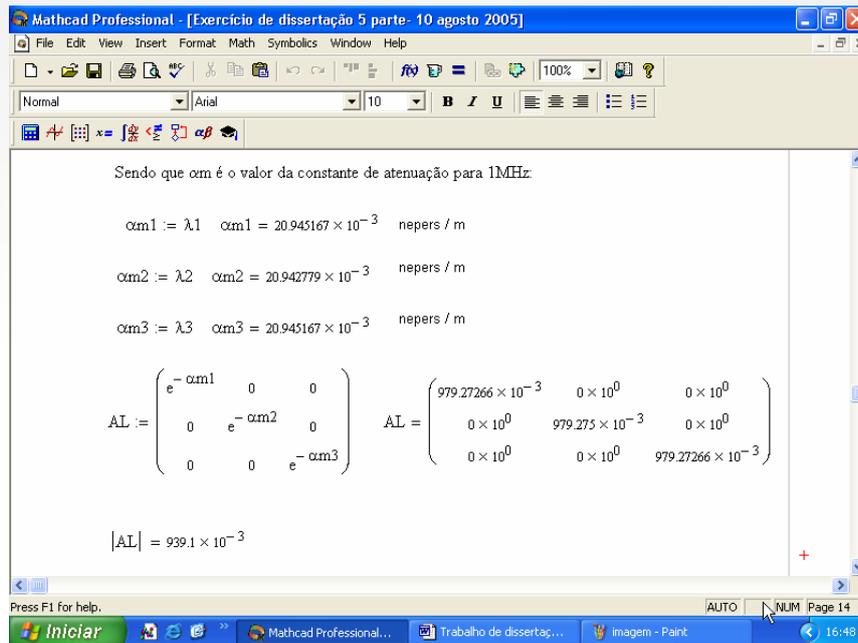


Figura 11.2.1.14 – Cálculo da matriz dos fatores de atenuação.

11.2.1.15 Campo elétrico da rádio interferência das três fases da linha de transmissão

A geração de corona em uma única fase provocará elevação das tensões v_{11} , v_{21} e v_{31} , determinadas por (70). Estas tensões estão em fase, uma em relação à outra, resultando num campo de RI em relação ao solo na primeira fase da linha de:

$$e_1 = e_{11} + e_{21} + e_{31} \quad (72)$$

Por outro lado, cada valor de campo elétrico de RI para cada fase da LT, segundo Comber e Nigbor¹⁰⁷, vale:

$$e_1 = \frac{q_1}{2 \pi \epsilon} \cdot \frac{2 h_1}{h_1^2 + x^2} \quad (73)$$

¹⁰⁷ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA, Rew 1987. p. 259

Sendo q_1 a carga na primeira fase da LT, devido ao efeito corona, h_1 a altura da primeira fase da linha em relação ao solo e x a distância lateral da fase ao ponto de observação.

A equação eletrostática (74), em termos de tensão de fase e cargas, tem sido adotada nas literaturas sobre sistemas de potência elétrica por Clarke¹⁰⁸, Calabrese¹⁰⁹ e Westinghouse¹¹⁰ e desenvolvida por Coberg e Nigbor¹¹¹, como sendo:

$$\begin{pmatrix} q_{11z} \\ q_{21z} \\ q_{31z} \end{pmatrix} = 2 \pi \varepsilon |A^{-1}| \begin{pmatrix} v_{11z} \\ v_{21z} \\ v_{31z} \end{pmatrix} \quad (74)$$

Onde q é a carga do condutor, v o potencial do condutor e A o coeficiente de potencial de Maxwell. Substituindo os valores correspondentes em (73) obtém-se:

$$\begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{21} \\ e_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 & 0 & 0 \\ 0 & F_2 & 0 \\ 0 & 0 & F_3 \end{pmatrix} |A^{-1}| \begin{pmatrix} v_{11z} \\ v_{21z} \\ v_{31z} \end{pmatrix} \quad (75)$$

Assim sendo, o valor do campo elétrico da RI para a primeira fase da LT valerá:

$$e_1 = \begin{pmatrix} F_1 & 0 & 0 \\ 0 & F_2 & 0 \\ 0 & 0 & F_3 \end{pmatrix} |A^{-1}| \begin{pmatrix} v_{11z} \\ v_{21z} \\ v_{31z} \end{pmatrix} \quad (76)$$

¹⁰⁸ CLARK, E. **Circuit Analysis of AC Power Systems**, vol 1 pp 373-375, 434 - 442, New York: John Wiley and Sons, Jan./Feb. 2001, pp. 218-222. 7.

¹⁰⁹ CALABRESE, G: **Symmetrical Components**. pp 289 - 298, 371-380. New York: Ronald, Rew 1995.

¹¹⁰ WESTINGHOUSE: **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**, pp 749-752. East Pittsburgh, Pa. Rew 2002.

¹¹¹ COMBER, M.G. NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987, p. 259.

Portanto, o campo elétrico de RI na primeira fase da linha de transmissão, segundo a expressão desenvolvida por Comberg e Nigbor¹¹², será:

$$e_1 = 30|F||A|^{-1}|S||AL||S|^{-1} \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (77)$$

Onde $|F|$ é uma matriz diagonal dos fatores de campo, $|A|$ é a matriz quadrada dos coeficientes de potencial de Maxwell, $|A|^{-1}$ é a matriz quadrada das capacitâncias próprias e mútuas, $|S|$ é a matriz quadrada de transformação modal, $|AL|$ é a matriz dos fatores de atenuação e Γ_1 é o gerador de corona na primeira fase da LT.

Outrossim, o fator de campo F é definido segundo Comber e Nigbor da seguinte maneira:

$$F = \frac{2h}{h^2 + x^2} \quad (78)$$

Onde h é altura da fase em relação ao solo e x a distância lateral do ponto de medição à fase mais externa da LT.

Para efeito de cálculo e apresentação desta análise, a distância lateral à LT será fixada em 15 metros. Outrossim, salienta-se que qualquer outro valor de x poderá ser inserido na expressão (78) que o programa do MATHCAD executará automaticamente, recalculando todos outros valores para o campo elétrico de rádio interferência. Assim sendo, os fatores de campo elétrico F_1 , F_2 e F_3 são calculados e mostrados na Figura 11.2.1.15.1.

¹¹² COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p. 259

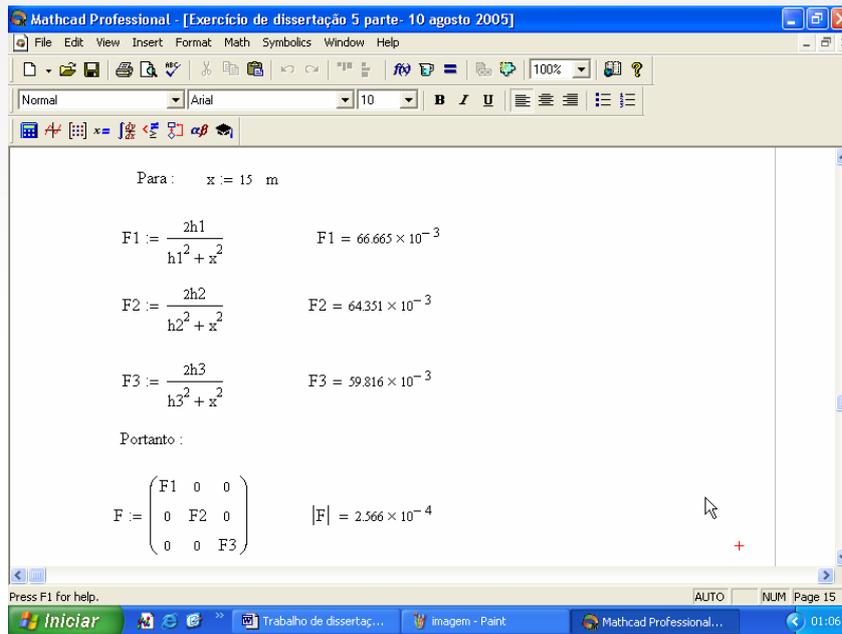


Figura 11.2.1.15.1 - Cálculo da matriz dos fatores de campo elétrico da RI.

O valor do campo elétrico da RI, devido ao corona, em um ponto localizado em uma fase da LT é calculado e mostrado na Figura 11.2.1.15.2.

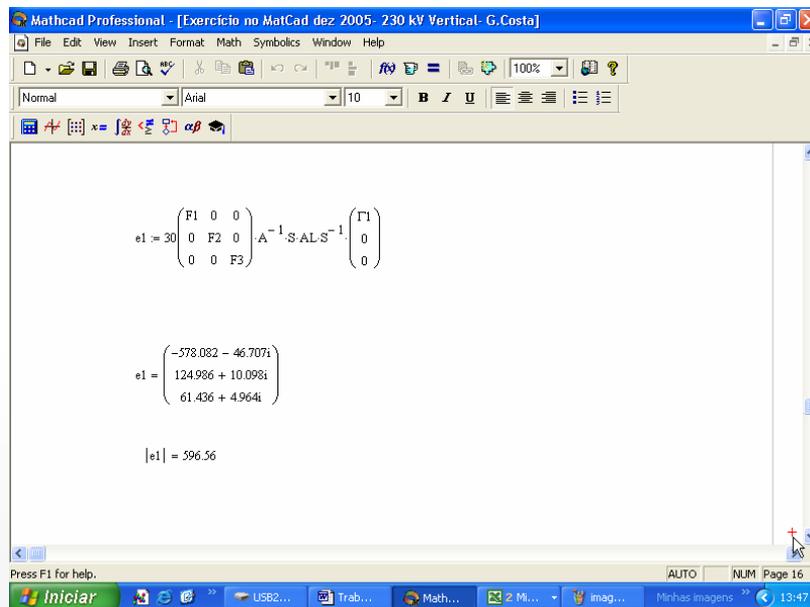


Figura 11.2.1.15.2 - Cálculo do campo elétrico de RI em um ponto da LT.

A intensidade de campo elétrico da rádio interferência, devido ao efeito corona, distribuída uniformemente sobre todo o comprimento da LT e para uma fase da linha, estendendo-se para ambas as direções do ponto de observação ou

medição, conforme descreve Comberg e Nigbor¹¹³, é calculada e mostrada na Figura 11.2.1.15.3a. e na Figura 11.2.1.15.3b.

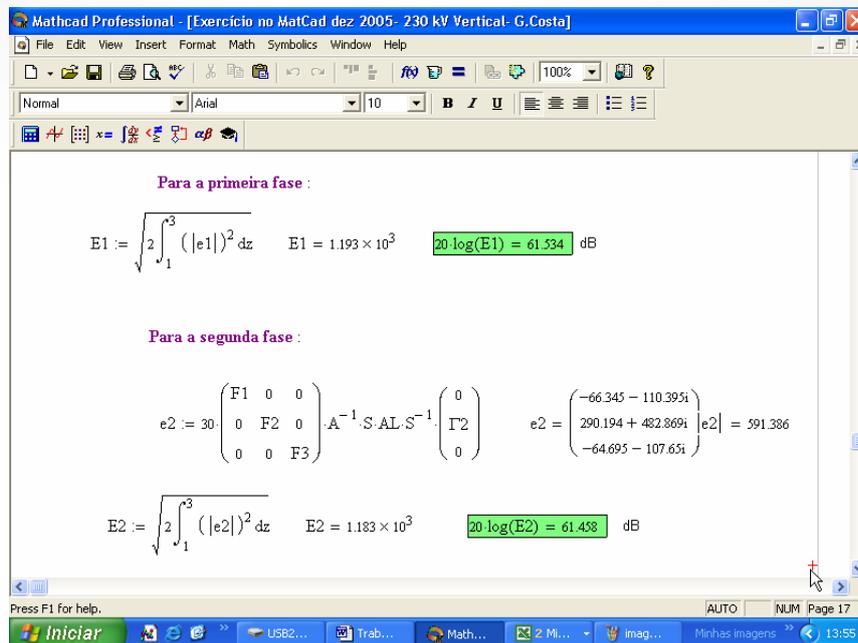


Figura 11.2.1.15.3a - Cálculo do campo elétrico da RI em todo o comprimento da LT, campos E1 e E2.

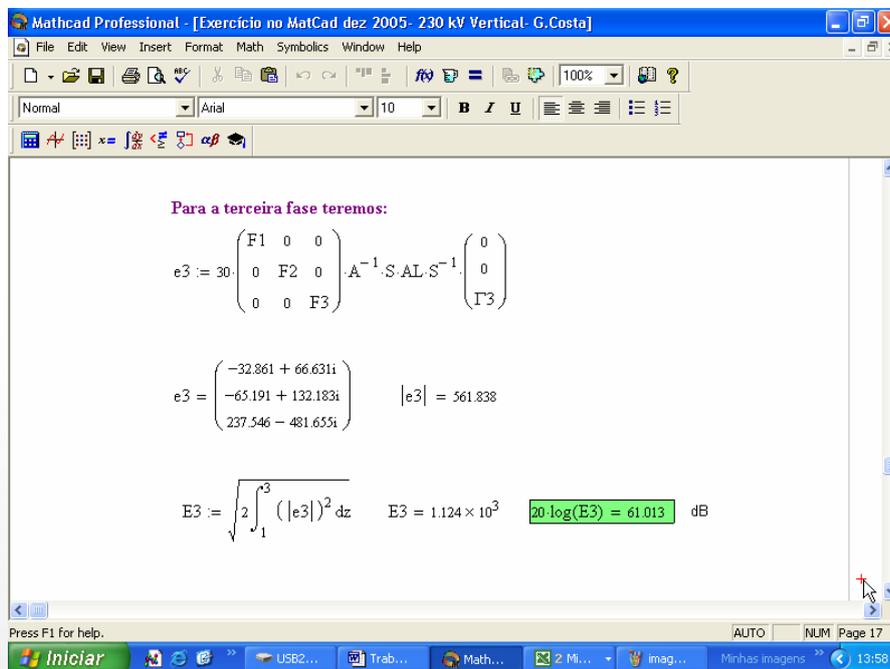


Figura 11.2.1.15.3b - Cálculo do campo elétrico da RI em todo o comprimento da LT, campo E3.

¹¹³ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p. 260.

11.2.1.16 Campo elétrico final da rádio interferência

Respeitando o que foi desenvolvido sobre o campo elétrico final da RI e, conseqüentemente, especificado em (40) e (41), e ainda observando as recomendações do CISPR¹¹⁴, chega-se a diversos valores para o campo elétrico final, no caso de chuva forte, os quais estão mencionados no Tabela 11.2.1.16.1, para diversas distâncias do ponto de medição.

Tabela 11.2.1.16.1 - Cálculo do campo elétrico final da RI no caso de chuva forte da LT 230 kV.

| | Distância Lateral | Campos Elétricos Monofásicos | | | Campo Elétrico Final |
|----|-------------------|------------------------------|--------|--------|----------------------|
| | | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 | Em |
| | | x | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
| | m | dB | dB | dB | dB |
| 1 | 0 | 67,402 | 65,533 | 64,025 | 67,968 |
| 2 | 5 | 66,512 | 64,967 | 63,626 | 67,240 |
| 3 | 10 | 64,293 | 63,473 | 62,543 | 65,383 |
| 4 | 15 | 61,534 | 61,458 | 61,013 | 62,996 |
| 5 | 20 | 58,741 | 59,259 | 59,256 | 60,758 |
| 6 | 25 | 56,119 | 57,071 | 57,428 | 58,750 |
| 7 | 30 | 53,723 | 54,984 | 55,620 | 56,802 |
| 8 | 35 | 51,548 | 53,031 | 53,880 | 54,956 |
| 9 | 40 | 49,573 | 51,217 | 52,229 | 53,223 |
| 10 | 45 | 47,772 | 49,537 | 50,673 | 51,605 |
| 11 | 50 | 46,122 | 47,978 | 49,212 | 50,095 |

Os valores de intensidade de campo elétrico são sempre expressos em termos de decibel e referidos a 1 $\mu\text{V}/\text{m}$.

Para efeito de comparação dos campos elétricos finais da RI, com o tempo de chuva forte, nas três fases da LT, elaborou-se o Gráfico 11.2.1.16.1.

¹¹⁴ CISPR-1: Specification for Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range 0,15 MHz to 30 MHz. Geneva, Suíça, Rev 2003.

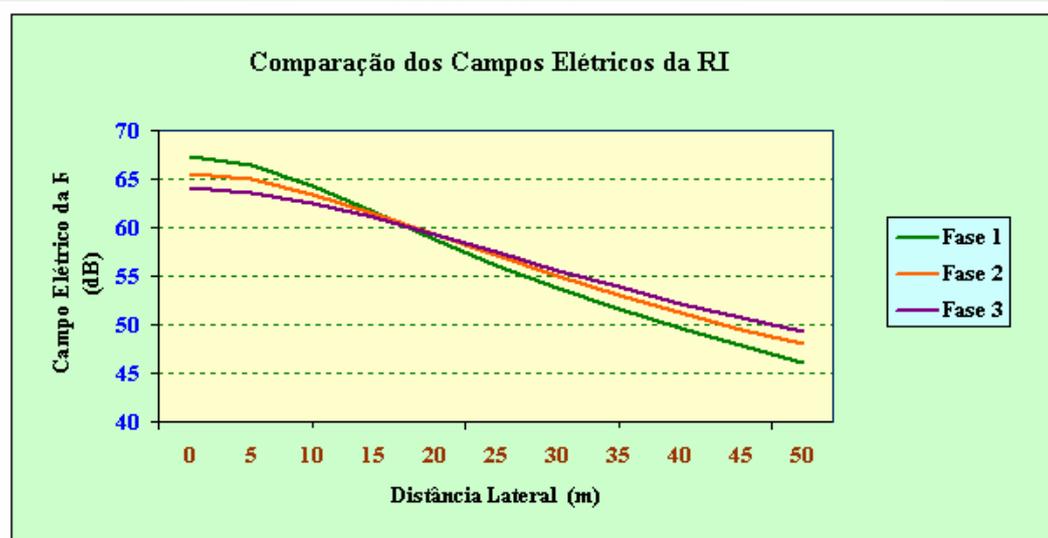


Gráfico 11.2.1.16.1 - Campo elétrico da RI, com o tempo de chuva forte, nas três fases da LT 230 kV.

O Gráfico 11.2.1.16.2 mostra mais detalhadamente a influência da rádio interferência com a proximidade da linha de transmissão.

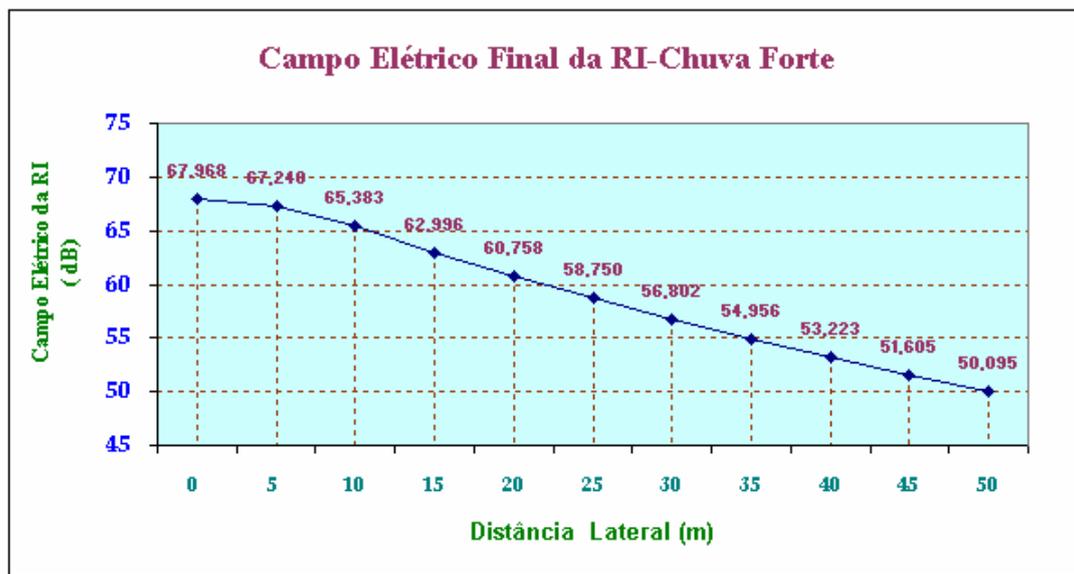


Gráfico 11.2.1.16.2 – Campo elétrico final da RI com chuva forte da LT 230.

Valores para o campo elétrico da RI, no caso de tempo bom, foram calculados respeitando as normas do IEEE¹¹⁵ e são apresentados na Tabela

¹¹⁵ IEEE Committee Report. Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-92, Nov. 2002. pp. 1029 - 1042.

11.2.1.16.2. Nesse caso foi considerado 17 dB abaixo dos valores calculados para o caso de tempo com chuva forte.

Tabela 11.2.1.16.2 - Comparação do campo elétrico final da RI com chuva forte e tempo bom da LT 230 kV.

| Distância Lateral | Campo Elétrico Final | Campo Elétrico Final |
|-------------------|-----------------------|----------------------|
| | Tempo com Chuva Forte | Tempo Bom |
| x | Em | Em |
| m | dB | dB |
| 0 | 67,968 | 50,968 |
| 5 | 67,240 | 50,240 |
| 10 | 65,383 | 48,383 |
| 15 | 62,996 | 45,996 |
| 20 | 60,758 | 43,758 |
| 25 | 58,750 | 41,750 |
| 30 | 56,802 | 39,802 |
| 35 | 54,956 | 37,956 |
| 40 | 53,223 | 36,223 |
| 45 | 51,605 | 34,605 |
| 50 | 50,095 | 33,095 |

O campo elétrico final da RI no caso de tempo bom é mostrado no Gráfico 11.2.1.16.3.

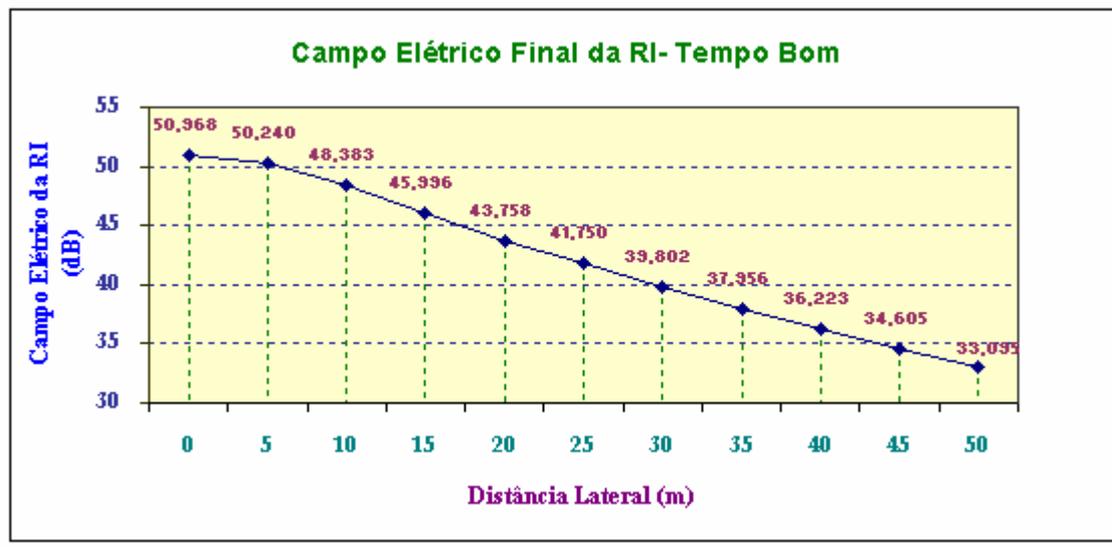


Gráfico 11.2.1.16.3 – Campo elétrico final da RI com o tempo bom da LT 230 kV.

Os campos elétricos finais da RI, tanto para o tempo de chuva forte como para o tempo bom, são mostrados no Gráfico 11.2.1.16.4.

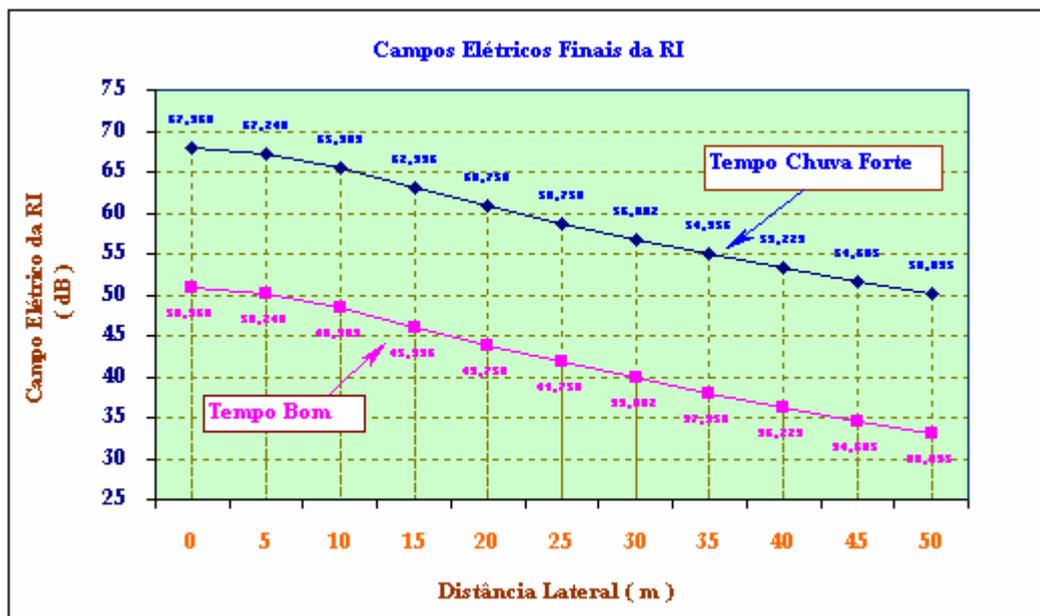


Gráfico 11.2.1.16.4 - Campos elétricos finais da RI com tempo de chuva forte e tempo bom da LT 230 kV.

As normas da ANATEL¹¹⁶ estabelecem que as emissoras de radiodifusão, na faixa de áudio, devem apresentar um valor mínimo de campo elétrico de 10 mV/m em equipamentos utilizados em zona urbana, ou seja, 80 dB quando convertido para uma referência de microvolts por metro, como já foi mencionado neste estudo. Portanto, a magnitude do sinal de rádio difusão vale:

(79)

$$S = 20 \cdot \log(10 \cdot 10^3) = 80 \text{ dB}$$

Pela norma NBR 7876 da ABNT¹¹⁷, as interferências provenientes de fontes externas deverão ter um nível tão baixo quanto possível, preferivelmente de 10dB abaixo da recepção do nível do sinal de áudio. No entanto, pelos critérios adotados de tolerância de radiofrequência apresentados neste estudo e

¹¹⁶ ANATEL: Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução nº. 237 - Regulamento para Certificação de Equipamentos de Telecomunicações. Novembro 2000.

¹¹⁷ NBR 7876. Medição da Rádio Interferência na faixa de 0,15 a 30,0 MHz Em Linhas e Equipamentos de Alta Tensão, S.Paulo. 1983.

normalizados pelo IEEE¹¹⁸, o nível de interferência do campo perturbador de uma LT deverá estar 20 dB, ou mais, abaixo do sinal de recepção de áudio dos equipamentos eletroeletrônicos e de telecomunicações utilizados nas imediações, com o intuito de preservar a qualidade do sinal das emissoras de radiodifusão. A Tabela 11.2.1.16.3 mostra os valores da relação sinal nível de ruído proveniente da linhas de alta tensão de 230 kV.

Tabela 11.2.1.16.3 - Relação Sinal Ruído LT 230 kV.

| Distância Lateral | Nível de Sinal | Nível de Ruído em Tempo de Chuva Forte | Relação Sinal Ruído |
|-------------------|----------------|--|---------------------|
| m | dB | dB | dB |
| 0 | 80,00 | 67,968 | 12,032 |
| 5 | 80,00 | 67,240 | 12,760 |
| 10 | 80,00 | 65,383 | 14,617 |
| 15 | 80,00 | 62,996 | 17,004 |
| 20 | 80,00 | 60,758 | 19,242 |
| 25 | 80,00 | 58,750 | 21,250 |
| 30 | 80,00 | 56,802 | 23,198 |
| 35 | 80,00 | 54,956 | 25,044 |
| 40 | 80,00 | 53,223 | 26,777 |
| 45 | 80,00 | 51,605 | 28,395 |
| 50 | 80,00 | 50,095 | 29,905 |

Portanto, para este caso específico de uma linha trifásica de 230 kV, com condutores colocados verticalmente em relação ao solo, não é aconselhável o uso de equipamentos eletroeletrônicos e equipamentos de telecomunicações a distâncias inferiores a 15 metros da LT.

Para melhor visualizar os níveis de sinal de áudio em relação aos níveis de rádio interferência proveniente da linha de transmissão de 230 kV, motivo dessa análise, é apresentado o Gráfico 11.2.1.16.5 que mostra até que ponto os níveis de ruído do campo perturbador de RI são aceitáveis em relação à distância lateral da LT.

¹¹⁸ IEEE Committee Report. "Transmission System Radio Influence", IEEE. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS- 84, N° 8, pp. 714 - 724. Rew 1989.

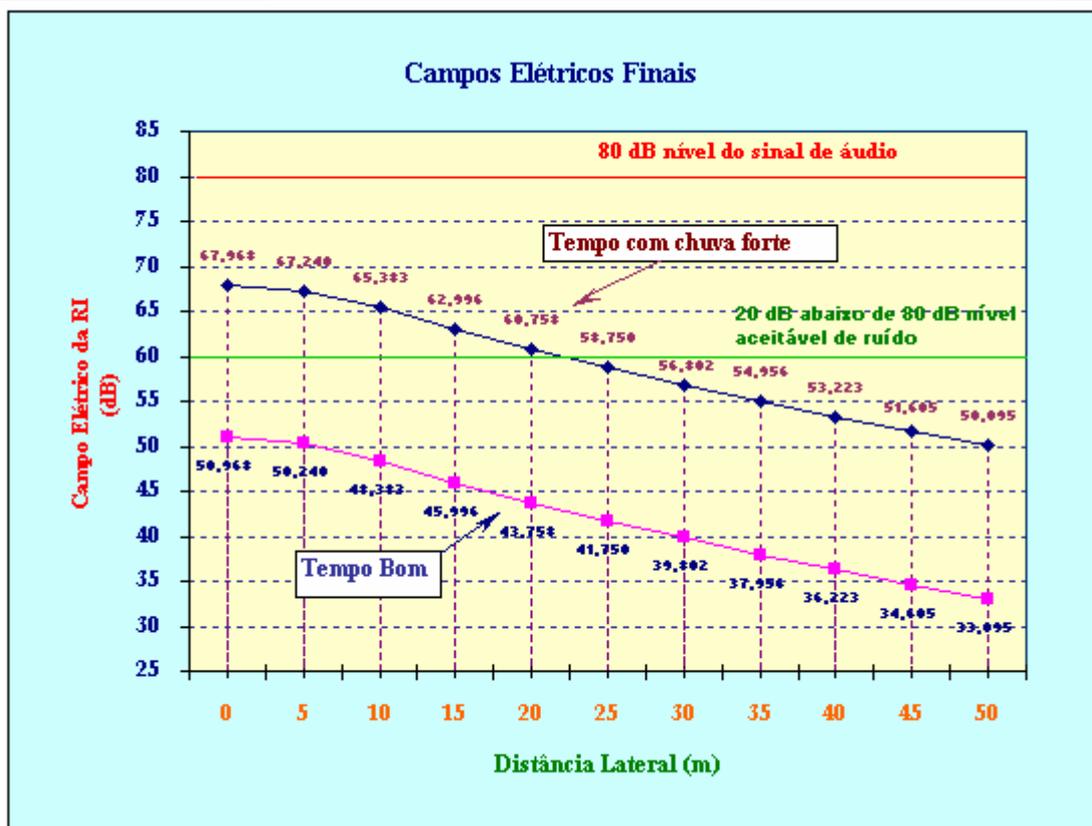


Gráfico 11.2.1.16.5 - Níveis de RI aceitáveis em relação ao nível de áudio.

Conclui-se mais aproximadamente que, pelo Gráfico 11.2.1.16.5, distâncias inferiores a 11 metros, no caso de chuva forte, pior caso, não devem estar dispostos os equipamentos de áudio, receptores, equipamentos de telecomunicação, medidores, instrumentos de precisão, porque estariam sujeitos às perturbações eletromagnéticas provenientes do efeito corona.

11.2.2 Rádio interferência proveniente de uma linha de 500 kV trifásica

O desenvolvimento matemático deste exemplo segue o mesmo encaminhamento dado para o caso anterior de uma linha de 230 kV.

Neste exemplo a simulação foi gerada a partir de dados de uma linha de transmissão de 500 kV, configurada abaixo, e utilizando-se o ambiente do programa MATHCAD.

As características da linha de transmissão de 500 kV, trifásica, são as seguintes:

- Nome da linha: Cholia-Saguaro-Arizona-USA
- Comprimento da linha: 1743 km
- Projeto: NESC Light & Heavy
- Estrutura: tipo 5L9
- Condutores: tipo ACSR, colocados horizontalmente um em relação ao outro.
- Afastamento entre os condutores: 10 metros.
- Raio equivalente do feixe: $R_e = 2,42$ cm.
- Resistividade do solo: $\rho = 100$ ohms.metro.
- Frequência de medição do detector de quase-pico: 1 MHz.
- Altura de fixação dos condutores em relação ao solo: $h_1 = h_2 = h_3 = 14$ metros.

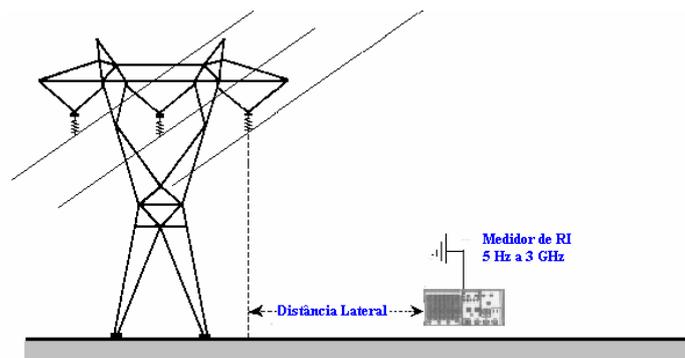


Figura 11.2.2 - Disposição da linha de 500 kV em relação ao ponto de medição.

11.2.2.1 Campo elétrico final da rádio interferência

Os valores de campo elétrico final da RI no caso de chuva forte são apresentados na Tabela 11.2.2.1.1, para diversas distâncias do ponto da LT ao ponto de medição.

Tabela 11.2.2.1.1 - Valores do campo elétrico final para 500 kV e chuva forte.

| | Distância | Campos Elétricos Monofásicos | | | Campo Elétrico Final |
|----|-----------|------------------------------|--------|--------|----------------------|
| | x | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 | Em |
| | m | dB | dB | dB | dB |
| 1 | 0 | 66,396 | 63,318 | 57,762 | 66,396 |
| 2 | 5 | 65,338 | 60,373 | 55,012 | 65,338 |
| 3 | 10 | 62,797 | 57,391 | 52,467 | 62,797 |
| 4 | 15 | 59,739 | 54,592 | 50,152 | 59,739 |
| 5 | 20 | 56,723 | 52,051 | 48,064 | 56,723 |
| 6 | 25 | 53,945 | 49,766 | 46,177 | 53,945 |
| 7 | 30 | 51,440 | 47,709 | 44,462 | 51,075 |
| 8 | 35 | 49,188 | 45,846 | 42,893 | 49,188 |
| 9 | 40 | 47,157 | 44,149 | 41,447 | 47,157 |
| 10 | 45 | 45,315 | 42,593 | 40,109 | 45,454 |
| 11 | 50 | 43,635 | 41,158 | 38,862 | 42,897 |

O Gráfico 11.2.2.1.1 mostra a comparação dos campos elétricos finais da RI, no caso de chuva forte, para as três fases da LT.

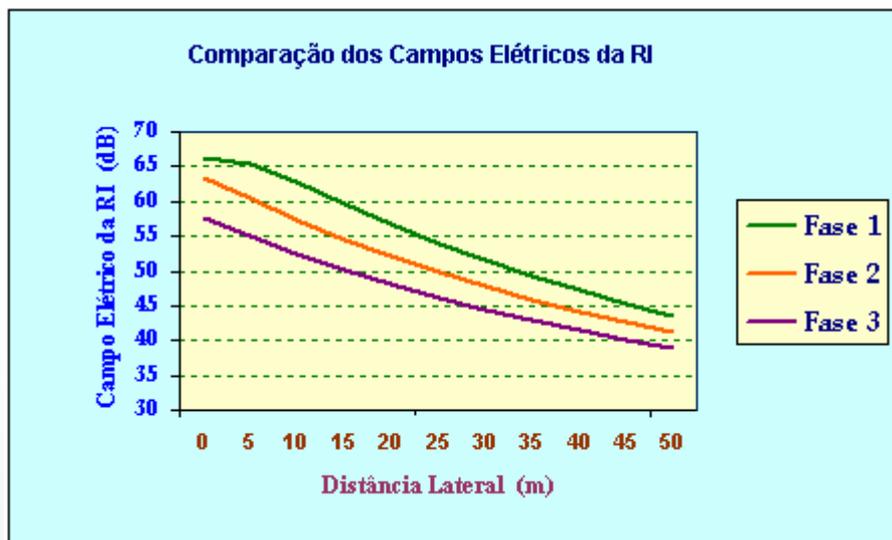


Gráfico 11.2.2.1.1 - Campos elétricos da RI, no caso de chuva forte, nas três fases da LT de 500 kV.

No Gráfico 11.2.2.1.2 é apresentado o campo elétrico final da RI para o caso de chuva forte. Pode-se observar o grau de influência da rádio interferência,

devido ao efeito corona na linha de 500 kV, com a proximidade do ponto de medição da LT.

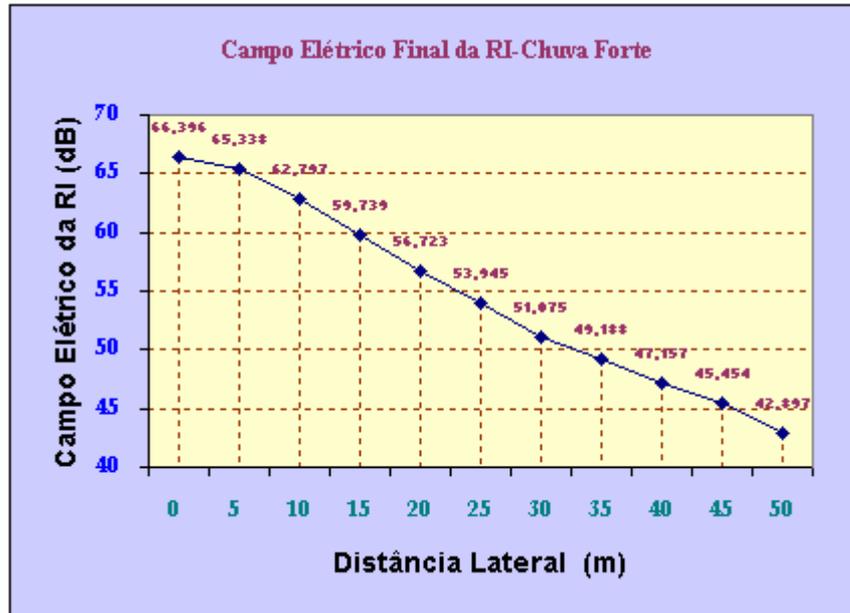


Gráfico 11.2.2.1.2 - Campo elétrico final da RI com chuva forte em uma LT de 500 kV.

Os valores para o campo elétrico da RI, no caso de bom tempo, foram calculados respeitando as normas do IEEE¹¹⁹ e mostrados na Tabela 11.2.2.1.2.

¹¹⁹ IEEE Committee Report. **Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Nov 2002.

Tabela 11.2.2.1.2 - Comparação dos campos elétricos da RI com chuva forte e tempo bom em uma LT de 500 kV.

| Distância Lateral | Campo Elétrico Final | Campo Elétrico Final |
|-------------------|-----------------------|----------------------|
| | Tempo com Chuva Forte | Tempo Bom |
| x | Em | Em |
| m | dB | dB |
| 0 | 66,396 | 49,396 |
| 5 | 65,338 | 48,338 |
| 10 | 62,797 | 45,797 |
| 15 | 59,739 | 42,739 |
| 20 | 56,723 | 39,723 |
| 25 | 53,945 | 36,945 |
| 30 | 51,075 | 34,075 |
| 35 | 49,188 | 32,188 |
| 40 | 47,157 | 30,157 |
| 45 | 45,454 | 28,454 |
| 50 | 42,897 | 25,897 |

O campo elétrico final da RI no caso de tempo bom de uma linha de 500 kV trifásica é mostrado no Gráfico 11.2.2.1.3, os valores calculados seguem as recomendações das normas IEEE¹²⁰ e NBR 7876¹²¹. Neste caso foram considerados valores para o tempo bom 17 dB abaixo dos valores calculados para tempo de chuva forte.

¹²⁰ IEEE Committee Report. **Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Nov 2002.

¹²¹ NBR 7876. **Medição da Radio Interferência na faixa de 0,15 a 30 MHz em linhas e equipamentos de alta tensão**, 1983.

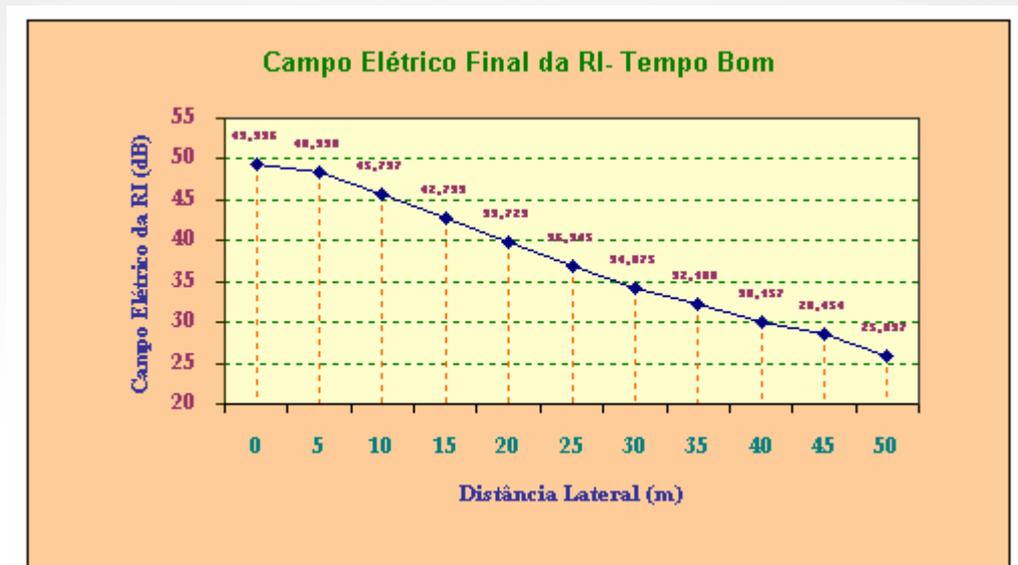


Gráfico 11.2.2.1.3 - Campo elétrico da RI com o tempo bom de uma linha de 500 kV, trifásica.

Os campos elétricos finais da RI, tanto para tempo de chuva forte como para o tempo bom, para uma LT de 500 kV trifásica são mostrados no Gráfico 11.2.2.1.4. Os valores apresentados são os constantes na Tabela 11.2.2.1.2.

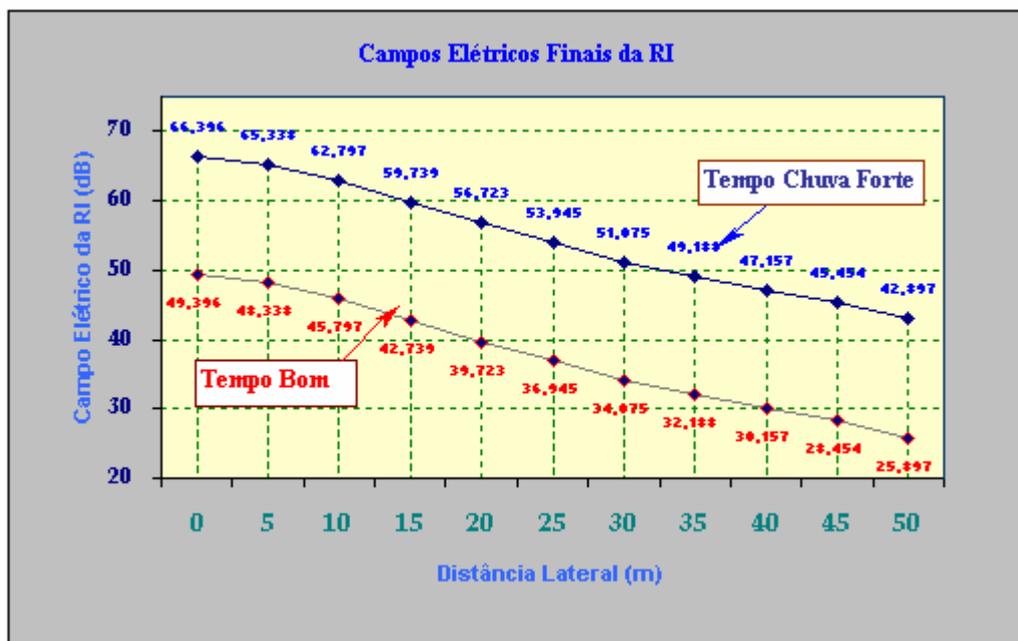


Gráfico 11.2.2.1.4 - Campos elétricos finais da RI nos casos de chuva forte e tempo bom de uma linha de 500 kV.

As normas da ANATEL¹²² e da NBR 7876¹²³ determinam que os valores de campo elétrico de equipamentos utilizados em zonas urbanas tais como medidores, receptores, etc., devem ter um valor mínimo de 10 mV/m, ou seja, 80 dB, quando convertido para uma referência de microvolts por metro. Outrossim, o nível de ruído deverá estar 20 dB abaixo do sinal de recepção de áudio. Assim sendo, elaborou-se a Tabela 11.2.2.1.3 para mostrar esses valores para uma LT trifásica de 500 kV.

Tabela 11.2.2.1.3 – Relação Sinal Ruído de uma LT trifásica de 500 kV.

| Distância Lateral | Nível de Sinal | Nível de Ruído em Tempo de Chuva Forte | Relação Sinal Ruído |
|-------------------|----------------|--|---------------------|
| m | dB | dB | dB |
| 0 | 80,00 | 66,396 | 13,604 |
| 5 | 80,00 | 65,338 | 14,662 |
| 10 | 80,00 | 62,797 | 17,203 |
| 15 | 80,00 | 59,739 | 20,261 |
| 20 | 80,00 | 56,723 | 23,277 |
| 25 | 80,00 | 53,945 | 26,055 |
| 30 | 80,00 | 51,075 | 28,925 |
| 35 | 80,00 | 49,188 | 30,812 |
| 40 | 80,00 | 47,157 | 32,843 |
| 45 | 80,00 | 45,454 | 34,546 |
| 50 | 80,00 | 42,897 | 37,103 |

O Gráfico 11.2.2.1.5 mostra os valores de campo elétrico da RI devido ao efeito corona em uma linha trifásica de 500 kV relacionados com os níveis de sinal de áudio recomendados por norma.

¹²² ANATEL: **Agência Nacional de Telecomunicações**. Resolução nº. 237 - Regulamento para Certificação de Equipamentos de Telecomunicações. Novembro 2000.

¹²³ NBR 7876. **Medição da Rádio Interferência na faixa de 0,15 a 30 MHz em linhas e equipamentos de alta tensão**, 1983.

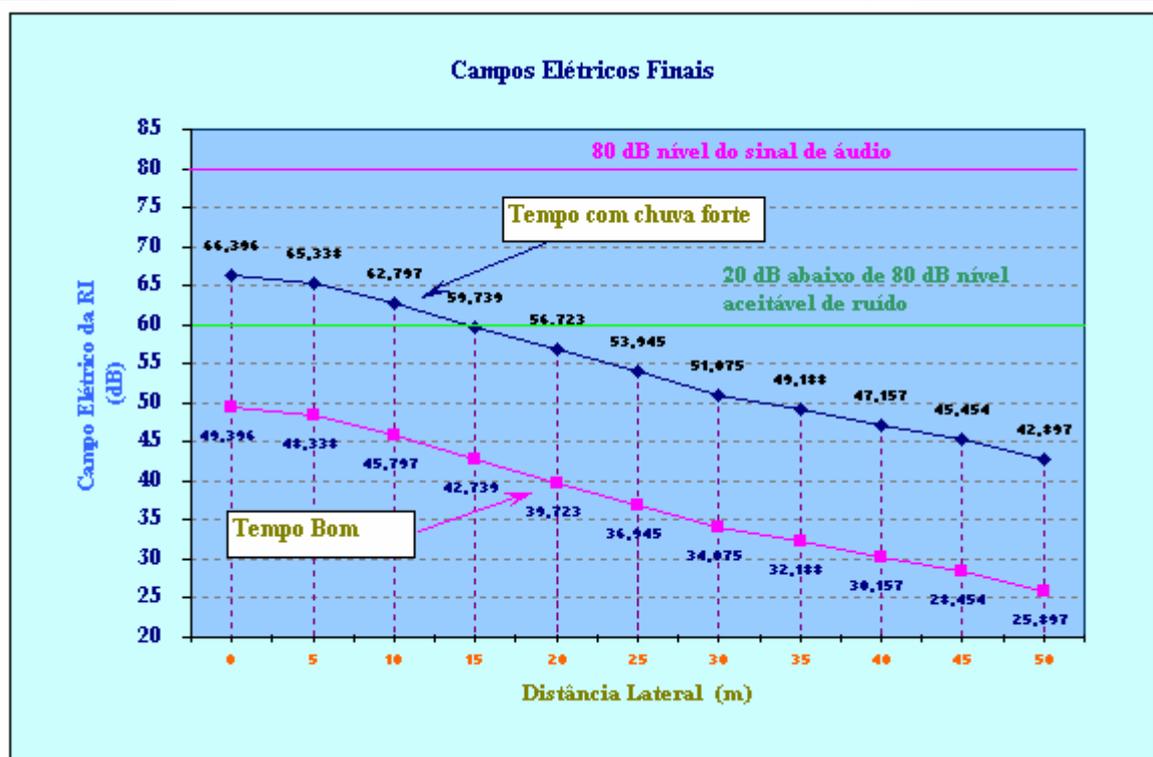


Gráfico 11.2.2.1.5 - Níveis de RI em relação aos níveis de áudio para uma LT de 500 kV.

Conclui-se que os níveis de campo elétrico da RI superiores a 60 dB não são aceitos por normas e se referem no Gráfico 11.2.2.1.5 a distâncias laterais de 14 metros para o caso de tempo com chuva forte e 10 metros para o caso de tempo bom. Isto quer dizer que os receptores de áudio e outros equipamentos de medição não devem estar a distâncias inferiores às determinadas neste estudo.

12 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA

Para validação da metodologia aplicada, o presente trabalho será confrontado com dois projetos já validados sobre rádio interferência.

O primeiro projeto desenvolvido pelo Eng. Gilberto José Corrêa da Costa para a Cia. Estadual de Energia Elétrica (CEEE), denominado Contribuição ao Estudo de Rádio Interferência para uma LT de 230 kV entre SEPA 6 e SEPA 4¹²⁴. Estes estudos foram baseados em dois trabalhos sobre rádio interferência, um

¹²⁴ COSTA, G.J.C.; **Contribuição ao Estudo de Rádio Interferência** LT 230 kV - SEPA 6 e SEPA 4. CEEE. S.G.-Depart. Proj. Elétricos. Out 1987.

realizado Laforest¹²⁵ e outro por Cladé e Gary denominado “*Les perturbations radioélectriques engendrées par les lignes de transport d’énergie*”¹²⁶. A modelagem matemática desenvolvida por Cladé e Gary foi submetida à análise pela Sociedade Francesa de Engenharia e Aplicações Elétricas (SOFRELEC)¹²⁷ que confirmou o nível de 230 kV para ser utilizado no trecho entre SEPA 6 e SEPA 4, portanto validando o trabalho apresentado pela CEEE.

Desta forma, as tabelas e gráficos relacionados a seguir são provenientes dos estudos realizados por Cladé e Gary para a LT de 230 kV entre SEPA 6 e SEPA 4 as quais servirão como referência para comprovação dos valores achados pela metodologia desenvolvida no presente trabalho.

Os valores dos campos elétricos monofásicos e campo elétrico final da RI, para o caso de chuva forte, calculados por Cladé e Gary, são expressos na Tabela 11.3.1. Os autores tomaram como exemplo uma LT de 230 kV com as mesmas características daquela apresentada neste trabalho, item 11.2.1 denominado: **Rádio interferência proveniente de uma linha de 230 kV trifásica.**

¹²⁵ LAFOREST, J.J. **The Effect of Station Radio Noise Sources on Transmission Line Noise Levels**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-84, Nº. 9, Rew 1998. pp 833-838.

¹²⁶ CLADÉ, J; GARY,C. **Les perturbations radioélectriques engendrées par les lignes de transport d’énergie**. RGE. Tome 75.nº 05 .Rew August 2001.

¹²⁷ SOFRELEC, **Societe Francaise d'Ingenierie et d'Applications Electriques**. Sociedade Francesa de Engenharia e Aplicações Elétricas. RCS Dijon B 409 423 274. Setember 2004.

Tabela 11.3.1 - Valores dos campos elétricos monofásicos e final de uma LT 230 kV - SEPA 6 e SEPA 4, de acordo com a metodologia de Cladé e Gary.

| Distância Lateral | Campos Elétricos Monofásicos | | | Campo Elétrico Final |
|-------------------|------------------------------|--------|--------|----------------------|
| | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 | Em |
| m | dB | dB | dB | dB |
| 0 | 67,402 | 65,533 | 64,025 | 67,97 |
| 5 | 66,512 | 64,967 | 63,626 | 67,24 |
| 10 | 64,293 | 63,473 | 62,543 | 65,38 |
| 15 | 61,534 | 61,458 | 61,013 | 63,00 |
| 20 | 58,741 | 59,259 | 59,256 | 60,76 |
| 25 | 56,119 | 57,071 | 57,428 | 58,75 |
| 30 | 53,723 | 54,984 | 55,620 | 56,80 |
| 35 | 51,548 | 53,031 | 53,880 | 54,96 |
| 40 | 49,573 | 51,217 | 52,229 | 53,22 |
| 45 | 47,772 | 49,537 | 50,673 | 51,61 |
| 50 | 46,122 | 47,978 | 49,212 | 50,10 |

O gráfico correspondente aos valores da Tabela 11.3.1 é apresentado a seguir:

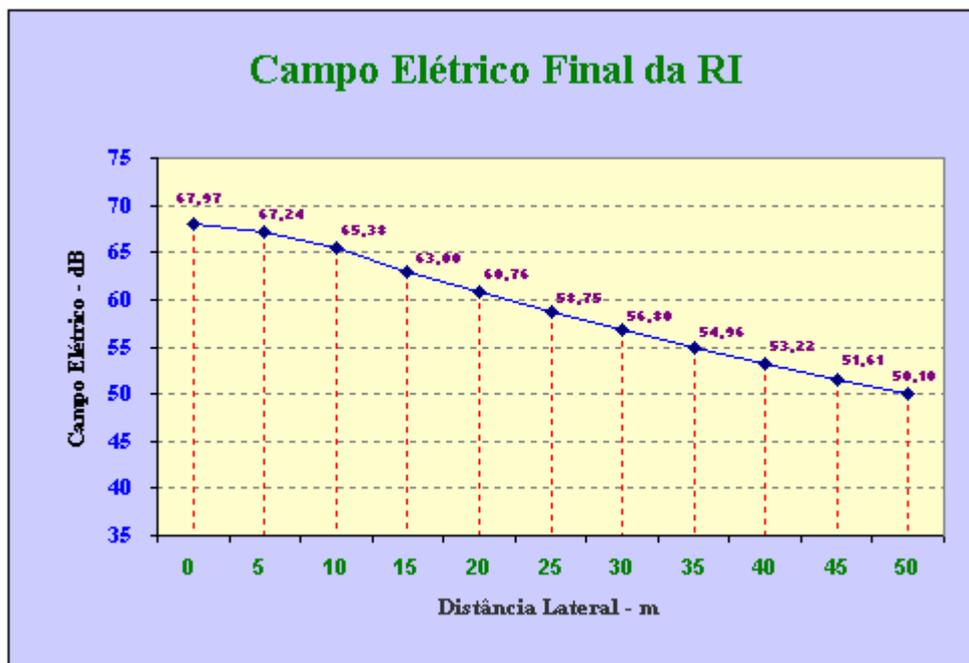


Gráfico 11.3.1 - Campo elétrico final da RI de uma LT de 230 kV utilizando a metodologia de Cladé e Gary.

Pela metodologia desenvolvida neste trabalho os valores achados para a LT de 230 kV são os apresentados na Tabela 11.3.2¹²⁸.

Tabela 11.3.2 - Valores dos campos elétricos monofásicos e final de uma LT 230 kV - SEPA 6 e SEPA 4, de acordo com a metodologia desenvolvida neste trabalho.

| Distância Lateral | Campos Elétricos Monofásicos | | | Campo Elétrico Final | Diferença entre Metodologias | |
|-------------------|------------------------------|--------|--------|----------------------|------------------------------|--------|
| | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 | Em | | |
| m | dB | dB | dB | dB | dB | % |
| 0 | 67,402 | 65,533 | 64,025 | 67,968 | (0,932) | 1,35 |
| 5 | 66,512 | 64,967 | 63,626 | 67,240 | (1,010) | 1,48 |
| 10 | 64,293 | 63,473 | 62,543 | 65,383 | (0,917) | 1,38 |
| 15 | 61,534 | 61,458 | 61,013 | 62,996 | 0,196 | (0,31) |
| 20 | 58,741 | 59,259 | 59,256 | 60,758 | 0,358 | (0,59) |
| 25 | 56,119 | 57,071 | 57,428 | 58,750 | 0,350 | (0,60) |
| 30 | 53,723 | 54,984 | 55,620 | 56,802 | 0,002 | (0,00) |
| 35 | 51,548 | 53,031 | 53,880 | 54,956 | (0,244) | 0,44 |
| 40 | 49,573 | 51,217 | 52,229 | 53,223 | (0,477) | 0,89 |
| 45 | 47,772 | 49,537 | 50,673 | 51,605 | (0,695) | 1,33 |
| 50 | 46,122 | 47,978 | 49,212 | 50,095 | (1,005) | 1,97 |

Pode-se observar que a diferença máxima entre uma metodologia e outra não é maior do que 1,97% em todos os pontos calculados. A diferença maior ocorre a uma distância lateral de 50 metros da fase da LT. Entre as distâncias de 15 a 35 metros do ponto de medição os campos elétricos da RI são praticamente iguais tanto numa metodologia como na outra.

O gráfico correspondente aos valores achados pela metodologia aplicada neste trabalho é mostrado a seguir:

¹²⁸ Valores referentes aos campos elétricos monofásicos e final provenientes do desenvolvimento matemático, através do programa MATHCAD. Trabalho sobre rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão. LEÃO, R.M. Capítulo 11.2.1 pág. 107. Dez. 2005.

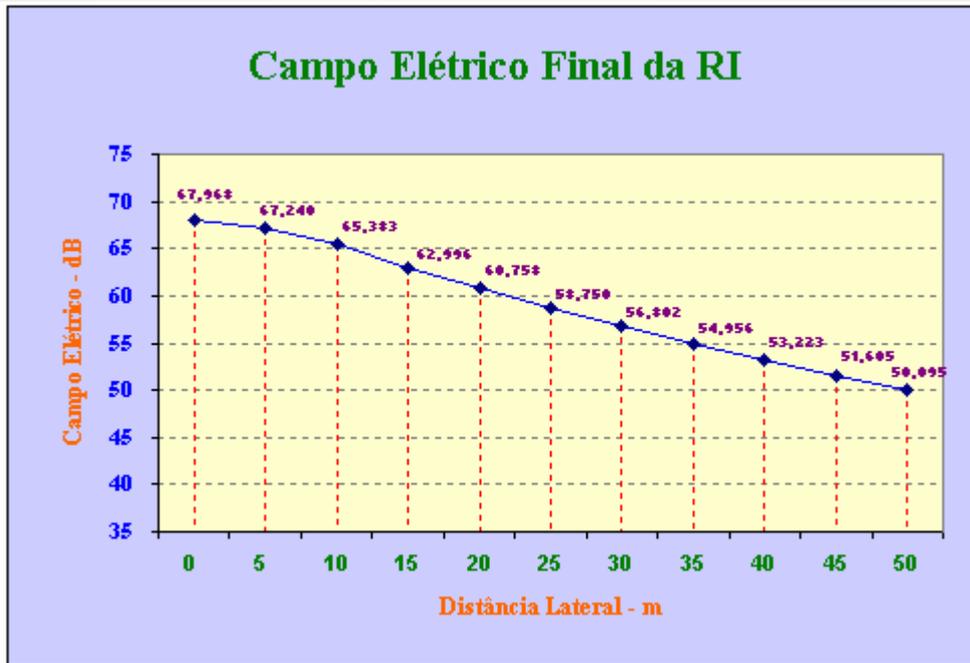


Gráfico 11.3.2 - Campo elétrico final da RI de uma LT de 230 kV utilizando a metodologia deste trabalho.

Para que se possa confrontar as duas metodologias, foi elaborado o Gráfico 11.3.3., denominado Campo elétrico final da RI, utilizando a metodologia de Cladé e Gary e a metodologia desenvolvida por este trabalho.

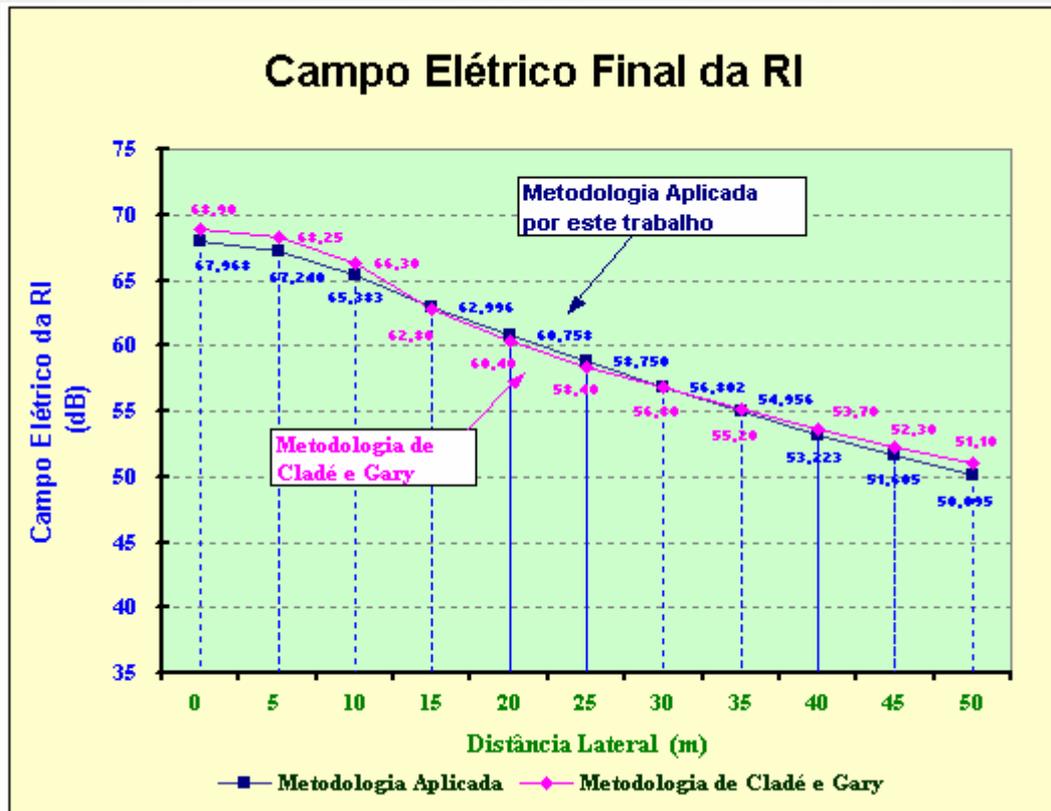


Gráfico 11.3.3 - Campo elétrico final da RI utilizando a metodologia de Cladé e Gary e a metodologia desenvolvida por este trabalho.

Comparando os valores apresentados no Gráfico 11.3.3, conclui-se que metodologia aplicada por este estudo se aproxima dos valores resultantes da metodologia de Cladé e Gary¹²⁹. Assim sendo, é possível utilizar o desenvolvimento matemático proposto por este trabalho para o cálculo da rádio interferência da LT de 230 kV.

Por outro lado, confrontou-se também o uso da metodologia desenvolvida por este estudo com os trabalhos desenvolvidos por Comber e Nigbor¹³⁰ sobre uma linha de 1100 kV em seu livro de referências sobre linhas de transmissão de alta tensão. Os autores usaram em seus estudos uma LT de 1100 kV com as seguintes características:

- Tipo de LT: três condutores em configuração horizontal.
- Condutores tipo ACSR.

¹²⁹ CLADÉ, J; GARY, C. **Les perturbations radioélectriques engendrées par les lignes de transport d'énergie**. RGE. Tome 75. N°. 05. Rew August 2001.

¹³⁰ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p. 244.

- Número de condutores por fase: 8 condutores
- Afastamento entre os condutores: 15 metros.
- Raio dos condutores: $R = 4,1$ cm.
- Diâmetro do feixe de condutores: 122 cm
- Resistividade do solo: $\rho = 75$ ohms.m.
- Frequência de medida da RI: $f = 500$ kHz.
- Altura de fixação dos condutores em relação ao solo: $h_1 = h_2 = h_3 = 20$ metros.
- Condições do tempo durante a medição: chuva forte.

Comberg e Nigbor construíram diversas curvas para determinar o nível de RI de uma linha de 1100 kV. Através destas curvas levantadas com valores de diversas medições determinaram os níveis dos campos elétricos monofásicos e do campo elétrico final da RI. Compararam os valores calculados por computador através de uma metodologia própria e concluíram que valores resultantes eram bem próximos àqueles medidos.

A Tabela 11.3.3 mostra os valores medidos pelo método de Comberg e Nigbor¹³¹.

Tabela 11.3.3 - Valores de campo elétrico final de RI de uma LT de 1100 kV pela metodologia de Comberg e Nigbor

| Distância Lateral | Campo Elétrico Final de Comberg e Nigbor do Transmission Line Reference Book |
|-------------------|--|
| m | dB |
| 0 | 82,00 |
| 5 | 81,00 |
| 10 | 80,20 |
| 15 | 78,30 |
| 20 | 76,50 |
| 25 | 76,20 |
| 30 | 74,10 |
| 35 | 72,22 |
| 40 | 70,00 |
| 45 | 67,80 |
| 50 | 65,70 |

¹³¹ COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p. 222.

O Gráfico 11.3.4 mostra aos valores achados pela metodologia de Comberg e Nigbor¹³².

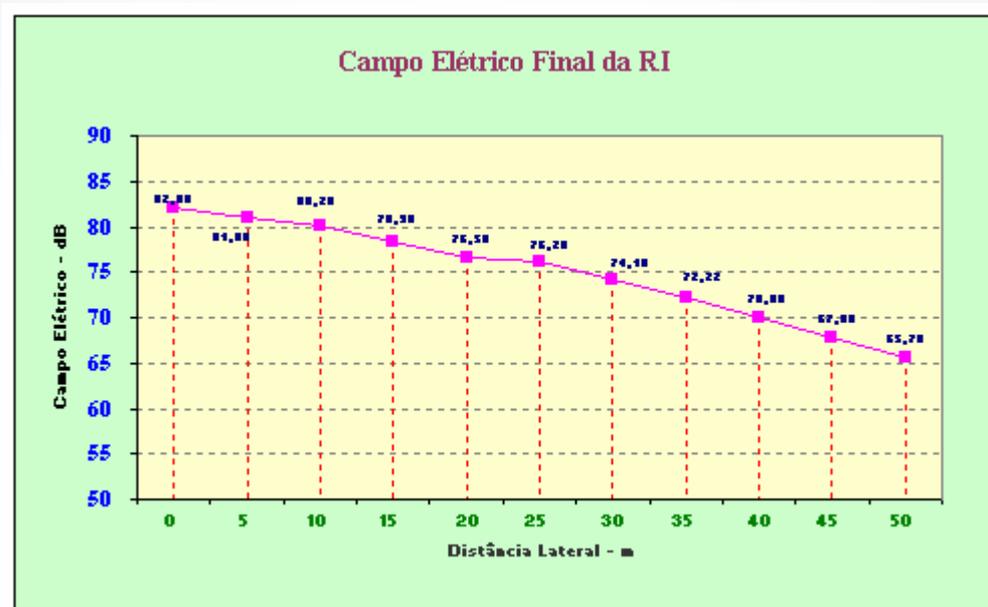


Gráfico 11.3.4 - Campo elétrico final de RI de uma LT de 1100 kV pela metodologia de Comberg e Nigbor.

Pela metodologia desenvolvida neste estudo os valores achados para a LT de 1100 kV são os apresentados na Tabela 11.3.4.

¹³² COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J.: **Radio Noise**. Transmission Line Reference Book. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1987. p. 222.

Tabela 11.3.4 - Valores dos campos elétricos monofásicos e final de RI de uma LT de 1100 kV pela metodologia desenvolvida por este trabalho.

| Distância Lateral | Campos Elétricos Monofásicos | | | Campo Elétrico Final | Diferença entre as Metodologias | |
|-------------------|------------------------------|--------|--------|----------------------|---------------------------------|------|
| | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 | Em | dB | % |
| m | dB | dB | dB | dB | dB | % |
| 0 | 84,423 | 80,645 | 75,319 | 84,423 | 2,423 | 2,87 |
| 5 | 83,864 | 78,720 | 73,401 | 83,864 | 2,864 | 3,42 |
| 10 | 82,441 | 76,696 | 71,555 | 82,441 | 2,241 | 2,72 |
| 15 | 80,501 | 74,659 | 69,801 | 80,501 | 2,201 | 2,73 |
| 20 | 78,360 | 72,689 | 68,158 | 78,360 | 1,860 | 2,37 |
| 25 | 76,213 | 70,831 | 66,630 | 76,213 | 0,013 | 0,02 |
| 30 | 74,155 | 69,100 | 65,210 | 74,155 | 0,055 | 0,07 |
| 35 | 72,224 | 67,494 | 63,889 | 72,224 | 0,004 | 0,01 |
| 40 | 70,428 | 66,004 | 62,656 | 70,428 | 0,428 | 0,61 |
| 45 | 68,761 | 64,619 | 61,501 | 68,761 | 0,961 | 1,40 |
| 50 | 67,214 | 63,327 | 60,415 | 67,214 | 1,514 | 2,25 |

Pode-se observar que a diferença máxima entre uma metodologia e outra não é maior do que 3,42% em todos os pontos calculados. A diferença maior ocorre a uma distância lateral de 5 metros da fase da LT. Entre as distâncias de 25 a 40 metros do ponto de medição os campos elétricos da RI são praticamente iguais tanto numa metodologia como na outra.

O gráfico correspondente aos valores achados pela metodologia aplicada neste trabalho é mostrado a seguir:

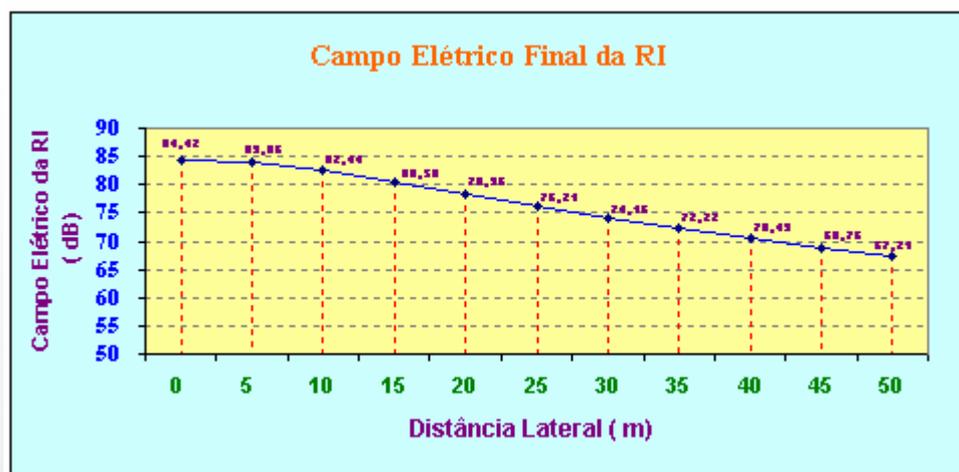


Gráfico 11.3.5 - Campo elétrico final da RI de uma LT de 1100 kV utilizando a metodologia deste trabalho.

Para que se possa confrontar as duas metodologias, elaborou-se o Gráfico 11.3.6. em que mostra as duas curvas dos campos elétricos finais: uma curva utilizando a metodologia de Comberg e Nigbor e a outra curva mostrando a metodologia aplicada neste estudo.

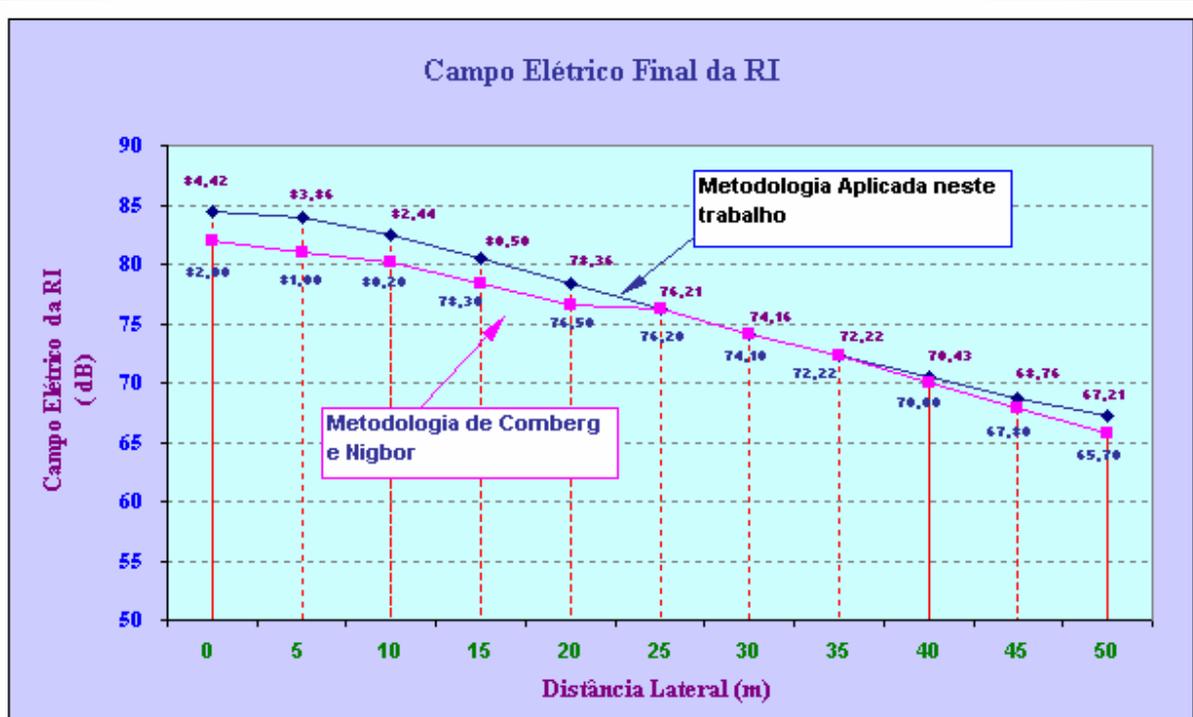


Gráfico 11.3.6 - Campos elétricos finais da RI pela metodologia de Comberg e Nigbor e pela metodologia aplicada neste trabalho.

Comparando os valores do Gráfico 11.3.6, conclui-se que a metodologia utilizada para o cálculo da RI de uma LT por este trabalho se aproxima dos valores resultantes da metodologia de Comberg e Nigbor. Assim sendo, é possível utilizar o desenvolvimento matemático proposto por este trabalho para o cálculo da rádio interferência da LT de 1100 kV.

Posto isto, podemos concluir que a metodologia desenvolvida neste estudo para o cálculo da rádio interferência proveniente de uma linha de transmissão de alta tensão é válida para qualquer LT com qualquer tensão.

CONCLUSÃO

O estudo sobre rádio interferência vem sendo realizado desde o começo do século passado quando Peek¹³³ analisou o efeito corona, mais tarde pelo Holm¹³⁴, Ryan e Henline¹³⁵, todos preocupados com o reflexo desse agente perturbador em equipamentos de radiodifusão e outros usados nas imediações das linhas de transmissão.

Sob este aspecto, outros estudos se sucederam por muitos anos. Todos os analistas são unânimes em afirmar a complexidade não só do entendimento sobre esta matéria, mas também em desenvolver um método analítico que viesse comprovar a existência da rádio interferência proveniente das linhas de alta tensão.

Nesse contexto, somente com o desenvolvimento analítico de Clark e Loftness¹³⁶, usando a técnica da transformação modal, foi possível chegar a valores mais apreciáveis dessas interferências.

De qualquer forma, o desenvolvimento matemático é relativamente grande, emprega um número muito elevado de fórmulas, tornando, de certa forma, difícil a compreensão, que só permite uma significativa interpretação pela construção de gráficos referentes aos valores equacionados.

Dentro desse argumento analítico, o presente trabalho apresenta, em sua parte final, gráficos que mostram até que ponto é possível admitir os níveis de rádio interferência provenientes de LT, de modo que seus efeitos não venham desqualificar a recepção do sinal em equipamentos usados nas imediações das linhas de transmissão.

Por estas razões é importante a padronização dos procedimentos tanto de medida quanto de ensaio de interferência para que as conclusões possam ser

¹³³ PEEK, F.W. **Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering**, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1929, pp.28-31, 48-108, 386. Located in Falvey Library, Villanova University, Villanova, PA: TK3401. P3. Rew 2004.

¹³⁴ HOLM, R. **Theory of Corona**. *Archiv fur Elektrotechnik*, vol 18, pp567-582, Alemanha. Rev 1999.

¹³⁵ RYAN, H.J.; HENLINE, H.H. **Hysteresis Character of Corona Formation**. *AIEE Transactions Power Apparatus and Systems*, vol. 43, pt III, Stanford University. Edition Nov. 2003

¹³⁶ CLARK, C.F.; LOFTNESS, M.O. **Some Observations of Foul Weather EHV Television Interference**. *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-90, nº. 06, Julho/Agosto 1989.

consistentes e, na medida do possível, reproduzíveis, de maneira a minimizar os erros.

Avaliações da geometria da linha de transmissão e do tempo, por ocasião das medições, são procedimentos indispensáveis para uma melhor execução dos cálculos. Informações adicionais são importantes para um perfeito entendimento da relação sinal/ ruído.

Outrossim, o projetista deve tomar em consideração os valores anuais de variação dos ruídos de rádio perante as diversas condições de tempo: chuva forte, bom e seco, a fim de que possa realmente avaliar a dimensão das perturbações eletromagnéticas, bem como saber analisar os efeitos da rádio interferência na execução de seus trabalhos.

O ambiente do MATHCAD mostrou-se adequado para o desenvolvimento analítico, possibilitando uma investigação dinâmica, dos efeitos do campo perturbador, bem como facilitando na construção dos gráficos explicativos. Assim sendo, foi possível estabelecer um código fonte capaz de possibilitar o estudo da rádio interferência com qualquer configuração e tensão.

Com o desenvolvimento da presente análise é permitido ao projetista e a empresas ligadas ao comércio de equipamentos eletroeletrônicos e de telecomunicações um estudo mais detalhado da rádio interferência causada por fontes externas, corona ou centelhamento, proveniente de linhas de transmissão.

O conhecimento da metodologia apresentada permitirá o estudo de outras configurações de linhas de transmissão, bem como a conversão de um nível de tensão da linha para outro, de modo a minimizar os efeitos da rádio interferência.

Além disto, os projetistas de linhas de transmissão e as empresas ligadas ao comércio de equipamentos eletroeletrônicos e de telecomunicações podem realizar um estudo detalhado da rádio interferência. Ademais, o projetista deve dar importância às recomendações do CISPR¹³⁷, quanto às distâncias de medida entre o ponto de medição da rádio interferência e o condutor fase mais externo à linha de transmissão.

No presente trabalho é possível concluir que equipamentos colocados a distâncias superiores a 20 metros de linhas de transmissão de até 500 kV não

¹³⁷ CISPR - Comitê International Spécial des Perturbations Radioponiques. Specification for CISPR radio interference measuring apparatus for the frequency range 0,15 a 30 MHz. CISPR publication n°. 01, 1961.

sofrem interferência eletromagnética apreciáveis mesmo em tempo de chuva forte.

Por outro lado, em tempo bom os equipamentos eletroeletrônicos e de telecomunicações praticamente não possuem problemas com as rádios interferências a qualquer distância de linha de transmissão até 500 kV.

A metodologia aplicada fornece soluções práticas para problemas que envolvem a geração, a propagação e a recepção dos sinais eletromagnéticos e ruídos, desde que se preservem as diretrizes da compatibilidade eletromagnética.

Ademais, infere-se que é de extrema validade manter os valores recomendados por norma da relação sinal/ruído, no caso de 20 dB ou mais baixo, no estudo do campo perturbador, de modo a garantir a compatibilidade eletromagnética dos sistemas elétricos envolvidos.

Através da análise de todos estes pontos e com o desenvolvimento matemático abordado, o presente estudo demonstrou que é possível estabelecer valores de campos elétricos da rádio interferência, analisá-los através de gráficos e tabelas e finalmente emitir conclusões quanto à qualidade da relação sinal/ruído, de modo a preservar a qualidade dos equipamentos eletroeletrônicos e equipamentos de telecomunicação usados nas proximidades das linhas de transmissão de alta tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, G.E. **The Calculations of the Radio Interference Level of Transmission Lines Caused by Corona Discharges.** AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol 75. pt. III, p 411 - 418. Rew 1991.

ADAMS, G.E., LIAO, T.W., POLAND M.G., TREBBY, F.J.: **Radio Noise Propagation and Attenuation on the Bonneville Power Administration McNary-Ross 345 kV line.** AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol 78, Par. III, pp 380 - 388. Rew. April 2002.

_____. ABEL, Engenharia de Segurança do Trabalho. **Projetos de Acústica Ambiental e Controle do Ruído.** Disponível em <http://www.abel-acustica.com.br/Pauta/01> - Acesso 15 outubro 2005.

ANATEL: Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução nº. 237 - Regulamento para Certificação de Equipamentos de Telecomunicações. Novembro 2000.

ANSI C63.022: **Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics of Information Technology Equipment.** Out 2002. Limites e métodos de medida das características de distúrbios de rádio para equipamentos de tecnológica da informação.

ANSI C 63.2: **Specifications for Radio-Noise and Field - Strenght Meters 0.015 to 30 MHz.** Especificações para ruídos de rádio e medidores de intensidade de campo de RI na faixa de 0.015 a 30 MHz. New York, 1969.

ANSI C 63.3: **Specifications for Radio-Noise and Field –Strength Meters 20 to 1000 MHz.** Especificações para ruídos de rádio e medidores de intensidade de campo de RI na faixa de 20 a 1000 MHz. New York, 1964.

BARRETO, Roberto Menna. **Influência de Linhas de Transmissão/Distribuição Em Sistemas Eletrônicos, de Telecomunicações e de Automação**, Rio de Janeiro, 2004.

BARTHOLD, L.O.; **Radio Frequency Propagation on Polyphase Lines**. IEEE. Transactions On Power Apparatus and Systems. Vol. Pas - 83. July 1997. Rew.

BARTHOLD, L.O; LAFOREST, J.J.; SCHLOMANN: Radio – **Frequency Propagation and Attenuation on The American Electric Power Dequine-Olive 345 kV Line**. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol 79, Par. III, Junho 1960, pp 303-309.

BEZERRA, Jairo Bezerra. **Curso de Matemática**. 11^a ed. Cia. Editora Nacional. 2001.

BRASIL, A.C.; LEÃO, Ricardo M.; AGUIAR, Y.M.A.; SOUSA, M.P; PELOSI, A.L: **Capacitores de Acoplamento para Sistema OPLAT - NBR 8149 - 1989**.

BRASIL, A.C; LEÃO, Ricardo M; AGUIAR, Y.M. A; SOUSA, V.M.P; PELOSI, A.L: **Equipamento de Tons de Áudio para Teleproteção- EB 2088 - 1994**.

BRASIL, A.C; LEÃO, Ricardo M; AGUIAR, Y.M. A; SOUSA, V.M.P; PELOSI, A.L: **Equipamento Terminal OPLAT para Teleproteção- EB 2089 - 1993**.

BS EN 55011: **Specification for limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment**. British Standard / European Standard 15 - Sep - 1998. Especificações para limites e métodos de medida das radio interferências de equipamentos industriais, científicos e médicos.

CALABRESE, G: **Symmetrical Components**. pp 289 - 298, 371 - 380. New York: Ronald, Rew 1995.

CISPR - 1: **Specification for Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range 0,15 MHz to 30 MHz.** Geneva, Suíça, Rev 2003.

CISPR - 2: **Specification for Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range 25 to 300 MHz.** Genova, Suíça, 1966. Especificações para equipamentos de medida de rádio interferência na faixa de 25 a 300 MHz.

CLADÉ, J.J.; GARY C.H., **Predetermination of Corona Losses Under Rain. Influence of Radio Intensity and Utilization of a Universal Chart.** IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, v.PAS-89, p.1179-1185. July/August 1970.

CLARK, C.F.; LOFTNESS, M.O., **Some Observations of Foul Weather EHV Television Interference.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol.PAS-90, N°. 6, Julho/Agosto 1989.

CLARK, E. **Circuit Analysis of AC Power Systems**, vol 1 pp 373-375, 434 - 442, New York: John Wiley and Sons, Jan./Feb. 2001, pp. 218 - 222. 7.

CLAYTON, R.P: **Electromagnetics for Engineers with Applications to Digital Systems and Electromagnetic Interference.** John Wiley & Sons. INC, 2004, p. 207.

CODI – Comité de Distribuição - Tema 17. **Localização de Defeitos com Detectores de Rádio Interferência e Ultra-Som.** Out. 1991.

COMBER, M.G. DENO, D.W. e ZAFANELLA, L.E., **Corona Phenomena on AC Transmission Lines.** Electric Power Research Institute. Palo Alto, Califórnia, USA. Cap.4, p. 169, 1982.

COMBER, M.G.; NIGBOR, R.J: **Radio Noise. Transmission Line Reference Book.** Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. Rew 1982.

COMBER, M.G.; ZAFFANELLA, L.E. **Audible Noise Reduction by Bundle Geometry Optimization**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS. 92, Outubro 1973.

CORTINA, R.; DEMICHELIS, F.; SERRAVALLI, W.; SFORZINI, M. **I Disturbi Alle Comunicazioni Radio e Televisive Prodotti Dalle Linee Aeree a Media Tensione**. Rendiconti Della LXIX Riunione Annuale AEI, 1978.

CORTINA, R.; SERRAVALLI, W.; SFORZINI, M. **Radio Interference Long Term Recording on an Operating 420-kV Line**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS - 89, pp 881 - 892. Rew Jan 1999.

COSTA, Gilberto José Corrêa da. **Contribuição ao Estudo de Rádio Interferência**. P.Alegre. CEEE, outubro, 1987.

DAVIS, A.H. **An Objective Noise Meter for the Measurement of Moderate, Loud, Steady and Impulsive Noise**. Journal of the IEE. Londres, Inglaterra, Vol. 83, p.249 - 260. Rew 2003.

DESARROLLO SOSTENIBLE, **Desarrollo Económico Respetuoso del Ambiente Natural Y Social**. República Argentina, 12 de março 1998.

DOLUKHANOV, M. **Propagation of Radio Waves**. Moscow, Mir Publishers. Moscou 1971. pp. 9 - 18.

DONALD, G.F; **Electronics Engineers Handbook**. McGraw- Hill Book Company. New York. Setembro 2001.

EDMINISTER, J.A.; **Circuitos Elétricos**. McGraw- Hill Book Company do Brasil. Rio de Janeiro. Brasil. 1996.

_____. **Efeito Corona**-Engenharia Elétrica da UFES - Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em <http://www2.lcee.ele.ufes.br/x/professores/arquivos/45>. Acesso em 10 setembro 2005.

EHRlich, Pierre J. **Dispositivos e Circuitos de Eletrônica Aplicada**. Editora Edgard Blücker Ltda. 1985.

_____. Federal Communications Commission. **Federal Communication Commission Rules and Regulations**. Vol. II. Part 15, revisado em Maio 1975.

FERN, W.J; BRABETS, B.I; **Field Investigation of Ozone Adjacent to High Voltage Transmission Lines**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 93, pp 1269, September/October 1974.

FUJIMORA, T.; **Studies on Corona Performance of Insulator Assemblies for UHF Transmission Lines**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems. June 1979.

GARY, C.; MOREAU, M. **L'effect de Couronne em Tension Alternative**. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. França, 1976.

GARY, C ; CLADÉ, J. **Lês Perturbations Radio-Électriques Engendrées Par lês Lignes de Transport d'Énergie**. Revue Générale de Electricité, Vol. 75, No 5, ,pp. 659 - 681. Rew. August 2001.

GARY, C. ; HIRSCH, F. **Interferences Produced By Corona Effect of Electric Systems**. Description of Phenomena Pratical Guide For Calculation. Grupo de trabalho 36.01. p. 28. Set 1997.

GARY, C.; MOREAU, M.: **Predetermination of the RI level of high voltage transmission lines**: Part II-Field calculating method. IEEE Summer Meeting, Portland, Oregon, N. Rew 2002.

GODDARD, W.R.; **Measurements and Study of Radio Noise from Electric Power Lines in the Central Canada Region**. Winnipeg, Canada, Office of Industrial Research, University of Manitoba. Rew May 1996.

GOODYEAR, C.C., **Signals and Information**. Wiley Interscience Division. John Wiley e Sons. New York.USA. 1986.

GROSS, I.W. **Corona Investigation on Extra High Voltage Lines - 500 kV**. Test Project of the American Gas and Electric Company. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 70,p. 75 - 94, Rew 1984.

HATANAKA, G.K.; **Field Measurements of VHF Noise from an Operating 500 kV Power Line**, IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol. PAS - 100. February 1981.

HEDMANN, D.E.: **Propagation on Overhead Transmission Lines-Theory of Modal Analysis**, IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems. Vol PAS - 84, pp 200 - 211.New Rew Abril 2000.

HOLM, R. **Theory of Corona**. *Archiv fur Elektrotechnik*, vol 18, pp. 567 - 582, Alemanha.Rew 1999.

HUGHES, W. F.; GAYLORD, Eber W. **Basic Equations of Engineering Science**. Schaum Publishing Co. New York. 1998.

IEC 61.000 - 1 - 1: **Eletromagnetic Compatibility (EMC) - Application and interpretation of fundamental definitions and terms**, Abril 1992.Recomendações para aplicação, interpretação de termos e definições consideradas básicas para o CEM.

IEC 61.000 - 6 - 3: 61000 - 6 - 3/PRAA: **Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 6-3: Generic Standards - Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments.** Recomendações para emissão de equipamentos elétricos e eletrônicos utilizados em ambientes residenciais, comerciais e industriais de pequeno porte. Set 2001.

IEC/CISPR - 13: **Sound and television broadcast receivers and associated equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement.** Especificações sobre limites e métodos de medida de equipamentos de som, televisores e receptores de rádio. Nov.2003.

IEC/CISPR - 15: **Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment.** Nov. 1998. Limites e métodos de medida das características de rádio perturbação dos equipamentos de iluminação e similares.

IEC/CISPR - 16; **Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antenna calibration test sites for 30 MHz to 1 000 MHz .** Out 1999. Métodos e especificações de equipamentos de medição de perturbações rádio e imunidade, com testes para calibração de antenas de 30 a 1000 MHz.

IEEE - 213, **Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines.** New York, NY.: Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), 1976. Std. 430-197.

IEEE Committee Report. **Transmission System Radio Influence,** IEEE. Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 84, N° 8, pp. 714 - 724. Rew 1989.

IEEE Committee Report. CIGRE/IEEE. **Survey on Extra High Voltage Transmission Line Noise.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS - 92, N° 3, pp1019 - 1028.Rev. Maio 2001.

IEEE Committee Report. **Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRE/IEEE Survey Results**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Nov 2002.

IEEE C - 95. 1: **IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz - Description**. Especificações de níveis de segurança com respeito à exposição humana dos campos eletromagnéticos da rádio interferência, 3 kHz a 300 GHz, USA, 1991.

IEEE 430 - 197: **Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Lines**. Procedimentos padrões para medidas de ruído de rádio proveniente de linhas aéreas. New York, USA, 1976.

IEC 62040/ED.1: **Uninterruptible compatibility (EMC) requirements**. (IEC Document 22B/107/CD). Requerimentos para compatibilidade eletromagnética ininterrupta. Rev. Out. 1993.

KENNEDY, G., **Electronic Communication Systems**. McGraw-Hill Kogakucha Ltda. Tokyo. December 1998.

KNUDSON, Niels: **Corona Power Losses on Bundle Conductors**. Elteknik, nº. 4. New rew 2003.

KOLMAN, Bernard. **Introdução à Álgebra Linear com Aplicações**. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora AS. 1999.

KRAUS, J.D.: **Electromagnetismo** - Ingeniería Eléctrica - El Ateneo, Buenos Aires, p. 424. Fourth Edition, New York: MacGraw - Hill, 1992.

KRAVCHENKO, V.D., **Measuring of Corona Losses on Operating 400 - 500 kV Lines**. Paper nº. 407, CIGRE, Rev. 1998.

LAFORST, J.J. **The Effect of Station Radio Noise Sources on Transmission Line Noise Levels**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS - 84, Nº. 9, Rew 1998. pp 833 - 838.

LAFORST, J.J., **Seasonal Variation of Fair-Weather Radio Noise**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, PAS - 87, p. 928 - 931, Rew 2002.

LATHI, B.P., **Communication Systems**. John Wiley e Sons. New York. USA. 1987.

LEÃO, Ricardo M.;DIAS,G.A.D.:**Rádio Interferência Proveniente de Linhas de Alta de Linhas de Alta Tensão**. Fórum de Integração Energética, Eletrisol, Porto Alegre-RS, Setembro 2005.

LEVOTOV, V.I. **Operational Experience on 500 kV Networks in the USSR**, CIGRE, 1999.

LINDNER, Pinhas Malka, TOPAZ, JEREMY M., MENDELSON, Avi. **Efeito Corona e Arco Voltaico**. Ofil Ltd. Israel. 2005.

LOEB, L.B. Electrical **Coronas-Their Basic Physical Mechanism**. Berkeley: University of California Press, 1963.

LOWENBERG. Edwin C. **Circuitos Eletrônicos**. Editora Mc. Graw - Hill do Brasil Ltda.1974.

MARKOV, G. **Antennas**. Progress Publishers. Moscow. 1984.

MARTIGNONI, A.; **Eletrotécnica**. - Editora Globo. P.Alegre. RGS. Brasil. 1980.

MARUVADA, P. Sarma. e TRINH, N.G.. **A Basis for Setting Limits to Radio Interference from High Voltage Transmission Lines**. IEEE. Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 94, N° 5, Setembro de 1975, pp. 1714 - 1724.

MARUVADA, P.Sarma: **AC and DC Transmission Line - Corona Effects**. Orlando, Flórida,USA, Fev. 2004.

MASON, C. Russel. **The Art and Science of Protective Relaying**. General Electric Co. Schenectady. New York. 1986.

MAXWELL, J.C.: **A Treatise on Electricity and Magnetism**. Oxford University Press, New York, Rew 2003.

MÜHLEN, Sérgio Santos. **Interferência e Compatibilidade Eletromagnética**. Alemanha 2002.

NBR 7876. Medição da Rádio Interferência na faixa de 0,15 a 30,0 MHz em Linhas e Equipamentos de Alta Tensão, S.Paulo. 1983.

NBR - 12304: Limites e Métodos e de Medição de Rádio Perturbação em Equipamentos da Tecnologia da Informação. 1992.

NBR - 7875: Instrumentos de Medição de Rádio Interferência na faixa de 0,15 a 30MHz, 1983.

NBR - 9890: Localização e Remoção de Focos de Rádio Interferência em Linhas Aéreas de Alta Tensão. Junho 1987.

PAKALA, W.E.; CHARTIER, V.L. **Radio Noise Measurements on Over Head Power Lines from 2.4 to 800 kV**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 90. nº 3. Rew Maio 2003.

PEEK, F.W, Jr., **Law of Corona**. AIEE, Transactions Power Apparatus and Systems, vol. 30,31,32. 1912 -1929.

PEEK, F.W. **Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering**, Third Edition, McGraw - Hill Book Company, Inc., 1929, pp.28 - 31,48 - 108,386. Located in Falvey Library, Villanova University, Villanova, PA: TK3401.P3. Rew 2004.

PELOSI, A.L.; SOUSA,V.M.P; BRASIL, A.C.; LEÃO, Ricardo M.: **Bobinas de Bloqueio para o Sistema OPLAT - NBR 8147 - 1984**.

PELOSI, A.L.; SOUSA, V.M.P; BRASIL,A.C.;LEÃO,Ricardo M.;**Equipamento de Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão - OPLAT- NBR 8146 - 1983**.

PERRY, D.E.; CHARTIER, V.L.; REINER, G.L.; **BPA 1100 kV Systems Development Corona and Electric Field Studies**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98.October 1979.

PERZ, M.C.: **Natural Modes of Power Line Carrier on Horizontal Three Phase Lines**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS - 83, pp 679 - 686. New Rew Maio 2000.

_____. Quelle Automação Industrial Ltda. Rua Igati, 47, Vila Anhanguera. S.Paulo, SP. Disponível **O Efeito Corona e as Descargas Elétricas nos Gases**. Disponível em <http://www.quelle.com.br/Artigos/EfeitoCorona.html>. Acesso em 20 setembro 2005.

RYAN, H.J.;HENLINE, H.H. **Hysteresis Character of Corona Formation**. AIEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol.43,pt III, Stanford University. Edition Nov. 2003 .

SCHWARTZ, Mischa. **Transmisión de la Información, Modulación y Ruido**. Buenos Aires: Alsina 731, 1968. p.217.

SHEPHERD, R.A., GADDIE, J.C.; **Measurements of the APD and the Degradation Caused by Power Line Noise at HF**. Menlo Park CA: Stanford Research Institute. Rew April 1999.

Sistema OPLAT - NBR 8147-1984.

SMITH, Albert A. **Radio Frequency, Principles and Applications**. New York, NY:IEEE Press, 1998. p. 111.

STEUDEL, U.; **Hochfrequenztechnik und Elektroakustik**. Vol.41, p.15.Germany. Rew 2002.

TERMAN, Frederick Emmons; PETTIT, Joseph Mayo. **Electronic Measurements**. International Student Edition. Mc.Graw-Hill Book Co.Tokyo. 1998.

TERMAN, F.E., **Electronic and Radio Engineering**. International Student Edition. McGraw - Hill Book Company. New York. USA. 1995.

THOUREL, L.; **The Antenna**. Chapman and Hall.London .Edition Published by Dunod, Paris. October 2000.

TONIOLO, Marcelo. **Artigos Técnicos e Informações para Dxistas**. Osasco, S.Paulo, 6 de maio 2002.

TRINH, G.; JORDAN, J.G., **Modes of Corona Discharges in Air**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, nº 5, p.1217 - 1215. USA 2001.

VALLANDRO, Leonel. **Dicionário Inglês-Português**. 3ª ed. Editora do Globo. 1970.

VDE 0875-11: **Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment - Radio disturbance characteristics; limits and methods of measurement**. (IEC/CISPR 11:1997, modified); German version EN 55011:1998. Limites e métodos de medidas das características de rádio interferência em equipamentos industriais, científicos e médicos.

VDE 0872-13: **Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of broadcast receivers and associated equipment**; German version EN 55013: Alemanha 1999. Limites e métodos de medida das características de radio interferências para receptores de rádio e equipamentos associados.

WARBURTON, F.W.; LIAO, T.W.; HOGLUND, N.A.; **Power Line Radiations and Interference above Fifteen Megahertz**. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems. Rew October 1992.

WEDEPHOL, L.M.; **Application of Matrix Methods to the Solution of Traveling Wave Phenomena in Polyphase Systems**. Proceedings IEEE. Rew. December 1993.

WESTINGHOUSE: **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**, pp 749-752. East Pittsburgh, Pa. Rew 2002.

_____. Wikipedia. **The Free Encyclopedia**. Disponível em http://em.wikipedia.org/wiki/Radio_Frequency_Interference. Acesso em 08 de setembro 2005.

ZINGARELLI, Nicola; **Lo Zingarelli Minore** - Vocabolario della lingua Italiana. Maggio 1994.