

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

# **AVALIAÇÃO DO RUÍDO DE RÁDIO INTERFERÊNCIA PROVENIENTE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500 kV**

por

**Alisson Ladeira Senna Filho**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia de Potência  
Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia.

Orientador: Professor Dr. Glássio Costa de Miranda

**Belo Horizonte – MG  
04 de março de 2011**

**Dissertação de Mestrado**

**AVALIAÇÃO DO RUÍDO DE RÁDIO  
INTERFERÊNCIA PROVENIENTE DE LINHAS DE  
TRANSMISSÃO DE 500 kV**

**Alisson Ladeira Senna Filho**

*“Se você quiser me encontrar, não vai mais aos lugares por onde andei ou morei.*

*Já não moro mais por aí...Se você quiser me encontrar, pare um pouco e, em silêncio, pense em mim. Se você quiser me encontrar, Olhe bem dentro de você. Sinta seu coração bater forte, sinta-se feliz e não procure mais por mim...*

*Eu estou aí...Dentro do seu coração!”*

*(Autor Desconhecido)*

*Dedico este trabalho a Deus*

*Aos meus pais Alisson (in memoriam) e Maria aos meus irmãos, que me ensinaram e me mostraram o caminho certo a ser seguido.*

*Aos meus filhos Ígor, Gabriel e Júlia que foram o motivo para a retomada dos meus estudos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela força e coragem que me forneceu para iniciar mais uma jornada importante na minha vida.

À minha esposa e sua família pela compreensão e paciência das intermináveis horas na elaboração deste trabalho, aos meus filhos pelo apoio e compreensão por eu ter me ausentado várias vezes e porque, sem dúvida, são pessoas de grande importância em minha vida.

Ao meu orientador e amigo professor Glássio Costa de Miranda, que me incentivou a começar e também conduziu com empenho e dedicação este trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica que diretamente e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho em especial aos professores José Osvaldo, Wallace, Ivan, Élson, Silvério, Flávio Hara, Flávio Vasconcelos, Porfírio, Davies e Hélder.

Aos amigos do LEAT, José Luis que atuou como co-orientador não oficial e Sérgio pelo apoio, amizade e compreensão.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica/Eletrônica em especial ao Darley por me ajudar nas correções e ao André e Hudson, por me ajudar nas tarefas como funcionário, sem a qual eu não teria conseguido concluir este trabalho dentro do prazo limite e também.

Aos amigos da UFMG, Ailton, Edino, Arthur, Emerson, Davi, Alexander, João Henrique, Filipe, Ramon, Rosemberg, Reginaldo e Raimundo.

A CEMIG pelo suporte financeiro e os equipamentos fornecidos para a execução das medições.

## RESUMO

Este trabalho trata de medições e cálculos de rádio interferência (RI) gerada nas linhas de transmissão de alta tensão devido ao efeito corona.

As medições foram realizadas na vizinhança de uma linha de 500 kV, circuito simples, com os condutores dispostos na horizontal.

Os procedimentos de medição são apresentados em detalhes e os resultados apresentados correspondem aos primeiros resultados publicados no estado de Minas Gerais.

Depois que o cálculo teórico de rádio interferência é apresentado, os procedimentos de medição e os resultados são discutidos. Inicialmente, o ruído ambiente na vizinhança da linha foi medido com uma antena tipo “loop” conectada ao medidor de rádio interferência. Em seguida a antena foi centrada abaixo dos cabos da linha para iniciar as medições.

Uma análise comparativa das diferenças entre os valores de RI calculados e medidos é apresentada. O resultado mostrou boa concordância, sendo melhor para pontos mais afastados da linha, também apresentou boa concordância com a literatura.

## **ABSTRACT**

The present work deals with measurements and calculations of radio interference (RI) generated by high voltage transmission lines due to corona.

Measurements were performed in the vicinity of a 500 kV, single-circuit transmission line with the conductors horizontally disposed.

The measurement procedures are presented in details and the presented results correspond to the first RI results published in Minas Gerais state.

After the theoretical RI calculations are presented, the measurement procedure and results are discussed. Initially, the background noise at the vicinity of the line was measured with a loop type antenna connected to a RI meter. Later the antenna was centered underneath the line cables to start the measurements.

A comparative analysis of the differences between the calculated and the measured RI values is presented. The results show good agreement, being better for points located far to the line; it also showed good agreement with those presented in the literature.

## ***Lista de Simbologias, Abreviações e Siglas***

dB	Decibel
$\text{dB}_{\text{uV/m}}$	Campo elétrico em decibel acima de 1 micro volt por metro
$\mu\text{V}$	Microvolts
$\delta$	Densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ )
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
t	Tempo
b	Pressão absoluta em mm de Hg
T	Temperatura em graus Celsius
mmHg	Pressão (milímetro de mercúrio)
$\lambda$	Comprimento de onda
n	Número de subcondutores
$E_g$	Gradiente máximo na superfície do condutor kV/cm
$E_0$	Nível de referência de RI da linha tomada como base
d	Diâmetro do subcondutor
$k_n$	Fator multiplicativo em função do número de condutores
RI	Rádio Interferência
RF	Rádio Frequência
LT	Linha de Transmissão
$D$	Distância do condutor ao medidor
$L_{1 \text{ rain}}$	Nível de ruído de RI excedido em 1% do tempo com chuva forte
$L_{50 \text{ wc}}$	Nível de ruído de RI excedido em 50% do tempo com condutor molhado
$L_{50 \text{ fair}}$	Nível de ruído de RI excedido em 50% do tempo com tempo bom
QP	Quase Pico
$\Omega$	Ohms
V	Volts
kV	Kilovolts
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
FI	Frequência intermediária
kW	Kilowatts
RMS	Root Mean Square
C	distância entre as fases



H	Altura dos condutores
SNR	Signal to Noise Ratio
EHV	Extra-Alta Tensão
UHV	Ultra-Alta Tensão
AM	Amplitude Modulada
FM	Frequência Modulada
TV	Televisão
VHF	Very High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
EMI	Interferência Eletromagnética
IEC	International Electrotechnical Commission
CISPR	International Special Committee on Radio Interference
FCC	Federal Communications Commission`s
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
CIGRÈ	International Council on Large Electric Systems
ANSI	American National Standards Institute
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações

## Listas de Figuras e Tabelas

Figura 2.1 - Efeito avalanche.....	16
Figura 2.2 - Distorção do campo elétrico causada por cargas parciais.....	17
Figura 2.3 - Corona em tensão alternada.....	18
Figura 2.4 - Espectro eletromagnético da rádio frequência.....	18
Figura 2.5 - Exemplo de correção na variação da tensão de uma LT.....	19
Figura 2.6 - Corona em um condutor úmido.....	20
Figura 2.7 - Efeito do diâmetro do subcondutor e o número de condutores.....	21
Figura 2.8 - Efeito da variação do diâmetro do feixe – 550 kV.....	21
Figura 2.9 - Efeito do espaçamento entre as fases – 550 kV.....	22
Figura 2.10 - Efeito da variação da altura – 550 kV.....	22
Figura 2.11 - Região de campo perto e campo distante.....	23
Figura 3.1 - Distância do condutor ao medidor de RI.....	27
Figura 3.2 - Diagrama de bloco do analisador de espectro.....	28
Figura 3.3 - SPAN (faixa de frequência).....	29
Figura 3.4 - Influência do parâmetro RBW na medição.....	29
Figura 3.5 - Influência do parâmetro VBW na medição.....	30
Figura 3.6 - Influência do parâmetro ST na medição.....	30
Figura 3.7 - Resposta do circuito detector de quase-pico.....	31
Figura 3.8 - Fator de antena típico em função da frequência.....	32
Figura 3.9 - Analisador de espectro do fabricante Rohde & Schwarz.....	33
Figura 3.10 - Antena loop ativa na faixa de 10 kHz a 30 MHz.....	33
Figura 3.11 - Medidor das condições atmosféricas.....	34
Figura 3.12 - Distribuição de frequência acumulativa do ruído.....	35
Figura 3.13 - Perfil lateral para três alturas diferentes de linha.....	35
Figura 3.14 - Local onde foram feitas as medições.....	36
Figura 3.15 - Esquema de medição.....	36
Figura 3.16 - Qualidade de recepção de rádio AM versus SNR.....	39
Figura 4.1 - Torre de transmissão.....	42
Figura 4.2 - Espectro do ambiente na faixa de 0,5 a 1,6 MHz.....	43
Figura 4.3 - Gráfico do perfil lateral medido e calculado.....	45
Figura 4.4 - Sinal das rádios em relação ao perfil lateral.....	47
Figura 4.5 - Gráfico com as Relações Sinal/Ruído (SNR).....	48
Figura 4.6 - Variação do sinal das rádios e do RI.....	49
Tabela 4.1 - Características da linha de 500 kV.....	41
Tabela 4.2 - Características dos instrumentos e frequência de medição.....	42
Tabela 4.3 - Condições climáticas e ponto de medição.....	42
Tabela 4.4 - Perfil lateral medido.....	44
Tabela 4.5 - Nível de sinal das rádios.....	44
Tabela 4.6 - Perfil lateral calculado.....	45
Tabela 4.7 - Relação Sinal/Ruído (SNR) para cada distância da linha.....	48

## Sumário

Resumo.....	lv
Lista de simbologias, abreviações e siglas.....	Vi
Figuras e tabelas.....	Viii
<b>Capítulo 1 – Introdução.....</b>	<b>11</b>
1.1 Relevância do Tema.....	11
1.2 Objetivo do Trabalho.....	12
1.3 Breve Histórico.....	12
1.4 Estrutura da Dissertação.....	14
<b>Capítulo 2 – A Rádio Interferência Proveniente de Linha de Transmissão....</b>	<b>15</b>
2.1 Introdução.....	15
2.2 O Efeito Corona como Fonte de Rádio Interferência.....	15
2.2.1 O corona na linha de transmissão.....	15
2.2.2 O corona sob chuva.....	16
2.2.3 O corona no semiciclo positivo e negativo.....	16
2.3 Aspectos Importantes em Relação a Rádio Interferência .....	18
2.3.1 Fatores que influenciam no nível de rádio interferência.....	19
2.3.2 Nível que expressa o limite da RI da linha.....	23
2.4 Propagação do Ruído de Rádio Interferência .....	23
<b>Capítulo 3 – Procedimentos de Cálculo e Medição de Rádio Interferência....</b>	<b>25</b>
3.1 Introdução .....	25
3.2 Métodos Empregados para Predição de RI.....	25
3.2.1 Métodos comparativos.....	25
3.2.2 Método analítico.....	26
3.2.3 Metodologia utilizada.....	26
3.3 Sistema de Medição de RI .....	27
3.3.1 Medidor de rádio interferência .....	27
3.3.2 Sensor de campo .....	31
3.3.3 Equipamentos utilizados.....	32
3.4 Metodologia de Medição .....	34
3.4.1 Determinação do nível de RI .....	34
3.4.2 Local de medição .....	36
3.4.3 Esquema de medição .....	36
3.4.4 Cuidados a serem observados.....	37
3.4.5 Principais procedimentos.....	38
3.4.5.1 Procedimento para escolha da frequência de medição .....	38
3.4.5.2 Procedimento para a medição do perfil lateral.....	38
3.4.5.3 Procedimento para medição da relação sinal/ruído.....	38

<b>Capítulo 4 – Resultados.....</b>	<b>41</b>
4.1 Introdução.....	41
4.2 Características da Linha e Dados Relacionados com a Medição.....	41
4.3 Resultados da Medição do RI para Tempo Bom.....	43
4.3.1 Perfil lateral.....	43
4.3.2 Relação sinal/ruído.....	44
4.4 Resultado do Cálculo do Perfil Lateral.....	44
4.5 Análise dos Resultados.....	46
4.5.1 Análise do perfil lateral.....	46
4.5.2 Análise da relação sinal/ruído (SNR).....	47
<b>Capítulo 5 – Conclusões.....</b>	<b>50</b>
5.1 Conclusões .....	50
5.2 Propostas de Continuidade.....	52
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>53</b>

### 1.1 Relevância do Tema

Nos dias atuais, o plano de aceleração do crescimento econômico virou prioridade e uma forma de verificar se o país está crescendo, é observar o quanto de energia este consome, pois, crescimento depende de energia. Para tanto, estamos sempre estudando meios de vencer o desafio de transportar maiores blocos de energia para dar sustentação ao país. Para atingir este objetivo torna-se necessário projetar linhas de transmissão com tensões mais elevadas e mais compactas. Porém, junto com esta necessidade existem também as questões urbanas, ambientais e de redução de custos, que tem que ser levadas em consideração para que o projeto seja viável e o sistema elétrico tenha qualidade, confiabilidade e sustentabilidade. Cada vez mais, busca-se um sistema que funcione dentro dos requisitos da sustentabilidade, evidenciando problemas tais como a poluição ambiental, os limites dos campos eletromagnéticos, o ruído audível e também a rádio interferência.

Quanto maior a tensão, maior será a probabilidade de ocorrência do efeito corona. Dentro de uma perspectiva de custo benefício, para tensões acima de 100 kV é economicamente inviável projetar uma linha que não produza nenhum ruído de rádio interferência. Neste contexto, o presente trabalho tem como foco, o estudo e a medição do ruído de rádio interferência provocado pelo efeito corona, presente nas linhas de transmissão de alta tensão (500 kV), e comparar os valores medidos com valores obtidos através de formulação numérica.

A rádio interferência é definida como a degradação da recepção de um sinal desejado, por outro sinal, que na maioria das vezes pode ser considerado indesejado, na faixa de frequência das ondas de rádio. As linhas de transmissão geram campo de 60 Hz, que é a frequência de transmissão, mas devido ao alto campo elétrico nas vizinhanças do condutor, faz com que este sistema gere também campos de alta frequência na faixa de alguns mega Hertz (MHz). O campo elétrico de 60 Hz cria uma ionização do ar que dá origem ao efeito corona, responsável pelo ruído que interfere nos sistemas de comunicação e também em outros equipamentos que por ventura estejam próximos as linhas de alta tensão [1,2].

Existe uma área da engenharia elétrica que estuda o ambiente eletromagnético no qual estamos inseridos, conhecida como Compatibilidade Eletromagnética (CEM). Qualquer ruído causado por linha de transmissão elétrica deve ser identificado e seus limites controlados, de forma que não cause interferência em nenhum dispositivo, unidade de equipamento ou sistema.

## 1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo, avaliar os aspectos envolvidos na medição da rádio interferência, e comparar o valor medido com o valor calculado através de uma formulação empírica, que melhor se ajuste aos parâmetros eletro-geométrico da linha de transmissão escolhida.

Além dos resultados apresentados, serão relatados os procedimentos envolvidos no processo de medição, já que estas informações são de difícil acesso.

## 1.3 Um Breve Histórico

Neste item será feito um breve histórico, do início do século xx até os dias de hoje, dos estudos em relação ao ruído de rádio interferência proveniente de linha de transmissão, citando o corona, que é a fonte deste ruído, a identificação do ruído rádio interferência como fonte de problema, o cálculo, medição e outros fatores importantes.

Sendo o corona a fonte de rádio interferência, é importante citar os primeiros passos a respeito de sua mitigação [3]. Lichtenberg em meados do século XVIII fez os primeiros estudos científicos, registrando as formas do corona. Ele constatou que as formas variavam com a magnitude, com a forma de onda e com a polaridade da tensão aplicada. Townsend no início do século XX, apresentou estudos sobre o processo de ionização em gases e realizou as primeiras formulações para o cálculo da tensão associada ao corona. Peek, em 1929, estimou o campo elétrico crítico para formação de descargas de corona. Suas expressões são largamente utilizadas até os dias de hoje. Loeb e Zaengl deram as últimas contribuições mais significativas na teoria de formação das descargas e para o cálculo do campo elétrico crítico.

Uma vez reconhecido que o ruído de rádio interferência de linha de transmissão causada por corona prejudicava a recepção dos sinais de rádio difusão, propostas de cálculo e medição do ruído de RI vêm sendo estudados. Estudos envolvendo cálculo de RI são encontrados desde a década de 30.

Em 1933 um encontro dos membros da International Electrotechnical Commission (IEC) em Paris recomendou o International Special Committee on Radio-Interference (CISPR) como responsável pelos problemas emergentes de EMI. A CISPR subsequentemente produziu publicações técnicas cobrindo medições e técnicas de testes e limites de emissões e imunidades [4].

F.O. McMillan e H.G. Barnett, em 1935, publicaram um trabalho mostrando a diferença nos valores medidos da RI, RMS e crista, indicando que para ruídos aleatórios a medição deve ser feita com um tipo de detecção apropriado. Eles também descrevem um instrumento que na época estava em desenvolvimento [5].

C.V. Aggers, Dudley E. Foster e C.S. Young, em 1940, citaram em seus trabalhos outras características do medidor de rádio interferência que também tem um efeito no valor medido. Isto torna desejável que os equipamentos usem técnicas similares, podendo-se fazer comparações satisfatórias entre os resultados [6].

G.E. Adams, em 1956, apresentou pela primeira vez um método para o cálculo do nível de RI para linhas de transmissão, usando a teoria modal, no qual desacopla as fases, com a utilização de técnicas matriciais associadas a uma transformação

linear dos vetores de tensão e corrente. Após este trabalho, um grande número de pesquisadores mostrou interesse pelo problema [7].

W.E. Pakala e R.M. Showers, em 1958, publicaram um trabalho apresentando diferenças entre técnicas da instrumentação envolvidas na normalização americana e européia [8].

G.E. Adams, L.O. Barthold, W.E. Pakala, E.R. Taylor, e R.T. Harrold, na década de 60, agruparam as várias formulações de cálculo da RI em duas metodologias de cálculo, sendo a primeira no início da década, no qual convencionou chamar de analítica (semi-empírico). Esta metodologia utiliza dados da corrente injetada por unidade de comprimento do condutor, pelo efeito corona, obtida através de medições em laboratório, para calcular o campo referente à rádio interferência. A outra metodologia, conhecida por métodos empíricos (ou comparativos), utiliza-se de comparações entre um valor de referência bem definido do nível de RI de uma linha, com uma determinada geometria, com os dados medidos de uma linha tomada como referência. Pakala e Taylor citaram também que os fatores geralmente considerados nas análises da rádio interferência são a geração do ruído, a propagação da tensão do ruído e a atenuação do ruído em uma direção perpendicular a linha. Eles também concluíram que em linhas com tensões abaixo de 70 kV, o ruído de RI é devido a fontes locais (ruído de centelhamento), as quais podem ser eliminadas; e nas tensões maiores, o corona é a principal fonte, sendo que é economicamente inviável eliminá-las. Outra conclusão importante refere-se ao uso do analisador de espectro, dando maior resolução, exatidão, comparação e agilidade, principalmente quando mudanças climáticas ocorrem em um curto intervalo de tempo [9].

R.T. Harrold, em 1970, fez comparações entre os equipamentos de medição analógicos e os analógicos com tratamento digital dos dados medidos (analisadores de espectro), mostrando que o analisador tem várias vantagens sobre o analógico: exatidão, velocidade na aquisição dos dados, visualização dos sinais a serem medido, sincronismo com a rede para medir o RI das fases separadas e também cobrir um largo espectro de frequência [10].

O IEEE/CIGRÉ, em uma pesquisa conjunta concluída em 1973, depois de reconhecer a ampla variação da RI, e visando o estabelecimento de leis estatísticas válidas, reuniu dados de 75 linhas, das mais diversas configurações e com tensões acima de 230 kV, situadas em regiões de climas diferentes. Uma segunda etapa desta pesquisa foi comparar esses resultados com os resultados obtidos através dos métodos de cálculo para a predeterminação de RI, que vinham sendo desenvolvidos por vários grupos de pesquisa de diversos países [11, 12].

De 1980 a 2000, são publicados vários trabalhos usando métodos de cálculo de RI empíricos e analíticos. A partir do ano 2000, os estudos foram direcionados, em sua grande maioria, para os métodos semi-empíricos, devido a sua maior flexibilidade, podendo ser utilizado na predição da RI para qualquer geometria de linha, independente do número de circuitos [13].

Quan Zhou, Caixin Sun, Lifan Liu, Wenxia Sima, Wendou An, em 2001, também fizeram uso de um método empírico para avaliar os efeitos do campo de RI [14].

Wan Baoquan, Liu Dichen, Wu Xiong e Lu Yao, em 2006, validam o cálculo baseado no método empírico para tempo bom, recomendado pela CISPR, concluindo

que os resultados foram bastante satisfatórios. Também citaram que a RI pode afetar a recepção de rádio e televisão, mas não afeta a saúde das pessoas [15].

Este trabalho apresenta uma avaliação dos aspectos envolvidos na medição da rádio interferência, e mostra uma comparação do nível de RI obtido através de medição, feita com um analisador de espectro, com o valor calculado através do método empírico. Os resultados mostraram boa concordância com a literatura.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, na seguinte sequência: Introdução, A Rádio Interferência Proveniente de Linhas de Transmissão, Procedimentos de Cálculo e Medição de RI, Resultados e Conclusões.

O Capítulo 1 mostra ao leitor o caminho que será seguido neste trabalho, situando-o em relação à relevância, o objetivo e um breve histórico acerca da medição e do cálculo de rádio interferência.

O capítulo 2 trata dos aspectos físicos relacionados ao efeito corona, dando maior ênfase ao corona em linhas de transmissão, fenômeno responsável pelo ruído de rádio interferência. Aborda também os fatores que influenciam nos níveis de RI.

O capítulo 3 apresenta, os métodos de predição de RI detalhando a formulação escolhida, a metodologia de medição, os cuidados a serem observados e os procedimentos de medição.

O capítulo 4 apresenta as medições, obtidas na linha de transmissão de Neves 1 – Vespasiano 2, tensão nominal de 500 kV, bem como os valores obtidos pela formulação escolhida para a predição do nível de rádio interferência, juntamente com suas análises e comparações entre os dois valores. Adicionalmente são apresentados os resultados da relação sinal/ruído.

O capítulo 5 encerra o texto resumindo as principais conclusões obtidas no trabalho, seguido da proposta de continuidade e das referências bibliográficas.



## Capítulo 2

---

### A Rádio Interferência Proveniente de Linhas de Transmissão

---

#### 2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos relativos ao efeito corona, como fonte principal de ruído em linhas de transmissão (LT). Optou-se ainda, de forma simplificada, abordar os aspectos principais que envolvem a rádio interferência, e os fatores que influenciam os seus níveis de intensidade.

#### 2.2 O Efeito Corona como Fonte de Rádio Interferência

O efeito corona é uma descarga elétrica que se forma na superfície do condutor quando a intensidade do campo elétrico nesta região excede a rigidez dielétrica do ar. Este campo elétrico intenso ioniza os átomos nas proximidades do condutor da linha de transmissão, ocasionando o aparecimento de descargas parciais.

Estas descargas provocam pulsos de tensão e corrente de curta duração, que se propagam ao longo das linhas, gerando campos eletromagnéticos de alta frequência. Estes campos dão origem à rádio interferência, e sua intensidade está diretamente ligada à geometria da linha, sendo o diâmetro do condutor um dos parâmetros de maior influência. A análise do desempenho de uma linha de transmissão, quanto ao corona, é feita comparando-se o valor do gradiente crítico ao valor do campo elétrico superficial dos condutores. Quando o campo elétrico superficial é maior que o crítico, têm-se a formação do corona, e conseqüentemente, a geração da rádio interferência [1,2].

No caso das linhas de transmissão, as agências reguladoras determinam o nível máximo de rádio interferência que pode existir no limite da faixa de servidão. Este nível é baseado na relação sinal/ruído de modo a proteger os sinais das rádios, a partir da distância estipulada pelo limite da faixa de passagem da linha. A largura da faixa de passagem é definida pela concessionária, conforme o projeto da LT, e a área correspondente a esta faixa deve ser adquirida pela concessionária. Em região urbana esta área pode ser muito cara, e a sua redução faz-se necessário o monitoramento destes ruídos, melhorando as técnicas de predição e otimização dos projetos [1, 2, 16].

##### 2.2.1 O corona na linha de transmissão

Quando o condutor da linha está sob condições de tensão alternada, cria em torno de si um campo eletromagnético. Quando o valor do gradiente de potencial, referente à componente do campo elétrico, na superfície deste condutor, excede o valor do gradiente crítico, os átomos do ar circunvizinho ao condutor se ionizam. Ou seja, elétrons livres são acelerados, e a energia cinética adquirida por estes elétrons será suficiente para que, ao colidirem com átomos neutros, oxigênio e nitrogênio, estes também sejam ionizados.

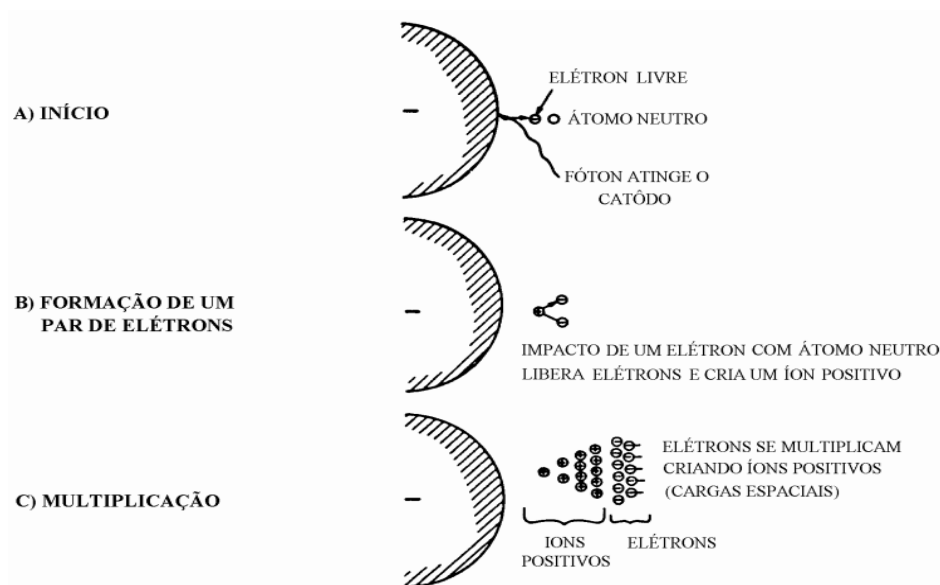


Figura 2.1 - Efeito avalanche [1]

Esta molécula neutra que sofre a colisão libera um elétron, tornando-se um íon positivo. Este elétron é acelerado, atingindo energia suficiente, até colidir com outros átomos neutros, arrancando novos elétrons. O número de elétrons se multiplica, iniciando o processo de avalanche (figura 2.1).

A intensidade do campo elétrico tem seu maior valor na superfície do condutor e diminui sua intensidade inversamente proporcional com a distância, e o gradiente de potencial aumenta inversamente proporcional com o diâmetro do condutor.

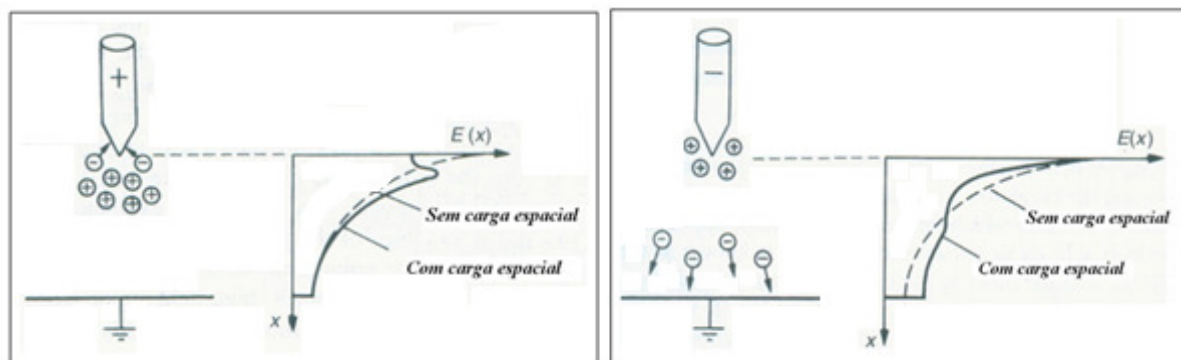
A partir de um bom projeto de linha de transmissão, o diâmetro e o número de condutores calculados levam a um gradiente menor que o campo crítico de corona. Mesmo assim, o corona se forma em pontos localizados, em forma de cristas, cujo fator contribuinte é a própria aspereza do condutor, umidade, temperatura, pressão, poluição, insetos e partículas vegetais nele depositadas. Apesar de todos estes fatores, pode-se, de forma simplificada, calcular os valores de campo elétrico que darão início ao processo de ionização [3].

### 2.2.2 O corona sob chuva

Durante as chuvas o efeito corona aumenta. Além da trilha de água formada na borda inferior do condutor e as gotas que ficam presas na superfície, existe também a umidade que altera as características de ionização do ar.

As perdas médias anuais por corona em LT's de extra-alta tensão podem variar de quilowatts a algumas centenas de quilowatts por quilômetro, sob condições adversas de chuva ou garoa (12 kW/km para tempo bom, 313 kW/km sob chuva e 374 kW/km sob garoa, para uma linha de 500 kV).

As perdas sob chuva dependem não só do índice de precipitações, como também do número de gotículas d'água que conseguem aderir à superfície dos condutores. Esse número é maior nos condutores novos do que nos usados [2].



(a) Tensão positiva

(b) Tensão negativa

Figura 2.2 – Distorção do campo elétrico causada por cargas espaciais [17]

### 2.2.3 O corona no semiciclo positivo e negativo

Sob condições de corrente alternada, o condutor muda de polaridade a cada semiciclo e para cada polaridade o campo elétrico cria cargas espaciais diferentes que tendem a alterar o campo elétrico na vizinhança do condutor. Esta alteração pode ser analisada através de uma configuração ponta-plano, como mostra a figura 2.2.

Na figura 2.2(a), a ponta com tensão positiva representa o anodo e uma placa aterrada representa o catodo. Neste caso, as linhas de campo saíram do anodo em direção ao catodo. Na presença deste campo elétrico, cuja distribuição espacial é apresentada no gráfico através da curva pontilhada, os elétrons nas proximidades do condutor serão acelerados em direção oposta a do campo. Devido a sua maior mobilidade, eles serão rapidamente acelerados em direção ao condutor, deixando uma nuvem de carga positiva para trás. Estas cargas espaciais criam um campo no sentido contrário ao campo original, diminuindo a intensidade do mesmo na superfície do condutor, aumentando a intensidade deste após as cargas espaciais (representado pela linha cheia no gráfico da figura 2.2(a) [17]. Na figura 2.2(b), a ponta (eletrodo) tem tensão negativa, e os elétrons são repelidos para a região de campo de baixa intensidade, deixando as cargas positivas próximas do eletrodo negativo. O efeito destas cargas é o de aumentar a intensidade do campo próximo a ponta, como mostra o gráfico da figura 2.2(b).

Sob condições de tensão alternada, as cargas espaciais podem modificar o tipo e a intensidade do corona que irá ocorrer em cada semiciclo. A figura 2.3 mostra os pulsos de corrente de corona correspondente a cada polaridade, mostrando que o fenômeno tem início a partir de determinado nível de tensão, nível este diferente para o semiciclo positivo e negativo. O corona no semiciclo positivo da tensão de 60 Hz, denominado corona positivo, tem maior amplitude, coloração mais intensa (mais esbranquiçado), ruído audível mais intenso, sendo também responsável pela maior fonte de ruído de rádio interferência [1].

O corona no semiciclo negativo, denominado corona negativo, é menos intenso, tem coloração avermelhada e menores amplitudes [16].

Para uma mesma configuração geométrica, o corona referente ao semiciclo positivo, devido as cargas espaciais, se inicia com um valor de tensão maior que no semiciclo negativo.

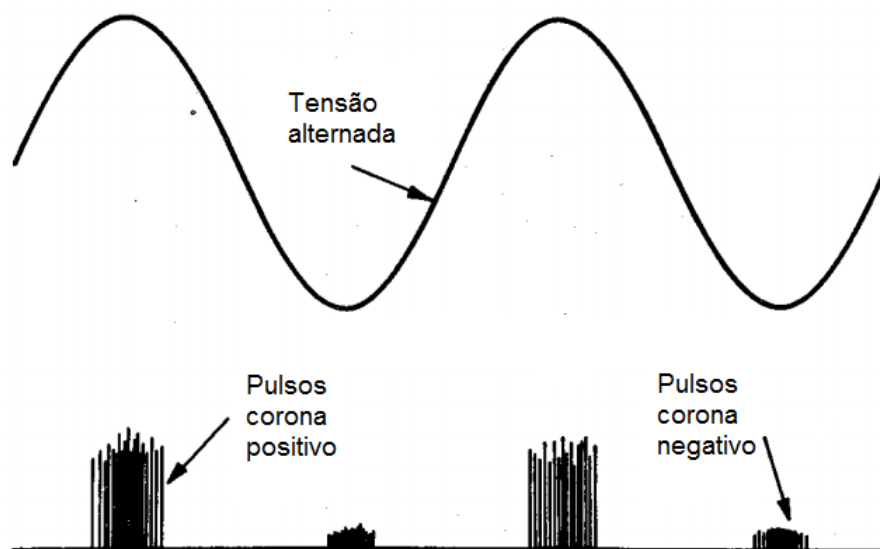


Figura 2.3 – Corona em tensão alternada [1]

### 2.3 Aspectos Importantes em Relação a Rádio Interferência

A rádio interferência são emissões eletromagnéticas, geradas não propositalmente, e podem afetar a qualidade de recepção de um equipamento, dispositivo ou sistema. Ela é responsável pela degradação da recepção de um sinal desejado, no espectro da rádio frequência. O termo rádio frequência refere-se a sinais na faixa de frequência de 3 kHz a 30 GHz. Para se referir às interferências na faixa de frequência abaixo de 30 MHz, o termo Rádio Interferência (RI) é utilizado. Esse termo foi primeiro empregado para descrever interferências eletromagnéticas na faixa de radiodifusão em AM (535 – 1605 kHz), depois foi estendido até 30 MHz. Em teoria, o ruído de rádio gerado pelas linhas de transmissão pode interferir em qualquer equipamento que opere à frequência de rádio, dependendo de alguns fatores tais como distância da linha ao equipamento de comunicação, a orientação da antena receptora, geometria da linha de transmissão e das condições climáticas.

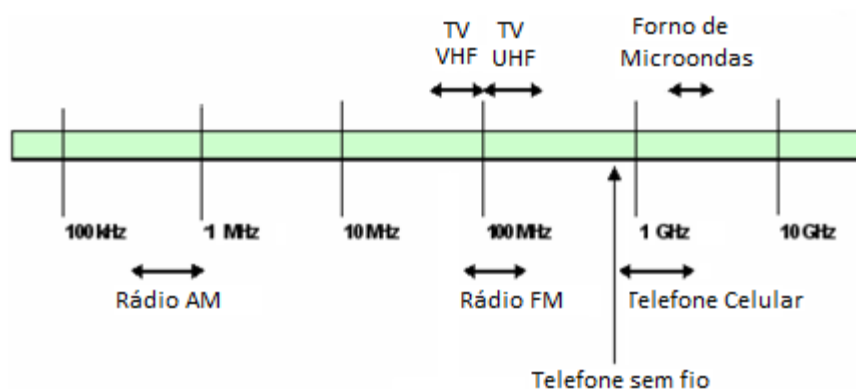


Figura 2.4 - Espectro eletromagnético da rádio frequência [2]

A rádio interferência proveniente das linhas de transmissão em corrente alternada pode ser avaliada geralmente por quatro características básicas. O nível de ruído referente à distância de 15 metros, o espectro de frequência, o perfil 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 durante um longo período de tempo) [1]. Até 30 MHz, como mostra a figura 2.4, existe a faixa de rádio frequência utilizada na operação de rádios AM (modulação em amplitude), e acima deste valor, a faixa de rádios FM (modulação em frequência), telefone sem fio e telefone celular, bem como as bandas destinadas à TV (televisão) em VHF e UHF e microondas.

### 2.3.1 Fatores que influenciam no nível de rádio interferência

O estudo do comportamento das linhas no que se refere a RI é bastante complexo, devendo ser preferencialmente obtido através de bases estatísticas. Existe uma grande dispersão nas medições de RI, devido a diversos fatores ambientais, obtidas com tempo bom (a seco) ou sob chuva. Por exemplo, com tempo bom, uma medida simples de avaliação do ruído pode ser obtida com um detector de quase-pico, frequência de medição de 1 MHz e a 15 metros da fase mais externa. A dispersão da RI tende a diminuir rapidamente com o aumento do índice de precipitação pluviométrico, levando-se então ao que se convencionou chamar de nível de RI para chuva forte. Este valor, denominado de  $L_1$ , expressa o nível de RI que excedeu somente em 1% do período de tempo, medido sob chuva. Os valores excedidos 50% do tempo ( $L_{50}$ ) são conhecidos por nível de condutor molhado ou chuva fraca. Este termo inclui chuva muito fraca, nevoa, garoa, etc. Retirando-se das medições os valores de tempo chuvoso, pode-se obter o nível de RI denominado tempo bom, aqueles cujo valor excedem 50% do tempo – para tempo bom. Este valor também pode ser obtido subtraindo-se 17 dB do valor de RI condutor molhado ( $L_{50}$ ).

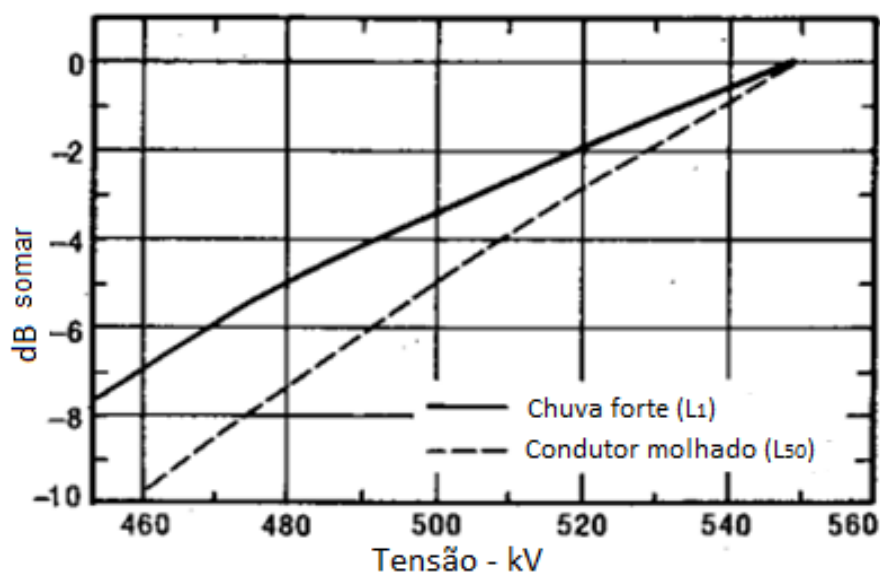


Figura 2.5 - Exemplo de correção na variação da tensão de uma LT [1]

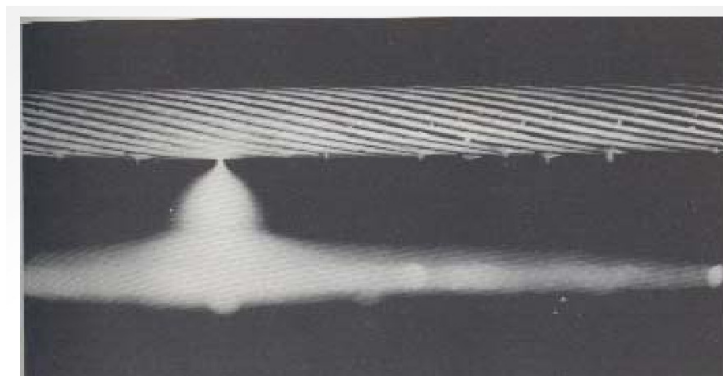


Figura 2.6 - Corona em um condutor úmido [2]

A intensidade do ruído depende do campo elétrico na superfície do condutor, que depende do nível de tensão da linha. Como em linhas de alta tensão existe uma variação de tensão permitida pelo órgão regulador, ao longo do dia tem-se uma variação no nível de ruído que dependerá do carregamento da linha. A figura 2.5 mostra que, para uma variação de 10 % na tensão (LT de 550 kV, circuito horizontal) obtém-se uma diminuição de 5 dB<sub>UV/m</sub> para (L<sub>50</sub>) condutor molhado e de 3 dB<sub>UV/m</sub> para (L<sub>1</sub>) chuva forte. A correção a ser feita na RI para a variação de tensão é simples, porém existem fatores que são mais complexos de se corrigir. As imperfeições nos condutores causadas por falha na fabricação, ou produzidas quando estes são estirados ao serem instalados, é um exemplo.

O efeito da umidade no nível de RI não tem uma relação direta como a variação da tensão. Se a umidade aumentar, o nível de RI tende a diminuir, porque o vapor de água captura os elétrons ionizados, inibindo o processo de avalanche. Porém, se houver formação de gotas de água no condutor, devido ao aumento da umidade, o nível de RI aumentará bastante. Água na forma de chuva fina ou garoa, após bater no condutor, forma pequenas gotas sobre a superfície do mesmo. Geralmente existem duas condições extremas, dependendo de quanto o condutor está molhado. Uma destas permite que a água se espalhe uniformemente em volta do condutor (hidrofílica). Na outra, o condutor fica coberto de gotículas esféricas, como uma superfície encerada (hidrofóbica). Uma superfície hidrofóbica configura-se em um maior número de fontes de corona. Na figura 2.6 pode-se observar claramente um ponto do qual se origina uma fonte de corona, em um condutor úmido.

A densidade do ar muda as características do ar, ao redor do condutor, alterando a probabilidade de colisões e a quantidade de energia envolvida nestas colisões. O cálculo do nível de RI para regiões acima do nível do mar incluem fatores de correção conforme a mudança na densidade do ar. Esta correção pode ser obtida através da equação 2.1,

$$\delta_r = 0.392 \frac{b}{273 + t}, \quad (2.1)$$

onde  $\delta_r$  é a densidade corrigida,  $b$  é a pressão absoluta em mm de Hg, e  $t$  é a temperatura em graus Celsius. Se a densidade relativa do ar não puder ser calculada, uma estimativa pode ser obtida adicionando 1 dB no nível de RI, para cada 300 metros acima do nível do mar.

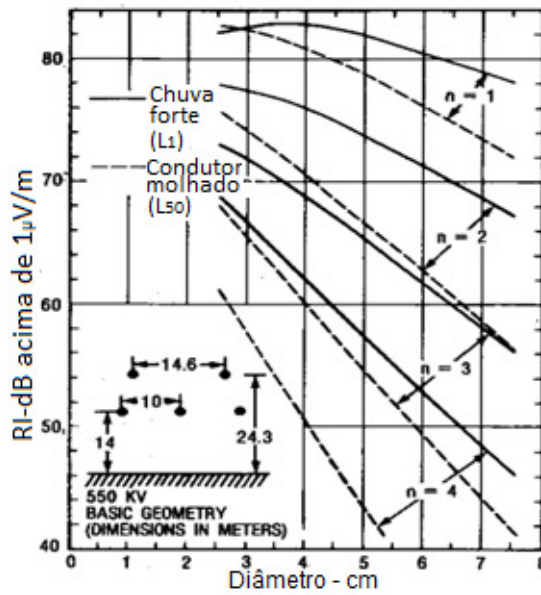


Figura 2.7 - Efeito do diâmetro do subcondutor e do número de condutores [1]

A presença de vento aumenta a atividade do corona positivo, porque as cargas acumuladas no ciclo negativo são varridas, favorecendo o início da formação de um canal ionizado. O vento também aumenta o número de partículas como poeira e restos de vegetais suspensos. Estas partículas tendem a aumentar o nível de RI, devido às descargas que ocorrem quando estas passam próximas ao condutor.

Estes fatores estão fora do controle do homem, mas existem os fatores geométricos da linha que podem ser alterados, com o objetivo de diminuir os níveis de RI. Qualquer alteração na geometria da linha que resulte em um menor gradiente de tensão nos condutores reduzirá os seus níveis de RI. Um aumento no diâmetro dos subcondutores de um feixe resultará na diminuição do ruído de rádio. Pode-se observar no gráfico da figura 2.7 que, quanto maior o número de condutores (n), maior é a inclinação da curva, indicando que a variação do ruído com o aumento do diâmetro é maior para feixes com mais condutores.

O aumento do raio equivalente do feixe de condutores (até 30 – 35 cm) tende inicialmente a diminuir os níveis de RI. A partir destes valores, os níveis de RI tendem a aumentar, mesmo com o aumento do número de condutores, como mostra a figura 2.8.

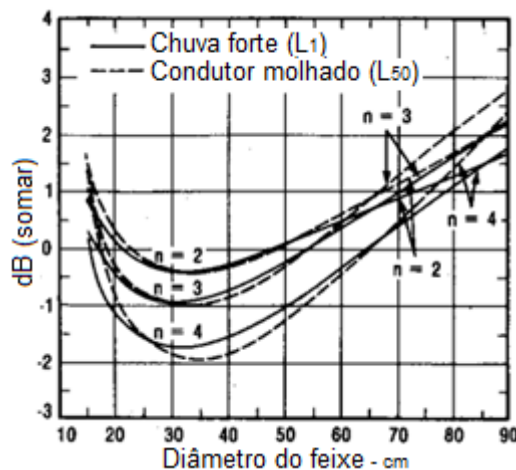


Figura 2.8 - Efeito da variação do diâmetro do feixe – 550 kV [1]

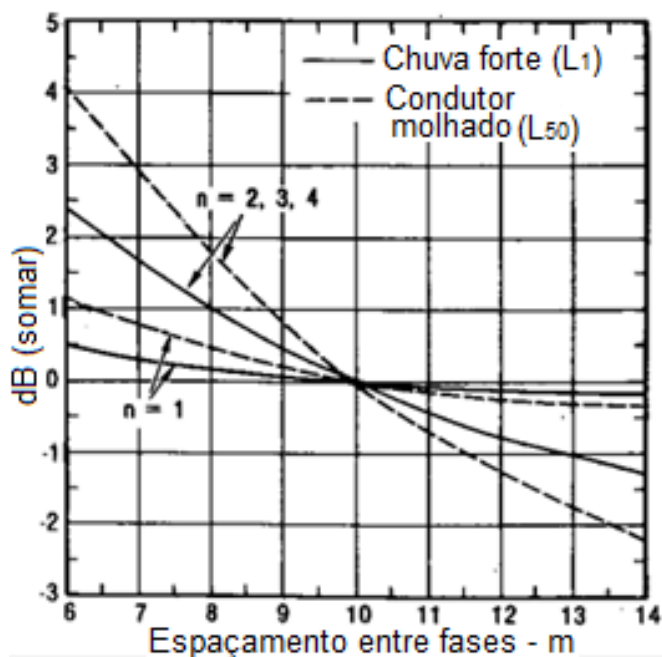


Figura 2.9 - Efeito do espaçamento entre as fases – 550 kV [1]

Aumentar o espaçamento entre as fases, de um circuito simples, diminuirá o gradiente de tensão dos condutores, mas não é um método muito econômico. A figura 2.9 mostra o gráfico de correção da influência do espaçamento entre as fases.

Com o aumento da altura da linha obtém-se um pequeno efeito no gradiente na superfície do condutor, mas pode ter efeito mais significativo no perfil lateral do ruído de rádio. Para distâncias muito grandes da linha, os níveis de ruído podem ser aumentados além dos seus níveis originais. A figura 2.10 mostra a variação dos níveis de RI em relação à altura das fases, para uma linha de 550 kV.

Para diminuir o gradiente na superfície do condutor, para uma mesma classe de tensão, é necessário o emprego de condutores de diâmetro maior, maior espaçamento entre as fases, utilização de condutores múltiplos, com números crescentes de subcondutores, e alteração da forma como os subcondutores são distribuídos no feixe de condutores.

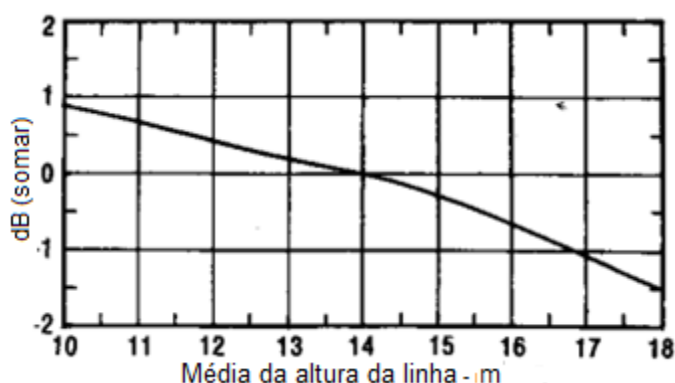


Figura 2.10 - Efeito da variação da altura – 550 kV [1]



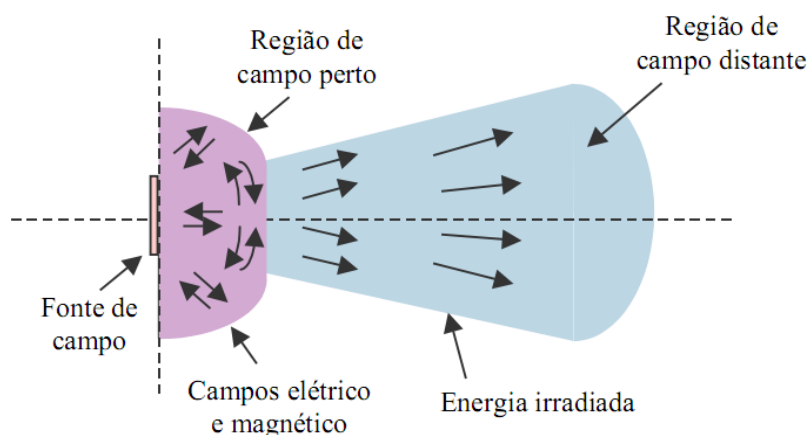


Figura 2.11 - Região de campo perto e campo distante [18].

### 2.3.2 Nível que expressa o limite da RI da linha

De uma forma geral, a compatibilidade eletromagnética engloba todos os fenômenos elétricos e magnéticos na faixa de 9 kHz a 400 GHz. Nos Estados Unidos não existe regulamentação para níveis que expressam o limite de ruído nas LTs. A FCC (Federal Communications Commission) classifica a linha de transmissão como um dispositivo que irradia sem intenção, ou seja, não é designado para irradiar. Isto requer que a linha opere de modo a não prejudicar o funcionamento dos serviços de navegação de rádio ou de outros serviços de comunicação.

Existe uma organização não governamental que prepara e publica padrões internacionais para a área de eletricidade, conhecida como International Electrotechnical Commission (IEC). Esta foi criada em 1906 e desde então vem criando métodos e recomendações a serem seguidos sobre a rádio interferência. No Brasil a IEC é representada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que também elabora as normas sobre utilização de equipamentos eletroeletrônicos [19, 20]. A ANATEL [21] determina que o valor limite para o ruído de rádio interferência na faixa de passagem, para a tensão máxima operativa da linha, deve ser de 24 dB abaixo do sinal, para 50 % do período de um ano. O sinal adotado para o cálculo deverá ser o nível mínimo de sinal estipulado pela ANATEL, referente à região atravessada pela linha de transmissão.

## 2.4 Propagação do Ruído de Rádio Interferência

Conforme mostra a figura 2.11, o campo eletromagnético do ruído de rádio interferência medido perto da linha de transmissão pode ser considerado composto de duas componentes. O campo de alta frequência criado pela corrente induzida no condutor, devido aos pulsos de corona, representado pela região de cor lilás, e o campo irradiado, representado pela cor azul.

Na frequência de 1 MHz, o comprimento de onda (aproximadamente 300 m) da RI, é muito maior que as dimensões da linha, e também a distância da linha até o ponto de medição. Para distâncias moderadas (região de campo perto), o campo de RI pode ser considerado quase-estático. Esta consideração simplifica os cálculos e o entendimento da propagação nas vizinhanças do condutor.

Para distâncias maiores, na região de campo distante, o campo irradiado tem maior contribuição, da soma das fontes pontuais de corona. A corrente que gera este campo é devido às cargas que são aceleradas com a ionização dos átomos na vizinhança do condutor. Como o percurso das cargas é pequeno (até a recombinação), ou seja, esta corrente não propaga no condutor, isto torna a fonte mais expressiva para distâncias maiores.

Para o caso de radiação de antena, a transição do campo quase-estático para o irradiado ocorre na distância da antena de  $\lambda/2\pi$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal transmitido. Medições feitas por pesquisadores têm demonstrado que a distância de transição  $\lambda/2\pi$  é também uma boa aproximação para linha trifásica, para o qual a distância medida a partir da fase mais externa, na frequência de 1 MHz, é de aproximadamente 48 metros [1]. Para a predição de RI além desta distância, usando o método de cálculo analítico (campo quase-estático), é necessário aplicar uma atenuação de  $1/D$ .

Devido o método de predição comparativo (empírico) fazer uso de medições em linhas tomadas como referência, não é necessário nenhuma correção no cálculo de RI para distâncias maiores que a transição (48 m).

---

### Procedimentos de Cálculo e Medição de Rádio Interferência

---

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição dos métodos utilizados na predição do ruído de RI, sendo detalhada a formulação escolhida para o cálculo da rádio interferência. A metodologia de medição é apresentada e discutida.

Adicionalmente á metodologia de medição serão citados os cuidados a serem observados na hora da medição dos ruídos nas linhas de transmissão.

#### 3.2 Métodos Empregados para Predição da RI

Para o cálculo do ruído de rádio interferência, existem duas metodologias classificadas como empíricas (ou comparativas) e semi-empíricas (ou analíticas). Estes métodos permitem levantar o desempenho das diversas linhas de transmissão em relação a RI, a partir de seus parâmetros de projeto e das tensões de operação. Em todos esses métodos os níveis de ruído gerados pelas linhas são determinados através de medições.

##### 3.2.1 Métodos comparativos

Estes métodos utilizam comparações entre um valor de referência bem definido do nível de RI de uma linha, 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 equação característica básica, para os métodos comparativos, pode ser expressa pela equação 3.1, que determina o nível de rádio interferência ( $E$ ) em  $\text{dB}_{\mu\text{V/m}}$ ,

$$E = E_0 + E_g + E_d + E_n + E_D + E_f + E_w, \quad (3.1)$$

onde  $E_0$  é o nível de RI da linha de referência, e os demais termos são fatores de correção. Os ajustes dependem das seguintes variáveis correspondentes ao valor de referência:

- Gradiente de superfície do condutor,  $E_g$ ;
- Diâmetro dos condutores,  $E_d$ ;
- Número de condutores no feixe,  $E_n$ ;
- Distância da LT ao medidor,  $E_D$ ;
- Frequência de medição,  $E_f$ ;
- Condições do tempo,  $E_w$ ;

### 3.2.2 Métodos analíticos

Os métodos analíticos podem ser usados na predição do nível de RI para qualquer geometria de linha, independente do número de circuitos, não sendo necessário um valor de referência de RI. Nesta metodologia são necessários dados relativos à corrente injetada por unidade de comprimento da linha, pelo efeito corona, e através da teoria de propagação de onda são calculadas as correntes e tensões de rádio frequência na linha de transmissão.

A corrente injetada por unidade de comprimento, denominada função de geração, é determinada através de medições em laboratório, através de gaiolas de ensaio, no qual o cabo sob teste passa no centro de uma estrutura metálica de seção circular, configurando uma região de campo uniforme em volta do condutor. Essa função é medida em instalações monofásicas para diferentes arranjos de condutores, com condições de superfície conhecidas. Empregando-se então os valores assim medidos, pode-se calcular a totalidade das correntes de ruído na LT, e os campos resultantes em sua vizinhança. Devido a forma como a função de geração é obtida, este método também é conhecido como semi-empírico [1].

### 3.2.3 Metodologia utilizada

O presente trabalho utiliza um método comparativo para a predição dos níveis de RI. Uma análise preliminar mostrou que, quando as variações na geometria e nos parâmetros da linha de transmissão em estudo, em relação aos casos de referência, são pequenas, e existe um grande número de medições para os dados de referência, os métodos empíricos apresentam excelentes resultados.

Dentre as várias formulações encontradas na bibliografia, o método FG apresenta os melhores resultados, na classe de tensão a ser utilizada neste trabalho (500 kV) [12]. Este método baseia-se no emprego de um valor de referência ( $E_0$ ), para tempo bom ( $E_w = 0$ ), obtido através de medições em linhas experimentais e reais. O gradiente máximo deve estar entre 15 kV/cm e 19 kV/cm, à frequência de 1 MHz ( $E_f = 0$ ), obtendo-se a equação 3.2,

$$E = \overbrace{53,7 \pm 5}^{E_0} + \overbrace{3,5 \times (g_m - 16,95)}^{E_g} + \overbrace{40 \times \log \frac{d}{3,93}}^{E_d} + \overbrace{\frac{E_n}{n}}^{E_n} + \overbrace{32 \times \log \frac{20}{D}}^{E_D}, \quad (3.2)$$

onde  $E_0$  é o nível de ruído de referência da linha tomada como base, juntamente com sua dispersão,  $g_m$  é o gradiente máximo na superfície do condutor (kV/cm RMS),  $d$  é o diâmetro do condutor (cm),

$$E_n = \begin{cases} -4dB \dots \dots \dots n = 1 \\ 10\log(n/4) \dots \dots \dots n > 1 \end{cases},$$

$n$  é o número de condutores por fase e  $D$  é a distância radial do condutor mais próximo à antena de medição (m), como mostra a figura 3.1,

$$D = \sqrt{h^2 + x^2}, \quad (3.3)$$

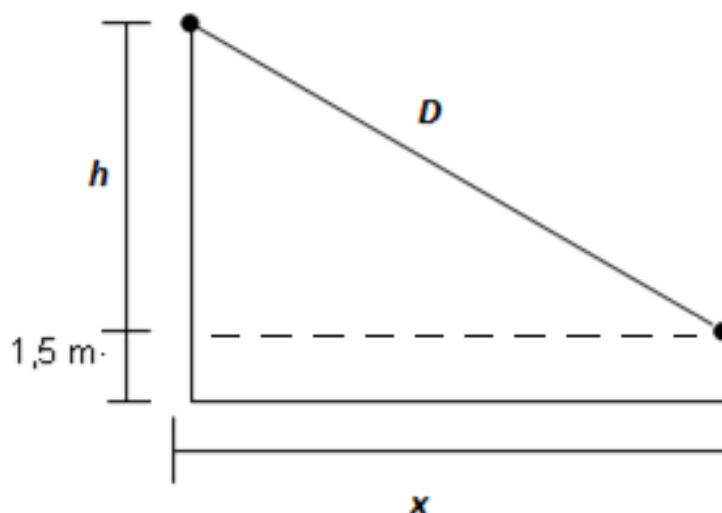


Figura 3.1 – Distância do condutor ao medidor de RI

Na equação (3.3),  $h$  é a altura do condutor mais próximo do solo, descontando a altura de 1,5 metros da posição da antena, e  $x$  é a distância da imagem do condutor mais externo até o ponto de medição.

### 3.3 Sistema de Medição de RI

O valor medido, referente a um sistema de medição adotado, pode sofrer influência de vários fatores, como equipamentos, configuração dos equipamentos, operador, meio ambiente, dados, etc.. Isto pode tornar difícil afirmar se a medição é confiável. O estudo destes fatores e seu comportamento aumentam a confiança da medida obtida. Então, este item abrange o estudo, a seleção e configuração dos equipamentos necessários para as medições da RI.

#### 3.3.1 Medidor de rádio interferência

Para medir o nível de interferência proveniente de uma linha de transmissão, deve-se usar um analisador de ruído que tenha uma característica de resposta parecida com a dos dispositivos de comunicação [22]. No caso deste trabalho, o sinal a ser medido é o ruído de RI que interfere nos equipamentos ou dispositivos de comunicação.

Um medidor de ruído (analisador de espectro) é basicamente um receptor de rádio calibrado e ajustado para uma frequência de medição, que será conectado a uma antena (sensor de campo) apropriada para captar o sinal a ser medido [2]. A conexão entre o sensor de campo e o analisador de espectro deve ser feita com um cabo coaxial apropriado, sendo que a impedância de surto (impedância característica) do cabo deve ser igual à impedância de entrada do medidor de RI.

A figura 3.2 mostra o diagrama de um analisador de espectro, apresentando, em forma de blocos, as partes mais importantes.

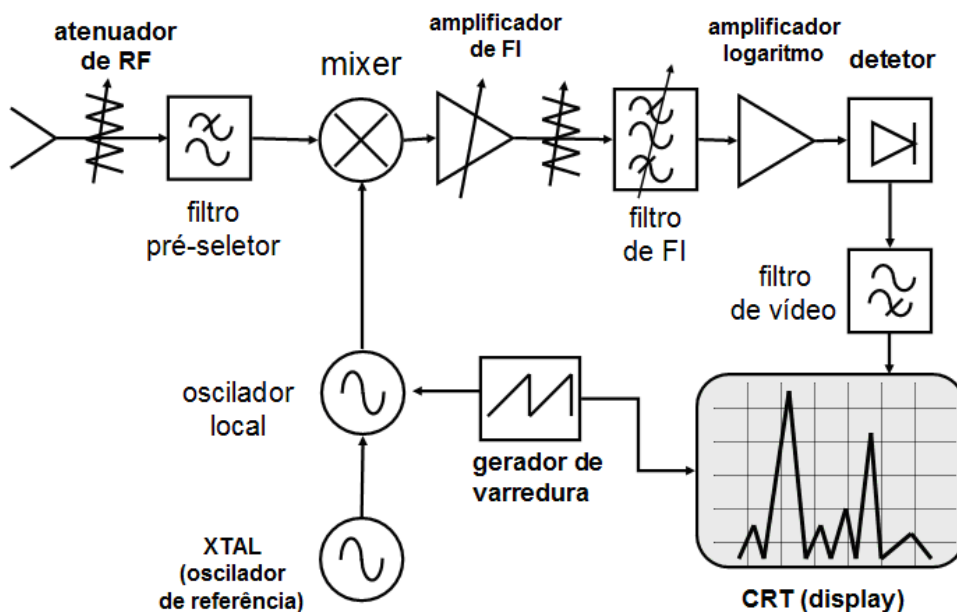
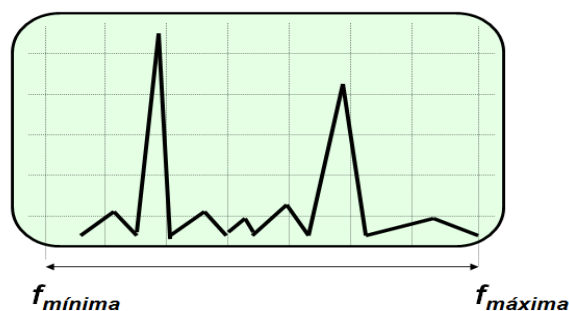


Figura 3.2 – Diagrama de bloco do analisador de espectro

A função do atenuador de RF é proteger o circuito misturador (mixer), dos sinais de níveis altos, atenuando o sinal de entrada. O valor da atenuação pode ser ajustado manualmente ou automaticamente, dependendo do instrumento. O Filtro pré-seletor é um filtro responsável pelo bloqueio de sinais fora da faixa de análise (FPB). Em analisadores modernos ajusta-se automaticamente a faixa de frequências que se pretende observar. No misturador ou mixer (dispositivo não linear), o sinal que se pretende observar sofre uma translação para a faixa de FI. O próximo bloco, amplificador de FI, amplifica sintonizado na faixa de FI. Ele é usado para ajustar a posição vertical dos sinais na tela sem afetar o nível do sinal no misturador. Quando alteramos este nível, o nível de referência será alterado na mesma proporção. Quando o sinal entra no filtro de FI, este seleciona os sinais dentro da faixa de FI. No bloco seguinte, amplificador logarítmico, o sinal sofre uma amplificação não-linear, para ser escalonado em dB. O sinal, assim, entra pelo detector de envoltória, onde passa por circuitos de amostragem, antes de ser visualizado no display do instrumento. Estes circuitos são considerados como parte do detector e determinam se o voltímetro lê o pico do envelope, a média ou quase-pico. Para eliminar os ruídos em alta frequência do sinal detectado, este deve passar pelo filtro de vídeo, para finalmente ser visualizado no display (CRT), na faixa de frequência selecionada.

O oscilador local é um oscilador controlado por tensão, que fornece a frequência de entrada do misturador, e o gerador de varredura é usado para sintonizar o oscilador local, alterando a frequência deste proporcionalmente á tensão da rampa. Este gerador também controla a deflexão horizontal do feixe do CRT, criando o domínio da frequência no eixo x.

Quanto à configuração, se o analisador de espectro atende a norma que foi escolhida, em suas características fundamentais, é importante entender como e quando certos parâmetros do instrumento podem influenciar na medição, evitando erros inerentes à configuração. Os parâmetros mais importantes, no caso do analisador de espectro, é o SPAN, RBW, VBW, ST, detector e a unidade da medida.



$$SPAN = f_{máx} - f_{mín} \quad (H_z)$$

Figura 3.3 – SPAN (faixa de frequência)

- **SPAN**

Um parâmetro importante no analisador de espectro é a faixa de frequência que ele pode analisar. Hoje em dia, existem analisadores que chegam a dezenas de GHz. Para uma medida específica é necessário restringir a faixa de frequência a ser visualizada, sendo a janela amostrada na tela do instrumento denominada SPAN. Para medir a RI, a faixa de frequência a ser configurada é de 0,15 a 30 MHz. A figura 3.3 mostra como obter o SPAN na medição.

- **RBW (Resolution Bandwidth)**

Representa a largura de banda de resolução do filtro. A resolução na qual os componentes individuais podem ser separados é determinada pela largura de banda de resolução. Selecionando um RBW demasiadamente grande, pode tornar impossível distinguir dois sinais que estejam próximos na frequência, sendo visualizado como somente um componente. A figura 3.4 ilustra a influência deste parâmetro, quando é configurado com um valor maior do que deveria ser.

A largura de banda do filtro de FI é definida como a largura de banda a 6 dB. Este é o modo pelo qual a RBW é especificada nos dados técnicos do analisador de espectro utilizado. O valor de RBW configurado para medir a RI na frequência de 1 MHz foi de 9 kHz a 6 dB. Deve-se prestar a atenção na especificação dos equipamentos, porque outros fabricantes podem utilizar a largura de banda a 3 dB.

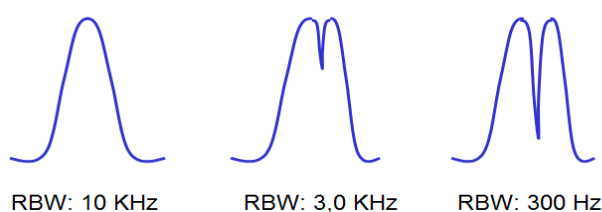


Figura 3.4 – Influência do parâmetro RBW na medição

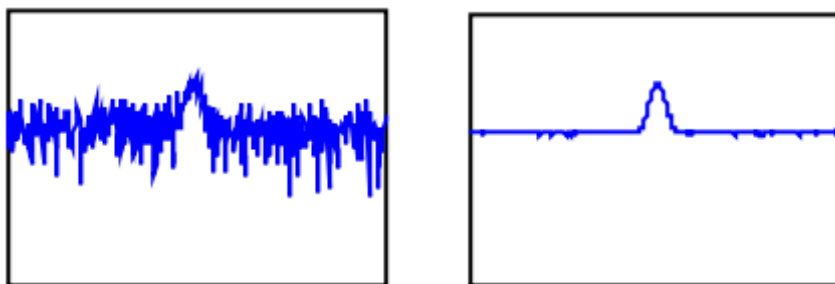


Figura 3.5 – Influência do parâmetro VBW na medição

- **VBW (Video Bandwidth)**

Este parâmetro é um filtro passa-baixas localizado após o detector e antes do CRT (display). Este é usado para determinar o valor médio ou aplicar a suavização dos pontos da curva mostrada na tela. O analisador mostra o sinal mais o ruído. Se um sinal estiver próximo do ruído, será difícil identificá-lo. Alterando-se o valor de VBW, podem-se reduzir estas variações pico a pico do ruído, facilitando a visualização do sinal, como mostra a figura 3.5. A VBW pode melhorar a capacidade de identificação e a repetibilidade em medições com relação sinal/ruído baixas. Uma configuração de filtragem de vídeo suficiente pode variar de 1/3 a 1/100 da RBW. Neste trabalho foi utilizado o VBW de 1/3 da RBW.

- **ST (Sweep Time)**

É o tempo gasto pelo gerador de varredura para cobrir o SPAN selecionado. Este valor interfere diretamente na qualidade da medição realizada. Um ST muito baixo pode resultar em erros de simultaneidade na visualização de sinais de frequências diferentes, e um ST muito alto pode resultar em erros nos valores das amplitudes e frequências indicados no display, como mostra a figura 3.6. Geralmente este parâmetro é configurado automaticamente pelo analisador, mas pode ser obtido através da equação (3.4),

O cálculo do ST pode ser feito através da equação 3.4,

$$ST = k \cdot \frac{SPAN}{(RBW)^2}, \quad (3.4)$$

onde k varia entre 2 e 3.

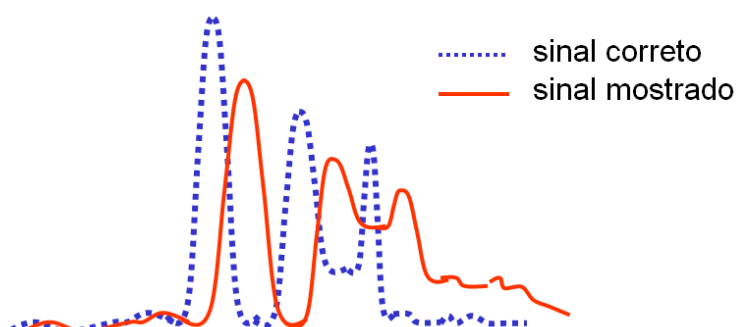


Figura 3.6 – Influência do ST na medição



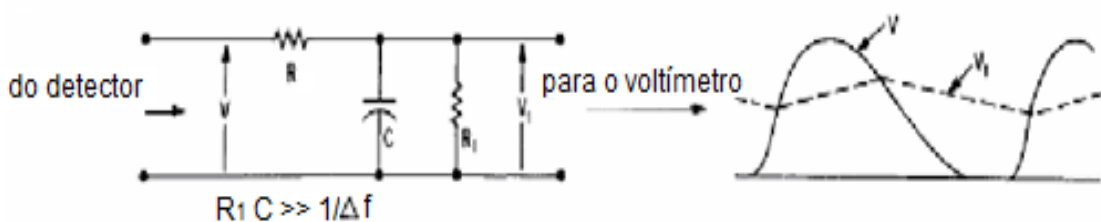


Figura 3.7 – Resposta do circuito detector de quase-pico

- **Detector**

No bloco detector, existem os circuitos de ponderação, que determinam se o voltímetro indicará a média (AVG), o pico (P) ou o valor quase pico (QP) do sinal de entrada. O detector quase pico (QP), utilizado nas medições deste trabalho, foi originalmente projetado para medir ruídos de rádio interferência em linhas de transmissão. A figura 3.7 mostra o circuito utilizado no modo detector quase-pico e a sua resposta para um exemplo dado.

A resposta do circuito é determinada pela constante de tempo de carga e descarga,  $RC$  e  $R_1C$ , respectivamente. Se  $R_1$  tende para infinito, o capacitor  $C$  só poderá descarregar através da sua própria resistência de escoamento, então a saída será efetivamente o pico do trem de pulso. Mas, se  $R_1$  tiver um valor que depende do tempo de subida e descida do sinal, juntamente com sua taxa de repetição, o sinal amostrado não sofrerá muita influência de picos esporádicos que não fazem parte do sinal de interesse. Valores incômodos de qualquer ruído não dependem somente do valor de pico, mas também da taxa de repetição dos pulsos de ruído.

O limite especificado para os níveis de RI é baseado no detector de quase-pico. Este dispositivo pondera os sinais de acordo com sua taxa de repetição. Quando esta taxa aumenta o detector não tem tempo de descarregar completamente. Isto torna a medição mais lenta, aumentando o tempo de varredura necessário para medir o ruído.

### 3.3.2 Sensor de campo

O medidor precisa de um sensor de campo para transformar o sinal de RI (campo eletromagnético) em tensão (sinal a ser medido). Uma antena é considerada um sensor de campo e a sua função é transformar energia eletromagnética irradiada em elétrons (sinal). Desta forma, o campo eletromagnético gerado pelo corona na linha de transmissão é transformado em um sinal de tensão, e conduzido ao medidor através de um cabo coaxial.

Como os medidores de ruído de rádio são voltímetros de rádio frequência muito sensíveis, estes são capazes de medir frações de micro volt. Para medir campos de ruído de rádio frequência, os medidores devem ser usados em conjunto com uma antena, posicionada 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 de antena. Tipicamente, existe uma impedância de casamento entre a antena e o medidor, o qual é requerido para prover uma máxima resposta.

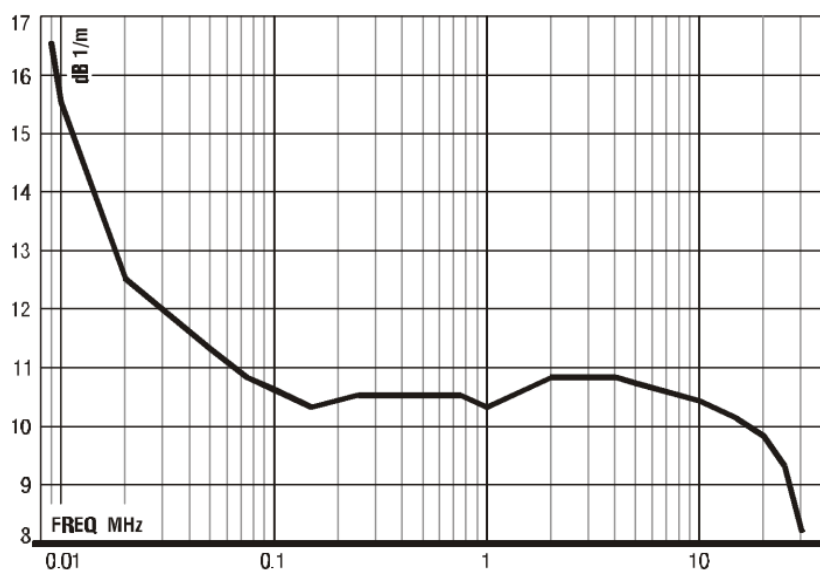


Figura 3.8 – Fator de antena típico em função da frequência [23]

As curvas do fator da antena, que incluem o efeito do acoplamento da antena, são fornecidas pelo fabricante.

Abaixo de aproximadamente 30 MHz as características do solo e da vegetação, os condutores e as estruturas afetam diferentemente a intensidade das componentes elétricas e magnéticas do campo, e o ângulo de polarização de uma antena. Estes fatores podem influenciar também a impedância da antena. As medições com antenas do tipo loop eletricamente isoladas são, geralmente, muito menos influenciadas pela aproximação de objetos do que as antenas tipo “Rod”, que é também uma antena própria para medir RI.

A figura 3.3 mostra uma curva do fator de antena típico, para corrigir a medição de campo elétrico. Para obter o campo elétrico final (RI), deve-se somar o nível do sinal lido no medidor, a perda no cabo e o fator de antena na frequência de medição. A perda no cabo deve ser medida periodicamente para cada cabo utilizado. A equação 3.5 exemplifica a obtenção do campo final (em dB).

$$E = E_m + FA + P_{cabo}, \quad (3.5)$$

onde E é o valor do campo de RI final,  $E_m$  é o valor amostrado no medidor, FA é o fator de antena obtido do gráfico da figura 3.8 e  $P_{cabo}$  é a perda no cabo coaxial usado para acoplar a antena ao medidor.

### 3.3.3 Equipamentos utilizados

Uma seleção prévia deve ser feita com os equipamentos envolvidos na medição de RI, e também com os vários medidores que serão necessários, para registrar os fatores que influenciam no nível do ruído a ser medido (temperatura, umidade, pressão, altitude, velocidade do vento e distância). Os medidores devem estar em bom funcionamento e também calibrados. Os equipamentos mais importantes envolvidos nesta medição e suas características são apresentados a seguir.



Figura 3.9 - Analisador de espectro fabricante Rohde & Schwarz [22]

- **Analisador de Espectro**

Conforme norma brasileira específica para medição de rádio interferência [20], o medidor deve ter como características fundamentais, faixa de passagem a 6 dB de 9 kHz, constante de tempo de carga do detector de quase-pico de 1 ms e de descarga de 160 ms, blindagem efetiva e erro na medição menor que 2 dB.

A figura 3.9 mostra o analisador de espectro utilizado nas medições, fabricante Rohde & Schwarz, tipo ESPI, com faixa de frequência de 9 kHz a 3 GHz, impedância de entrada 50  $\Omega$ , e incerteza de medição total para o modo receiver de 1,5 dB.

- **Antena Loop**

Da mesma forma, a antena utilizada para a medição de RI deve ser do tipo quadro vertical, eletrostaticamente blindada, de dimensões tais que possa ser inscrita num quadrado de 60 cm de lado.

A figura 3.10 mostra a antena tipo loop do fabricante ETS - LINDGREN, tipo 6502 com faixa de operação na frequência de 10 kHz a 30 MHz, impedância de saída 50  $\Omega$ , incerteza de  $\pm 2$  dB com nível de confiança 95 % ( $k = 2$ ), utilizada para medir o nível de RI.



Figura 3.10 – Antena loop ativa na faixa de 10 kHz a 30 MHz [23]

Esta antena é blindada, eliminando interferências de campos elevados de 60 Hz, a sua base tem (19,0 x 12,0 x 67,3) cm, diâmetro do loop de 60,0 cm e peso de 2,0 kg.



Figura 3.11 – Medidor das condições atmosféricas [24]

- **Medidor de condições atmosféricas**

A figura 3.11 mostra o medidor utilizado para registrar as condições ambientais, juntamente com outras informações relevantes. O equipamento é digital do fabricante Brunton (tipo ADC-PRO), com incertezas de  $\pm 1$  grau na temperatura,  $\pm 10\%$  na velocidade do vento,  $\pm 2$  mmHg na pressão atmosférica,  $\pm 3$  m na altitude, e  $\pm 3,5\%$  na umidade relativa do ar.

### 3.4 Metodologia de Medição

Depois de verificado o sistema de medição, a metodologia consistirá na determinação da categoria de condições climáticas que serão feitas as medições, do local e do esquema de medição e baseado em um procedimento normalizado, realizar as medições.

#### 3.4.1 Determinação do nível de RI

O nível de rádio interferência tem grande dependência das condições climáticas, isto é, se o tempo apresenta-se bom, seco e com baixa umidade, se existe a ocorrência de ventos, garoa, umidade alta, chuva fraca, ou se o tempo se caracteriza por um estado de chuvas fortes, grande umidade, precipitações de flocos de neve, entre outras. Das condições de chuva forte para as condições de tempo bom, os níveis de RI podem variar de 25 a 30 dB. Mesmo dentro de uma condição particular de tempo, tempo bom, por exemplo. Variações de 10 a 15 dB podem ocorrer devido à variação do número de fontes de corona alterando com o tempo.

É possível descrever as variações de ruídos 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 certo valor. O tempo total representado pode compreender todas as condições de tempo ou categorias particulares, tais como, chuva, neve ou bom tempo.

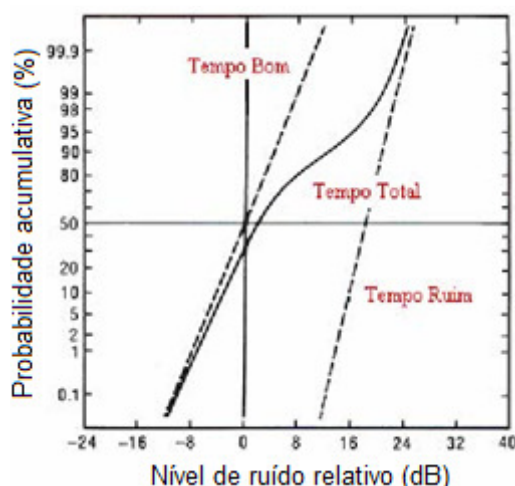


Figura 3.12 - Distribuição de frequência acumulativa [1]

A figura 3.12 mostra uma curva típica de uma distribuição estatística de longo tempo. Os pontos de inflexão aparecem como função do percentual de ocorrência das várias condições de tempo. Esta caracterização é obtida através de medições de longo tempo (1 ano ou mais) e depende de instrumentos e estrutura mais sofisticada.

Medições de curta duração, dentro de uma mesma categoria de tempo, podem ser utilizadas para verificar se os níveis da RI estão dentro dos limites impostos pelas normas, se a comparação com valores obtidos por cálculos está satisfatória, o comportamento da RI na faixa de servidão ou até mesmo verificar a segurança das pessoas em áreas invadidas.

Para comparação entre medição e cálculo, o perfil lateral da linha mostra a avaliação do campo em função da distância, com pontos específicos de interesse. Um destes pontos situa-se a 15 metros da fase mais externa da linha, onde a RI é praticamente independente da altura, conforme mostra a figura 3.13, tornando esta distância normalizada para medições.

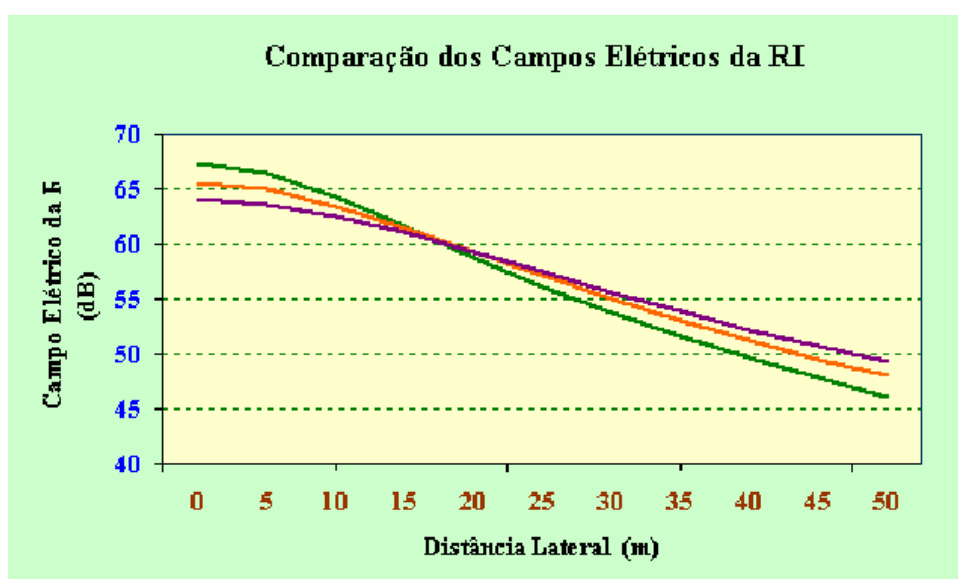


Figura 3.13 – Perfil lateral para três alturas diferente de linha [2]



Figura 3.14 - Local onde foram feitas as medições

### 3.4.2 Local de medição

O local apropriado para fazer a medição da RI deve ser plano, sem fontes de ruídos que possam inviabilizar a medição, afastado no mínimo 8 km da subestação, transposição e também de mudança de direção brusca da linha, para evitar reflexões que possam alterar as medições. A figura 3.14 mostra o local onde foram feitas as medições deste trabalho.

### 3.4.3 Esquema de medição

A figura 3.15 mostra a disposição dos equipamentos utilizados na medição do ruído de rádio interferência na linha de transmissão. Os detalhes da posição da antena em relação à linha, seu deslocamento e como a RI foi medida, serão citados nos procedimentos de medição adotados em campo.

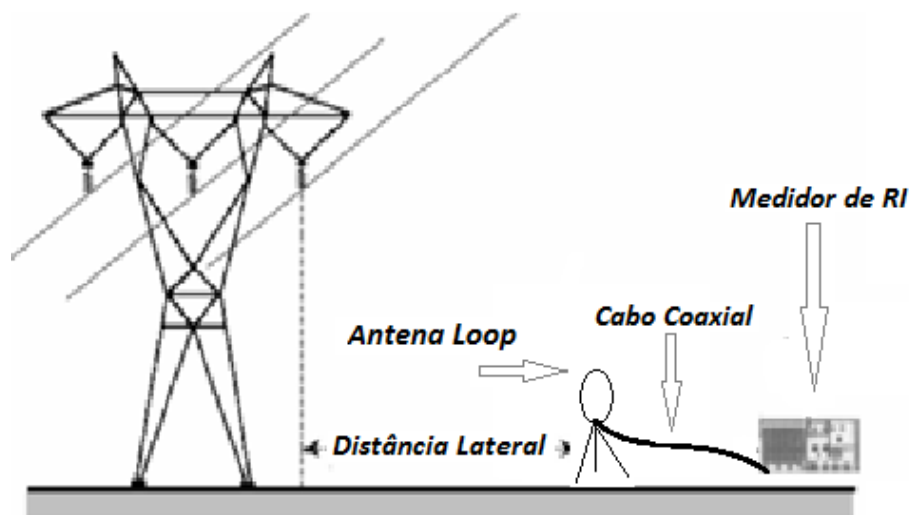


Figura 3.15 – Esquema de medição

### 3.4.4 Cuidados a serem observados

- **Equipamentos de segurança**

O campo elétrico (60 Hz) elevado nas proximidades da linha torna a medição da RI de alto risco. O uso de equipamentos de proteção individual (EPI) é de suma importância. Atenção especial deve ser dada ao tipo de luva a ser usada, devido a ocorrência de descargas eletrostáticas.

- **Descargas atmosféricas**

As LTs configuram-se em um ponto de grande probabilidade de incidências de descargas atmosféricas. O auxílio de sistemas de localização de tempestades torna-se necessário, por questões de segurança. Uma descarga elétrica pode viajar na linha e descer para o solo através das torres, criando potenciais elevados.

- **Obstruções físicas**

A antena de medição, posicionada 1,5 metros acima do solo sobre um tripé isolante, deve ser utilizada o mais afastado possível da presença de objetos como, veículos, árvores, cercas, pessoas e outras, que possam perturbar o campo a ser medido. Para a medição do perfil lateral, a antena terá que ser deslocada em uma direção perpendicular à linha, e este caminho percorrido também terá que estar livre de qualquer obstrução física.

- **Deslocamento perpendicular da antena em relação a linha**

Ao deslocar a antena deve-se prestar atenção na ortogonalidade com a linha. A medida que se afasta da linha, torna-se difícil manter o caminho percorrido pela antena ortogonal a linha. Estender uma trena longa ou até mesmo um barbante ao longo da linha de medição ajuda a manter-se ortogonal a linha e facilita a medição.

- **Corona na antena**

Devido ao alto valor do campo elétrico, principalmente abaixo da linha, pode aparecer corona na antena. Testes preliminares simples deverão ser efetuados para garantir que as antenas estejam livres do efeito corona. Se ao mudar de posição ou com a aproximação de uma pessoa, da antena, acontecer uma caída brusca no nível do sinal medido, pode ser uma boa indicação de corona.

- **Ruído de centelhamento**

O ruído de centelhamento é proveniente de ruptura do isolamento em: conexão mal feita, isoladores quebrados ou defeituosos ou algum mau contato que possa originar um gap. Para certificar que o valor medido é proveniente do efeito corona e não de ruído de

centelhamento, a comparação entre o valor medido em quase-pico e o valor de pico pode ajudar a diferenciar. O ruído de corona tem um valor de pico levemente maior que o de quase-pico, em torno de 3 dB<sub>μV</sub>. Com o ruído de centelhamento existem grandes diferenças de amplitude.

- **Blindagem do equipamento de medição**

No caso do instrumento de medição, a sua blindagem deverá ser tal que, quando a antena for removida, a indicação da intensidade de campo cairá para um valor 60 dB abaixo do valor medido, ou para um valor não mensurável. Uma prática aconselhável para minimizar o efeito do campo é a utilização de cabos longos para a conexão da antena ao instrumento de medição.

### **3.4.5 Procedimentos de medição**

Um bom guia de procedimentos de medição é necessário. A IEEE – 213 mostra os aspectos mais importantes da medição de ruídos de rádio nas linhas de transmissão, na faixa de 10 kHz até 1 GHz [25].

#### **3.4.5.1 Procedimento para escolha da frequência de medição**

A frequência de medição é normalizada, porém existe uma tolerância, para que se possa encontrar um ponto no qual o ruído de fundo não prejudique as medições. A 15 metros da linha, deve-se obter a orientação da antena, onde se obtém o maior valor de campo. Nesta orientação, faz-se uma varredura na frequência, a uma distância suficientemente grande da linha para obter-se somente ruído ambiente. Esta varredura indica os pontos com menores ruído de fundo. O uso de fones de ouvido, conectados nas saídas de áudio do medidor, ajuda na determinação da frequência de medição. Na faixa de radiodifusão e TV as frequências dos sinais são bem estabelecidas e podem ser evitadas facilmente.

#### **3.4.5.2 Procedimento para a medição do perfil lateral**

Para a medição do perfil lateral da linha, cujas fases têm configuração horizontal, a antena é posicionada abaixo da fase central, a uma altura de 1,5 metros, sobre um tripé isolante. Esta posição representa a distância correspondente igual à zero. A orientação da antena é determinada pela posição de maior valor da RI. Deslocando-se a antena em intervalos de distâncias previamente definido (3 metros), efetuam-se as medições para cada ponto, até cobrir o perfil lateral da linha. Estes pontos deverão fornecer uma curva que retrata de forma confiável este perfil. Este caminho a ser percorrido pela antena é tomado ao longo de um eixo horizontal, em um plano perpendicular a linha no meio do vão. A distância coberta pelo perfil lateral é limitada pelo nível de ruído ambiente do local.



### 3.4.5.3 Procedimento para medição da relação sinal/ruído

Para uma boa recepção de sinais de rádio e televisão livres de interferência, é necessário existir uma elevada relação sinal/ruído (SNR) na entrada do receptor.

Para obter a relação sinal/ruído primeiro deve-se medir o nível do sinal das rádios de interesse. Posicionando a antena na distância correspondente a faixa de servidão, e girando-a lentamente até que esta registre o maior nível de sinal. Geralmente o sinal de uma rádio não varia numa pequena região, de forma que para qualquer distância que for efetuada esta medição, chegará a um mesmo valor.

Para obter o SNR, a partir dos campos medidos devemos subtrair o ruído (N) do nível do sinal (S), conforme exemplo das equações 3.6, 3.7 e 3.8.

$$S = 5mV / m \Rightarrow S = 20 \log \left( \frac{5 \cdot 10^3}{1} \right) \Rightarrow S = 74 \text{ dB} \quad \text{acima de } 1\mu V, \quad (3.6)$$

$$N = 500\mu V / m \Rightarrow N = 20 \log \left( \frac{500}{1} \right) \Rightarrow N = 54 \text{ dB} \quad \text{acima de } 1\mu V, \quad (3.7)$$

$$SNR = S - N \Rightarrow SNR = 74 - 54 = 20 \text{ dB}. \quad (3.8)$$

Para avaliar o critério de tolerabilidade da rádio interferência, relacionado com a qualidade de recepção do rádio, o SNR é um fator muito importante, porque ele é responsável pela inteligibilidade na recepção do sinal desejado. A figura 3.16 mostra o gráfico utilizado na correlação entre SNR e a qualidade de recepção do sinal de rádio, onde a região:

- A5 – Inteiramente satisfatório
- B4 – Muito bom
- C3 – Plenamente satisfatório
- D2 – Conversação fácil e inteligível
- E1 – Conversação inteligível com severa concentração
- F0 – Conversação ininteligível

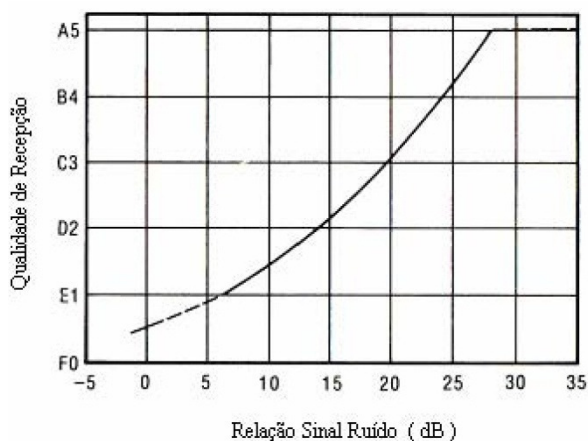


Figura 3.16 – Qualidade de recepção de rádio AM versus SNR [1]

O comitê do IEEE propôs este gráfico para dar uma razoável avaliação do efeito do ruído da linha de transmissão na qualidade da recepção do sinal. Este gráfico foi utilizado para verificar o SNR da linha na faixa de servidão e localizar na curva, a região que resultou. Para cada região existe uma especificação da qualidade de recepção [1].

#### 4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos cálculos e medições de RI, referente ao perfil lateral de uma linha de transmissão real de 500 kV. Uma comparação entre estes valores é apresentada. Adicionalmente é mostrado o nível de ruído ambiente nas proximidades da linha e a relação sinal/ruído referente aos pontos de medição.

#### 4.2 Características da Linha e Dados Relacionados com a Medição

A linha de transmissão escolhida para efetuar as medições é de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e está em operação. O vão onde foram realizadas as medições pertence ao município de Ribeirão das Neves, Minas Gerais. Este vão é plano, sem fontes de ruído que podem inviabilizar a medição, e afastado de pontos que possam causar reflexões. Na tabela 4.1 são apresentadas as principais características da linha e a figura 4.1 mostra um desenho da torre próxima ao ponto de medição [26].

Linha de transmissão	Neves 1 - Vespasiano 2 (500 kV)
Tensão de operação	525 kV
Gradiente máximo no condutor	18,95 kV/cm
Espaçamento entre fases ( C )	12 m
Vão médio entre torres	270 m
Altura dos condutores ( H )	10 m
Número de condutores por fase	3
Número de fases	3
Número de circuitos	1
Espaçamento entre condutores (d)	45,7 cm
Largura da faixa de servidão	70 m
Tipo de condutor	Ruddy
Diâmetro do condutor	28,7 mm
Configuração	Horizontal

Tabela 4.1 – Características da linha de 500 kV

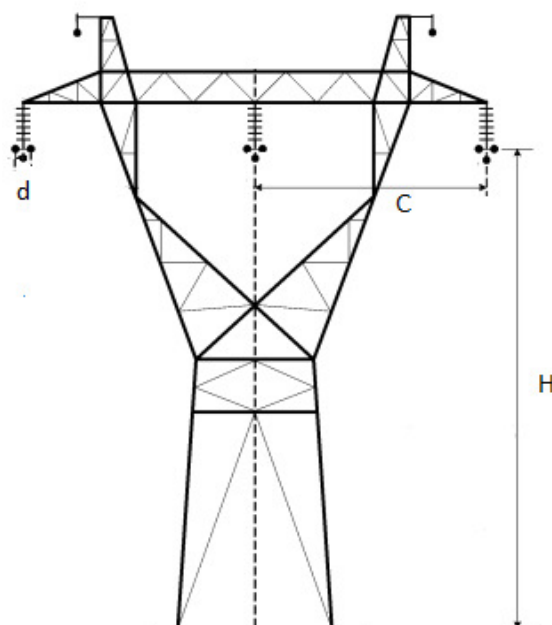


Figura 4.1 – Torre de transmissão

Na tabela 4.2 são apresentadas as características dos instrumentos e a frequência de medição. Na tabela 4.3 são mostradas as condições climáticas obtidas na realização das medições. Os valores de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e pressão apresentados são a média dos valores obtidos no início e no final das medições. Alguns equipamentos utilizados foram calibrados e outros ainda estavam com seus relatórios de calibração, fornecidos pelos fabricantes, no seus prazos de validades.

Antena	Loop com faixa de 9 kHz a 30 MHz
Instrumento utilizado	Analisador de Espectro Rohde & Schwarz
Detector	Quase Pico
Bandwidth	9 kHz a 6 dB
Constante de tempo do instrumento	1/160 ms
Frequência de medição	1 MHz

Tabela 4.2 - Características dos instrumentos e frequência de medição

Altitude	796 m
Temperatura	28,7 C <sup>o</sup>
Umidade relativa	46%
Velocidade do vento	1,6 m/seg
Pressão	691,1 mmHg
Categoria de tempo	Tempo bom

Tabela 4.3 - Condições climáticas e ponto de medição

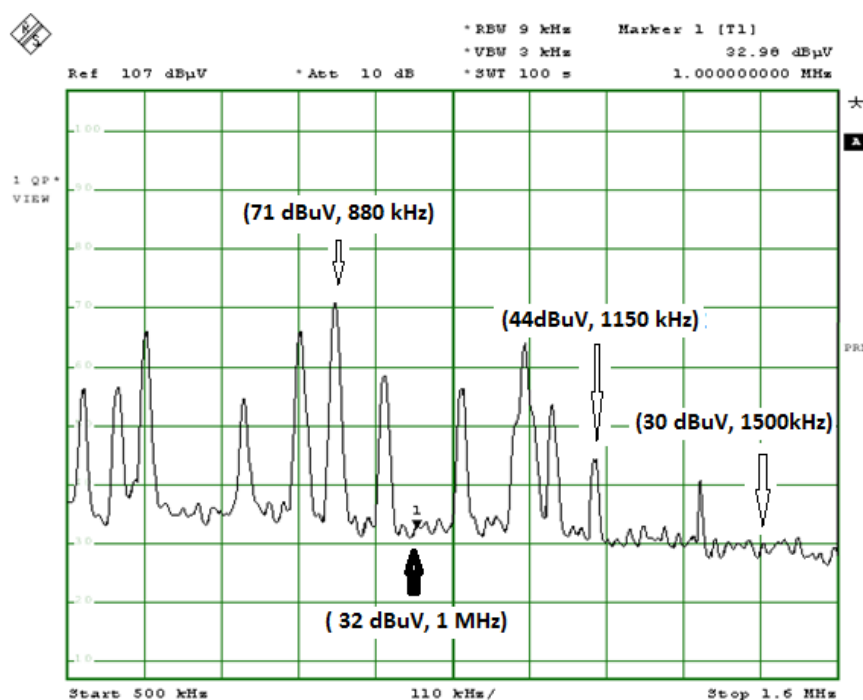


Figura 4.2 – Espectro do ambiente na faixa de 0,5 a 1,6 MHz

### 4.3 Resultados da Medição de RI para Tempo Bom

A frequência de medição foi determinada através da medição do ruído ambiente, entre 500 kHz e 1.6 MHz, a 150 metros de distância da linha. A antena foi colocada a 1,5 metros do solo e orientada na mesma posição em que registrou o maior nível de RI à distância de 15 metros da linha.

O espectro referente a esta medição é apresentado na figura 4.2, onde foram destacados através das setas claras, alguns valores de sinal de rádio juntamente com a sua frequência correspondente. A seta escura mostra a frequência de medição escolhida, onde o nível do ruído apresenta valores aceitáveis, estando afastado dos sinais de grandes amplitudes, além de 1 MHz ser a frequência de referência da formulação para o cálculo da RI utilizada neste trabalho.

Os valores de tensão apresentados na figura 4.2 devem ser corrigidos devido as perdas no cabo ( $0,45 \text{ dB}_{\mu\text{V}}$ ) e ao fator de antena ( $12,1 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}$ ), levando a um nível de ruído ambiente na frequência de 1 MHz de  $44,5 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}$ .

#### 4.3.1 Perfil lateral

O perfil lateral da RI foi obtido tomando-se como ponto inicial a fase central. As medições foram obtidas a 1,5 metros de altura, com intervalos de 3 em 3 metros, até a distância de 54 metros laterais à linha. Os valores medidos já corrigidos são apresentados na tabela 4.4. Observa-se que a diferença entre os valores medidos a 150 metros e a 54 metros da linha é de aproximadamente  $2 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}$ .

Distância (m)	RI medido (dB <sub>μV/m</sub> )	Distância (m)	RI medido (dB <sub>μV/m</sub> )
0	62.20	30	50.56
3	61.00	33	48.67
6	57.90	35	47.84
9	53.90	39	45.72
12	57.21	42	44.46
15	57.25	45	44.40
18	56.48	48	44.34
21	55.18	51	42.98
24	53.60	54	42.97
27	51.84	----	----

Tabela 4.4 – Perfil lateral medido

Rádios	Frequência (kHz)	Potência (kW)	Nível do Sinal (dB <sub>μV/m</sub> )
Rádio 1	610	100	88
Rádio 2	950	50	69
Rádio 3	830	50	54

Tabela 4.5 – Nível de sinal das rádios

### 4.3.2 Relação sinal/ruído

Por ser um dado de grande interesse, os valores de referência para a obtenção da relação sinal/ruído, nos pontos de medição da RI, foram relacionados com três sinais de rádios distintas. O nível de sinal destas rádios são no mínimo 10 dB maiores que o ruído ambiente. A tabela 4.5 mostra os níveis de sinal medidos, sendo que as rádios estão identificadas pela frequência de transmissão.

## 4.4 Resultado do Cálculo do Perfil Lateral

O perfil lateral da linha foi levantado utilizando-se a equação (3.2), para os mesmos pontos obtidos nas medições. A tabela 4.6 apresenta os valores mínimos e máximos calculados, em dB<sub>μV/m</sub>, apresentando uma dispersão em torno de 10 a 15 dB<sub>μV/m</sub>.

A metodologia utilizada neste trabalho calcula o campo elétrico (RI) a partir da fase mais externa da linha, ou seja, neste caso, a partir de 12 metros. As correções para as condições do tempo (tempo bom) e da frequência de medição (1 MHz) são nulas ( $E_{fw} = 0$  e  $E_f = 0$ ).

Distância (m)	RI máximo calculado (dB <sub>μV/m</sub> )	RI mínimo calculado (dB <sub>μV/m</sub> )
0	----	----
3	----	----
6	----	----
9	----	----
12	71.6	60.1
15	70.8	59.4
18	68.7	57.5
21	66.0	55.2
24	63.5	53.0
27	61.2	50.9
30	59.1	49.0
33	57.1	47.3
35	55.4	45.8
39	52.4	43.2
42	51.2	42.1
45	50.3	41.3
48	49.9	41.0
51	48.8	40.0
54	47.7	39.0

Tabela 4.6 - Perfil lateral calculado

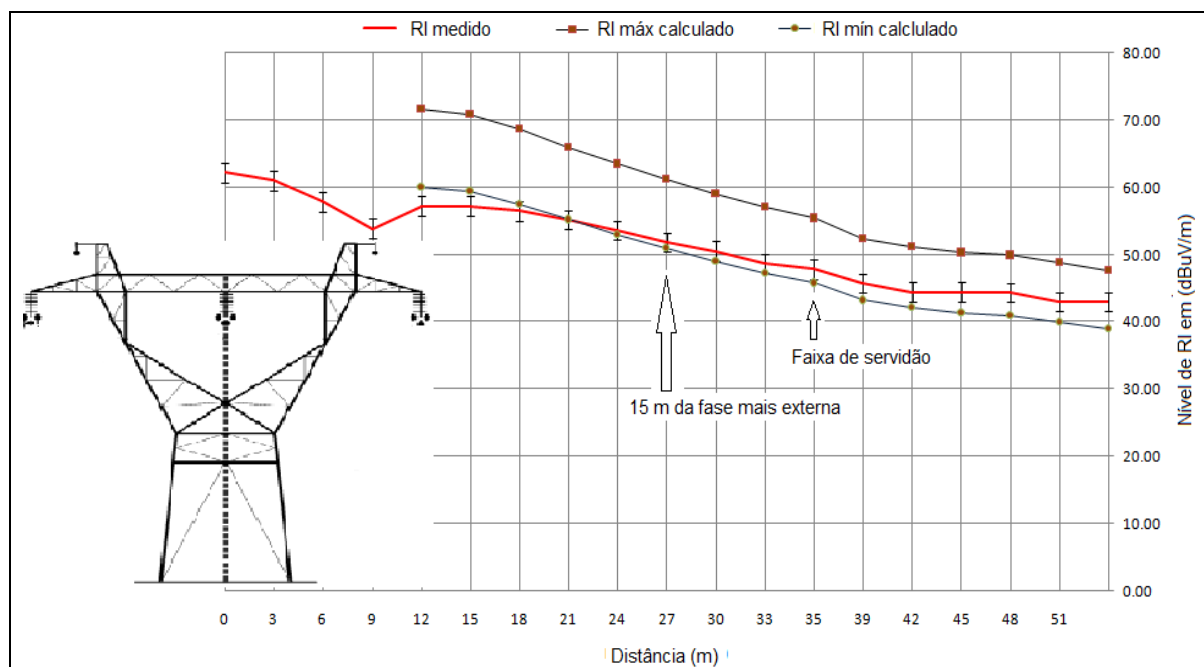


Figura 4.3 - Gráfico do perfil lateral medido e calculado

## 4.5 Análise dos Resultados

A comparação entre os valores da RI medidos e calculados pode ser feita a partir do gráfico da figura 4.3. Neste gráfico, os valores medidos foram traçados juntamente com a incerteza da medição ( $\pm 1,8 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$ ), obtida através dos dados fornecidos pelos manuais dos equipamentos e o desvio padrão das medidas experimentais. Também foi inserido no gráfico um desenho da torre para análise da RI em relação a geometria da linha.

### 4.5.1 Análise do perfil lateral

No gráfico da figura 4.3, a posição zero coincide com o meio da torre onde se encontra a fase central da linha de transmissão. Neste ponto obteve-se o maior nível de RI medido ( $62,2 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$ ) e calculado, devido a influência das outras fases externas. Com o deslocamento da antena o valor do campo foi decrescendo, conforme se afastava da fase central, chegando ao valor de  $53,9 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$ , a aproximadamente 9 metros da fase central. A partir deste ponto, a contribuição da fase mais externa predomina, fazendo com que o valor do campo elétrico apresente um crescimento de aproximadamente 4 dB. A partir de 12 metros tem-se o decaimento natural do campo com a distância.

Observando as curvas apresentadas neste gráfico, pode-se ressaltar 4 pontos importantes. A 21 metros de distância da fase central, a curva de valor medido entra na faixa de valor esperado pelo cálculo; a 27 metros (15 metros da fase mais externa), representa o valor de referência do nível da RI de uma linha; a 35 metros de distância (23 metros da fase mais externa) é a distância da faixa de passagem da linha; e a 42 metros da fase central o nível da RI igualou-se ao nível do ruído ambiente.

Como se pode perceber, de uma forma geral, o valor medido teve uma boa concordância com os valores calculados, principalmente nas distâncias próximas da faixa de servidão, pois esta é uma das regiões de maior interesse. A partir de 21 metros, os valores medidos ficaram dentro da faixa do valor esperado pelo cálculo, com 8,9% de diferença em relação à média dos valores calculados. Como as expressões existentes para o cálculo de RI, incluindo-se a utilizada neste trabalho, são mais apropriadas para regiões mais afastadas da linha, as diferenças encontradas próximo a linha são maiores.

A 27 metros do centro da linha, a diferença do valor medido e calculado é de 7,5% ( $4,2 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$ ), dentro da dispersão da medição (10 a  $15 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$ ). Esta distância corresponde a 15 metros de afastamento da fase mais externa e é tida como a distância de referência para medição da RI de uma linha de transmissão. Na pesquisa conjunta entre o CIGRE/IEEE, todos os valores medidos por vários grupos de pesquisa foram referidos para a distância de 15 metros, para efeito de comparação entre valores de RI de linhas. Nesta distância da linha, o RI é independente da altura. Por esta razão a distância normalizada de medição é a 15 metros da fase mais externa, sendo que esta análise assume uma altura uniforme da linha. Então a rádio interferência de  $51,8 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$  é o nível de ruído desta linha.

Na faixa de servidão, à distância de 35 metros, a diferença entre o valor medido e o valor médio calculado é de 5,4 %. A partir deste ponto os valores medidos, computando a incerteza da medição, estão dentro da faixa do valor esperado pelo cálculo. A partir de 42 metros de distância, o nível de RI medido igualou-se ao ruído ambiente ( $44,5 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$ ).



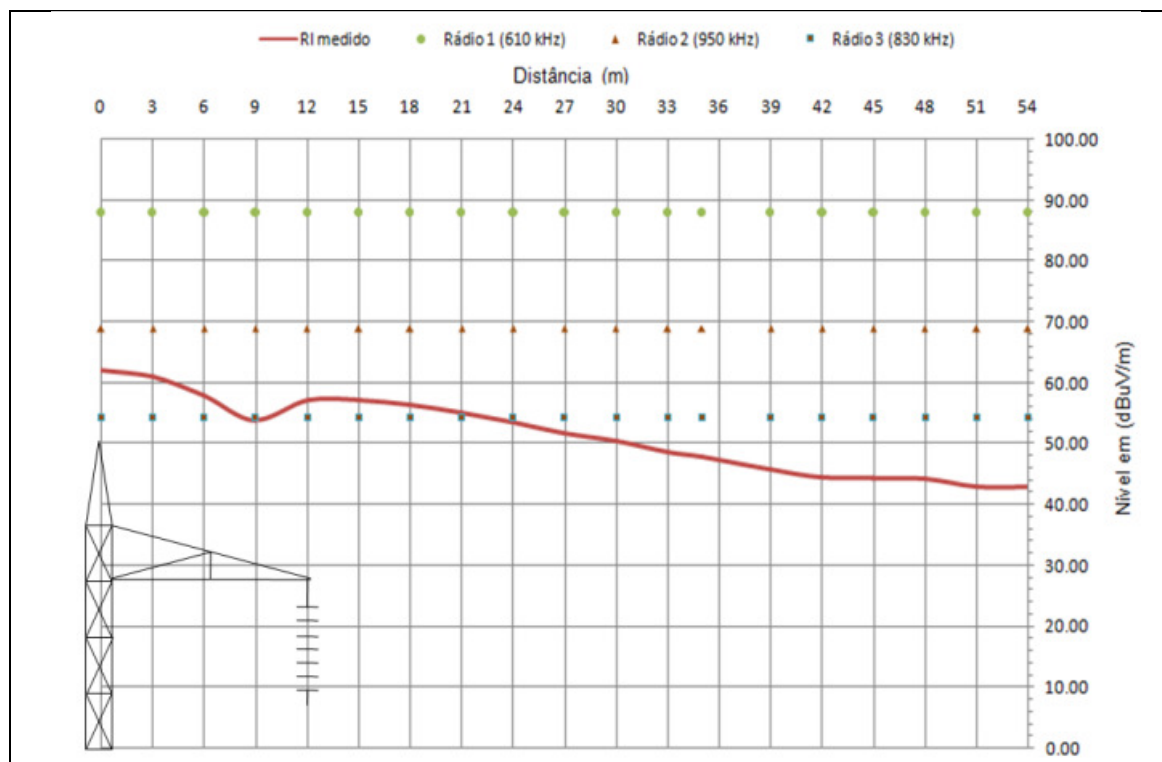


Figura 4.4 - Sinal das rádios em relação ao perfil lateral

#### 4.5.2 Análise da relação sinal/ruído (SNR)

A figura 4.4 mostra a amplitude do sinal das rádios escolhidas, juntamente com o nível de ruído de RI da linha. Observando-se as potências das rádios e as amplitudes dos seus sinais nos pontos de medição, nota-se que o sinal da rádio 2 tem a mesma potência da rádio 3, porém a amplitude dos sinais é diferente. Isto ocorre porque o sinal depende do caminho, da distância e da condutividade do terreno que a onda percorreu.

A tabela 4.7 mostra as relações sinal/ruído (SNR), levantadas para cada ponto de medição. O sinal da rádio1, para qualquer distância da linha, ficou maior que o ruído de RI; a rádio 2 tem seu sinal próximo do ruído, mas superior, e a rádio 3, para algumas distâncias, o sinal é menor que o ruído de rádio interferência. A figura 4.5 mostra a SNR calculada, em função da distância da linha, apresentando também o valor mínimo de recepção. Os requisitos indicam que a relação sinal/ruído no limite da faixa de servidão deve ser no mínimo igual a 24 dB, correspondendo a uma região de recepção “muito boa”. Neste caso o SNR acima de 24 dB a partir da faixa de servidão é o limite aceitável para esta linha.

A rádio 1 não sofrerá problema de interferência, com SNR acima de 24 dB para qualquer distância da linha, classificando-se na região de qualidade de recepção “muito bom”.

A rádio 2 terá sua recepção desqualificada para distâncias menores que 45 metros do centro da linha. Na faixa de servidão, local onde deve-se garantir uma boa recepção, o SNR ficou abaixo do limite, indicando um comprometimento da qualidade de recepção.

A rádio 3, em qualquer posição lateral a linha, teve o SNR abaixo de 24 dB. Para distâncias menores que 24 metros do centro da linha, o sinal desta rádio é menor que o nível de ruído da linha, apresentando SNR negativo. Na faixa de servidão, o SNR da rádio 3 está próximo de 10 dB, ou seja, uma recepção que depende de concentração para ser inteligível.

Distância (m)	SNR Rádio1 (dB)	SNR Rádio2 (dB)	SNR Rádio3 (dB)
0	25.8	06.8	-08.0
3	26.9	08.0	-06.8
6	30.1	11.1	-03.7
9	34.1	15.1	00.3
12	30.8	11.8	-02.9
15	30.7	11.8	-03.0
18	31.5	12.5	-02.2
21	32.8	13.8	-00.9
24	34.4	15.4	00.6
27	36.7	17.2	02.4
30	37.4	18.5	03.7
33	39.3	20.4	05.6
35	40.7	21.2	06.4
39	41.1	22.1	07.3
42	42.3	23.3	08.5
45	43.5	24.6	09.8
48	43.7	24.7	09.9
51	45.0	26.0	11.3
54	45.0	26.1	11.3

Tabela 4.7 - Relação Sinal/Ruído (SNR) para cada distância da linha

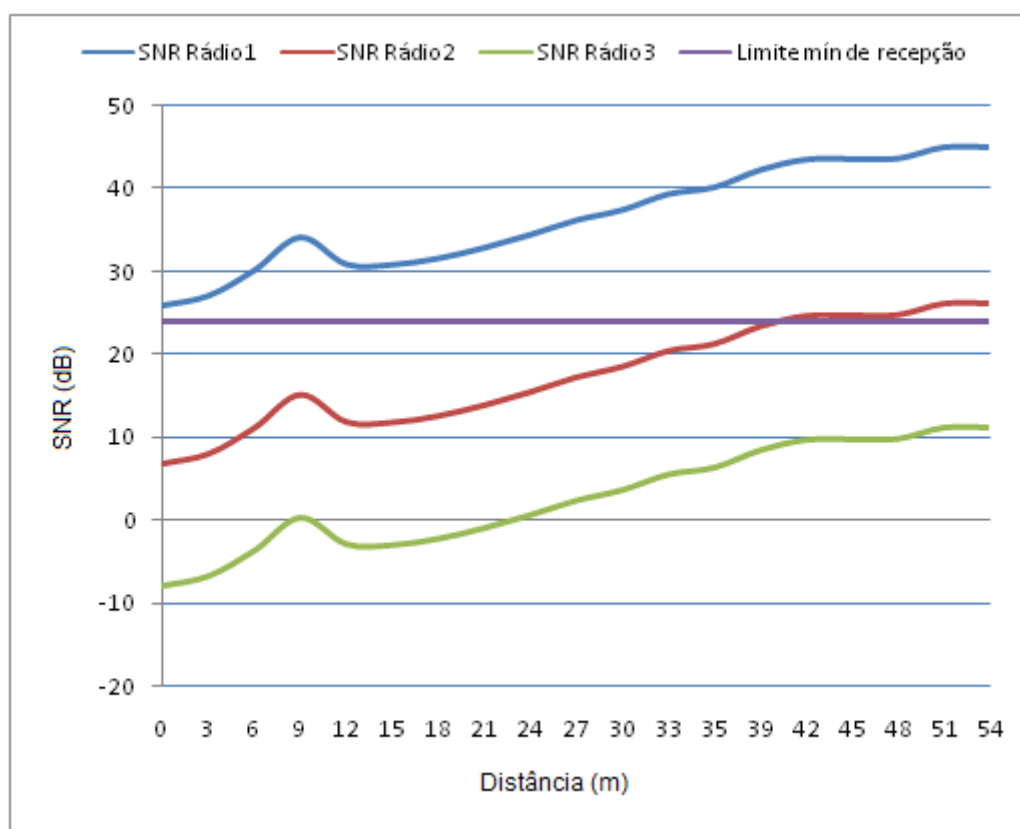


Figura 4.5 - Gráfico com as Relações Sinal/Ruído (SNR)

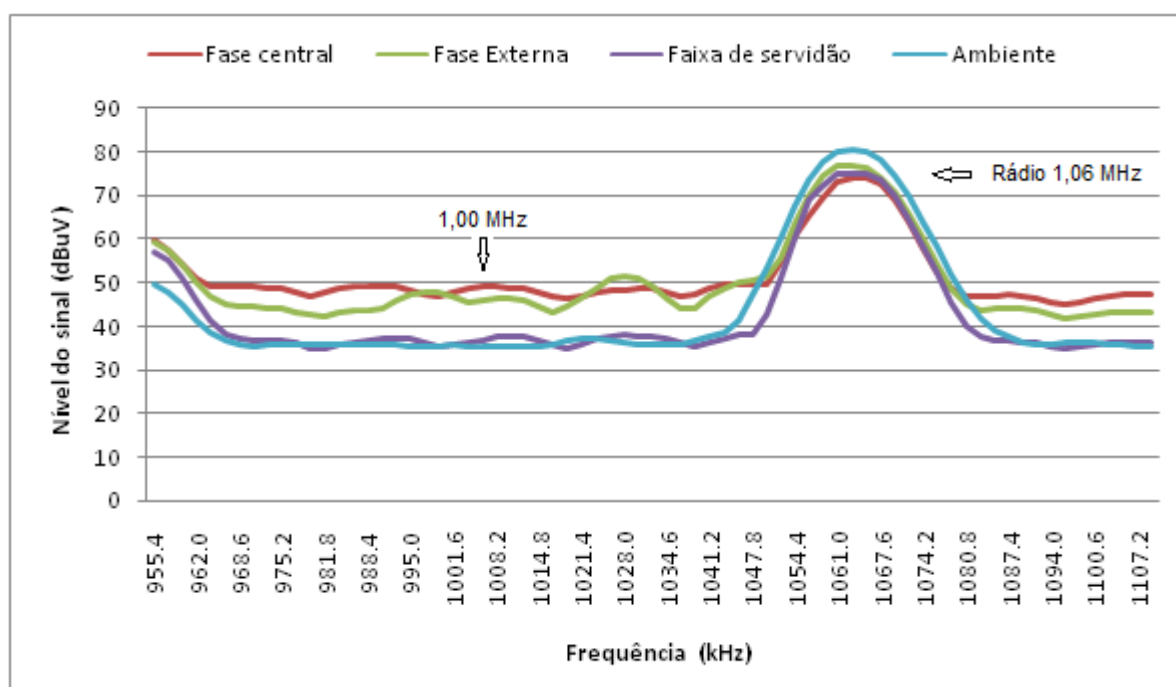


Figura 4.6 – Variação do sinal e do RI

Para caracterizar a influência da polarização da antena em medições de SNR, foi obtido o espectro de frequência para quatro distâncias da antena em relação ao centro da linha. Cada medição é obtida através do maior nível de RI medido em relação à polarização da antena. O medidor fez somente uma varredura para cada distância, não sendo apresentadas as correções do fator de antena e das perdas no cabo.

A figura 4.6 mostra a faixa de frequência de aproximadamente 955 kHz a 1100 kHz, neste intervalo está a frequência escolhida para medição de 1MHz e também a de uma rádio de frequência igual a 1060 kHz e potência 25 kW. Neste oscilograma as quatro curvas obtidas, com distâncias diferentes da linha, fase central, fase externa, faixa de servidão e ambiente são de 0, 12, 35 e 42 metros respectivamente.

Observando-se os níveis dos sinais na frequência de 1 MHz, nota-se que o mesmo diminui coerentemente conforme a antena se afasta da linha. O sinal da rádio de 1.06 MHz, obtido com a antena na mesma posição na qual foi registrado o maior nível de RI, apresentou variações significantivas, onde deveria manter um nível estável. A curva vermelha registrou o maior ruído em 1 MHz e apresentou o menor nível de sinal a 1.06 MHz, e a curva azul com nível de RI próximo do ruído ambiente, apresentou o maior nível de sinal.

#### 5.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho, de estudar os aspectos envolvidos na medição da rádio interferência gerados por uma linha de transmissão de 500kV em operação, medir este ruído e comparar o valor medido com o valor calculado, através de uma formulação empírica que melhor se ajusta a linha escolhida, foi atingido.

A fonte da rádio interferência proveniente de linhas de transmissão é o efeito corona; a sua formação está associada a elevados gradientes de potencial elétrico, resultantes de níveis de tensão de transmissão elevados, geometria das linhas, e características ambientais, dentre outras. Dentro de uma perspectiva de custo benefício, para tensões acima de 100 kV é economicamente inviável projetar-se uma linha que não produza ruído de rádio interferência. Nesta perspectiva, este ruído deve ser monitorado, para que não ultrapasse os limites máximos permitidos pelas normas reguladoras.

Para a realização dos cálculos de RI é muito importante um levantamento dos dados, referentes às características da linha de transmissão, com exatidão, além do estudo preliminar da formulação que melhor se adapta ao sistema de interesse. A expressão utilizada para o cálculo da RI apresentou excelentes resultados devido às características semelhantes entre as linhas utilizadas para a obtenção da formulação e a linha de transmissão utilizada neste trabalho.

Os valores obtidos através dos cálculos apresentaram-se coerentes com os valores encontrados na literatura, resultando em um perfil com o decaimento suave do campo de RI com a distância. Desprezando-se as distâncias muito próximas da linha, e as distâncias a partir de 42 metros, pode-se considerar que o perfil lateral da linha de 500 kV teve uma atenuação média por metro de  $0,5 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}$ .

Para realizar as medições de RI em uma linha de 500 kV em operação, é necessário utilizar as técnicas e os equipamentos descritos na literatura e nas normas. Também é necessário escolher um ponto de medição que atenda aos requisitos exigidos por norma e tenha um ruído ambiente que esteja com níveis baixos. Quanto menor o ruído ambiente, maior será a distância a ser coberta pelo perfil lateral, pois o valor do ruído ambiente limita a medição do perfil lateral da linha.

A medição prévia feita no local escolhido indicou valores aceitáveis para o levantamento do perfil lateral, na frequência de 1 MHz. Nesta frequência não havia sinais de grandes amplitudes nem ruídos indesejáveis. O perfil lateral da linha foi medido e calculado de 3 em 3 metros, até a distância de 54 metros. A partir desta distância, o valor medido tende a estabilizar no nível do ruído ambiente, e o valor calculado continua diminuindo com a distância.

Os valores medidos da RI apresentaram valores coerentes com a literatura, mostrando-se fortemente influenciados pelos parâmetros de configuração do analisador de espectro utilizado na medição. Esta característica indica a necessidade de um operador experiente, e que conheça a configuração necessária para cada tipo de medição.

Os valores de RI, obtidos através dos cálculos e das medições tiveram maior concordância para distâncias mais afastadas da linha, devido à metodologia de cálculo ser mais apropriada para distâncias a partir de 15 metros da fase mais externa.

Normalmente, para classe de tensão de 500 kV, o limite da faixa de passagem da linha é em torno de 35 m. O valor da RI nesta faixa é de 47,84 dB<sub>μV/m</sub>. A diferença da média do valor calculado foi de apenas 5,45 %.

Na distância de 27 metros (15 metros da fase mais externa) o nível de RI medido é de 51,84 dB<sub>μV/m</sub>. Conforme a norma NBR 7876, para fins de comparação este é o nível de RI desta linha. Considerando o valor médio de RI medido nas linhas de 500 kV, relacionadas na pesquisa do IEEE/CIGRE [11, 12], de 47,2 dB<sub>μV/m</sub>, resultou em uma diferença de 9,8 %. Devido à grande dispersão do nível de RI, pode-se avaliar que a diferença foi pequena. Um fator que influenciou, foi o valor do gradiente na superfície dos cabos da linha em estudo ser mais elevado que os valores das linhas envolvidas na pesquisa. Para esta comparação foram escolhidas as linhas com maior grau de semelhança e também com número de medições próximos, ou seja, código 2.

No processo de obtenção dos dados relativos às medições, as condições de superfície do condutor apresentaram-se como fator de grande influência na determinação do nível de RI. Este pode ser maior devido à acumulação de insetos, partículas vegetais e também se sua superfície estiver arranhada ou riscada.

Para a avaliação da relação sinal/ruído (SNR) de uma linha, é importante trabalhar na faixa de frequência correspondente a ondas médias (AM), pois nesta faixa de frequência a polarização é vertical, o alcance é inversamente proporcional a frequência e a variação do sinal no instante da medição é mínima. Deve-se prestar atenção nas variações destes sinais devido a distância da fonte e variações ambientais. A utilização do SNR como critério de análise do nível de RI, relacionado com determinada linha de transmissão, torna-se mais interessante que o uso de valores absolutos.

Apesar da norma da ANATEL (resolução 237) estipular um valor mínimo de sinal de 80 dB, entre as rádios escolhidas neste trabalho somente uma atinge o valor mínimo (rádio1 88 dB<sub>μV/m</sub>, rádio2 69 dB<sub>μV/m</sub> e rádio3 54,2 dB<sub>μV/m</sub>). 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. A RI em relação a rádio difusão, principalmente em AM, deixará de ser um problema de interferência causado por linha de transmissão, com o início da transmissão digital. Esta forma de transmitir os sinais de rádio é pouco sensível a interferências de sinais indesejáveis. Outro aspecto que tornará a rádio difusão livre da RI, é a tendência da melhoria da qualidade (seletividade) dos receptores com base no incentivo ao uso de técnicas mais modernas.

Com relação à dependência do nível da RI quanto às condições climáticas, pode-se concluir que os valores medidos apresentados neste trabalho têm um grau de confiabilidade maior que o calculado. Isto se deve ao fato da medição ter seguido um procedimento normalizado e o método de cálculo ser referente às condições européias. Apesar das correções mais importantes terem sido efetuadas, existem vários fatores que também influenciam, mas não foram considerados.

Os resultados mostraram que, é possível fazer predição da RI utilizando a metodologia de cálculo empírica, bastando para isto que a linha de transmissão em estudo tenha parâmetros geométricos e elétricos compatíveis com aqueles utilizados na obtenção da formulação empírica a ser utilizada. Além disto, seguindo-se um bom procedimento de medição, os valores obtidos em campo podem ser utilizados para o acompanhamento e/ou análise da metodologia de cálculo. As condições ambientais (tempo bom, garoa, chuva fraca, vento, chuva forte) são fundamentais para que tal procedimento possa representar corretamente os níveis da RI gerados pela linha de transmissão.

## 5.2 Propostas de Continuidade

Com a experiência obtida neste trabalho, foi possível perceber a necessidade de um levantamento da distribuição estatística relativa à medição de rádio interferência proveniente de linhas de transmissão. Computar o nível da RI em um curto período de tempo está longe de ser satisfatório.

Como continuidade deste trabalho propõe-se, a partir do uso de equipamentos adequados, o levantamento da curva de distribuição de frequência cumulativa do nível de RI desta linha de transmissão. Estas curvas mostram a porcentagem do tempo que o nível de ruído está abaixo ou acima de certo valor. Nesta medição o tempo total de medição pode compreender todas as condições de tempo. Estas medições poderão ser usadas para obter uma formulação que melhor se ajustam as nossas condições (resistividade, clima, altitude).

---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] *Transmission line reference book - 345kV and Above*. Second edition. EPRI - Electric Power Research Institute, 1982. 625 p.
- [2] LEÃO, R. M. *Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão*. 1ª ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008. 146 p.
- [3] SOUZA, A. L. *Estudo de modelos para definição de um critério de início de corona através da análise de experimentos e simulações computacionais*. 2009. 80 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- [4] JACKSON, G. A. The early history of radio interference. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, vol. 57, Nº. 6, p. 244 – 250, November/Dezember 1987.
- [5] McMILLAN, F. O.; BARNETT, H. G. *The radio interference measuring instrument*. A.I.E.E. Pacific convention, Seattle, Wash, August 27 - 30, 1935.
- [6] AGGERS, C. V.; FOSTER, D. E.; YOUNG, C. S. *Instruments and methods of measuring radio noise*. Presented at the AIEE combined summer and Pacific Coast Convention, San Francisco, Calif., Paper 39-144, June 26 - 30, 1939.
- [7] ADAMS, G. E. *The calculation of the radio interference level of transmission lines caused by corona discharges*. AIEE Trans., Vol. 75, pp. 411-419, 1956.
- [8] PAKALA, W. E.; SHOWERS, R. M. *Principles and application of radio interference measurements*. Manuscript received by the PGI, Part of the work reported in this paper was supported by the Navy Dept., Bureau of Ships, under contract NObsr 72505, August 20, 1958.

- [9] PAKALA, W. E.; TAYLOR, E. R.; HARROLD, R. T. *Radio noise measurements on high voltage lines from 2.4 to 345 kV*. Air Force Base, T. R. N° RADC – TR 66-606, vol I, II and III, N. Y.
- [10] HARROLD, R. T. *The spectrum analyzer applied to the measurement of EHV power line radio noise*. recommended and approved by the Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Meeting, Paper 71 TP 163-PWR, New York, January 31 – February 05, 1971.
- [11] IEEE Committee Report. CIGRE/IEEE. *Survey on extra high voltage transmission line radio noise*. IEEE Transactions on power apparatus and systems. v. PAS-92, n. 3, pp 1019 - 1028 May/Jun, 1973.
- [12] IEEE Committee Report. *Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE survey results*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. Paper T 72 547-8, San Francisco, Calif., 1972.
- [13] MIRANDA, G. C. *Condutores compactos desenvolvidos no Brasil aplicação real*. (P&D - 285). Relatório 1, Contrato CEMIG/FCO – TE 15889/2010, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2010.
- [14] QUAN, Zhou; CAIXIN, Sun; LIFENG, Liu; WENXIA, Sima; WENDOU, An. *Electromagnetic environment of the EHV transmission line and its effect*. IEEE Conferences, p. 229 – 232, 2001.
- [15] WAN, Baoquan; LIU, Dichen; WU, Xiong; LU, Yao. *The study on the radio interference from 800 kV Yun Guang UHVDC transmission line*. International Conference on Power System Technology, IEEE, 1 – 4244-0111, 9/06/2006.
- [16] FILHO, E. B. G. *Estudo da aplicação dos condutores compactos em linhas urbanas de 138 kV: aspectos elétricos de corona e RI*. 2005, pag. 51, Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- [17] KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. *High voltage engineering: fundamentals*. Second edition, Published by Butterworth-Heinemann, 2000.



- [18] SALDANHA, J. O. P.; MURTA, M. L. *Avaliação do ambiente eletromagnético visando segurança pessoal: determinação do nível de poluição eletromagnética em Belo Horizonte*. Belo Horizonte: Engenharia Elétrica da UFMG, abril de 2002, pag. 30, Relatório Técnico N° 1, TEC 2219/96.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7876: *linhas e equipamentos de alta tensão: medição de rádio interferência na faixa de 0.15 a 30 MHz, método de ensaio*. Pag. 19, 1983.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7875: *Instrumentos de medição de rádio interferência na faixa de 0.15 a 30 MHz (padrão CISPR), padronização*, pag. 19, 1983.
- [21] ANATEL: Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução n° 237 – *Regulamento para certificação de equipamento de telecomunicações*. Novembro de 2000.
- [22] Guia prático do Analisador de espectro Rohde & Schwarz, FSV 3 (1307.9002k03)
- [23] Manual antena loop ativa, marca ETS Lindgren, tipo 6502. EMC Test Systems, L.P. – September 2002. REV E – PN 399058.
- [24] Manual do medidor de condições ambientais marca Brunton, 2255 Brunton Court Riverton, WY 82501 – WWW.brunton.com.
- [25] IEEE – 213, *Standard procedures for the measurement of radio noise from overhead power lines*. Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Std 430 – 197, New York, NY 1976.
- [26] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. *Características do projeto da linha de transmissão de Neves 1 – Vespasiano 2, 500 kV*. 2002, N° 30904 – Siemens – 1382 c, pag. 16.