



Clara Elizabeth Verdugo Muñoz

**Medições e Modelagem da perda de
propagação e qualidade de recepção em
sistemas de radiodifusão com mobilidade**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento
de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro

Abril de 2017



Clara Elizabeth Verdugo Muñoz

**Medições e Modelagem da perda de propagação e qualidade de recepção
em sistemas de radiodifusão com mobilidade**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Profa. Marta Pudwell Chaves de Almeida
Co-orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Glaucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Rodolfo Saboia Lima de Souza
INMETRO

Prof. Pedro Vladmir Gonzalez Castellanos
UFF

Prof. Márcio da Silveira Carvalho
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 18 de abril de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Clara Elizabeth Verdugo Muñoz

Graduou-se em Ingenieria Electrónica na UDENAR (Universidad de Nariño, Colômbia) em 2015. Atualmente é estudante de doutorado da PUC-Rio na área de concentração Eletromagnetismo Aplicado.

Ficha Catalográfica

Verdugo Muñoz, Clara Elizabeth

Medições e modelagem da perda de propagação e qualidade de recepção em sistemas de radiodifusão com mobilidade / Clara Elizabeth Verdugo Muñoz ; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – 2017.
100 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2017.
Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Recepção em mobilidade. 3. Propagação em regiões urbanas. 4. Propagação de ondas medias. 5. Rádio digital DRM. 6. Modelagem estatística. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha mãe, irmãos e sobrinhos.

Ao Emersson e à Carlota.

Agradecimentos

À minha mãe pelo apoio, carinho e amor incondicional. Ao meu pai, que de sua maneira, representa a base do meu sucesso. Ao meu irmão pelas palavras de conforto nos momentos difíceis. Às minhas irmãs, que sempre me ajudaram a ir em frente.

Ao Emersson, que sempre esteve ao meu lado, me incentivando e apostando em minha capacidade.

Ao meu orientador, Professor Luiz Alencar Reis da Silva Mello, pela excelente orientação, competência, confiança e muita paciência.

À PUC-Rio, e em especial, ao corpo docente do CETUC, por ter contribuído para o meu crescimento profissional acadêmico.

A todos os meus colegas do CETUC, pela amizade, cooperação e ajuda.

À CAPES, pelo fomento da bolsa durante a realização do trabalho.

Resumo

Muñoz, Clara Elizabeth Verdugo; Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. **Medições e modelagem da perda de propagação e qualidade de recepção em sistemas de radiodifusão com mobilidade.** Rio de Janeiro, 2017. 100p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Ministério da Comunicações vem incentivando a realização de avaliações com sistemas de radiodifusão sonora digital, visando a futura decisão para a escolha do Padrão de Rádio Digital a ser adotado no País. Nos anos de 2012 a 2014 foram realizadas pelo CETUC, em parceria com o Ministério da Comunicações, a Anatel e o Inmetro, campanhas de medições nas faixas de ondas médias e VHF em algumas cidades do país, para avaliar os padrões de radiodifusão digital e subsidiar a decisão em curso sobre o padrão a ser adotado no Brasil. As campanhas envolveram medições estáticas e medições com mobilidade. Os dados das medições estáticas já foram analisados e os resultados divulgados. Neste trabalho são analisados os resultados das medições móveis. A primeira parte desse estudo trata da comparação dos resultados experimentais com os modelos de predição semiempíricos. Posteriormente, a análise estatística da variabilidade do sinal recebido em termos dos desvanecimentos de larga e pequena escala. Na parte final, a qualidade de recepção e a cobertura do sinal digital foram analisados a partir dos dados das medições.

Palavras-chave

Propagação em regiões urbanas; AM digital; Rádio digital; DRM; Distribuições estatísticas; Modelagem estatística; Análise de cobertura;

Abstract

Muñoz, Clara Elizabeth Verdugo; Mello, Luiz Alencar Reis da Silva (Advisor). **Measurements and Models for the propagation loss and reception quality in mobile broadcast systems.** Rio de Janeiro, 2017. 100p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Communications Ministry has been encouraging evaluations with digital sound broadcasting systems, aiming at the future decision for the Digital Radio Standard choice to be adopted in Brazil. In 2012 to 2014 were carried out by CETUC, in partnership with the Communications Ministry, Anatel and Inmetro, measurements campaigns at the medium and VHF bands in some cities of the country, to evaluate the digital broadcasting standards and to subsidize the current decision on the standard to be adopted in Brazil. Static and mobility measurements were involved at the campaign. The static measurement data have already been analyzed and the results reported. In this work, the mobile measurements results are analyzed. At the first part of this study deals with the comparison between experimental results with prediction models. Subsequently, statistical analysis of the received signal variability in terms of large and small scale fading were done. In the final part, reception quality and digital signal coverage were examined from the measurement data.

Keywords

Urban propagation; Digital AM; Digital Radio; DRM; Statistical distribution; Statistical modelling; Coverage analysis;

Sumário

| | |
|---|----|
| 1 Introdução | 14 |
| 1.1. Descrição do Problema | 14 |
| 1.2. Objetivos do Trabalho | 15 |
| 1.3. Resultados Obtidos | 15 |
| 1.4. Organização do Texto | 16 |
| 2 Trabalhos Anteriores | 17 |
| 3 Modelos de Previsão | 21 |
| 3.1. Modelos para Perda de Propagação | 21 |
| 3.1.1. Modelo de espaço livre | 21 |
| 3.1.2. Recomendação ITU-R P.368 | 23 |
| 3.1.3. Regulamento da Anatel | 28 |
| 3.1.4. Condutividade do solo | 28 |
| 3.2. Análise Estatística do Sinal | 30 |
| 4 Medições | 33 |
| 4.1. Setup de Medidas | 33 |
| 4.1.1. Características do Transmissor | 33 |
| 4.1.2. Sistema de recepção | 36 |
| 4.1.3. Parâmetros de medição | 38 |
| 4.2. Rotas de medição | 39 |
| 5 Obtenção e análise dos resultados | 42 |
| 5.1. Comparação com os modelos de predição | 42 |
| 5.1.1. Metodologia | 42 |
| 5.1.2. Comparação com os modelos de propagação | 43 |
| 5.1.3. Perda média de percurso em função da distância | 48 |
| 5.2. Análise Estatística dos Desvanecimentos | 52 |
| 5.2.1. Metodologia | 53 |

| | |
|--|----|
| 5.2.2. Desvanecimento de Larga Escala | 55 |
| 5.2.3. Desvanecimento de Pequena Escala | 59 |
| 5.3. Qualidade de recepção | 61 |
| 6 Conclusão | 65 |
| Referências Bibliográficas | 67 |
| Anexo 1 – Intensidade de Campo Elétrico e Ajuste | 71 |
| Anexo 2 – Desvanecimento de Larga Escala | 79 |
| Anexo 3 – Desvanecimento de Pequena Escala | 85 |
| Anexo 4 – Qualidade de Recepção | 93 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 Composição de campos que formam as ondas terrestres | 23 |
| Figura 3.2 Mapa de condutividade para a região do Estado de São Paulo | 30 |
| Figura 4.1 Estação transmissora (esq); torre da Rádio CBN AM (dir) | 34 |
| Figura 4.2 Estação transmissora (esq); torres da Rádio Cultura AM (dir) | 35 |
| Figura 4.3 Transmissor e processador áudio analógico Orban (esq); transmissor Harris (dir), utilizados na estação Rádio CBN AM | 35 |
| Figura 4.4 Processador de áudio analógico Orban (esq); Transmissor Harris 3DX-50 (dir); utilizados na estação Rádio Cultura AM | 36 |
| Figura 4.5 Laboratório móvel de telecomunicações de Inmetro | 37 |
| Figura 4.6 Diagrama esquemático do setup de recepção | 38 |
| Figura 4.7 Localização da antena transmissora e contorno protegido diurno da Rádio CBN AM | 39 |
| Figura 4.8 Localização da antena transmissora da Rádio Cultura AM | 40 |
| Figura 4.9 Mapa das rotas de medição da Rádio Cultura AM | 41 |
| Figura 5.1 Intensidade de campo medida, curva de ajuste e predições: Rota 2-Diurno, Rádio CBN AM | 45 |
| Figura 5.2 Intensidade de campo medida, curva de ajuste e predições: Rota 3-Diurno, Rádio CBN AM | 46 |
| Figura 5.3 Intensidade de campo medida, curva de ajuste e predições: Rota 2-Diurno, Rádio Cultura AM | 46 |
| Figura 5.4 Intensidade de campo medida, curva de ajuste e predições: Rota 9-Noturno, Rádio Cultura AM | 47 |
| Figura 5.5 Intensidade de campo elétrico medida e modelo da Recomendação ITU-R 368-9 com a distância em escala logarítmica. Rota 2, período diurno. Rádio CBN AM | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.6 Potência medida e reta da perda com relação à distância. Rota 2, período diurno. Rádio CBN AM | 50 |
| Figura 5.7 Potência elétrica medida e reta da perda com relação à distância. Rota 2, período diurno. Rádio Cultura AM | 51 |
| Figura 5.8 Medições e o seu sinal depois da filtragem, desvanecimento de Larga Escala, (a) médio comprimento de onda, (b) dois comprimentos de onda, (c) cinco comprimentos de onda | 54 |
| Figura 5.9 Desvanecimento de Pequena Escala. Para a Rádio CBN AM, Rota 2, período diurno. | 55 |
| Figura 5.10 Desvanecimento de Larga Escala para a Rota 2 no período diurno da Rádio CBN AM | 56 |
| Figura 5.11 Desvanecimento de Larga Escala para a Rota 2 no período noturno da Rádio CBN AM | 57 |
| Figura 5.12 Desvanecimento de Larga Escala para a Rota 9 no período noturno da Rádio Cultura AM | 58 |
| Figura 5.13 Desvanecimento de Pequena Escala para a Rota 2 no período diurno da Rádio CBN AM | 59 |
| Figura 5.14 Função cumulativa para o desvanecimento de Pequena Escala para a Rota 2 no período diurno da Rádio CBN AM | 60 |
| Figura 5.15 Desvanecimento de Pequena Escala para a Rota 2 no período noturno da Rádio CBN AM | 60 |
| Figura 5.16 Função cumulativa para o desvanecimento de Pequena Escala para a Rota 2 no período noturno da Rádio CBN AM | 61 |
| Figura 5.17 Qualidade de recepção e intensidade de campo elétrico em função da distância: Rota 2, período diurno, Rádio CBN AM. | 62 |
| Figura 5.18 Qualidade de recepção e intensidade de campo elétrico em função da distância: Rota 2, período diurno, Rádio Cultura AM. | 62 |
| Figura 5.19 Qualidade de recepção e intensidade de campo elétrico vs. SNR: Rota 2, período diurno, Rádio CBN AM. | 63 |
| Figura 5.20 Qualidade de recepção e intensidade de campo elétrico vs. SNR: Rota 2, período diurno, Rádio Cultura AM. | 63 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 Principais Distribuições de Probabilidade em Telecomunicações | 32 |
| Tabela 4.1 Características das estações transmissoras de rádio | 34 |
| Tabela 4.2 Características do setup de medições | 37 |
| Tabela 4.3 Parâmetros de medição dos testes em mobilidade DRM30 | 38 |
| Tabela 4.4 Descrição das rotas de teste, nas medições em mobilidade | 41 |
| Tabela 5.1 Parâmetros usados para o cálculo da intensidade de campo elétrico com a recomendação ITU-P R.368-9, para os casos da Rádio CBN AM e Rádio Cultura AM | 43 |
| Tabela 5.2 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para a Rota 2-Diurno, Rádio CBN AM | 45 |
| Tabela 5.3 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para a Rota 3-Diurno, Rádio CBN AM | 46 |
| Tabela 5.4 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para a Rota 2-Diurno, Rádio Cultura AM | 47 |
| Tabela 5.5 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para a Rota 9-Noturno, Rádio Cultura AM | 47 |
| Tabela 5.6 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para todas as rotas de medições. | 48 |
| Tabela 5.7 Convenção para os modelos que melhor se ajustam na Tabela 5.6 | 48 |
| Tabela 5.8 Expoente de perdas de percurso para diferentes ambientes [27]. | 50 |
| Tabela 5.9 Coeficientes da equação de ajuste (5.4) e expoentes da perda de percurso da Potência com a Distância para todas as rotas analisadas | 51 |
| Tabela 5.10 Descrição dos parâmetros da função normal para o | |

| | |
|--|----|
| desvanecimento de larga escala da Figura 5.10 | 56 |
| Tabela 5.11 Descrição dos parâmetros das funções normal para o desvanecimento de larga escala da Figura 5.11 | 57 |
| Tabela 5.12 Descrição dos parâmetros das funções normal para o desvanecimento de larga escala da Figura 5.12 | 58 |
| Tabela 5.13 Descrição dos parâmetros das funções de densidade apresentadas na Figura 5.13 | 59 |
| Tabela 5.14 Descrição dos parâmetros das funções de densidade apresentadas na Figura 5.15 | 61 |
| Tabela 5.15 Qualidade de Recepção e cobertura para duas rotas de medições | 64 |
| Tabela 5.16 Qualidade de Recepção e cobertura para todas as rotas de medições | 64 |

1

Introdução

1.1. Descrição do Problema

Nos últimos anos o Ministério das Comunicações vem incentivando a realização de testes e avaliações com sistemas de radiodifusão sonora digital, visando a futura decisão para a escolha do Padrão de Rádio Digital a ser adotado no País. Trata-se do último sistema de comunicações que ainda utiliza tecnologias analógicas, depois da adoção de tecnologias digitais pelos sistemas de TV. Esta adoção permitirá a melhoria da qualidade e redução de potências de transmissão dos sistemas de radiodifusão digital. Isto permitirá a liberação de faixas de frequência para utilização por outros sistemas e serviços.

Nos anos de 2012 a 2014 foram realizadas pelo CETUC, em parceria com o Ministério da Comunicações, a Anatel e o Inmetro, campanhas de medições nas faixas de ondas médias e VHF em São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília, para avaliar os padrões de radiodifusão digital DRM (Europeu) e HD Radio (Norte-americano) e subsidiar a decisão em curso sobre o padrão a ser adotado no Brasil.

As campanhas envolveram medições estáticas e medições com mobilidade. Os dados das medições estáticas já foram analisados e os resultados divulgados. Nesta dissertação será realizada a análise os resultados das medições móveis, que representam o maior volume de dados disponíveis. Praticamente não existem resultados de medições com mobilidade nestas faixas de frequência disponíveis na literatura técnica.

Os resultados incluem a comparação da perda de propagação mediana medida com a prevista por modelos semiempíricos, a modelagem estatística da variabilidade do sinal recebido e a análise da qualidade de recepção e cobertura digital a partir dos dados de medições.

1.2. Objetivos do Trabalho

Para este trabalho os objetivos definidos foram:

- a) pesquisar a bibliografia sobre o problema da cobertura de sistemas de radiodifusão digital móvel em ambientes urbanos.
- b) desenvolver um programa de computador para a análise de dados de medições de perda de propagação e qualidade de recepção em sistemas de radiodifusão digital em regiões urbanas e rurais no Brasil.
- c) obter o valor mediano da perda de propagação em função da distância ao transmissor.
- d) comparar a perda de propagação mediana em função da distância ao transmissor com modelos semiempíricos como a Recomendação ITU-R P.368, a recomendação da Anatel e o modelamento teórico para o espaço livre.
- e) fazer a modelagem estatística da variabilidade do sinal recebido, como dos desvanecimentos de larga e pequena escala.
- f) analisar a qualidade de recepção e a cobertura digital a partir dos dados de medições.

1.3. Resultados Obtidos

Nesta seção serão apresentados resultados da perda de propagação em função da distância ao transmissor, comparados com a perda obtida por modelos semiempíricos, utilizando os parâmetros padrão para a região e os de melhor ajuste às medições a partir dos resultados dos cálculos de erro. Além da variabilidade do sinal recebido, os desvanecimentos em larga e pequena escala são apresentados em histogramas juntamente com distribuições de probabilidade para as medições diurna e noturna, para duas frequências diferentes na banda de ondas medias.

Também, será obtida uma análise da qualidade de recepção e da cobertura digital para as medições.

Para chegar a estes resultados se fará uso da ferramenta Matlab.

1.4. Organização do Texto

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica com trabalhos desenvolvidos até o momento para a modelagem estatística do sinal recebido na propagação na banda de ondas medias considerando medições estáticas e dinâmicas.

No capítulo 3 serão apresentados os modelos teóricos para perda de propagação, assim como das funções de distribuição de probabilidade representativas para a propagação em mobilidade.

O capítulo 4 apresenta o setup das medições em mobilidade feitas para entorno urbano nos períodos diurno e noturno na cidade de São Paulo na banda de ondas medias, e a metodologia do processamento de dados desenvolvido em Matlab, além da apresentação dos resultados principais.

No capítulo 5, apresenta-se a comparação entre os dados medidos de perda de propagação e os obtidos pelos modelos teóricos, a análise estatística dos desvanecimentos de larga e pequena escala e uma avaliação do melhor ajuste de cada distribuição com os dados medidos. Também será realizada a análise da qualidade de recepção e cobertura digital para as medições feitas.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido e as propostas de trabalho futuro.

2 Trabalhos Anteriores

O Consórcio Digital Radio Mondiale (DRM) é uma organização internacional, concebida por organismos de radiodifusão, mas com a assistência e participação ativa dos fabricantes de transmissores e receptores e de outras partes interessadas (tais como organismos reguladores). O sistema DRM, proposto pelo consórcio, foi projetado especificamente como uma substituição digital de alta qualidade para a atual radiodifusão analógica nas bandas AM e FM (VHF). Como tal, pode ser operado com a mesma canalização e alocações de espectro como atualmente empregadas. [1].

A Especificação do Sistema DRM para radiodifusão abaixo de 30 MHz (denominada “DRM30”) foi publicada pela primeira vez pelo Instituto Europeu de Normalização das Telecomunicações (ETSI) em 2001. [2]. Para estabelecer o uso internacional do sistema para radiodifusão sonora digital foi publicada uma recomendação pela ITU.[3].

O objetivo principal do sistema DRM é garantir que a melhor qualidade de áudio seja atingida, simultaneamente com a manutenção do serviço de AM. Em relação à banda, o sistema pode chegar a ocupar múltiplas larguras de banda dependendo da localização e das frequências usadas. Por exemplo, na Europa a largura de 9 KHz é usada na faixa de ondas médias, enquanto nas Américas é utilizada a largura de 10 KHz. Com respeito à banda de ondas curtas, foi aprovada a largura de banda de 5KHz. [2].

Para canais com largura de 10 KHz, a taxa de bits disponível para a codificação dos dados é de, aproximadamente, 35 Kbits/s para um canal e 72 Kbits/s para canais duplos. A fim de oferecer a melhor qualidade para uma dada taxa de bits, o sistema oferece diferentes esquemas de codificação. O padrão avançado de codificação de áudio (AAC), juntamente com a ferramenta SBR (*Signal Band Replicator*) permitem que a qualidade desejada seja alcançada com baixas taxas de bits. Além disso, o sistema define os codificadores de voz MPEG-4 CELP e MPEG-4 HVXC para ser utilizados a taxas de 4 Kbits/s ou menos. [2].

O sistema DRM foi projetado com esse objetivo de permitir a que as novas transmissões digitais possam coexistir com as transmissões analógicas atuais, com a definição de parâmetros de funcionamento proporcionem compatibilidade análogo/digital. Desta forma, a mudança da radiodifusão analógica para a digital pode ser feita por etapas ao longo de algum período de tempo, permitindo que as emissoras já existentes possam melhorar progressivamente seu sistema. Ademais, o sistema foi criado para que os transmissores analógicos possam ser modificados para as transmissões digitais e analógicas e, conseqüentemente, reduzir o custo do investimento inicial para uma emissora. [4].

Por outro lado, para os ouvintes, a introdução de serviços DRM30 permite que uma emissora lhes proporcione melhorias significativas na qualidade de áudio e na confiabilidade do serviço. Em consequência, emissoras internacionais de AM poderão proporcionar serviços em ondas médias e curtas comparáveis aos serviços locais de FM.

A fim de avaliar o desempenho do sistema nas faixas de ondas médias e curtas, múltiplos estudos têm sido feitos em alguns países europeus durante os últimos anos [5]. Em Madrid e nas regiões vizinhas da Espanha, foi realizada uma campanha de medições, no ano de 2005, documentada em [6]. Neste estudo, o objetivo fundamental foi a avaliação do funcionamento do DRM30 utilizando a faixa de ondas médias. O estudo foi dividido nos seguintes objetivos operacionais [5]:

- Estudo da qualidade geral de áudio através da área de cobertura de um transmissor DRM operando com uma potência inferior em relação ao transmissor analógico AM que irá ser substituído;
- Estimar os campos mínimos nos diferentes ambientes reais de recepção com base em medições de campo;
- Analisar a influência do ambiente sobre a qualidade da recepção estática;
- Estudar a distribuição da intensidade de campo sobre a área de cobertura, a fim de comparar os valores medidos com os resultados do método de previsão usado atualmente. O método de referência é a recomendação ITU-R P.368-9 [7].

- Estudo de recepção móvel dentro da área de cobertura prevista e identificação de distúrbios críticos.

No estudo apresentado é desenvolvida a comparação entre os valores de campo medido, em ambientes rurais e urbanos, e os valores previstos pela Recomendação ITU-R P.368-9 [7]. Com relação aos resultados, chegou-se a um bom ajuste entre os dados previstos e os valores reais medidos. As previsões apresentaram um erro de previsão menor ou igual a 3dB na metade dos locais, e em geral, para a grande maioria dos locais os erros são menores ou iguais a 9 dB. [9]. Mostrou-se que os valores da condutividade são muito importantes para a uma boa previsão de cobertura.

Com relação à recepção móvel, múltiplas rotas foram medidas ao longo de radiais do transmissor. Na qualidade de áudio, para distâncias de até 35 Km desde o transmissor pode-se observar uma qualidade perfeita em ambientes rurais e suburbanos. Entretanto, na faixa de 35 a 70 Km foram observadas algumas quedas de áudio. [8].

Com base as medições dos campos foram encontrados os valores mínimos da relação sinal a ruído (C/N) para a recepção do sistema DRM30 para serem comparados com os valores mínimos recomendados pela ITU. Os resultados são apresentados em [8].

Na Cidade do México, foram realizadas medições com o propósito de analisar a radiodifusão para cobertura local na faixa de HF [10]. Neste caso o principal mecanismo de propagação é a linha de visada para uma faixa de vários quilômetros desde o transmissor, embora a propagação por ondas de superfície seja também relevante nas imediações do transmissor. Para os diferentes ambientes urbanos estudados, os resultados mostraram pouca variação espacial na intensidade dos campos medidos. Esta baixa variabilidade espacial em ambientes abertos e industriais se deve, principalmente, ao baixo tráfego de veículos e à altura baixa dos edifícios em ambos os tipos de região. No que concerne à distribuição dos campos medidos, ajustam-se bem as distribuições normal e Lognormal [10].

As recomendações ITU-R P.842-5 [11] e P.1148 [12] apresentam resultados e conclusões de estudos de variabilidade espaço-temporal para propagação na faixa de HF. Estes estudos são importantes pois estes efeitos de propagação podem causar degradações dos serviços de áudio analógico. Ambas as recomendações são

baseadas na Recomendação P.1057-4 [13], que descreve várias distribuições de probabilidade relevantes para o modelamento e predição da propagação.

As recomendações que tratam da componente de onda celeste focam as variações de ionização atmosfera devidas, particularmente, à variação da atividade solar. Os efeitos de componentes ionosféricas sobre a variabilidade do sinal de ondas médias nos serviços digitais estão descritos na Recomendação ITU-R P1321 [14]. Nesta mesma recomendação é indicado que a variabilidade da onda de superfície é desprezível.

Nos experimentos realizados em Madrid [8] demonstrou-se que esta última hipótese anterior não é completamente adequada em ambiente de recepção urbano. Por isso, foi preciso realizar uma nova análise da variabilidade temporal do sinal DRM30 em novas medições [15]. Neste trabalho se corrobora que a distribuição lognormal é a que melhor representa a propagação nas zonas rurais e suburbanas. Seu valor médio depende, fundamentalmente, da distância entre o transmissor e o receptor. De outro lado, para ambiente urbano a distribuição de Weibull se adapta melhor a pontos de recepção próximos a locais de alto tráfego de automóveis. Para as outras regiões, a distribuição lognormal representa bem as variações.

Ademais, o comportamento da intensidade de campo elétrico em ambiente urbano, depende muito da densidade e tipo de veículos que atravessam pela rota de medição. Veículos grandes, como os ônibus, podem bloquear o sinal recebido pela antena. Este efeito de atenuação torna-se ainda mais importante considerando que a altura da antena de um receptor móvel típico varia de 1 a 1,5 metros. Em resumo, o estudo mostrou que o valor médio da intensidade de campo recebido é dependente fortemente de fatores ambientais tais como tráfego e a densidade das construções. Esses fatores devem ser considerados no projeto e nas ferramentas do planejamento de rede DRM30 [15].

3 Modelos de Previsão

3.1. Modelos para Perda de Propagação

Com o objetivo de realizar uma comparação entre as intensidades de campo medidas e modelos de previsão, nesta seção serão descritos os modelos existentes e apresentadas as expressões matemáticas para a construção das curvas de intensidade de campo.

3.1.1. Modelo de espaço livre

No caso que a antena transmissora esteja posicionada no espaço livre, e com um ganho G_T em direção à antena receptora, a densidade de potência para uma distância d na direção considerada é : [16]

$$W = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (3.1)$$

A potência disponível na antena receptora é:

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} A \quad (3.2)$$

Onde:

A é a área efetiva da antena:

$$A = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (3.3)$$

P_T é a potência de transmissão

G_R é o ganho da antena receptora

Assim, se obtém a equação de *Friis* [17] ou de espaço livre:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.4)$$

Usando a relação entre a frequência f , o comprimento de onda λ e a velocidade de propagação c , $c = f\lambda$, a equação anterior é expressa:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad (3.5)$$

Para expressar a perda de propagação como uma quantidade positiva, pode-se escrever

$$L_F(dB) = 10 \log_{10}(P_T/P_R) \quad (3.6)$$

$$L_F(dB) = -10 \log_{10} G_T - 10 \log_{10} G_R + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d + k \quad (3.7)$$

Onde

$$k = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{3 \times 10^8} \right) = -147,56 \quad (3.8)$$

Logo, pode-se encontrar uma expressão para a intensidade de campo elétrico em função da distância conhecida desde a antena transmissora, bem como a densidade de potência. Considerando que, a relação entre a intensidade de campo e a densidade de potência é:

$$W = \frac{E^2}{\eta} \quad (3.9)$$

Onde, η é a impedância característica da onda em espaço livre, igual a 120π , a equação (3.1) pode ser escrita:

$$\frac{E^2}{120\pi} = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (3.10)$$

Obtendo-se:

$$E = \frac{\sqrt{30P_T G_T}}{d} \quad (3.11)$$

3.1.2. Recomendação ITU-R P.368

As curvas de intensidade de campo contidas na recomendação ITU-R P.368-9 [18] têm como finalidade evitar cálculos complexos na determinação prática da intensidade do campo. Na recomendação, as curvas são calculadas com o programa de computador GRWAVE fornecido pelo ITU. Neste trabalho são obtidas com Matlab seguindo o mesmo algoritmo do programa indicado. As expressões utilizadas na recomendação são baseadas na solução de Norton [19-20].

A seguir são apresentadas as bases teóricas e matemáticas, assim como a solução para o cálculo da intensidade de campo elétrico segundo a recomendação ITU-P R.368-9 [18].

Onda Terrestre

No canal radio móvel, a onda entre o transmissor e o receptor pode seguir múltiplas trajetórias. Figura 3.1. Considera-se a mais simples, um raio direto, como é expressada no modelo de propagação no espaço livre. E também, a que inclui a reflexão na superfície da terra, conhecida como o modelo de dois raios, onde se tem uma componente transmitida e outra refletida. [21]

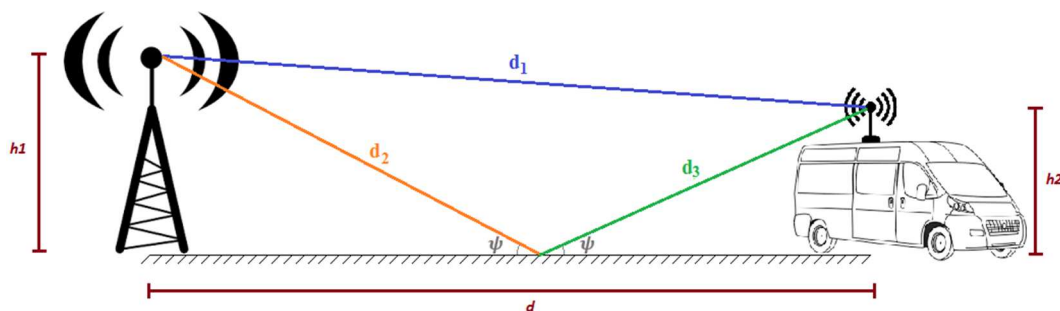


Figura 3.1 Composição de campos que formam as ondas terrestres

Para o caso de uma antena dipolo eletricamente curta e colocada sobre a terra, o módulo da componente vertical do campo elétrico distante é dado por [22]:

$$\frac{E_z}{E_0} = 1 + R_v e^{-j\theta} + (1 - R_v) F e^{-j\theta} \quad (3.12)$$

O fator R_v é o coeficiente de reflexão no solo, dado por:

$$R_v = \frac{(\epsilon_r - jx) \sin(\psi) - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}}{(\epsilon_r - jx) \sin(\psi) + \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}} \quad (3.13)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.14)$$

$$x = 60\sigma\lambda \quad (3.15)$$

Onde, ϵ_r é a constante dielétrica relativa com $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{F}{m}$, σ é a condutividade do solo em S/m e θ é o fator de fase.

$$\theta = \frac{4\pi h_1 h_2}{d} \quad (3.16)$$

Sendo h_1 e h_2 as alturas do transmissor e receptor respetivamente. Os primeiros dois termos na parte direita da equação (3.12) representam a onda espacial, compondo-se da onda direta (E_0) e da onda refletida ($E_0 R_v e^{-j\theta}$), que considera o fator de fase (θ) e o coeficiente de reflexão do solo (R_v). O terceiro termo correspondentemente à onda de superfície. A dificuldade está no cálculo do último termo devido ao fator de atenuação (F).

Para o caso de terra esférica lisa, a função de atenuação da onda de superfície terrestre F é definida por [23]:

$$|F| = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{jx}{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-j \frac{2\pi}{3}\right) \frac{\exp(-jxt) w_1(t)}{w_1'(t) - q w_1(t)} dt \quad (3.17)$$

$$x = \sqrt[3]{\frac{ka}{2} \frac{d}{a}} \quad (3.18)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.19)$$

$$q = -j \left(\sqrt[3]{\frac{ka}{2}} \right) \Delta \quad (3.20)$$

$$\Delta = \left(\sqrt{\frac{j\epsilon_0\omega}{\sigma_s + j\epsilon\omega}} \right) \left(\sqrt{\frac{1 - j\epsilon_0\omega}{\sigma_s + j\epsilon\omega}} \right) \quad (3.21)$$

Na função (3.17) $w_1(t)$ é a função de Airy e $w'_1(t) = \frac{dw_1(t)}{dt}$. A variável a na expressão (3.18) é o raio da terra $a = 6.368 \times 10^3$ m.

A função (3.17) não tem uma expressão analítica. Com o propósito de diminuir a dificuldade dos cálculos e permitir a implementação computacional do modelo emprega-se solução mediante séries de resíduos.

Solução mediante séries de resíduos

Uma solução da equação integral (3.17) consiste em sua decomposição em uma série residual que inclui os pólos do integrando. Assim, (3.17) pode ser expressada da seguinte forma:

$$F = \sqrt{\frac{\pi x}{j}} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\exp(-jxt_s)}{t_s - q^2} \quad (3.22)$$

Onde os pólos em $t = t_s$ são raízes da equação

$$w'_1(t) - qw_1(t) = 0 \quad (3.23)$$

Sendo:

$$w_1(t) = \sqrt{\pi} [B_i(t) - jA_i(t)] \quad (3.24)$$

onde que $B_i(t)$ e $A_i(t)$ são funções de Airy, definidas em [24]. Dados x e q , pode-se calcular a serie residual com a equação (3.22). É preciso, ainda, encontrar as raízes que satisfazem a expressão (3.23). Essas raízes, que são função de q , satisfazem a equação diferencial (3.25)

$$\frac{dt_s}{dq} = \frac{1}{t_s - q^2} \quad (3.25)$$

Para solucionar a expressão (3.25) são utilizadas duas premissas, dependendo do valor absoluto da variável q [23].

- **Premissa 1:** $|q| \leq 1$

Condição inicial:

$$t_s|_{q=0} = t_s(0) = \alpha'_s e^{-j\pi/3} \quad (s = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.26)$$

Onde os α'_s são os zeros de $A'_i(-\alpha)$. Depois, forma-se em um plano complexo q uma sequência de $R+1$ pontos:

$$0 = q_0, q_1, q_2, \dots, q_R = q \quad (3.27)$$

igualmente espaçados em uma linha reta, desde a origem até um valor determinado de q . Começando com a solução conhecida em $q_0 = 0$, $\alpha'_s e^{-j\pi/3}$, as soluções em $q_0, q_1, q_2, \dots, q_R$ são calculadas em sequências usando a equação de Runge-Kutta de quarta ordem [23]:

$$t_s(q_n + 1) = t_s(q_n) + \frac{\Delta q}{6} [p_1 + 2p_2 + 2p_3 + p_4] \quad (3.28)$$

Onde

$$p_1 = f(q_n, t_s(q_n)) \quad (3.29)$$

$$p_2 = f\left(q_n + \frac{1}{2}\Delta q, t_s(q_n) + \frac{1}{2}p_1\right) \quad (3.30)$$

$$p_3 = f\left(q_n + \frac{1}{2}\Delta q, t_s(q_n) + \frac{1}{2}p_2\right) \quad (3.31)$$

$$p_4 = f(q_n + \Delta q, t_s(q_n) + p_3) \quad (3.32)$$

$$\Delta q = q_r - q_{r-1} \quad (3.33)$$

$$f(q, t) = \frac{1}{t - q^2} \quad (3.34)$$

Dessa maneira, com os valores de t_s se calcula a serie residual da expressão (3.28) para encontrar o valor da intensidade de campo.

- **Premissa 2:** $|q| > 1$

Condição inicial:

$$t_s|_{q=0}^{Q=0} = t_s(\infty) = \alpha_s e^{-j\pi/3} \quad (s = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.35)$$

onde α_s são os zeros de $A_i(-\alpha)$ e $Q = q^{-1}$. De maneira análoga que para a premissa 1, forma-se em um plano complexo Q , uma sequência de $R+1$ pontos:

$$0 = Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_R = Q = \frac{1}{q} \quad (3.36)$$

uniformemente espaçados ao longo de uma linha reta, desde a origem até um valor determinado de Q . Em $Q_0 = 0$, a condição inicial é definida por $\alpha_s e^{-j\pi/3}$. As soluções em $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_R$ são calculadas em sequência usando a formula de Runge-Kutta de quarta ordem.

Do mesmo modo que para a equação (3.34) na premissa 1, tem-se a expressão (3.37)

$$f(Q, t) = \frac{1}{1 - Q^2 t} \quad (3.37)$$

Assim, com todos os valores de t_s obtidos, pode-se calcular a serie residual (3.22) e encontrar o valor da intensidade de campo para $|q| > 1$.

Para a predição da intensidade de campo com esta recomendação, além de usar o método anterior, são necessários parâmetros adicionais que serão descritos no Capítulo 5 na seção da comparação entre modelos de predição.

3.1.3. Regulamento da Anatel

Com base na Recomendação ITU-R P.368-9 [18], a Agência Nacional de Telecomunicações – Anatel, aprovou o regulamento técnico para a prestação do serviço de radiodifusão sonora em onda media e onda tropical (2300 KHz-5060 KHz). [25]. O regulamento especifica que para o cálculo da predição da intensidade de campo, além de utilizar a Recomendação da ITU, considera-se o plano regional de distribuição de canais de radiodifusão sonora em onda média ou plano do Rio de Janeiro, RJ81 [26]. Este plano contém uma lista que identifica os canais atribuídos para localidades das administrações da Região 2 que em 1981 firmaram o Acordo Regional de Radiodifusão, fixando frequências, potências e outros dados. [25]

Para o cálculo da intensidade de campo elétrico, mediante a metodologia da Anatel, é preciso considerar o acordo RJ81, onde para a proteção de rádio do segundo canal adjacente diminui-se o resultado da intensidade de campo elétrico (em dB) obtido com a Recomendação ITU-R P.368-9 em 29.5 dB [26].

3.1.4. Condutividade do solo

Quando um condutor é submetido a um campo elétrico os elétrons continuam movendo-se em direções aleatórias mas derivam-se lentamente, com uma velocidade \mathbf{v}_e , na direção negativa do campo aplicado gerando uma corrente de condução no condutor. O campo elétrico aplicado \mathbf{E} e a velocidade de deriva do elétron \mathbf{v}_e estão relacionados por [27]:

$$\mathbf{v}_e = -\mu_e \mathbf{E} \quad (3.38)$$

onde μ_e é a mobilidade do elétron.

Na equação (3.39) J é definida como a densidade de corrente de convenção. A densidade de corrente entre o catodo e o anodo de um tubo de vácuo é uma densidade de corrente de convenção.

$$J = q_v \mathbf{v} \quad (A/m^2) \quad (3.39)$$

Substituindo (3.38) em (3.39), pode-se escrever:

$$J = q_{ve} \mathbf{v}_e = q_{ve} (-\mu_e \mathbf{E}) = -q_{ve} \mu_e \mathbf{E} \quad (3.40)$$

onde q_{ve} é a densidade de carga do elétron. Sabendo que:

$$J = \sigma_s \mathbf{E} \quad (3.41)$$

define-se a condutividade do elétron como:

$$\sigma_s = -q_{ve} \mu_e \quad (S/m) \quad (3.42)$$

A condutividade σ_s de um condutor é um parâmetro que caracteriza as propriedades condutivas de elétrons livres neste condutor. Os materiais que têm o valor da condutividade muito baixo são classificados como dielétricos ou isoladores. A condutividade de um dielétrico ideal é zero.

Para o caso do cálculo da intensidade do campo com a recomendação ITU-P R.368-9, é preciso, considerar a condutividade do solo da região em que se deseja prever. Assim, utiliza-se o atlas mundial da condutividade do solo contido na recomendação ITU-P R.832-2 [28] para a região do Estado de São Paulo. Na Figura 3.2 apresenta-se o mapa de condutividade para São Paulo.

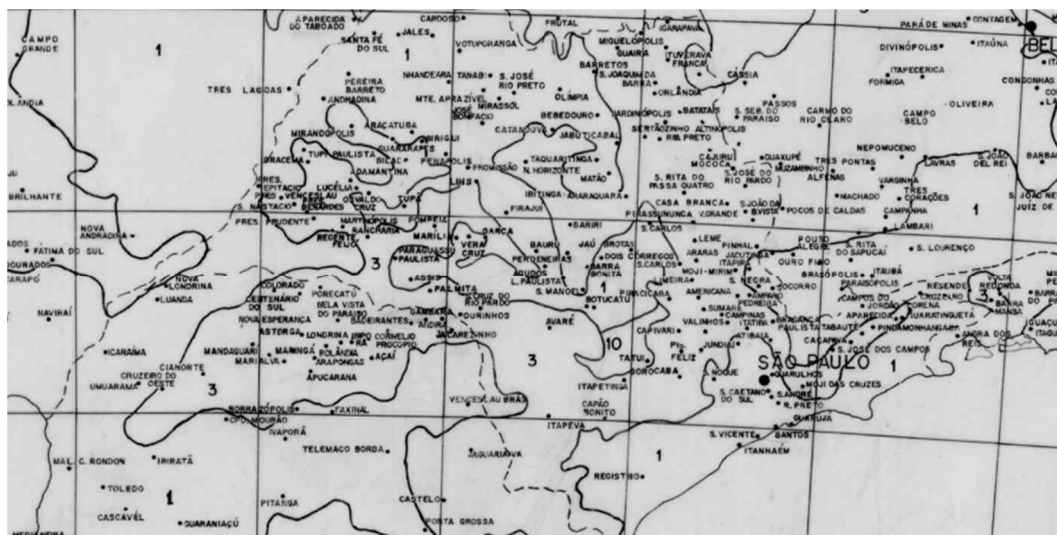


Figura 3.2 Mapa de condutividade para a região do Estado de São Paulo

3.2. Análise Estatística do Sinal

Para a estimativa da variabilidade do sinal num canal de rádio em relação a seu valor mediano a uma determinada distância do transmissor é usada a modelagem estatística baseada em funções de distribuição de probabilidade. A partir de dados experimentais é possível ajustar os parâmetros de cada distribuição de probabilidades ao ambiente onde é propagado o sinal.

As funções de distribuição de probabilidade mais utilizadas para representar o comportamento do sinal no canal radio móvel e que foram neste trabalho para a análise estatística dos dados obtidos nas medidas de campo, são apresentadas e descritas brevemente na Tabela 3.1.

A metodologia utilizada para no modelamento estatístico dos dados medidos em campo é a seguinte:

- i. Primeiro, a partir dos dados medidos é obtido um histograma com intervalos uniformes e disjuntos de mesmo tamanho.
- ii. A partir deste histograma estima-se os parâmetros das distribuições de probabilidade de interesse, usando o estimador de máxima verossimilhança (*MLE*).
- iii. Finalmente, além de traçar as figuras de comparação visual entre os histogramas empíricos com as curvas das funções de distribuição de probabilidade teóricas, realizam-se testes de hipóteses para a avaliar

o ajuste das distribuições. Utiliza-se os testes de Qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov, sendo que o primeiro é usado para comparar funções densidade de probabilidade enquanto o segundo é utilizado para a comparação com distribuições cumulativas.

| Distribuição | Descrição | Função densidade de probabilidade | | Ref. |
|------------------|---|---|--|---------|
| | | Função | Variáveis | |
| Lognormal | A distribuição lognormal é utilizada para descrever a variação de escala do sinal em larga escala, envolvendo grandes distâncias, devido aos múltiplos percursos em ambientes com obstáculos. | $f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$ | μ : Média. σ : Desvio padrão. x : Variável aleatória que representa o valor normalizado da tensão. | [22] |
| Rayleigh | Ajusta-se a ambientes de propagação homogêneos, com elevado número de ondas originadas de multipercursos e sem linha de visada. Aplica-se quando há linha de visada direta ou uma componente que contribui de modo significativo para o sinal recebido. | $f(x \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$ | σ^2 : Potência média no tempo do sinal recebido. x : Variável aleatória que representa o valor normalizado da tensão. | [22] |
| Rice | A distribuição de Rice é usualmente descrita em termos de um parâmetro K que é definido como a relação entre a potência do sinal dominante e a variação do multipercurso. Quando não existe componente dominante, $s \rightarrow 0$, a distribuição de Rice tende a uma distribuição de Rayleigh. | $f(x s, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xs}{\sigma^2}\right)$ $K = \frac{s^2}{2\sigma^2}$ | $I_0(\cdot)$: Função Bessel de primeiro tipo e ordem zero. s : Amplitude de um sinal estacionário, dominante ou direto. σ : Desvio padrão. x : Variável aleatória que representa o valor normalizado da tensão. | [17,22] |
| Nakagami | Baseia-se na distribuição de Rayleigh. Quando $m = 1$ a distribuição de Nakagami tende à distribuição de Rayleigh. | $f(x m, \Omega) = 2 \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \frac{1}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right)$ $m = \frac{\Omega^2}{E[(x^2 - \Omega^2)]}$ | $\Gamma(\cdot)$: Função Gamma. m : Fator de desvanecimento. Ω : Potência média temporal do sinal recebido. x : Variável aleatória que representa o valor normalizado da tensão. | [17] |
| Weibull | Útil na descrição de canais com desvanecimento devido a interferência de sinais gerados por multipercurso. A distribuição de Weibull tende à de Rayleigh quando $b = 2$. | $f(x a, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right); \quad x \geq 0$ | a : Parâmetro de escala. b : Parâmetro de forma, conhecido também como inclinação da distribuição Weibull. x : Variável aleatória que representa o valor normalizado da tensão. | [17] |
| Bimodal | Representa uma função com dobre modo, é uma adição de duas funções unimodais, por exemplo a soma de duas normais resulta em uma normal bimodal ou pode se nomear binormal | $f(x) = p * g_1(x) + (1 - p) * g_2(x)$ | p : Parâmetro de combinação, probabilidade. $g_1(x)$ e $g_2(x)$: funções de densidade a utilizar | [22] |

Tabela 3.1 Principais Distribuições de Probabilidade em Telecomunicações

4

Medições

As campanhas de medições em mobilidade na faixa de ondas medias a analisar, foram realizadas pelo CETUC, em parceria com o Ministério das comunicações, a Anatel e o Inmetro nos anos 2012 a 2014.

4.1.

Setup de Medidas

Nesta seção apresenta-se a composição dos sistemas de transmissão e recepção para as duas campanhas de medições feitas a partir da transmissão de duas estações, a Rádio Excelsior Ltda (denominada CBN AM) e a estação Fundação Padre Anchieta (denominada Cultura AM). Compõem esta seção, a representação da estrutura do sistema de transmissão; e para o sistema de recepção, a apresentação da unidade móvel e os equipamentos envolvidos na captação do sinal DRM30 e no processamento dos dados.

4.1.1.

Características do Transmissor

Os dados da estação e do excitador DRM30 que foi instalado tanto na estação da Rádio CBN e na estação da Rádio Cultura AM, para geração do sinal híbrido são apresentados na Tabela 4.1. A Figura 4.1 até a Figura 4.4 apresentam detalhes das estações de transmissão.

| Item | Descrição | |
|--------------------------------------|--|---|
| | CBN AM | Cultura AM |
| Especificações técnicas operacionais | Frequência : 780 kHz Classe: B Campo Característico: E = 321 mV/m Potência Diurna: 50 kW Potência Noturna: 10 kW | Frequência : 1200 kHz Classe: B Campo Característico: E = 315 mV/m Potência Diurna: 50 kW Potência Noturna: 20 kW |
| Transmissor | Fabricante: Harris Corporation Modelo: 3DX-50 Potência Nominal: 100 KW | Fabricante: Harris Corporation Modelo: 3DX-50 Potência Nominal: 100 KW |

| | | |
|---|--|---|
| | Potência Utilizada Durante os Testes (diurna / noturna): 43/10 KW | Potência Utilizada Durante os Testes (diurna / noturna): 50/20 KW |
| Localização estação transmissora | Endereço: Rua Hiléia Amazônica, 13, Jardim Panorama, São Paulo, SP Coordenadas Geográficas: 23°36'20.85"S / 46°32'20.20"W Datum: WGS 84 | Endereço: Avenida Robert Kennedy s/nº, Barrio Nova Guarapiranga, São Paulo, SP Coordenadas Geográficas: 23°40'37.16"S / 46°42'53.84"W Datum: WGS 84 |
| Excitador DRM | Servidor De Conteúdo: Fabricante: DRM Thomson Modulador: Fabricante: Digidia / Modelo: Soprano DRM | Servidor De Conteúdo: Fabricante: Digidia / Modelo: Alto Modulador: Fabricante: Digidia / Modelo: Soprano DRM |
| Processador de áudio analógico | Fabricante: ORBAN / Modelo: 9200 | Fabricante: ORBAN / Modelo: 9100 B |
| Sistema radiante | Diagrama De Radiação: Omnidirecional Tipo: Antena monopolo vertical Altura: 122 metros | Diagrama De Radiação: Omnidirecional Tipo: Antena monopolo vertical Altura: 70 metros |
| Linha de transmissão | Fabricante: Andrew Modelo: HJ11-50 Diâmetro: 4" Comprimento: 130 m Impedância Característica: 50 Ohm Atenuação: 0,03 dB/100 m | Fabricante: RF Systems Radio Frequency Modelo: HCA 4 1/8" Diâmetro: 4 1/8" Comprimento: 235 m Impedância Característica: 50 Ohm Atenuação: 0,03 dB/100 m |
| Sistema digital DRM30 | Frequência: 790 KHz Relação De Potência AM/DRM30: 12 dB Uso de técnica "Spectral Shaping" Bit-Rate: 14.5 kbps - 25.6 kbps | Frequência: 1210 KHz Relação De Potência AM/DRM30: 12 dB Uso de técnica "Spectral Shaping" Bit-Rate: 14.5 kbps - 25.6 kbps, |

Tabela 4.1 Características das estações transmissoras de rádio



Figura 4.1 Estação transmissora (esq); torre da Rádio CBN AM (dir)



Figura 4.2 Estação transmissora (esq); torres da Rádio Cultura AM (dir)



Figura 4.3 Transmissor e processador áudio analógico Orban (esq); transmissor Harris (dir), utilizados na estação Rádio CBN AM



Figura 4.4 Processador de áudio analógico Orban (esq); Transmissor Harris 3DX-50 (dir); utilizados na estação Rádio Cultura AM

O tipo de modulação utilizada na transmissão do sinal digital foi 16 QAM. A modalidade de transmissão utilizada é denominada *simulcast*, na qual é transmitido um sinal híbrido que contém um sinal analógico AM e um sinal digital DRM30, ambos portando a mesma programação sonora. A transmissão *simulcast* é obtida com a instalação de excitador DRM30 junto ao transmissor da estação sob teste.

4.1.2. Sistema de recepção

As medições do sistema DRM30, para os dois sistemas testados, foram realizadas com o laboratório móvel de telecomunicações do Inmetro, um veículo totalmente preparado e configurado para execução de trabalhos em campo, mostrado na Figura 4.5. A estrutura disponível para o laboratório móvel contou com o compartilhamento dos equipamentos e recursos do laboratório de comunicações sem fio do Inmetro, ampliando as possibilidades de configurações de medição do veículo. Este laboratório possui facilidades para a adaptação de novos equipamentos e conjuntos de antenas para realizar experimentos em diferentes sistemas de comunicações e frequências.



Figura 4.5 Laboratório móvel de telecomunicações de Inmetro

Neste experimento os dois equipamentos principais de medição são o receptor profissional DRM30 e o analisador de espectro. O receptor DRM30 é constituído pelo receptor de áudio digital AOR7030 e o software *Fraunhofer* instalado num laptop. Os demais equipamentos utilizados no *setup* de medição são antena loop de recepção omnidirecional, laptop com *softwares* de captura e processamento de dados, um receptor GPS e três rádios analógicos. Os dados do analisador de espectro foram gravados por um software dedicado, juntamente com informação de localização e tempo fornecidos pelo GPS. A Tabela 4.2 apresenta a descrição dos equipamentos e a Figura 4.6 apresenta o diagrama esquemático da recepção.

| Item | Descrição |
|------------------------|---|
| Antena de recepção | Fabricante: CIAOradio |
| | Modelo: L101 |
| | Tipo: Antena loop ativa |
| Receptor DRM30 | Fabricante: Fraunhofer Institut Integrierte Schaltungen (IIS) |
| | Modelo: AOR7030 |
| Analisador de espectro | Fabricante: ANRITSU |
| | Modelo: MS2724B (9 kHz – 20 GHz) |
| GPS | Modelo: Garmin 60 CSX |
| Computadores | Laptop com Matlab para controlador do analisador Laptop Thomson para demodulador Laptop Linux para controlador sistema recepção |
| Acessórios | Cabos, fonte de alimentação, cabos UTP, cabo serial |

Tabela 4.2 Características do setup de medições

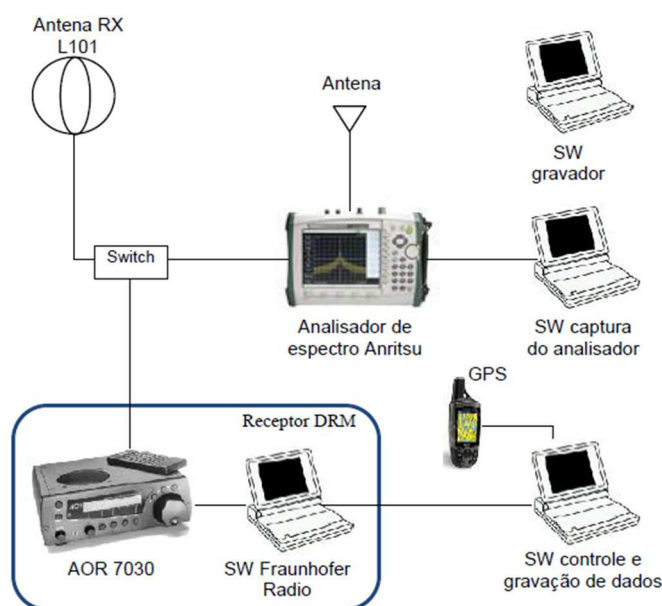


Figura 4.6 Diagrama esquemático do setup de recepção

4.1.3. Parâmetros de medição

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros de medição registrados durante os testes com mobilidade. Os três parâmetros mais importantes são a intensidade de campo elétrico, a relação sinal-ruído (SNR, a MER do sinal DRM30) e o número de quadros de áudio recebidos corretamente.

As amostras IQ e dados RSCI são especialmente importantes porque permitem reproduzir o sinal recebido no laboratório. O GPS fornece a localização e horário das medições, permitindo a apresentação de mapas para avaliação dos ambientes de recepção em função da distância ao transmissor.

| Parâmetro | Equipamento | Intervalo de medição |
|--------------------------------|----------------|----------------------|
| Intensidade de campo elétrico | Receptor DRM30 | 400 ms |
| SNR (MER) | | 400 ms |
| Quadros de áudio corretos (AQ) | | 400 ms |
| Delay spread | | 400 ms |
| Espalhamento em frequência | | 400 ms |
| Amostras IQ | | 1/12000 s |
| Dados RSCI | | 400 ms |
| Localização | GPS | 1 s |
| Hora | | 1 s |
| Velocidade | | 1 s |

Tabela 4.3 Parâmetros de medição dos testes em mobilidade DRM30

4.2. Rotas de medição

As emissoras têm a situação aprovada no Plano Básico de Distribuição de Canais de Radiodifusão Sonora em Onda Média (OM) – PBOM: frequência de 780 KHz, potência diurna de 50 KW, noturna de 10KW e sistema irradiante omnidirecional, para o caso da Rádio CBN AM.

Similarmente, para Rádio Cultura AM, PBOM: frequência de 1210 KHz, potência diurna de 100 KW e noturna de 20 KW e sistema irradiante diretivo, com 2 torres. Contudo, devido a problemas no seu sistema irradiante na ocasião dos testes, a estação estava operando com a potência diurna reduzida para 50 KW e diagrama omnidirecional.

As Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram mapas com a localização da estação transmissora e o contorno protegido diurno (2 mV/m, localizado entre 45 e 62 km da estação transmissora) para o caso de Rádio CBN AM, e, para Rádio Cultura AM, contornos protegidos diurno (2 mV/m, localizado entre 31.70 Km da estação transmissora) e noturno (2.5 mV/m localizado a 22.3 Km da estação transmissora), em ambos os casos segundo o modelo de predição Anatel. [29].

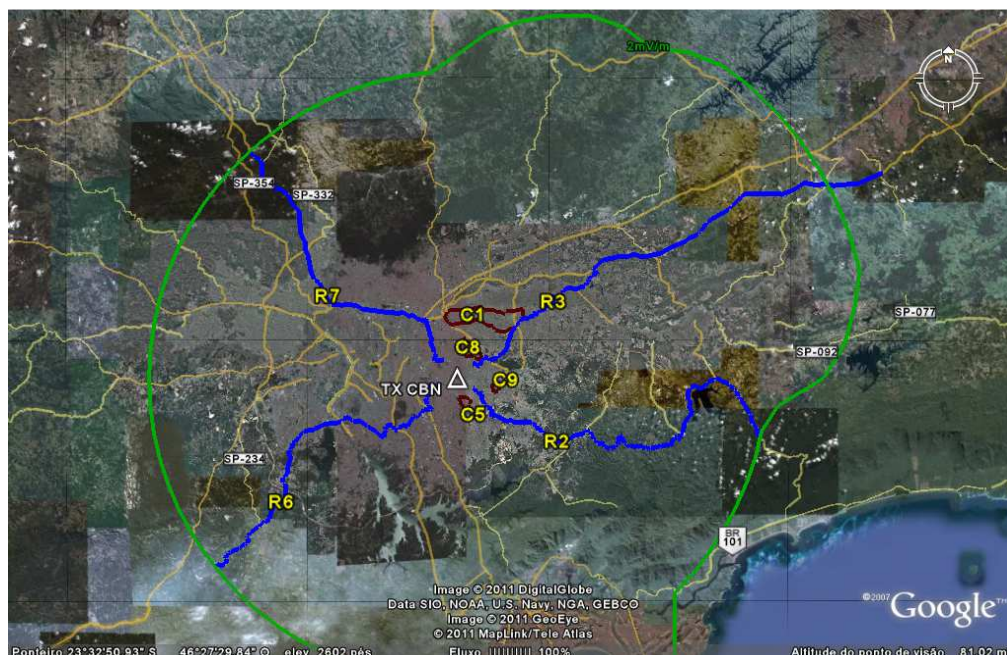


Figura 4.7 Localização da antena transmissora e contorno protegido diurno da Rádio CBN AM

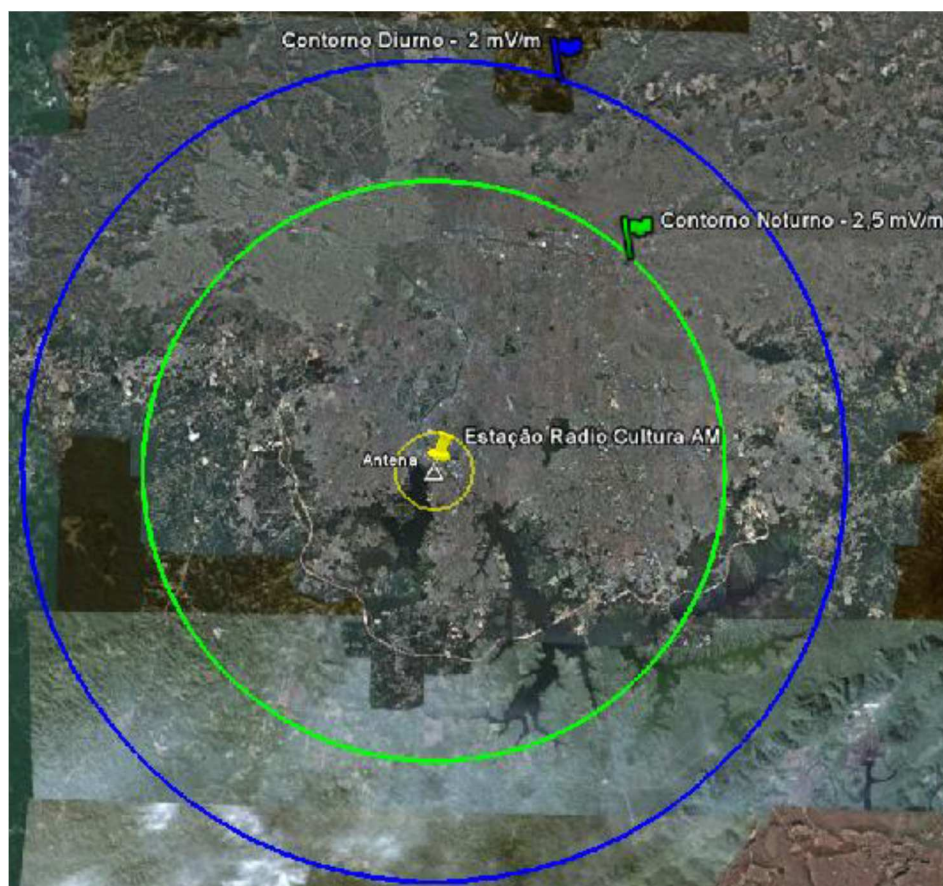


Figura 4.8 Localização da antena transmissora da Rádio Cultura AM

As medições foram realizadas ao longo de rotas radiais e de rotas locais fechadas, tendo sido registrados dados em situação de movimento e em pontos fixos. Neste trabalho é apresentada a análise para as medições em movimento nas rotas radiais. A determinação destas rotas procurou caracterizar diversos ambientes de propagação.

As rotas utilizadas nos testes da transmissão DRM30 a partir das estações da Rádio CBN e Cultura AM são apresentadas na Tabela 4.4. A Figura 4.7 e a Figura 4.9 ilustram a disposição geográfica das rotas para cada uma das estações, respectivamente, onde em azul estão traçadas as rotas radiais utilizadas neste trabalho.

| Teste | Rota | Descrição | Período |
|-------------------------|------|--|----------------|
| Rádio CBN AM | R2 | Radial Sudeste Mogi das Cruzes | Diurno/Noturno |
| | R3 | Radial Nordeste Taubaté | Diurno/Noturno |
| | R6 | Radial Sudoeste Rodovia Regis Bittencourt | Diurno |
| | R7 | Radial Noroeste Limeira | Noturno |

| | | | |
|-----------------------------|----|--------------------|---------|
| Rádio Cultura AM | R2 | Rota Leste | Diurno |
| | R3 | Rota Norte | Diurno |
| | R4 | Rota Noroeste | Diurno |
| | R5 | Rota Oeste | Diurno |
| | R6 | Rota Sudoeste | Diurno |
| | R7 | Rota Leste Noturna | Noturno |
| | R8 | Rota Oeste Noturna | Noturno |
| | R9 | Rota Sul Noturna | Noturno |

Tabela 4.4 Descrição das rotas de teste, nas medições em mobilidade

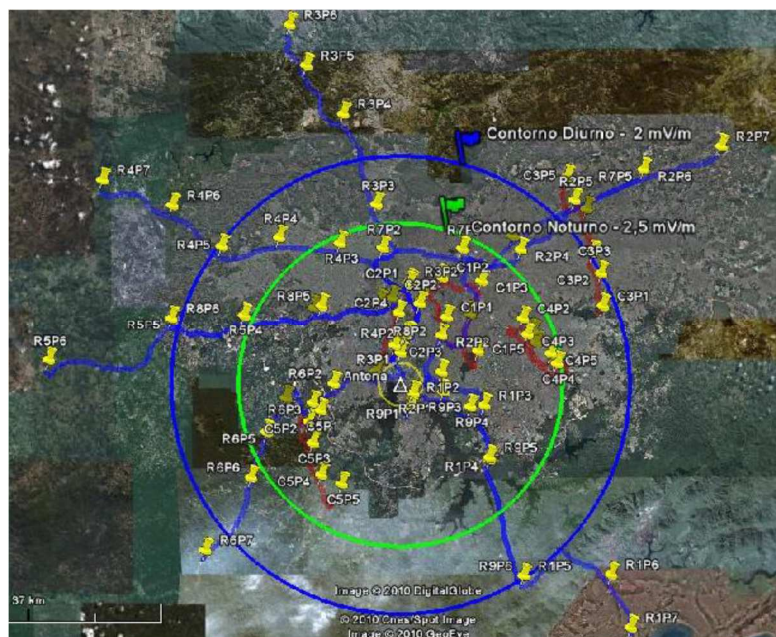


Figura 4.9 Mapa das rotas de medição da Rádio Cultura AM

Na Rádio CBN AM, o período de medições foi iniciado em 15 de março de 2010 e terminou em 29 de março de 2010. Para a estação Rádio Cultura AM, as medições começaram em 12 de janeiro de 2010 e com termino em 28 de fevereiro de 2010. [30]

5

Obtenção e análise dos resultados

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada no processamento das medidas feitas em mobilidade na Rádio CBN AM e na Rádio Cultura AM, assim como a análise dos resultados.

Para as medidas da intensidade de campo elétrico de cada uma das rotas foi obtida a relação da perda com a distância e realizada a comparação com os modelos teóricos apresentados no Capítulo 3.

Foram realizadas ainda a análise estatística dos desvanecimentos de larga e pequena escala e a análise da qualidade de recepção e cobertura.

Para algumas das rotas em que ocorreram medições tanto no período diurno como no noturno foram realizadas análises em separado e os resultados comparados.

Para o processamento dos dados medidos e a posterior análise foram desenvolvidas e utilizadas rotinas no *software* Matlab, por sua grande facilidade na manipulação de matrizes e tabelas, assim como nos cálculos estatísticos.

5.1.

Comparação com os modelos de predição

Para caracterizar o canal de propagação móvel é importante comparar os resultados das medições com os modelos teóricos existentes, apresentados no Capítulo 3.

5.1.1.

Metodologia

Partindo dos dados das medições de uma rota específica, e a partir das coordenadas de latitude e longitude do GPS no receptor e das coordenadas fixas do transmissor, é possível calcular as distâncias entre eles em cada medição feita. Como é descrito na Tabela 4.3, cada medida da intensidade de campo foi tomada com um intervalo de 400 ms.

Pela morfologia das rotas, que não são em linha totalmente reta, e dada a alta resolução temporal das medições (uma amostra a cada 400 ms), pode-se ter múltiplas medições da intensidade para distancias iguais. Por este motivo, calcula-se o valor mediano das medidas da intensidade tomadas em distâncias iguais, obtendo-se assim, para cada distância, um valor único da intensidade de campo.

Como as distâncias não são equidistantes entre si, foi feita uma interpolação entre os dados, para obter medidas da intensidade de campo elétrico para cada 10 metros de distância entre o transmissor e o receptor.

Para o cálculo da intensidade e posterior comparação com modelos propostos, utilizam-se os modelos de predição tratados no Capítulo 3, seção 3.1. A próxima seção apresenta a verificação dos modelos descritos com os resultados obtidos das medições.

5.1.2. Comparação com os modelos de propagação

Nesta seção é feita a comparação dos valores medidos com os valores calculados pelos modelos obtendo-se, a partir do cálculo do erro RMS, qual o modelo que apresenta o melhor ajuste.

Para a predição da intensidade de campo elétrico, com o modelo da ITU-R P.368-9, apresentado na seção 3.1.2, é preciso considerar alguns parâmetros que, para cada um dos casos Rádio CBN AM e Rádio Cultura AM, estão descritos na Tabela 5.1, onde o parâmetro campo característico é a intensidade de campo elétrico medido numa distância de 1 Km do transmissor.

| Parâmetro | Rádio CBN AM | Rádio Cultura AM |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Permissividade relativa do solo | 15 | 15 |
| Condutividade do solo | 0.01-1 mS/m | 0.01-1 mS/m |
| Potência de transmissão (Dia/Noite) | 43/10 KW | 50/20 kW |
| Campo característico | 321 mV/m (110.1 dB μ V/m) | 315 mV/m (110 dB μ V/m) |

Tabela 5.1 Parâmetros usados para o cálculo da intensidade de campo elétrico com a recomendação ITU-P R.368-9, para os casos da Rádio CBN AM e Rádio Cultura AM

Na Figura 5.1 são apresentadas as medições da intensidade de campo feitas na rota 2 em período diurno da Rádio CBN AM, assim como sua curva de ajuste; além disso, são apresentadas as predições com os modelos de espaço livre, Anatel e ITU-R P.368-9.

Para o modelo ITU-R P.368-9, considera-se dois valores da condutividade do solo, o primeiro deles tomado do mapa de condutividade de São Paulo contido na recomendação ITU-P R.832-2 [31] e o segundo, escolhendo um valor que se ajusta melhor às medições feitas, que no caso é $\sigma_s = 0.01 \text{ mS/m}$.

Igualmente, para a rota 3, no período diurno de transmissão da Rádio CBN AM, um gráfico com as predições é apresentado na Figura 5.2. Neste caso o melhor ajuste foi obtido com a predição que considera o valor da condutividade de $\sigma_s = 1 \text{ mS/m}$.

No caso da Rádio Cultura AM, apresentam-se figuras para duas de suas rotas. Na primeira delas, a Figura 5.3, referente à rota 2 do período diurno, a predição da Anatel é a que melhor se ajusta às medições. Na segunda, a Figura 5.4, correspondente ao período noturno na rota 9, a predição mais acertada foi a dada pelo modelo da ITU, considerando a condutividade de $\sigma_s = 0.01 \text{ mS/m}$.

Para uma análise quantitativa da aderência dos modelos aos dados medidos, utilizou-se cálculos do Erro médio (δ), Desvio Padrão do Erro (σ) e o Erro RMS (E_{RMS}), entre os resultados medidos e os fornecidos por cada modelo de propagação. Nas tabelas em seguida a cada figura comparativa são apresentados esses resultados para facilitar a análise, comprovando a análise qualitativa.

O valor do erro médio foi calculado utilizando a equação (5.1):

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n y(i) - x(i)}{n} \quad (5.1)$$

onde $x(i)$ representa o valor medido na posição i , $y(i)$ representa o valor do modelo na posição i e n representa o número de medições de cada rota.

O desvio padrão do erro foi determinado pela equação (5.2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y(i) - x(i) - \delta]^2}{n - 1}} \quad (5.2)$$

O erro RMS, que representa conjuntamente o erro médio e o desvio padrão do erro, foi determinado por:

$$E_{RMS} = \sqrt{\delta^2 + \sigma^2} \quad (5.3)$$

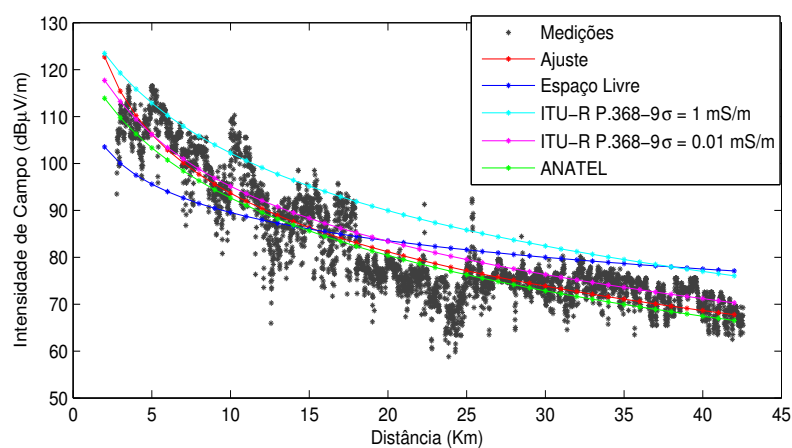


Figura 5.1 Intensidade de campo medida, curva de ajuste e predições: Rota 2-Diurno, Rádio CBN AM

| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|--------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 8.1121 | 1.7305 | 1.4304 | 1.2108 |
| Desvio Padrão | 1.5010 | 1.4658 | 3.2621 | 7.1704 |
| Erro RMS | 8.2498 | 2.2678 | 3.5619 | 7.2719 |

Tabela 5.2 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para a Rota 2-Diurno, Rádio CBN AM

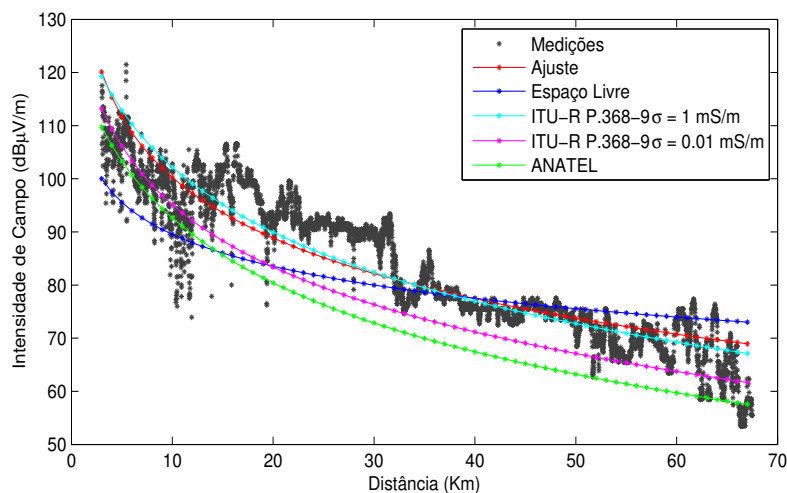


Figura 5.2 Intensidade de campo medida, curva de ajuste e previsões: Rota 3-Diurno, Rádio CBN AM

| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 0.0483 | 6.1292 | 9.5907 | 2.6606 |
| Desvio Padrão | 1.1943 | 12.3721 | 19.3673 | 7.9695 |
| Erro RMS | 1.1953 | 13.8071 | 21.6119 | 8.4018 |

Tabela 5.3 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para a Rota 3-Diurno, Rádio CBN AM

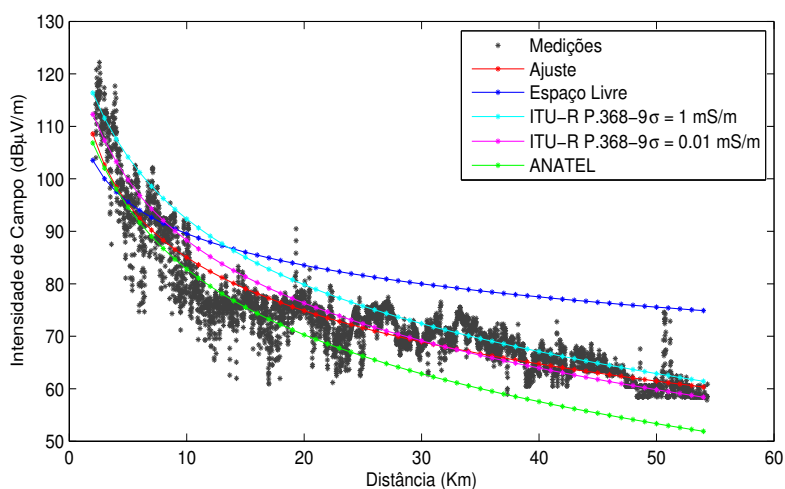


Figura 5.3 Intensidade de campo medida, curva de ajuste e previsões: Rota 2-Diurno, Rádio Cultura AM

| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 8.2598 | 4.7890 | 1.2826 | 9.2749 |
| Desvio Padrão | 2.4153 | 2.0008 | 3.5413 | 4.7347 |
| Erro RMS | 8.6057 | 5.1901 | 3.7664 | 10.4135 |

Tabela 5.4 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para a Rota 2-Diurno, Rádio Cultura AM

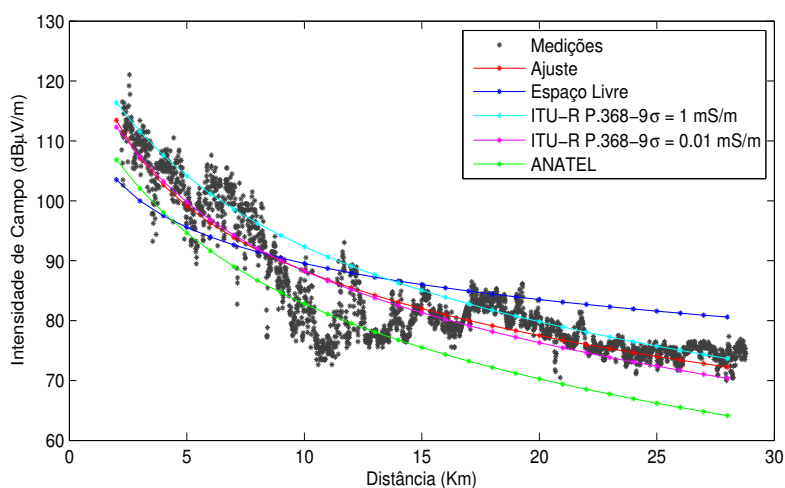


Figura 5.4 Intensidade de campo medida, curva de ajuste e predições: Rota 9-Noturno, Rádio Cultura AM

| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 3.1226 | 0.6670 | 6.4198 | 2.6881 |
| Desvio Padrão | 1.1633 | 1.5802 | 13.1359 | 4.9223 |
| Erro RMS | 3.3322 | 1.7152 | 14.6207 | 5.6084 |

Tabela 5.5 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para a Rota 9-Noturno, Rádio Cultura AM

No Anexo 1 encontram-se todas as figuras e tabelas para as rotas de medição, tanto da Rádio CBN AM como da Rádio Cultura AM.

Na Tabela 5.6 são apresentados os erros calculados para todas as rotas de medições. A partir do erro RMS, identifica-se qual dos modelos teóricos se ajusta melhor aos dados medidos, indicados na última linha da Tabela 5.6. A Tabela 5.7 mostra a convenção utilizada na tabela anterior.

Assim, para algumas das rotas que se dispõe das medições nos períodos diurno e noturno, corrobora-se que um mesmo modelo de predição se ajusta a ambas medições, como para as rotas 2, 3 e 7 da Rádio CBN AM. Apenas duas das medições foram ajustadas pela recomendação ITU-R 368-9 com o valor da condutividade recomendado.

Em geral, a proposta da Anatel e o modelo da recomendação ITU-R 368-9 com o valor menor da condutividade são os que melhor representam o desempenho das rotas de medições. E como é esperado, nenhum dos modelos segue o modelo de espaço livre.

| Erro | Modelo | CBN AM | | | | | | | Cultura AM | | | | | | | | |
|--|--------------|-----------------|------|-------|-------|---------|------|-------|------------|-------|-------|-------|------|---------|-------|-------|-------|
| | | Diurno | | | | Noturno | | | Diurno | | | | | Noturno | | | |
| | | R2 | R3 | R6 | R7 | R2 | R3 | R7 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | |
| Erro Médio | ITU | $\sigma = 1$ | 8.11 | 0.05 | 10.40 | 11.32 | 7.26 | 1.43 | 11.80 | 8.26 | 7.76 | 4.83 | 6.84 | 10.18 | 4.68 | 3.66 | 3.12 |
| | | $\sigma = 0.01$ | 1.73 | 6.13 | 4.02 | 4.97 | 0.51 | 5.38 | 5.03 | 4.79 | 4.26 | 1.31 | 3.32 | 6.53 | 0.81 | 0.01 | 0.67 |
| | Anatel | | 1.43 | 9.59 | 0.87 | 1.78 | 2.29 | 8.11 | 2.25 | 1.28 | 1.78 | 4.71 | 2.71 | 0.63 | 4.87 | 5.88 | 6.42 |
| | Espaço Livre | | 1.21 | 2.66 | 4.34 | 3.50 | 1.14 | 4.60 | 6.72 | 9.27 | 8.28 | 4.65 | 7.01 | 8.19 | 3.06 | 5.40 | 2.69 |
| Desvio Padrão | ITU | $\sigma = 1$ | 1.50 | 1.19 | 1.85 | 0.72 | 1.55 | 4.34 | 1.19 | 2.41 | 1.49 | 1.73 | 3.82 | 3.38 | 2.36 | 3.72 | 1.16 |
| | | $\sigma = 0.01$ | 1.47 | 12.37 | 2.18 | 0.45 | 1.24 | 11.95 | 1.12 | 2.00 | 1.82 | 1.36 | 3.41 | 3.76 | 2.03 | 3.33 | 1.58 |
| | Anatel | | 3.26 | 19.37 | 1.85 | 0.72 | 4.95 | 17.28 | 1.19 | 3.54 | 3.90 | 9.68 | 6.68 | 3.38 | 10.23 | 12.53 | 13.13 |
| | Espaço Livre | | 7.17 | 7.70 | 7.41 | 5.86 | 5.51 | 4.50 | 3.24 | 4.73 | 8.30 | 6.03 | 3.12 | 9.30 | 3.28 | 1.63 | 4.92 |
| Erro RMS | ITU | $\sigma = 1$ | 8.25 | 1.19 | 10.57 | 11.34 | 7.42 | 4.57 | 11.86 | 8.60 | 7.90 | 5.13 | 7.83 | 10.72 | 5.24 | 5.22 | 3.33 |
| | | $\sigma = 0.01$ | 2.26 | 13.80 | 4.57 | 4.99 | 1.34 | 13.11 | 5.15 | 5.19 | 4.64 | 1.90 | 4.76 | 7.53 | 2.18 | 3.33 | 1.71 |
| | Anatel | | 3.56 | 21.61 | 2.05 | 1.92 | 5.45 | 19.08 | 2.55 | 3.77 | 4.29 | 10.76 | 7.20 | 3.44 | 11.33 | 13.84 | 14.62 |
| | Espaço Livre | | 7.27 | 8.40 | 8.59 | 7.91 | 5.63 | 10.56 | 7.46 | 10.41 | 11.72 | 7.62 | 7.67 | 12.39 | 4.48 | 5.64 | 5.61 |
| Modelo que melhor se ajusta de acordo com o Erro RMS | | | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |

Tabela 5.6 Erros comparativos entre as medidas e cada modelo teórico, para todas as rotas de medições.

| Convenção | Modelo |
|-----------|--|
| 1 | ITU-R 368-9 $\sigma_s = 1 \text{ mS/m}$ |
| 2 | ITU-R 368-9 $\sigma_s = 0.01 \text{ mS/m}$ |
| 3 | Anatel |
| 4 | Espaço Livre |

Tabela 5.7 Convenção para os modelos que melhor se ajustam na Tabela 5.6

5.1.3.

Perda média de percurso em função da distância

A partir dos dados das medições é possível observar três tipos de efeitos de canal banda estreita: o incremento da perda com a distância e os desvanecimentos,

de larga e pequena escala. Estes últimos serão estudados mais adiante na seção da análise estatística dos desvanecimentos.

Como mostrado na figura abaixo o modelo da recomendação ITU-R 368-9 apresenta um comportamento aproximadamente linear com a distância em escala logarítmica.

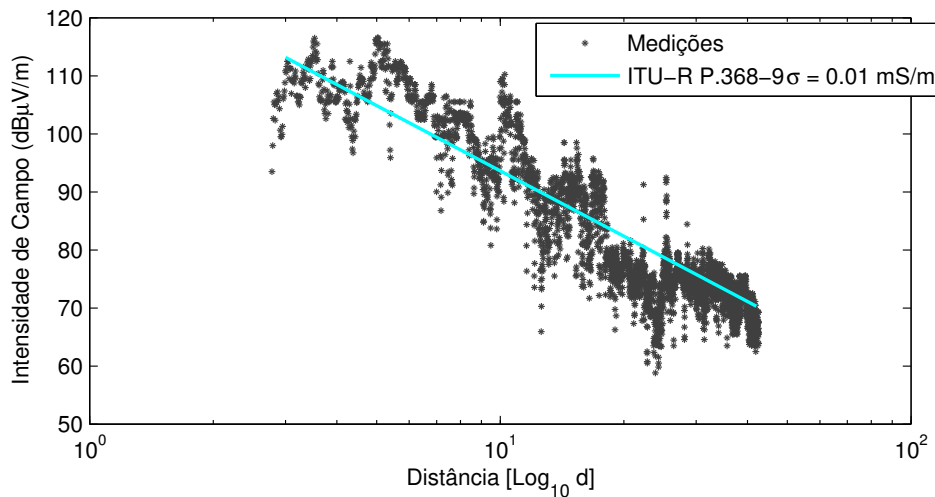


Figura 5.5 Intensidade de campo elétrico medida e modelo da Recomendação ITU-R 368-9 com a distância em escala logarítmica. Rota 2, período diurno. Rádio CBN AM

Assim, nesta seção considera-se que o decaimento da potência recebida com a distância entre o transmissor e o móvel, que pode ser modelado por [32]:

$$P[dBm] = a - 10 * n * \text{Log}(d) \quad (5.4)$$

A constante a , representa a perda de percurso numa distância de referência d_0 próxima do transmissor (geralmente 100 metros); o fator $10n$ é a inclinação da reta, sendo n o expoente de perda de percurso do sinal, que pode ser utilizado para classificar o tipo de ambiente, conforme mostrado na Tabela 5.8 [33].

| Ambiente | Expoente de perdas, n |
|------------------------------|-------------------------|
| Espaço Livre | 2 |
| Área urbana | 2.7 – 3.5 |
| Área urbana com sombreamento | 3 - 5 |

| | |
|---|-----------|
| Dentro de construções com linha de visada | 1.6 – 1.8 |
| Dentro de construções com obstruções | 4 – 6 |
| Setor industrial com obstruções | 2 - 3 |

Tabela 5.8 Expoente de perdas de percurso para diferentes ambientes [27].

Com base nos valores da distância e da potência conhecidos de cada ponto das medições realizadas nas rotas não haverá um único valor de a e de $10n$ que satisfaça (5.4). O procedimento descrito por [32] permite a obtenção dos valores de a e de n que fornecem a equação da reta de perda de potência com a distância que melhor se ajusta aos dados medidos.

Na Figura 5.6, apresenta-se a perda de potência com a distância e a reta de ajuste (linha vermelha), calculada de acordo com [32], para o caso da medição da Rádio CBN AM na Rota 2 em período diurno.

Da mesma maneira, na Figura 5.7, tem-se a reta da perda de percurso das medições feitas na Rádio Cultura AM, na Rota 2 em período diurno. Depois, encontra-se a reta de ajuste e o expoente de perdas de percurso para todas as rotas analisadas; A Tabela 5.9 apresenta os resultados dos ajustes para todas as rotas e ambas as Rádios CBN AM e Rádio Cultura AM.

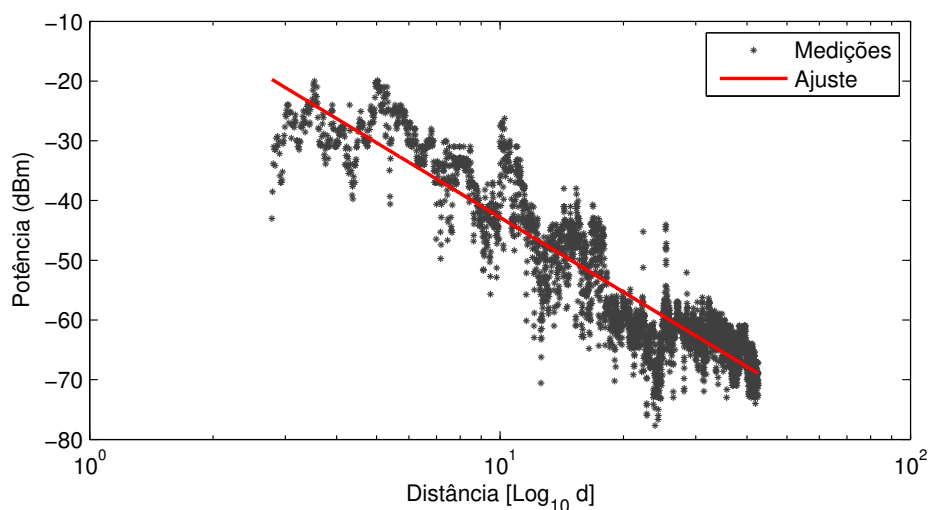


Figura 5.6 Potência medida e reta da perda com relação à distância. Rota 2, período diurno. Rádio CBN AM

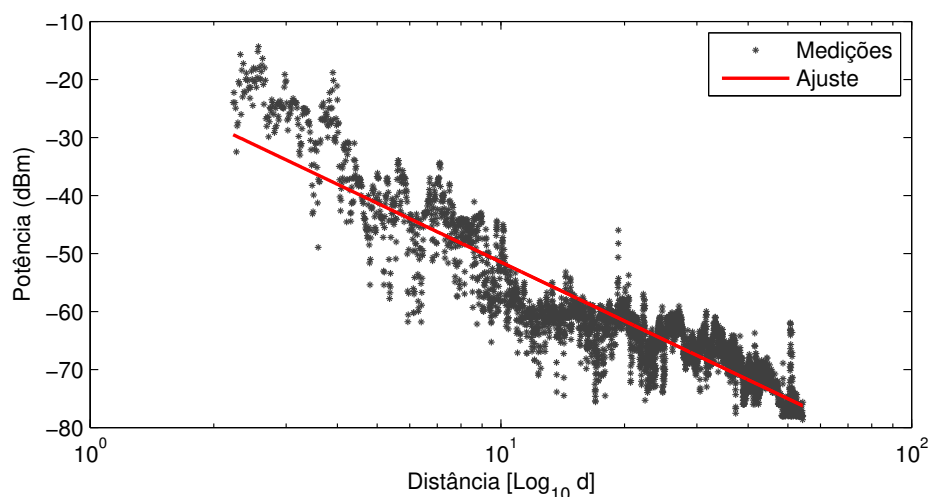


Figura 5.7 Potência elétrica medida e reta da perda com relação à distância. Rota 2, período diurno. Rádio Cultura AM

| Rádio | Rota | Equação de ajuste $a - 10 * n * \log(d)$ | | Expoente de Perdas |
|------------|----------------|---|--------|--------------------------|
| | | $10n$ | a | |
| CBN AM | Rota 2 Diurno | 41.55 | -1.27 | 4.1 |
| | Rota 3 Diurno | 37.92 | 1.70 | 3.7 |
| | Rota 6 Diurno | 46.81 | 3.57 | 4.7 |
| | Rota 7 Diurno | 39.24 | -7.29 | 3.9 |
| | Rota 2 Noturno | 39.23 | -9.47 | 3.9 |
| | Rota 3 Noturno | 18.26 | -24.06 | 1.8 |
| | Rota 7 Noturno | 32.87 | -20.32 | 3.2 |
| Cultura AM | Rota 2 Diurno | 33.70 | -17.78 | 3.3 |
| | Rota 3 Diurno | 44.21 | 3.17 | 4.4 |
| | Rota 4 Diurno | 35.64 | -11.55 | 3.5 |
| | Rota 5 Diurno | 29.17 | -21.96 | 2.9 |
| | Rota 6 Diurno | 52.14 | 3.87 | 5.2 |
| | Rota 7 Noturno | 30.97 | -18.65 | 3.1 |
| | Rota 8 Noturno | 26.40 | -24.63 | 2.6 |
| | Rota 9 Noturno | 35.93 | -12.24 | 3.6 |

Tabela 5.9 Coeficientes da equação de ajuste (5.4) e expoentes da perda de percurso da Potência com a Distância para todas as rotas analisadas

Considerando os expoentes de perdas registrados na última coluna da Tabela 5.9 e apoiado nos dados da Tabela 5.8, a região das medições fornece expoentes de

perda correspondentes a áreas urbanas sem e com sombreamento, que são os valores desejados, já que como foi descrito no Capítulo 4, as campanhas de medições foram feitas em ambientes urbanos. Os valores dos expoentes obtidos variam dependendo da rota, assumindo valores entre 2,9 e 5,2 nos períodos diurnos e entre 1,8 e 3,9 nos períodos noturnos. Estas variações podem ser justificadas devido à presença das componentes de onda de superfície e, possivelmente, onda celeste, além da onda espacial.

5.2.

Análise Estatística dos Desvanecimentos

Como foi descrito na seção anterior, nas medições obtidas se podem observar os três tipos de efeitos de propagação no canal de banda estreita: a perda média de percurso, o desvanecimento de larga escala e o desvanecimento de pequena escala.

O desvanecimento de larga escala refere-se às variações do sinal recebido em relação ao nível médio do sinal avaliado para grandes distâncias de separação entre o transmissor e o receptor. Esse desvanecimento é associado, principalmente, à difração sobre objetos de grandes dimensões em relação ao comprimento de onda. No caso de ondas médias, em que o comprimento de onda é da ordem de 300 metros a topografia é a principal causa de desvanecimentos de larga escala. [33].

Os resultados medidos de desvanecimento em larga escala foram comparados com a função de densidade de probabilidade normal, que normalmente representa esse tipo de desvanecimento [34].

Por outra parte, o desvanecimento de pequena escala se refere às mudanças na amplitude e na fase do sinal em deslocamentos da ordem de frações do comprimento de onda entre transmissor e receptor [33]. As estatísticas do desvanecimento em pequena escala foram comparadas com as distribuições estatísticas Normal, Rayleigh, Rice, Nakagami e Weibull, que foram descritas sucintamente na Tabela 3.1. As distribuições dos dados medidos serão apresentadas em histogramas, enquanto as funções de densidade de probabilidade teóricas serão mostradas em curvas contínuas.

5.2.1. Metodologia

Partindo das medidas de potência para cada 10 metros de distância entre o transmissor e o móvel, seção 5.1.1, e as retas de ajuste da perda de percurso, calculadas na seção 5.1.3, pode-se retirar a variabilidade do sinal com relação à distância fazendo a subtração, em escala logarítmica, dos dados da reta de ajuste às medições feitas. Figura 5.6

Uma vez o efeito da distância é removido, para encontrar o desvanecimento de larga escala, aplica-se um filtro de média móvel. Que opera pela média de um número de pontos a partir do sinal de entrada para produzir cada ponto no sinal de saída. Como é escrito na equação (5.5) [35]:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (5.5)$$

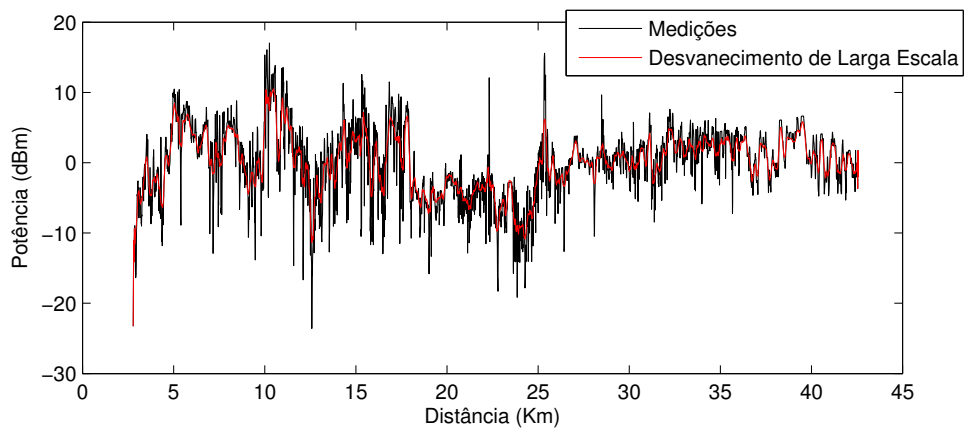
$x[]$ = Sinal de entrada, equivalente ao sinal recebido-Perda de percurso

$y[]$ = Sinal de saída (Desvanecimento de larga escala)

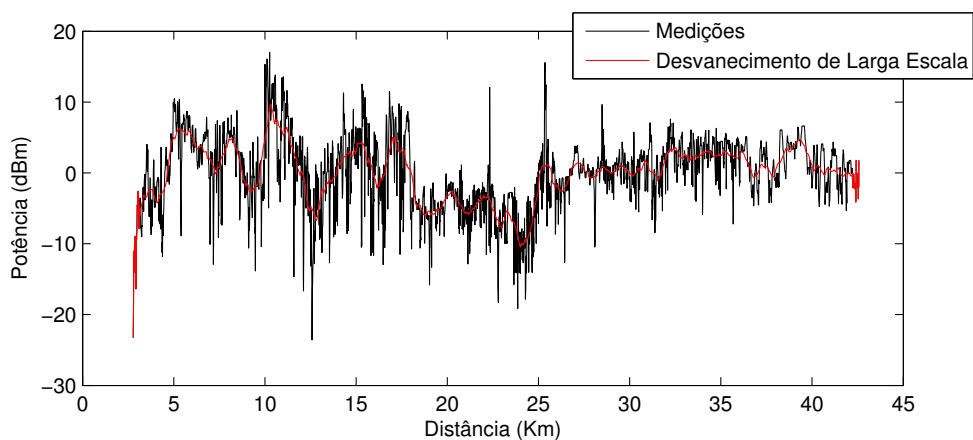
M = Número de pontos no filtro de média móvel

Prova-se a filtragem com um número de pontos equivalente à distância de média, duas e cinco vezes o comprimento de onda. Exemplos de filtrações de média móvel aplicados ao sinal descrito, para a rota 2, período diurno, da Rádio CBN AM, são apresentados na Figura 5.8, onde o sinal vermelho é o desvanecimento de larga escala.

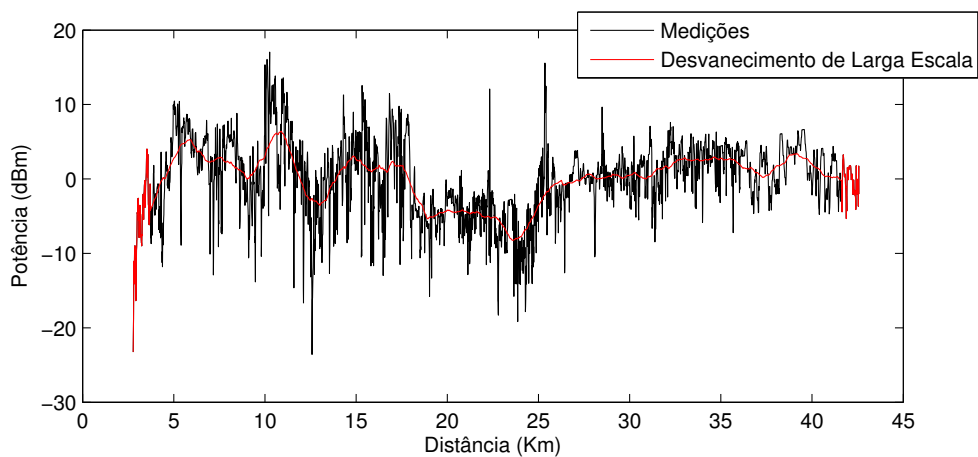
Na Figura 5.8 (a) o sinal depois da filtragem considera algumas das componentes de pequena escala, a diferença do sinal filtrado da Figura 5.8 (b) que apresenta somente o desvanecimento de larga escala. No sinal vermelho na Figura 5.8 (c) não se observam alguns dos comportamentos do desvanecimento de larga escala. Portanto, decide-se utilizar no filtro de média móvel um número de pontos (M) equivalente a duas vezes o comprimento de onda.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.8 Medições e o seu sinal depois da filtragem, desvanecimento de Larga Escala, (a) médio comprimento de onda, (b) dois comprimentos de onda, (c) cinco comprimentos de onda

Posteriormente, o desvanecimento de larga escala é subtraído do sinal não filtrado, conseguindo assim, o desvanecimento de pequena escala. Um exemplo do resultado é mostrado na Figura 5.9.

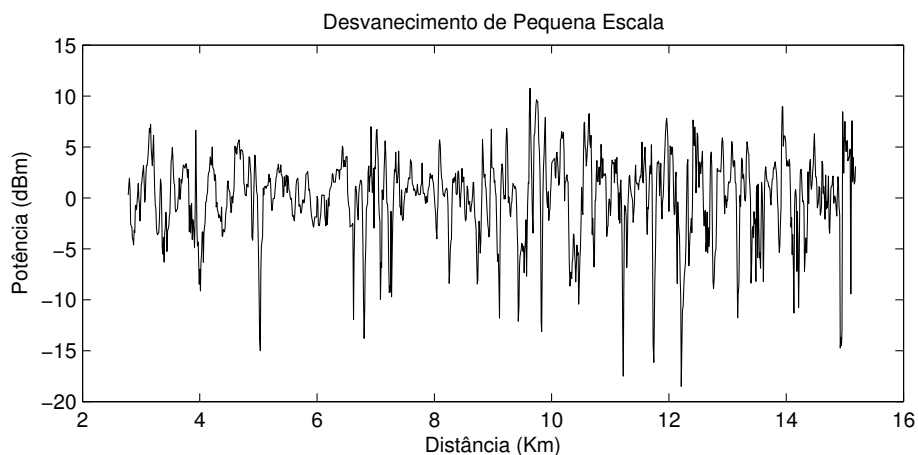


Figura 5.9 Desvanecimento de Pequena Escala. Para a Rádio CBN AM, Rota 2, período diurno.

Posteriormente, para a análise estatística, continua-se com a metodologia descrita na seção 3.2 do Capítulo 3, onde os sinais da Figura 5.8 (b) e da Figura 5.9 serão usados para caracterizar os desvanecimentos de larga e pequena escala, respectivamente.

Nas seguintes seções são apresentados os resultados dessas análises estatísticas para algumas das rotas. Os resultados completos são mostrados em anexos.

5.2.2. Desvanecimento de Larga Escala

A Figura 5.10 indica o desvanecimento de larga escala e a função normal (vermelha) que representa seu comportamento para a Rota 2, no período diurno das medidas da Rádio CBN AM. Para a validação quantitativa do resultado, além de realizar o cálculo de erro quadrático aplica-se o teste de Qui-Quadrado. Os parâmetros das funções e os resultados dos testes são apresentados na Tabela 5.10.

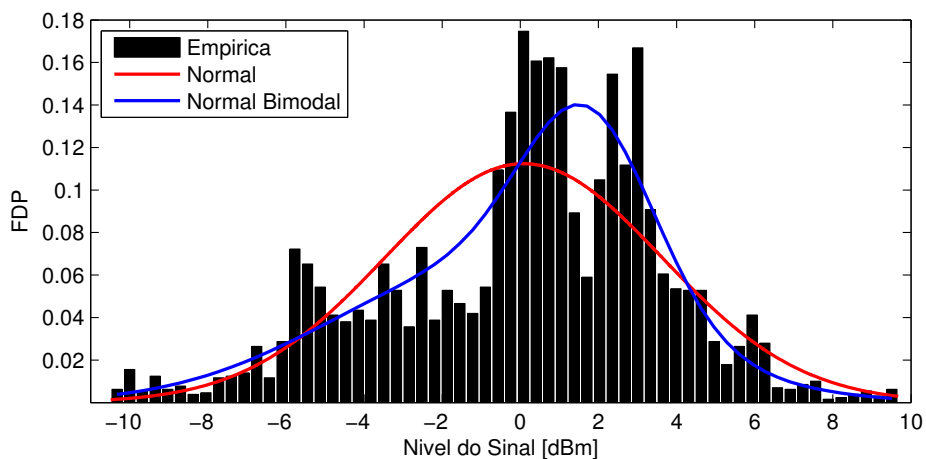


Figura 5.10 Desvanecimento de Larga Escala para a Rota 2 no período diurno da Rádio CBN AM

| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 3.55 |
| | μ_1 | | 0.08 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 8e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 3.98 |
| | | μ_1 | -0.94 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 1.69 |
| | | μ_2 | 1.75 |
| | p | | 0.62 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 5.23e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Tabela 5.10 Descrição dos parâmetros da função normal para o desvanecimento de larga escala da Figura 5.10

Pelos resultados mostrados na figura e tabela, pode-se concluir que a função normal unimodal não representa adequadamente o desvanecimento de larga escala para esta rota e período específico, portanto, o resultado é melhor representado por uma função normal bimodal, como pode se ver na curva azul da Figura 5.10. Os parâmetros desta função são apresentados na parte inferior da Tabela 5.10.

A descrição da função bimodal e seus parâmetros encontra-se na Tabela 3.1. Para a determinação dos parâmetros da função bimodal se aplica a análise de máxima verossimilhança (*mle*) em Matlab.

Para a rota 2 no período diurno, a partir dos erros quadráticos calculados para cada função normal identifica-se que a distribuição bimodal é a que representa estatisticamente melhor o desvanecimento de larga escala.

Igualmente ocorre para esta rota, mas no período noturno, como se apresenta na Figura 5.11 e na Tabela 5.11 onde os resultados dos erros quadráticos respaldam a função bimodal com o melhor ajuste do desvanecimento de larga escala.

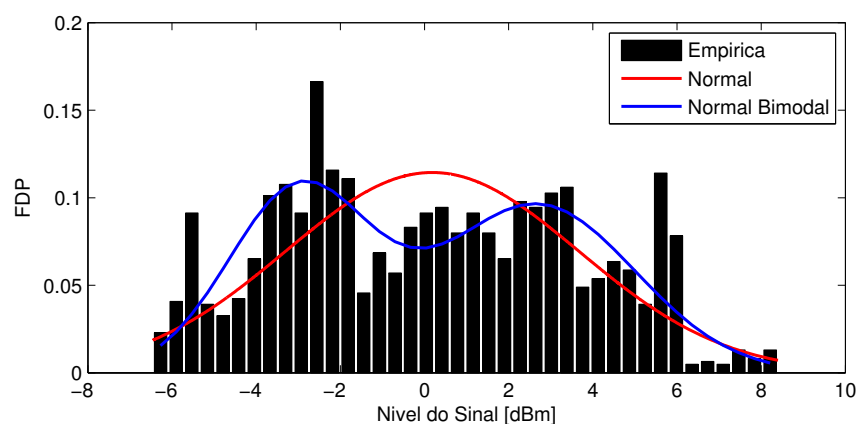


Figura 5.11 Desvanecimento de Larga Escala para a Rota 2 no período noturno da Rádio CBN AM

| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 3.49 |
| | μ_1 | | 0.18 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 9.88e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 1.68 |
| | | μ_1 | -2.99 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 2.33 |
| | | μ_2 | 2.67 |
| | p | | 0.44 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 6.12e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Tabela 5.11 Descrição dos parâmetros das funções normal para o desvanecimento de larga escala da Figura 5.11

Outro caso em que foi observado um comportamento bimodal para a densidade de probabilidade do desvanecimento de larga escala foi a rota 9, no período noturno, para as transmissões da Rádio Cultura AM. Na Figura 5.120, são mostradas as funções densidade ajustadas e na Tabela 5.12 seus parâmetros.

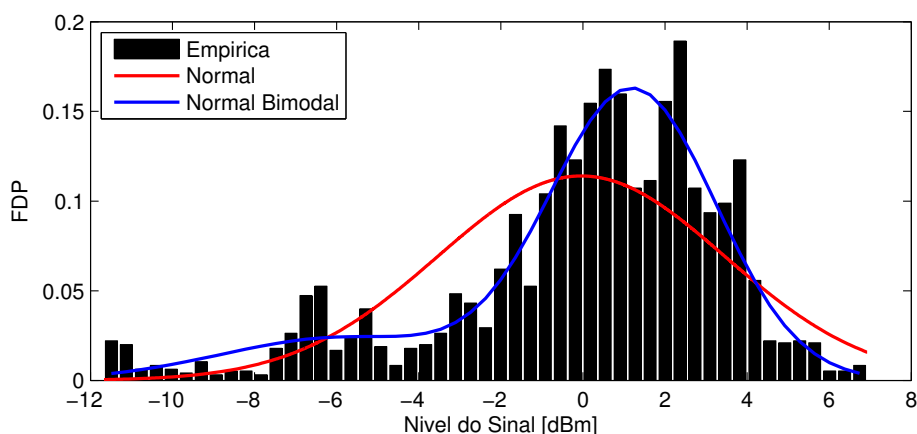


Figura 5.12 Desvanecimento de Larga Escala para a Rota 9 no período noturno da Rádio Cultura AM

| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 3.49 |
| | μ_1 | | -0.04 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 10e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 2.95 |
| | | μ_1 | -5.86 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 2.03 |
| | | μ_2 | 1.22 |
| | p | | 0.18 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 3.62e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Tabela 5.12 Descrição dos parâmetros das funções normal para o desvanecimento de larga escala da Figura 5.12

No Anexo 2 apresentam-se as figuras e tabelas resultantes da análise do desvanecimento de larga escala para todas as rotas de medições.

5.2.3. Desvanecimento de Pequena Escala

Com base nos sinais pré-processados para a análise do desvanecimento de pequena escala encontrados mediante a metodologia descrita na seção 5.2.1, encontra-se as funções de densidade de probabilidade e cumulativas para cada uma das rotas. Para a validação dos resultados se aplica o teste de hipóteses de Qui-quadrado.

Para a Rota 2 no período diurno da Rádio CBN AM as funções de densidade ajustadas e os histogramas dos dados empíricos são indicados na Figura 5.13. Os parâmetros das funções ajustadas são mostrados na Tabela 5.13. Analogamente, as funções de distribuição cumulativa de probabilidades são mostradas na Figura 5.14.

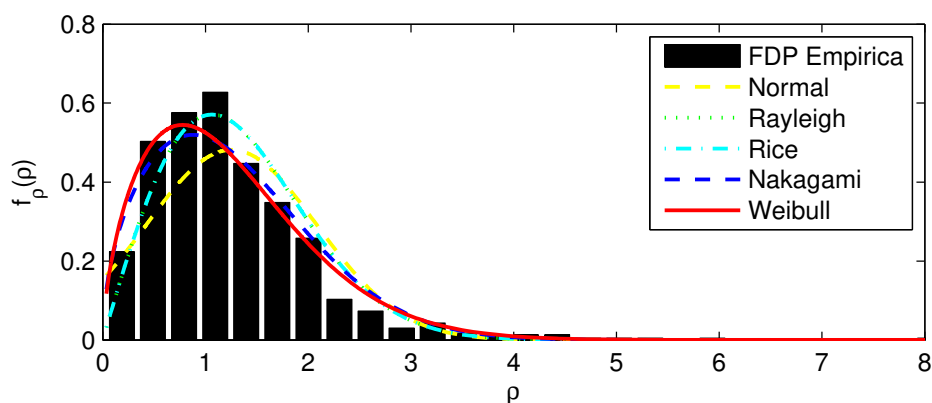


Figura 5.13 Desvanecimento de Pequena Escala para a Rota 2 no período diurno da Rádio CBN AM

| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.25 | 0.83 | 1.06 | 0.03 | 1.06 | 0.76 | 2.26 | 1.40 | 1.62 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.2088 | | 0.2440 | 0.2894 | | 0.3206 | | 0.3216 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | sim | sim | | não | | sim | |

Tabela 5.13 Descrição dos parâmetros das funções de densidade apresentadas na Figura 5.13

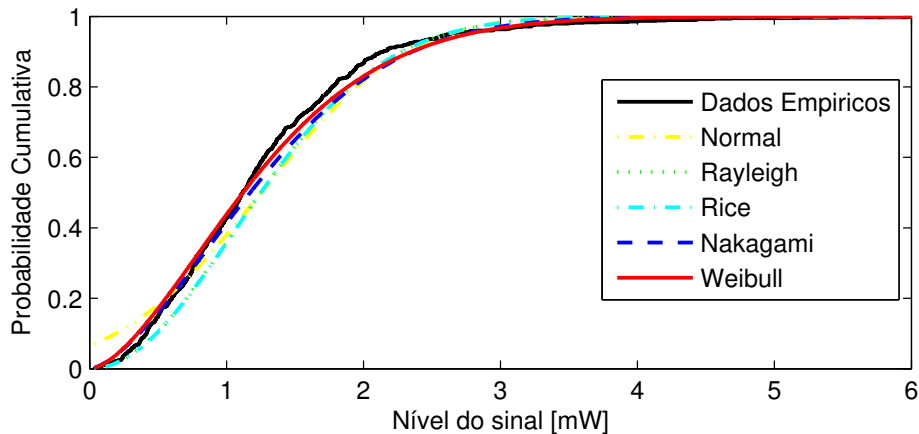


Figura 5.14 Função cumulativa para o desvanecimento de Pequena Escala para a Rota 2 no período diurno da Rádio CBN AM

Estas figuras indicam que as todas as funções apresentadas representam o comportamento do desvanecimento de pequena escala. Para validar este resultado, na última linha da Tabela 5.13 se indicam os resultados do teste Chi-quadrado. As funções densidade Normal e de Nakagami não passaram o teste de hipóteses. Desse modo, as densidades de probabilidade que se ajustam mais aos resultados empíricos são as funções Rayleigh, Rice e Weibull.

Para o período noturno a análise estatística do desvanecimento de pequena escala da mesma rota de medição, é mostrada nas Figura 5.15 e Figura 5.16, assim como na Tabela 5.14.

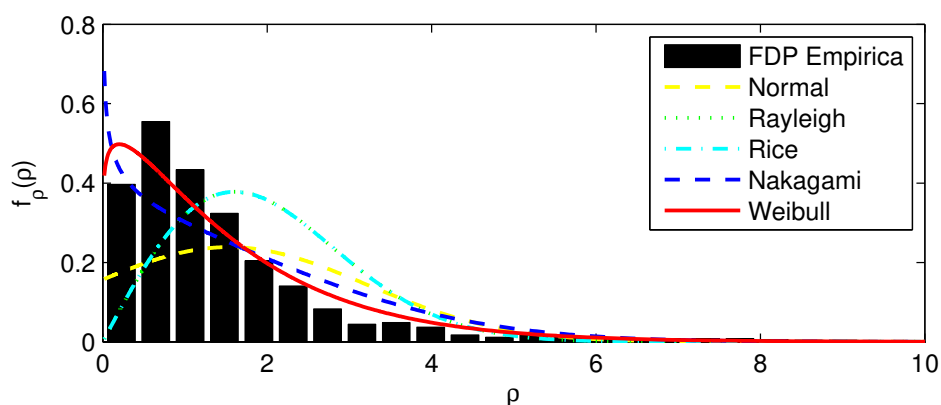


Figura 5.15 Desvanecimento de Pequena Escala para a Rota 2 no período noturno da Rádio CBN AM

| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|---------|------------|------------|--------|------------|----------|------------|---------|-------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.53 | 1.67 | 1.61 | 0.04 | 1.60 | 0.41 | 5.15 | 1.6 | 1.11 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1634 | | 0.1776 | 0.1885 | | 0.1932 | | 0.1904 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Tabela 5.14 Descrição dos parâmetros das funções de densidade apresentadas na Figura 5.15

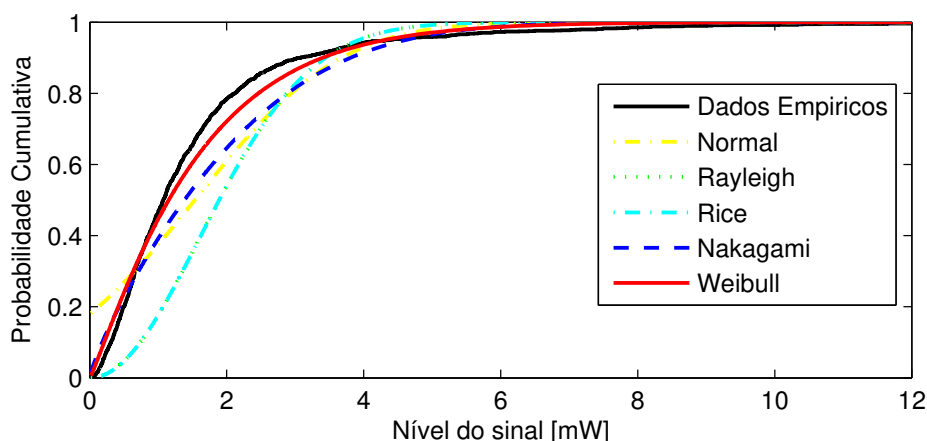


Figura 5.16 Função cumulativa para o desvanecimento de Pequena Escala para a Rota 2 no período noturno da Rádio CBN AM

Segundo a Tabela 5.14, apenas a função Weibull representa o comportamento do desvanecimento de pequena escala nesta rota para o período noturno, comprovando-se graficamente na Figura 5.16.

O pior desempenho em ambos os casos segundo o teste de Qui-quadrado e as figuras apresentadas, é o da função Normal.

As análises para as outras rotas, incluindo as figuras e as tabelas de parâmetros, são apresentadas no Anexo 3.

5.3. Qualidade de recepção

A fidelidade com que o áudio transmitido é reproduzido pelo receptor é avaliada de forma objetiva por meio de um parâmetro denominado AQ , que indica a quantidade de quadros de áudio decodificados corretamente em um pacote de 10 quadros [36].

Como foi apresentado na Tabela 4.3, o registro dos pacotes de 400 ms é feito continuamente durante o percurso da rota.

As Figura 5.17 e Figura 5.18 apresentam a intensidade de campo medida em função da distância para a rota 2, período diurno das Rádio CBN AM e Cultura AM respectivamente. A qualidade de recepção de cada ponto é indicada pela cor do símbolo: verde para os pontos onde todos os pacotes tiveram 8 ou mais quadros de áudio decodificados corretamente (boa qualidade) e vermelho caso contrário.

Na Tabela 5.15 apresenta-se uma comparação entre os resultados de cobertura e qualidade de recepção de duas rotas de medições. Os resultados indicam que para a Rádio CBN AM, o raio de cobertura é de aproximadamente 23 Km e 97.5% dos pontos obtiveram recepção boa. Para a Rádio Cultura AM, o raio de cobertura é de 16 Km e a recepção é boa em 92.1% dos pontos. Em ambos os casos, para uma boa recepção é requerida uma intensidade de campo acima de 70 dB μ V/m aproximadamente.

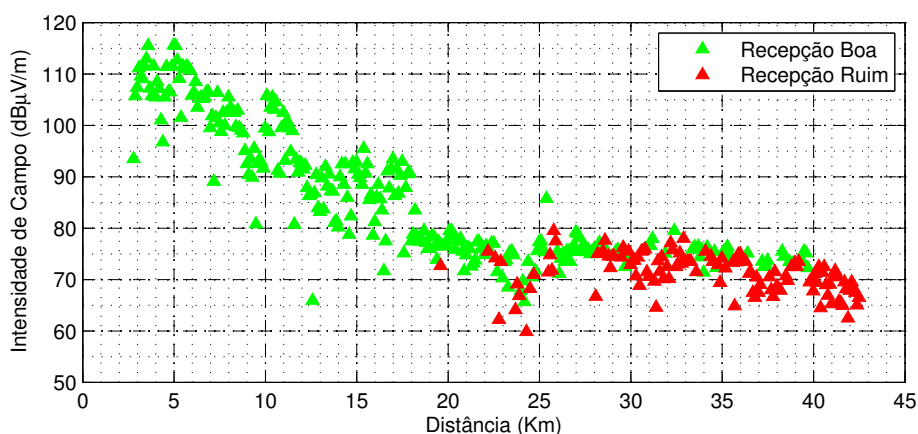


Figura 5.17 Qualidade de recepção e intensidade de campo elétrico em função da distância: Rota 2, período diurno, Rádio CBN AM.

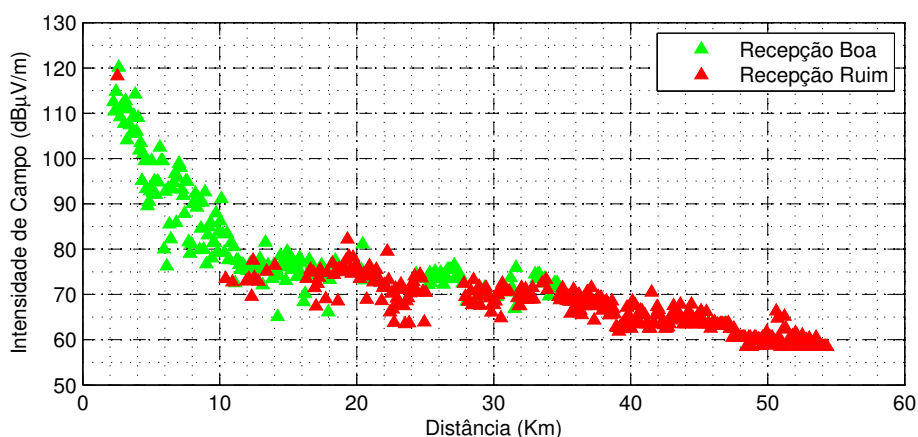


Figura 5.18 Qualidade de recepção e intensidade de campo elétrico em função da distância: Rota 2, período diurno, Rádio Cultura AM.

O limiar para o SNR também foi obtido com base nos resultados das medições de qualidade em mobilidade. A Figura 5.19 e a Figura 5.20 apresentam os valores do SNR em função da intensidade de campo elétrico, assim como a qualidade da recepção, para as Rádios CBN AM e Cultura AM respectivamente. Para uma recepção boa, em ambos os casos, o limiar é de aproximadamente 14 dB. Este valor é consistente com a Rec. ITU-R BS.1114 [37]

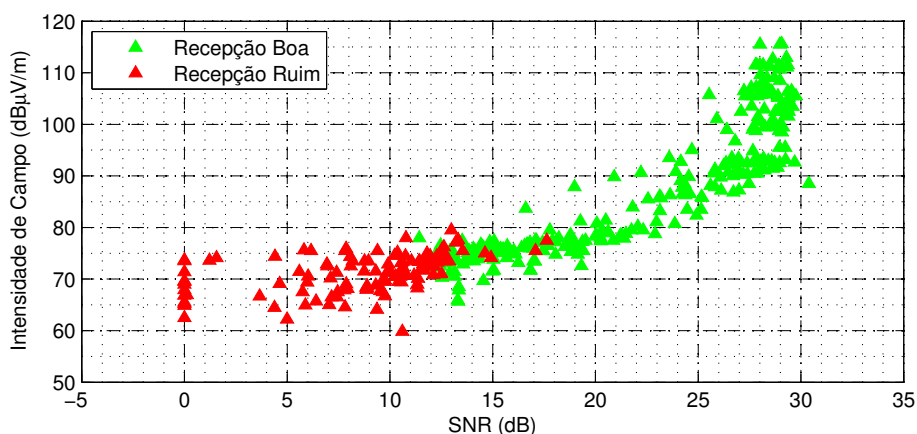


Figura 5.19 Qualidade de recepção e intensidade de campo elétrico vs. SNR: Rota 2, período diurno, Rádio CBN AM.

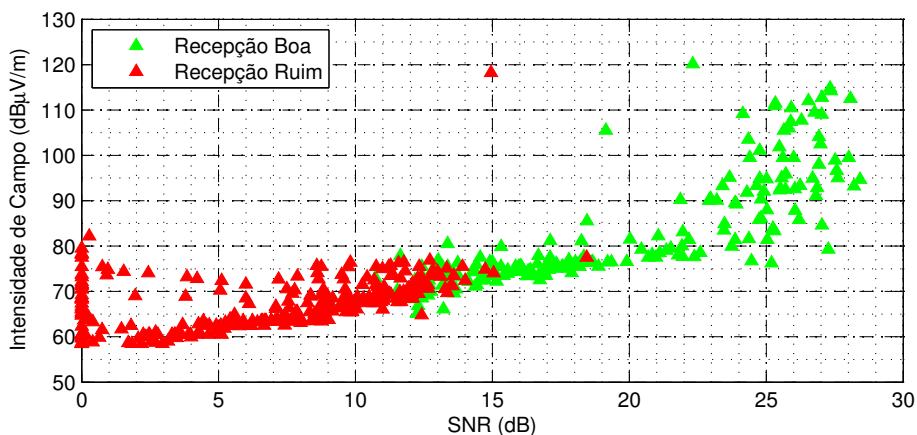


Figura 5.20 Qualidade de recepção e intensidade de campo elétrico vs. SNR: Rota 2, período diurno, Rádio Cultura AM.

| Medida | Rota 2, período diurno. Rádio CBN AM | Rota 2, período diurno. Rádio Cultura AM |
|-------------------------|---|---|
| Número total de pontos | 398 (100%) | 522 (100%) |
| Pontos com recepção boa | 278 (69.8%) | 204 (39.1%) |
| Limiar Distância / | 23 Km / | 16 Km / |

| | | |
|---|-------------|-------------|
| Número total de pontos | 204 (100%) | 139 (100%) |
| Pontos com recepção boa no limiar da distância | 199 (97.5%) | 128 (92.1%) |
| Limiar SNR / | 14 dB / | 14 dB / |
| Número total de pontos | 249 (100%) | 169 (100%) |
| Pontos com recepção boa no limiar do SNR | 245 (98.4%) | 164 (97%) |

Tabela 5.15 Qualidade de Recepção e cobertura para duas rotas de medições

A análise da qualidade de recepção e cobertura para todas as rotas de medições é apresentada na Tabela 5.16. O Anexo 4 inclui as figuras da análise para as outras rotas.

| Modelo | CBN AM | | | | | | | Cultura AM | | | | | | | | |
|--|--------|------|------|------|---------|------|------|------------|------|------|------|------|------|---------|------|--|
| | Diurno | | | | Noturno | | | Diurno | | | | | | Noturno | | |
| | R2 | R3 | R6 | R7 | R2 | R3 | R7 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | |
| % Pontos com recepção boa na rota | 69.8 | 76.1 | 51.8 | 55.5 | 81.5 | 95.9 | 40.9 | 39.1 | 38.0 | 51.4 | 51.0 | 33.9 | 44.4 | 45.2 | 72.5 | |
| Cobertura (Km) | 23 | 48 | 20 | 20 | 18 | 20 | 11 | 16 | 28 | 27 | 25 | 17 | 12 | 15 | 22 | |
| % Pontos com recepção boa na Cobertura | 97.5 | 99.3 | 86.9 | 74.4 | 90.2 | 95.3 | 83.8 | 92.1 | 64.0 | 88.4 | 95.1 | 79.7 | 88.2 | 90.6 | 92.9 | |
| Limiar do SNR (dB) | 14 | 13 | 14 | 14 | 12 | 18 | 14 | 14 | 13 | 13 | 13 | 14 | 13 | 13 | 12 | |
| % Pontos com no Limiar do SNR | 98.4 | 99.8 | 98.8 | 98.0 | 97.2 | 99.4 | 97.3 | 97 | 88.1 | 98.3 | 98.6 | 95.9 | 98.8 | 97.9 | 98.9 | |

Tabela 5.16 Qualidade de Recepção e cobertura para todas as rotas de medições

6 Conclusão

Neste trabalho foi realizada a análise de dados de medições de intensidade de campo na faixa de ondas médias e qualidade de recepção de um sistema de radiodifusão digital padrão DRM na cidade de São Paulo.

Os resultados das medições de intensidade de campo foram comparados com o modelo de previsão da Recomendação ITU-R P.368-9. Para obter uma boa concordância entre os dados medidos e as previsões é necessário ajustar a condutividade do solo, parâmetro fundamental no modelo já que, para distâncias curtas a onda de superfície é o mecanismo de propagação dominante. Somente duas das rotas apresentam melhor concordância com o modelo da Rec. ITU-R P.368-9 utilizando como dado de entrada o valor da condutividade indicado para a região da cidade de São Paulo pela Recomendação ITU-P R.832-2.

Em geral o melhor ajuste é obtido com valores de condutividade menores do que o obtido do mapa de contido nesta recomendação. Portanto, como tparte de um trabalho futuro, seria importante desenvolver estudos de condutividade do solo em ambientes diversos com o objetivo de atualizar e refinar o mapa brasileiro de condutividades existente na Rec. ITU-P R.832-2.

O nível médio do sinal recebido cai com a distância seguindo, aproximadamente, uma lei de potência. Os expoentes de perda foram obtidos para as diversas rotas mostraram valores entre 2,9 e 5,2 no período diurno e entre 1,8 e 3,9 no período noturno. As variações se justificam não só pelas diferentes características das rotas, mas também pela existência de diferentes mecanismos de propagação nesta faixa de frequências. Além da onda espacial contribuem para o campo recebido as ondas de superfície, dominante em pontos próximos ao transmissor, e a onda celeste, dominante para pontos distantes. A presença da onda celeste, mais intensa à noite, é o que explica os menores coeficientes de perdas no período noturno.

As distribuições de probabilidades das variações de larga escala do sinal recebido podem ser aproximadas por funções normais tomando o nível de sinal em

dB. Em parte das rotas estas distribuições apresentam comportamento bimodal e foram utilizadas distribuições binormais. Mais uma vez o comportamento pode ser justificado pela presença de diferentes mecanismos de propagação alternadamente dominantes dependendo da distância ao transmissor.

Já os desvanecimentos de pequena escala puderam ser bem representados em todos, por distribuições de Weibull. A distribuição de Rayleigh também apresentou bom resultados em uns poucos casos.

As medições de qualidade de recepção mostraram um raio de cobertura de 15 a 30 km, dependendo da rota. Esta grande variação se deve em parte às características do solo e também aos níveis de ruído nas diferentes rotas. As melhores condições de propagação à noite permitem que a potência de transmissão seja reduzida neste período sem prejuízo da cobertura.

Como futuros trabalhos é possível sugerir a análise de dados de medições em mobilidade disponíveis de outras cidades como Rio de Janeiro e Belo Horizonte, a análise dos resultados de medições semelhantes realizadas na faixa de VHF e ainda a análise dos dados de medições realizadas também na cidade de São Paulo utilizando sistema de padrão HD Radio para comparação com os resultados obtidos neste trabalho para o padrão DRM.

Referências bibliográficas

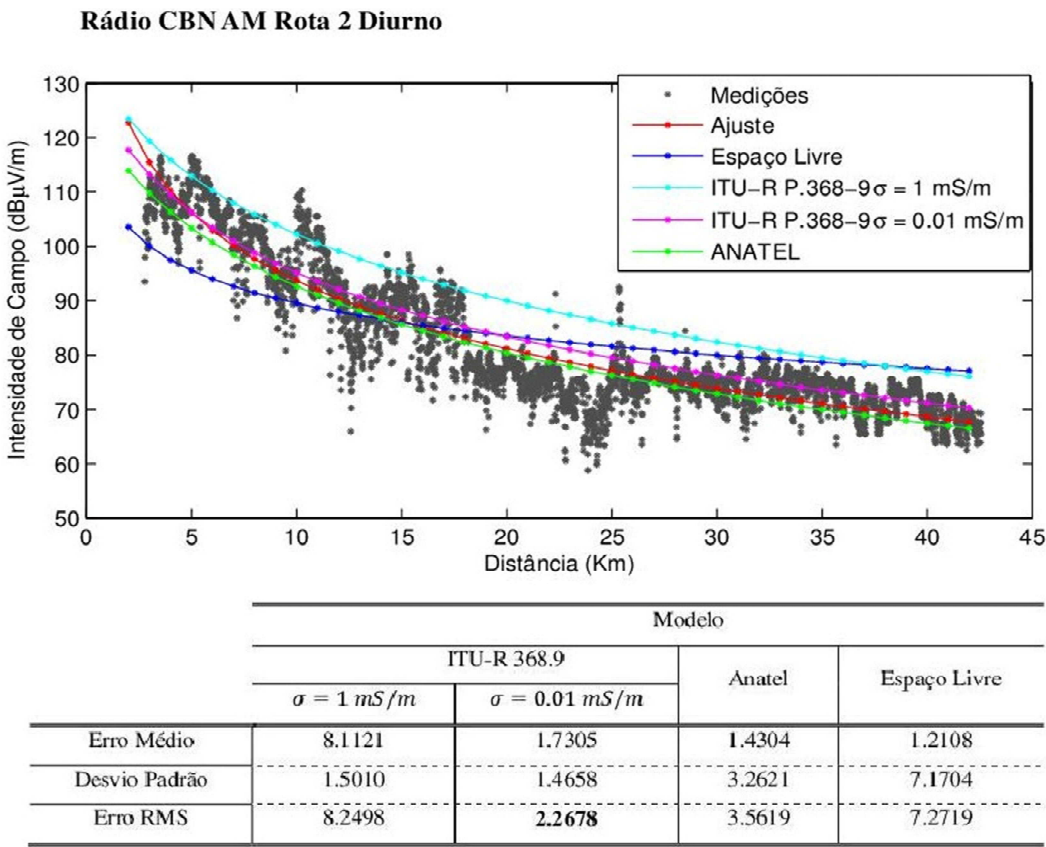
- 1 DIGITAL RADIO MONDIALE. DRM. **Introduction and Implementation Guide**. Revisão 2. Disponível em: <www.drm.org>. 2010.
- 2 EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. ETSI ES 201 980 v3.1.1. **Digital Radio Mondiale (DRM): system specification**. Disponível em: <www.etsi.org>. 2009.
- 3 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R BS.1514-2. **System for digital sound broadcasting in the broadcasting bands below 30MHz**. Disponível em: <www.itu.int>. 2011.
- 4 PRIETO, G. et al. Digital radio mondiale: broadcasting and reception. In: Electrotechnical Conference, 2004. MELECON 2004. **Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean**. IEEE, 2004. p. 485-487. 2004.
- 5 MATIAS, J. et al. Location correction factor for coverage planning tools for DRM (Digital Radio Mondiale) in the 26 MHz band. **IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting**. IEEE, 2008. p. 1-7. 2008.
- 6 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU Radio Communications Study Group E-175E. **Digital Radio Mondiale (DRM) Daytime Tests**. 2005.
- 7 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R P.368-9. **Ground-wave propagation curves for frequencies between 10KHz and 30KHz**. Disponível em: <www.itu.int>. 2007.
- 8 GUERRA, D. et al. Medium wave DRM field test results in urban and rural environments. **IEEE transactions on broadcasting**, v. 51, n. 4, p. 431-438, 2005.

- 9 PRIETO, G. et al. Digital Radio Mondiale (DRM). Field trials for minimum C/N requirements. **Proc. of the International Broadcasting Convention, IBC 2005**. p. 43-48. 2005.
- 10 MATIAS, J. et al. **Local Radio Coverage Using the Digital Radio Mondiale International Standard: Time Variability Characterization**. Department of Electronics & Telecommunications, Bilbao Faculty of Engineering (University of the Basque Country). 2006.
- 11 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R P.842-5. **Computation of Reliability and compatibility of HF radio systems**. Disponível em: <www.itu.int>. 2013.
- 12 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R P.1148-1. **Standardized procedure for comparing predicted and observed HF sky-wave signal intensities and the presentation of such comparisons**. Disponível em: <www.itu.int>. 2001.
- 13 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R P.1057-4. **Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling**. Disponível em: <www.itu.int>. 2015.
- 14 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R P.1321-5. **Propagation factors affecting systems using digital modulation techniques at LF and MF**. Disponível em: <www.itu.int>. 2016.
- 15 GUERRA, D. et al. Medium wave digital radio mondiale (DRM) field strength time variation in different reception environments. **IEEE transactions on broadcasting**, v. 52, n. 4, p. 483-491. 2006.
- 16 PARSONS, J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. 2 ed. John Wiley and Sons LTD, 2000.
- 17 FRIIS, H.T. A note on a simple transmission formula. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**. v. 34, n. 5, p. 254-256, 1946.
- 18 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R P.368-9. **Ground-wave propagation curves for frequencies between 10KHz and 30KHz**. Disponível em: <www.itu.int>. 2007.

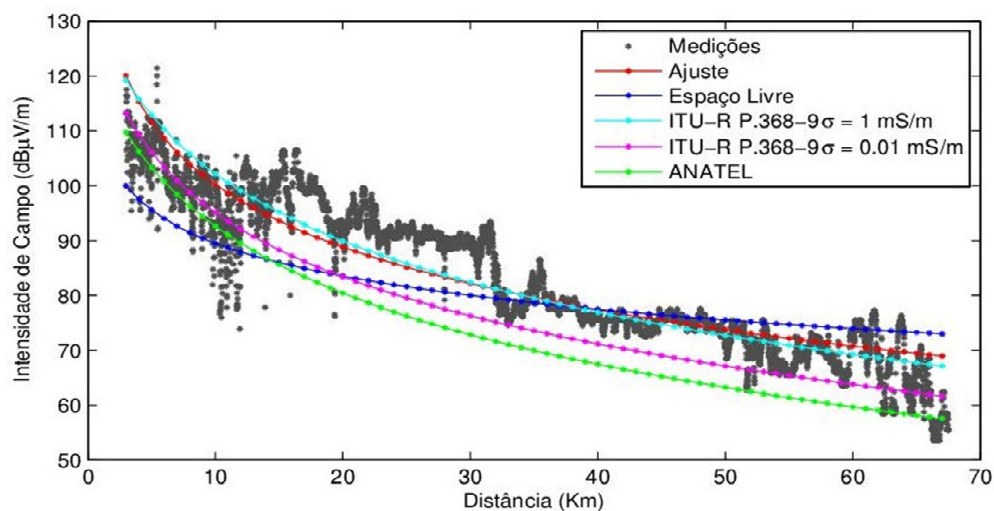
- 19 NORTON, K. A. The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**. v. 24, n. 10, p. 1367-1387. 1936.
- 20 NORTON, K. A. The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**. v. 25, n. 9, p. 1203-1236. 1937.
- 21 RAPPAPORT, T. S. et al. **Wireless communications: principles and practice**. New Jersey: Prentice Hall PTR. 1996.
- 22 GERKS, I. Use of a high-speed computer for ground-wave calculations. **IRE Transactions on Antennas and Propagation**. v. 10, n. 3, p. 292-299. 1962.
- 23 HENDEL, H.; FAITH, T. **On the calculation of the ground wave attenuation factor at low frequencies**. 1966.
- 24 ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. **Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables**. Courier Corporation, 1964.
- 25 AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. ANATEL. **Regulamento técnico para emissoras de radiodifusão sonora em onda média e em onda tropical – 120 metros**. 1999.
- 26 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU. **Plan for MF broadcasting in Region 2, Rio de Janeiro**. (RJ81). 1981.
- 27 BALANIS, C. A. **Advanced Engineering Electromagnetics**. John Wiley and Sons, 2012.
- 28 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R 832-2. **World atlas of ground conductivities, 2012**. Disponível em: <www.itu.int>. 2012.
- 29 AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. ANATEL. **Regulamento técnico para emissoras de radiodifusão sonora em onda média e em onda tropical – 120 metros**. 1999.

- 30 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. INMETRO. **Medições de Campo do Sistema DRM30 (Digital Radio Mondiale) na Faixa de Ondas Médias em São Paulo com a Rádio CBN AM.** 2011.
- 31 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R 832-2. **World atlas of ground conductivities, 2012.** Disponível em: <www.itu.int>. 2012.
- 32 AFRIC, W.; ZOVKO-CIHLAR, B.; GRGIC, S. Methodology of Path Loss Calculation using Measurement Results. **IEEE Transactions on Communications**, v. 50, p. 495-502. 2007.
- 33 RAPPAPORT, T. S. et al. **Wireless Communications: Principles and Practice.** New Jersey: Prentice Hall PTR. 1996.
- 34 PARSONS, J. D. **The Mobile Radio Propagation Channel.** 2 ed. John Wiley and Sons LTD, 2000.
- 35 SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.** 1997
- 36 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. INMETRO. **Medições de Campo do Sistema DRM30 (Digital Radio Mondiale) na Faixa de Ondas Médias em São Paulo com a Rádio CBN AM.** 2011.
- 37 INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION. ITU-R BS.1114-7. **Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3 000 MHz, 2012.** Disponível em: <www.itu.int>. 2012.

Anexo 1 – Intensidade de Campo Elétrico e Ajuste

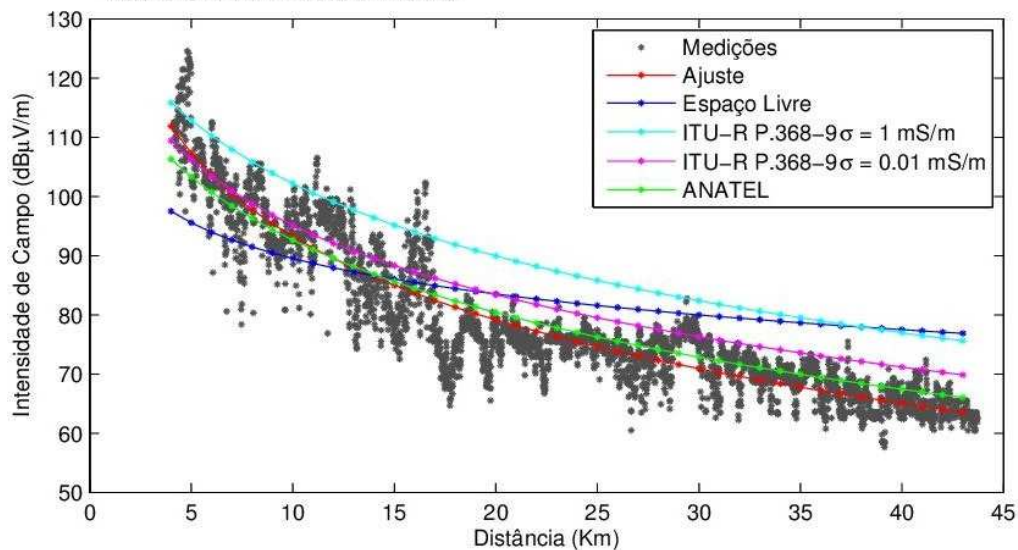


Rádio CBN AM Rota 3 Diurno



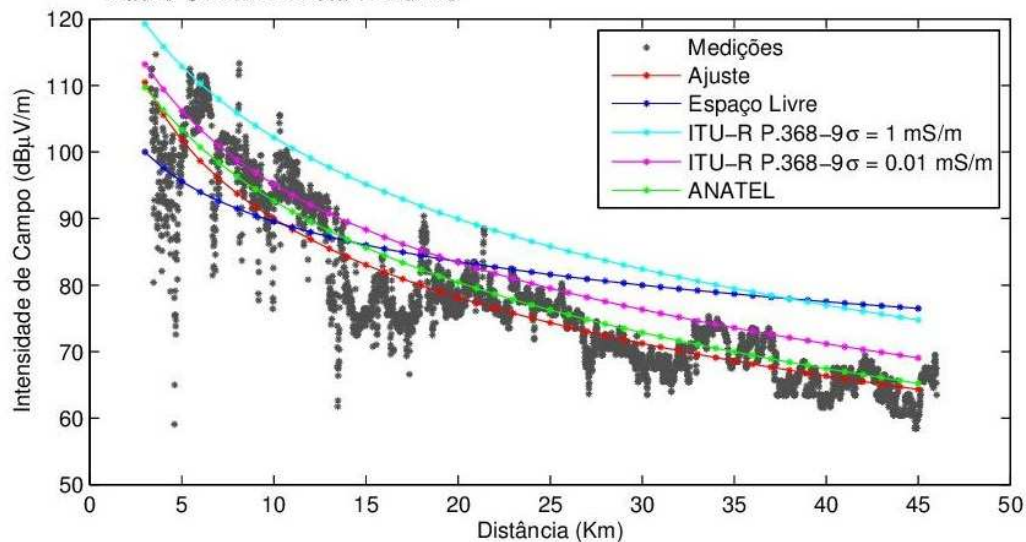
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 0.0483 | 6.1292 | 9.5907 | 2.6606 |
| Desvio Padrão | 1.1943 | 12.3721 | 19.3673 | 7.9695 |
| Erro RMS | 1.1953 | 13.8071 | 21.6119 | 8.4018 |

Rádio CBN AM Rota 6 Diurno



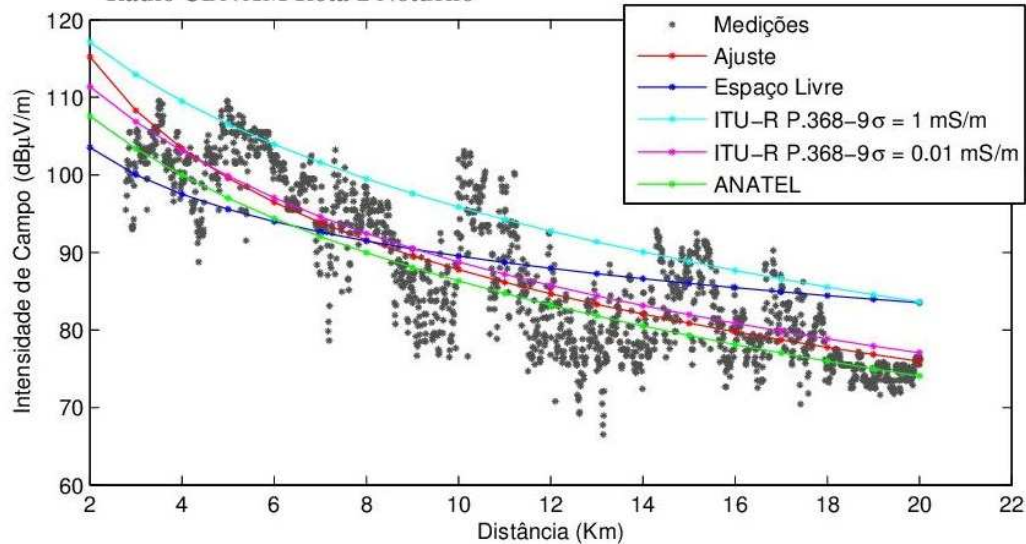
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 10.4032 | 4.0144 | 0.8608 | 4.3406 |
| Desvio Padrão | 1.8559 | 2.1795 | 1.8559 | 7.4083 |
| Erro RMS | 10.5674 | 4.5679 | 2.0458 | 8.5863 |

Rádio CBN AM Rota 7 Diurno



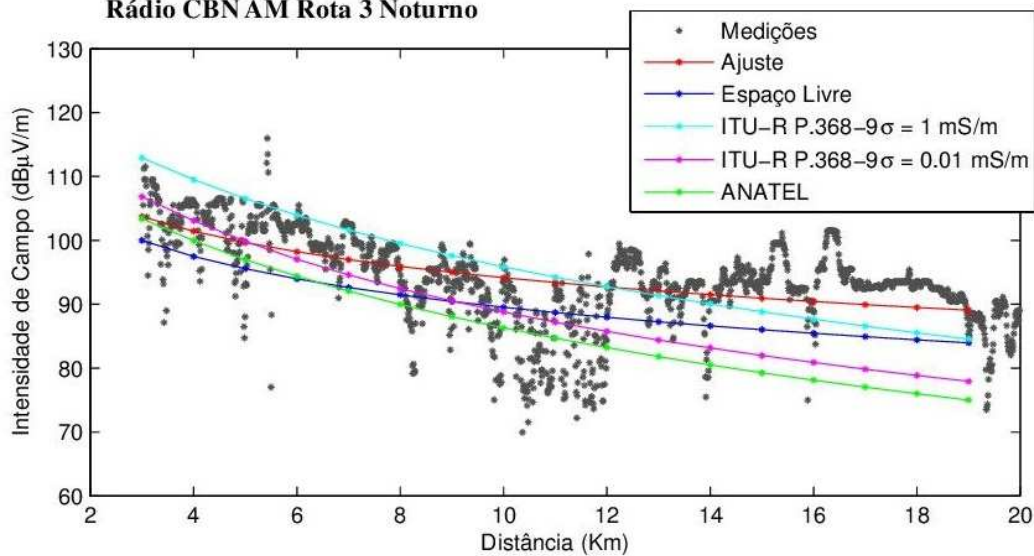
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 11.3188 | 4.9682 | 1.7764 | 5.3059 |
| Desvio Padrão | 0.7224 | 0.4466 | 0.7224 | 5.8622 |
| Erro RMS | 11.3418 | 4.9882 | 1.9176 | 7.9068 |

Rádio CBN AM Rota 2 Noturno



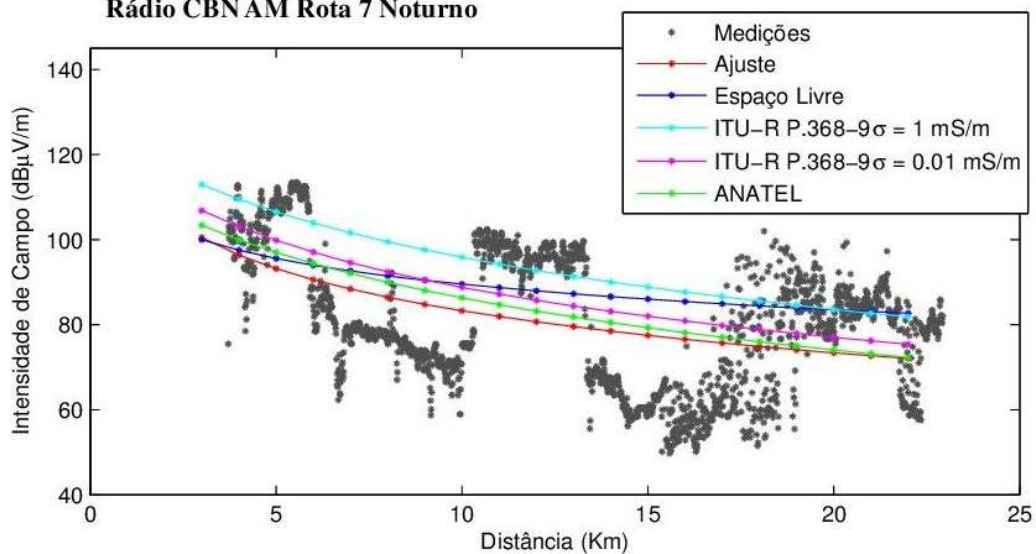
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|--------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 7.2570 | 0.5118 | 2.2854 | 1.1380 |
| Desvio Padrão | 1.5533 | 1.2370 | 4.9463 | 5.5096 |
| Erro RMS | 7.4214 | 1.3387 | 5.4488 | 5.6259 |

Rádio CBNAM Rota 3 Noturno



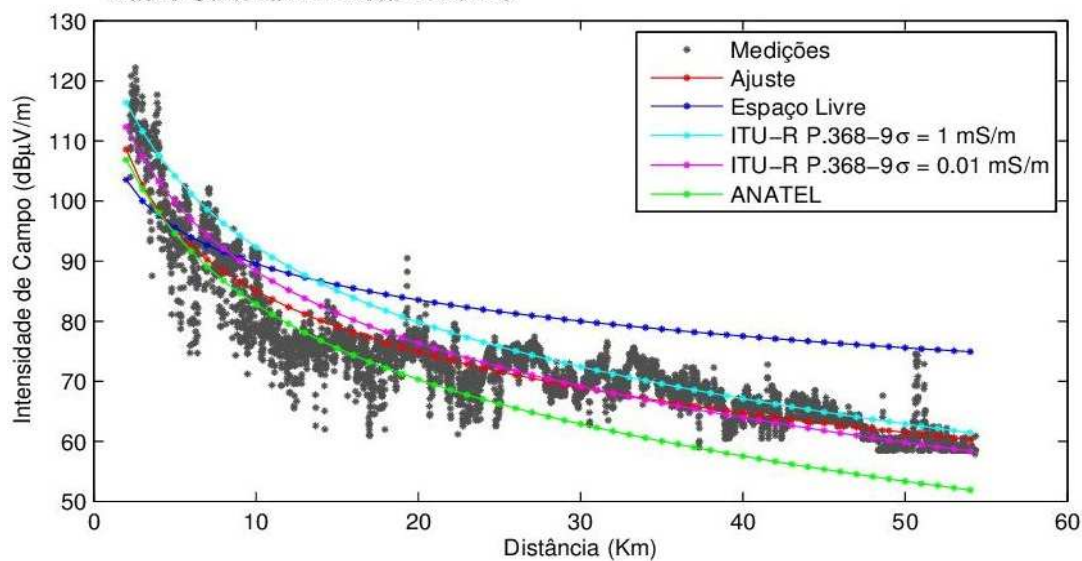
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 1.4315 | 5.3849 | 8.1109 | 4.6034 |
| Desvio Padrão | 4.3440 | 11.9532 | 17.2762 | 9.4993 |
| Erro RMS | 4.5738 | 13.1101 | 19.0854 | 10.5560 |

Rádio CBNAM Rota 7 Noturno



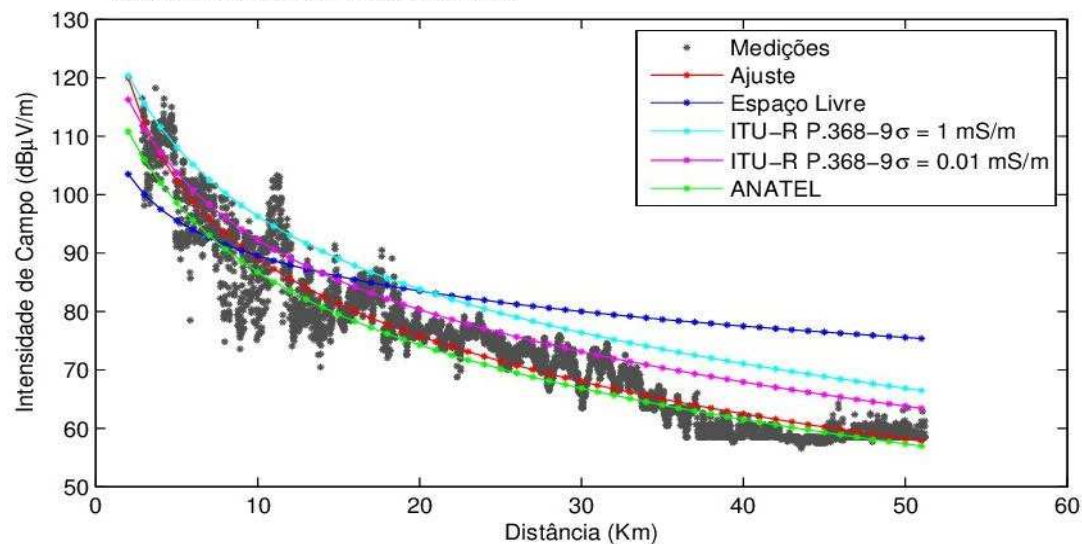
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 11.7978 | 5.0295 | 2.2554 | 6.7252 |
| Desvio Padrão | 1.1930 | 1.1159 | 1.1930 | 3.2366 |
| Erro RMS | 11.8579 | 5.1518 | 2.5514 | 7.4635 |

Rádio Cultura AM Rota 2 Diurno



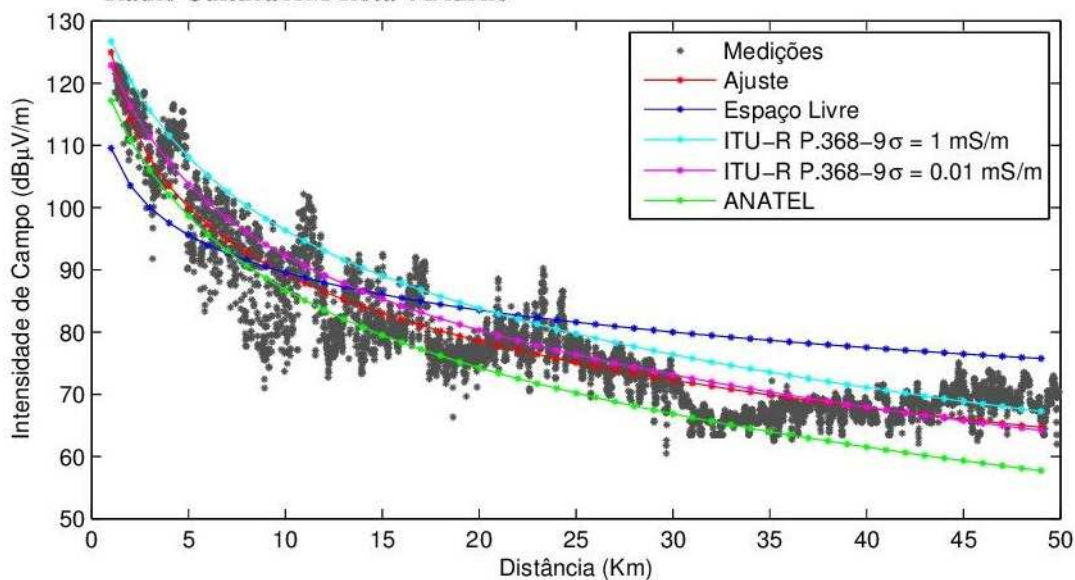
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 8.2598 | 4.7890 | 1.2826 | 9.2749 |
| Desvio Padrão | 2.4153 | 2.0008 | 3.5413 | 4.7347 |
| Erro RMS | 8.6057 | 5.1901 | 3.7664 | 10.4135 |

Rádio Cultura AM Rota 3 Diurno



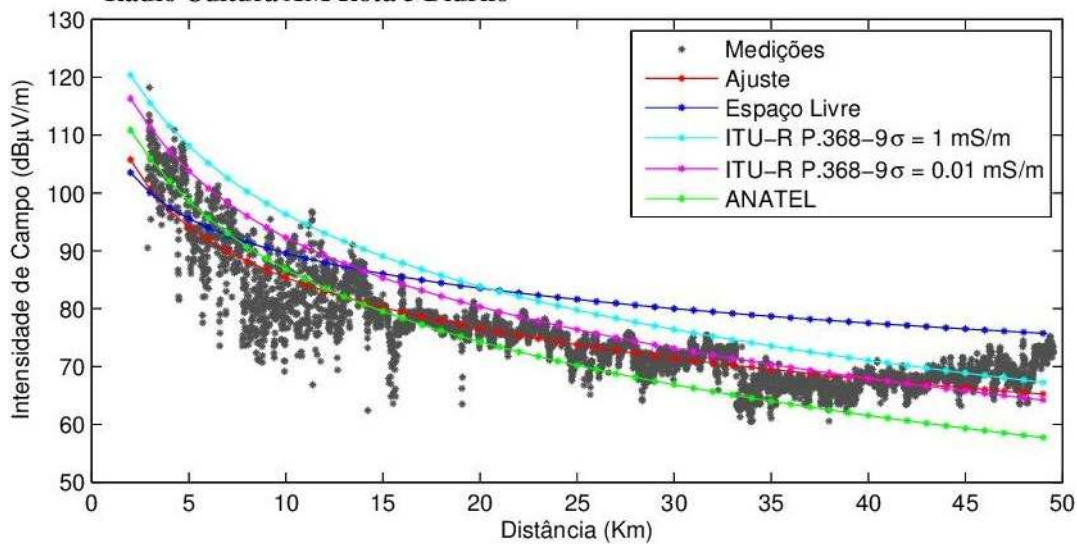
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 7.7594 | 4.2635 | 1.7830 | 8.2779 |
| Desvio Padrão | 1.4925 | 1.8255 | 3.8992 | 8.3014 |
| Erro RMS | 7.9016 | 4.6379 | 4.2876 | 11.7234 |

Rádio Cultura AM Rota 4 Diurno



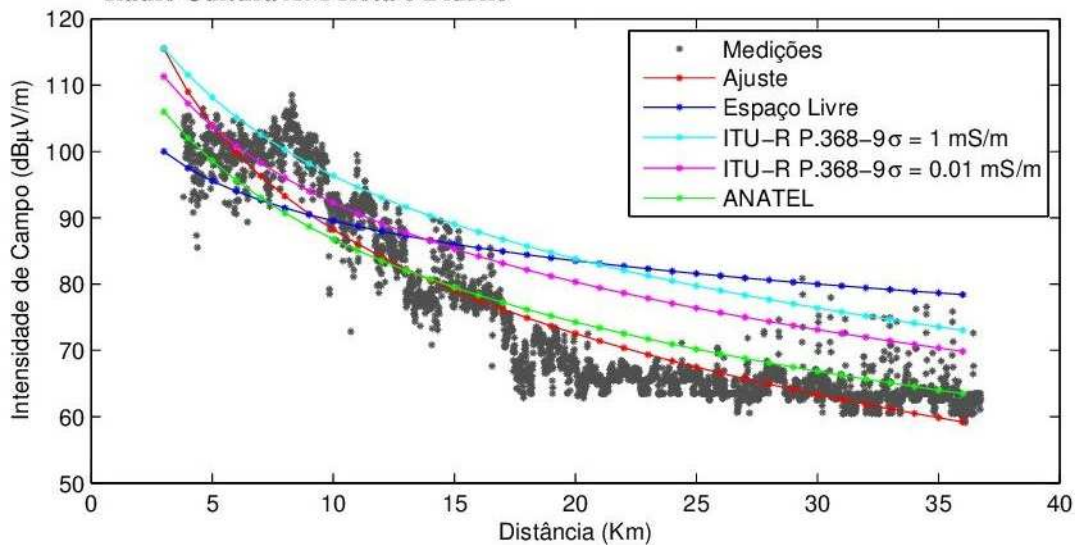
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 4.8300 | 1.3085 | 4.7124 | 4.6498 |
| Desvio Padrão | 1.7350 | 1.3652 | 9.6793 | 6.0316 |
| Erro RMS | 5.1322 | 1.8910 | 10.7655 | 7.6159 |

Rádio Cultura AM Rota 5 Diurno



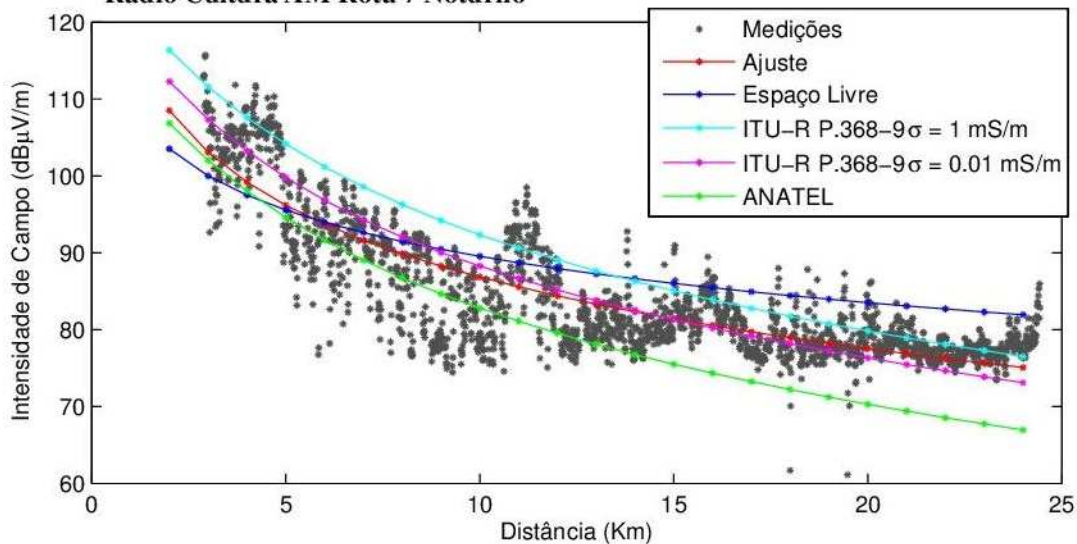
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|--------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 6.8355 | 3.3216 | 2.7069 | 7.0093 |
| Desvio Padrão | 3.8254 | 3.4131 | 6.6759 | 3.1246 |
| Erro RMS | 7.8331 | 4.7626 | 7.2038 | 7.6742 |

Rádio Cultura AM Rota 6 Diurno



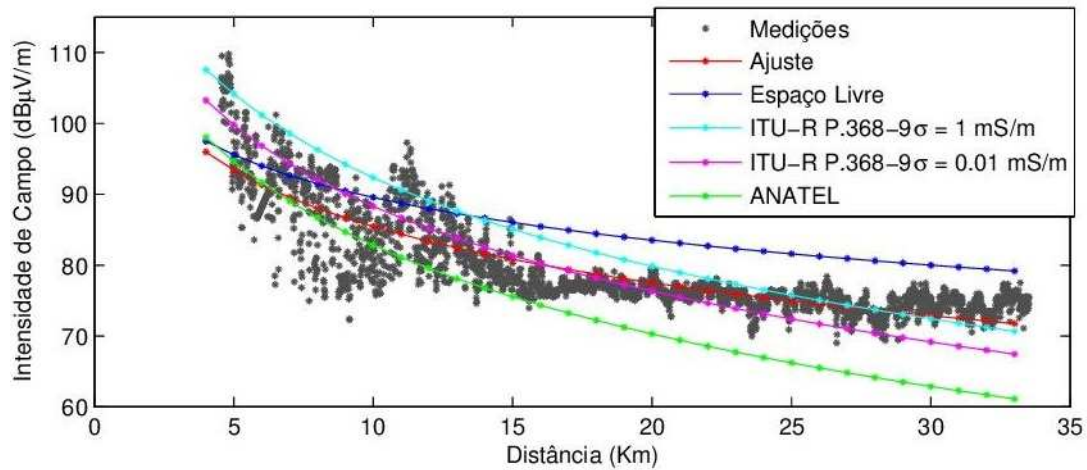
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 10.1766 | 6.5277 | 0.6342 | 8.1936 |
| Desvio Padrão | 3.3824 | 3.7611 | 3.3824 | 9.2994 |
| Erro RMS | 10.7240 | 7.5338 | 3.4413 | 12.3941 |

Rádio Cultura AM Rota 7 Noturno



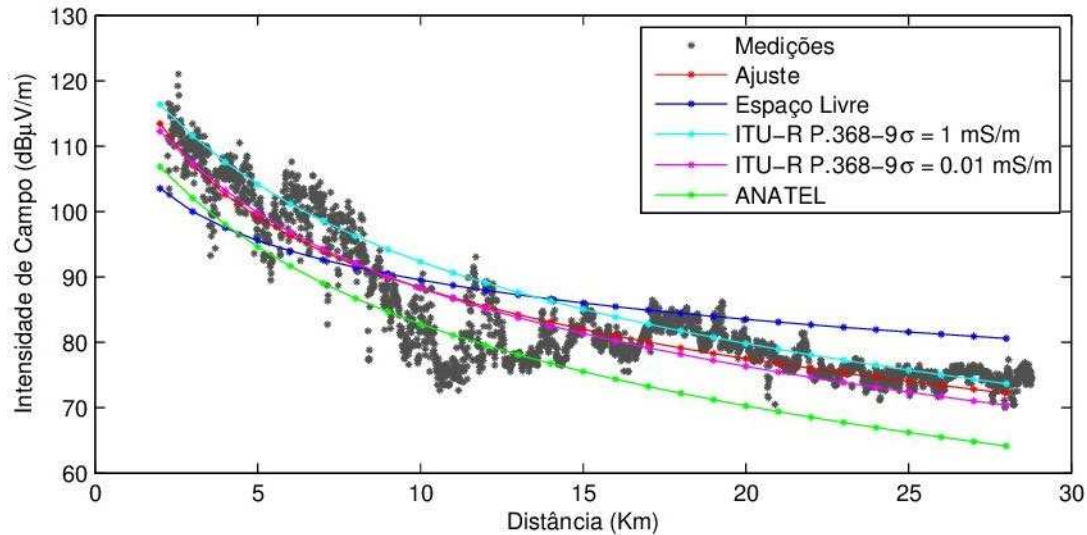
| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 4.6757 | 0.8062 | 4.8667 | 3.0562 |
| Desvio Padrão | 2.3582 | 2.0310 | 10.2277 | 3.2818 |
| Erro RMS | 5.2368 | 2.1852 | 11.3265 | 4.4845 |

Rádio Cultura AM Rota 8 Noturno



| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 3.6612 | 0.0138 | 5.8812 | 5.4007 |
| Desvio Padrão | 3.7188 | 3.3357 | 12.5282 | 1.6351 |
| Erro RMS | 5.2186 | 3.3358 | 13.8399 | 5.6428 |

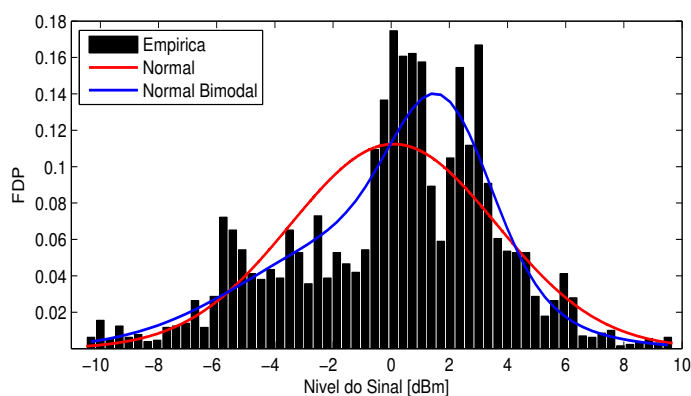
Rádio Cultura AM Rota 9 Noturno



| | Modelo | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|---------|--------------|
| | ITU-R 368.9 | | Anatel | Espaço Livre |
| | $\sigma = 1 \text{ mS/m}$ | $\sigma = 0.01 \text{ mS/m}$ | | |
| Erro Médio | 3.1226 | 0.6670 | 6.4198 | 2.6881 |
| Desvio Padrão | 1.1633 | 1.5802 | 13.1359 | 4.9223 |
| Erro RMS | 3.3322 | 1.7152 | 14.6207 | 5.6084 |

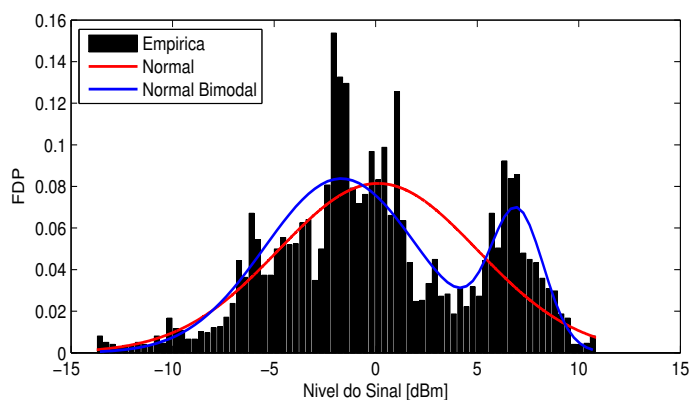
Anexo 2 – Desvanecimento de Larga Escala

Rádio CBN AM Rota 2 Diurno



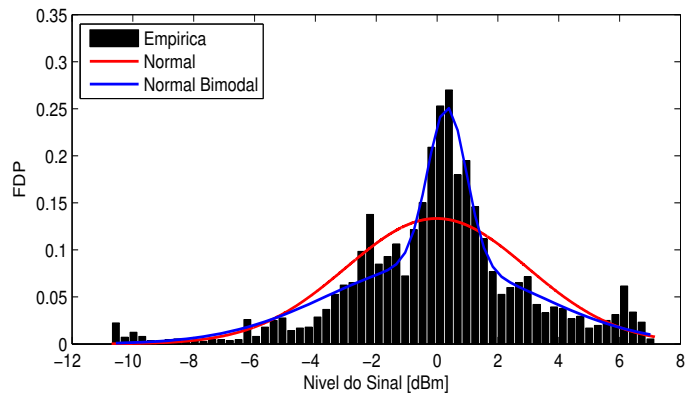
| Modo | Parâmetro | Valor | |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | 3.55 | |
| | μ_1 | 0.08 | |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 8e-04 | |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | sim | |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 3.98 |
| | | μ_1 | -0.94 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 1.69 |
| | | μ_2 | 1.75 |
| | p | | 0.62 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 5.23e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Rádio CBN AM Rota 3 Diurno



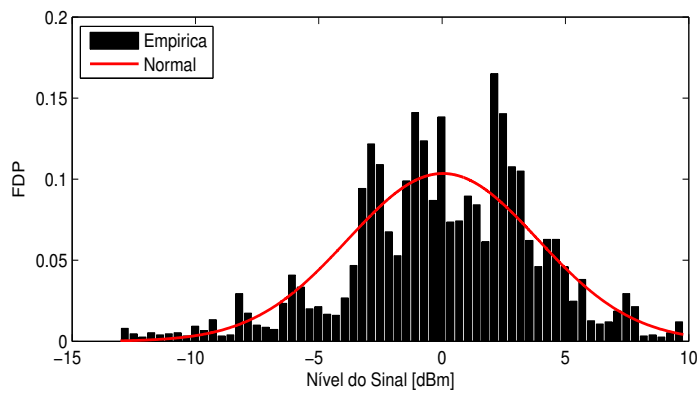
| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 4.90 |
| | μ_1 | | 0.12 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 5.80e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 3.77 |
| | | μ_1 | -1.69 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 1.30 |
| | | μ_2 | 6.98 |
| | p | | 0.79 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 3.15e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Rádio CBN AM Rota 6 Diurno



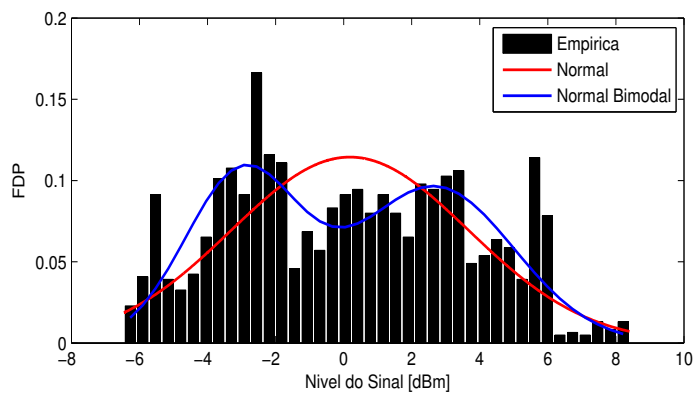
| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 2.99 |
| | μ_1 | | -0.01 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 11e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 3.46 |
| | | μ_1 | -0.14 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 0.63 |
| | | μ_2 | 0.33 |
| | p | | 0.73 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 2.78e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Rádio CBN AM Rota 7 Diurno



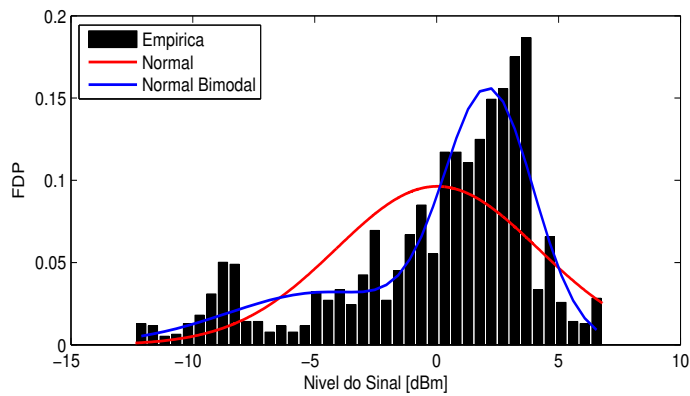
| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| σ | 3.85 |
| μ | 0.03 |
| Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 4.72e-04 |
| Passa o teste de Qui-Quadrado | sim |

Rádio CBN AM Rota 2 Noturno



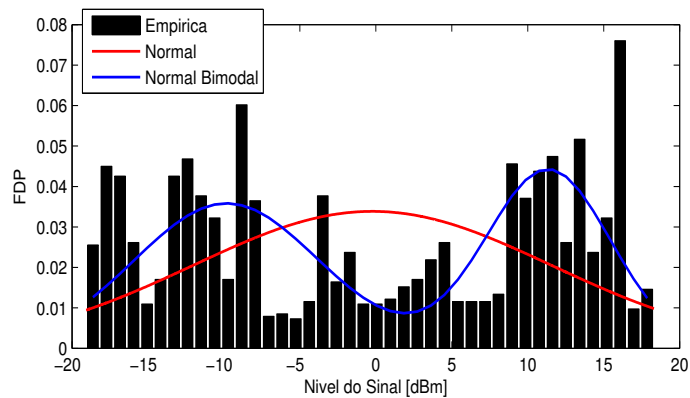
| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 3.49 |
| | μ_1 | | 0.018 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 9.88e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 1.69 |
| | | μ_1 | -2.99 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 2.33 |
| | | μ_2 | 2.67 |
| | p | | 0.44 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 6.12e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Rádio CBN AM Rota 3 Noturno



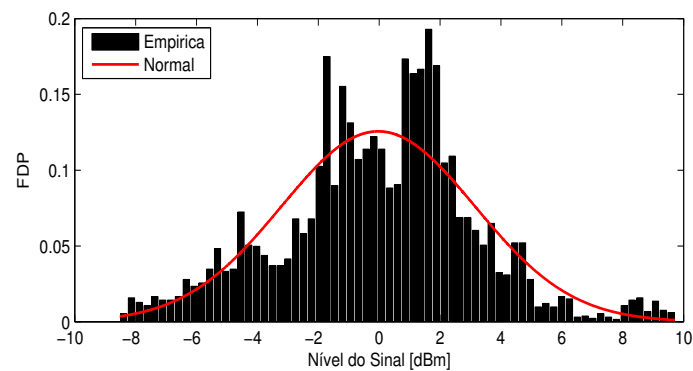
| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 4.14 |
| | μ_1 | | 0.02 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 15e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 3.97 |
| | | μ_1 | -4.58 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 1.83 |
| | | μ_2 | 2.17 |
| | p | | 0.32 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 5.14e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Rádio CBN AM Rota 7 Noturno



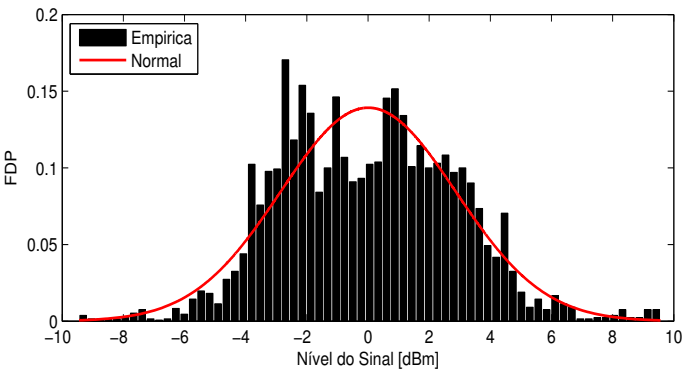
| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 11.79 |
| | μ_1 | | -0.23 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 4.38e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 6.08 |
| | | μ_1 | -9.83 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 4.09 |
| | | μ_2 | 11.34 |
| | p | | 0.55 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 2.37e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

Rádio Cultura AM Rota 2 Diurno



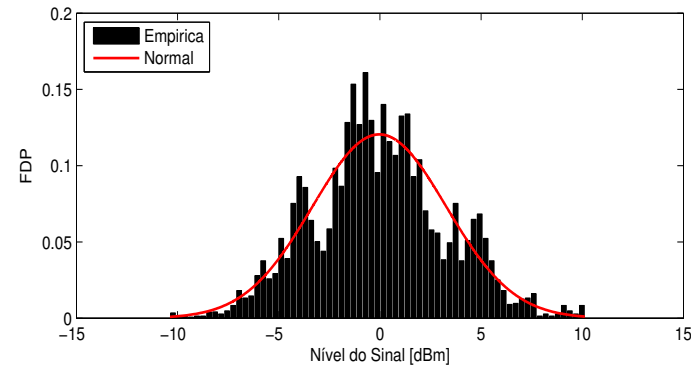
| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| σ | 3.18 |
| μ | -0.03 |
| Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 5.79e-04 |
| Passa o teste de Qui-Quadrado | sim |

Rádio Cultura AM Rota 3 Diurno



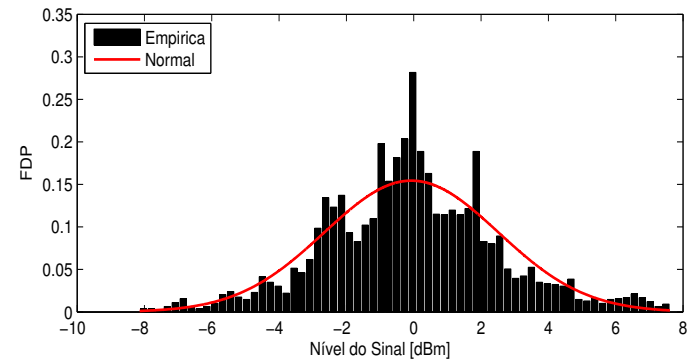
| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| σ | 2.87 |
| μ | 0.01 |
| Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 4.03e-04 |
| Passa o teste de Qui-Quadrado | sim |

Rádio Cultura AM Rota 4 Diurno



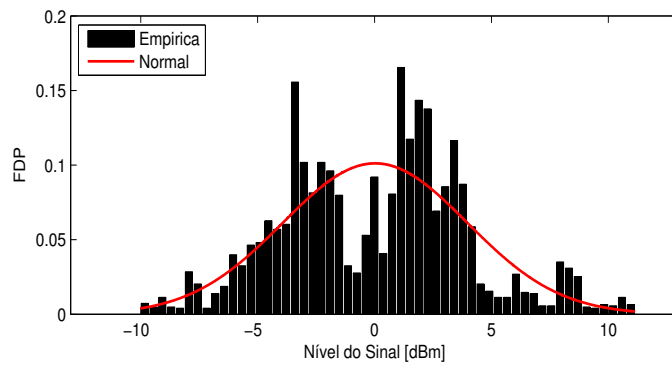
| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| σ | 3.31 |
| μ | -0.03 |
| Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 2.83e-04 |
| Passa o teste de Qui-Quadrado | sim |

Rádio Cultura AM Rota 5 Diurno



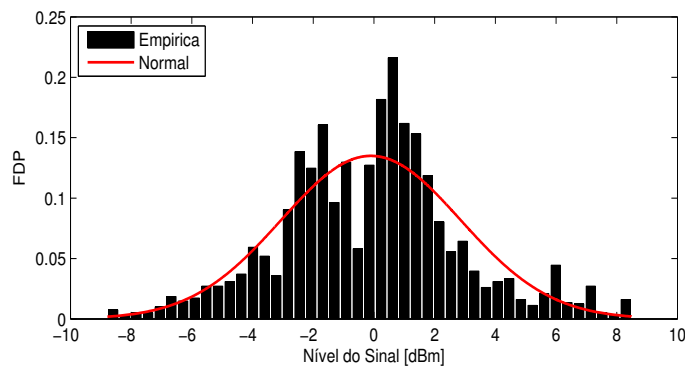
| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| σ | 2.58 |
| μ | -0.07 |
| Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 7.05e-04 |
| Passa o teste de Qui-Quadrado | sim |

Rádio Cultura AM Rota 6 Diurno



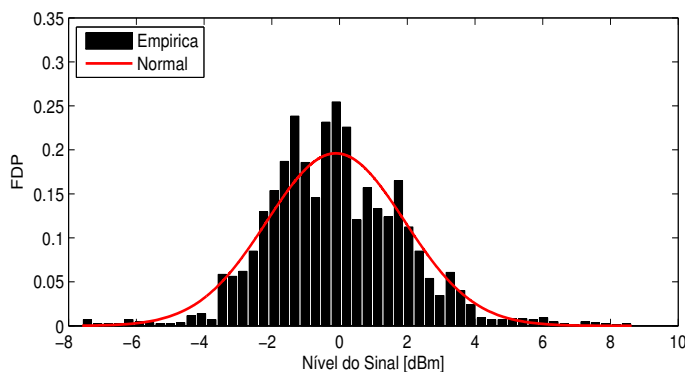
| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| σ | 3.94 |
| μ | 0.03 |
| Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 7.87e-04 |
| Passa o teste de Qui-Quadrado | sim |

Rádio Cultura AM Rota 7 Noturno



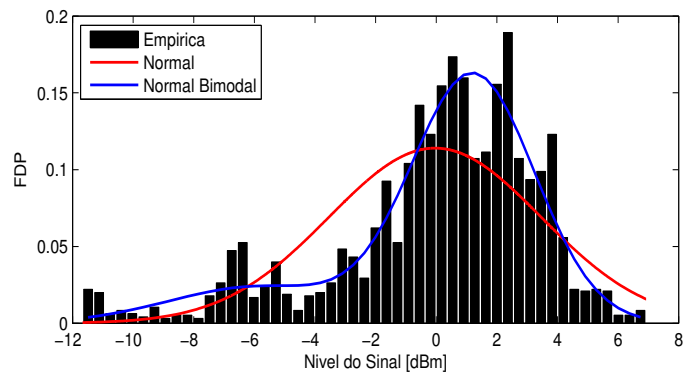
| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| σ | 2.96 |
| μ | -0.10 |
| Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 6.87e-04 |
| Passa o teste de Qui-Quadrado | sim |

Rádio Cultura AM Rota 8 Noturno



| Parâmetro | Valor |
|---|----------|
| σ | 2.04 |
| μ | -0.11 |
| Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | 5.12e-04 |
| Passa o teste de Qui-Quadrado | sim |

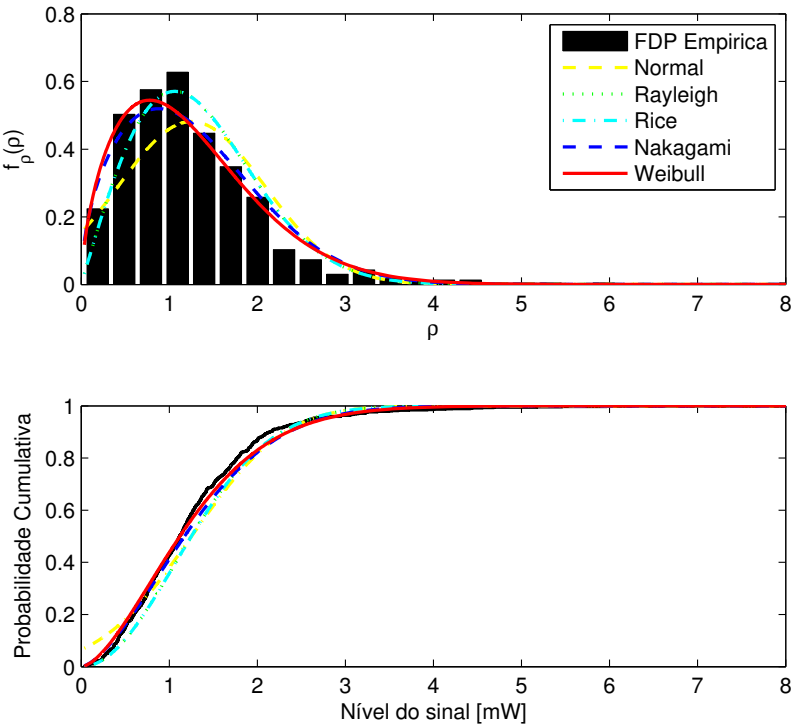
Rádio Cultura AM Rota 9 Noturno



| Modo | Parâmetro | | Valor |
|----------|---|------------|----------|
| Unimodal | σ_1 | | 3.499 |
| | μ_1 | | -0.04 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 10e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |
| Bimodal | $g_1(x)$ | σ_1 | 2.95 |
| | | μ_1 | -5.86 |
| | $g_2(x)$ | σ_2 | 2.03 |
| | | μ_2 | 1.22 |
| | p | | 0.18 |
| | Erro médio quadrático entre os valores observados e esperados | | 3.62e-04 |
| | Passa o teste de Qui-Quadrado | | sim |

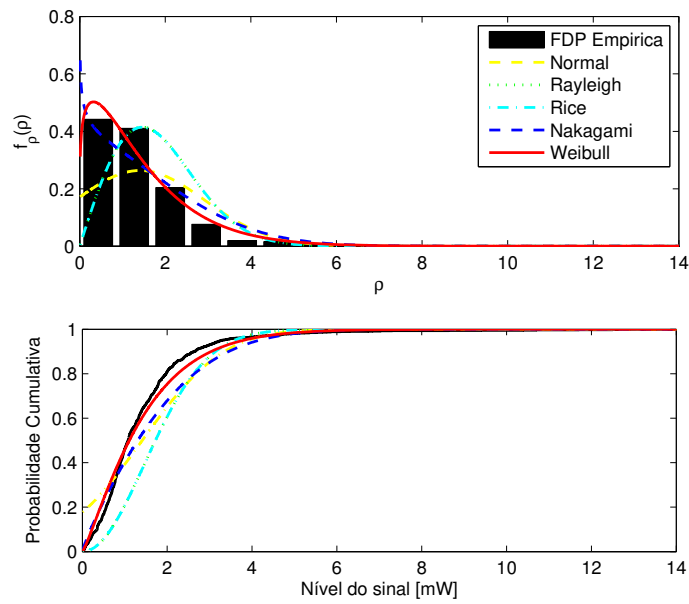
Anexo 3 – Desvanecimento de Pequena Escala

Rádio CBN AM Rota 2 Diurno



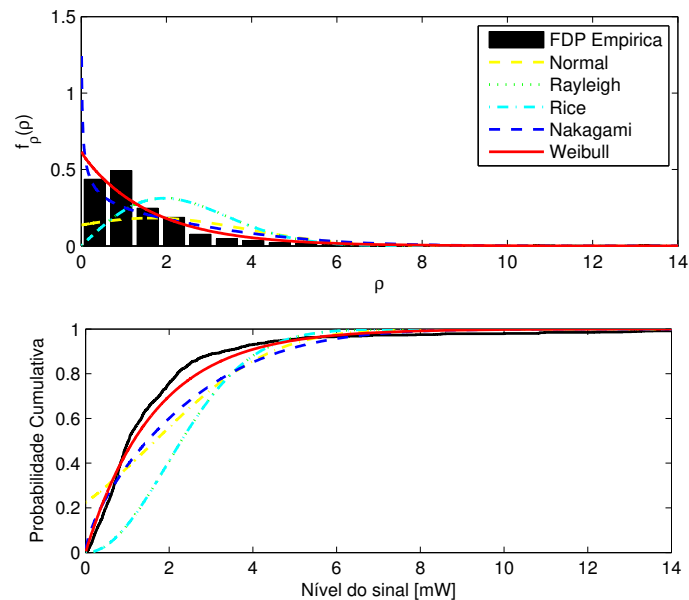
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.25 | 0.83 | 1.06 | 0.03 | 1.06 | 0.76 | 2.26 | 1.40 | 1.62 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.2088 | | 0.2440 | 0.2894 | | 0.3206 | | 0.3216 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | sim | sim | | não | | sim | |

Rádio CBN AM Rota 3 Diurno



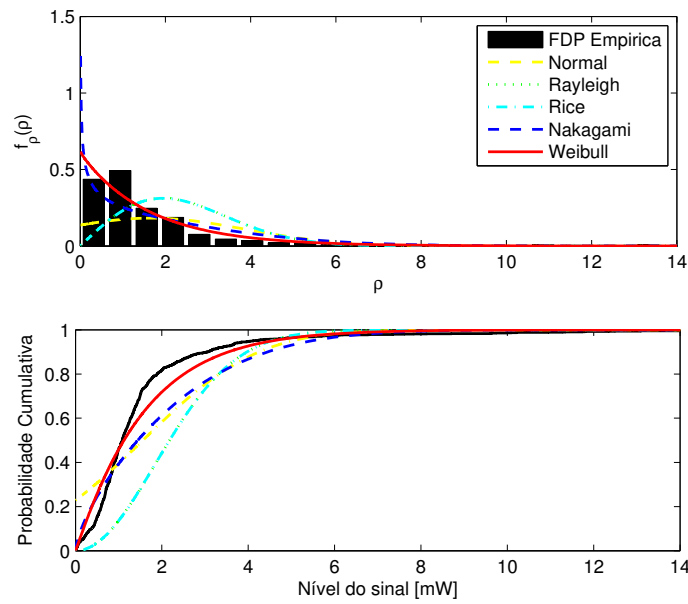
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.41 | 1.51 | 1.46 | 0.02 | 1.48 | 0.44 | 4.28 | 1.51 | 1.19 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1791 | | 0.2077 | 0.1926 | | 0.1463 | | 0.1106 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio CBN AM Rota 6 Diurno



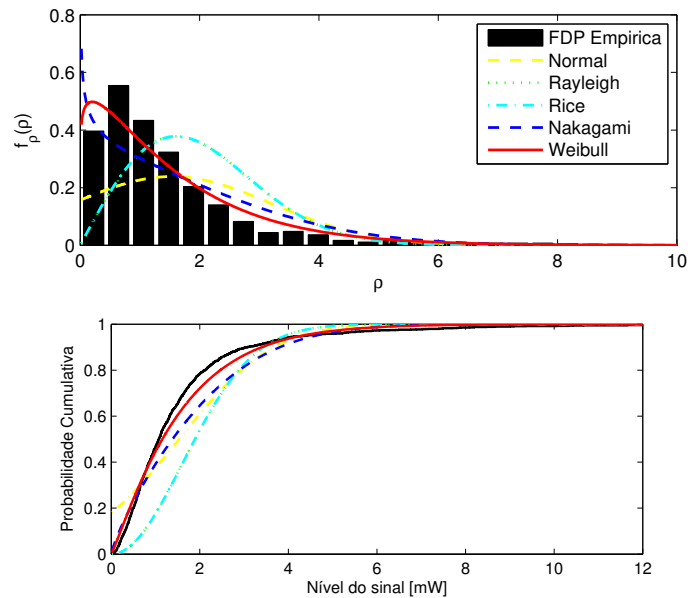
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.67 | 2.19 | 1.94 | 0.01 | 1.90 | 0.33 | 7.56 | 1.66 | 0.99 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1456 | | 0.1563 | 0.1613 | | 0.1588 | | 0.1497 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio CBN AM Rota 7 Diurno



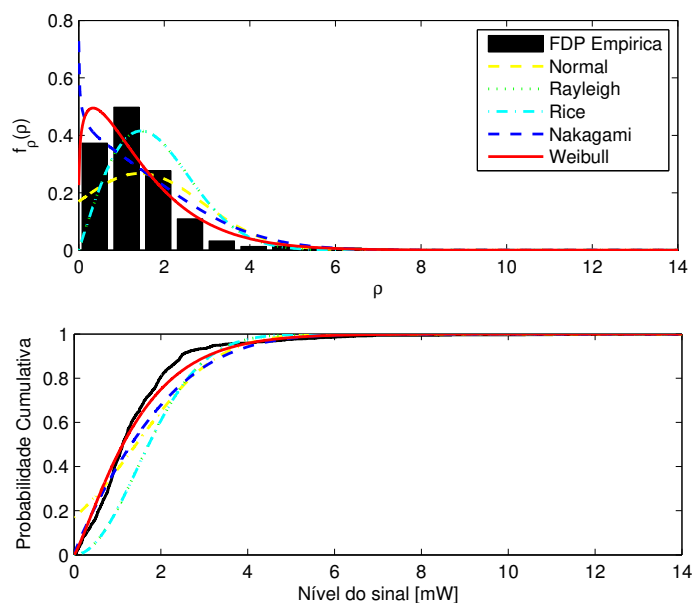
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.56 | 2.10 | 1.85 | 0.01 | 1.84 | 0.35 | 6.85 | 1.59 | 1.05 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1510 | | 0.1648 | 0.1569 | | 0.1325 | | 0.1092 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio CBN AM Rota 2 Noturno



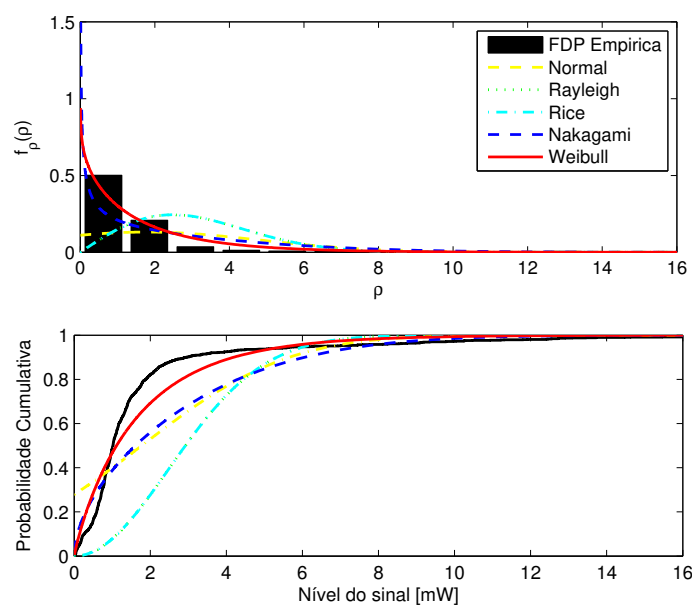
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.53 | 1.67 | 1.61 | 0.04 | 1.60 | 0.41 | 5.15 | 1.60 | 1.11 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1634 | | 0.1776 | 0.1885 | | 0.1932 | | 0.1904 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio CBN AM Rota 3 Noturno



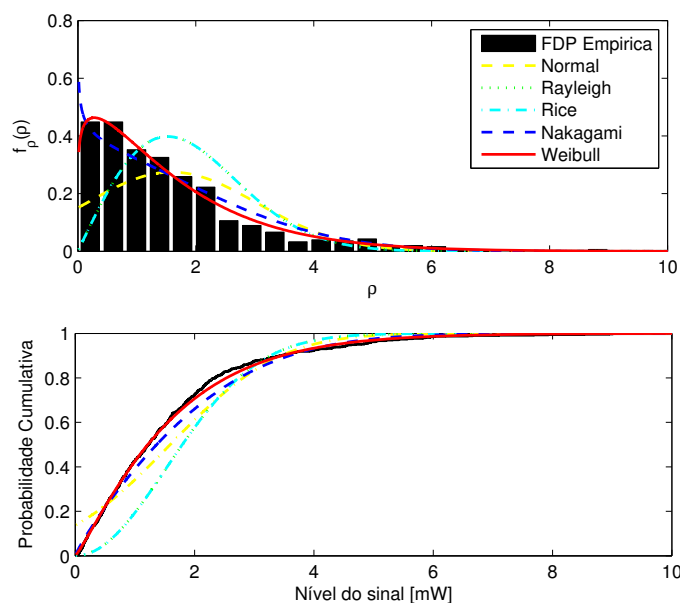
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.43 | 1.49 | 1.46 | 0.02 | 1.46 | 0.44 | 4.27 | 1.52 | 1.20 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1770 | | 0.2076 | 0.2046 | | 0.1701 | | 0.1296 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio CBN AM Rota 7 Noturno



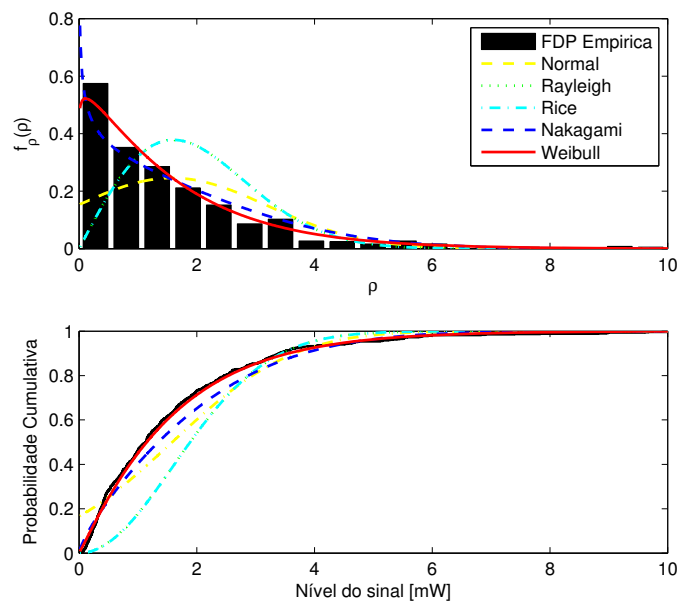
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.78 | 3.03 | 2.48 | 0.03 | 2.46 | 0.28 | 12.33 | 1.67 | 0.91 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1248 | | 0.1300 | 0.1234 | | 0.1093 | | 0.0973 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio Cultura AM Rota 2 Diurno



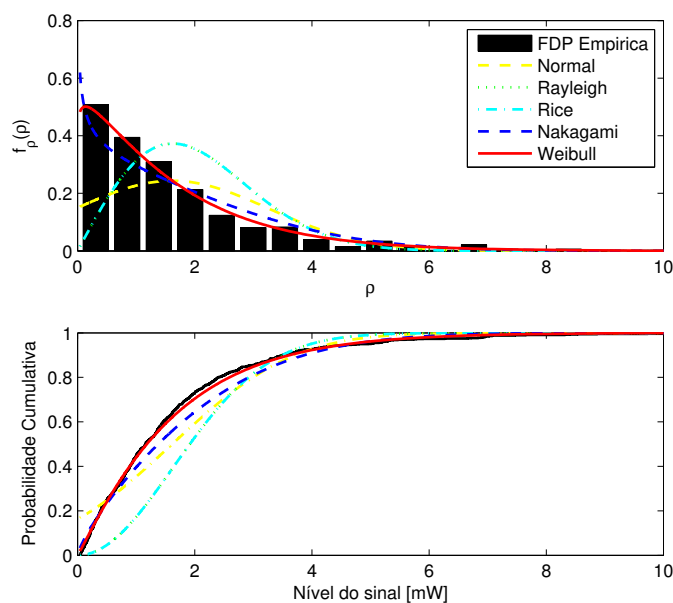
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.59 | 1.45 | 1.52 | 0.05 | 1.51 | 0.44 | 4.65 | 1.67 | 1.15 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1562 | | 0.1731 | 0.1895 | | 0.1994 | | 0.1993 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | sim | | sim | |

Rádio Cultura AM Rota 3 Diurno



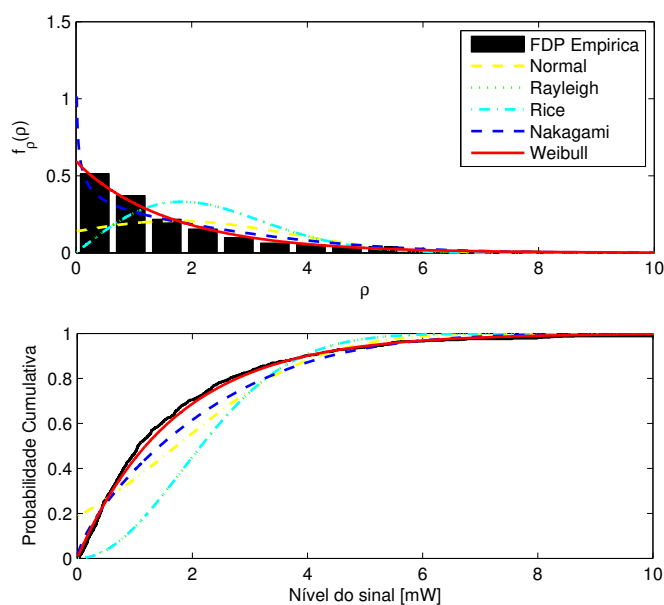
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.58 | 1.62 | 1.60 | 0.05 | 1.60 | 0.39 | 5.14 | 1.62 | 1.06 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1615 | | 0.1805 | 0.1926 | | 0.1925 | | 0.1801 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio Cultura AM Rota 4 Diurno



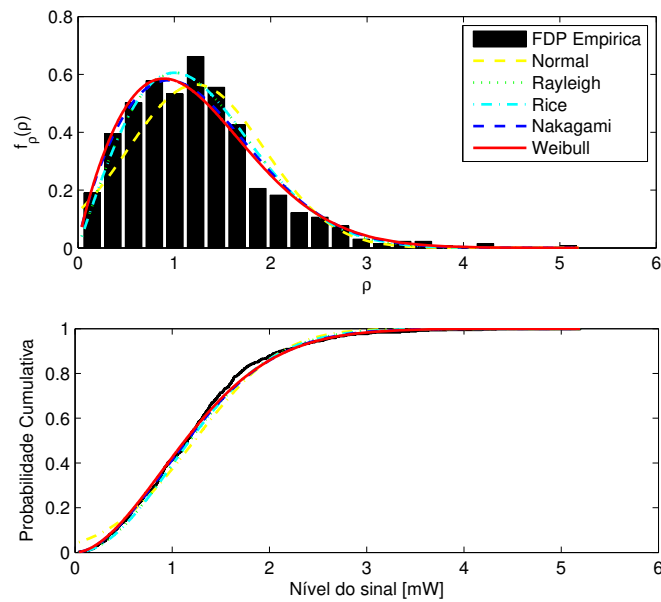
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.62 | 1.64 | 1.63 | 0.04 | 1.63 | 0.40 | 5.30 | 1.66 | 1.07 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1577 | | 0.1783 | 0.1906 | | 0.1895 | | 0.1756 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio Cultura AM Rota 5 Diurno



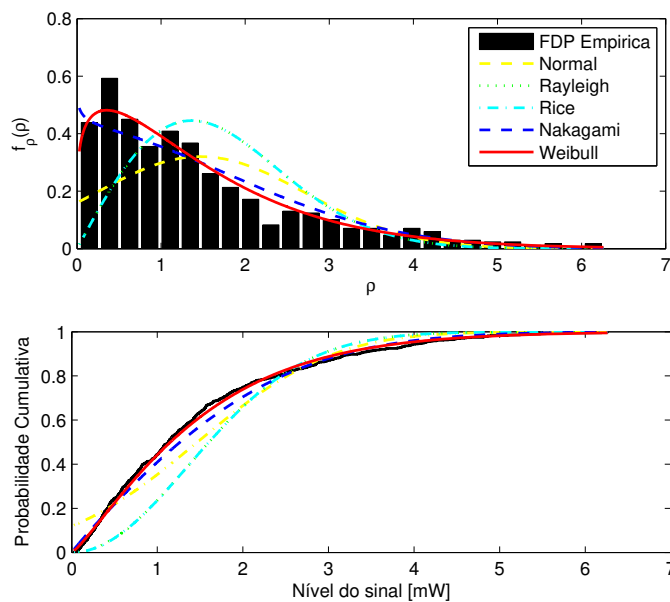
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.72 | 1.93 | 1.83 | 0.05 | 1.83 | 0.35 | 6.69 | 1.72 | 0.99 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1479 | | 0.1632 | 0.1713 | | 0.1685 | | 0.1560 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | não | | sim | |

Rádio Cultura AM Rota 6 Diurno



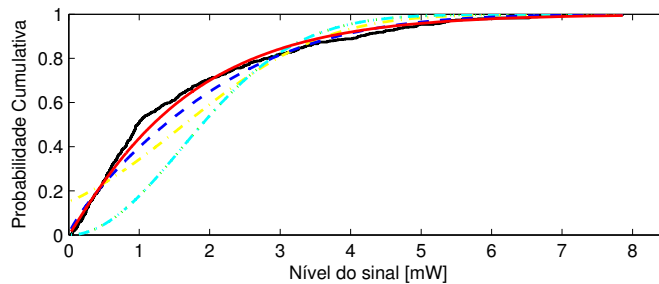
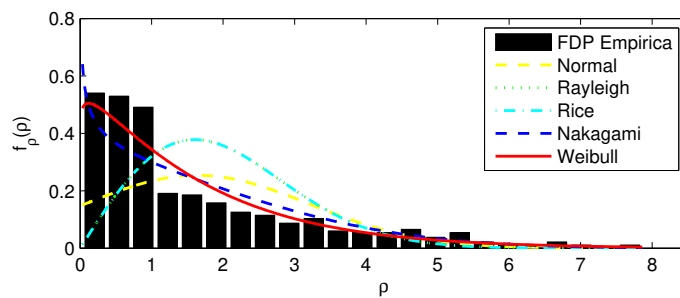
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.23 | 0.71 | 1.00 | 0.01 | 1.01 | 0.89 | 2.01 | 1.38 | 1.82 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.2440 | | 0.2354 | 0.2607 | | 0.3009 | | 0.3354 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | sim | sim | | sim | | sim | |

Rádio Cultura AM Rota 7 Noturno



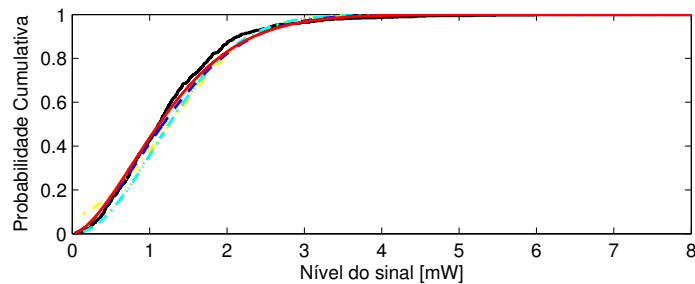
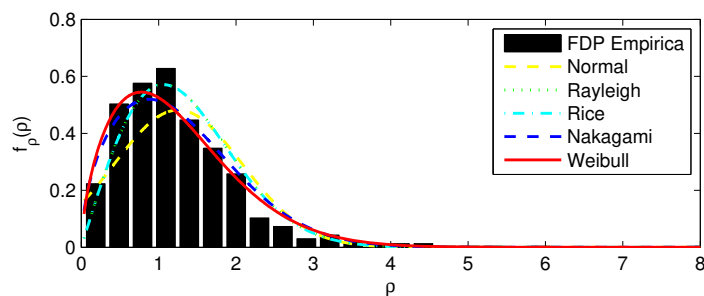
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.47 | 1.25 | 1.36 | 0.05 | 1.36 | 0.47 | 3.71 | 1.56 | 1.20 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1752 | | 0.1752 | 0.1836 | | 0.1940 | | 0.2029 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | sim | sim | | sim | | sim | |

Rádio Cultura AM Rota 8 Noturno



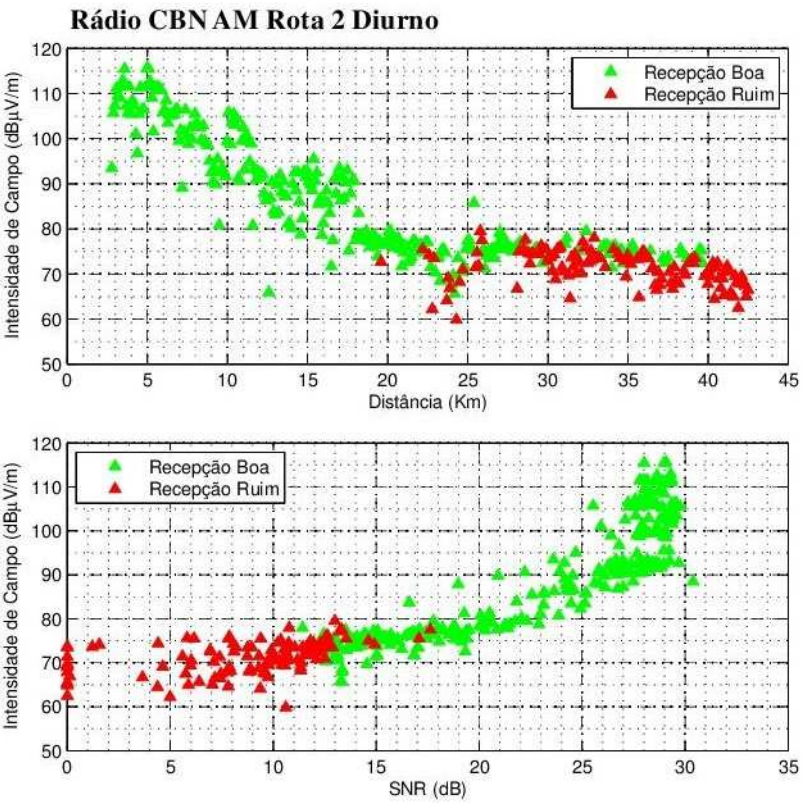
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.64 | 1.57 | 1.60 | 0.05 | 1.60 | 0.40 | 5.14 | 1.68 | 1.06 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.1683 | | 0.1734 | 0.1811 | | 0.1879 | | 0.1912 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | não | não | | sim | | sim | |

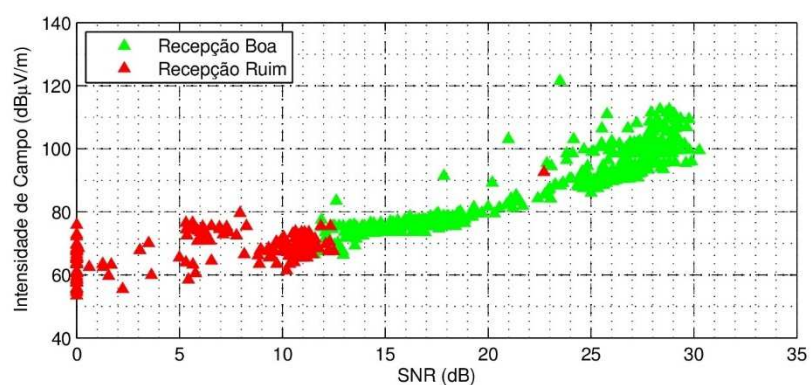
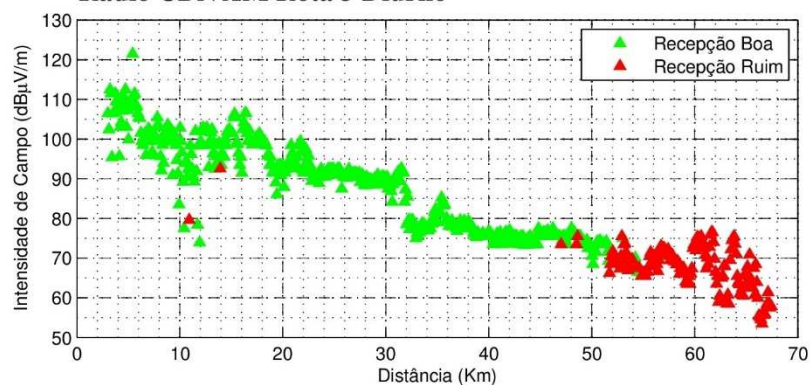
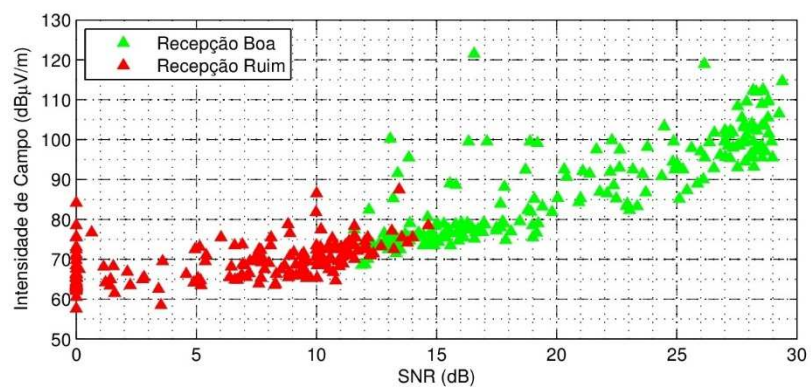
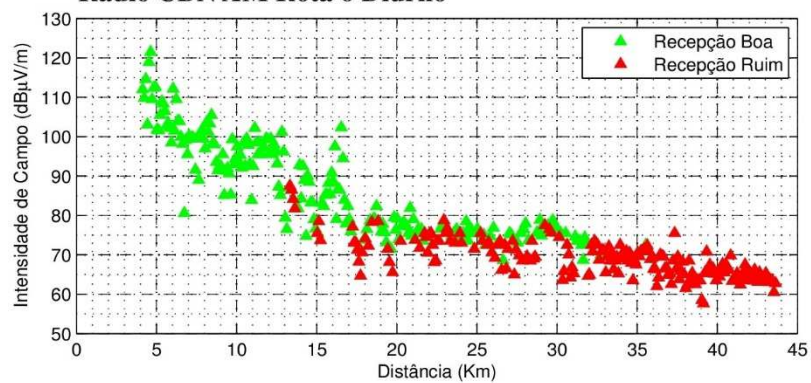
Rádio Cultura AM Rota 9 Noturno



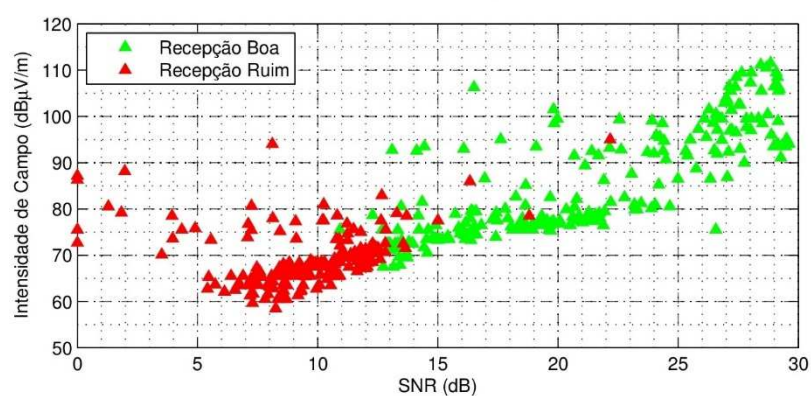
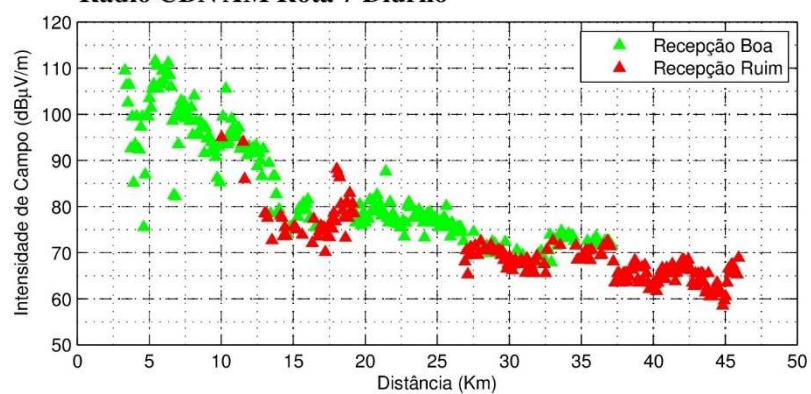
| | Normal | | Rayleigh | Rice | | Nakagami | | Weibull | |
|---|-----------|--------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
| | (μ) | (σ) | (σ) | (s) | (σ) | (m) | (Ω) | (a) | (b) |
| Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | 1.25 | 0.83 | 1.06 | 0.03 | 1.06 | 0.76 | 2.26 | 1.40 | 1.62 |
| Erro RMS entre os valores observados e esperados | 0.2088 | | 0.2440 | 0.2894 | | 0.3206 | | 0.3216 | |
| Distribuições que passaram no teste de Qui-Quadrado | não | | sim | sim | | sim | | sim | |

Anexo 4 – Qualidade de Recepção

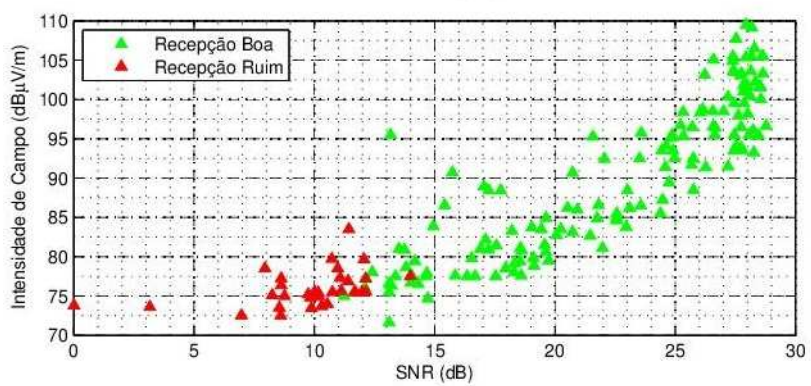
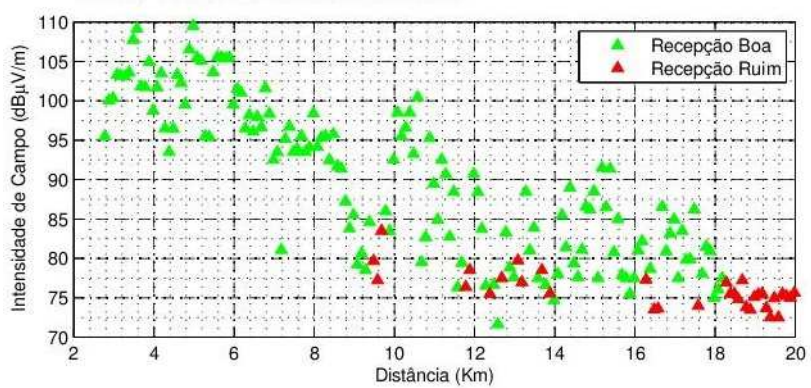


Rádio CBN AM Rota 3 Diurno**Rádio CBN AM Rota 6 Diurno**

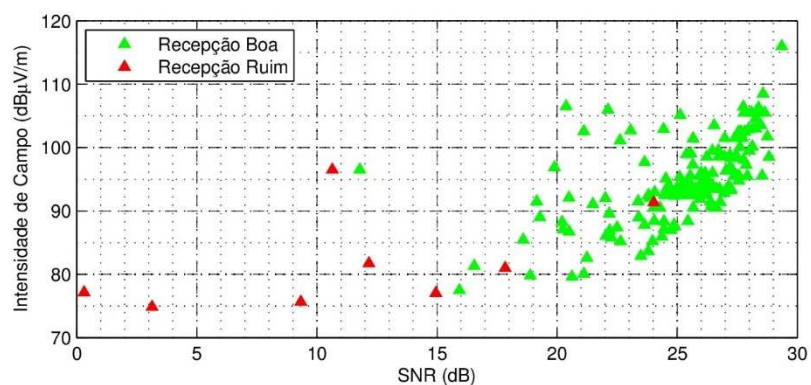
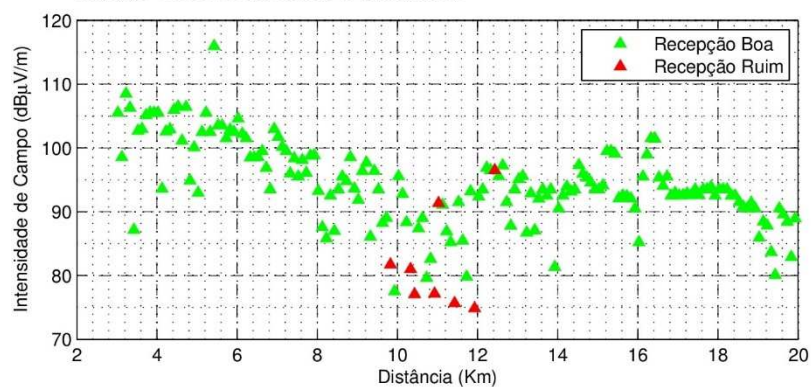
Rádio CBN AM Rota 7 Diurno



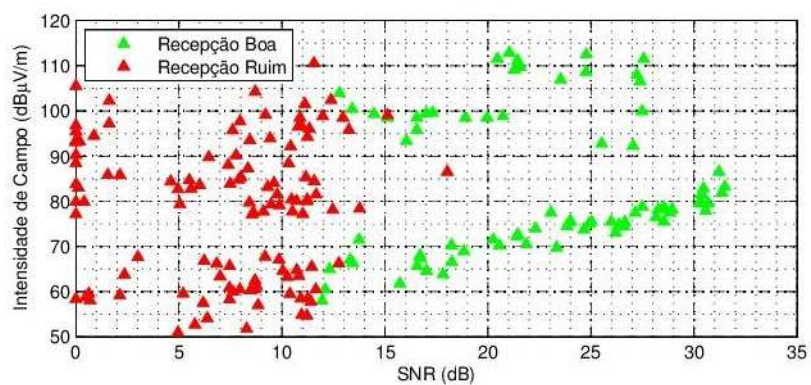
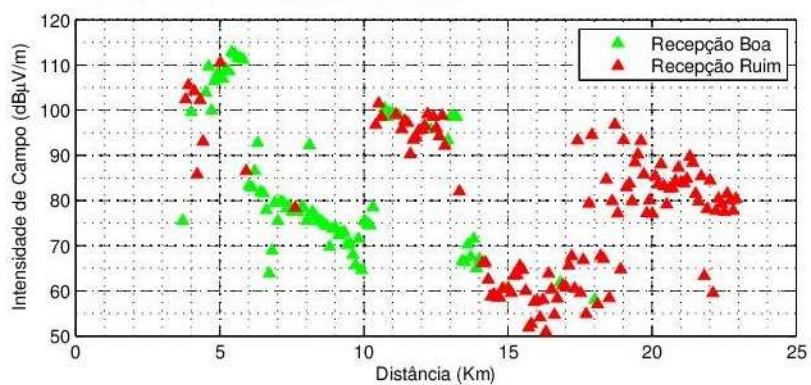
Rádio CBN AM Rota 2 Noturno

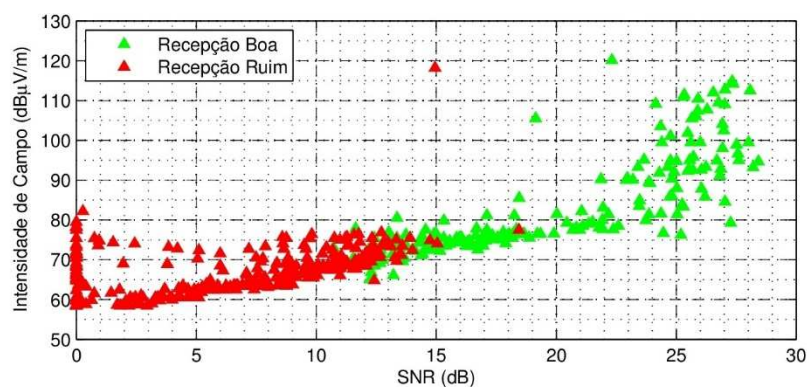
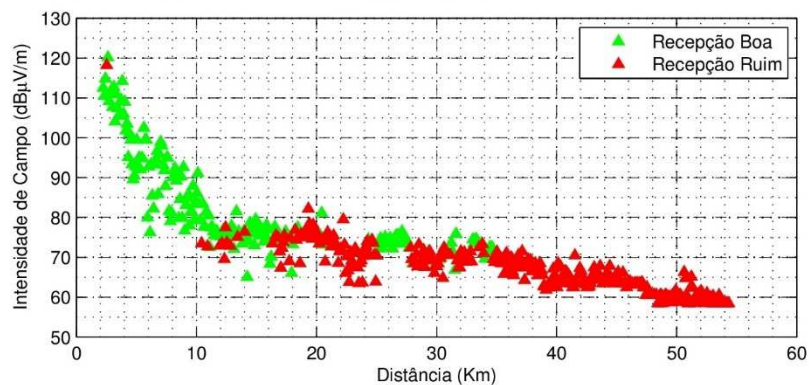
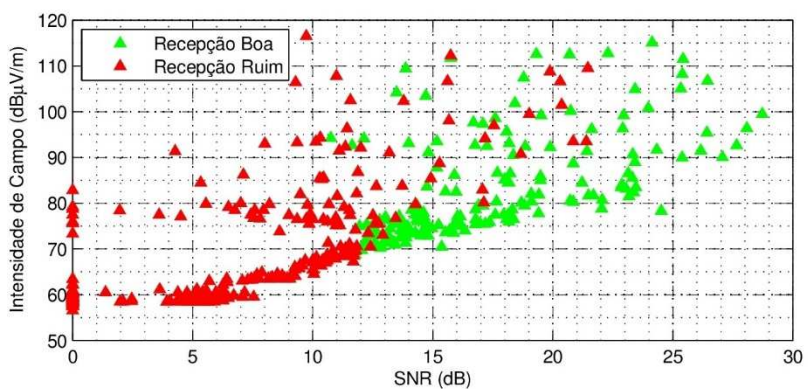
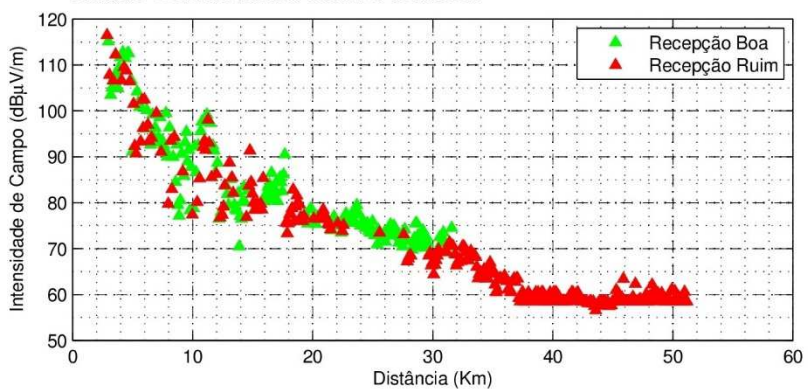


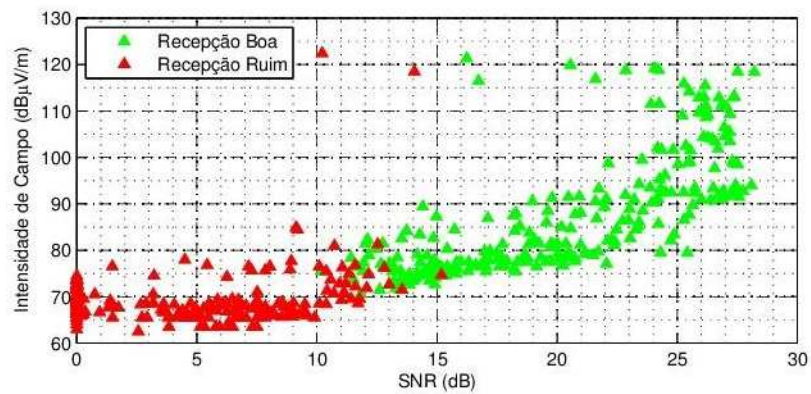
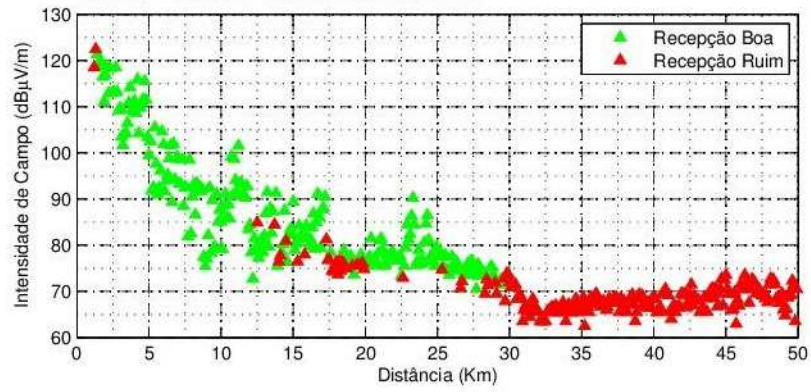
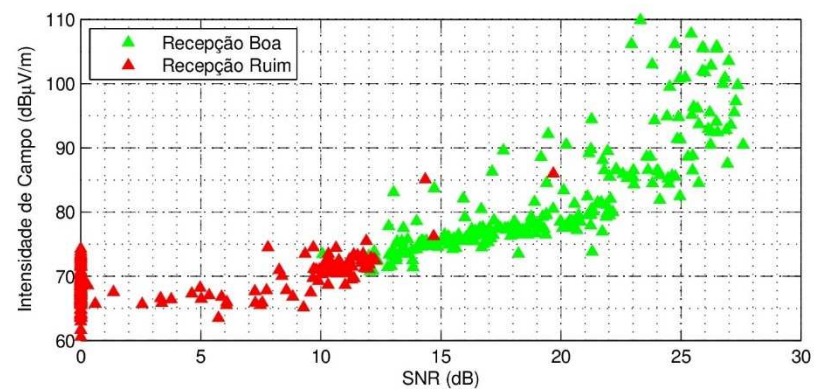
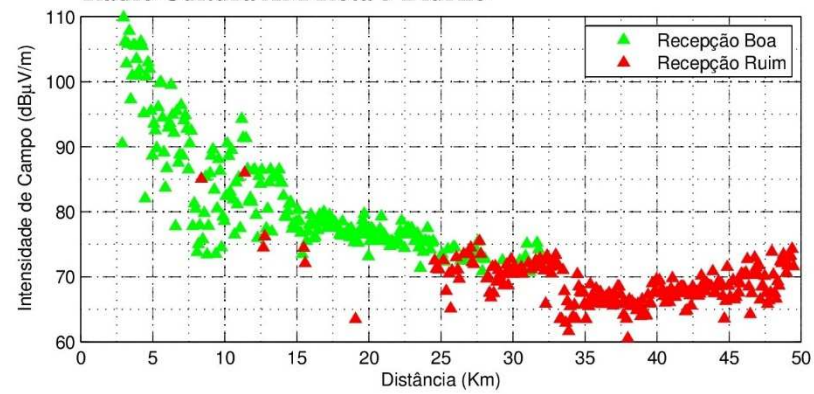
Rádio CBN AM Rota 3 Noturno



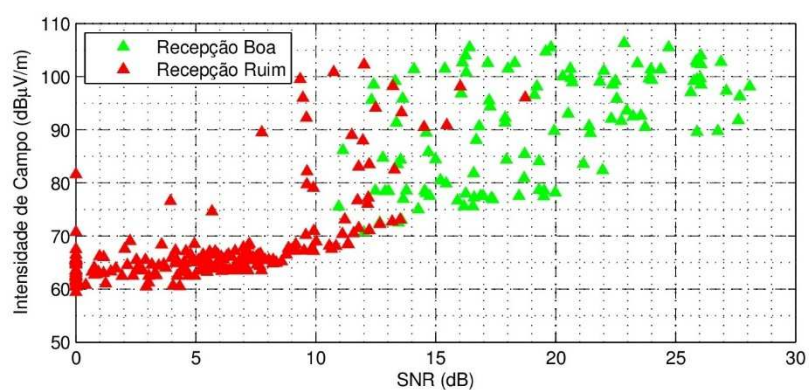
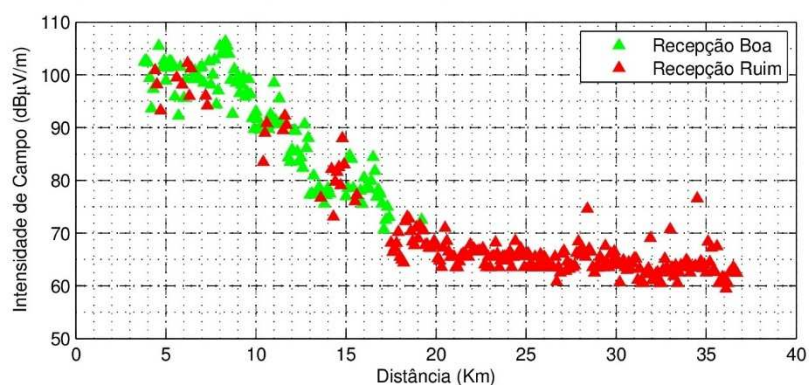
Rádio CBN AM Rota 7 Noturno



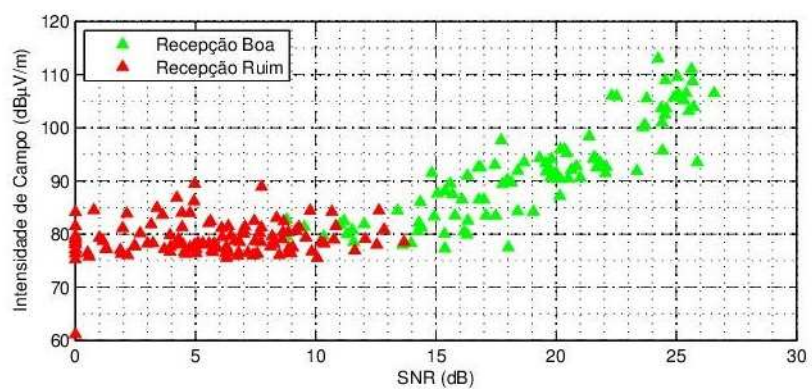
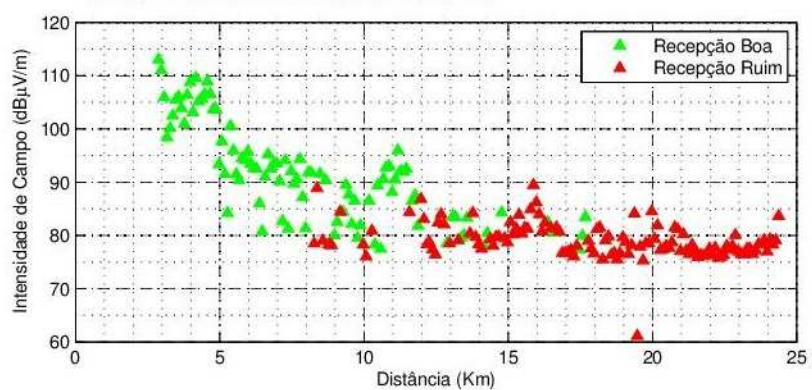
Rádio Cultura AM Rota 2 Diurno**Rádio Cultura AM Rota 3 Diurno**

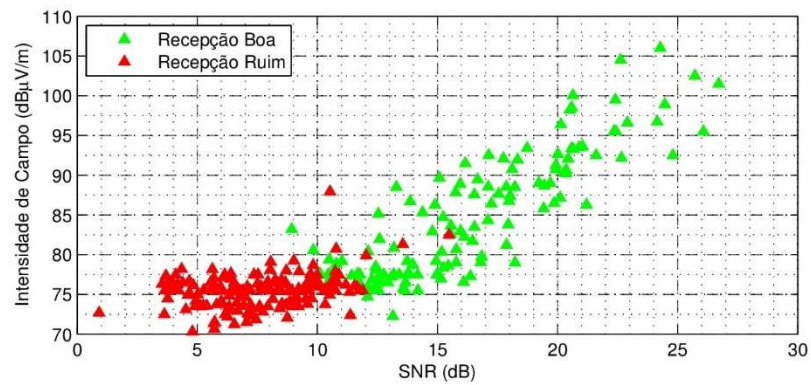
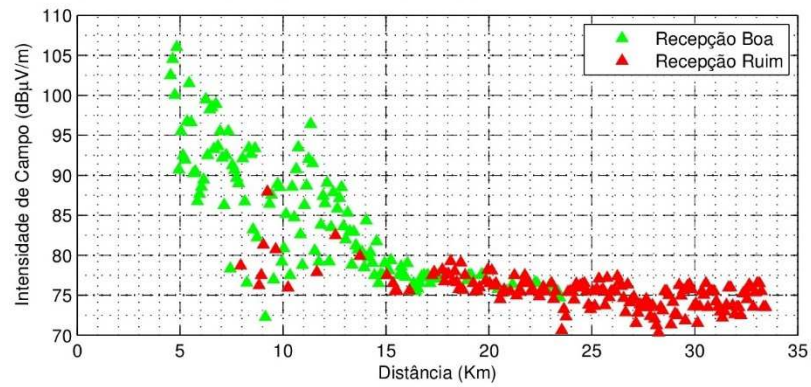
Rádio Cultura AM Rota 4 Diurno**Rádio Cultura AM Rota 5 Diurno**

Rádio Cultura AM Rota 6 Diurno



Rádio Cultura AM Rota 7 Noturno



Rádio Cultura AM Rota 8 Noturno**Rádio Cultura AM Rota 9 Noturno**