

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RADIODIFUSÃO LOCAL NA FAIXA DE 26 MHz USANDO  
DRM – RESULTADOS DE TESTES EM BRASÍLIA**

**RAFAEL GRANJA NEVES**

**ORIENTADOR: LÚCIO MARTINS DA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 294/07**

**BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RADIODIFUSÃO LOCAL NA FAIXA DE 26 MHz USANDO DRM –  
RESULTADOS DE TESTES EM BRASÍLIA**

**RAFAEL GRANJA NEVES**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Lúcio Martins da Silva, Doutor (ENE-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Humberto Abdalla Jr., Dr. Ing. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Nelson Henriques Dantas, Ph.D.  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 16 DE MARÇO DE 2007**

## FICHA CATALOGRÁFICA

NEVES, RAFAEL GRANJA

Radiodifusão Local na Faixa de 26 MHz Usando DRM – Resultados de Testes em Brasília [Distrito Federal] 2007.

xvi, 104p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2007).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Radiodifusão digital

2. Radiodifusão em 26 MHz

3. Testes de campo

4. Sistema DRM

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NEVES, R. G. (2007). Radiodifusão Local na Faixa de 26 MHz Usando DRM – Resultados de Testes em Brasília. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-294/07, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rafael Granja Neves.

TÍTULO: Radiodifusão Local na Faixa de 26 MHz Usando DRM – Testes em Brasília.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Rafael Granja Neves

SQSW 302 Bloco G Apartamento 501, Setor Sudoeste.

70.673-207 Brasília – DF – Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela saúde e orientação para concluir este curso;

A meus pais e à minha irmã pela paciência e ajuda;

Aos meus parentes e amigos pelo suporte e pelos momentos de descontração;

A todos aqueles envolvidos na realização dos testes nos quais essa dissertação está baseada:

Primeiramente ao professor Lúcio pelo apoio e instrução constantes, nas reuniões, na realização dos testes e na solução dos problemas e dúvidas surgidos;

Aos professores Humberto Abdalla Jr. e Antônio José Martins Soares, além de Flávio Ferreira Lima e Thiago Aguiar Soares pela contribuição nas reuniões de planejamento que possibilitaram a realização dos testes;

Aos participantes das medições: Flávio, Thiago, Iván, Roque, Georges e Sérgio pelo trabalho e companheirismo;

Ao Osman (in memoriam) e ao Toshihiro, da Radiobrás, pela disposição e ajuda;

À Radiobrás pelo veículo de medição utilizado nos testes e pelo fornecimento de parte do conteúdo sonoro utilizado;

Aos motoristas cedidos pela Radiobrás pela paciência e disposição;

Ao consórcio DRM pela cessão de boa parte dos equipamentos e softwares utilizados nos testes e pelas instruções técnicas quanto à realização dos mesmos;

Ao professor Paulo Henrique Portela de Carvalho e ao Laboratório de Estruturas de Microondas e Ondas Milimétricas (LEMOM) pelo empréstimo do analisador de espectro e do aparelho GPS;

Ao professor Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira e ao Laboratório de Alta Tensão pelo uso do local para estacionar o veículo de medição;

À Rádio Câmara por ceder sua torre de transmissão para a instalação da antena transmissora e pelo espaço para acomodar os equipamentos do transmissor.

## RESUMO

A digitalização da radiodifusão sonora está em andamento em vários países do mundo. Um dos sistemas disponíveis para essa digitalização é o Digital Radio Mondiale (DRM), que foi concebido para ser usado em frequências inferiores a 30 MHz. Esse sistema pode propiciar recepção e áudio de qualidade muito superior àquela oferecida pela radiodifusão sonora AM, utilizando canais com largura de 10 ou 20 kHz. Uma aplicação desse sistema que tem despertado interesse é a radiodifusão local na faixa de 26 MHz (25,67 a 26,1 MHz), por meio de propagação em linha de visada, de forma semelhante ao que se faz em VHF usando a modulação analógica FM. A faixa de 26 MHz é usada tradicionalmente para transmissão de longa distância por meio de reflexão ionosférica, mas essa propagação não é efetiva na maior parte do ciclo de 11 anos da atividade solar. Por isso, ela é muito pouco utilizada. Com objetivo de avaliar o desempenho do sistema DRM em transmissões locais na faixa de 26 MHz e, conseqüentemente, a viabilidade dessa modalidade de radiodifusão, foi realizada uma campanha de testes de campo em Brasília. Essa dissertação descreve os testes realizados e os resultados obtidos. Esses testes indicaram que o sinal DRM de 26 MHz pode ter uma área de cobertura similar a de um sinal FM/VHF, tendo uma potência bem menor que a desse último. Contudo, podem ocorrer interrupções do áudio recuperado quando a recepção é em movimento e se está nos limites da área de cobertura ou em local onde a intensidade do sinal recebido varia muito por causa dos múltiplos percursos de propagação. Testes complementares e testes de maior duração são recomendados para uma avaliação mais indubitável da viabilidade dessa modalidade de radiodifusão.

## **ABSTRACT**

The digitalization of the sound broadcasting systems is currently underway throughout the world. One of the systems available for such a process is Digital Radio Mondiale (DRM), which is currently designed to operate in frequencies below 30 MHz. Through the use of the DRM system, a much higher audio quality can be achieved than that of AM radio with the use of 10 or 20 kHz wide channels. One interesting application of this system is local broadcasting in the 26 MHz band (25.67 to 26.1 MHz), using line-of-sight propagation in a way similar to that used in VHF, with frequency modulated signals. The 26 MHz band is traditionally used for long range transmission through ionospheric reflection. However, this propagation method is not effective in most of the time of the 11 year sunspot cycle. Therefore it is nowadays scarcely used. A test campaign was carried out in Brasilia in the attempt to better evaluate the performance of the DRM system for local broadcasting in the 26 MHz band and consequently the viability of such an application. This dissertation describes those tests and the results obtained. There was a clear indication that the 26 MHz DRM signal can achieve a reception area similar to that of a FM/VHF signal using a much lower radiated power. Nevertheless, audio dropouts can occur in the mobile reception performed in the boundaries of the reception area or in locations where the signal received experiences strong variations caused by multipath propagation. Some complementary tests, as well as some long-term tests, should be made in order to better endorse this broadcasting strategy.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 SUMÁRIO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 A RADIODIFUSÃO SONORA NA FAIXA DE 26 MHZ .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 A FAIXA DE 26 MHZ NO BRASIL.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 CANALIZAÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2.4 POSSÍVEIS ADVERSIDADES DA FAIXA DE 26 MHZ .....</b>	<b>8</b>
<b>3 DESCRIÇÃO DOS TESTES REALIZADOS .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1 SISTEMA DE TRANSMISSÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2 SISTEMA DE RECEPÇÃO E DE MEDIÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3 MODOS DE TRANSMISSÃO DRM TESTADOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3.4 MEDIÇÕES REALIZADAS .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4.1 Qualidade do áudio.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4.2 Razão sinal-erro de modulação .....</b>	<b>19</b>
<b>3.5 ROTAS PERCORRIDAS .....</b>	<b>22</b>
<b>4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 MEDIÇÕES FIXAS COM O MODO DE TRANSMISSÃO B-21.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1.1 Medições em ambiente aberto .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.2 Medições em ambiente industrial.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1.3 Medições em ambiente residencial.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1.4 Medições em ambiente urbano denso .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2 MEDIÇÕES EM MOVIMENTO COM O MODO DE TRANSMISSÃO B-21.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.1 Medições em ambiente aberto .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.2 Medições em ambiente industrial.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.3 Medições em ambiente residencial.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.4 Medições em ambiente urbano denso .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.5 Medições ao longo das rotas radiais.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.6 Medições ao longo da rota Circular .....</b>	<b>55</b>

<b>4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O MODO DE TRANSMISSÃO B-21 .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.1 Análise das medições fixas .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.2 Análise das medições em movimento .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4 MEDIÇÕES COM O MODO DE TRANSMISSÃO B-38 .....</b>	<b>65</b>
<b>4.5 MEDIÇÕES COM O MODO DE TRANSMISSÃO A-41 .....</b>	<b>68</b>
<b>4.5.1 Rota Asa Norte (R11) .....</b>	<b>68</b>
<b>4.5.2 Rota Radial SW (R12) .....</b>	<b>72</b>
<b>5 ANÁLISE DA VIABILIDADE DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DRM NO BRASIL .....</b>	<b>80</b>
<b>5.1 MODOS DE ROBUSTEZ .....</b>	<b>80</b>
<b>5.2 LIMIARES DE RECEPÇÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>5.3 CAUSAS DOS ERROS OCORRIDOS .....</b>	<b>82</b>
<b>5.4 PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICA E INTERFERÊNCIA .....</b>	<b>84</b>
<b>5.5 INFLUÊNCIA DO LOCAL DOS TESTES .....</b>	<b>85</b>
<b>5.6 RECEPÇÃO INTERNA .....</b>	<b>86</b>
<b>5.7 LOCALIZAÇÃO DO TRANSMISSOR .....</b>	<b>86</b>
<b>5.8 EQUIPAMENTO DE RECEPÇÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>5.9 TOLERÂNCIA A IMPERFEIÇÕES .....</b>	<b>87</b>
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>94</b>
<b>A O SISTEMA DRM .....</b>	<b>95</b>
<b>A.1 HISTÓRICO .....</b>	<b>95</b>
<b>A.2 FAIXAS DE FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO E LARGURA DE FAIXA DO SINAL DRM .....</b>	<b>96</b>
<b>A.3 ARQUITETURA DO SISTEMA .....</b>	<b>96</b>
<b>A.3.1 Canais de informação .....</b>	<b>96</b>
A.3.1.1 Canal de acesso rápido .....	97
A.3.1.2 Canal de descrição de serviço .....	97



A.3.1.3 Canal de serviço principal.....	98
<b>A.3.2 Codificação de fonte e pré-codificadores .....</b>	<b>98</b>
<b>A.4 MODOS DE ROBUSTEZ .....</b>	<b>101</b>
<b>A.5 CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO.....</b>	<b>102</b>
<b>A.6 RADIODIFUSÃO ANALÓGICA E DIGITAL SIMULTÂNEA .....</b>	<b>103</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixas de freqüência em ondas curtas destinadas para radiodifusão no Brasil.	5
Tabela 3.1 – Dados sobre o sistema de transmissão do sinal DRM.	10
Tabela 3.2 – Modos de transmissão OFDM oferecidos pelo sistema DRM.	14
Tabela 3.3 - Modos de transmissão DRM utilizados nos testes.	16
Tabela 3.4 – Características da codificação de áudio utilizada com cada modo de transmissão DRM testado.	17
Tabela 3.5 – Rotas percorridas nos testes.	24
Tabela 4.1 – Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas em ambiente aberto.	28
Tabela 4.2 – Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas em ambiente industrial.	34
Tabela 4.3 – Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas em ambiente residencial.	35
Tabela 4.4 – Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas em ambiente urbano denso.	36
Tabela 4.5 - Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas com o modo B-38.	66
Tabela 4.6 - Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas na rota Asa Norte (R11).	68
Tabela 4.7 - Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas na rota Radial SW (R12).	72
Tabela A.1 – Características dos codificadores de fonte do DRM [20].	99
Tabela A.2 - Parâmetros OFDM dos quatro modos de robustez DRM [12], [21].	101
Tabela A.3 – Modos de robustez do sistema DRM.	102
Tabela A.4 – Taxa de bits disponível para o canal de serviço principal (MSC) [2].	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Localização do sistema de transmissão do sinal DRM.....	9
Figura 3.2 – Transmissor DRM: modulador-e-excitador (módulo da esquerda) e amplificador de RF (módulo da direita).....	10
Figura 3.3 – Antena utilizada durante os testes instalada na torre de transmissão.....	11
Figura 3.4 – Diagramas de radiação da antena transmissora usada nos testes.....	11
Figura 3.5 – Sistema de recepção utilizado durante os testes.....	13
Figura 3.6 – Veículo utilizado nos testes.....	13
Figura 3.7 – Amostra espectral do sinal DRM radiado medida a uma distância de aproximadamente 11 km do transmissor.....	15
Figura 3.8 – Constelação 16-QAM com pontos-alvo e respectivas regiões de decisão.....	20
Figura 3.9 – Constelações 16-QAM com BER nula, mas diferentes níveis de MER. (A) MER alta (B) MER baixa.....	21
Figura 3.10 – Interferência intermitente em uma constelação 64-QAM.....	22
Figura 3.11 – Algumas das rotas percorridas durante os testes.....	25
Figura 4.1 – Distribuição espacial dos pontos onde foram realizadas medições fixas com o modo de transmissão B-21. A cor do ponto indica a qualidade (AudioQ) da recepção.....	27
Figura 4.2 – Ponto onde foram realizadas as medições R1P4 e R1P4_2.....	28
Figura 4.3 – Ponto onde foi realizada a medição R2P3.....	29
Figura 4.4 – Diferentes ambientes de recepção dentro da mesma rota: ponto R4P3, ambiente aberto e ponto R4P2, ambiente urbano denso.....	29
Figura 4.5 – Localização do ponto R5P4, no centro da cidade, mas em ambiente aberto..	30
Figura 4.6 - Ponto R8P4, localizado no parque da cidade.....	30
Figura 4.7 - Pontos R8P1 e R8P2, localizados em um bairro residencial, mas classificados como em ambiente aberto.....	31
Figura 4.8 – Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R6P3.....	32
Figura 4.9 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R6P3_2.....	32
Figura 4.10 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R7P2.....	33

Figura 4.11 – Pontos localizados em ambiente industrial: R2P1 e R2P2. ....	34
Figura 4.12 - Pontos localizados em ambiente residencial: R32P2 e R3P5.....	36
Figura 4.13 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R6P2.....	37
Figura 4.14 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R6P2_2.....	38
Figura 4.15 – Local onde foram realizadas a medição R5P5 e R5P5_2. ....	39
Figura 4.16 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R5P5.....	40
Figura 4.17 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R5P5_2.....	40
Figura 4.18 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Eixo Monumental, com o modo de transmissão B-21. ....	42
Figura 4.19 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota SIA, com o modo de transmissão B-21.....	43
Figura 4.20 – Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota SIA, com o modo de transmissão B-21. ....	44
Figura 4.21 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Lago Sul (R3), com o modo de transmissão B-21. ....	45
Figura 4.22 – Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Lago Sul, com o modo de transmissão B-21.....	46
Figura 4.23 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Asa Norte, com o modo de transmissão B-21.....	47
Figura 4.24 – Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Asa Norte, com o modo de transmissão B-21. ....	48
Figura 4.25 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Central, com o modo de transmissão B-21. ....	49
Figura 4.26 – Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Central, usando modo de transmissão B-21. ....	50
Figura 4.27 – Rota Radial SW com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão B-21.....	52
Figura 4.28 - AudioQ, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial SW, com o modo de transmissão B-21. ....	53

Figura 4.29 – Rota Radial NE com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão B-21.....	54
Figura 4.30 - AudioQ, altitude, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial NE, com o modo de transmissão B-21. ....	55
Figura 4.31 – Rota Circular com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão B-21. ....	57
Figura 4.32 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Circular, com o modo de transmissão B-21.....	58
Figura 4.33 - Intensidade de campo versus distância ao transmissor para as medições fixas com o modo B-21, com indicação d ambiente e do nível da AudioQ.....	59
Figura 4.34 - MER versus intensidade de campo nas medições fixas realizadas como o modo B-21, com indicação da faixa do valor da AudioQ.....	60
Figura 4.35 – Distribuição cumulativa dos quadros de áudio com erros segundo a intensidade de campo medida. ....	62
Figura 4.36 - Distribuição cumulativa dos quadros de áudio com erros segundo o valor da MER medido. ....	63
Figura 4.37 – Porcentagem de quadros de áudio com erros como função da intensidade de campo medida. ....	64
Figura 4.38 - Porcentagem de quadros de áudio com erros como função do valor de MER medido. ....	64
Figura 4.39 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Central, com o modo de transmissão B-38. ....	67
Figura 4.40 - Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Central, com o modo de transmissão B-38. ....	67
Figura 4.41 - Localização do veículo de medição durante as medidas dos pontos R4P3 e R11P3.....	69
Figura 4.42 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R11P1.....	70
Figura 4.43 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Asa Norte, com o modo de transmissão A-41.....	71
Figura 4.44 - Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Asa Norte, com o modo de transmissão A-41.....	71
Figura 4.45 - Localização do veículo de medição durante as medidas dos pontos R6P1 e R12P1.....	72

Figura 4.46 - AudioQ, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial SW (trecho de ida), com o modo de transmissão A-41.....	73
Figura 4.47 - Rota Radial SW (ida) com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão A-41. ....	74
Figura 4.48 - AudioQ, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial SW (trecho de volta), com o modo de transmissão A-41.....	75
Figura 4.49 - Rota Radial SW (volta) com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão A-41. ....	76
Figura 4.50 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R12P3. ....	77
Figura 4.51 - AudioQ, velocidade do veículo, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial SW (teste de velocidade), com o modo de transmissão A-41.....	78
Figura 4.52 - Rota Radial SW (teste de velocidade) com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão B-21. ....	79
Figura A.1 - Diagrama de bloco conceitual do transmissor DRM. (Adaptado de [12]) .....	98
Figura A.2 – Opções de codificação de fonte (áudio ou voz) disponíveis no sistema DRM. (Adaptado de [2]) .....	99
Figura A.3 – Exemplos de configurações <i>simulcast</i> DRM. (Adaptado de [12]).....	104

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AAC	advanced audio coding
AM	amplitude modulation – <i>modulação em amplitude</i>
BER	bit error rate – <i>taxa de erros de bit</i>
CELP	code-excited linear prediction
CRC	cyclic redundancy check – <i>verificação cíclica de redundância</i>
DAB	digital audio broadcasting
DRM	Digital Radio Mondiale
FAC	fast access channel – <i>canal de acesso rápido</i>
FEC	forward error correction
FI	freqüência intermediária
FM	frequency modulation – <i>modulação em freqüência</i>
HD	high definition – <i>alta definição</i>
HF	high frequency – <i>freqüência alta</i>
HVXC	harmonic vector excitation coding
IBOC	in-band, on-channel
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MER	modulation error ratio – <i>razão erro de modulação</i>
MSC	main service channel – <i>canal de serviço principal</i>
OC	ondas curtas
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing – <i>multiplexação por divisão em freqüência ortogonal</i>
OL	ondas longas
OM	ondas médias
QAM	quadrature amplitude modulation – <i>modulação de amplitude em quadratura</i>

Radiobrás	Empresa Brasileira de Comunicação
RSR	razão sinal-ruído
SDC	service description channel – <i>canal de descrição de serviços</i>
SFN	single frequency network – <i>rede de frequência única</i>
SIA	Setor de Indústrias e Abastecimento
UV	ultravioleta
VHF	very high frequency – <i>frequência muito alta</i>
WMER	weighted modulation error ratio – <i>razão erro de modulação ponderado</i>



# 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas tecnologias na área de telecomunicações, é natural que se busque sempre adequar os meios de comunicação existentes às novas necessidades do seu público alvo. Atualmente vários sistemas de radiodifusão têm sido desenvolvidos tendo em mente a digitalização dos sistemas analógicos em uso, tanto para a radiodifusão sonora quanto para a radiodifusão de sons e imagens (TV). A digitalização desses meios é vista não como uma tendência, mas como uma necessidade, uma vez que não realizá-la iria enfraquecer o apelo desse setor frente a um público alvo cada vez mais exigente.

Algumas das vantagens mais marcantes dos sistemas digitais são: melhor qualidade do áudio recebido, recepção mais uniforme do sinal, envio de informações adicionais (na forma de texto, por exemplo) e economia de potência. A desvantagem mais significativa dos sinais digitais é que a transição entre uma boa e uma má recepção ocorre de forma muito abrupta, ao passo que em uma recepção analógica, a qualidade do sinal se deteriora gradativamente.

Na Europa, especialmente, a implementação do sistema Eureka 147 DAB (Digital Audio Broadcasting) já está em fase avançada, tendo sido realizada em diversos países [1]. Nesse sistema, entre 5 e 7 conteúdos de áudio diferentes são transmitidos simultaneamente, utilizando uma banda de 1,536 MHz. Essa estratégia é especialmente interessante quando se estão realizando transmissões de alcance nacional, uma vez que a utilização de redes de frequência única (SFN) possibilita a cobertura de extensas áreas com o emprego de uma quantidade de potência relativamente baixa.

No entanto, em muitos países como o Brasil, as rádios de alcance local têm uma importância muito grande, e para elas o uso da tecnologia DAB pode não ser interessante. Embora em alguns grandes centros vários radiodifusores possam se unir para transmitir utilizando um canal DAB, em determinadas localidades o pequeno número de estações não justificaria os custos da implementação do sistema. Por isso, no caso específico do Brasil, a criação de novas oportunidades para uma transmissão local de boa qualidade seria de grande interesse.

O uso da tecnologia digital é especialmente interessante para os radiodifusores que

atuam em frequências inferiores a 30 MHz, uma vez que nessa faixa de frequências são utilizadas larguras de bandas pequenas e modulação AM, resultando em uma qualidade de áudio muito inferior à obtida na faixa de VHF, onde é utilizada a modulação FM e uma banda de transmissão muito maior.

Dos sistemas de radiodifusão sonora digital já implantados ou em fase de implantação no mundo, atualmente apenas dois são compatíveis com o sistema de canalização utilizado no Brasil para frequências inferiores a 30 MHz: o sistema americano HD Radio, também conhecido como sistema IBOC (In-Band On-Channel), e o sistema europeu DRM (Digital Radio Mondiale).

O consórcio DRM apresenta duas propostas principais para a realização de transmissões digitais locais em frequências inferiores a 30 MHz. A primeira proposta seria a digitalização progressiva da faixa AM, pela substituição das atuais rádios analógicas por emissoras utilizando sinal digital, havendo para isso uma fase de transição, onde ambos os sinais seriam transmitidos simultaneamente (transmissão *simulcast*). A outra possibilidade seria o uso da faixa de 26 MHz, tradicionalmente utilizada para a radiodifusão a longa distância [2].

A faixa de 26 MHz é a faixa de frequência mais elevada dentre as faixas de ondas curtas (OC). Devido à possibilidade de se utilizar a propagação ionosférica para transmitir um sinal a longas distâncias, essa faixa foi tradicionalmente utilizada para a realização de transmissões internacionais. No entanto, devido ao fato de a propagação ionosférica nessa faixa não ser sempre possível, essa atualmente raramente é utilizada.

Na tentativa de comprovar a viabilidade da utilização da faixa de 26 MHz para a realização de transmissões digitais de alcance local, vários testes com o sistema DRM têm sido realizados nos últimos anos [1] [3] [4] [5] [6]. Os resultados desses testes indicam que a recepção de um áudio de alta qualidade é possível com a utilização de uma potência relativamente baixa, mas que a interferência via propagação ionosférica de outras emissoras operando na mesma frequência pode ser um fator de degradação considerável.

Visando avaliar de forma prática o desempenho do sistema DRM nessa faixa de frequências, o Grupo de Radiodifusão do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, em parceria com o consórcio DRM e com a Empresa Brasileira de Comunicação (Radiobrás), realizou alguns testes de campo entre os meses de abril e

julho de 2006. Esses testes envolveram medições móveis e fixas, realizadas sobre um sinal digital transmitido do Centro de Transmissão da Câmara dos Deputados, distante do centro de Brasília aproximadamente 11,5 km.

Essa dissertação tem por objetivo apresentar os resultados desses testes, tais como a influência do ambiente de recepção na qualidade do sinal, os fatores que causam degradação no sinal e as configurações do sistema DRM mais adequadas para essa estratégia de transmissão. Além disso, outros tópicos importantes, não abrangidos nesses testes, tais como interferência via propagação ionosférica e a viabilidade da recepção interna, são discutidos, sendo apresentadas propostas de novos testes para uma avaliação mais completa do desempenho do sistema.

## **1.1 SUMÁRIO**

O Capítulo 2 desse estudo discute o uso da faixa de 26 MHz para radiodifusão local. O uso atual dessa faixa é apresentado, assim como algumas possíveis vantagens e desvantagens da sua utilização.

O Capítulo 3 descreve os testes realizados. Nele são apresentados os sistemas de transmissão e de recepção utilizados nos testes, as áreas da cidade onde foram realizadas medições e as grandezas que foram mensuradas. Além disso, são apresentadas algumas características do sinal digital transmitido e a metodologia de realização dos testes.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos testes. Nesse capítulo as medições fixas e em movimento são analisadas caso a caso de acordo com os seus ambientes de recepção. Com isso, procura-se descobrir que fatores têm influência na recepção do sinal e o que deve ser considerado, quando da instalação de uma emissora, para se obter uma recepção livre de erros dentro da área de interesse.

Por fim, o Capítulo 5 reúne todas as conclusões obtidas a partir dos resultados apresentados no Capítulo 4 e procura definir os limiares para que o sistema DRM funcione corretamente nos ambientes testados. Nesse capítulo são tiradas as conclusões possíveis sobre o funcionamento do sistema nessa faixa e apresentadas sugestões de novos testes visando uma conclusão definitiva. Esses resultados são apresentados de forma mais sucinta no Capítulo 6.

## **2 A RADIODIFUSÃO SONORA NA FAIXA DE 26 MHz**

Atualmente, a radiodifusão sonora local na maior parte do mundo está concentrada em três faixas, conhecidas popularmente como faixas de ondas média (OM), onda curta (OC) e de FM. Nas faixas de OM e de OC, a técnica de modulação utilizada é a AM (Amplitude Modulation). No Brasil, a faixa de OM se estende de 535 kHz a 1705 kHz e a faixa FM de 87,4 MHz a 108 MHz. É preciso ressaltar, no entanto, que devido à maior largura de banda utilizada e ao fato de a modulação FM ser mais imune ao ruído, a qualidade de recepção das rádios FM é via de regra muito superior à das rádios AM.

Devido à popularização da rádio FM e ao número limitado de canais presentes nesta faixa, em algumas regiões mais povoadas do país não é possível conseguir uma outorga para realizar novas transmissões. Por outro lado, a menor qualidade das transmissões AM desestimula a procura pela sua utilização.

Visando aumentar o número de canais disponíveis para uma radiodifusão de boa qualidade, o consórcio DRM propõe duas soluções distintas. A primeira é a digitalização das transmissões nas faixas de OM e de OC, com a substituição progressiva das atuais emissoras analógicas por emissoras digitais, com sinais ocupando banda com largura de 5 kHz, 10 kHz ou 20kHz (no caso da Região 2 da UIT), mas com qualidade que pode ser comparável à das rádios FM, que utilizam 20 vezes mais banda. Por essa proposta haverá um período de transição onde sinais analógico e digital conviverão nessas faixas. Para isso, no entanto, deveria ser levada em conta a interferência mútua entre o sinal digital adicionado e os sinais analógicos já existentes, o que resultaria em uma maior complexidade quanto ao planejamento da distribuição dos canais.

Uma segunda proposta é a utilização da faixa de 26 MHz para a transmissão local de sinais digitais, usando a propagação em linha de visada. Nesse caso os sinais analógico e digital ficariam bastante separados uns dos outros, evitando interferências entre os novos e antigos sinais e simplificando o planejamento da atribuição de canais. Outra vantagem seria a oportunidade para que eventuais novos radiodifusores já começassem a operar de forma totalmente digital. Além disso, por utilizar frequências maiores, essa faixa requer o uso de antenas de comprimento muito menor, o que simplifica a sua instalação. Por fim, a faixa de ondas médias possui em geral um nível considerável de ruído criado pelo homem, o que não ocorre de forma tão intensa na faixa de 26 MHz [1].

## 2.1 A FAIXA DE 26 MHZ NO BRASIL

No Brasil, a parte do espectro compreendida entre 3200 kHz e 261000 kHz é denominada de faixa de ondas decamétricas [7] Essa faixa é dividida em duas sub-faixas: ondas tropicais (3200-5060 kHz) e ondas curtas (5950-26100 kHz). Em alguns países a faixa de ondas curtas recebe o nome de faixa de altas frequências (HF, do inglês *High Frequency*). Por fim, a faixa de ondas curtas é subdividida em sete faixas alocadas para radiodifusão (Tabela 2.1), denominadas segundo as suas frequências, dentre as quais, a de mais alta frequência é a faixa de 26 MHz (também denominada faixa de 11 metros, devido ao seu comprimento de onda aproximado).

Tabela 2.1 – Faixas de frequência em ondas curtas destinadas para radiodifusão no Brasil.

Faixa	Frequência (kHz)
Faixa de 6 MHz ou de 49 m	5950 a 6200
Faixa de 10 MHz ou de 31 m	9500 a 9775
Faixa de 12 MHz ou de 25 m	11700 a 11975
Faixa de 15 MHz ou de 19 m	15100 a 15450
Faixa de 18 MHz ou de 16 m	17700 a 17900
Faixa de 22 MHz ou de 13 m	21450 a 21750
Faixa de 26 MHz ou de 11 m	25600 a 26100

## 2.2 PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICA

As faixas para radiodifusão em ondas curtas são tradicionalmente utilizadas em todo o mundo para transmissões a longas distâncias. Isso é conseguido através do uso da propagação pela ionosfera. A ionosfera, localizada aproximadamente entre 50 km e 500 km de altitude, é uma camada da atmosfera bastante rarefeita e com uma grande concentração de íons e elétrons livres.

Quando uma onda eletromagnética atinge a ionosfera, ela pode sofrer uma série de refrações que levam ao retorno da mesma em direção à terra. A ocorrência dessas refrações depende de vários fatores, tais como a frequência da onda, o seu ângulo de incidência e o quanto a ionosfera está ionizada. As frequências das faixas de ondas médias e de ondas curtas são as mais propícias para o uso em transmissões utilizando ondas ionosféricas.

A concentração de íons presente na ionosfera depende principalmente da intensidade da radiação ultravioleta (UV) recebida do sol. Essa radiação leva ao surgimento de diferentes camadas na ionosfera. A formação de camadas distintas é explicada pela existência de diferentes frequências UV na radiação solar [8]. Devido a essa

dependência da radiação solar, uma faixa de frequências que em determinado momento pode ser utilizada com sucesso para enviar informação de um ponto a outro, pode não ser utilizável em um outro momento. Por isso, quando da determinação da frequência a ser utilizada em determinada situação, uma série de fatores deve ser considerada. Os principais fatores a serem considerados na escolha da frequência utilizada em OC são [8]: localização (em especial a latitude), estação do ano, hora do dia, variações cíclicas (número de manchas solares) e condições anormais de propagação. Quanto maior for a concentração de elétrons livres na ionosfera, maiores serão as frequências que sofrerão um refração forte o suficiente para que retornem à terra [9].

Na prática, a maior parte das transmissões comerciais em OC se dá nas faixas de frequências inferiores e intermediárias, uma vez que as faixas mais altas só têm desempenho satisfatório nas épocas do máximo do ciclo solar, que possui uma periodicidade média de 11 anos, e quando surgem as chamadas camadas E esporádicas [1] [5]. Como exemplo, em consulta feita à página da ANATEL na internet [10] em setembro de 2006, foram encontradas 71 autorizações para uso de frequências para radiodifusão em OC. Destas, 26 se encontravam na faixa de 6 MHz, 21 na de 10 MHz, 17 na de 12 MHz, 5 na de 15 MHz e 2 na de 18 MHz. Nenhum serviço foi encontrado nas faixas de 22 e 26 MHz. A mais alta frequência de portadora utilizada foi de 17875 kHz. As faixas mais altas de OC também estão em desuso em outros lugares do mundo [2] [3], o que levou ao surgimento da proposta de usar a faixa de 26 MHz para radiodifusão local.

### **2.3 CANALIZAÇÃO**

Como mostrado na Tabela 2.1, a faixa de 26 MHz no Brasil possui uma largura total de 500 kHz. Atualmente ela está dividida em canais de 10 kHz com portadoras espaçadas a cada 5kHz. Caso se opte por utilizar essa faixa para transmitir sinais com largura de banda de 10 kHz, a faixa poderia ser dividida em 50 canais. No entanto, para possibilitar transmissões de qualidade comparável à das rádios FM, é recomendado utilizar-se canais de 20 kHz. Nesse caso, estariam disponíveis em cada localidade 25 canais.

A faixa de FM, por sua vez, dispõe de 101 canais com portadoras separadas a cada 200 kHz [11]. No entanto, uma vez que é preciso garantir que não haja interferência entre as emissoras localizadas muito próximas, não são utilizados na mesma localidade os dois

canais com frequência da portadora imediatamente inferior e os dois canais com frequência da portadora imediatamente superior à de uma emissora em funcionamento. Isso já reduz o número de canais disponíveis em cada localidade a um terço do número total de canais. Além disso, não podem ser utilizadas frequências cujo batimento de FI interfira na recepção de outra emissora, o que faz com que o número de canais FM realmente disponíveis em determinada localidade seja comparável ao número de canais que se obteria com o uso da faixa de 26 MHz.

No entanto, devido à forma “comportada” como está distribuída a energia em um sinal DRM, com uma queda acentuada da energia radiada fora da banda do sinal, a princípio é de se esperar que todos os 25 novos canais na faixa de 26 MHz estejam disponíveis em cada localidade. O primeiro fato que corrobora essa idéia é a largura de banda efetiva dos sinais DRM. Apesar de as larguras dos sinais serem referidas normalmente como 10 kHz ou 20 kHz, a banda efetivamente ocupada é um pouco inferior a esses valores e seu valor exato depende do modo de robustez utilizado. Para uma banda nominal de 20 kHz e modos de robustez A e B, os valores efetivos das bandas utilizadas são de 19,21 kHz e 19,27 kHz [12], respectivamente, o que garante que na pior das hipóteses dois sinais DRM adjacentes estarão separados de 730 Hz.

Além disso, as relações de proteção necessárias entre um sinal DRM e outro sinal localizado em um canal adjacente são relativamente altas. Para um sinal com largura de banda de 5 kHz, utilizando o modo B, com modulação 64-QAM e taxa de código de 0,6, a relação de proteção ao primeiro adjacente é de -21,6 dB, ao passo que para sinais com a mesma configuração e banda de 10 kHz, essa relação de proteção é de -21,8 dB [13]. É de se esperar que a relação de proteção para uma banda de 20 kHz seja da mesma ordem. Caso a configuração utilizada seja modo B, modulação 16-QAM e taxa de código de 0,5, as relações de proteção passam a ser respectivamente de -28,3 dB e -28,4 dB. Utilizando modo A, 64-QAM e taxa de código de 0,5, tem-se respectivamente -24,1 dB e -24,0 dB.

Devido aos baixos valores de relação de proteção, é de se esperar que todos os canais possam ser utilizados em uma mesma localidade desde que as antenas transmissoras não estejam muito separadas umas das outras e que a diferença de potência radiada entre as diversas emissoras não seja muito elevada. Naturalmente seria necessária a realização de testes complementares a fim de se verificar o bom funcionamento do sistema em tais condições.

## 2.4 POSSÍVEIS ADVERSIDADES DA FAIXA DE 26 MHZ

Apesar das diversas vantagens apresentadas, ainda existem alguns questionamentos sobre a viabilidade do uso do sistema DRM na faixa de 26 MHz. O principal deles é sobre o nível de interferência que ocorreria nos períodos de máximo de atividade solar. O ciclo solar, que tem um período de aproximadamente onze anos, tem grande influência sobre a ionização da ionosfera. Quando o ciclo atinge o seu máximo, as condições se tornam mais propícias para a refração de frequências mais altas e as transmissões na faixa de 26 MHz se tornam mais viáveis. Um outro fenômeno que permite a propagação de sinais na faixa de 26 MHz mesmo em épocas de menor atividade solar é o surgimento das chamadas camadas E esporádicas. Os autores de alguns testes realizados na Alemanha afirmam que é impossível evitar eventuais interferências devido à propagação ionosférica e que os radiodifusores que utilizem essa faixa deveriam estar cientes de que o seu serviço pode não estar disponível 100% do tempo [1] [5]. No entanto, nenhum teste de campo foi realizado até o momento para verificar se o nível de interferência causado é alto o bastante para inviabilizar a recepção.

Outra questão importante é o fato de os múltiplos percursos resultantes da reflexão do sinal em obstáculos causarem um desvanecimento plano [4], [5]. No desvanecimento plano, todas as portadoras do sinal são atenuadas com aproximadamente a mesma intensidade, ao passo que no desvanecimento seletivo, uma parte do sinal é mais atenuada do que outras. Até certo ponto os efeitos do desvanecimento seletivo podem ser minimizados pelo uso do OFDM juntamente com técnicas de *interleaving* e codificação. Distribuindo os bits por portadoras diferentes, é possível que ao reordená-los os eventuais erros que ocorram estejam espalhados o suficiente para possibilitar a sua correção.

Além de não fazer uso de uma das vantagens da técnica OFDM, o desvanecimento plano pode levar a quedas prolongadas do áudio, caso o receptor esteja se locomovendo a baixas velocidades (ou esteja parado) e se encontre em uma zona onde os múltiplos percursos se somem de maneira destrutiva, resultando em uma intensidade de campo muito baixa.



### 3 DESCRIÇÃO DOS TESTES REALIZADOS

Entre os meses de abril e julho de 2006 extensivos testes de campo com o sistema DRM foram realizados na cidade de Brasília pelo Grupo de Radiodifusão do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, em parceria com o consórcio DRM e com a Empresa Brasileira de Radiodifusão (Radiobrás). Os resultados desses testes provêm embasamento prático para uma análise da viabilidade da implementação desse sistema nessa faixa.

#### 3.1 SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Para a realização dos testes apresentados nessa dissertação, um sistema de transmissão foi instalado no Centro de Transmissão da Câmara dos Deputados, que está distante do centro de Brasília aproximadamente 11,5 km — veja Figura 3.1. Os principais componentes desse sistema foram um transmissor DRM e uma antena transmissora. A Tabela 3.1 contém alguns dados desses equipamentos.

A Figura 3.2 mostra uma fotografia do transmissor DRM utilizado. Ele é constituído por um modulador-e-excitador (módulo da esquerda), que gera o sinal DRM, e um amplificador de RF (módulo da direita).

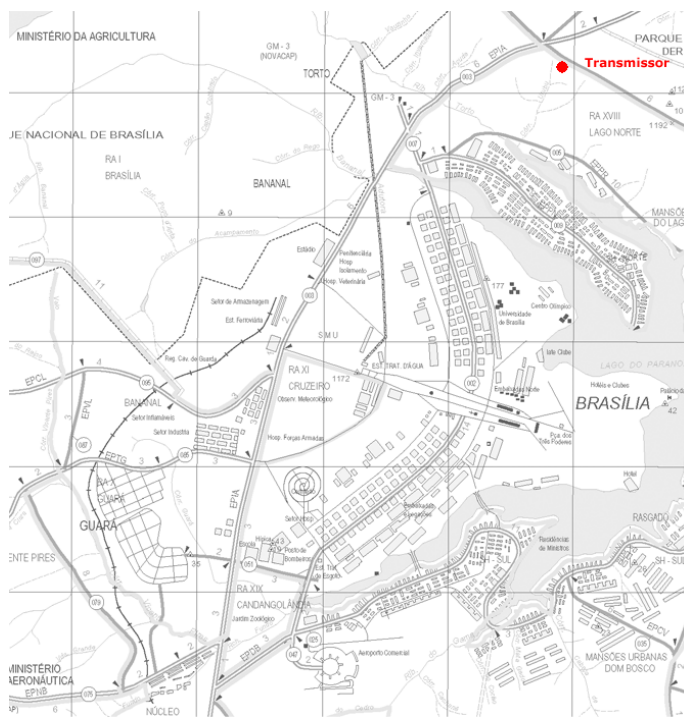


Figura 3.1 - Localização do sistema de transmissão do sinal DRM.

Tabela 3.1 – Dados sobre o sistema de transmissão do sinal DRM.

Localização	Centro de Transmissão da Câmara dos Deputados Coordenadas da torre de transmissão: 15° 41' 34.0'' S e 47° 51' 15.2'' W
Transmissor DRM	Composto por um modulador-e-excitador DRM e um amplificador de RF Fabricante: RIZ – Transmitters Co. Origem: Croácia Potência média de saída: 200 W Potência de pico de saída: 2 kW
Antena transmissora	Fabricante: TCI International, Inc. Origem: EUA Tipo: dipolo vertical com comprimento de 12,5 m, com alimentação descentralizada Ganho máximo: $\approx 7$ dBi Altura em que foi instalada: 55 m acima da base da torre



Figura 3.2 – Transmissor DRM: modulador-e-excitador (módulo da esquerda) e amplificador de RF (módulo da direita).

A Figura 3.3 mostra uma fotografia da antena transmissora utilizada. Ela é um dipolo vertical com comprimento de 12,5 m, com o ponto de alimentação localizado a 2/3 do seu extremo inferior. O objetivo da alimentação não centralizada é tornar a radiação diretiva no plano vertical, de modo a minimizar a radiação em direção à ionosfera e, assim, minimizar possíveis ondas ionosféricas, que podem causar interferências em áreas distantes da área de serviço da estação transmissora. A Figura 3.4 mostra os diagramas de radiação vertical e horizontal da antena. Notar a diretividade no plano vertical: a diferença entre o lóbulo principal ( $-25^\circ$ ) e o lóbulo secundário ( $45^\circ$ ) é de aproximadamente 6 dB. O

ganho máximo dessa antena é de aproximadamente 7 dBi.



Figura 3.3 – Antena utilizada durante os testes instalada na torre de transmissão.

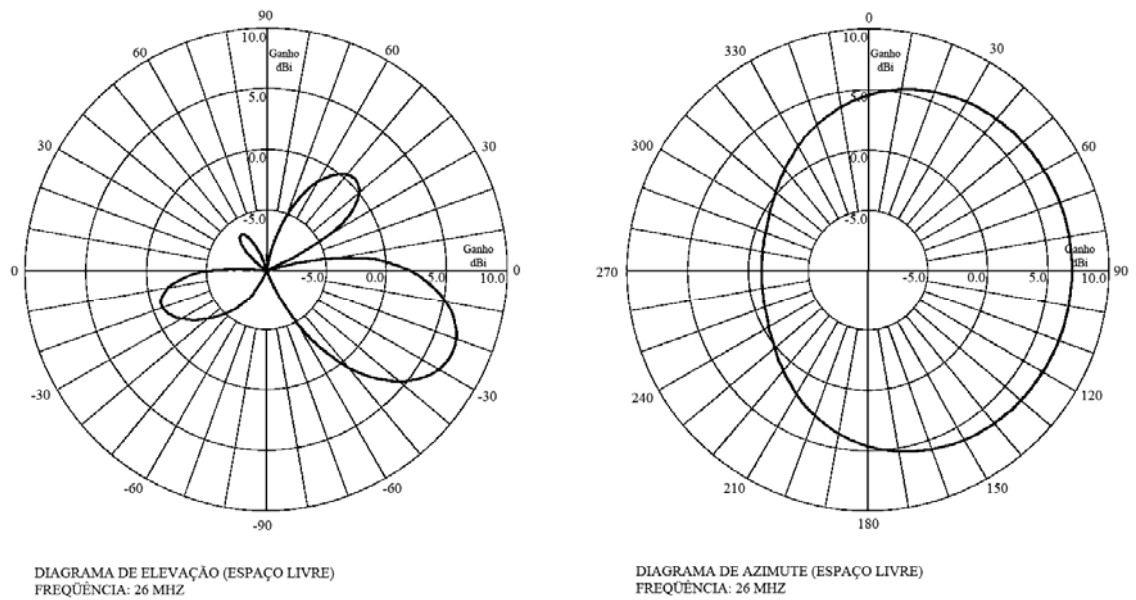


Figura 3.4 – Diagramas de radiação da antena transmissora usada nos testes.

### 3.2 SISTEMA DE RECEPÇÃO E DE MEDIÇÃO

A Figura 3.5 mostra um diagrama de blocos do sistema de medição utilizado na realização dos testes. Esse sistema foi montado em um veículo do tipo perua — veja fotografia mostrada na Figura 3.6. Ele pode ser dividido em três partes — módulo de recepção, módulo de medição e módulo de controle, descritas a seguir.

O módulo de recepção foi constituído por uma antena HE011 e um Miniport Receiver EB200, ambos fabricados pela Rohde & Schwarz. A antena é um monopólo ativo curto e foi instalada sobre um plano de terra montado sobre o teto da perua. O seu fator K é de 14 dB.

O Miniport Receiver EB200 teve dupla função no sistema de medição. Uma delas era atuar como um conversor de frequência, trasladando o sinal DRM recebido de HF (25,885 MHz) para uma frequência intermediária de apenas 6 kHz, de modo que o sinal DRM pudesse ser digitalizado por uma placa de áudio.

O módulo de medição foi composto por um analisador de espectro Agilent E4402B, Miniport Receiver EB200, uma placa de áudio externa Sound Blaster Audigy 2NX e um computador *laptop*. O analisador de espectro foi usado principalmente para avaliar as características espectrais do sinal DRM radiado. A função do Miniport Receiver EB200 era medir a intensidade do sinal DRM recebido — além de funcionar como conversor de frequência, conforme mencionado anteriormente. Uma das funções do computador *laptop* foi executar o software GPL-ed DReaM, uma implementação em software de um receptor DRM. O sinal DRM recebido, após ter sido trasladado em frequência pelo Miniport Receiver EB200 e digitalizado pela placa de áudio, era processado por esse software receptor.

Todo o controle do sistema de medição era feito por um software específico executado sobre GNU/Linux pelo computador *laptop*, que executava simultaneamente o software GPL-ed DReaM. Por meio desse software de controle se faziam a configuração e controle do Miniport Receiver EB200 e da placa de áudio. Além desses dois equipamentos, havia um aparelho GPS e um tacômetro. Todos os dados fornecidos pelos equipamentos de medida eram gravados pelo software de controle, para processamento posterior.

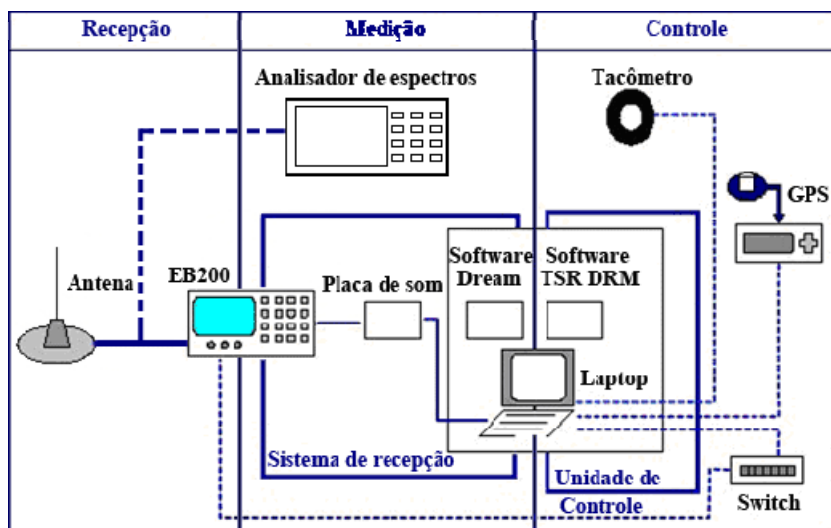


Figura 3.5 – Sistema de recepção utilizado durante os testes.



Figura 3.6 – Veículo utilizado nos testes.

### 3.3 MODOS DE TRANSMISSÃO DRM TESTADOS

O sistema DRM permite que vários parâmetros do sistema possam ser alterados de forma a privilegiar a qualidade do áudio transmitido ou a robustez da transmissão em relação aos efeitos dos ruídos, interferências, multipercurso e efeito Doppler [2] [12]. Os principais parâmetros alteráveis são o modo de transmissão OFDM, as modulações utilizadas, a taxa de codificação para controle de erros e a extensão do *interleaving*. Quanto maior a robustez propiciada pela configuração escolhida menor é a taxa de bits de transmissão efetiva disponível e, conseqüentemente, mais baixa é a qualidade do áudio transmitido.

Os modos de transmissão OFDM oferecidos pelo sistema DRM são quatro e são identificados pelas letras A, B, C e D. Esses modos se diferenciam na separação entre portadoras OFDM, na duração dos símbolos OFDM e na duração do intervalo de guarda OFDM [12]. A Tabela 3.2 mostra as condições de propagação a que se destina cada modo e seus usos típicos. Em função dessas características, os testes foram realizados com os modos de transmissão A e B.

O sinal DRM pode ter largura de banda de 4,5 kHz, 5 kHz, 9 kHz, 10 kHz, 18 kHz ou 20 kHz. A idéia era realizar os testes com sinais com largura de banda de 20 kHz, para poder transmitir um sinal de áudio com qualidade pelo menos equivalente àquela oferecida pela radiodifusão FM. Contudo, devido a restrições dos equipamentos de medida, não foi possível utilizar a largura de 20 kHz. Por isso, os testes foram realizados com sinais com largura de banda de 18 kHz.

A Figura 3.7 mostra uma amostra espectral do sinal DRM, medida a uma distância de aproximadamente 11 km do transmissor. A frequência de referência do sinal DRM radiado foi de 25,885 MHz. O sinal DRM ocupou uma faixa de 4,5 kHz abaixo dessa frequência e uma faixa de 13,5 kHz acima. Essa é a ocupação espectral nominal [12].

Tabela 3.2 – Modos de transmissão OFDM oferecidos pelo sistema DRM.

<b>Modo de transmissão OFDM</b>	<b>Condições de propagação típicas a que se destina</b>	<b>Usos típicos</b>
A	Onda de superfície, com pouco desvanecimento	Cobertura local ou regional usando onda de superfície nas faixas OL e OM. Cobertura local usando onda espacial na faixa OC 26 MHz.
B	Canais seletivos no tempo e na frequência, com maior <i>delay spread</i>	Cobertura nacional e internacional usando onda celeste nas faixas OM e OC. Cobertura local usando onda espacial na faixa OC 26 MHz.
C	Idem modo B, mas com elevado Doppler <i>spread</i>	Cobertura internacional usando onda celeste na faixa OC.
D	Idem modo B, mas com severos <i>delay spread</i> e Doppler <i>spread</i>	Onda celeste requerendo robustez altíssima, particularmente onda celeste com incidência quase vertical para cobertura nacional na faixa OT.

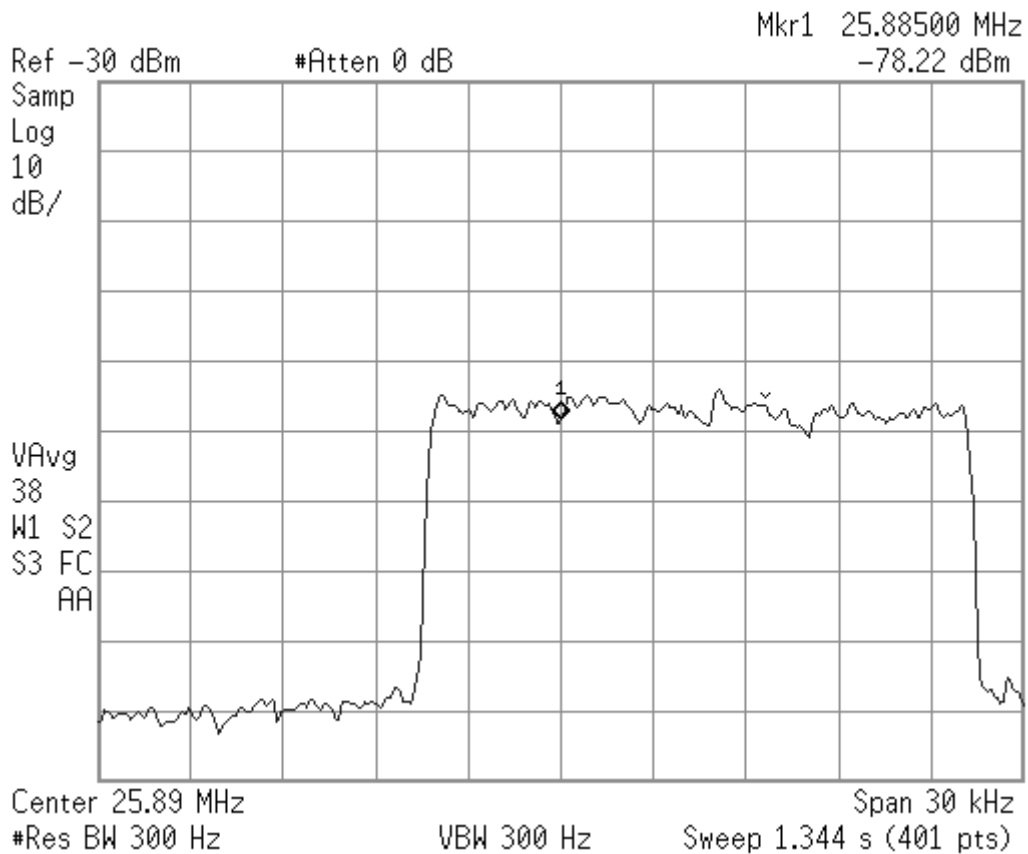


Figura 3.7 – Amostra espectral do sinal DRM radiado medida a uma distância de aproximadamente 11 km do transmissor.

Os componentes de informação multiplexados e transmitidos pelo sistema DRM são divididos em três canais: o canal de acesso rápido ou FAC (*Fast Access Channel*), o canal de descrição de serviço ou SDC (*Service Description Channel*) e o canal de serviço principal ou MSC (*Main Service Channel*) [2] [12]. O canal de acesso rápido (ou FAC) transporta dados que informam ao receptor a largura de faixa do sinal DRM, a modulação usada com o SDC e com o MSC, o comprimento do embaralhamento (*interleaving*), quantos serviços contém o MSC e o nome desses serviços. O receptor decodifica primeiro o FAC, para depois decodificar o SDC e o MSC. Como o FAC transporta os dados mais críticos do sistema, ele requer maior robustez, que é conseguida com o uso da modulação 4-QAM e de um código FEC mais robusto.

O SDC contém a descrição de como decodificar os serviços contidos no MSC. O SDC sempre usa uma modulação mais robusta (isto é, de menor ordem) do que aquela utilizada pelo MSC, de modo que ele possa ser decodificado em razão sinal-ruído menor do que a requerida para o MSC. Assim, quando o MSC usa 64-QAM o SDC usa 16-QAM e quando o MSC usa 16-QAM o SDC usa 4-QAM.



O MSC contém os serviços (áudio e dados) e, por isso, detém a maior parte da capacidade de transmissão do sinal DRM. O MSC pode transportar até quatro serviços distintos, cada um deles podendo ser áudio ou dados. O MSC usa a modulação 16-QAM ou a 64-QAM. Grupos de células OFDM do MSC, e também do SDC, são embaralhadas no tempo com a finalidade de reduzir os efeitos do desvanecimento de curto termo. A extensão (quantidade de células) do embaralhamento — *interleaving*, em inglês — pode ser longa ou curta, o que corresponde a um intervalo de tempo de aproximadamente 800 ms ou 2,4 s, respectivamente [12] [14].

A Tabela 3.3 apresenta os três modos de transmissão que foram utilizados nos testes. Esses modos serão designados pelos nomes mostrados na primeira coluna da Tabela 3.3: a letra indica o modo de robustez OFDM utilizado pelo modo de transmissão e o número é o valor aproximado da taxa de bits de transmissão, em kbps. O modo B-21 foi o mais testado. Ele foi testado em um total de oito rotas, em diversos ambientes de recepção. Os modos B-38 e A-41 foram testados em comparação com o modo B-21, em um número reduzido de rotas. Os modos B-38 e A-41 foram escolhidos por proporcionarem uma taxa de bits mais alta que a do modo B-21, embora naturalmente com menor nível de robustez. Isso pode ser desejável, dependendo do interesse do radiodifusor, para enviar um áudio de melhor qualidade ou para enviar um número maior de programas simultaneamente. Além disso, essas taxas foram feitas bastantes próximas de modo a possibilitar também uma comparação entre os modos A e B de robustez OFDM.

Tabela 3.3 - Modos de transmissão DRM utilizados nos testes.

Designação do modo	Modo de robustez OFDM	Largura de banda (kHz)	Modulação		<i>Inter_leaving</i>	Taxa do código FEC	Taxa de bits (kbps)
			MSC	SDC			
B-21	B	18	16-QAM	4-QAM	Longo	0,5	21,2
B-38	B	18	64-QAM	16-QAM	Longo	0,6	38,2
A-41	A	18	64-QAM	16-QAM	Longo	0,5	40,9

O sistema DRM permite o uso de três codificadores de fonte que fazem parte do padrão MPEG-4; são eles: o codificador AAC (*Advanced Audio Coding*), um codificador CELP (*Code Excited Linear Prediction*) e um codificador HVXC (*Harmonic Vector eXcitation Coding*). Esses dois últimos são codificadores de voz para serem usados quando a radiodifusão é unicamente de fala (noticiários, entrevistas, etc) e a taxa de bits disponível é baixa ou muito baixa, respectivamente. Esses codificadores não foram utilizados nos



testes apresentados nessa dissertação.

O AAC é um codificador de áudio genérico. No sistema DRM, ele pode ser usado com a técnica SBR (*Spectral Band Replication*), propiciando um esquema de codificação altamente eficiente. Nesse esquema, o AAC codifica um áudio de banda estreita e a técnica SBR recria no decodificador a informação das altas frequências do áudio a partir da informação das baixas frequências e de uma informação SBR auxiliar que despende aproximadamente 2 kbps para ser transmitida [2]. Esse esquema é capaz de propiciar sinais de áudio estereofônico de alta qualidade (equivalente à qualidade propiciada pelos CDs) a taxas de bits em torno de 48 kbps. E sinais de áudio monofônico com qualidade próxima daquela propiciada pelas emissoras FM podem ser conseguidos a taxas de bits em torno de 20 kbps [15], [16].

O sistema DRM permite também o uso de um esquema estereofônico paramétrico, que utiliza uma técnica de síntese na decodificação do áudio para melhorar o sinal mono AAC, dando a esse uma percepção estereofônica [2]. Esse esquema requer também a transmissão de uma informação auxiliar que despende aproximadamente 2 kbps e é extraída do sinal de áudio estereofônico original pelo codificador.

A Tabela 3.4 mostra as características principais da codificação de áudio utilizada com cada modo de transmissão DRM testado.

Tabela 3.4 – Características da codificação de áudio utilizada com cada modo de transmissão DRM testado.

<b>Modo de transmissão</b>	<b>Taxa de bits (kbps)</b>	<b>Codificador</b>	<b>SBR</b>	<b>Estereofonia</b>	<b>Qualidade em relação àquela da radiodifusão FM</b>
B-21	21,2	AAC	Sim	Paramétrica	Próxima
B-38	38,2	AAC	Sim	Real	Superior
A-41	40,9	AAC	Sim	Real	Superior

### **3.4 MEDIÇÕES REALIZADAS**

Nessa seção serão descritos alguns dos parâmetros medidos durante os testes:

#### **3.4.1 Qualidade do áudio**

A qualidade do sinal de áudio apresentado a um ouvinte por um receptor DRM

depende principalmente dos seguintes fatores:

- a qualidade do áudio codificado e transmitido — isto é, a qualidade do áudio reconstruído na ausência de erros de transmissão;
- a degradação causada a esse áudio na transmissão.

A qualidade do áudio codificado e transmitido depende, por sua vez, da taxa de bits disponível para essa codificação. A Seção 3.3 apresenta algumas informações sobre o esquema de codificação de áudio usado pelo sistema DRM e a Tabela 3.4 contém as características principais da codificação utilizada com cada modo de transmissão DRM testado.

As degradações sofridas pelo sinal DRM na transmissão, devidas ao ruído, interferências e multipercurso, causam principalmente interrupções no sinal de áudio apresentado ao ouvinte.

Para avaliar a qualidade da transmissão é usado um parâmetro denominado AudioQ. Esse parâmetro representa uma medida objetiva da qualidade do áudio recuperado pelo receptor. Ele é definido a seguir.

O sinal DRM é constituído de quadros de transmissão com duração de 400 ms. Cada quadro de transmissão contém 10 quadros de áudio com duração de 40 ms. Ao conjunto de bits que representa um quadro de áudio são acrescentados oito bits CRC que permitem ao receptor verificar a integridade do quadro de áudio recuperado [12]. A partir do número de quadros de áudio recebidos com erros é definida o parâmetro de qualidade objetiva AudioQ, como mostrado na Equação (3.1) [6].

$$\text{AudioQ} = \frac{\text{Número de quadros de áudio corretamente decodificados}}{\text{Número de quadros de áudio recebidos}} \quad (3.1)$$

O consórcio DRM define como recepções de qualidade aquelas com um valor de AudioQ igual ou superior a 98%. No entanto, não está bem definido o intervalo de tempo em que esse parâmetro deve ser medido.

Nas medições fixas, a AudioQ foi calculada considerando-se todos os quadros de áudio recebidos durante três minutos de recepção. Já para as medições em movimento, é desejável que se tenha uma forma de medir a qualidade do áudio de forma quase

instantânea. Por isso, a AudioQ foi medida em cada quadro de transmissão. Portanto, um erro em apenas um dos quadros de áudio de um quadro de transmissão já faz com que a AudioQ seja de 90%.

### 3.4.2 Razão sinal-erro de modulação

Uma boa estimativa da qualidade da recepção do sinal pode ser feita através do cálculo da razão sinal-ruído (RSR), que é definida como a razão entre a potência do sinal recebida e a potência do ruído presente na banda do sinal.

No entanto, como o ruído se sobrepõe ao sinal transmitido, uma estimativa real da RSR é de difícil realização prática. O software DReaM, utilizado para analisar o sinal recebido, mede a cada 400 ms uma grandeza que, apesar de ser denominada SNR (*Signal-to-Noise Ratio*, o correspondente em inglês à RSR), é na verdade uma medida de erro de modulação (MER – *Modulation Error Ratio*) [17]. Para realizar essa medida, o programa computa a distância entre o ponto da constelação recebida e o ponto que foi inicialmente transmitido. Caso todo deslocamento dos pontos da constelação recebida fosse causado unicamente por ruído gaussiano, seria de se esperar que a MER e a RSR tivessem o mesmo valor. No entanto, na prática, outros fatores como múltiplos percursos ou o efeito Doppler podem causar esses deslocamentos, embora, na maioria dos casos, seus efeitos sejam de magnitude muito menor que os do ruído externo.

A MER é uma medida de qualidade associada às modulações digitais. Ela mede a qualidade do sinal recebido através da medição da organização da constelação recebida. Nos sinais QAM, por exemplo, devido à sua organização simétrica, a cada símbolo ideal está associada uma região de decisão quadrada centrada no mesmo. A Figura 3.8 mostra as regiões de decisão de uma constelação 16-QAM. Para cada símbolo recebido dentro de uma região de decisão será assumido que o símbolo ideal nela centrado foi enviado. Quando algum fator externo (como ruído ou interferências) é forte o suficiente para fazer com que um dado símbolo cruze a região de decisão do símbolo originalmente transmitido, o símbolo recebido será interpretado como sendo um outro, ao qual está associada uma sequência de bits diferente da original, resultando em um erro de recepção.

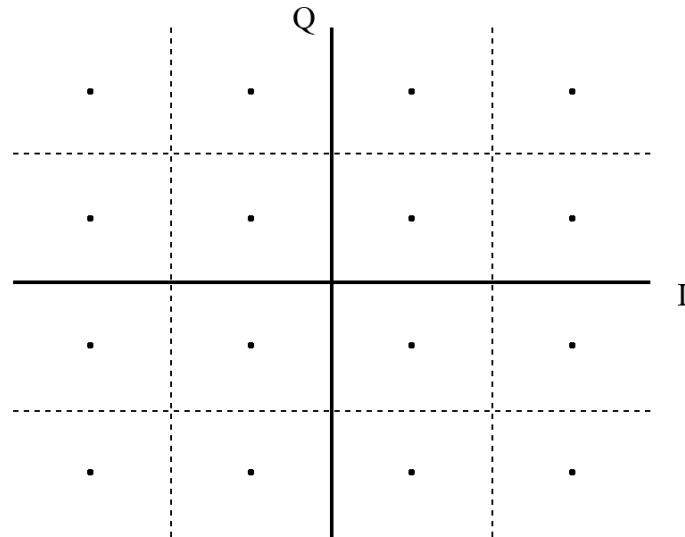


Figura 3.8 – Constelação 16-QAM com pontos-alvo e respectivas regiões de decisão.

O cálculo da MER é feito dividindo-se a potência média dos pontos idealmente transmitidos pela potência do erro associado a cada ponto recebido. (3.2) mostra como é feito esse cálculo.

$$\text{MER} = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_j (\tilde{I}_j^2 + \tilde{Q}_j^2)}{\sum_j [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

$I_j$  e  $Q_j$  são respectivamente os componentes I e Q do j-ésimo símbolo recebido,

$\tilde{I}_j$  e  $\tilde{Q}_j$  são respectivamente os componentes I e Q ideais do j-ésimo símbolo recebido,

Uma vez que o cálculo da MER leva em conta apenas o posicionamento dos símbolos recebidos, todos os fatores que prejudicam o sinal serão considerados. Normalmente, o mais importante desses fatores é o ruído gaussiano, razão pela qual muitas vezes a MER é chamada de RSR, o que tecnicamente está incorreto. Alguns dos demais fatores que afetam o cálculo da MER são: interferências de outros sinais na mesma banda, ruído de banda estreita, erro de fase, imperfeições do transmissor e do receptor e compressão do sinal [18].

Como é possível notar pela presença do logaritmo em (3.2), a MER, assim como a RSR é medida em dB, sendo que uma MER alta significa um sinal com poucos erros (desejável). Quando se inclui no somatório do divisor um coeficiente proveniente da estimação de canal feita pelo receptor e se multiplica o dividendo pela soma de todos esses

coeficientes, obtêm-se uma variante da MER conhecida como WMER.

Os erros de recepção de sinais digitais também podem ser medidos através da taxa de erros de bit (BER). No entanto, como a BER mede apenas os erros ocorridos, ela é ineficiente para comparar a qualidade de sinais livres de erro. A Figura 3.9 ilustra a diferença da qualidade entre duas constelações 16-QAM recebidas com BER nula, mas com diferentes níveis de MER.

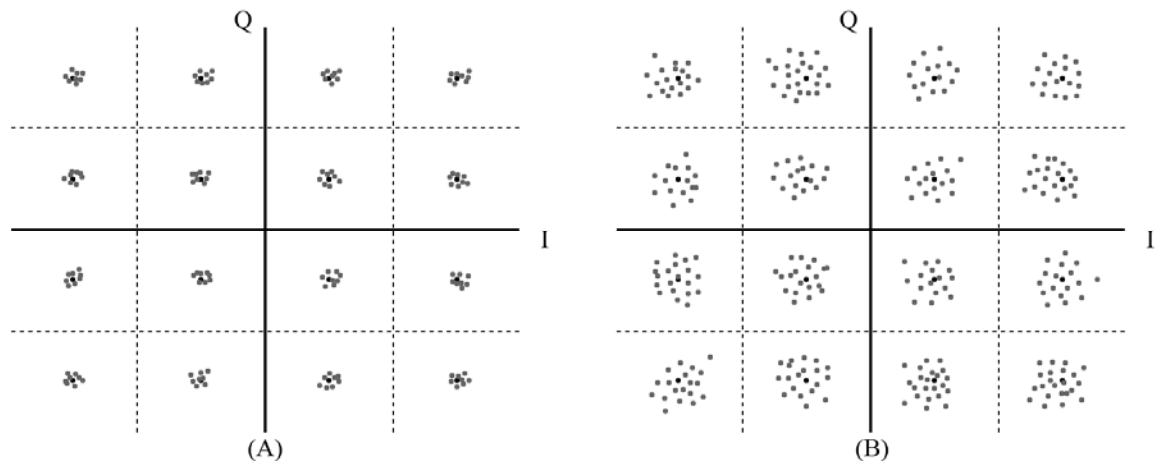


Figura 3.9 – Constelações 16-QAM com BER nula, mas diferentes níveis de MER. (A) MER alta  
(B) MER baixa.

Portanto, a MER pode ser utilizada como referência para se saber o quão perto o sistema está de começar a falhar. Para sistemas de televisão a cabo, por exemplo, o limiar para uma boa recepção utilizando uma modulação 64-QAM é de cerca de 23 dB e para uma modulação 256-QAM, de 28 dB. É sugerido, no entanto, que a MER seja pelo menos 3 dB maior que esses valores para que o sistema opere confiavelmente [19].

É preciso ressaltar, no entanto, que a MER passa a não ser uma medida tão precisa uma vez que os erros comecem a ocorrer. Como visto anteriormente, o cálculo da MER envolve a localização dos símbolos recebidos e dos símbolos idealmente transmitidos. No entanto, uma vez que um símbolo cruze a fronteira entre as regiões de decisão, um símbolo errado é tomado como aquele que foi enviado, por estar mais próximo ao símbolo recebido. Assim, o sistema computa um valor menor de erro do que o ocorrido na prática.

A MER também pode dar uma falsa impressão de estabilidade quando fontes de interferência intermitente fortes atingem o sistema. Esse tipo de interferência, por ser de curta duração, afeta apenas uma parte do sinal recebido – veja Figura 3.10-, mas pode ser

forte o suficiente para que a maior parte dos símbolos recebidos nesse período apresente erros. No entanto, como o cálculo da MER é uma média dos vários símbolos recebidos e apenas uma pequena parte deles é afetada, o valor de MER medido será alto mesmo com o sistema apresentando erros de recepção. Esses erros seriam percebidos caso fosse possível medir também a BER.

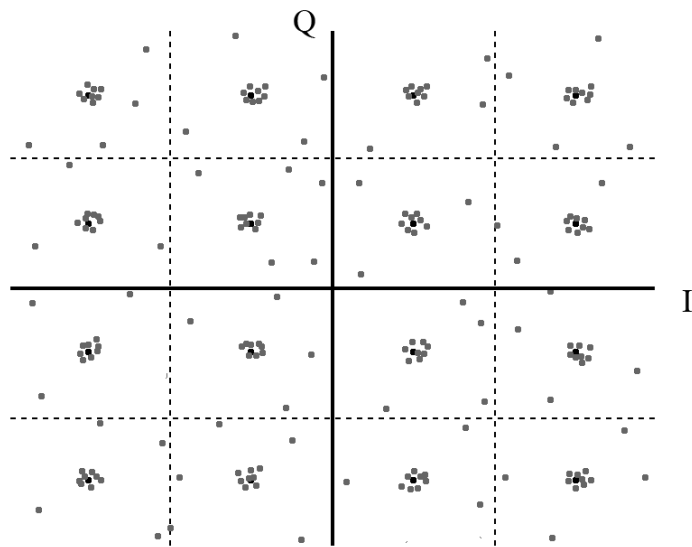


Figura 3.10 – Interferência intermitente em uma constelação 64-QAM.

### 3.5 ROTAS PERCORRIDAS

Durante o planejamento dos testes, os ambientes de recepção de Brasília foram divididos em quatro tipos básicos, predominantes na cidade. Esses ambientes são definidos como:

- Aberto: Áreas com poucas edificações, distantes umas das outras e com pequena altura. Tráfego predominantemente escasso, podendo chegar a moderado.
- Industrial: Áreas com pequenas empresas, utilizando equipamentos de pequeno e médio porte (por exemplo, gráficas e oficinas automotivas). Prédios de pequena altura, com normalmente um ou dois pavimentos. Tráfego tipicamente intenso.
- Residencial: Área com casas de um ou dois pavimentos, ruas largas e alguns espaços abertos. Tráfego predominantemente moderado.
- Urbano denso: Área com prédios de apartamentos (entre quatro e sete pavimentos),

casas (um ou dois pavimentos), hotéis e prédios de escritórios. Tráfego tipicamente intenso.

Durante o planejamento dos testes, procurou-se definir pelo menos uma rota fechada que pertencesse predominantemente a cada um dos ambientes de recepção especificados. As rotas fechadas são aquelas que se iniciam e terminam no mesmo ponto. O ambiente urbano denso, por ser considerado mais representativo da cidade, foi testado em duas rotas distintas.

Convém ressaltar também que os termos utilizados para definir os ambientes de Brasília podem não ser extensíveis a outras cidades brasileiras. Por exemplo, o ambiente industrial de cidades como São Paulo possui indústrias muito mais pesadas que as de Brasília, o que implica em uma quantidade de ruído eletromagnético muito maior, e logo, em condições de recepção menos favoráveis. De modo semelhante, os ambientes urbanos densos de outras grandes cidades brasileiras possuem uma densidade maior de prédios, que por sua vez também têm uma altura maior do que a média dos edifícios de Brasília. Esses fatores também degradam a recepção do sinal devido ao multipercurso mais intenso.

Além das rotas fechadas, foram definidas duas rotas radiais, uma no sentido sudoeste e outra no sentido nordeste, além de uma rota circular.

O objetivo das rotas radiais era verificar o limite de cobertura do sistema, acompanhando o desempenho do sistema com a diminuição da intensidade de campo elétrico recebido. A rota Radial SW se encontra na direção do lóbulo principal da antena transmissora, ao passo que a rota Radial NE se encontra nas costas da antena, de modo que a extensão daquela é muito maior que a desta.

Na rota Circular, procurou-se manter o veículo a uma distância de aproximadamente 14,8 km do transmissor, de forma a verificar a influência do tipo de ambiente no sinal recebido, uma vez que nesse caso a intensidade de campo elétrico recebido será função primordialmente de fatores locais. Essa rota inicia-se em um ambiente residencial, passa por pontos abertos e, do meio para o final, pode ser considerada essencialmente urbana.

A Tabela 3.5 mostra as diversas rotas que foram percorridas, com indicação do modo de transmissão utilizado, ambiente predominante, número de medições fixas e

número de trechos em movimento medidos.

Tabela 3.5 – Rotas percorridas nos testes.

<b>Rota</b>	<b>Nome</b>	<b>Modo</b>	<b>Ambiente</b>	<b>Medições Fijas</b>	<b>Trajetos em movimento</b>
R1	Eixo Monumental	B-21	Aberto	4	4
R2	SIA	B-21	Industrial	4	4
R3	Lago Sul	B-21	Residencial	5	5
R4	Asa Norte	B-21	Urbano	5	5
R5	Central	B-21	Urbano	6	6
R6	Radial SW	B-21	Misto	3	2
R7	Radial NE	B-21	Misto	2	1
R8	Circular	B-21	Misto	5	4
R9	Central	B-38	Urbano	6	6
R10	Central Noturna	B-38	Urbano	6	-
R11	Asa Norte	A-41	Urbano	5	5
R12	Radial SW	A-41	Misto	3	2

Cada rota percorrida é composta por pontos de medição fixa, onde as medições foram realizadas com o veículo estacionado, e por medições em movimento, que foram realizadas durante o deslocamento deste entre dois pontos de medição fixa. A única exceção foi a rota Central Noturna (Modo B-38), onde somente foram realizadas medições fixas. Essa rota, por sinal, foi a única realizada durante o período noturno.

As medições fixas permitem avaliar o comportamento do sistema em condições bastante estáveis, uma vez que há pouca variação da intensidade de campo elétrico. As medições em movimento, por outro lado, são muito mais críticas, uma vez que o movimento do veículo faz com que a intensidade de campo varie bruscamente em questão de segundos, devido à variação contínua dos múltiplos percursos percorridos pelo sinal até chegar ao receptor.

As medições fixas tiveram duração útil de três minutos cada. A duração das medições em movimento dependeu da extensão do trajeto percorrido.

A Figura 3.11 mostra o percurso das seis rotas não-radiais utilizadas durante os testes do Modo B-21.



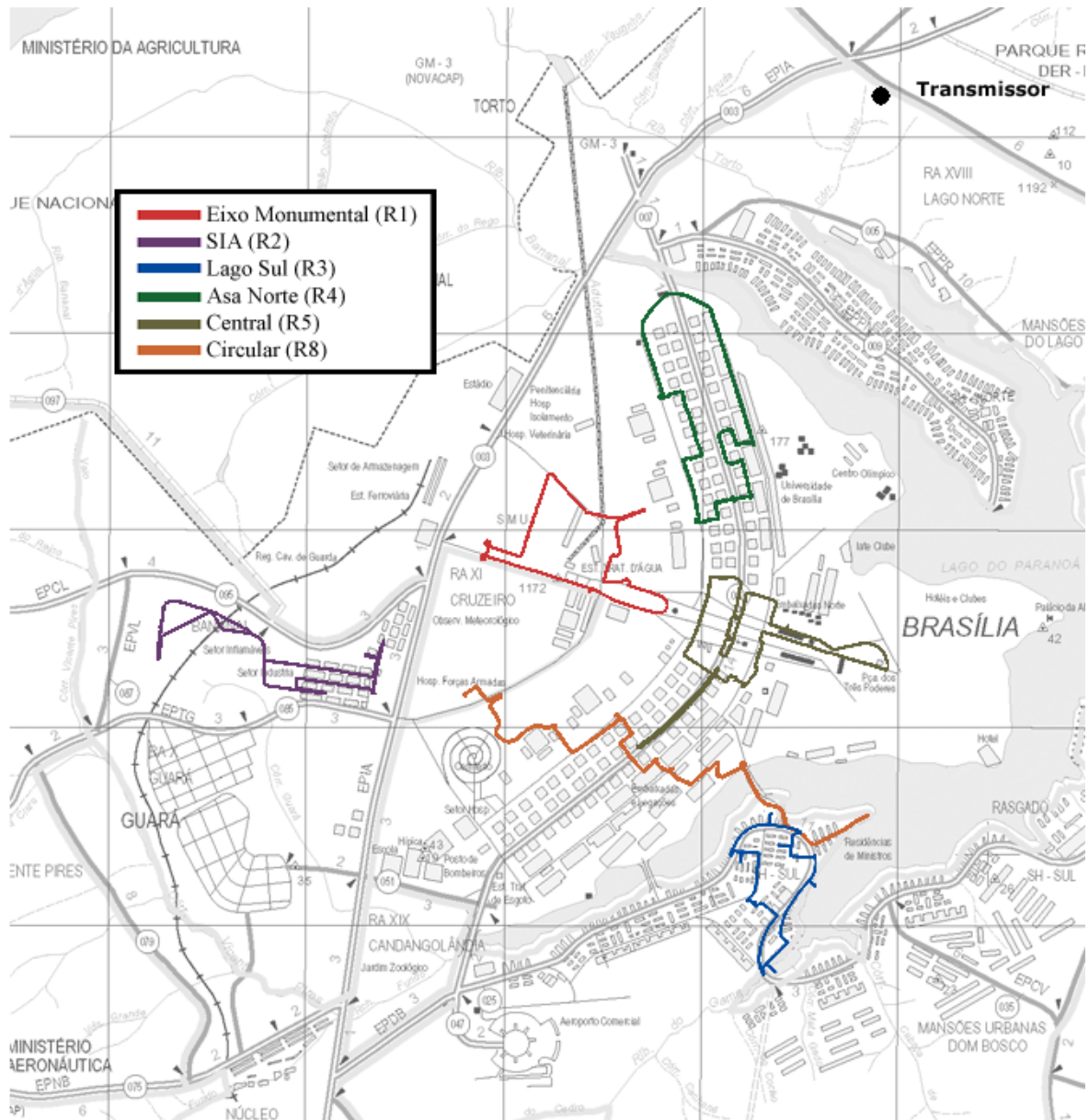


Figura 3.11 – Algumas das rotas percorridas durante os testes.

As rotas Central e Asa Norte, percorridas respectivamente usando os Modos B-38 e A-41 (R9 e R11, respectivamente), são ligeiramente distintas daquelas utilizadas nos testes do Modo B-21, mas cobrem essencialmente a mesma região destas.

## **4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES**

Conforme foi informado no Capítulo 3, três modos de transmissão DRM — denominados B-21, B-38 e A-41 (veja Tabela 3.3) — foram testados na campanha de testes. Nesse capítulo serão apresentados os resultados das medições realizadas para avaliar a cobertura e a qualidade da recepção propiciada por esses modos de transmissão. Primeiro, serão apresentadas as medições realizadas com o modo B-21, com o qual foi feito um maior número de medidas. Em seguida, serão apresentadas as medidas feitas com os modos B-38 e A-41.

Foram realizadas medições em diversos tipos de ambientes e em duas rotas radiais, conforme descrição apresentada na Seção 3.5. Além disso, foram realizadas medições com a unidade de recepção em movimento e parada (ou fixa). Assim, especialmente para o modo de transmissão B-21, a apresentação dos resultados dos testes começará por aqueles obtidos com as medições fixas, divididos segundo o tipo de ambiente de recepção, e posteriormente serão apresentados os resultados das medições em movimento.

### **4.1 MEDIÇÕES FIXAS COM O MODO DE TRANSMISSÃO B-21**

No total, foram feitas 40 medições fixas em 34 pontos diferentes, sendo 14 em ambiente aberto, 3 em ambiente industrial, 5 em ambiente residencial e 12 em ambiente urbano denso. Em seis pontos foram feitas duas medições. A Figura 4.1 mostra a distribuição espacial dos pontos, que estavam situados ao longo das diversas rotas apresentadas na Seção 3.5. Um ponto da rota Radial SW (R6) e dois da rota Radial NE (R7) estão localizados fora da área mostrada na Figura 4.1.

Para simplificar a identificação de cada medição, foi utilizada a seguinte terminologia: letra ‘R’ (de rota) seguida do número da rota (segundo a Tabela 3.5) e letra ‘P’ (de ponto) seguida de um número que identifica o ponto da rota. Caso mais de uma medição tenha sido realizada no mesmo ponto, ao nome da segunda medição será acrescentado ‘\_2’. Assim, por exemplo, R6P3\_2 é o nome dado à segunda medição feita no ponto 3 da rota Radial SW (R6).

A seguir serão apresentadas de forma mais específica os resultados das medições fixas realizadas, separadas por ambiente de recepção.

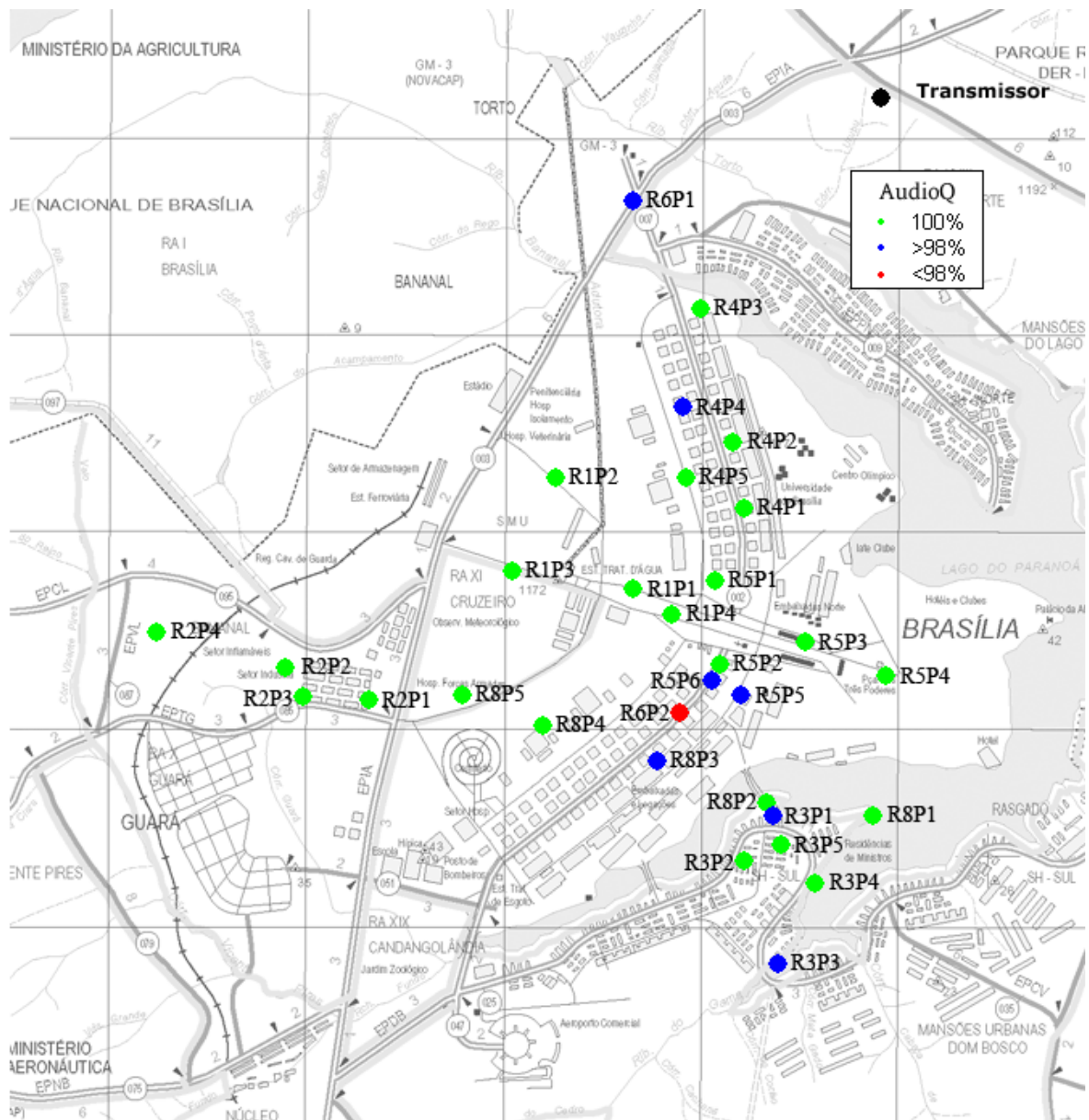


Figura 4.1 – Distribuição espacial dos pontos onde foram realizadas medições fixas com o modo de transmissão B-21. A cor do ponto indica a qualidade (AudioQ) da recepção.

#### 4.1.1 Medições em ambiente aberto

As medições fixas em ambiente aberto estão detalhadas na Tabela 4.1. Os valores de intensidade de campo e da MER são valores médios correspondentes a três minutos de medição.

Tabela 4.1 – Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas em ambiente aberto.

Ponto	Distância ao transmissor (km)	Intensidade de campo (dB $\mu$ V/m)	MER (dB)	AudioQ (%)
R1P1	11,46	63,7	29,1	100
R1P2	10,35	65,1	28,8	100
R1P3	12,42	60,2	28,8	100
R1P4	11,64	58,2	28,6	100
R1P4_2	11,64	53,4	27,7	100
R2P3	18,43	48,1	27,1	100
R4P3	5,76	68,2	28,7	100
R5P4	12,14	52,5	27,9	100
R6P1	5,47	66,5	28,8	99,98
R6P3	36,30	36,2	10,6	92,67
R6P3_2	36,30	35,3	11,6	98,61
R7P1	4,91	33,9	16,0	99,98
R7P2	13,59	28,2	10,2	43,77
R8P1	15,08	46,9	25,6	100
R8P2	14,97	48,6	25,8	100
R8P4	14,85	38,4	25,6	100

Na rota Eixo Monumental (R1), a única tipicamente aberta e que apresenta uma distância média ao transmissor de 11 km, todos os quatro pontos apresentaram intensidade de sinal e MER altas o suficiente para se obter recepções livres de erro. As duas medições no ponto 4 (mostrado na Figura 4.2), R1P4 e R1P4\_2, foram realizadas em dias diferentes e forneceram valores de intensidade de campo elétrico que diferem entre si de quase 5 dB. Esse ponto está muito próximo da Torre de TV, que tem 224 m de altura e onde estão instaladas um grande número de antenas transmissoras de emissoras de TV e rádio. Além disso, existem nas vizinhanças prédios relativamente altos, como se pode ver nas fotos mostradas na Figura 4.2, onde podem ocorrer reflexões do sinal DRM. Assim, multipercursos e espúrios de outras transmissões são as causas prováveis da diferença entre os valores da intensidade de campo obtidos nas duas medições.



Figura 4.2 – Ponto onde foram realizadas as medições R1P4 e R1P4\_2.

O ponto R2P3, embora pertença a uma rota em ambiente tipicamente industrial, denominado Setor de Indústria e Abastecimento (SIA), foi classificado como ponto em ambiente aberto, por ser um local com trânsito escasso e distante de edificações que possam refletir o sinal transmitido – veja Figura 4.3. Embora seja o ponto mais distante do transmissor (18,43 km) dentre aqueles não pertencentes às rotas radiais, a intensidade de campo e a MER do sinal recebido foram altas, o que proporcionou uma recepção sem erros.



Figura 4.3 – Ponto onde foi realizada a medição R2P3.

De maneira semelhante, os pontos R4P3, R5P4 e R8P4 embora pertençam a rotas essencialmente urbanas densas, foram classificados como pontos em ambiente aberto. O ponto R4P3 localiza-se ao final da zona residencial Asa Norte, às margens do Lago Paranoá e com visada direta ao transmissor desobstruída – veja Figura 4.4. Sua proximidade ao transmissor lhe garantiu uma alta intensidade de campo e conseqüentes altos valores medidos de MER e AudioQ.



Figura 4.4 – Diferentes ambientes de recepção dentro da mesma rota: ponto R4P3, ambiente aberto e ponto R4P2, ambiente urbano denso.

O ponto R5P4, mesmo localizado a menos de 1 km do centro político da capital,



está em uma região distante de grandes edifícios ou de outros obstáculos que possam interferir na propagação do sinal, como mostrado na Figura 4.5. O trânsito no local, embora não fosse escasso, não chegou a ser intenso. Aqui também os níveis de intensidade de campo, MER e AudioQ medidos foram muito altos.



Figura 4.5 – Localização do ponto R5P4, no centro da cidade, mas em ambiente aberto.

O ponto R8P4, mesmo pertencendo formalmente a uma das regiões mais densamente ocupadas de Brasília (Asa Sul) está localizado no parque da cidade, também distante de edificações e com trânsito fluído, como pode ser visto na Figura 4.6. No entanto, possivelmente devido às árvores localizadas muito próximas ao veículo, a intensidade de sinal medida foi bastante inferior àquela medida em outros pontos com distâncias similares, como por exemplo, R8P1 e R8P2. O fato de a MER medida possuir um valor elevado leva a crer que o sinal recebido sofreu atenuação, mas que o sinal recebido não possui múltiplos percursos de intensidade considerável.



Figura 4.6 - Ponto R8P4, localizado no parque da cidade.

Os dois primeiros pontos da rota Circular (R8P1 e R8P2), embora localizados no mesmo bairro da única rota essencialmente residencial (Lago Sul), se encontram em regiões relativamente afastadas de casas ou demais edificações e com visada ao

transmissor bastante desobstruída – veja Figura 4.7. Por isso, as medidas realizadas nesses pontos apresentaram intensidade de campo e MER elevadas, resultando em recepções livres de erros.



Figura 4.7 - Pontos R8P1 e R8P2, localizados em um bairro residencial, mas classificados como em ambiente aberto.

Os pontos R6P1 e R6P3 são os pontos inicial e final da rota Radial SW. O ponto 2 dessa rota, por encontrar-se no centro da cidade, cercado de prédios elevados, foi classificado como em ambiente urbano denso. O ponto inicial da rota, de modo similar ao ponto R4P3, encontra-se muito próximo ao transmissor, de forma a receber uma intensidade de campo considerável, o que resultou também em uma MER elevada e uma AudioQ quase perfeita. O valor de 99,98% indica que apenas um dos 4500 quadros de áudio recebidos no intervalo de 3 minutos do teste apresentou erro, o que não comprometeu a qualidade da recepção.

O ponto R6P3 é o ponto final da rota, que fora definido previamente como o ponto da rota em que a recepção deixa de ser satisfatória definitivamente. Dessa forma, é de se esperar que a AudioQ nesse ponto seja baixo. A segunda medição realizada (R6P3\_2) evidencia que nesse ponto, com um pequeno aumento no nível da MER medida ocorre um aumento considerável no valor da AudioQ. O fato de o intervalo de tempo entre ambas as medições ter sido relativamente curto (cerca de 10 minutos) indica que as condições de recepção nesse ponto podem sofrer alterações relativamente rápidas, talvez influenciadas pelo tráfego presente na rodovia próxima.

Analisando a variação instantânea da AudioQ juntamente com a variação da MER em ambas as medições realizadas nesse ponto, Figuras 4.8 e 4.9 respectivamente, nota-se que o limiar da qualidade do áudio recebido se dá, nesse caso, em aproximadamente 11 dB.

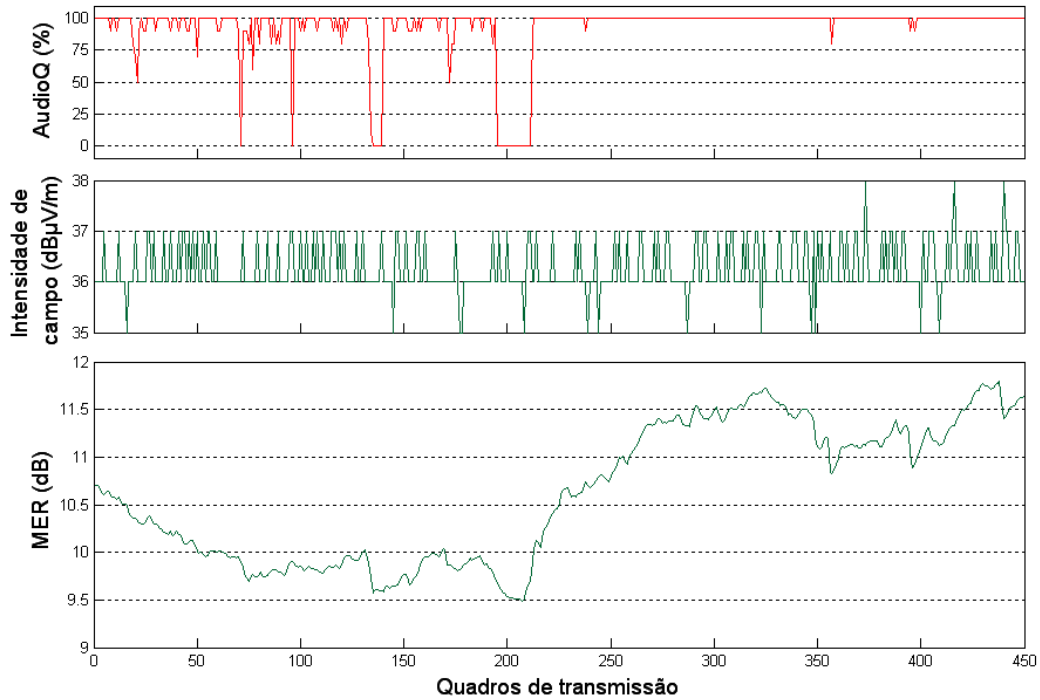


Figura 4.8 – Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R6P3.

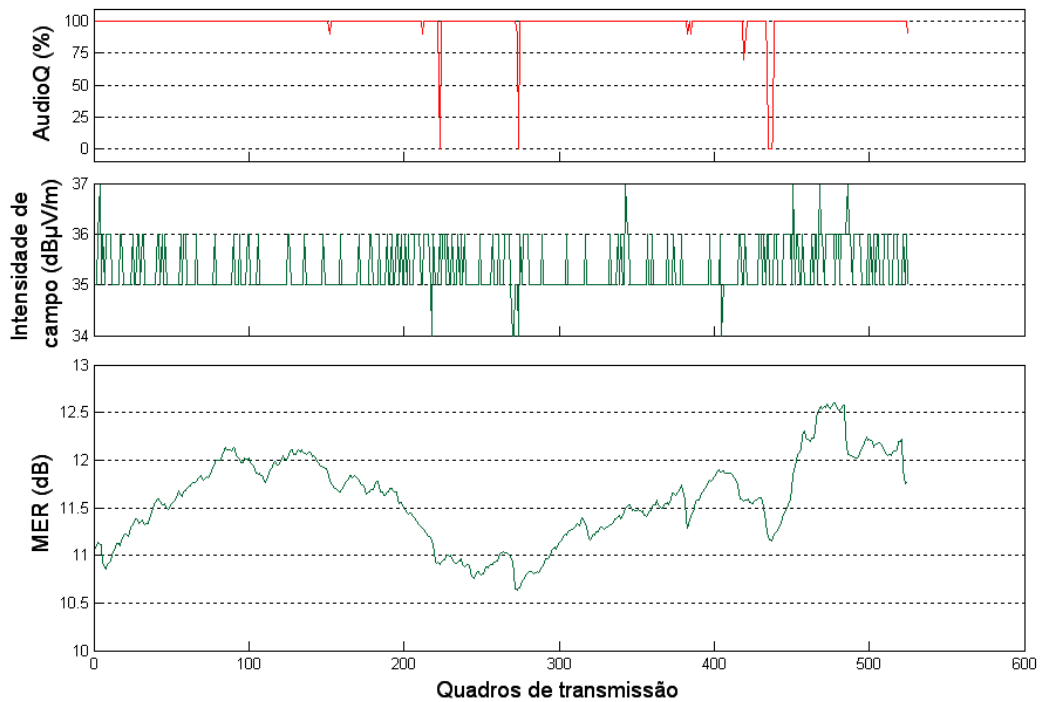


Figura 4.9 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R6P3\_2.

A rota Radial NE (R7) estava localizada nas costas da antena transmissora, de modo a receber um nível menor de intensidade de campo que pontos com a mesma distância localizados na região central da cidade. Dessa forma, mesmo sendo o ponto mais próximo ao transmissor de toda a campanha de medições, o ponto R7P1 apresenta um



valor de intensidade de campo relativamente baixo. Apesar disso, a proximidade do transmissor e o fato de não haver grandes obstáculos no caminho do sinal, proporcionam nesse ponto a recepção de um sinal com pouco desvanecimento e praticamente livre de múltiplos percursos. Isso pode ser visto no fato de que, mesmo com uma intensidade de sinal inferior à medida no ponto R6P3 (33,9 dB $\mu$ V/m contra 36,2 dB $\mu$ V/m), foi obtida nesse ponto uma MER bastante superior (16,0 dB contra 10,6 dB), o que proporcionou uma recepção de alta qualidade do sinal.

O fato de essa rota estar localizada nas costas da antena transmissora também implicou em uma diminuição considerável no comprimento desta. Enquanto o ponto final da rota Radial SW (R6P3) distava 36,30 km do transmissor, o ponto final da rota Radial NE (R7P2) estava a apenas 13,59 km deste. Neste ponto, o de menor intensidade de campo de toda a campanha de medições, o sistema ultrapassa o limiar de MER necessário para uma boa recepção utilizando o modo B-21 e passa a não ter uma boa qualidade de áudio. A variação temporal da MER e da AudioQ durante essa medição, que pode ser vista na Figura 4.10, mostra como a qualidade do áudio tende a melhorar quando há um aumento da MER, mas não consegue se estabilizar em um nível elevado. O pico de intensidade de campo ocorrido no quadro 360 pode ser resultado da passagem de um veículo pesado próximo à unidade de recepção.

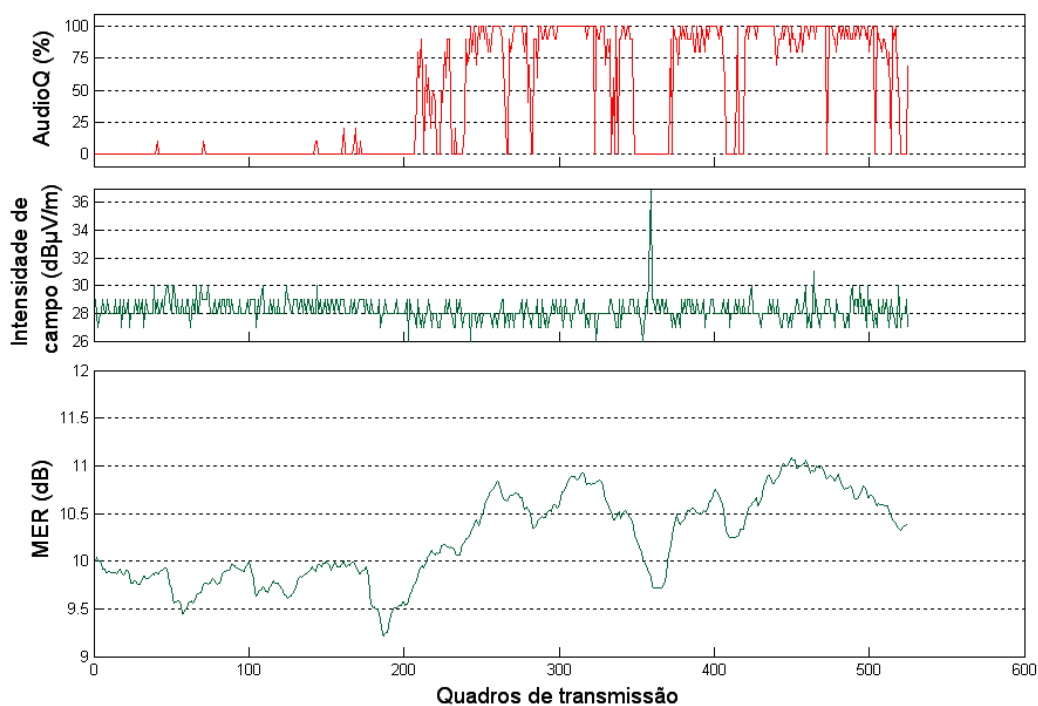


Figura 4.10 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R7P2.

### 4.1.2 Medições em ambiente industrial

As medições de cada ponto em ambiente industrial estão detalhadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas em ambiente industrial.

Ponto	Distância ao transmissor (km)	Intensidade de campo (dB $\mu$ V/m)	MER (dB)	AudioQ (%)
R2P1	16,32	43,9	23,2	100
R2P2	16,96	41,1	22,8	100
R2P4	17,16	46,1	26,1	100

Todos os pontos pertencentes ao ambiente industrial localizam-se na mesma rota (R2), em uma área de Brasília denominada Setor de Indústrias e Abastecimento (SIA). Embora essa área não apresente indústrias de grande porte, esperava-se que o tráfego local, mais intenso que em outras regiões da cidade, e a maior distância ao transmissor pudessem deteriorassem a recepção do sinal DRM. No entanto, como a linha de visada direta dos pontos dessa rota é quase que totalmente livre de obstáculos de maior tamanho, obtiveram-se em todos os pontos valores de intensidade de campo suficientemente elevados para garantir níveis médios de MER bem acima do limiar do sistema, resultando em uma recepção sem erros do sinal em todos os pontos medidos. A Figura 4.11 ilustra o ambiente de recepção encontrado nos pontos dessa rota com fotografias das duas primeiras medições fixas nela realizadas: R2P1 e R2P2.



Figura 4.11 – Pontos localizados em ambiente industrial: R2P1 e R2P2.

### 4.1.3 Medições em ambiente residencial

As medições de cada ponto em ambiente residencial estão detalhadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas em ambiente residencial.

Ponto	Distância ao transmissor (km)	Intensidade de campo (dB $\mu$ V/m)	MER (dB)	AudioQ (%)
R3P1	15,22	39,1	18,2	99,69
R3P1 2	15,22	39,5	18,8	100
R3P2	16,24	49,3	26,6	100
R3P3	18,31	33,1	19,2	98,2
R3P3 2	18,31	32,9	20,1	100
R3P4	16,55	43,0	23,9	100
R3P5	15,80	48,4	27,4	100

Todos os pontos de medição fixa classificados como em ambiente residencial se encontram na rota R3. Essa rota se localiza inteiramente no Lago Sul, um bairro residencial de classe alta, constituído basicamente por residências de 1 ou 2 pavimentos espaçadas entre si, como pode ser visto na Figura 4.12, que mostra dois dos pontos de medição fixa onde foram realizadas medições nessa rota.

Apesar da maior distância ao transmissor (comparada aos pontos no centro da cidade), o sinal chegou a todos os pontos com intensidade de campo suficiente para proporcionar altos níveis de MER e conseqüentes boas recepções. À exceção das primeiras medições realizadas nos pontos R3P1 e R3P3, todos os pontos tiveram recepções perfeitas durante os 3 minutos de medição útil. Nos pontos onde a medição não foi perfeita (embora a recepção ainda tenha sido satisfatória), a medição foi repetida visando averiguar se os erros apresentados eram sistêmicos ou eventuais. Em ambos os pontos, o resultado obtido foi uma recepção sem erros, mesmo com níveis similares de MER e intensidade de campo, o que leva a crer que os erros foram eventuais.

No ponto mais distante do transmissor (R3P3), a intensidade de campo caiu a níveis inferiores aos obtidos no ponto final da rota Radial SW (R6P3, vide Tabela 4.1), mas assim como no ponto R7P1, a menor distância que a onda percorre evita que os efeitos de múltiplos percursos se acentuem, o que resulta em uma MER consideravelmente maior.



Figura 4.12 - Pontos localizados em ambiente residencial: R32P2 e R3P5.

#### 4.1.4 Medições em ambiente urbano denso

As medições de cada ponto em ambiente urbano denso estão detalhadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas em ambiente urbano denso.

Ponto	Distância ao transmissor (km)	Intensidade de campo ( $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ )	MER (dB)	AudioQ (%)
R4P1	9,05	62,1	28,6	100
R4P2	7,84	62,7	28,9	100
R4P4	7,62	63,8	28,8	99,98
R4P5	8,90	63,6	28,7	100
R5P1	10,68	57,6	28,7	100
R5P2	12,34	47,4	26,8	100
R5P3	11,51	55,4	28,4	100
R5P5	12,83	44,1	26,2	100
R5P5_2	12,85	34,7	13,2	99,24
R5P6	12,69	51,8	27,1	99,98
R6P2	13,54	34,6	7,6	82,67
R6P2_2	13,54	33,9	12,5	97,03
R8P3	14,62	35,9	17,4	99,98
R8P5	15,12	44,9	28,5	100

As duas principais rotas classificadas como urbanas densas são as rotas Asa Norte (R4) e Central (R5). A rota R4 se localiza em um bairro residencial da cidade constituído por prédios de 8 ou 4 pavimentos e casas de 1 ou 2 pavimentos. Dessa rota, o único ponto não classificado como urbano denso foi o ponto R4P3, como explicado na Seção 4.1.1. A rota R5, onde apenas o ponto R5P4 não foi classificado como urbano denso, localiza-se no centro da cidade e passa por diversos setores administrativos e comerciais com prédios de vários pavimentos. No centro da cidade localiza-se também o ponto R6P2, o ponto com a recepção mais problemática de toda a campanha de medições. Por fim, o trecho final da

rota Circular (R8) passa pela Asa Sul e Setor Sudoeste, bairros similares à Asa Norte e também classificados como urbanos densos, de onde vem a classificação dos pontos R8P3 e R8P5. O ponto R8P4, por estar localizado no parque da cidade, distante de obstáculos relevantes, foi classificado como em ambiente aberto – veja Seção 4.1.1.

Das 14 medições realizadas, 8 apresentaram recepção perfeita (AudioQ = 100%). Das 6 medições com erros, 4 podem ser considerados erros eventuais e 2, sistêmicos, mais precisamente, as duas medições realizadas no ponto 2 da rota Radial SW (R6).

A linha de visada direta do ponto R6P2 passa pelo centro do Setor Comercial Sul, uma área de Brasília com vários prédios de escritórios de altura mais elevada que os demais. Além disso, próximo a esse ponto encontram-se o Setor Bancário e o Setor de Autarquias Sul, áreas que também possuem prédios elevados, nos quais o sinal pode ter sido refletido, chegando, portanto ao receptor por múltiplos percursos e degradando a recepção. Desta forma, mesmo apresentando uma intensidade de campo semelhante à de alguns outros pontos (e.g. R3P3, R6P3 e R7P1) a MER obtida aqui foi inferior à destes. A variação temporal intensa da AudioQ, mostrada na Figura 4.13, indica que o áudio não foi recebido de maneira estável por longos períodos de tempo, o que indica uma recepção de péssima qualidade. Nota-se, no entanto, que a AudioQ variou com menor intensidade entre os quadros 130 e 210, quando a MER medida apresentou um pequeno pico.

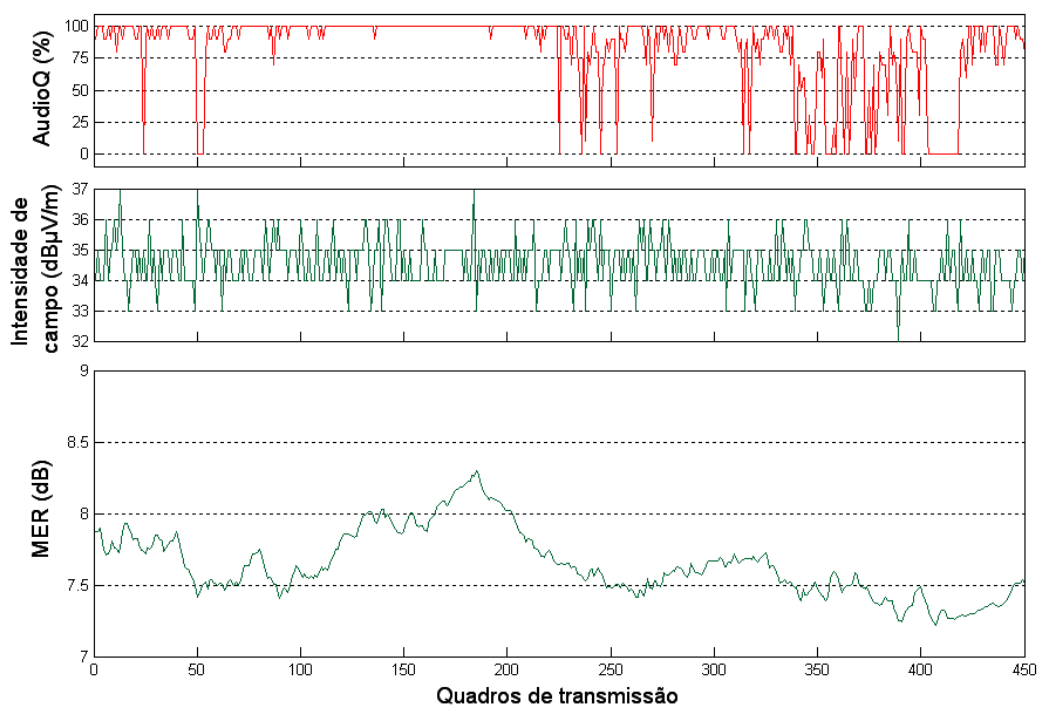


Figura 4.13 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R6P2.

Na tentativa de elucidar o ocorrido na primeira medição, uma segunda medida foi realizada, com duração maior do que as dos demais pontos de medição fixa. Como pode ser visto na Figura 4.14, a menor intensidade de campo e maior MER indicam que o multipercurso foi menos intenso que na primeira medição. No entanto, ainda houve um número considerável de erros de recepção, muito embora estes tenham sido em sua maioria de menor intensidade que os da primeira medição.

Ao final da medição o valor de MER medida caiu abruptamente para 0 dB, sendo acompanhada por uma queda igualmente intensa da AudioQ. É preciso ressaltar, no entanto, que o valor de MER igual a 0 dB não deve ser interpretado literalmente, uma vez que caso os erros de modulação tiveram a mesma intensidade dos pontos originais, eles cruzariam as fronteiras de decisão da constelação e seriam computados com menor intensidade, aumentando a MER. Dessa forma, esse resultado deve indicar apenas que a intensidade de erros foi tamanha que o software não pôde computá-la com precisão.

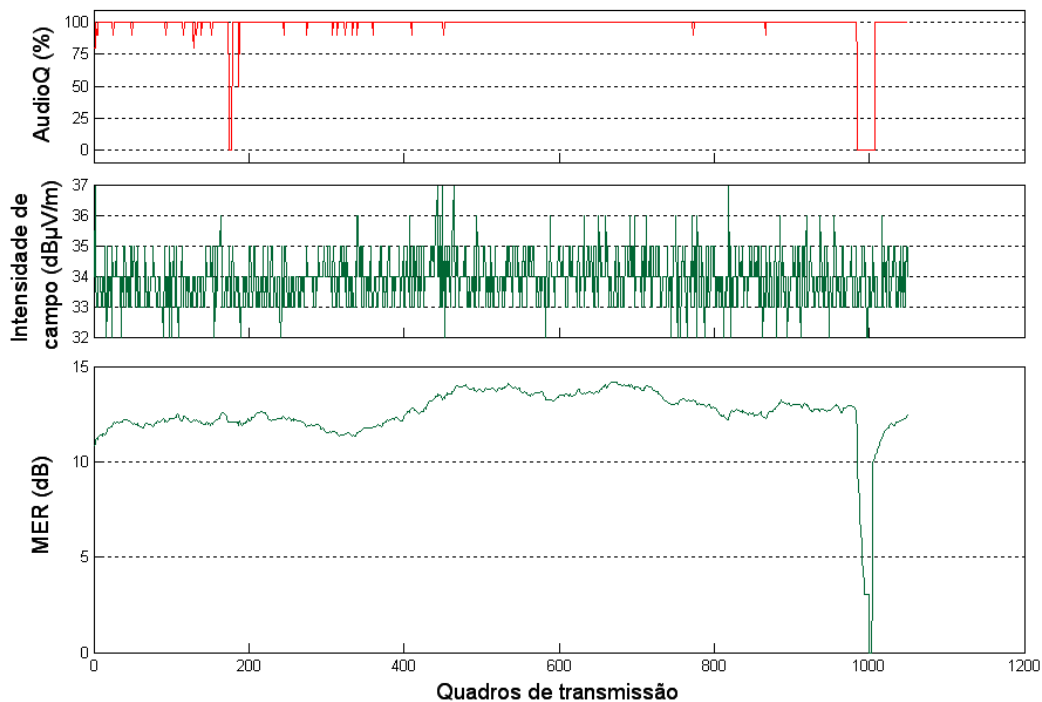


Figura 4.14 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R6P2\_2.

A influência dos prédios próximos na recepção do sinal também pode ser observada nas duas medições realizadas no ponto 5 da rota Central (R5). Esse ponto está localizado em uma área de prédios governamentais de vários pavimentos, conhecida como Setor de Autarquias Sul – veja Figura 4.15 -, e embora ambas as medidas tenham sido consideradas

como tendo sido realizadas no mesmo ponto, elas estão na verdade separadas por alguns metros.



Figura 4.15 – Local onde foram realizadas a medição R5P5 e R5P5\_2.

Isso foi feito porque, quando se realizaram as medições, notou-se que um pequeno deslocamento do veículo de medição resultava em grandes variações na intensidade de campo medida. Isso ocorre porque ao se deslocar o veículo, o caminho principal por onde o sinal chegava ao móvel pode ser bloqueado, diminuindo a intensidade de campo elétrico recebida. Além disso, o deslocamento pode fazer com que o sinal chegue por novos caminhos, surgindo, portanto, o fenômeno do multipercurso, que pode resultar em desvanecimento do sinal. Nesse caso específico, a variação da intensidade de campo chegou a quase 10 dB.

A análise da variação temporal da MER e da AudioQ de ambas as medições, mostrada na Figura 4.16 para a condição mais favorável e na Figura 4.17 para a medição menos favorável, mostra que enquanto a MER da primeira medição permanece sempre em níveis muito altos, mantendo a qualidade do áudio sempre em 100%, na segunda medição a MER baixa para bem próximo do limiar de recepção do sistema e alguns erros passam a ocorrer. É possível notar também, que a maior intensidade de campo recebida na medição R5P5 resulta em uma MER de valor muito mais constante que a da outra medição. Enquanto a MER da primeira medição variou pouco mais de 1 dB, a variação da segunda superou 3 dB. Por fim, nota-se que a maior concentração de erros de recepção na medição R5P5\_2 coincide com a medição dos menores valores de MER.



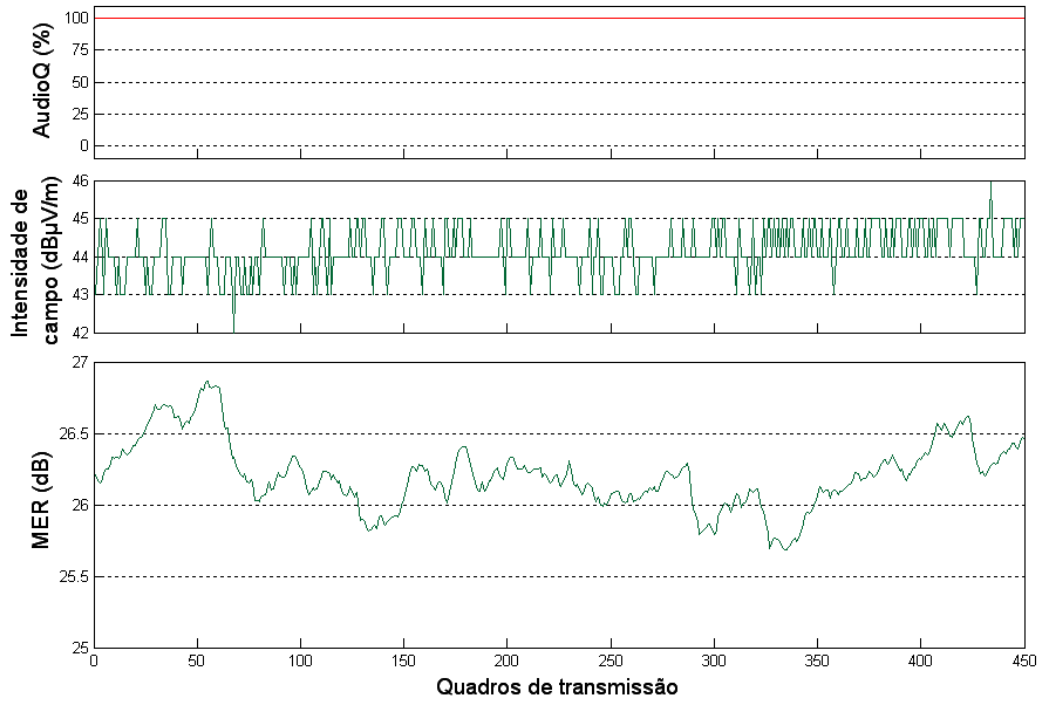


Figura 4.16 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R5P5.

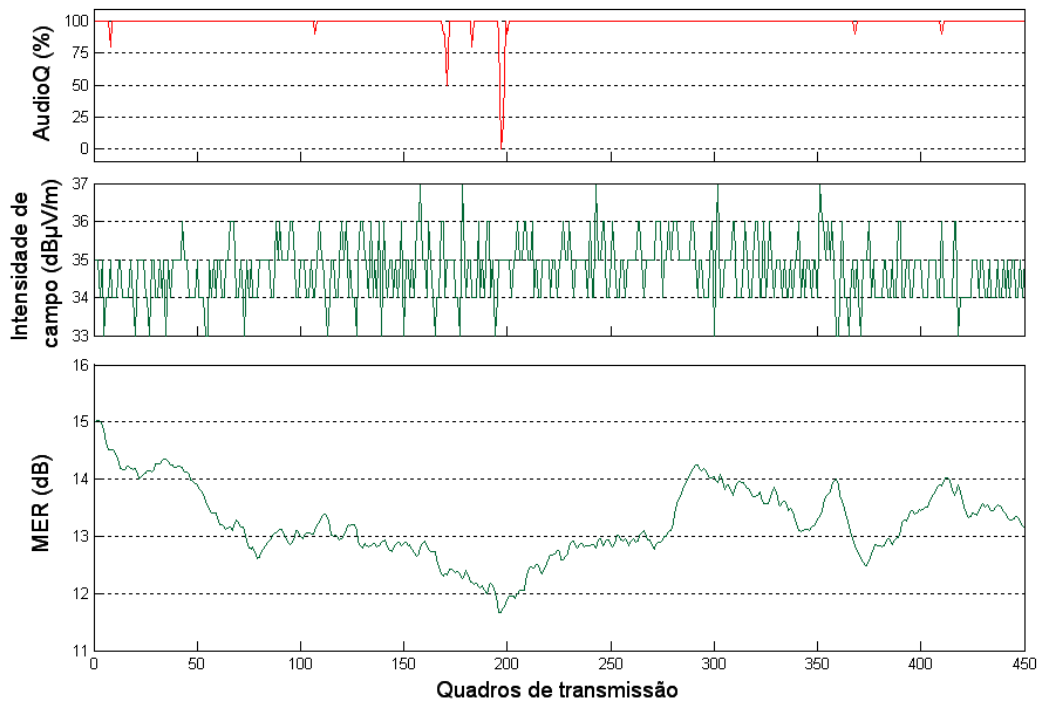


Figura 4.17 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R5P5\_2.

## 4.2



## **MEDIÇÕES EM MOVIMENTO COM O MODO DE TRANSMISSÃO B-21**

Nesta seção serão apresentados os resultados das medidas realizadas em movimento ao longo das rotas descritas na Seção 3.5, usando o modo de transmissão B-21. Aqui também a seção será dividida segundo o ambiente predominante de cada rota, embora seja importante lembrar que algumas rotas têm trechos localizados em outro tipo de ambiente que não aquele predominante.

### **4.2.1 Medições em ambiente aberto**

A única rota percorrida essencialmente em ambiente aberto foi a rota Eixo Monumental (R1). Essa rota estava relativamente próxima do transmissor, com a distância do veículo a ele variando entre 10 e 13 km e a linha de visada até o transmissor desobstruída. Por essa razão, a intensidade de campo recebida foi bastante elevada: a maior parte do tempo esteve acima de 50 dB $\mu$ V/m e em nenhum momento caiu abaixo de 35 dB $\mu$ V/m, como se pode ver na Figura 4.18. Isso fez com que a MER se mantivesse igualmente alta: a maior parte do tempo seu valor foi superior a 20 dB — veja gráfico mostrado na Figura 4.18. Dessa forma, a recepção foi praticamente livre de erros, como se pode ver pela curva de AudioQ mostrada na Figura 4.18. De fato, apenas para um quadro de transmissão a AudioQ do sinal recebido foi inferior a 100%. Nesse quadro de transmissão, um único quadro de áudio (ou 40 ms) não foi recuperado satisfatoriamente, o que não foi suficiente para causar uma degradação perceptível no áudio reproduzido. Em várias das medições em movimento foram medidas pequenas quedas da AudioQ como essa, sem que a MER se alterasse significativamente. Isso ocorre devido ao fato de a MER ser uma média, o que pode muitas vezes ocultar erros de curta duração na recepção.

Por fim, nota-se que o gráfico da intensidade de campo tende a acompanhar o gráfico da distância ao transmissor de maneira inversamente proporcional até aproximadamente o 2000º quadro. Nesse momento ocorre uma queda mais abrupta devido à passagem sob dois viadutos. Em torno e após o 2700º quadro, o veículo de medida trafegou próximo a prédios de grande altura, o que fez a intensidade de campo variar bastante devido ao desvanecimento causado provavelmente pela obstrução do sinal e a múltiplos percursos de propagação devidos a reflexões.

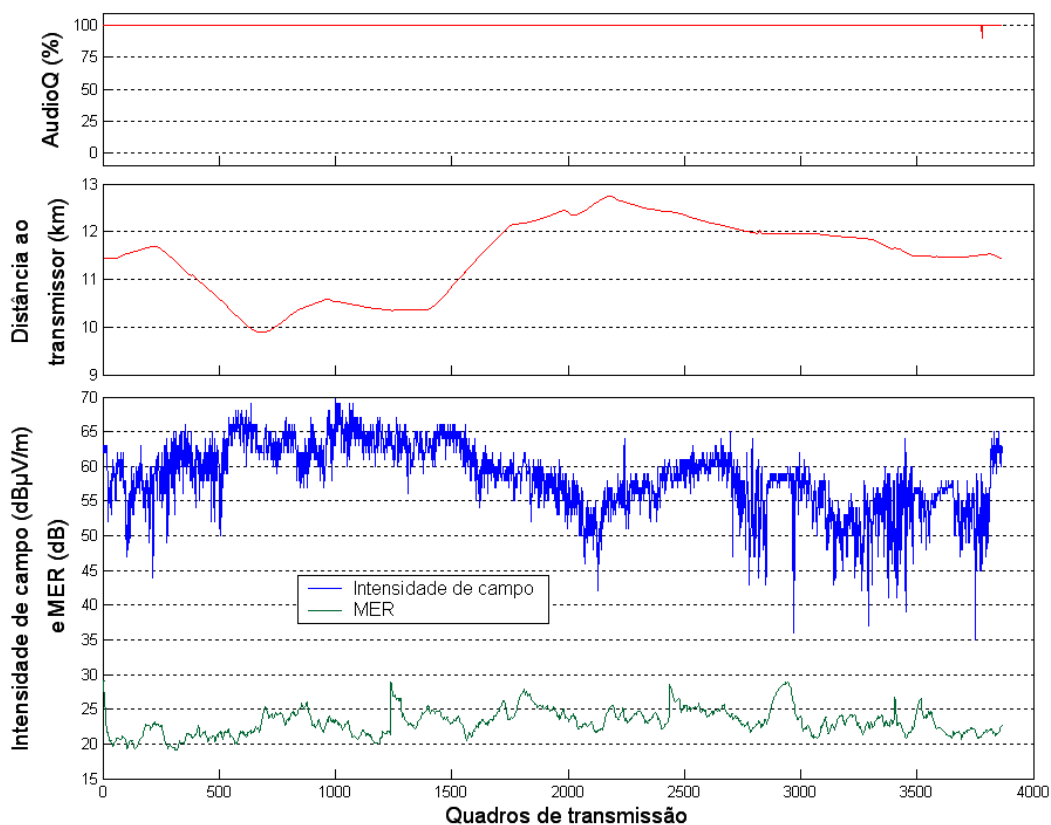


Figura 4.18 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Eixo Monumental, com o modo de transmissão B-21.

#### 4.2.2 Medições em ambiente industrial

A única rota percorrida em ambiente tipicamente industrial foi a rota R2, localizada no Setor de Indústria e Abastecimento (SIA) de Brasília. Dentre as rotas fechadas, essa é a rota mais distante do transmissor, com distâncias variando entre 15 e 19 km. No entanto, o trecho mais distante é menos densamente ocupado, como se pode ver nas fotos mostradas na Figura 4.3, podendo ser classificado como ambiente aberto. Conseqüentemente, nesse trecho as condições de recepção são melhores.

A Figura 4.19 mostra os resultados das medições feitas ao longo da rota SIA (R2). Notar que na primeira parte do percurso (até o 1600º quadro), localizada em uma área mais densamente ocupada, ocorre uma variação considerável da intensidade de campo em pequenos intervalos de tempo. Segue-se, então, um trecho localizado em ambiente mais aberto (correspondente aos quadros de 1600 a 3300), onde nota-se uma variação muito menor da intensidade de campo. Por fim, a rota volta a percorrer a região principal do SIA e nota-se novamente uma variação maior da intensidade de campo.

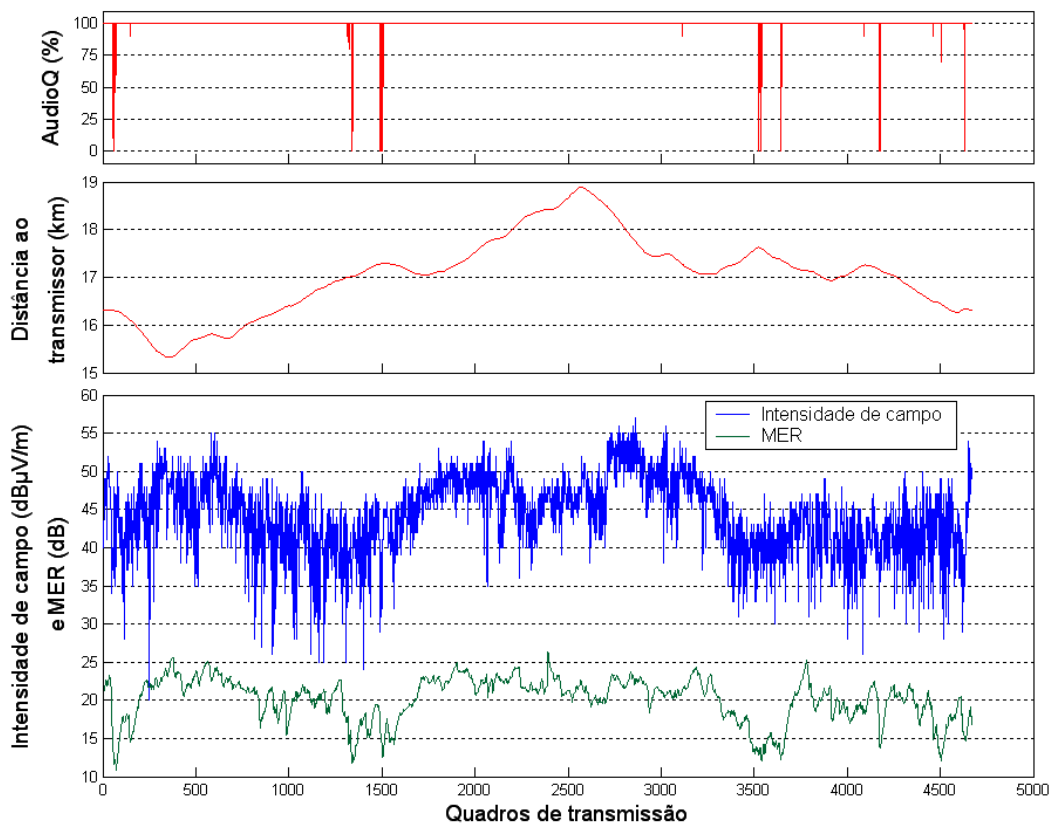


Figura 4.19 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota SIA, com o modo de transmissão B-21.

Nos dois trechos localizados em áreas mais densamente ocupadas, as grandes variações no nível de campo recebido se refletiram em variações igualmente acentuadas da MER e, conseqüentemente, em erros no áudio reconstruído (AudioQ < 100%). Tipicamente, os erros ocorreram quando a MER caiu para em torno de 15 dB ou abaixo desse valor.

No trecho da rota que estava mais distante do transmissor, mas em área praticamente de ambiente aberto, a intensidade de campo recebido se manteve quase todo tempo acima de 40 dBμV/m e a MER, acima de 20 dB, resultando em uma recepção praticamente livre de erros.

A Figura 4.20 mostra a localização dos trechos da rota SIA onde o valor de AudioQ medido foi igual ou superior a 98% e aqueles onde a AudioQ foi inferior a 98%.

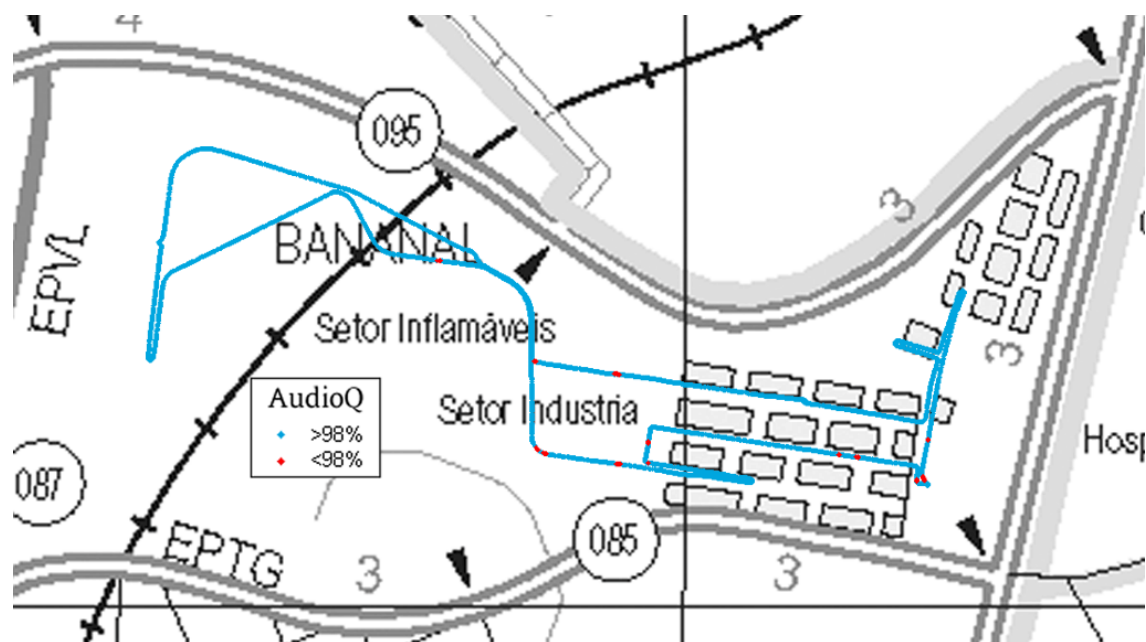


Figura 4.20 – Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota SIA, com o modo de transmissão B-21.

#### 4.2.3 Medições em ambiente residencial

Em ambiente denominado residencial houve apenas a rota Lago Sul (R3), que estava, assim como a rota SIA (R2), relativamente afastada do transmissor, com distâncias variando entre 15 e 18,5 km.

A Figura 4.21 mostra os resultados das medições feitas ao longo da rota Lago Sul (R3). Assim como ocorreu na rota SIA (R2), a intensidade de campo apresentou grande variabilidade ao longo da rota R3, provavelmente causada por obstruções do sinal e pela propagação multipercurso, e esteve entre 35 e 50 dB $\mu$ V/m a maior parte do tempo. Contudo, em alguns trechos da rota, houve grandes reduções na intensidade do sinal. A maior delas (em torno do quadro 1600) ocorreu quando o veículo de medida passou muito próximo a um pequeno edifício situado em uma área comercial do bairro. Isso fez com que o valor da MER caísse para zero. Uma outra queda da MER para zero (quadro 4150) ocorreu com um nível de campo elevado, o que indica que a causa provável foi a propagação multipercurso ou alguma fonte de ruído nas proximidades.

Assim como ocorreu na rota SIA (R2), na rota R3 os erros de recepção ocorreram quando o valor da MER caiu para em torno de 15 dB ou abaixo desse valor. Na maioria das vezes que isso ocorreu, a intensidade de campo tinha valor menor que 35 dB $\mu$ V/m.

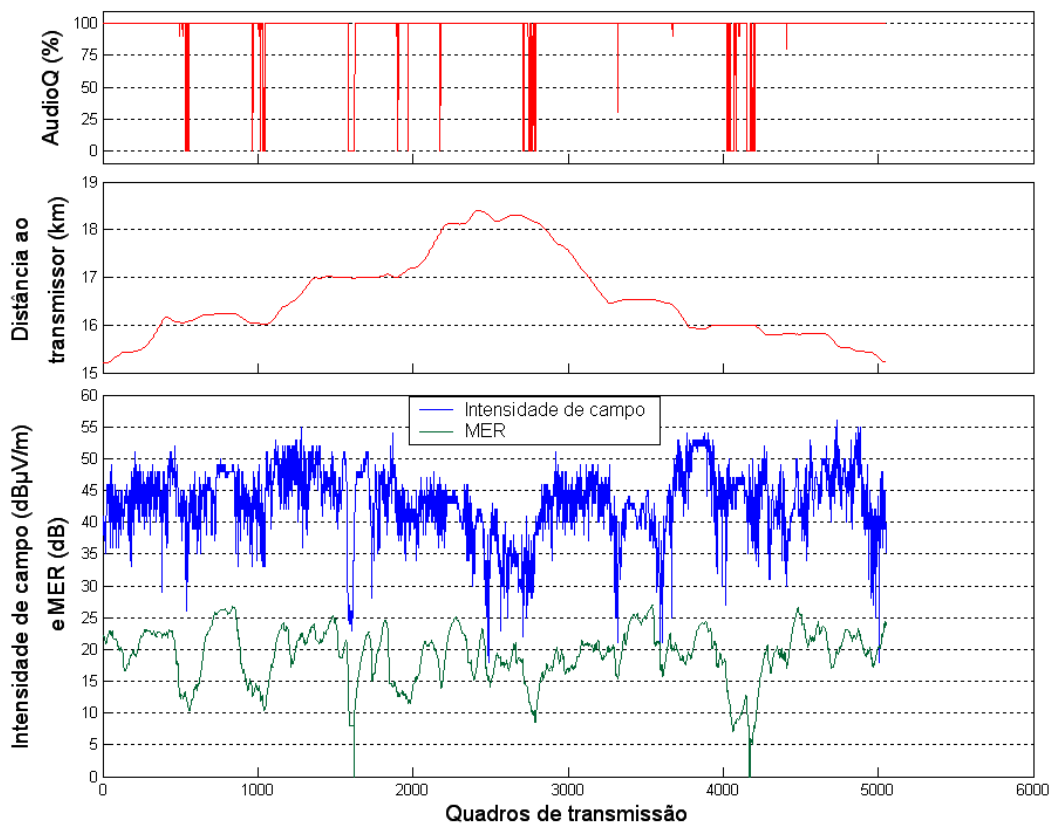


Figura 4.21 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Lago Sul (R3), com o modo de transmissão B-21.

A Figura 4.22 mostra, em vermelho, a localização dos trechos da rota R3 onde a medida de AudiQ foi menor que 98%. É possível notar que a maioria dos erros de recepção ocorreu quando o veículo de medição trafegava por vias perpendiculares à linha de visada direta ao transmissor. Isso leva a crer que as casas localizadas em ambos os lados das vias são obstáculos grandes o suficiente para refletir o sinal e causar multipercurso. Nota-se que a concentração de erros ocorridos é tanto maior quanto mais perpendicular a rua trafegada for ao transmissor.

A teoria de que esses erros foram causados por multipercurso resultante da reflexão do sinal nas casas localizadas próximas à via é reforçada pelo fato de que em algumas ruas igualmente perpendiculares ao transmissor, porém mais afastadas das residências, não ocorreram erros de recepção.

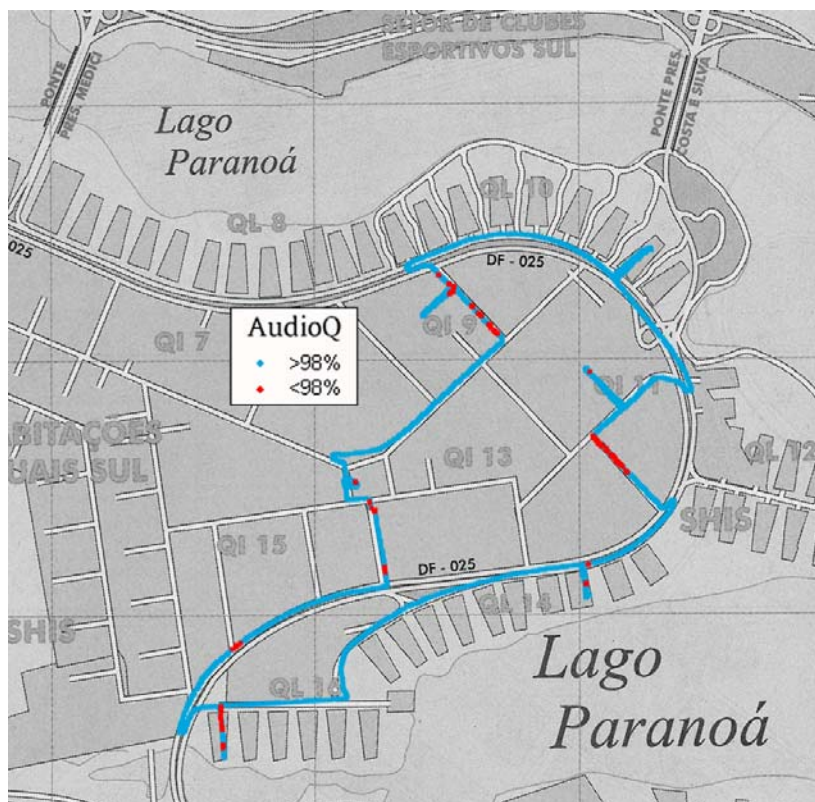


Figura 4.22 – Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Lago Sul, com o modo de transmissão B-21.

#### 4.2.4 Medições em ambiente urbano denso

Em ambiente urbano denso foram percorridas duas rotas: rota Asa Norte (R4) e rota Central (R5).

A rota R4 é a mais próxima do transmissor, com distâncias entre 6 e 10 km. A Figura 4.23 mostra os resultados das medições feitas ao longo dessa rota. Assim como na rota R1 (em ambiente aberto), a intensidade de campo atingiu, ao longo da rota R4, valores bem altos, chegando algumas vezes a ultrapassar 70 dB $\mu$ V/m. No entanto, a variação da intensidade do sinal recebido foi muito mais rápida ao longo da rota R4 do que ao longo da rota R1 — compare o gráfico da intensidade de campo mostrado na Figura 4.23 com aquele mostrado na Figura 4.18. Isso se deve ao fato da rota R4 estar localizada em uma área com uma grande densidade de prédios de 4 e 6 andares, que obstruem e refletem o sinal DRM. Com o movimento do veículo de medida, esse ambiente causa desvanecimento rápido no sinal recebido por causa das mudanças rápidas nas condições de obstrução e de multipercurso.

Uma redução na variabilidade da intensidade do sinal foi observada aproximadamente entre os quadros 1700 e 2100, recebidos em um trecho da rota localizado

às margens do Lago Paranoá, no final da zona residencial denominada Asa Norte. Esse trecho possui uma visada direta ao transmissor desobstruída e não há edifícios nas proximidades. Portanto, essa área pode ser classificada como aberta. Nota-se, no entanto, que apesar da maior estabilidade da intensidade de campo, a MER teve, nesse trecho, uma grande variação e atingiu seu menor valor, embora suficientemente alto para que a AudioQ fosse de 100%. Provavelmente, isso foi causado por multipercurso devido à reflexão do sinal na superfície do lago.

Em apenas um ponto, no quadro 1500 ocorreu um erro no áudio recebido, causado por uma queda momentânea, porém abrupta, da intensidade de campo quando o veículo de medição passou por uma pequena depressão. Esse erro não foi intenso o suficiente para alterar significativamente a MER.

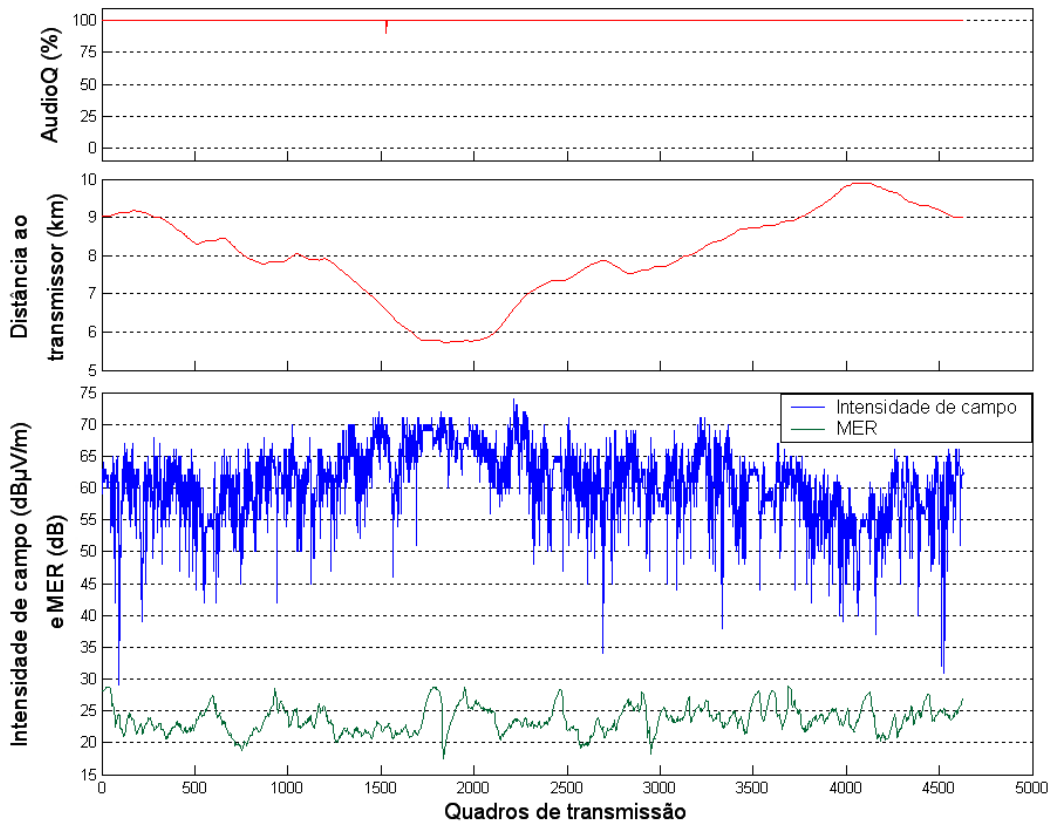


Figura 4.23 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Asa Norte, com o modo de transmissão B-21.

A Figura 4.24 mostra a rota R4. O ponto em vermelho indica o único local onde a AudioQ foi menor que 100%.



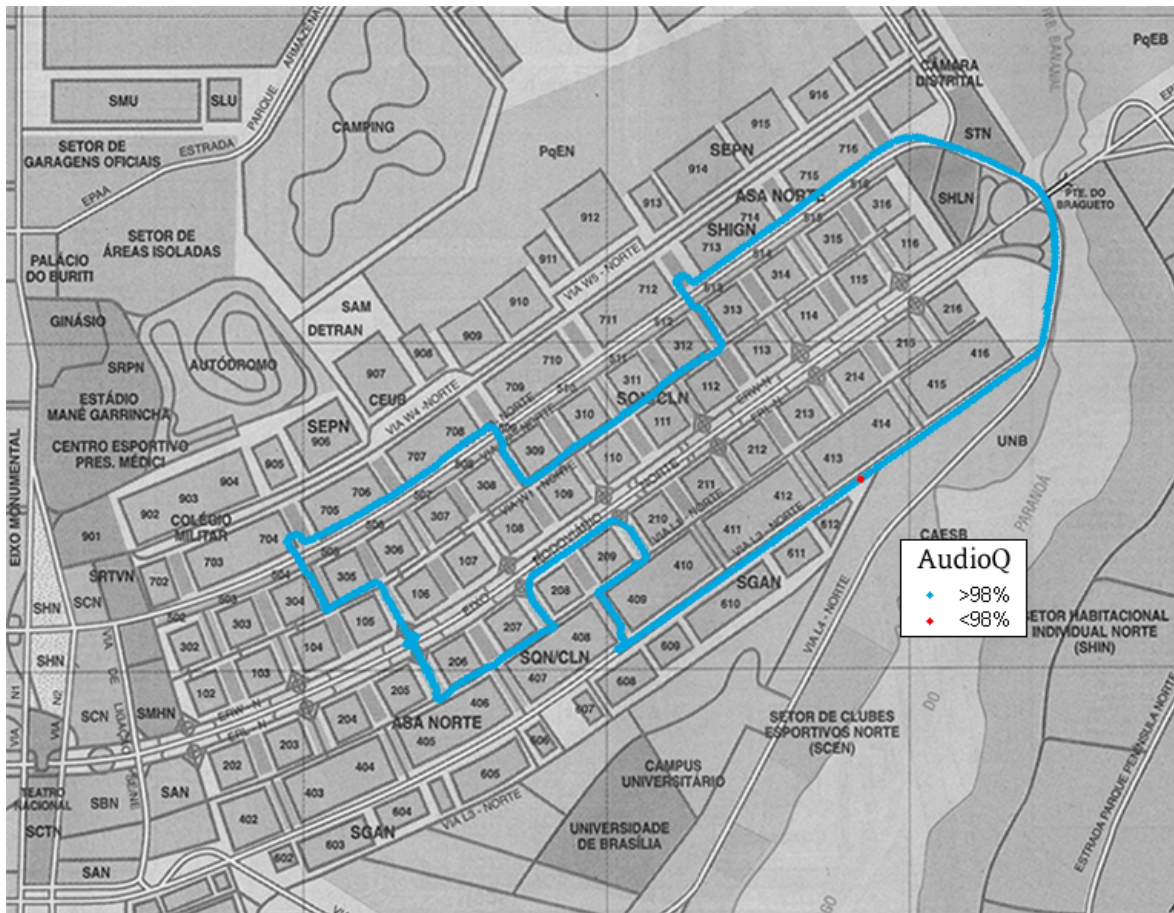


Figura 4.24 – Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Asa Norte, com o modo de transmissão B-21.

Ao longo da rota Central (R5), a distância entre o veículo de medida e o transmissor variou entre 10,5 e 15 km. A Figura 4.25 mostra os resultados das medições feitas ao longo dessa rota. A variação instantânea da intensidade de campo ao longo de R5 foi ainda maior que na rota R4. A área onde está localizada a rota R5 é a que contém os prédios mais altos de Brasília e, conseqüentemente, é uma área onde ocorre forte desvanecimento rápido no sinal recebido por causa das mudanças rápidas, quando a recepção é em movimento, nas condições de obstrução e de multipercurso.

Apesar da grande variabilidade da intensidade do sinal recebido, essa se manteve a maior parte do tempo acima de 35 dB $\mu$ V/m e a MER acima de 20 dB. No entanto, durante a recepção dos quadros 4100 a 5000, houve uma redução da intensidade do sinal, acompanhada de um aumento da sua variação. Para alguns quadros nesse intervalo, a intensidade do sinal foi menor que 30 dB $\mu$ V/m e a MER chegou a valores em torno de 15 dB. Conseqüentemente, a AudioQ de alguns quadros foi baixa ou até mesmo igual a zero, o que significa que todo um quadro de transmissão (400 ms) foi perdido. A recepção dos quadros 4100 a 5500 ocorreu quando o veículo transitava pelo Setor de Autarquias Sul e



pelo Setor Bancário Sul, áreas da cidade com prédios de altura elevada e relativamente próximos uns dos outros. Certamente por isso os efeitos das obstruções e do multipercurso foram mais intensos do que no restante da rota.

Alguns quadros que precederam ao quadro 7000 também apresentaram AudioQ inferior a 100%. A recepção desses quadros se deu nas proximidades de um grande edifício de um *shopping center*, provável causador de reflexões e, portanto, de propagação multipercurso.

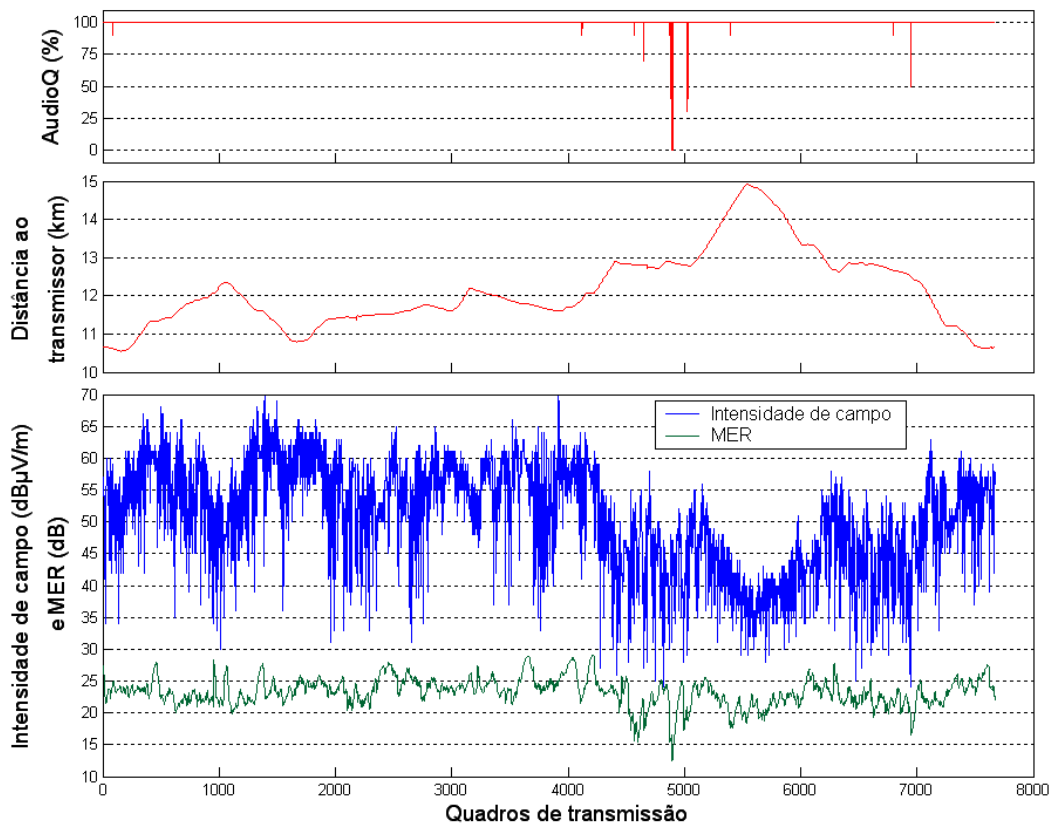


Figura 4.25 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Central, com o modo de transmissão B-21.

A Figura 4.26 mostra, em vermelho, a localização dos trechos da rota R5 onde a medida de AudiQ foi menor que 98%. É possível observar como a maioria dos erros ocorridos se concentra na mesma região do mapa, justamente na região onde estão localizados o Setor de Autarquias Sul, o Setor Bancário Sul e o Setor Comercial Sul.

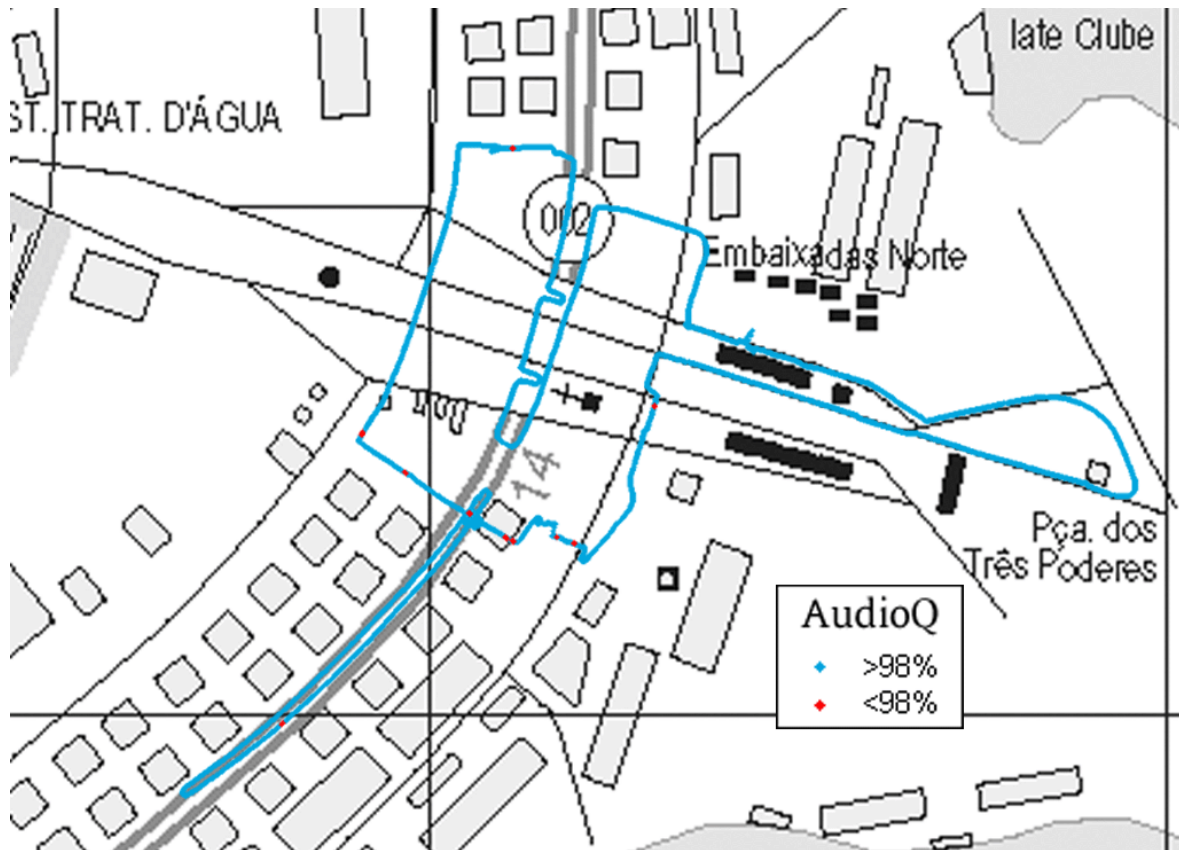


Figura 4.26 – Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Central, usando modo de transmissão B-21.

#### 4.2.5 Medições ao longo das rotas radiais

Como explicado anteriormente, foram percorridas durante os testes duas rotas radiais — Radial SW (R6) e Radial NE (R7) —, com o objetivo de estimar o limite de cobertura do sinal DRM.

A rota Radial SW (R6) é a mais extensa das duas, por se encontrar na direção do lóbulo principal da antena transmissora, tendo sido possível receber o sinal com qualidade a cerca de 36 km do transmissor. A Figura 4.27 mostra a localização geográfica dessa rota e a qualidade da recepção ao longo dela. A Figura 4.28 mostra o resultado das medições feitas.

A rota R6 se inicia a pouco mais de 5 km de distância do transmissor em um cruzamento de rodovias denominado Balão do Torto. Esse é o ponto mais alto da rota e a linha de visada dele até a antena transmissora é desobstruída. Saindo desse ponto, a rota percorre uma descida até passar sobre o Lago Paranoá e, então, chega ao início do Plano Piloto, a principal área urbana de Brasília. Desse ponto até ao transmissor, a distância é de

aproximadamente 6 km. A rota passa, então, por todo o Plano Piloto, percorrendo o Eixo Rodoviário, uma das principais avenidas de Brasília. O final do Plano Piloto — final da Asa Sul — está distante do transmissor aproximadamente 17,5 km.

No primeiro trecho da rota, até o ponto que dista aproximadamente 13,5 km do transmissor, houve um erro de configuração do *software* de medição e os valores medidos de MER ficaram inválidos. Contudo as medições de intensidade de campo e de AudioQ foram corretas.

No trecho que dista em torno de 11,5 km do transmissor, o veículo de medida passou por uma espécie de túnel, o que causou uma grande diminuição na intensidade do sinal recebido, como mostra o gráfico na Figura 4.28. Contudo, durante essa travessia do túnel o valor de AudioQ permaneceu em 100%, ou seja, não houve interrupção da recepção.

Após a saída do túnel, a intensidade do sinal recebido aumentou, mas apresentou uma grande variação e os valores de AudioQ caíram bastante, chegando a 0% para alguns quadros — veja gráfico mostrado na Figura 4.28. Após o túnel começa o setor denominado Asa Sul e, em seu início, nas proximidades da rota, existem diversos prédios altos, pertencentes ao denominado Setor Bancário Sul. Provavelmente esses prédios causaram a reflexão do sinal, intensificando o fenômeno da recepção multipercurso. Assim, apesar do nível da intensidade do sinal recebido ser relativamente alto, houve uma grande degradação na qualidade da recepção. O ponto R6P2 de medida fixa se localiza nesse trecho da rota R6 e a degradação aqui relatada foi observada também nas medições fixas, apresentadas na Subseção 4.1.4. A reinicialização do sistema para a realização da medição no ponto R6P2 corrigiu o erro de *software* anteriormente apresentado e, a partir desse ponto, foi possível fazer medições válidas da MER também em movimento.

O trecho da rota que dista em torno de 19,5 km se localiza em uma depressão, onde pode ter ocorrido a obstrução da linha de visada para a antena transmissora. Isso explicaria a diminuição no nível do sinal recebido e no valor da MER e, conseqüentemente, uma momentânea degradação na qualidade da recepção (isto é, AudioQ < 100%). Uma outra degradação momentânea ocorreu quando a distância ao transmissor foi de aproximadamente 23 km, durante a passagem sob um viaduto.

Por fim, a cerca de 35 km de distância do transmissor a intensidade de campo teve

uma diminuição mais acentuada e a MER iniciou uma queda ainda mais forte. Além da distância de 36 km a recepção não foi mais possível.

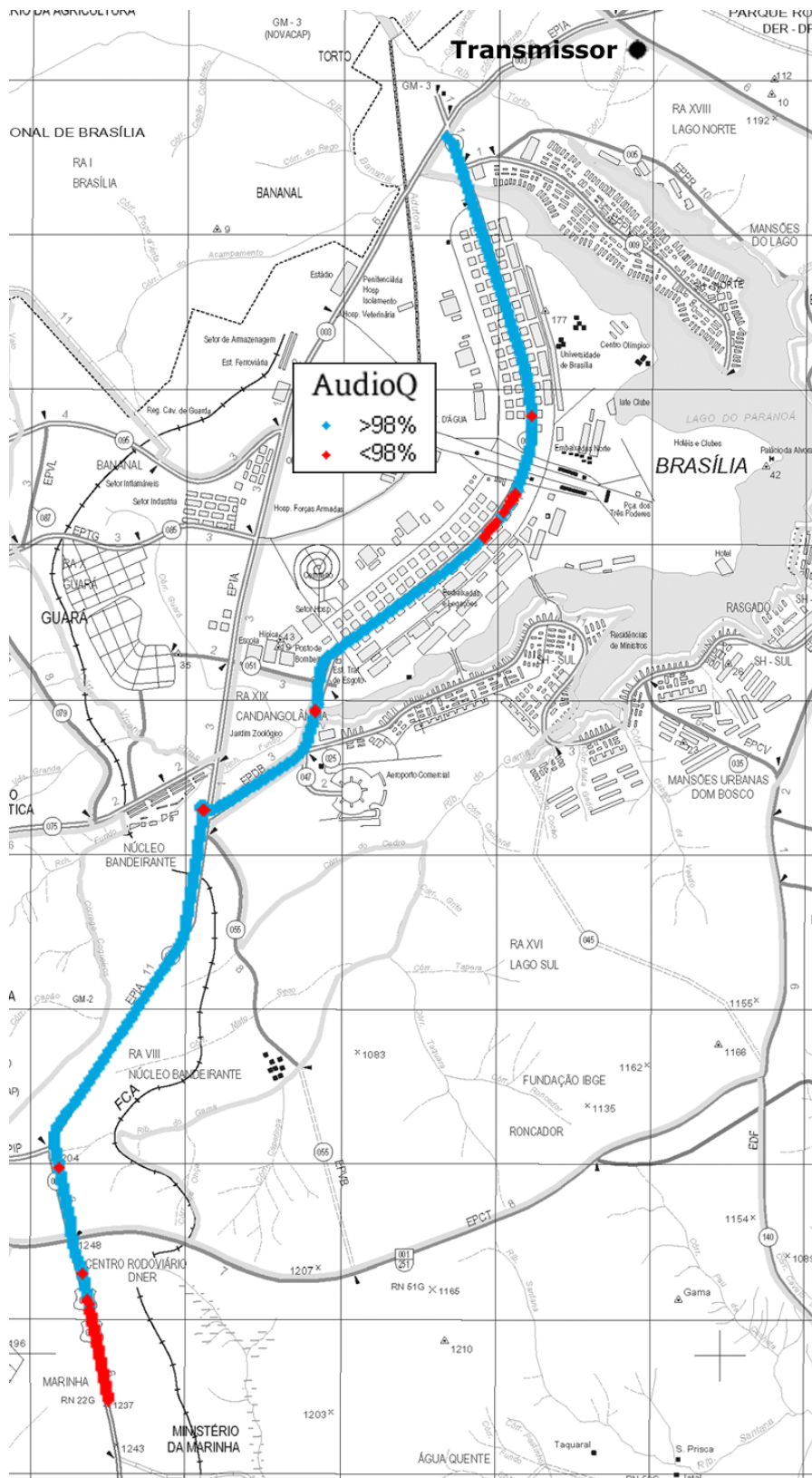


Figura 4.27 – Rota Radial SW com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão B-21.

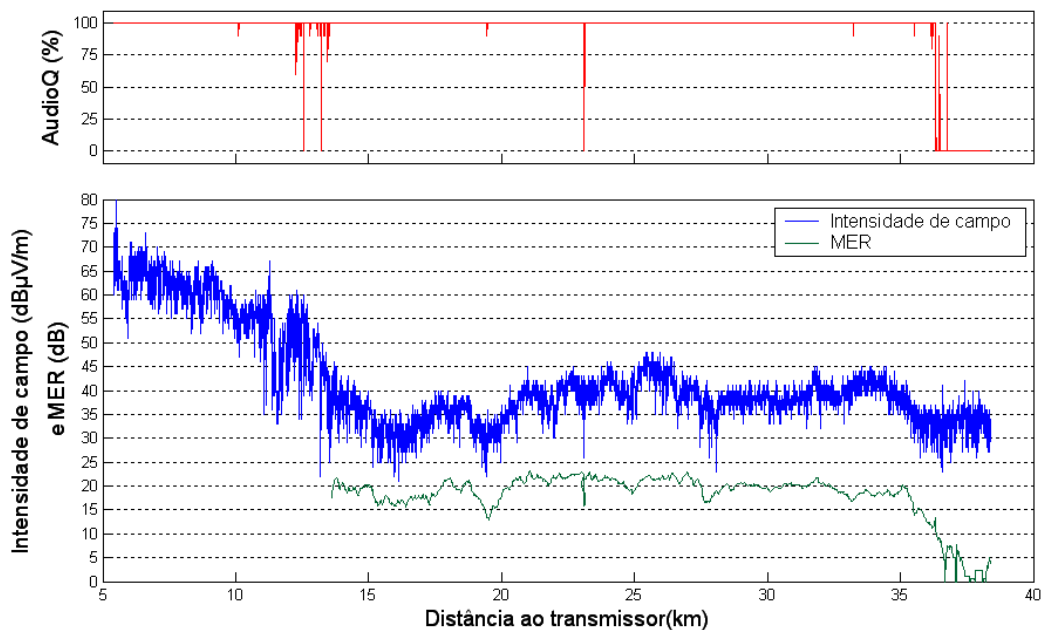


Figura 4.28 - AudioQ, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial SW, com o modo de transmissão B-21.

A Figura 4.29 mostra a localização geográfica da rota Radial NE e a qualidade da recepção ao longo dela. Essa rota estava praticamente situada detrás da antena transmissora, portanto em uma direção em que o ganho da antena era bem menor — veja o diagrama de radiação da antena mostrado na Figura 3.4. Conseqüentemente, o comprimento dessa rota foi bem menor que aquele da rota Radial SW. O percurso foi todo ele em uma rodovia federal. No início, existem alguns conjuntos habitacionais nas margens da rodovia e o trecho que dista entre 6 e 11 km, aproximadamente, está ao lado de uma pequena cidade, denominada Sobradinho. Após essa cidade, a rota situa-se em ambiente rural e, portanto, do tipo aberto.

A Figura 4.30 mostra o resultado das medições feitas ao longo da rota Radial NE. Ela mostra também a altitude ao longo do percurso, que varia bem mais que ao longo da rota Radial SW e, por isso, tem maior efeito sobre os resultados das medições. Contudo, devido a estar em uma área menos densamente povoada e sem prédios altos, até a distância de 12 km, a variação de curto termo da intensidade do sinal recebido foi bem menor que aquela observada no trecho da rota Radial SW situado no Plano Piloto. Para distâncias maiores que 12 km, o sinal recebido já era relativamente fraco e, além disso, provavelmente estava obstruída a linha de visada para a antena transmissora: por isso, a variação da intensidade do sinal recebido aumenta muito.

No trecho da rota que dista entre 5 e 6 km, a medida AudioQ caiu para 0% por duas

vezes e houve interrupções no áudio tocado. Esse trecho está situado em um vale e certamente a linha de visada para a antena transmissora ficou obstruída, fazendo com que a intensidade do sinal se mantivesse abaixo de  $35 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , a maior parte do tempo, e a MER abaixo de 15 dB.

A recepção foi de boa qualidade até a distância de aproximadamente 13 km. Além do baixo ganho da antena nessa direção, o terreno muito acidentado contribui claramente para limitar o alcance do sinal DRM.



Figura 4.29 – Rota Radial NE com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão B-21.

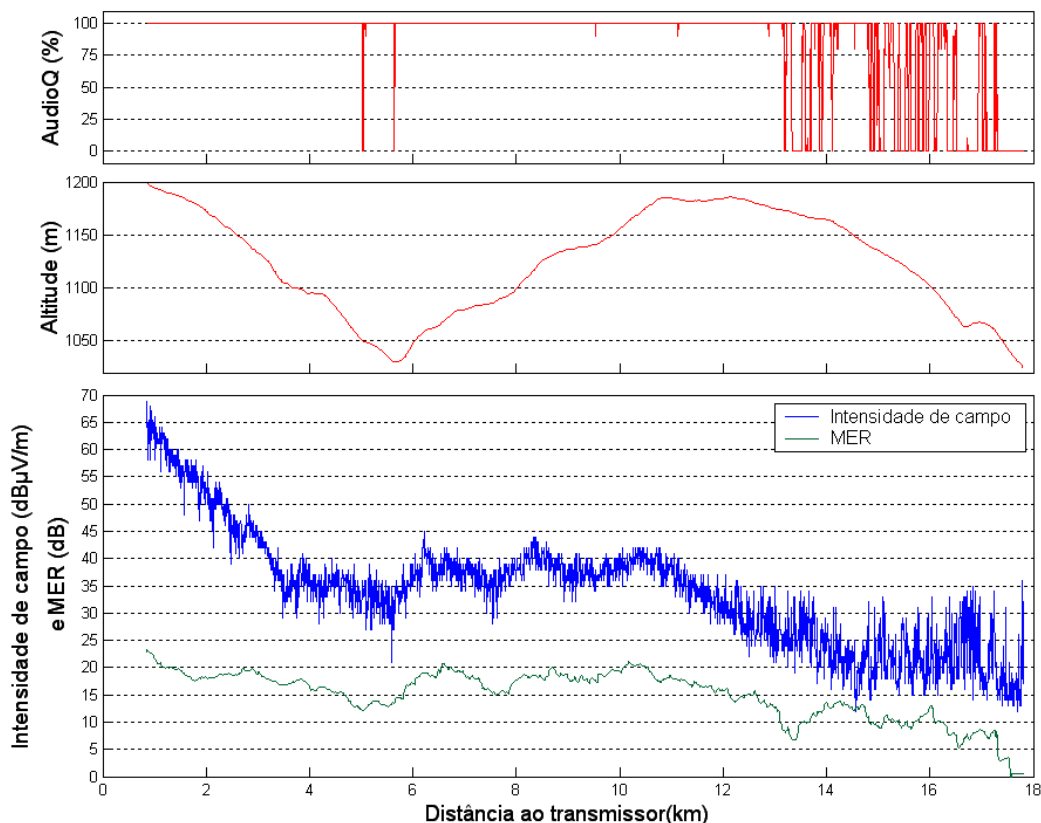


Figura 4.30 - AudioQ, altitude, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial NE, com o modo de transmissão B-21.

#### 4.2.6 Medições ao longo da rota Circular

A rota Circular (R8) foi definida de modo que a distância entre o veículo de medida e o transmissor variasse o menos possível. Ela é mostrada na Figura 4.31. Idealmente, essa rota seria um arco de um círculo em cujo centro estaria o transmissor, por isso a denominação circular. O objetivo das medições nessa rota é verificar a influência dos diversos ambientes de recepção na qualidade do sinal recebido. Essa rota se iniciou no Lago Sul, um bairro tipicamente residencial de Brasília com casas de 1 ou 2 pavimentos, passou através da Asa Sul, um bairro com prédios de 4 ou 7 pavimentos, e terminou no Setor Sudoeste, um bairro semelhante à Asa Sul.

A Figura 4.32 mostra o resultado das medições feitas ao longo da rota Circular. Ao longo de toda a rota, a intensidade de campo elétrico apresentou variações rápidas, que indicam a existência de múltiplos percursos com intensidade considerável. Durante o trajeto pelo Lago Sul (até antes do 1000º quadro), nota-se que a intensidade de campo atinge níveis mais elevados que no resto do percurso. A provável razão para isso é o fato de não haver obstrução da linha de visada dessa área para a antena transmissora. Por outro lado, nota-se uma grande variação na intensidade do sinal causada possivelmente pelo

desvanecimento produzido pelo fenômeno da propagação multipercurso. A superfície do Lago Paranoá, que está bem próximo, deve ser uma das principais fontes de sinal refletido.

Logo após a passagem sobre o Lago Paranoá, ocorreu uma grande queda no nível da intensidade de campo — veja na Figura 4.32 em torno do quadro 1000. Esse pequeno trecho da rota tem altitude relativa baixa, um morro obstrui a linha de visada para a antena transmissora e parte dele é uma passagem sob um viaduto. Por isso, a queda na intensidade do sinal recebido. Contudo, essa queda não causou degradação na qualidade de recepção, o valor de AudioQ se manteve em 100%. Após esse trecho, a rota passou por uma área com poucos prédios e a intensidade de campo e a MER foram altas o suficiente para recepção livre de erros.

O trecho da rota onde os quadros DRM de 2000 a 4000, aproximadamente, foram recebidos está situado no setor denominado Asa Sul, uma área urbana densa, com prédios de 4 ou 7 pavimentos. Nesse trecho, os múltiplos percursos se intensificaram bem como a obstrução de linha de visada para a antena transmissora, aumentando a variação da intensidade de campo e da MER, ocasionando diversos erros na recepção e interrupções do áudio tocado. Como se pode ver na Figura 4.31, uma maior concentração de erros ocorreu nas vias perpendiculares à linha de visada para a antena transmissora, certamente devido à obstrução do sinal pelos prédios. Uma queda maior da intensidade do sinal, em torno do quadro 2700, ocorreu durante a passagem sob uma seqüência de viadutos do Eixo Rodoviário.

Por volta do quadro 4000, o veículo entrou no Parque da Cidade, uma região livre de edifícios de maior altura e que pode ser considerada quase que como um ambiente aberto. Lá a intensidade de campo se estabilizou um pouco mais e a MER não mais atingiu níveis inferiores a 15 dB. Até o final dos testes o nível de campo se manteve alto o suficiente para manter uma recepção praticamente livre de erros.



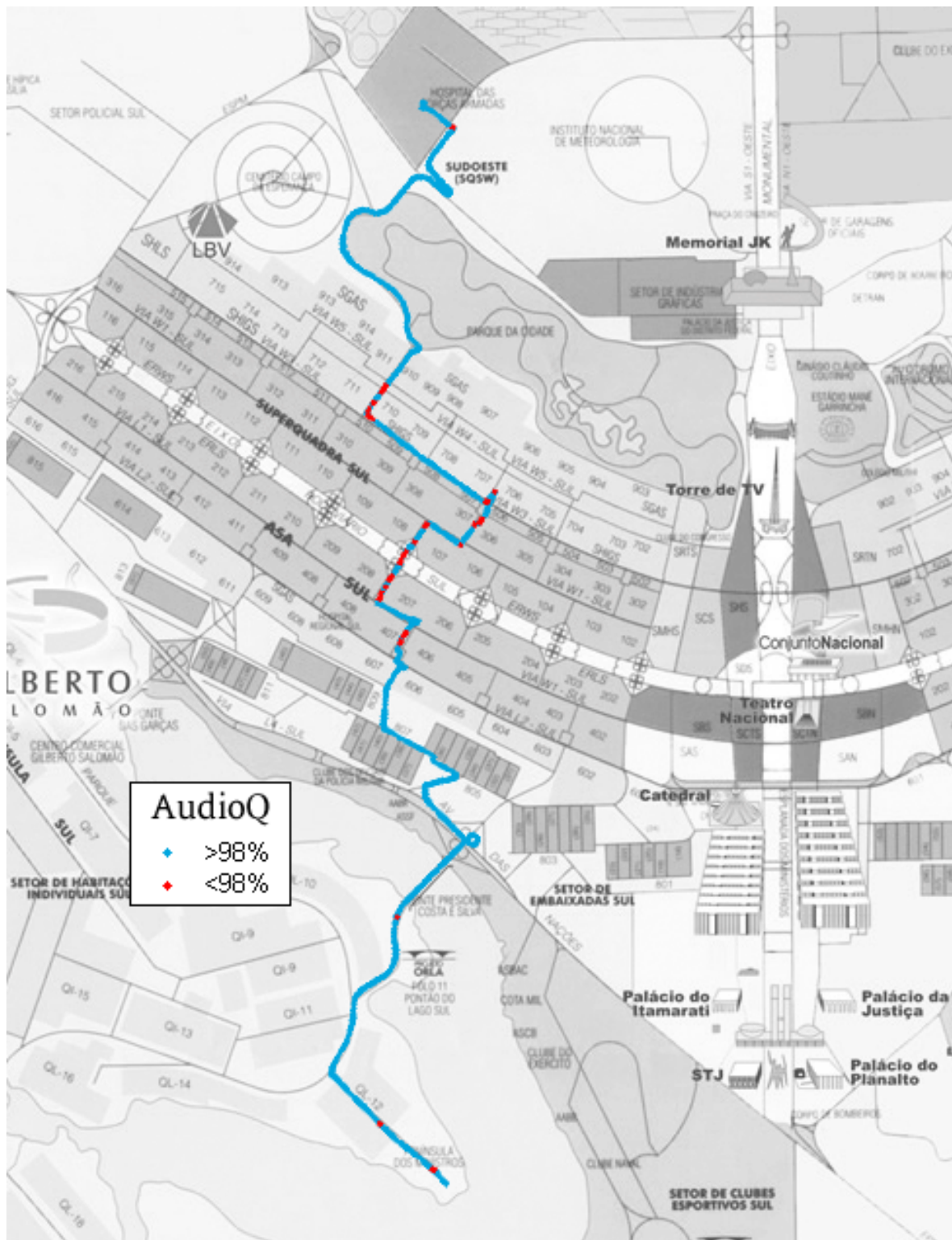


Figura 4.31 – Rota Circular com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão B-21.

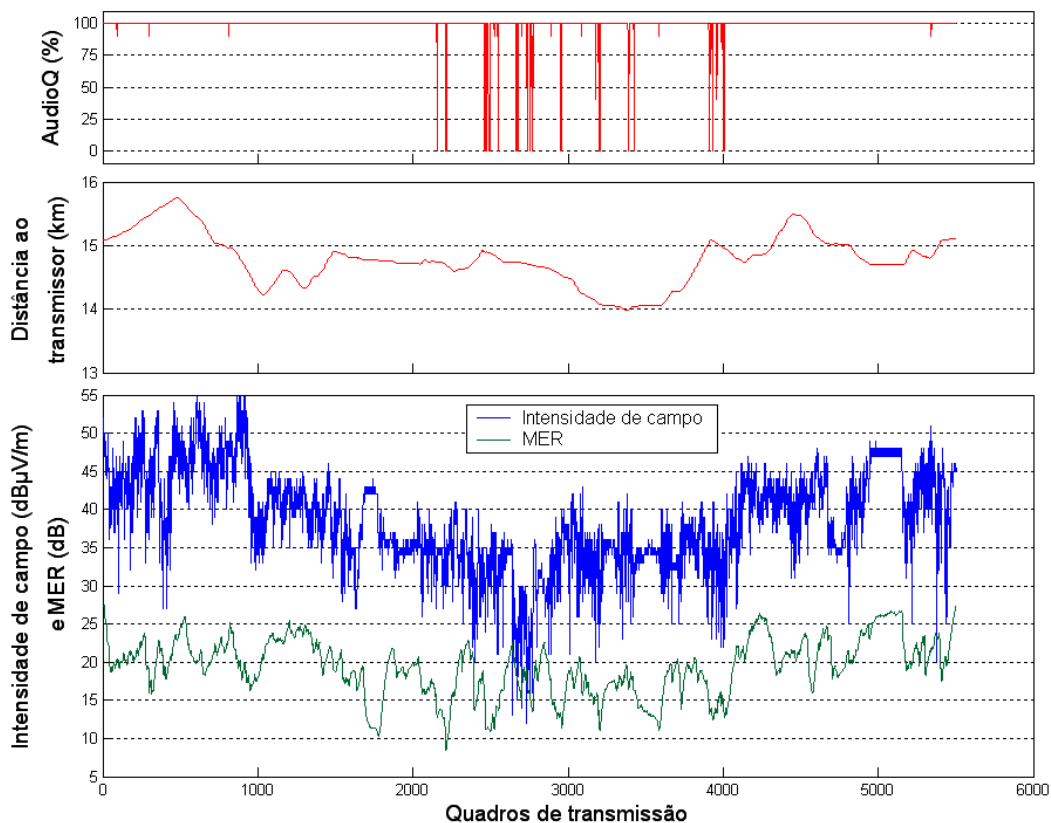


Figura 4.32 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas ao longo da rota Circular, com o modo de transmissão B-21.

### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O MODO DE TRANSMISSÃO B-21

#### 4.3.1 Análise das medições fixas

Com o modo de transmissão B-21, foram feitas 40 medições fixas em 34 pontos diferentes, com duração de 3 minutos em cada uma das medições. Apenas em quatro delas a qualidade da recepção foi abaixo do mínimo admissível (AudioQ < 98%). Das 36 medições com AudioQ superior a 98%, em 27 delas não houve qualquer erro na recepção (AudioQ = 100%).

A Figura 4.33 mostra um gráfico da intensidade de campo versus distância ao transmissor para as medições com o modo B-21. Por meio da cor dos símbolos, é mostrada também a faixa da AudioQ medida.

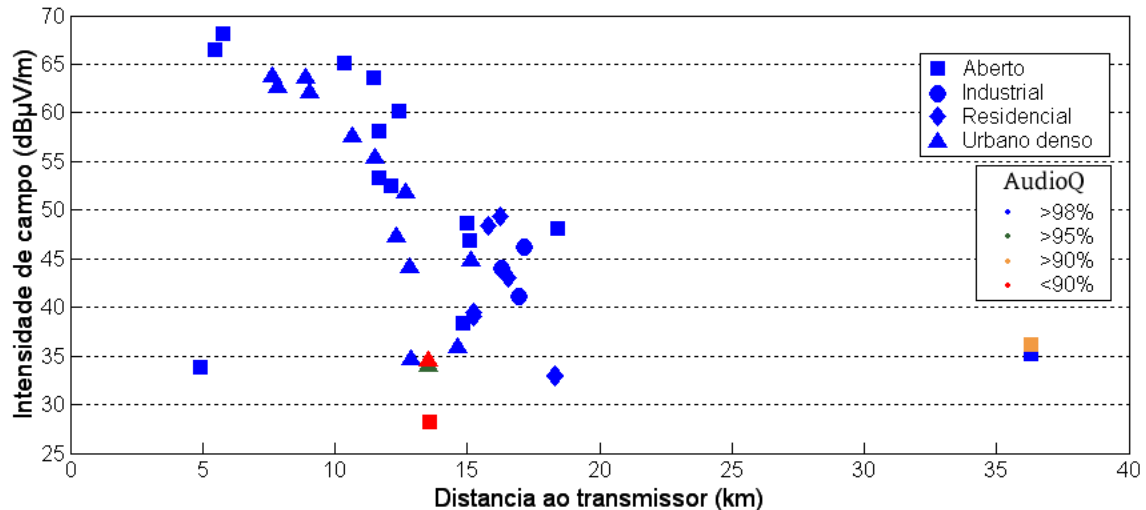


Figura 4.33 - Intensidade de campo versus distância ao transmissor para as medições fixas com o modo B-21, com indicação de ambiente e do nível da AudioQ.

Na Figura 4.33 nota-se três pontos que estão especialmente afastados da distribuição apresentada pelos demais pontos. O ponto a cerca de 5 km do transmissor e com intensidade de campo de aproximadamente 34 dBµV/m é o primeiro ponto da rota Radial NE (R7P1), que se localiza nas costas da antena, recebendo, portanto um campo elétrico com intensidade consideravelmente inferior àquela de pontos à mesma distância, mas localizados à frente da antena. Outros dois pontos, localizados a cerca de 36 km do transmissor e com intensidade de campo de cerca de 36 dBµV/m, correspondem a duas medições realizadas no ponto 3 da rota Radial SW (R6P3 e R6P3\_2). Esse ponto, o mais distante do transmissor entre todos os pontos medidos, já se encontra bastante afastado do centro da cidade (cerca de 25 km), em uma região já semi-rural, com poucos prédios, todos de baixa altura. Além disso, esse ponto possui uma altitude de cerca de 1230 m, enquanto o centro da cidade se encontra a cerca de 1100 m do nível do mar, o que lhe proporciona uma visão direta do transmissor.

Considerando os pontos que se encontram mais alinhados com a curva, nota-se que os pontos contidos no ambiente urbano denso, tendem a ficar na parte mais interna da distribuição (à esquerda), ao passo que os pontos dos demais ambientes se localizam na parte mais externa da mesma. Em outras palavras, em geral, pontos do ambiente urbano denso apresentam uma intensidade de campo inferior àquela de pontos de outros ambientes localizados a distâncias similares do transmissor. Essa diferença chega, em alguns casos, a mais de 20 dB.

Dos quatro pontos que apresentaram um nível de AudioQ insatisfatório, dois deles (os dois do ambiente urbano denso) se referem ao mesmo ponto, o ponto 2 da rota Radial SW (R6P2 e R6P2\_2). Esse ponto se localiza numa das principais vias da cidade, conhecida como eixão, e foi certamente o ponto mais crítico dos testes. Como discutido na Seção 4.1.4, o ponto R6P2 apresenta um linha de visada direta bastante obstruída, além de prédios próximos de altura elevada, resultando possivelmente em múltiplos percursos que degradam a recepção do sinal.

Os outros dois pontos são os pontos extremos das duas rotas radiais, ou seja, o ponto 3 da rota Radial SW (R6P3) e o ponto 2 da rota Radial NE (R7P2). Uma vez que o objetivo inicial das rotas radiais era verificar o comportamento do sistema com a diminuição progressiva da intensidade de campo recebida, as mesmas foram medidas até que se comprovasse que a qualidade do sinal estava degradada, de modo que é natural que o último ponto de ambas as rotas apresentasse um baixo nível de AudioQ. Nota-se também que, devido à diretividade da antena e à localização privilegiada do ponto R6P3, o limite de cobertura da rota Radial SW foi muito superior ao da Radial NE.

A Figura 4.34 mostra a relação entre a MER e a intensidade de campo nas medições fixas realizadas. A faixa do valor da AudioQ também está indicado através da cor do ponto que representa uma medição específica.

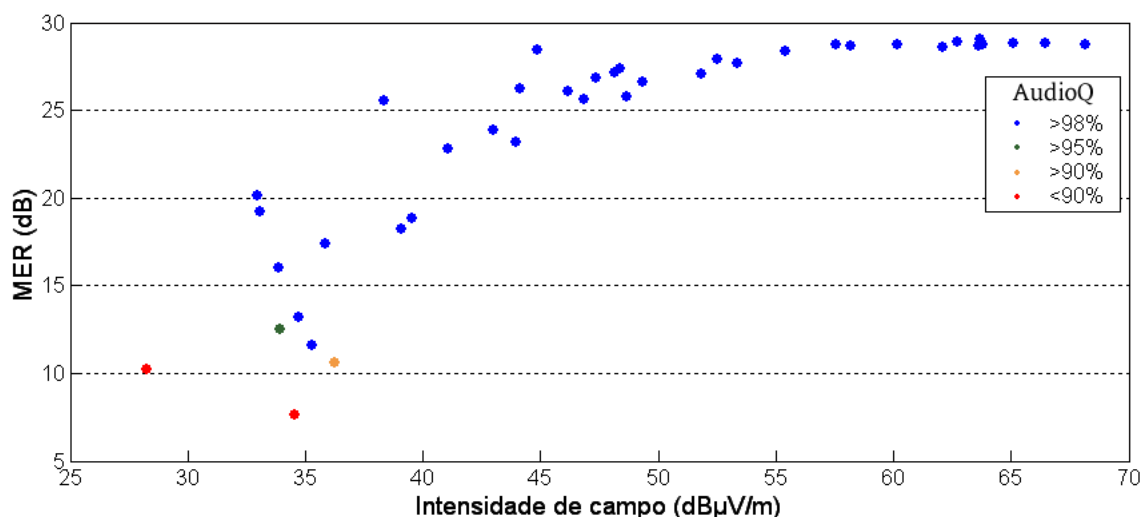


Figura 4.34 - MER versus intensidade de campo nas medições fixas realizadas como o modo B-21, com indicação da faixa do valor da AudioQ.

É possível notar, como era de se esperar, uma relação mais claramente definida entre a MER e a intensidade de campo medidas do que aquela entre intensidade de campo

e distância, uma vez que essa relação depende mais diretamente da arquitetura do sistema do que do ambiente de recepção.

Vê-se também que a MER medida está limitada a pouco mais de 29 dB, por maior que seja a intensidade de campo recebida. Essa limitação, na verdade, é do software utilizado nas medições e não do sistema em si. Isso pôde ser comprovado quando algumas medições prévias foram realizadas a poucos metros da antena transmissora e ainda assim a MER medida limitou-se a 33 dB. No entanto, como pode ser visto na Figura 4.34, essa limitação não é crítica para os testes realizados, uma vez que o limiar de recepção do sistema se encontra em níveis muito inferiores (a cerca de 12 dB). É preciso ressaltar, no entanto, que os níveis de MER medidos para valores superiores a cerca de 26 dB não são absolutamente precisos, mas devem ser tomados como uma indicação de que o sistema apresenta uma MER suficientemente alta para garantir uma recepção de qualidade.

Para efeito de planejamento de futuras radiodifusões DRM na faixa de 26 MHz, seria interessante conhecer as condições necessárias para se ter uma boa recepção do sinal transmitido. Dois limiares especialmente importantes seriam os valores mínimos de MER e de intensidade de campo necessários para uma recepção de boa qualidade. Se considerarmos como limiares de recepção os mínimos valores medidos acima dos quais não há pontos de medição fixa com AudioQ inferior a 98%, teríamos para a intensidade de campo um limiar de de aproximadamente 35 dB $\mu$ V/m e para a MER, de 13 dB.

#### **4.3.2 Análise das medições em movimento**

Da mesma forma como foram encontrados limiares de recepção para as medições fixas, seria interessante conhecer em que condições a recepção em movimento é bem-sucedida. Uma primeira alternativa para se chegar a esses valores seria tratar individualmente a recepção de cada quadro DRM de transmissão e construir gráficos como aqueles feitos para as medições fixas, mostrados nas Figura 4.33 (intensidade de campo versus distância) e Figura 4.34 (MER versus intensidade de campo). No entanto, devido à constante mudança do ambiente de recepção, causada pelo movimento do veículo, tais gráficos não apresentariam um comportamento tão linear quanto o dos gráficos dos pontos de medição fixa, constituindo na realidade nuvens de pontos. Embora fosse de esperar que resultasse uma maior concentração de pontos com erros de recepção quando tanto a MER quanto a intensidade de campo tivessem valores baixos, haveria algumas exceções, como

pontos com intensidade de campo e MER altas (maiores que 65 dB $\mu$ V/m e 20 dB, respectivamente) que apresentaram erros de recepção.

Uma das formas escolhidas para determinar os limiares de intensidade de campo e de MER foi verificar a porcentagem de quadros de áudio errados para cada valor de intensidade de campo e de MER dentre todos os quadros de áudio recebidos, visando obter alguns valores de referência.

A Figura 4.35 mostra uma distribuição cumulativa da quantidade de quadros de áudio recebidos com erros em função da intensidade de campo medida, formada a partir de todos os quadros de áudio recebidos em todas as medições em movimento realizadas com o modo B-21. O gráfico resultante mostra, por exemplo, que 90% dos quadros de áudios recebidos com erros ocorreram com a intensidade de campo inferior a 41 dB $\mu$ V/m. Outra leitura significativa é que menos de 2% dos quadros de áudio recebidos com erros ocorreram com intensidade de campo superior a 47 dB $\mu$ V/m.

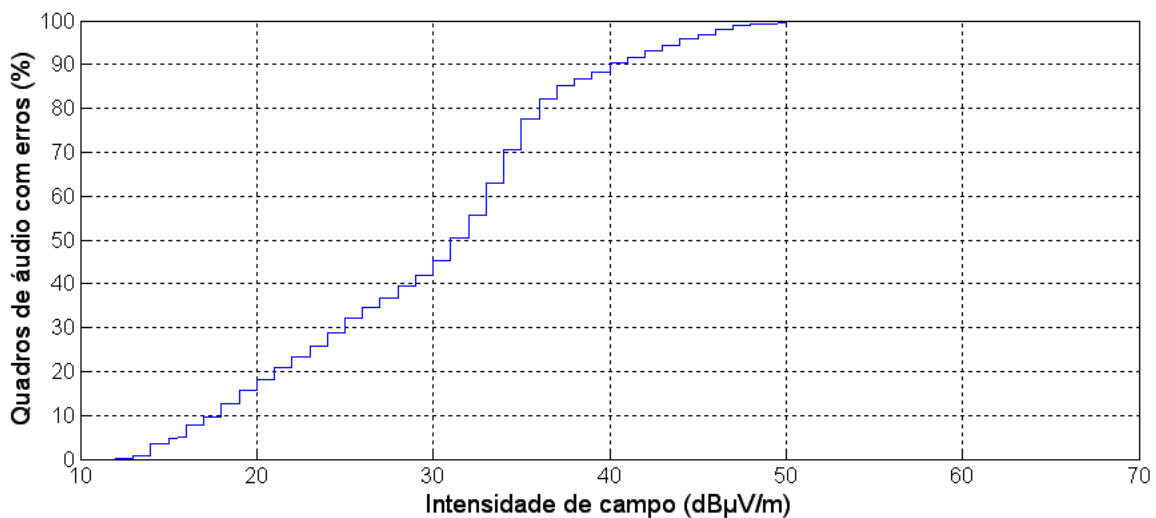


Figura 4.35 – Distribuição cumulativa dos quadros de áudio com erros segundo a intensidade de campo medida.

De maneira semelhante, a Figura 4.36 mostra a distribuição cumulativa da quantidade de quadros de áudio recebidos com erros em função dos valores de MER medidos. Desse gráfico pode-se ver que aproximadamente 95% dos quadros de áudio com erros foram recebidos com MER inferior a 15 dB. Por outro lado, menos de 2% dos quadros de áudio com erros foram recebidos com MER superior a 17 dB.

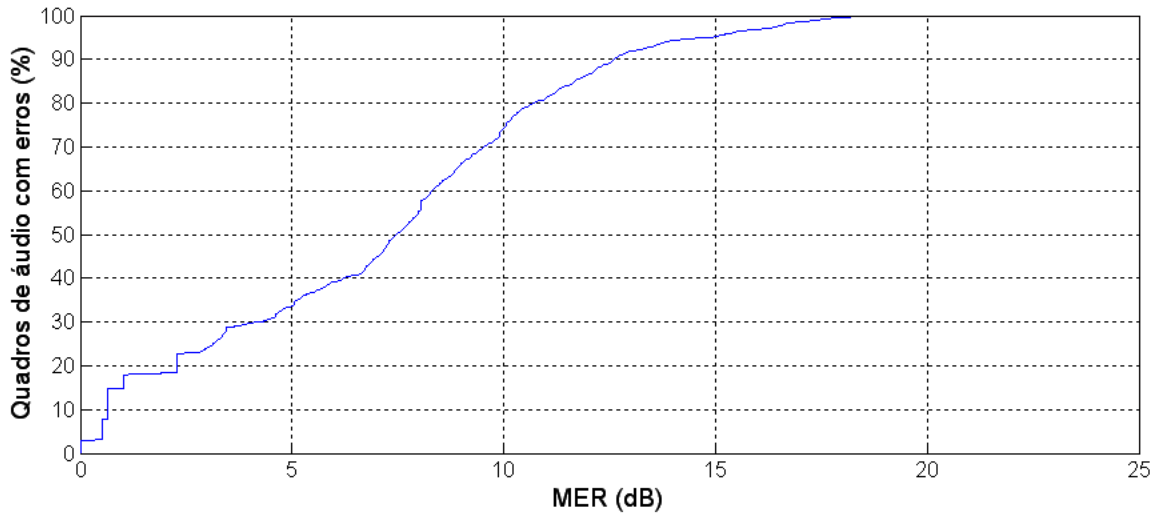


Figura 4.36 - Distribuição cumulativa dos quadros de áudio com erros segundo o valor da MER medido.

Outra forma de analisar os dados obtidos com as medições é verificando a porcentagem de quadros de áudio com erros para cada faixa de valores de intensidade de campo do sinal DRM recebido. Para tanto, todos os quadros de áudio recebidos foram separados, segundo a intensidade de campo recebida, em faixas de 1 dB $\mu$ V/m, e o erro médio (100 – AudioQ médio), considerando-se cada faixa individualmente, foi calculado. A Figura 4.37 mostra o histograma resultante. Por exemplo, quando a intensidade de campo do sinal DRM recebido foi medida em 41 dB $\mu$ V/m, apenas 0,95% dos quadros de áudio recebidos contiveram erros; para 47 dB $\mu$ V/m, a porcentagem foi de 0,73%.

Um histograma análogo foi construído para os valores de MER medidos e é mostrado na Figura 4.38. Por exemplo, considerando apenas os valores de MER que se situaram entre 12 dB e 13 dB, 7,15% dos quadros de áudio recebidos apresentaram erros; para valores de MER entre 16 dB e 17 dB, essa porcentagem caiu para 1,76%.

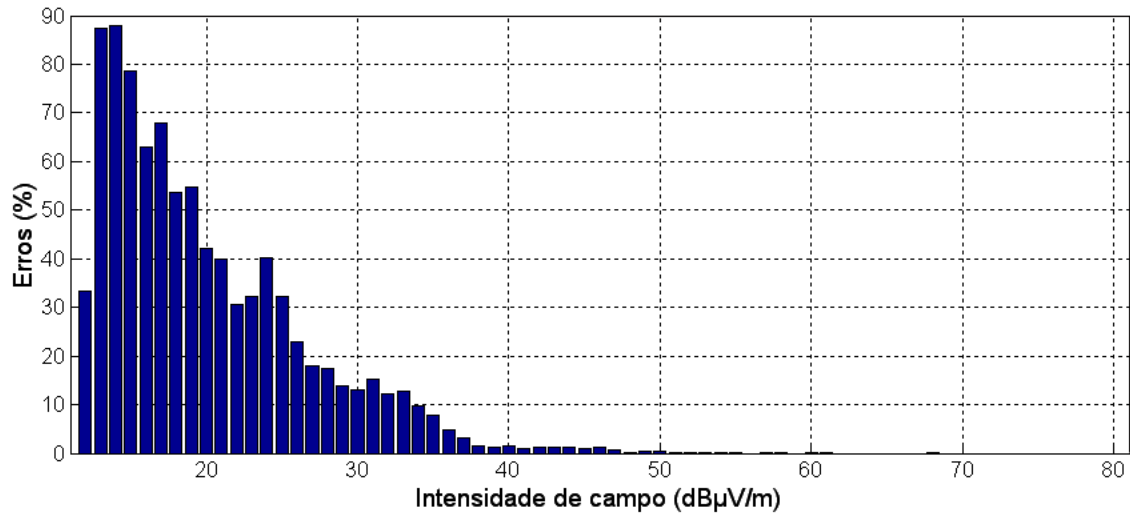


Figura 4.37 – Porcentagem de quadros de áudio com erros como função da intensidade de campo medida.

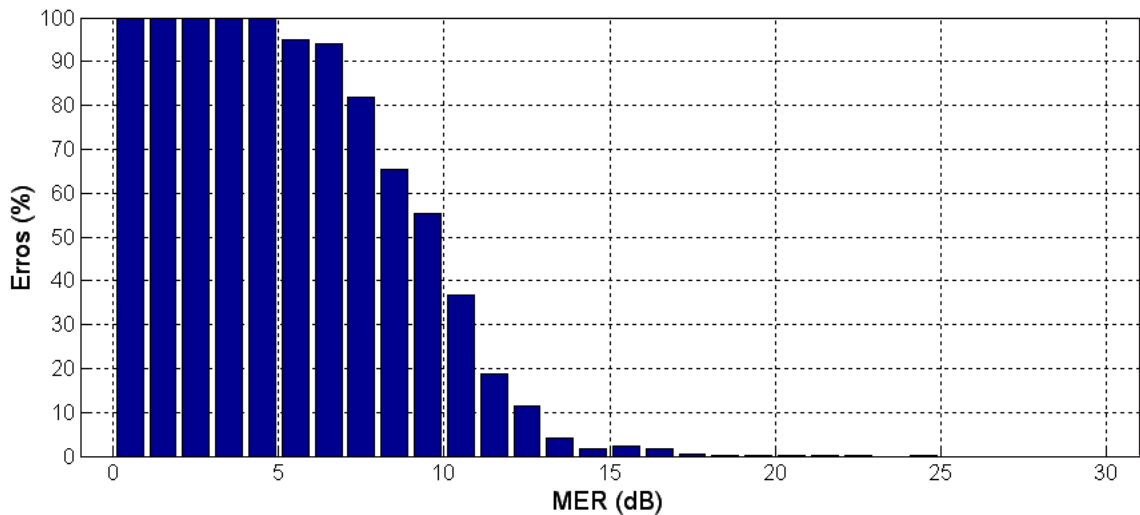


Figura 4.38 - Porcentagem de quadros de áudio com erros como função do valor de MER medido.

Embora as Figuras 4.35 e 4.36 permitam avaliar a concentração dos erros ocorridos durante toda a campanha de medições, eles não indicam de forma precisa os limiares de recepção do sistema, uma vez que a quantidade de quadros recebidos para cada valor de intensidade de campo e de MER não foi a mesma. As Figuras 4.37 e 4.38, por outro lado, apresentam esse resultado de forma muito mais direta. Pelo gráfico da Figura 4.37, por exemplo, quando se consideram apenas as medições em que a intensidade de campo foi de 38 dBµV/m, obtém-se uma porcentagem de erro de 1,55%, que decresce monotonicamente com o aumento da intensidade de campo considerada. Assim, é de se esperar que, caso a intensidade de campo mínima da região de cobertura de uma rádio operando com o modo B-21 seja de 38 dBµV/m, a AudioQ obtida nessa região seja superior a 98%.



Por essa análise, chega-se aos seguintes valores para os limiares de recepção em movimento do sistema operando no modo de transmissão B-21: intensidade de campo de 38 dB $\mu$ V/m e MER de 14 dB. É interessante notar que esses valores são muito semelhantes aos obtidos pela análise dos pontos de medição fixa na Seção 4.3.1.

#### **4.4 MEDIÇÕES COM O MODO DE TRANSMISSÃO B-38**

O segundo modo de transmissão utilizado foi escolhido para proporcionar uma qualidade de áudio maior do que aquela obtida com o modo B-21. Isso é conseguido aumentando a ordem da modulação utilizada.

Esse modo foi testado em duas rotas, rota Central (R9) e rota Central Noturna (R10). Embora o nome dessas rotas sugira que essa seja igual à rota Central do modo B-21 (R5), algumas modificações no percurso foram feitas. As rotas do modo B-38 passam pelo mesmo túnel que é percorrido na rota Radial SW (R6) e também pelo Setor Comercial Sul. Dos pontos de medição fixa testados, os pontos R9P1, R9P3, R9P4 e R9P5 são iguais respectivamente aos pontos R5P1, R5P3, R5P4 e R5P5. Os pontos da rota R10 são os mesmos da rota R9, porém medidos à noite. Assim como para os pontos da rota R5, todos os pontos são considerados como em ambiente urbano denso, à exceção dos pontos R9P4 e R10P4, que estão em ambiente aberto.

A Tabela 4.5 mostra os resultados das medições realizadas em todos os pontos de medição fixa com o modo B-38. Assim como havia ocorrido com os pontos da rota R5, para os pontos deste modo, a distância relativamente curta ao transmissor fez com que a intensidade de campo recebida fosse alta o bastante para garantir uma MER igualmente alta e recepções praticamente perfeitas. Apenas os pontos R9P5 e R10P1 apresentaram erros, que foram considerados eventuais.

Comparando os resultados das duas rotas, nota-se que à exceção do ponto R10P5, todos os pontos da rota noturna apresentaram uma intensidade de campo ligeiramente maior que a dos respectivos pontos da rota diurna. Isso pode ser resultado da adição de ruído recebido através de ondas refletidas na ionosfera. Aliás, a diferença encontrada entre os pontos R9P5 e R10P5 pode ser devido a um posicionamento diferente do veículo de medição, como já foi discutido na seção 4.1.4.

Tabela 4.5 - Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas com o modo B-38.

Ponto	Distância ao transmissor (km)	Intensidade de campo (dB $\mu$ V/m)	MER (dB)	AudioQ (%)
R9P1	10,67	56,1	28,3	100
R9P2	11,65	63,3	28,6	100
R9P3	11,50	57,8	28,6	100
R9P4	12,13	50,8	27,5	100
R9P5	12,84	45,5	26,1	99,98
R9P6	12,34	41,9	24,8	100
R10P1	10,72	58,3	28,3	99,98
R10P2	11,65	66,7	28,2	100
R10P3	11,51	58,0	28,6	100
R10P4	12,13	53,8	27,8	100
R10P5	12,85	46,8	27,1	100
R10P6	12,33	44,5	27,6	100

A Figura 4.39 apresenta os resultados das medições da AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER realizadas na rota Central (R9). Quando se comparam essas medições com aquelas da rota R5 (Figura 4.25), nota-se que a intensidade de campo continua com a variação típica de ambientes urbanos densos. Além disso, a MER oscilou aproximadamente entre os mesmos níveis que os do modo B-21 (geralmente entre 20 e 25 dB, mas com quedas e aumentos ocasionais). No entanto, o número de erros no áudio recebido aumentou consideravelmente e os mesmos agora ocorrem com níveis de MER muito mais altos. Se no modo B-21 os erros ocorriam tipicamente com níveis de MER inferiores a 15 dB, no modo B-38 eles ocorrem com níveis de MER próximos a 20 dB.

Na Figura 4.40 é possível notar que a maioria dos erros ocorridos se concentrou na mesma região que os da rota R5 (Figura 4.26), com o surgimento de mais alguns erros quando o veículo passou perto dos prédios dos ministérios, resultado possivelmente da reflexão do sinal nos mesmos.

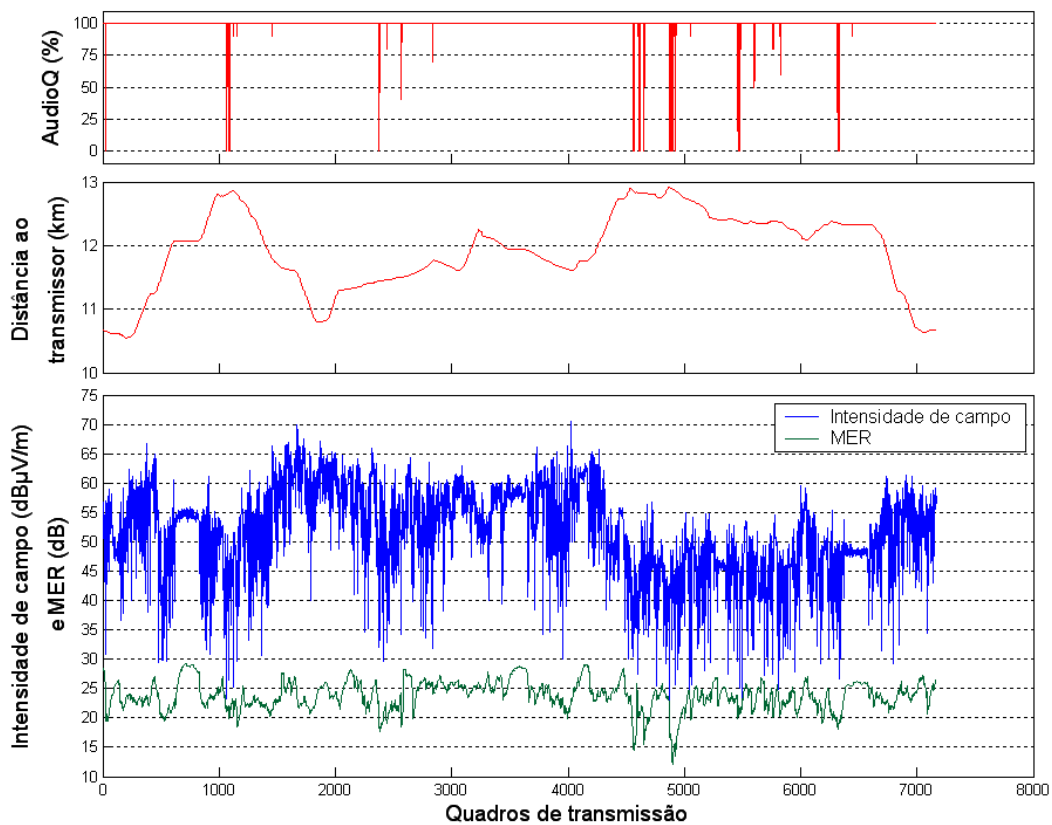


Figura 4.39 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Central, com o modo de transmissão B-38.

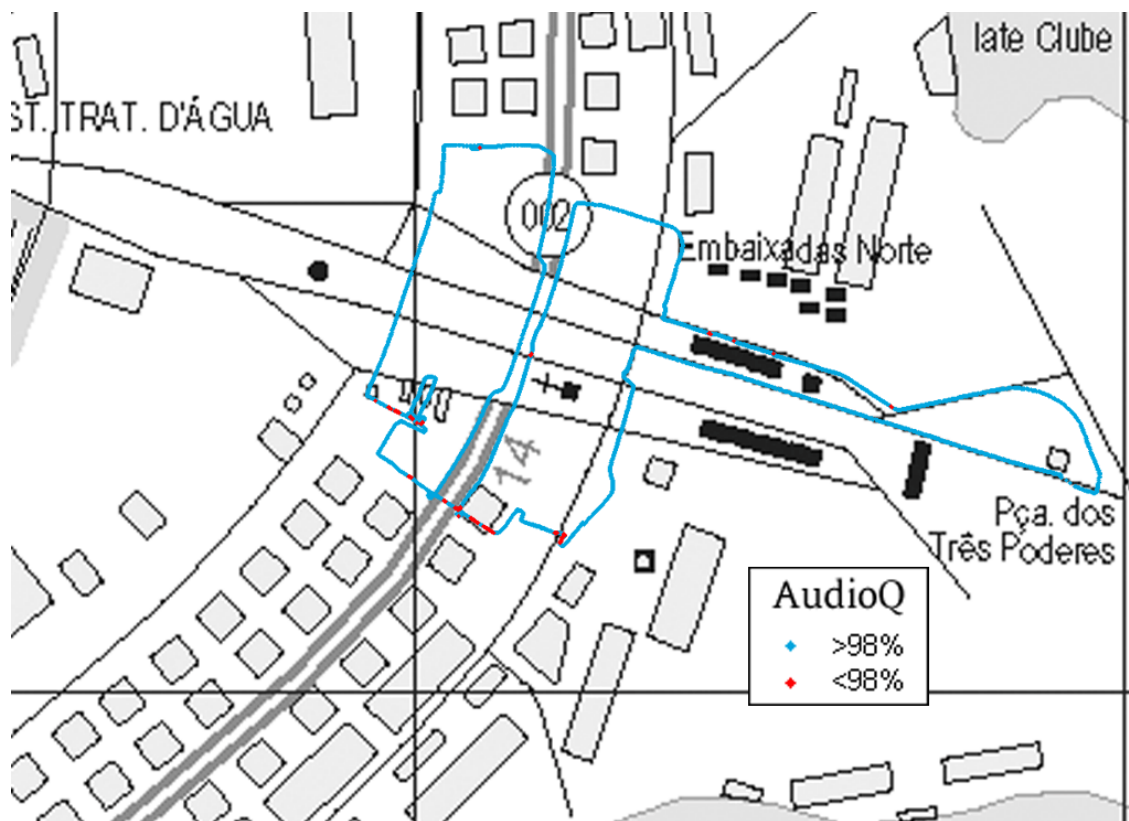


Figura 4.40 - Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Central, com o modo de transmissão B-38.

## 4.5 MEDIÇÕES COM O MODO DE TRANSMISSÃO A-41

O modo A-41, assim como o modo B-38 apresenta uma taxa de transmissão muito superior à do modo B-21, o que é conseguido pelo uso de constelações de maior ordem. Com relação ao modo B-38, esse modo possui as mesmas ordens de constelações para os três tipos de serviços do sistema, mas usa um modo de robustez e uma taxa de codificação diferentes. A configuração é tal que as taxas de transmissão dos modos B-38 e A-41 são bastante similares (38,2 kbps e 40,9 kbps respectivamente). O modo de robustez utilizado (modo A) é o menos robusto de todos, o que permite maiores taxas de transmissão.

Assim como no modo B-38, duas rotas foram testadas utilizando este modo: rota Asa Norte (R11) e rota Radial SW (R12). Com a primeira rota, visou-se averiguar o funcionamento desse modo em um ambiente urbano denso, o mais exigente dos quatro em teste. A segunda rota tinha por objetivo verificar o limite de cobertura do sistema em condições similares às do modo B-21.

Diferentemente da rota Central do modo B-38, a rota Asa Norte do modo A-41 (R11) é muito semelhante à rota Asa Norte do modo B-21 (R4). Embora alguns trechos da rota tenham sido alterados, devido à simetria do bairro onde essa rota se encontra, o ambiente da rota percorrida foi essencialmente o mesmo encontrado no modo B-21. Além disso, as cinco medições fixas foram realizadas nos mesmos locais daquelas da rota R4.

A rota Radial SW (R12) percorreu rigorosamente o mesmo percurso da rota Radial SW do modo B-21 (R6) até o ponto onde houve boa recepção.

### 4.5.1 Rota Asa Norte (R11)

A Tabela 4.6 mostra os resultados das medições fixas realizadas na rota Asa Norte.

Tabela 4.6 - Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas na rota Asa Norte (R11).

Ponto	Distância ao transmissor (km)	Intensidade de campo (dB $\mu$ V/m)	MER (dB)	AudioQ (%)
R11P1	9,02	64,8	25,9	96,98
R11P2	7,87	62,7	24,7	99,96
R11P3	5,78	66,3	16,0	100
R11P4	7,62	64,2	25,7	99,93
R11P5	8,89	63,0	25,0	99,98

De todos os pontos da rota R11, apenas o ponto R11P3 apresentou uma recepção

perfeita, apesar de ter sido o ponto com a menor MER. Semelhantemente ao ocorrido na medição com o modo B-21, nesse ponto, que é muito próximo ao transmissor, foi recebida uma intensidade de campo muito alta. No entanto, diferentemente do ocorrido no modo B-21, a MER medida foi muito inferior ao esperado. Essa diferença se deve provavelmente à localização do veículo de medição, que, como mostrado na Figura 4.41, na medição R4P3 estava apenas próximo às linhas de transmissão e na medição R11P3 estava realmente sob estas.



Figura 4.41 - Localização do veículo de medição durante as medidas dos pontos R4P3 e R11P3.

Nos demais pontos da rota R11, nota-se que as MER recebidas foram altas, embora inferiores àquelas medidas no modo B-21. No entanto, mesmo com MER elevadas, todos os pontos apresentaram alguns erros espaçados, causados possivelmente por interferências intermitentes, ao passo que a interferência no ponto R11P3 era contínua.

Dos cinco pontos medidos, o único com qualidade do áudio inferior ao limiar estabelecido pelo sistema DRM (AudioQ = 98%) foi o ponto R11P1. No entanto, diferentemente de outros pontos com qualidade de áudio insatisfatória, que apresentaram várias pequenas quedas no nível da AudioQ (veja, por exemplo, a Figura 4.8), nesse ponto a recepção foi perfeita, à exceção de três instantes, nos quais a reprodução do áudio foi interrompida por cerca de um segundo, como mostrado na Figura 4.42. O fato de a MER não ter se alterado significativamente durante essa medição indica que algum fator intenso, mas de curta duração, deve ter ocasionado os erros. Pelo fato de o ponto de medição estar situado próximo de uma via automotiva, é possível que a passagem de algum veículo de maior porte tenha causado um multipercurso forte o suficiente para comprometer a recepção do sinal. Uma vez que os níveis de intensidade de campo e de MER medidos se mantiveram relativamente constantes, seria interessante contar com algum equipamento que avaliasse a constelação recebida, como um analisador vetorial, para que se pudesse

verificar com exatidão a causa dos erros ocorridos.

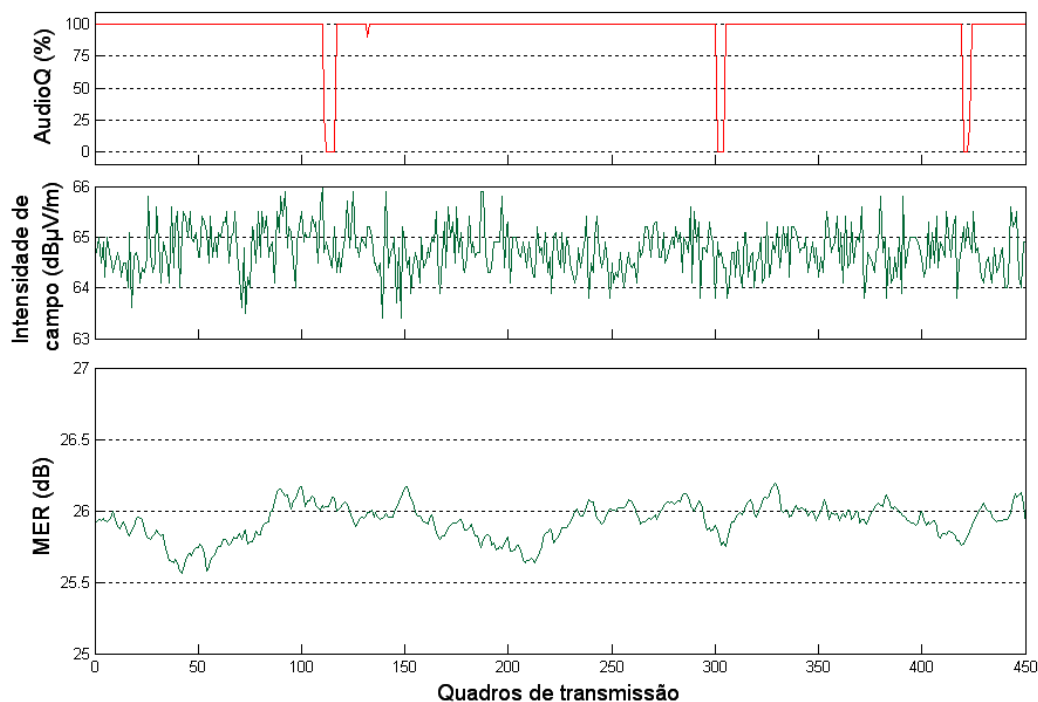


Figura 4.42 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R11P1.

A Figura 4.43 apresenta os resultados das medições em movimento realizadas na rota R11. Nota-se que a intensidade de campo apresentou uma variação rápida, típica de ambientes urbanos densos, assim como no modo B-21. No entanto, apesar de a intensidade de campo se manter aproximadamente nos mesmos níveis do modo B-21, a MER sofreu uma queda de cerca de 3 dB. Computando-se o valor médio da MER ao longo da medição com o modo B-21 chega-se a um valor de 23,68 dB, ao passo que com o modo A-41 tem-se 20,80 dB. Essa queda pode ser explicada pela menor proteção proporcionada pelo modo de robustez A, que possui um intervalo de guarda menor e, portanto, é menos eficiente quando os sinais do multipercurso apresentam grandes atrasos.

A Figura 4.44 indica os pontos onde a AudioQ medida foi inferior a 98%. É possível notar que o número de erros de áudio ocorridos aumentou consideravelmente em relação à rota medida com o modo B-21. Através da Figura 4.43 também nota-se que as maiores quedas da AudioQ ocorreram quando a MER se aproximou de 15 dB.

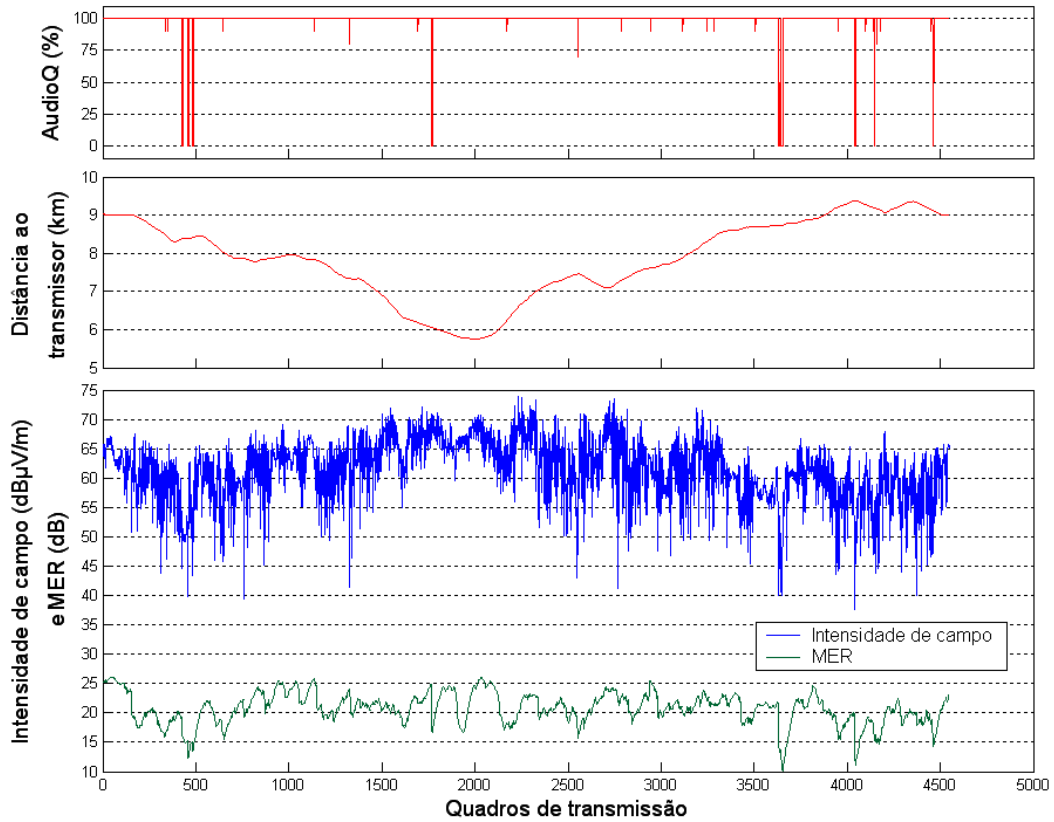


Figura 4.43 - AudioQ, distância ao transmissor, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Asa Norte, com o modo de transmissão A-41.

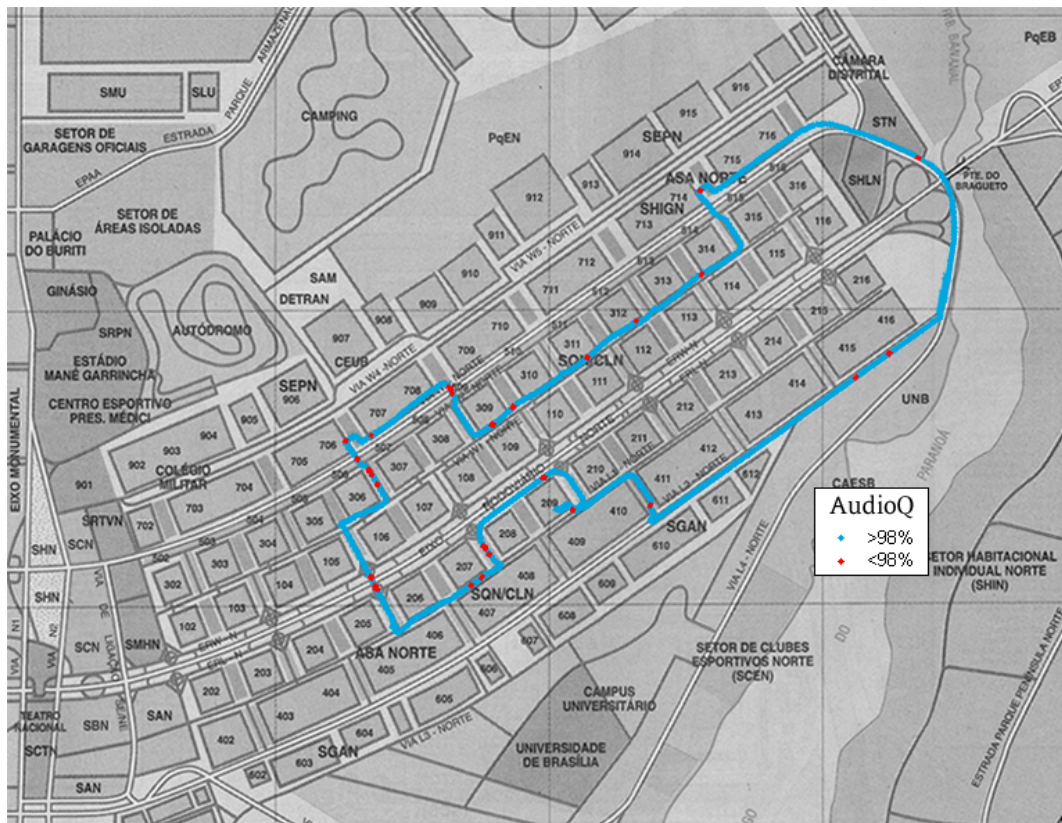


Figura 4.44 - Distribuição espacial dos valores de AudioQ medidos ao longo da rota Asa Norte, com o modo de transmissão A-41.



#### 4.5.2 Rota Radial SW (R12)

A Tabela 4.7 mostra os resultados das medições fixas realizadas na rota Radial SW.

Tabela 4.7 - Intensidade de campo média, MER média e AudioQ obtidas com as medições fixas na rota Radial SW (R12).

Ponto	Distância ao transmissor (km)	Intensidade de campo (dB $\mu$ V/m)	MER (dB)	AudioQ (%)
R12P1	5,48	59,9	23,3	99,91
R12P2	13,54	-	-	-
R12P3	12,37	49,4	13,7	68,56
R12P4	8,64	61,3	23,3	99,96

Assim como na medição feita com o modo B-21, a medição da rota Radial SW feita com o modo A-41 iniciou-se a cerca de 5 km do transmissor e seguiu rumo ao centro da cidade pela principal avenida da mesma.

Na primeira medição fixa, assim como na medição do modo B-21, a recepção foi quase perfeita, mas apresentou alguns erros ocasionais. A recorrência desses erros leva a crer que a linha de transmissão localizada próxima ao ponto de medição (Figura 4.45) causou alguma interferência na recepção do sinal. Possivelmente a estrutura de sustentação da mesma atuou como uma antena, recebendo e retransmitindo o sinal.



Figura 4.45 - Localização do veículo de medição durante as medidas dos pontos R6P1 e R12P1.

A Figura 4.46 ilustra as variações da AudioQ, intensidade de campo e MER observadas durante a medição em movimento da rota R12 – trecho de ida. A intensidade de campo apresenta um comportamento muito semelhante ao da rota R6, embora com um nível cerca de 3 dB inferior.

A MER, por outro lado, permanece em um nível de aproximadamente 18 dB até uma distância de cerca de 10 km do transmissor. Nesse ponto, a MER cai para menos de



15 dB e o áudio, que antes era quase perfeito, passa a apresentar muitos erros, prejudicando a recepção. Como no modo B-21 o sistema havia apresentado problemas em torno de 13 km do transmissor, mas depois se recuperou, optou-se por continuar percorrendo a rota. No entanto, após a passagem pelo túnel, a MER caiu a níveis muito baixos e o áudio não mais se recupera.

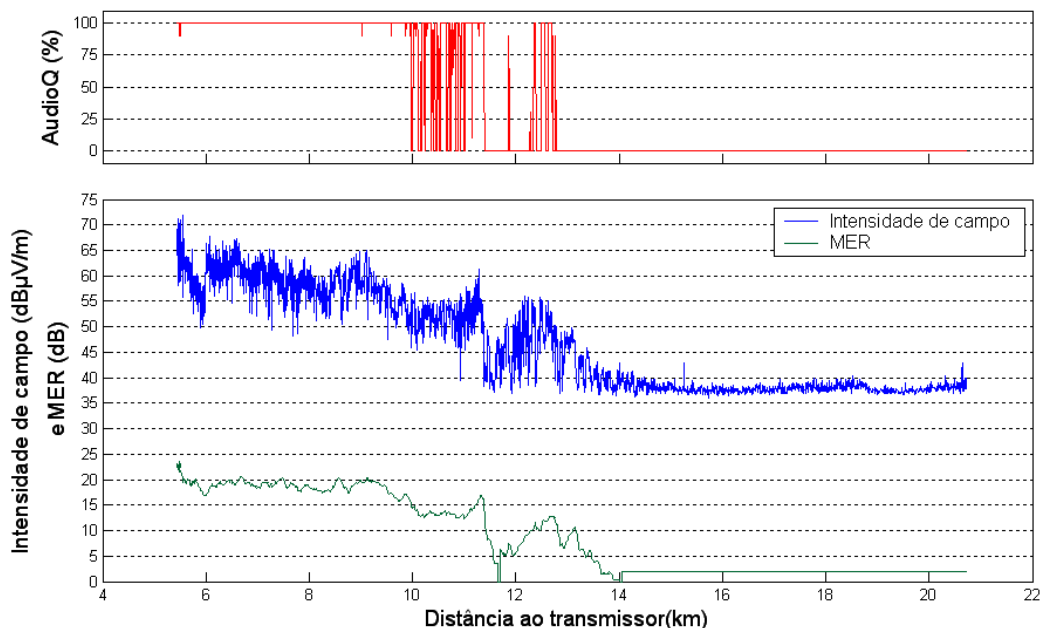


Figura 4.46 - AudioQ, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial SW (trecho de ida), com o modo de transmissão A-41.

A Figura 4.47 indica os pontos onde a AudioQ foi inferior a 98%. É interessante notar que o ponto onde o áudio recebido começou a apresentar erros é aproximadamente o mesmo ponto onde na rota R6 um erro isolado ocorreu, como indicado na Figura 4.27. Em ambos os casos, os erros foram provavelmente causados devido ao multipercurso, resultante da reflexão do sinal em prédios de grande altura situados no Setor de Autarquias Norte e no Setor Comercial Norte. Embora essa degradação não tenha sido tão grande no modo B-21, no modo A-41 ela foi forte o bastante para comprometer definitivamente a recepção do sinal.

Além disso, é possível notar a diferença entre os limites de cobertura proporcionados pelos dois modos. Enquanto o modo mais robusto B-21 apresentou recepção a até 35 km do transmissor, com algumas exceções, o modo A-41 não pôde ser recebido em nenhum momento no bairro Asa Sul.

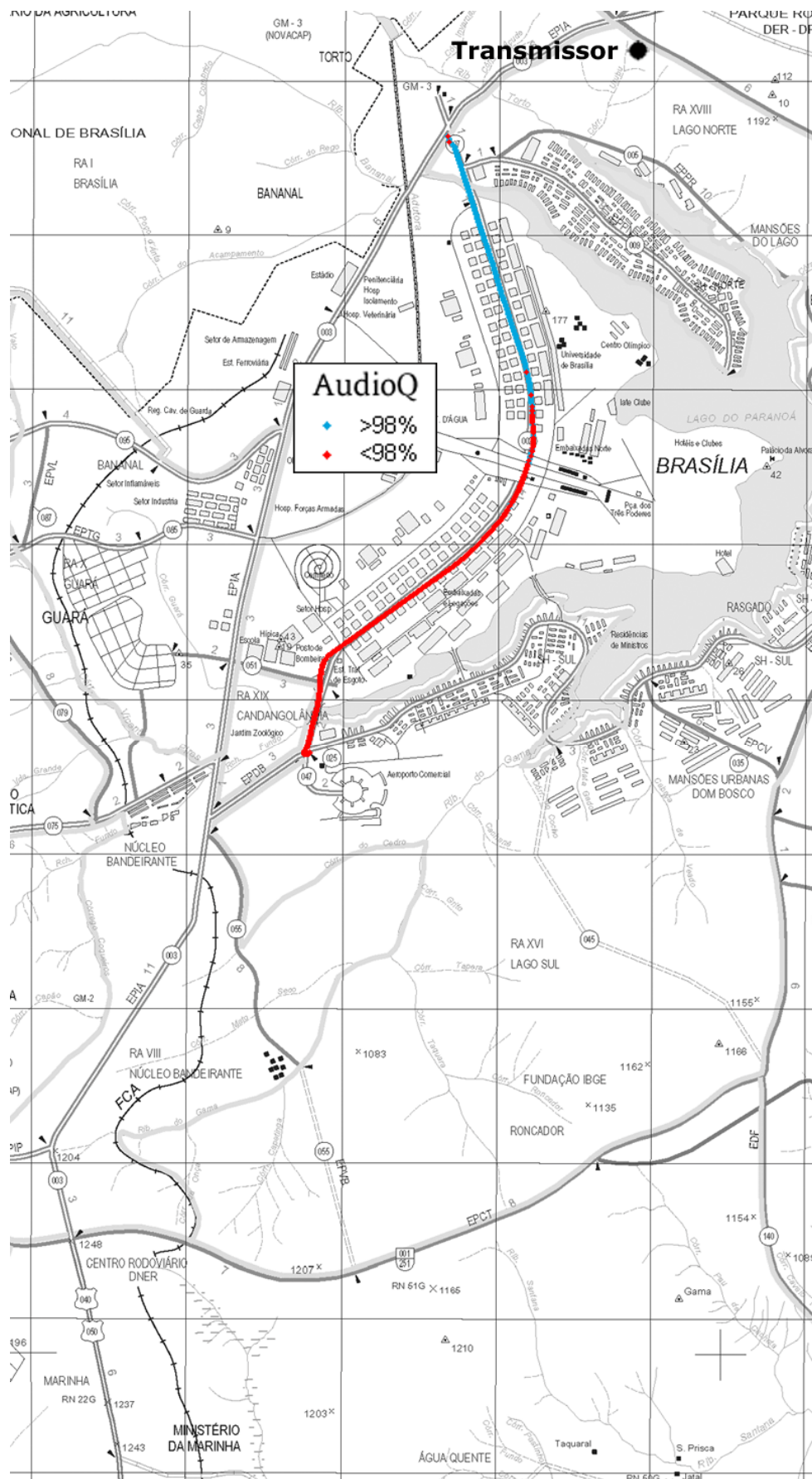


Figura 4.47 - Rota Radial SW (ida) com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão A-41.

No ponto onde havia sido realizada a medição R6P2 no modo B-21, não havia áudio algum, então não foi realizada qualquer medida. A rota foi percorrida até se chegar a quase 21 km de distância do transmissor. Uma vez que não se conseguiu retomar a recepção do sinal, optou-se por encerrar a rota nesse ponto.

Devido à curta duração da rota até então, decidiu-se percorrê-la no sentido contrário e realizar medições em mais dois pontos, um no limiar de recepção do sistema e um em um ponto com boa recepção. O gráfico da variação dos parâmetros medidos durante o percurso de volta (Figura 4.48) mostra uma semelhança muito grande com o das medições realizadas no trajeto de ida (Figura 4.46). É preciso ressaltar que esse percurso foi percorrido no sentido contrário ao do gráfico, isto é, do ponto mais distante ao transmissor até o ponto R12P4 a 8,6 km do transmissor.

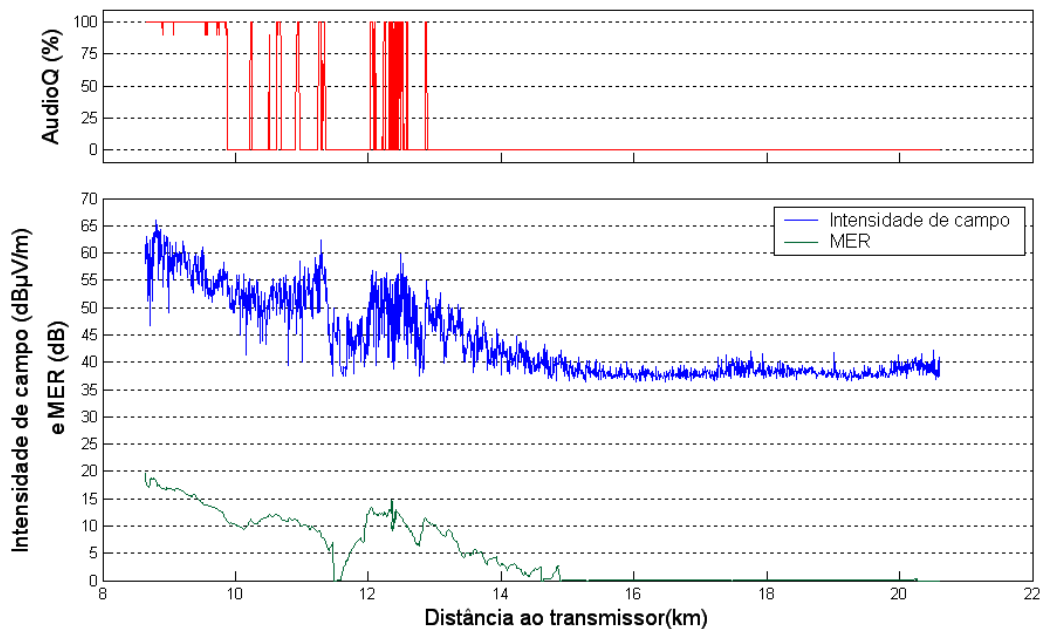


Figura 4.48 - AudioQ, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial SW (trecho de volta), com o modo de transmissão A-41.

Na Figura 4.49, que indica onde a AudioQ foi inferior a 98% para as medições realizadas no trajeto de volta, vê-se claramente que o áudio somente pôde ser recebido com qualidade a partir do mesmo ponto onde ele havia sido perdido no trajeto de ida.

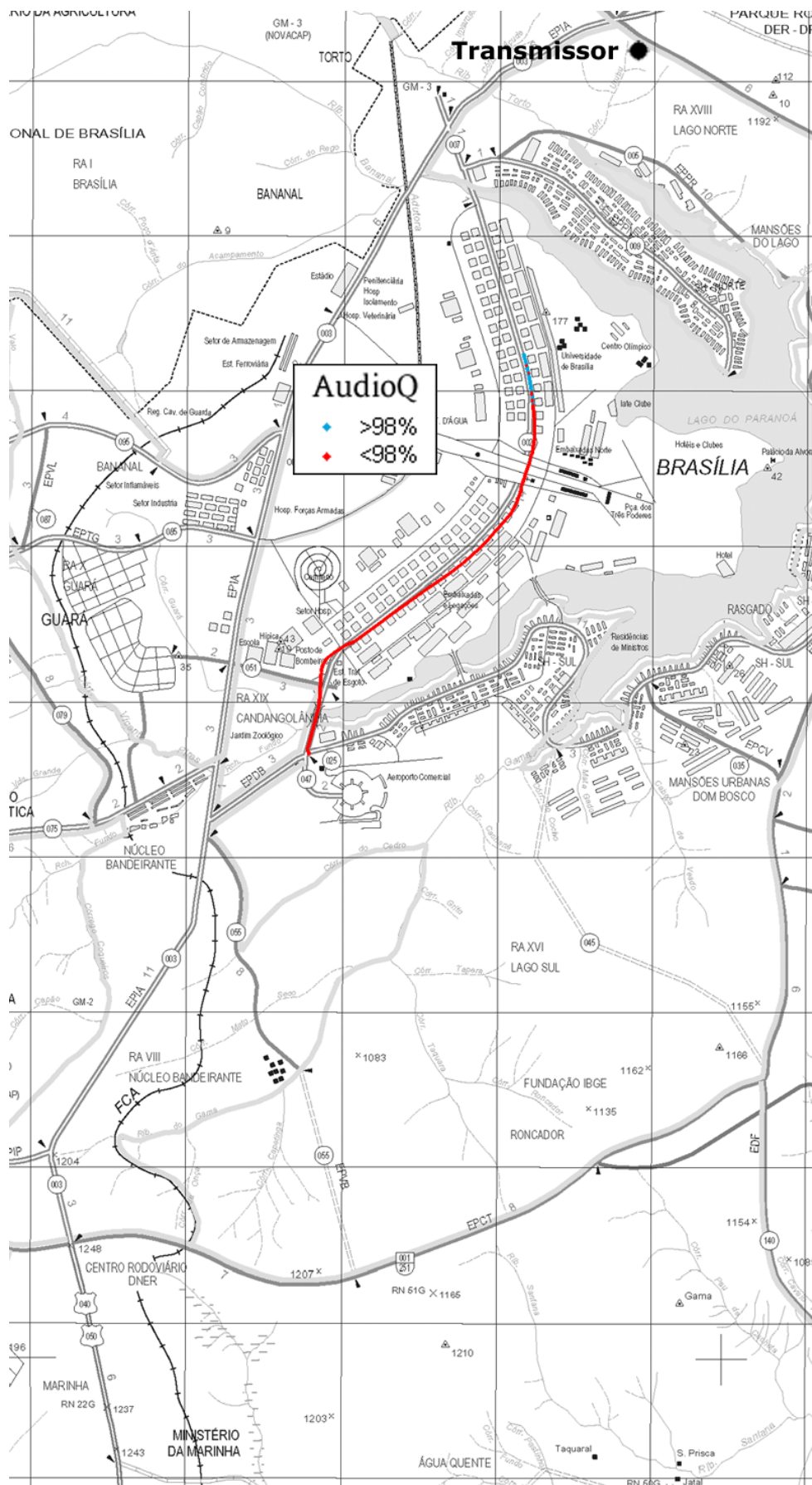


Figura 4.49 - Rota Radial SW (volta) com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão A-41.

Durante o trajeto de volta, foi realizada mais uma medição fixa, no ponto R12P3, que encontrava-se em um local onde a recepção não estava completamente estabilizada, de modo que a AudioQ apresentou variações freqüentes, se estabilizando por alguns instantes e caindo para zero diversas vezes, como pode ser visto na Figura 4.50. O resultado no áudio é que se escutam alguns trechos de áudio intercalados por diversos cortes de curta duração, o que torna a recepção bastante desagradável. Analisando-se a variação da AudioQ juntamente com a da MER, nota-se que o áudio quase se estabiliza quando a MER excede 14 dB, mas cai rapidamente com a queda desta. Em instantes com MER inferior a 13 dB, se perde o áudio completamente (AudioQ=0).

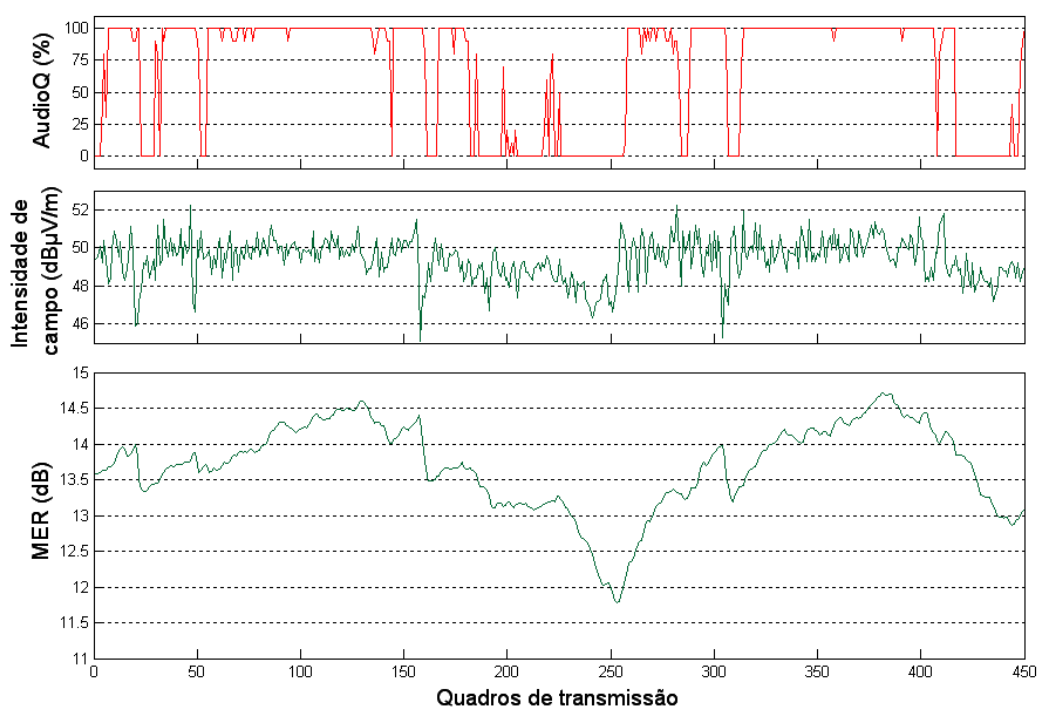


Figura 4.50 - Variação temporal da AudioQ, intensidade de campo e MER na medição R12P3.

Ao final do trajeto de volta, realizou-se uma última medição fixa, no ponto R12P4. Ali, a intensidade de campo foi alta o suficiente para garantir que a MER também fosse muito alta e a recepção fosse quase livre de erros.

Após a realização da medição R12P4, foi feita uma tentativa de se avaliar a influência da velocidade do veículo na qualidade do sistema. A partir desse ponto, a 8,64 km de distância do transmissor, percorreu-se um trajeto em direção a este sem levar em conta a limitação de velocidade recomendada pelo técnico do consórcio DRM (de 80 km/h). Essa limitação foi obedecida nos testes anteriores justamente para evitar que a velocidade fosse um fator de degradação do sistema.

Como pode ser visto na Figura 4.51, no primeiro trecho de aceleração, o áudio recebido passou a apresentar uma grande quantidade de erros aproximadamente quando o veículo ultrapassou 70 km/h e somente voltou a se estabilizar quando a velocidade do veículo voltou a ser inferior aos mesmos 70 km/h. No segundo trecho de aceleração, no entanto, o mesmo não ocorre, uma vez que o veículo atinge cerca de 100 km/h sem que o áudio seja comprometido. Uma possível explicação para isso é o fato de a intensidade de campo nesse momento ser cerca de 5 dB superior à do outro trecho de aceleração. Essa hipótese é reforçada pelo fato de novos erros no áudio passarem a ocorrer no mesmo instante em que a intensidade de campo sofre uma queda de aproximadamente 10 dB, possivelmente causada por uma obstrução da linha direta ao transmissor pelo terreno próximo, e deixarem de ocorrer quando a intensidade de campo volta a aumentar.

Embora a simples realização desse teste não seja suficiente para determinar os limiares de recepção em velocidade do sistema, ela mostrou claramente que a velocidade pode ser um fator de degradação importante do sistema. A Figura 4.52 mostra os trechos onde ocorreram os erros durante esse teste. Comparando esse resultado com aquele da Figura 4.47, nota-se que os trechos que apresentaram erros quando o veículo estava em alta velocidade apresentaram recepção perfeita quando a velocidade foi mantida baixa.

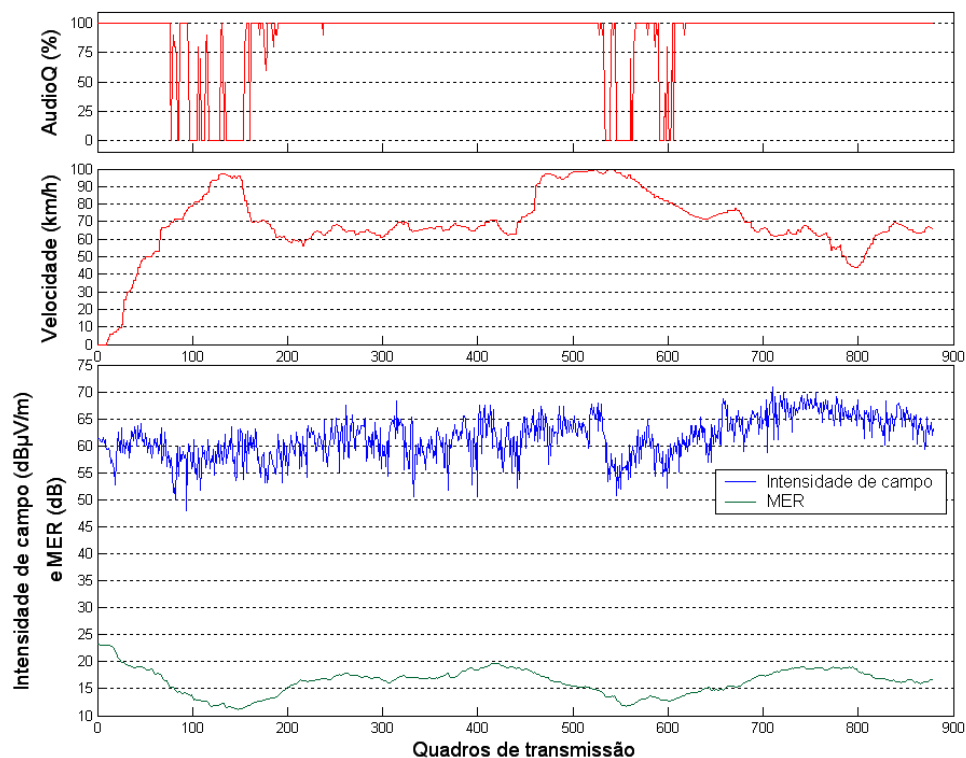


Figura 4.51 - AudioQ, velocidade do veículo, intensidade de campo e MER medidas durante a rota Radial SW (teste de velocidade), com o modo de transmissão A-41.



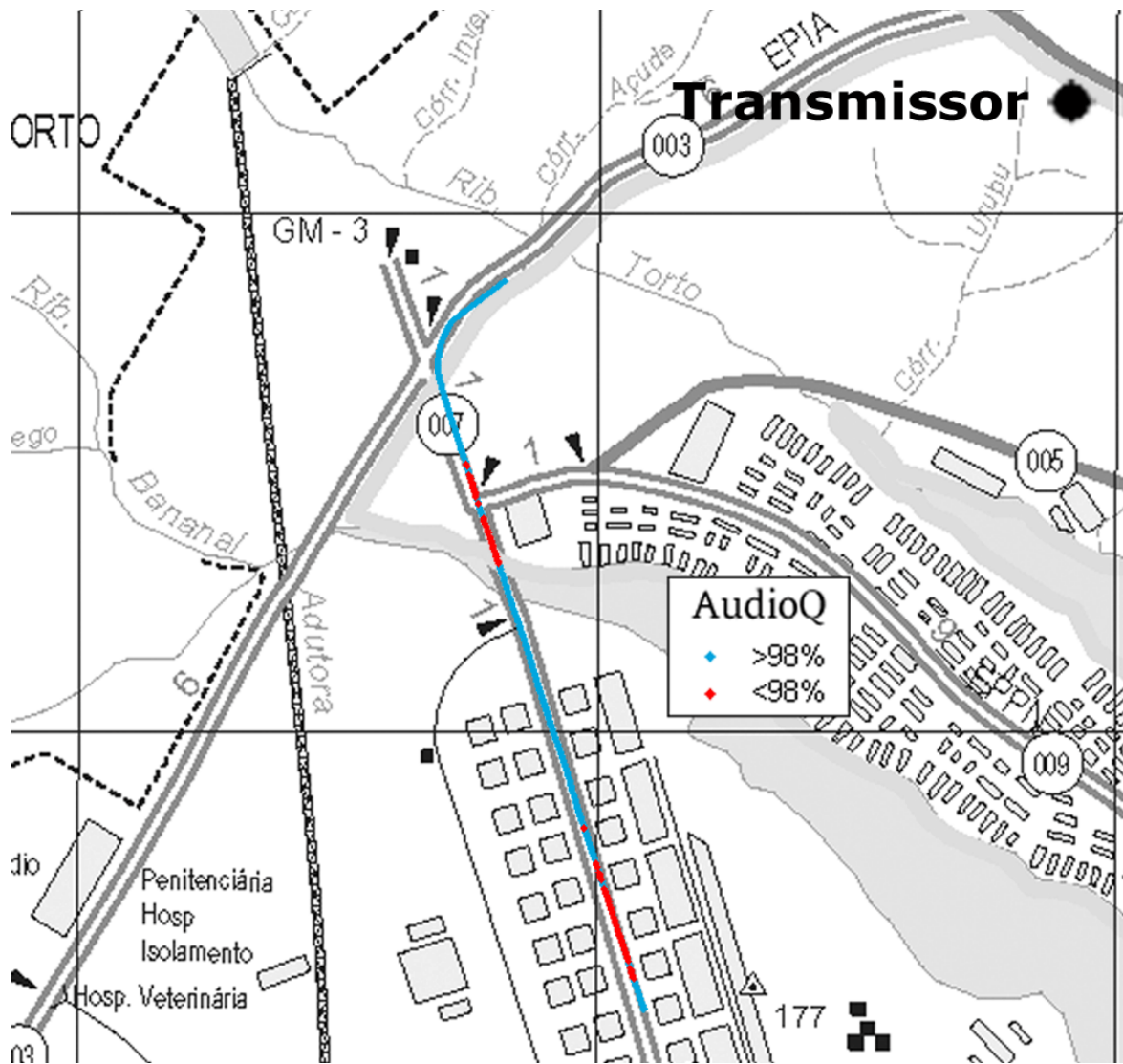


Figura 4.52 - Rota Radial SW (teste de velocidade) com indicação da qualidade objetiva (AudioQ) da recepção ao longo dela, para o modo de transmissão B-21.

## **5 ANÁLISE DA VIABILIDADE DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DRM NO BRASIL**

Os testes realizados demonstram que em locais onde as condições de recepção foram favoráveis, com nível de campo elevado e sem a ocorrência de múltiplos percursos consideráveis, a recepção foi satisfatória e o áudio recebido foi de boa qualidade.

Também foi verificado que o equipamento transmissor é compacto e sua operação é bastante amigável, sendo possível alterar diversos parâmetros do sinal transmitido de acordo com as necessidades do radiodifusor. Além disso, mesmo sem terem sido realizados testes mais específicos, observou-se que o áudio recebido utilizando-se o recurso estereofônico paramétrico foi de boa qualidade.

### **5.1 MODOS DE ROBUSTEZ**

Analisando os resultados obtidos em cada um dos três modos de transmissão utilizados, constata-se, como esperado, que o modo B-21, o mais robusto, apresentou melhores condições de recepção quando comparado a rotas semelhantes percorridas com os outros dois modos. Comparado ao modo B-38, ele apresentou aproximadamente os mesmos valores de MER quando em ambientes de recepção semelhante, no entanto, no modo B-38 os erros normalmente aconteciam com valores de MER maiores que os dos erros no modo B-21. O modo A-41, que utilizou o modo de robustez A, apresentou uma queda no valor médio da MER recebida de aproximadamente 3 dB em relação ao modo B-21.

No entanto, mesmo apresentando uma boa qualidade de áudio, através do uso do estéreo paramétrico, o áudio não pôde ser transmitido em estéreo real com a taxa de transmissão proporcionada por esse modo. Assim, caso se opte por uma transmissão em estéreo real, as configurações do sistema devem ser alteradas (de maneira semelhante à do modo B-38), tornando o sistema menos robusto.

Com relação aos modos de robustez em si, o número de erros nas medições fixas realizadas com o modo A-41 (modo de robustez A) e a queda na MER recebida desencorajam o uso desse modo em ambientes urbanos densos. O modo de robustez B, que é mais próprio para ambientes com múltiplos percursos intensos devido ao seu maior



intervalo de guarda, seria o mais recomendável para transmissões locais em ambientes urbanos. O radiodifusor (ou a agência reguladora) deveria então projetar a sua transmissão com base em três variáveis: ordem da constelação utilizada (robustez), uso do estéreo paramétrico ou do estéreo real (qualidade) e potência de transmissão. Caso se deseje uma maior qualidade, o sistema será menos robusto e uma maior potência deverá ser utilizada para cobrir eficientemente a mesma área.

## 5.2 LIMIARES DE RECEPÇÃO

Analisando os resultados em movimento obtidos em cada uma das rotas percorridas individualmente e os resultados totais representados nas Figuras 4.37 e 4.38, nota-se que para o modo B-21 tem-se um limiar de recepção móvel para uma MER de aproximadamente 14 dB e limiar de intensidade de campo situado em torno de 38 dB $\mu$ V/m. Como esses resultados são mais restritivos que os obtidos para as medições fixas – veja Seção 4.3.1 -, eles serão considerados como os limiares do sistema. Para os demais modos, o número limitado de rotas percorridas não permite que sejam elaborados gráficos confiáveis como os do modo B-21. Esses resultados foram obtidos utilizando o critério estabelecido pelo consórcio DRM, segundo o qual a recepção do sinal pode ser considerada de boa qualidade quando se obtém valores de AudioQ superiores a 98%.

Nos testes descritos em [1], obteve-se um limiar de recepção situado entre 23 e 26 dB $\mu$ V/m utilizando o seguinte modo de transmissão: modo de robustez A, modulação 16-QAM, banda de 10 kHz e taxa de código de 0.62. No entanto, o parâmetro de qualidade utilizado foi a decodificação correta de ao menos 60 % dos quadros de áudio recebidos. Se adotarmos esse padrão, que não parece razoável para garantir uma recepção de qualidade, esses resultados estarão aproximadamente de acordo com aqueles apresentados na Figura 4.37.

Nos resultados dos testes apresentados em [4], utilizando a mesma configuração que a do modo B-21, obteve-se um valor de 18 dB como limiar para a MER e de 37 dB $\mu$ V/m para a intensidade de campo. Esses resultados, no entanto, foram obtidos a partir da análise apenas das medições fixas realizadas, tomando por base o critério de se ter uma AudioQ superior a 98%. Os autores ressaltam, no entanto, a influência que o tráfego local causou nos resultados, afirmando que o limiar da MER seria inferior a 15 dB e o limiar de campo próximo a 31 dB $\mu$ V/m caso se considerassem apenas as medições realizadas sem a

presença de tráfego local intenso.

É preciso ressaltar, no entanto, que a definição de um limiar de nível mínimo de intensidade de campo para uma boa recepção, além de depender do critério utilizado para se definir uma boa recepção, depende também do ambiente de recepção considerado. Caso a intensidade dos múltiplos percursos seja considerável, um elevado nível de campo recebido pode não significar uma recepção satisfatória, especialmente se o modo de robustez utilizado for o modo A.

### **5.3 CAUSAS DOS ERROS OCORRIDOS**

Apesar de os testes realizados terem apresentados resultados majoritariamente positivos, é preciso ressaltar que eles não são suficientes para se tirar uma conclusão definitiva sobre a viabilidade do uso do sistema DRM em 26 MHz no Brasil. Como ficou claro pelos testes, embora a recepção tenha sido satisfatória em quase toda a região central da cidade, ainda houve locais onde ocorreram erros no áudio recebido. Dos resultados obtidos, nota-se que esses erros podem ser atribuídos primordialmente a dois fatores: distância ao transmissor e ambiente de recepção.

Considerando as medições fixas do modo B-21, por exemplo, houveram dois pontos onde os erros ocorreram devido à grande distância ao transmissor (e conseqüente menor intensidade de campo), mais precisamente os pontos R6P3 e R7P3, os pontos extremos das duas rotas radiais percorridas. Já nas medições R6P2 e R6P2\_2, mesmo com o veículo a uma distância não tão grande do transmissor, ocorreram erros na recepção, causados provavelmente devido à chegada do sinal por múltiplos percursos.

Nas medições em movimento desse modo, a influência desses dois fatores também pode ser notada. Na rota Asa Norte (R4), por exemplo, apesar de se ter um ambiente predominantemente urbano denso (o mais propenso ao surgimento de intensos múltiplos percursos), obteve-se uma recepção quase livre de erros. Isso ocorreu devido à pequena distância ao transmissor, o que fez com que a intensidade de campo, mesmo variando bastante, sempre oscilasse entre valores elevados. Já na rota Central (R5) e no trecho mais denso da rota Radial SW (R6), pôde se notar uma incidência maior de erros de áudio. Na rota R5, em especial, houve uma maior concentração de erros quando o móvel estava em regiões com prédios de vários andares (Setor de Autarquias Sul e Setor Comercial Sul).

Outras duas rotas que ilustram bem esse fenômeno são as rotas SIA (R2) e Circular (R8). Na rota SIA os erros se concentraram na parte mais urbana do percurso, sendo que na região mais aberta deste, a recepção foi praticamente perfeita, muito embora essa região esteja mais distante do transmissor. Já na rota Circular, procurou-se manter a distância do veículo ao transmissor o mais constante possível e também é possível notar que os erros de áudio se concentraram na parte mais urbana do trajeto.

Também é interessante notar que mesmo obstáculos de menor altura, como casas, podem causar um multipercurso forte o suficiente para degradar o sinal recebido, como pode ser percebido na rota Lago Sul.

A maior parte dos erros ocorridos pode ser justificada pelo fato de os testes terem sido realizados com uma potência inferior àquela que seria utilizada em uma transmissão comercial. É de se esperar que a utilização de uma potência maior eleve o nível de campo dos pontos mais distantes o suficiente para que a MER se estabilize em um nível alto o suficiente para se ter uma boa recepção do sinal. Além disso, é de se esperar que nos pontos com maior concentração de edifícios as variações da intensidade de campo recebido em movimento continuem intensas, mas que oscilem entre níveis elevados (como na rota Asa Norte), possibilitando uma boa recepção.

Para a realização de testes futuros, seria interessante que se dispusesse de algum equipamento que possibilitasse a visualização das constelações recebidas. Com a adição desse equipamento, seria possível analisar melhor a ocorrência de erros em pontos onde a MER foi alta, como, por exemplo, nos pontos R6P1, R11P1 e R12P1. Seria possível também obter uma melhor compreensão sobre o porquê de em alguns pontos a MER recebida ter sido relativamente baixa e ainda assim se ter obtido uma recepção de qualidade, como, por exemplo, no ponto R11P3. A princípio, o equipamento indicado para a realização dessas medições seria um analisador vetorial. No entanto, uma vez que o sinal medido possui várias sub-portadoras, essa estratégia poderia não ser eficaz. Outra possibilidade seria a realização dessa medição via software. Essa estratégia, no entanto, aumentaria ainda mais o esforço computacional realizado pelo computador utilizado nas medições.

Outra situação potencialmente problemática no caso de o sistema vir a ser efetivamente implantado é a recepção em alta velocidade. Durante os testes realizados, à

exceção do teste de velocidade, tomou-se o cuidado de não ultrapassar a velocidade de 80 km/h, uma vez que em testes anteriores a equipe de técnicos do sistema DRM já havia experimentado degradações na recepção quando esta é realizada em alta velocidade. O valor de 80 km/h foi observado para se evitar alguma interferência nas medições, no entanto, ainda é necessária a realização de mais testes a fim de verificar qual é o valor de velocidade limiar do sistema, além de avaliar possíveis soluções para esse problema. No teste de velocidade realizado, dependendo da intensidade de campo recebida, a velocidade de 70 km/h já foi suficiente para causar erros de recepção. Essa limitação do sistema pode ser um empecilho, caso a área de cobertura da emissora envolva vias de alta velocidade.

#### **5.4 PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICA E INTERFERÊNCIA**

A elevação do nível de potência transmitida, no entanto, pode apresentar alguns efeitos adversos, caso o planejamento da potência radiada por cada emissora não seja bem realizado. Mesmo a faixa de 26 MHz sendo a menos adequada das faixas de OC para ser utilizada em transmissões a longas distâncias, em determinados momentos, dependendo do nível de ionização da ionosfera, é possível que a onda transmitida seja refratada pela ionosfera e atinja grandes distâncias. Assim, caso a potência transmitida em direção à ionosfera seja muito grande, ela pode ser suficiente para causar interferência em outras localidades, o que dificultaria o planejamento da distribuição de canais a nível nacional. [1] afirma ter recebido mensagens confirmando a recepção de um sinal DRM transmitido com baixa potência a partir de Nuremberg, Alemanha, em diversos países europeus como França, Itália, Suíça, Irlanda, Escócia e Dinamarca.

Assim como nos testes realizados em Brasília, o uso de um local de transmissão elevado e de uma antena diretiva, com o lóbulo principal apontado em direção ao solo pode reduzir esse problema. No entanto, segundo [5], essa estratégia pode não ser eficiente, uma vez que a refletividade do solo nessa faixa de frequência seria alta o suficiente para fazer com que o sinal fosse refletido de volta para a ionosfera, resultando em uma propagação com múltiplos saltos. Fica claro, portanto, que ainda seria necessária a realização de mais testes, em épocas mais propícias para a propagação ionosférica na faixa de 26 MHz, de forma que se pudesse avaliar o efeito desse tipo de interferência em sinais distantes. Nesses testes deveria ser realizada a verificação experimental do nível de potência a ser utilizado para cobrir a região desejada e, utilizando essa potência, deveria ser verificado a que distância e com que intensidade o sinal se propaga. Seria também interessante confirmar

através de testes ao menos alguns dos valores de relação de proteção apresentados em [13] para interferências entre sinais DRM. Com isso, seria possível avaliar tanto o nível de interferência entre emissoras distantes no mesmo canal quanto a possibilidade de se utilizar canais adjacentes na mesma localidade.

Segundo [1], o problema da interferência devido à propagação ionosférica é inevitável e a transmissão em 26 MHz deveria ser feita apenas por emissoras que possam tolerar as limitações na confiabilidade da recepção nessa faixa. Uma sugestão apresentada seria o uso da faixa de 26 MHz à noite e de ondas médias durante o dia, condição na qual a propagação ionosférica em ambas as faixas é minimizada. Outra sugestão seria o uso de redes de frequência única, com vários transmissores, o que diminuiria a intensidade de radiação enviada para a ionosfera e aumentaria a intensidade de campo nas proximidades das antenas transmissoras, distribuindo a energia de forma mais uniforme pela área de cobertura. Essas duas soluções, no entanto, aumentariam tanto o custo quanto a complexidade das emissoras, que teriam de utilizar mais de um equipamento transmissor e atentar para o sincronismo entre eles, o que dificulta o seu uso prático.

## **5.5 INFLUÊNCIA DO LOCAL DOS TESTES**

Além do problema da propagação ionosférica, como já foi discutido na Seção 3.5, Brasília, por ser uma cidade planejada, não é uma boa referência para as demais cidades brasileiras. Nas regiões mais urbanas da cidade a altura da grande maioria dos edifícios é limitada e os mesmos estão via de regra bem afastados uns dos outros. Em cidades mais densamente ocupadas, como São Paulo e Rio de Janeiro, é provável que as condições de recepção do sinal sejam mais difíceis, uma vez que os prédios mais altos e mais próximos devem aumentar a quantidade de múltiplos percursos pelos quais o sinal chega ao receptor, além de muitas vezes bloquear mais severamente a linha de visada direta ao transmissor, reduzindo a potência recebida.

Outro fator importante é que a área industrial da cidade é pouco desenvolvida. Possivelmente em regiões com uma indústria provida de um maquinário mais pesado o nível de ruído causado possa ser alto o suficiente para interferir na recepção do sinal. [1] comenta que em testes fixos realizados em uma região industrial, a ocorrência de erros se concentrava em determinada hora do dia, provavelmente causada pela utilização periódica de algum maquinário pesado.

Além disso, a intensidade do tráfego de veículos também pode ter um papel importante na recepção do sinal, uma vez que os veículos que passam próximos ao receptor são fontes tanto de múltiplos percursos como de ruído elétrico gerado por seus motores. A presença de tráfego intenso pode elevar a intensidade de campo mínima para recepção estática do sinal em até 6 dB [4].

Por todas essas razões é recomendável que os testes sejam realizados em outras cidades com condições mais adversas de recepção para se obter uma melhor avaliação do sistema e dos limiares de campo que seriam necessários para se obter uma boa recepção. Seria interessante realizar testes em locais com uma densidade urbana mais intensa, com uma indústria mais pesada e com um terreno mais acidentado.

## **5.6 RECEPÇÃO INTERNA**

Outro teste importante que deveria ser realizado para melhor caracterizar o sistema é o da recepção do sinal DRM dentro de edifícios e residências. Como já foi discutido na Seção 2.4, o fato de o sinal sofrer desvanecimento plano faz com que a intensidade do sinal varie bastante com deslocamentos de alguns metros, dependendo do ambiente de recepção. Assim, em recepções estáticas ou em baixas velocidades, é possível que o receptor se encontre em um local onde prevalece a contribuição destrutiva dos múltiplos percursos e não receba um sinal forte o suficiente para proporcionar uma boa recepção. Se somarmos a isso a atenuação que o sinal sofrerá ao adentrar os edifícios e o fato de que a maioria dos receptores comerciais não deverão ter antenas apropriadas para essa faixa, é de se esperar que a recepção interna não apresente a mesma qualidade das medições fixas externas realizadas nesses testes.

## **5.7 LOCALIZAÇÃO DO TRANSMISSOR**

Os testes realizados utilizaram uma antena transmissora que estava um pouco afastada da região que se esperava cobrir (o ponto mais próximo estava a mais de 5 km de distância). Seria interessante testar se uma melhor cobertura da região central da cidade seria conseguida com o uso de uma antena localizada mais próxima ao centro da mesma. É preciso ressaltar, no entanto, que essa antena provavelmente não teria a mesma altura em relação ao solo da antena utilizada nos testes e conseqüentemente não teria uma visada tão desobstruída. Assim, mesmo em pontos próximos ao transmissor deverá ser notada uma

grande variação na intensidade de sinal recebida, devido aos múltiplos percursos.

## **5.8 EQUIPAMENTO DE RECEPÇÃO**

Os testes realizados utilizaram um equipamento que pode ser classificado como profissional, em um esquema que não pode ser implementado comercialmente. Seria interessante que fossem realizados também testes com receptores DRM comerciais, a fim de se averiguar se os níveis de campo mínimos para uma boa recepção seriam os mesmos.

Esse teste também seria interessante para avaliar o atraso que o sinal sofreria em um sistema real. De forma informal, constatou-se durante os testes que o áudio sofria um atraso de alguns segundos desde o momento em que este era enviado pelo reproduzidor de discos ao transmissor até o momento em que era efetivamente ouvido no receptor. Esse atraso pode em parte ser atribuído ao software responsável pelas medições. Uma vez que o computador responsável por reproduzir o áudio durante os testes também precisava realizar uma série de outras medições simultaneamente, é possível que ele tenha inserido certo atraso no sistema que não ocorreria em um receptor comercial.

No entanto, como o transmissor realiza um embaralhamento dos bits no tempo no momento da transmissão (*interleaving*), a existência de um atraso no sistema é inevitável. Dependendo de sua duração, esse atraso pode ser um problema considerável para alguns programas de rádio, em especial aqueles com eventos ao vivo (por exemplo, transmissão de eventos esportivos) ou aqueles com participação do ouvinte através de telefonemas.

## **5.9 TOLERÂNCIA A IMPERFEIÇÕES**

Por fim, seria interessante testar a aceitação do público alvo a erros de recepção. No caso da transmissão digital, a recepção apresenta dois momentos característicos: ou o sinal é recebido de forma perfeita ou a saída de áudio se silencia (ao menos momentaneamente), ao passo que na transmissão analógica, a qualidade do áudio recebido vai se degradando gradativamente. É de se esperar que o público alvo seja menos tolerante aos erros nos sistemas digitais do que às degradações que ocorrem nos sistemas atualmente em uso. Isso se deve tanto à forma abrupta como os erros ocorrem nos sistemas digitais, quanto à alta expectativa por qualidade associada aos sistemas digitais. Uma má aceitação de erros no áudio pode fazer com que a potência que se deve utilizar para garantir uma recepção perfeita em toda a região de interesse torne o uso do sistema inviável.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Essa dissertação apresentou os resultados de testes realizados em Brasília com o intuito de avaliar o desempenho do sistema DRM em transmissões locais na faixa de 26 MHz. Esses resultados indicam que essa modalidade de radiodifusão local pode ser viável. Mesmo utilizando uma potência de transmissão média de apenas 200 W, a recepção do sinal DRM foi boa até a uma distância de cerca de 35 km do transmissor, quando a linha de visada estava desobstruída.

Contudo, mesmo com a utilização de um modo de transmissão DRM mais robusto (denominado nessa dissertação de modo B-21), algumas interrupções no áudio recebido ocorreram em pontos dentro da área de cobertura. Essas interrupções foram mais frequentes em regiões de maior densidade predial, o que ilustra como a recepção do sinal é afetada pela propagação multipercurso e pela obstrução da sua linha de visada por prédios.

A potência média de 200 W utilizada nos testes, embora adequada para que fossem encontrados os limiares de recepção do sistema, não se mostrou suficiente para propiciar uma boa recepção em toda a área de cobertura.

Um aspecto relevante observado foi que os níveis de intensidade de campo necessários para uma boa recepção do sinal DRM são consideravelmente inferiores aos níveis correspondentes para a recepção dos sinais das rádios FM. Para o modo de transmissão DRM mais robusto testado, os limiares de intensidade de campo para uma boa recepção foram de 35 dB $\mu$ V/m para a recepção fixa e de 38 dB $\mu$ V/m para a recepção móvel. Esses valores são muito menores que o valor de 66 dB $\mu$ V/m utilizado para delimitar a área de serviço urbana de uma emissora FM.

Embora não tenham sido realizados testes formais de qualidade subjetiva do áudio decodificado, foi possível notar que a qualidade do áudio recebido foi muito boa mesmo com uma taxa de transmissão de apenas 21 kbps e o uso da estereofonia paramétrica. O uso de um modo um pouco menos robusto que o modo B-21, propiciando uma taxa de bits de transmissão entre 25 e 30 kbps, seria suficiente para se transmitir um sinal de áudio com qualidade equivalente à do áudio transmitido por uma emissora FM.

Embora a qualidade do áudio decodificado tenha sido boa quando a recepção do sinal DRM foi bem-sucedida, verificou-se que a transição entre uma boa recepção do áudio



e a interrupção da recepção se dá de maneira muito mais abrupta que aquela das modulações analógicas.

Os resultados dos testes feitos com o modo A de robustez OFDM indicam que esse modo provavelmente não será adequado para a radiodifusão local em 26 MHz em cidades de médio e grande porte. Em áreas urbanas densas, o espalhamento dos atrasos (*delay spread*) nos múltiplos percursos de propagação deve requerer o uso do modo B. Contudo, poucas medições foram realizadas com o modo A, conseqüentemente mais medições devem ser feitas para confirmar essa observação preliminar.

Quanto aos equipamentos utilizados para a transmissão do sinal, foi verificado que os módulos transmissor e excitador são compactos e de fácil utilização e que a antena é menor do que as usadas para radiodifusão em OM, embora seja recomendado que ela seja instalada em um local alto, de forma a atingir diretamente mais pontos da cidade.

No entanto, apesar de os testes terem sido bem sucedidos nas condições em que foram realizados, eles não são suficientes para se afirmar de forma categórica que o sistema DRM pode ser utilizado com sucesso na faixa de 26 MHz. Um grave problema que poderia ocorrer é a interferência co-canal através de propagação ionosférica que poderia surgir nos períodos de máxima atividade solar e quando ocorresse o surgimento das camadas E esporádicas. Seria necessário verificar através de testes de campo a intensidade da interferência que ocorreria caso fossem adotadas medidas para diminuí-la, tais como o uso de antenas direcionais, que minimizem a radiação em direção à ionosfera.

Também foi verificado que o deslocamento do receptor em velocidades altas degrada a recepção do sinal DRM, o que pode ser um grave inconveniente dependendo do tipo de trânsito presente na área de cobertura pretendida pelo radiodifusor. É recomendada a realização de mais testes com o intuito de verificar mais precisamente em que condições se dá essa degradação.

Por essas razões, recomenda-se a realização de alguns testes adicionais para que se confirme de forma indubitável a viabilidade de transmissões locais em 26 MHz utilizando o sistema DRM. Esses testes estão apresentados no Capítulo 5, mas, de forma sucinta, eles são os seguintes:

- teste para determinar a velocidade limiar acima da qual a recepção do sinal DRM

é deteriorada significativamente;

- teste para avaliar a propagação ionosférica indesejável do sinal DRM e a interferência que esse tipo de propagação poderá causar entre sinais DRM na faixa de 26 MHz;
- avaliação da interferência entre sinais DRM que ocupam canais adjacentes e cujas áreas de cobertura apresentam sobreposição;
- testes em cidades com características diferentes das de Brasília: cidades com maior densidade urbana, com indústria pesada e com um terreno mais acidentado;
- teste para avaliar a qualidade da recepção residencial com antena interna;
- testes mais extensivos com modos de transmissão menos robustos, mas que propiciam maior capacidade de transmissão;
- testes com receptores DRM comerciais;
- avaliação do efeito do atraso intrínseco do sistema DRM;
- avaliação subjetiva usando ouvintes comuns dos efeitos dos erros de recepção, especialmente das eventuais interrupções do áudio.

Além desses testes, uma sugestão de trabalho futuro relacionado com a radiodifusão local em 26 MHz é o desenvolvimento de antenas que minimizem a radiação em direção à ionosfera e, conseqüentemente, que reduzam as interferências que as ondas ionosféricas possam causar.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] T. Lauterbach, “Local Radio in the 26 MHz Band using DRM – Results of the Nuremberg Field Trial and general Considerations,” disponível em: [http://www.ai.fh-nuernberg.de/Professors/Lauterbach/CampusRadio/index\\_Stand0703.htm](http://www.ai.fh-nuernberg.de/Professors/Lauterbach/CampusRadio/index_Stand0703.htm), consultado em outubro de 2006.
- [2] Broadcasters’ User Manual, Publicação DRM™, 1ª ed., 2004. Disponível em <http://www.drm.org>, consultado em fevereiro de 2007.
- [3] J. Matías, I. Losada, D. Guerra, G. Prieto, U. Gil, P. Angueira, “Local Radio Coverage Using Digital Radio Mondiale International Standard: Time Variability Characterization,” apresentado no IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Las Vegas, EUA, 2006.
- [4] J. Matías, I. Corderí, P. Angueira, U. Gil, J. Ordiales, e A. Arrinda, “DRM (Digital Radio Mondiale) Local Coverage Tests Using the 26 MHz Broadcasting Band,” *IEEE Trans. Broadcasting*, a ser publicado
- [5] T. Lauterbach, B. Kreuzen, R. Zitzmann, K. Blomeier, “Is DRM on 26 MHz an Option for Local Digital Broadcasting? Results from a Field Trial in Nuremberg, Germany,” apresentado no 5º Fraunhofer IIS Workshop Digitaler Rundfunk, disponível em: [http://www.ai.fh-nuernberg.de/Professors/Lauterbach/CampusRadio/index\\_Stand0703.htm](http://www.ai.fh-nuernberg.de/Professors/Lauterbach/CampusRadio/index_Stand0703.htm), consultado em outubro de 2006.
- [6] 6E/274-E “Digital Radio Mondiale DRM Local Coverage Using the 26 MHz Broadcasting Band”, disponível em: <http://www.drm.org/drm-itu-sub/drm-itu-sub.php>, consultado em fevereiro de 2007
- [7] Norma Técnica para Emissoras de Radiodifusão em Ondas Decamétricas (Norma no 02/83), aprovada pela Portaria MC nº 025, de fevereiro 1983.
- [8] R. L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunications*. John Wiley & Sons, 1997, pp. 577-660

- [9] IPS - Australian Space Weather Agency, “Introduction to HF Radio Propagation,” disponível em: <http://www.ips.gov.au/Educational/5/3>, consultado em novembro de 2006.
- [10] Sítio da Anatel: <http://www.anatel.gov.br>, consultado em setembro de 2006.
- [11] Regulamento Técnico para Emissoras de Radiodifusão Sonora em Frequência Modulada, aprovado pela Resolução nº 67 da Anatel, de novembro de 1998.
- [12] ETSI ES 201 980: “Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification”, v2.1.1, 2004.
- [13] Rec. ITU-R BS.1615: “Planning parameters” for digital sound broadcasting at frequencies below 30 MHz, 2003.
- [14] J. Stott, “DRM – Key Technical Features,” *BBC Research and Development*, disponível em: [http://www.ebu.ch/en/technical/trev/trev\\_286-stott.pdf](http://www.ebu.ch/en/technical/trev/trev_286-stott.pdf), consultado em fevereiro de 2007.
- [15] M. Dietz e S. Meltzer, “CT-aacPlus - a State-of-the-art Audio Coding Scheme,” Coding Technologies, Germany, disponível em: [http://www.ebu.ch/en/technical/trev/trev\\_291-dietz.pdf](http://www.ebu.ch/en/technical/trev/trev_291-dietz.pdf), consultado em fevereiro de 2007.
- [16] M. Wolters, K. Kjörling, D. Homm e H. Purnhagen, “A closer look into MPEG-4 High Efficiency AAC”, Convention Paper, AES 115<sup>TH</sup> Convention, outubro de 2003, disponível em: <http://www.telos-systems.com/techtalk/hosted/HE-AAC.pdf>, consultado em fevereiro de 2007
- [17] ETSI TS 102 349: “Digital Radio Mondiale (DRM); Receiver Status and Control Interface (RSCI)”, v1.1.1, 2005.
- [18] G. Terreault, “QAM Signal Impairments and their Effects on MER and BER”, Sunrise Telecom Broadband, disponível em: [http://www.sunrisetelecom.com/broadband/QAM\\_Impairment\\_Effects\\_on\\_MER\\_BE R\\_104.pdf](http://www.sunrisetelecom.com/broadband/QAM_Impairment_Effects_on_MER_BE R_104.pdf), consultado em dezembro de 2006.

- [19] “Modulation Error Ratio and Signal-to-Noise Ratio Demystified”, Sunrise Telecom, disponível em: [http://www.sunrisetelecom.com/broadband/online\\_learning.shtml](http://www.sunrisetelecom.com/broadband/online_learning.shtml), consultado em dezembro de 2006.
- [20] F. Hoffmann, C. Hansen e W. Schäfer, “Digital Radio Mondiale (DRM): Digital Sound Broadcasting in the AM Bands,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 49, no.3, pp. 319-328, setembro de 2003
- [21] Rec. ITU-R BS.1514-1: Systems for digital sound broadcasting in the broadcasting bands below 30 MHz, 2002.

## **APÊNDICES**

## A O SISTEMA DRM

### A.1 HISTÓRICO

O consórcio DRM (*Digital Radio Mondiale*) foi formado em 1998 com o propósito de formular os requerimentos para um sistema de radiodifusão digital para ser usado nas faixas de radiodifusão AM e então projetá-lo e introduzi-lo no mercado. Os principais objetivos estabelecidos para o projeto foram [2]:

- uma melhoria significativa na qualidade do áudio, na disponibilidade e na confiabilidade;
- receptores mais fáceis de serem usados e com mais recursos;
- compatibilidade com o uso atual e futuro do espectro nas bandas AM;
- uma migração segura da radiodifusão analógica para a digital; e
- disponibilidade de receptores a um custo baixo por meio de uma especificação do sistema aberta e sem proprietário.

No início do ano 2000, foram concluídos os primeiros moduladores protótipos DRM e uma série de testes de campo foi iniciada. Em 2001 foi publicada a primeira versão do padrão DRM pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) e em abril do mesmo ano foi aprovado pela ITU (*International Telecommunication Union*). Em janeiro de 2002, membros do DRM iniciaram a transmissão de várias horas diárias de sinais DRM. Em junho de 2003, 16 emissoras de vários países começaram a transmitir diariamente o sinal digital DRM para a Europa, América do Norte, Oriente Médio, Austrália e Nova Zelândia [2], [20].

Em 2004, o consórcio contava com mais de 80 membros, entre os quais radiodifusores, fabricantes de equipamentos de transmissão, fabricantes de receptores, universidades, instituições de pesquisa, organizações internacionais e nacionais reguladoras e normatizadoras, operadores de redes de comunicação e organizações de licenciamento de direitos de propriedade intelectual.

## A.2 FAIXAS DE FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO E LARGURA DE FAIXA DO SINAL DRM

O sistema DRM foi projetado para ser um padrão mundial para radiodifusão em frequências abaixo de 30 MHz [21]. Dessa forma, ele oferece configurações que permitem a transmissão em onda longa (OL), onda média (OM), onda tropical (OT) e onda curta (OC). O sistema DRM é completamente compatível com o espaçamento e a largura de faixa dos canais de radiodifusão nessas faixas de frequência [20].

Atualmente, na faixa OM o espaçamento entre canais adjacentes é de 9 kHz, nas regiões ITU 1 e 3, e de 10 kHz, na Região 2. Na faixa OC, em todo o mundo o espaçamento entre canais adjacentes é de 5 kHz, mas a largura de faixa dos canais é de 10 kHz. O sistema DRM foi projetado para ser compatível com essa diversidade, por isso o sinal DRM pode ter as seguintes larguras de faixa nominais [2], [12], [20], [21]:

- 9 ou 10 kHz (valores primários)— esses valores possibilitam a compatibilidade com os planos atuais de distribuição de canais;
- 4,5 ou 5 kHz (metade dos valores primários) — esses valores permitem a transmissão simultânea (*simulcast*) do sinal digital DRM e do sinal analógico AM dentro de um único canal com largura de 9 ou 10 kHz, (desde que o sinal AM seja do tipo SSB ou VSB);
- 18 ou 20 kHz (dobro dos valores primários) — esses valores permitem uma maior capacidade de transmissão onde e quando as condições de planejamento permitirem.

## A.3 ARQUITETURA DO SISTEMA

A Figura A.1 mostra um diagrama de bloco conceitual do transmissor DRM. Uma descrição sucinta dos componentes desse sistema é apresentada a seguir.

### A.3.1 Canais de informação

Os componentes de informação multiplexados e transmitidos pelo sistema DRM são divididos em três canais: o canal de acesso rápido ou FAC (*Fast Access Channel*), o canal de descrição de serviço ou SDC (*Service Description Channel*) e o canal de serviço principal ou MSC (*Main Service Channel*) [12],[21]. As características e o tipo de



informação de cada um desses canais são descritos a seguir.

#### A.3.1.1 Canal de acesso rápido

O canal de acesso rápido (ou FAC) transporta dados que informa ao receptor a largura de faixa do sinal DRM, a modulação usada com o SDC e com o MSC, o comprimento do embaralhamento (*interleaving*), quantos serviços contém o MSC e o nome desses serviços. O receptor decodifica primeiro o FAC, para depois decodificar o SDC e o MSC. Para que o receptor possa adquirir e decodificar a informação contida no FAC em menos tempo, não é aplicado ao FAC o embaralhamento temporal de células OFDM, como é feito com o SDC e o MSC. Contudo, como o FAC transporta os dados mais críticos do sistema, ele requer maior robustez, que é conseguida com o uso da modulação 4-QAM, a mais robusta dentre as modulações disponíveis no sistema DRM, e com o uso de um código de canal também robusto. Desse modo, mesmo quando a decodificação do SDC e do MSC falha, devido a um desvanecimento do sinal, por exemplo, o FAC continua geralmente garantindo a sincronização do receptor e, assim, minimizando o tempo de recuperação para o serviço de áudio após o fim de um desvanecimento severo.

#### A.3.1.2 Canal de descrição de serviço

Uma vez decodificada a informação contida no FAC, o receptor pode iniciar a decodificação da informação transportada pelo canal de descrição de serviço (ou SDC). Entre outras coisas, o SDC descreve em detalhes como decodificar os serviços contidos no MSC e também informa se existem outras frequências em que os mesmos serviços ou serviços relacionados podem ser recebidos, em quais regiões e quando eles estão disponíveis. As células OFDM do SDC são embaralhadas no tempo para aumentar sua resistência ao desvanecimento de curto termo. O SDC sempre usa uma modulação menos complexa (isto é, de menor ordem) do que aquela utilizada pelo MSC, portanto ele pode ser decodificado em RSR menor do que a requerida para o MSC. Assim, quando o MSC usa 64-QAM o SDC usa 16-QAM e quando o MSC usa 16-QAM o SDC usa 4-QAM.

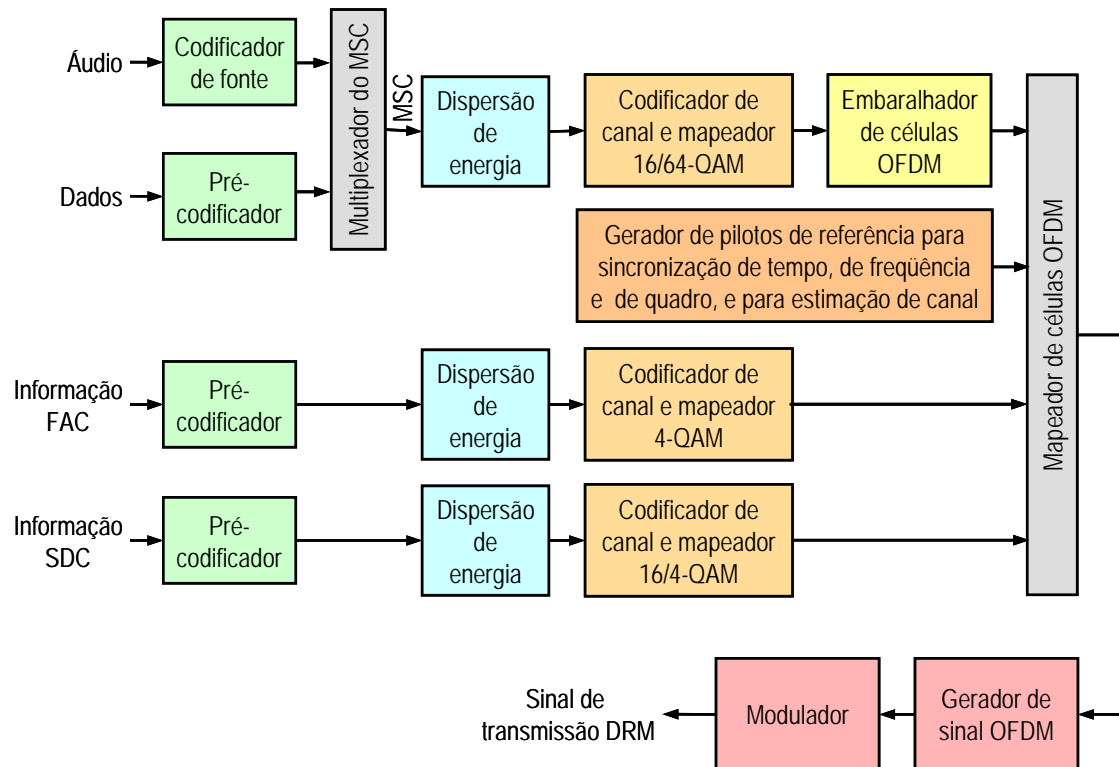


Figura A.1 - Diagrama de bloco conceitual do transmissor DRM. (Adaptado de [12])

### A.3.1.3 Canal de serviço principal

O canal de serviço principal (ou MSC) contém os serviços (áudio e dados) e, por isso, detém a maior parte da capacidade de transmissão do sinal DRM. O MSC pode transportar até quatro serviços distintos, cada um deles podendo ser áudio ou dados. O MSC usa a modulação 16-QAM ou a 64-QAM ou, no modo hierárquico, parte usa 64-QAM e o restante 16-QAM. Igual ou desigual proteção de erro pode ser aplicada ao MSC (isto é, a mesma taxa de código pode ser aplicada a todo o MSC ou uma parte usa uma taxa de código e o restante uma taxa de código diferente). As células OFDM do MSC são embaralhadas no tempo com a finalidade de reduzir os efeitos do desvanecimento de curto termo, a profundidade (ou comprimento) do embaralhamento é a mesma usada com o SDC.

### A.3.2 Codificação de fonte e pré-codificadores

O codificador de fonte (áudio ou voz) e os pré-codificadores (de dados e de informações FAC e SDC) convertem os fluxos de bits (ou *streams*) de entrada em um formato apropriado para transmissão digital. No caso da codificação de fonte, essa funcionalidade inclui técnicas de compressão de áudio ou de voz. A saída do codificador

de fonte e a saída do pré-codificador de dados podem compreender duas partes que requerem dois níveis de proteção diferentes na etapa de codificação de canal.

Devido às limitações impostas pelas normas que regem a radiodifusão na faixa de frequências inferior a 30 MHz e aos parâmetros de codificação e modulação utilizados, a taxa de bits disponível para a codificação de fonte é geralmente baixa, estando na faixa de 4,8 kbps (canais de 4,5 e de 5 kHz) a 72 kbps (canais de 18 e de 20 kHz) [12]. Por isso, o codificador de fonte é um elemento fundamental para o bom desempenho de um sistema de radiodifusão digital.

O sistema DRM oferece grande flexibilidade na codificação de fonte, permitindo o uso de três esquemas de codificação: um para codificação de áudio (AAC) e dois para codificação de voz (CELP e HVXC) [12]. A Figura A.2 mostra o arranjo previsto para a codificação de fonte no sistema DRM. Os três codificadores disponíveis fazem parte do padrão MPEG-4 e algumas de suas características são mostradas na Tabela A.1.

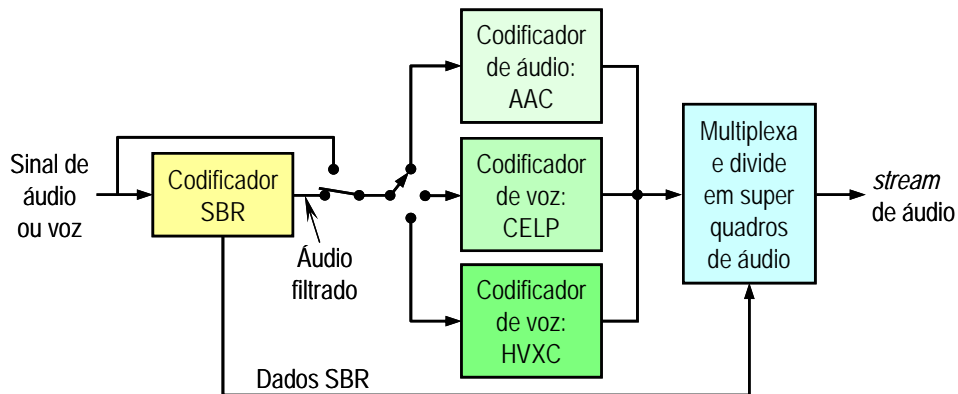


Figura A.2 – Opções de codificação de fonte (áudio ou voz) disponíveis no sistema DRM. (Adaptado de [2])

Tabela A.1 – Características dos codificadores de fonte do DRM [20].

<b>Codificador</b>	<b>Taxa de amostragem (kHz)</b>	<b>Taxas de bits possíveis (kbps)</b>	<b>Aplicação</b>
AAC	12 e 24	Ampla faixa, com granulação de 20 bps	Codificação de áudio genérico, estereofônico ou monofônico
CELP	8 e 16	4 a 20	Codificação de voz a baixas taxas de bits
HVXC	8	2 a 4	Codificação de voz a taxas de bits muito baixas

O codificador AAC (*Advanced Audio Coding*) é para a codificação de áudio genérico, estereofônico ou monofônico. No sistema DRM, apenas duas taxas de amostragem são permitidas ao AAC: 12 kHz e 24 kHz [12]. Em princípio, o áudio codificado teria, então, largura de banda menor que 6 kHz ou 12 kHz, respectivamente. Contudo, o sistema DRM permite o uso da técnica SBR (*Spectral Band Replication*) que é capaz de melhorar a percepção de um sinal de áudio truncado espectralmente em uma frequência baixa. Ela utiliza, de uma forma dinâmica, o conteúdo espectral da informação de baixa frequência para criar uma imitação para informação de alta frequência perdida. Isso requer uma informação SBR auxiliar que despende aproximadamente 2 kbps [2]. No caso, o codificador AAC codifica um sinal de áudio de banda estreita — com largura de banda menor do que 6 (ou 12) kHz — e paralelamente o codificador SBR extrai e codifica apenas a forma (ou envoltória) do espectro do áudio original para frequências acima de 6 (ou 12) kHz. Essas duas informações, a saída do codificador AAC e a saída do codificador SBR, são transmitidas e usadas pelo decodificador para criar uma imitação da informação espectral de alta frequência perdida, que é combinada com a informação espectral de baixa frequência para produzir um sinal de áudio que se estende até 15 kHz ou mais [2].

A combinação do codificador AAC com o esquema SBR é denominada aacPlus ou HE AAC (*high efficiency AAC*). O aacPlus é capaz de propiciar sinais de áudio estereofônico de alta qualidade (equivalente à qualidade propiciada pelos CDs) a taxas de bits em torno de 48 kbps; e sinais de áudio monofônico com qualidade próxima daquela propiciada pelas emissoras FM podem ser conseguidos a taxas de bits em torno de 20 kbps [15], [16].

O sistema DRM permite também o uso de um esquema estereofônico paramétrico, que utiliza uma técnica de síntese na decodificação do áudio para melhorar o sinal mono AAC, dando a esse uma percepção estereofônica [2]. Esse esquema requer também a transmissão de uma informação auxiliar que despende aproximadamente 2 kbps e é extraída do sinal de áudio estereofônico original pelo codificador. Portanto, para implementar a expansão da largura de banda e a estereofonia paramétrica é necessário despende aproximadamente 4 kbps adicionais. Contudo, esses dois esquemas, quando combinados com a codificação AAC, propicia uma qualidade de áudio notável com um dispêndio total de bits tão baixo quanto 20 kbps [2].

O codificador de voz MPEG-4 CELP (*Code Excited Linear Prediction*) propicia

voz de boa qualidade a baixas taxas de bits — veja Tabela A.1. Ele possibilita que um sistema DRM transmita simultaneamente por um único canal dois ou três programas vocais distintos (por exemplo, noticiários) ou o mesmo programa vocal em duas ou três línguas, o que é de grande interesse em radiodifusão internacional.

O codificador de voz HVXC (*Harmonic Vector eXcitation Coding*) depende taxas de bits mais baixas do que aquelas do codificador CELP — veja Tabela A.1. Ele também se destina à transmissão simultânea de vários programas vocais ou de um mesmo programa em até quatro línguas diferentes. Ele possibilita também que programas de rádio possam ser armazenados em memória *flash*.

#### A.4 MODOS DE ROBUSTEZ

A propagação nas faixas AM (OL, OM, OT e OC) pode variar entre onda de superfície, onde o ruído elétrico é o fator adverso predominante, à onda ionosférica (ou celeste) com diversos graus de complexidade, onde os efeitos Doppler e do atraso diferencial (entre os múltiplos percursos) são fatores adversos adicionais. Sob certas circunstâncias, sinais podem chegar a algumas localidades da área de cobertura por meio de ambos os modos de propagação. Para conviver com esses efeitos adversos, o sistema DRM oferece quatro modos de robustez ou modos OFDM. A Tabela A.2 mostra os principais parâmetros desses modos e a Tabela A.3 mostra as condições de propagação a que cada modo se destina, bem como as suas aplicações típicas. Por meio da escolha do modo OFDM, da ordem da modulação e das taxas da codificação de canal, em função das condições de propagação, pode ser garantido que o sinal de áudio será recebido com a melhor qualidade possível para o nível de disponibilidade de serviço e cobertura desejados pelo radiodifusor. Inevitavelmente, a escolha de um

Tabela A.2 - Parâmetros OFDM dos quatro modos de robustez DRM [12], [21].

Parâmetro	Modo de robustez			
	A	B	C	D
Espaçamento entre portadoras ( $\Delta f_p$ )	41,667 Hz	46,875 Hz	68,182 Hz	107,143 Hz
Duração da parte útil do símbolo ( $T_u = 1/\Delta f_p$ )	24 ms	21,333 ms	14,667 ms	9,333 ms
Intervalo de guarda ( $T_g$ )	2,667 ms	5,333 ms	5,333 ms	7,333 ms
Duração do símbolo OFDM ( $T_s = T_u + T_g$ )	26,667 ms	26,667 ms	20 ms	16,667 ms
$T_g/T_u$	1/9	1/4	4/11	11/14

Tabela A.3 – Modos de robustez do sistema DRM.

Modo de robustez	Condições de propagação típicas	Usos típicos
A	Onda de superfície, com pouco desvanecimento	Cobertura local ou regional usando onda de superfície nas faixas OL e OM. Cobertura local usando onda espacial na faixa OC 26 MHz.
B	Canais seletivos no tempo e na frequência, com maior <i>delay spread</i>	Cobertura nacional e internacional usando onda celeste nas faixas OM e OC.
C	Idem modo B, mas com elevado Doppler <i>spread</i>	Cobertura internacional usando onda celeste na faixa OC.
D	Idem modo B, mas com severos <i>delay spread</i> e Doppler <i>spread</i>	Onda celeste requerendo robustez altíssima, particularmente onda celeste com incidência quase vertical para cobertura nacional na faixa OT.

modo mais robusto ou de uma modulação mais robusta ou de uma codificação de canal mais robusta terá o efeito de reduzir a taxa de bits disponível e portanto a qualidade do áudio transmitido.

O modo A foi projetado para propiciar a mais alta taxa de bits possível em uma cobertura por meio de onda de superfície. É o modo com o menor intervalo de guarda e o menor espaçamento entre portadoras OFDM — veja Tabela A.2. No modo B, o espaçamento entre portadoras OFDM é um pouco maior do que no modo A mas o intervalo de guarda é praticamente o dobro daquele do modo A, o que torna o modo B mais robusto aos efeitos dos múltiplos percursos e, por isso, ele é indicado para o caso em que pelo menos parte do sinal recebido é devido a ondas ionosféricas. O modo C tem, em relação ao modo B, um maior espaçamento entre portadoras OFDM, o que o torna mais robusto ao efeito Doppler e, por isso, ele é indicado para longas distâncias (cobertura nacional ou internacional) com múltiplos saltos (isto é, múltiplas reflexões na ionosfera). Finalmente, o modo D que tem o maior intervalo de guarda e o maior espaçamento entre portadoras OFDM, o que o torna robusto mesmo em condições muito adversas de múltiplos percursos e de efeito Doppler e, por isso, ele se destina especialmente para cobertura nacional usando onda celeste com incidência quase vertical na faixa OT.

## A.5 CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO

A taxa de bits que o sistema DRM pode suportar depende da largura de faixa do

sinal DRM, do modo de proteção, da modulação e das taxas dos códigos corretores de erro. Para cada um desses quatro itens são oferecidas duas ou mais opções, que, ao serem combinadas entre si, produzem um grande número de configurações possíveis para o sistema DRM. A Tabela A.4 mostra algumas dessas configurações e a taxa de bits que elas disponibilizam para o canal de serviço principal (ou MSC). O sistema DRM oferece, portanto, ao radiodifusor uma grande flexibilidade para configurar sua transmissão em função da área de cobertura pretendida, dos serviços a serem oferecidos, da qualidade desses serviços e da confiabilidade.

Tabela A.4 – Taxa de bits disponível para o canal de serviço principal (MSC) [2].

Modo de robustez	Modulação usada com o MSC	Nível de robustez	Taxa de bits útil aproximada (kbps)					
			Largura de faixa nominal do sinal (kHz)					
			4,5	5	9	10	18	20
A	64-QAM	min	14,7	16,7	30,9	34,8	64,3	72,0
		max	9,4	10,6	19,7	22,1	40,9	45,8
	16-QAM	min	7,8	8,9	16,4	18,5	34,1	38,2
		max	6,3	7,1	13,1	14,8	27,3	30,6
B	64-QAM	min	11,3	13,0	24,1	27,5	50,0	56,1
		max	7,2	8,3	15,3	17,5	31,8	35,8
	16-QAM	min	6,0	6,9	12,8	14,6	26,5	29,8
		max	4,8	5,5	10,2	11,7	21,2	23,8
C	64-QAM	min	Não usado			21,6	Não usado	45,5
		max				13,8		29,0
	16-QAM	min				11,5		24,1
		max				9,2		19,3
D	64-QAM	min	Não usado			14,4	Não usado	30,6
		max				9,2		19,5
	16-QAM	min				7,6		16,3
		max				6,1		13,0

## A.6 RADIODIFUSÃO ANALÓGICA E DIGITAL SIMULTÂNEA

O sistema DRM suporta várias configurações de transmissão simultânea (*simulcast*) de um sinal analógico AM e de um sinal digital, ambos transportando o mesmo áudio, ou versões de um mesmo áudio [2], [12]. A Figura A.3 mostra algumas configurações possíveis. O sinal DRM pode ser alocado na faixa (ou canal) adjacente superior ou inferior àquela ocupada pelo sinal analógico AM e o sinal DRM pode ocupar uma faixa com largura nominal de 5 kHz, 10 kHz ou 20 kHz. É possível, ainda, transmitir dois sinais DRM, um ocupando a faixa adjacente inferior e o outro a faixa adjacente superior, como mostra os dois últimos diagramas da Figura A.3. Esses dois sinais podem ser frequências alternativas

para o conjunto de serviços, propiciando diversidade espectral. Nesse caso, o SDC indica as duas freqüências em que os serviços estão disponíveis. Alternativamente, os dois sinais podem ser a camada (ou parte) básica e a camada de melhoramento do conjunto de serviços oferecidos. Nesse caso, o SDC indica a freqüência da outra camada. Todos os receptores serão capazes de decodificar a camada básica, enquanto que alguns serão também capazes de decodificar a camada de melhoramento e propiciar melhor qualidade.

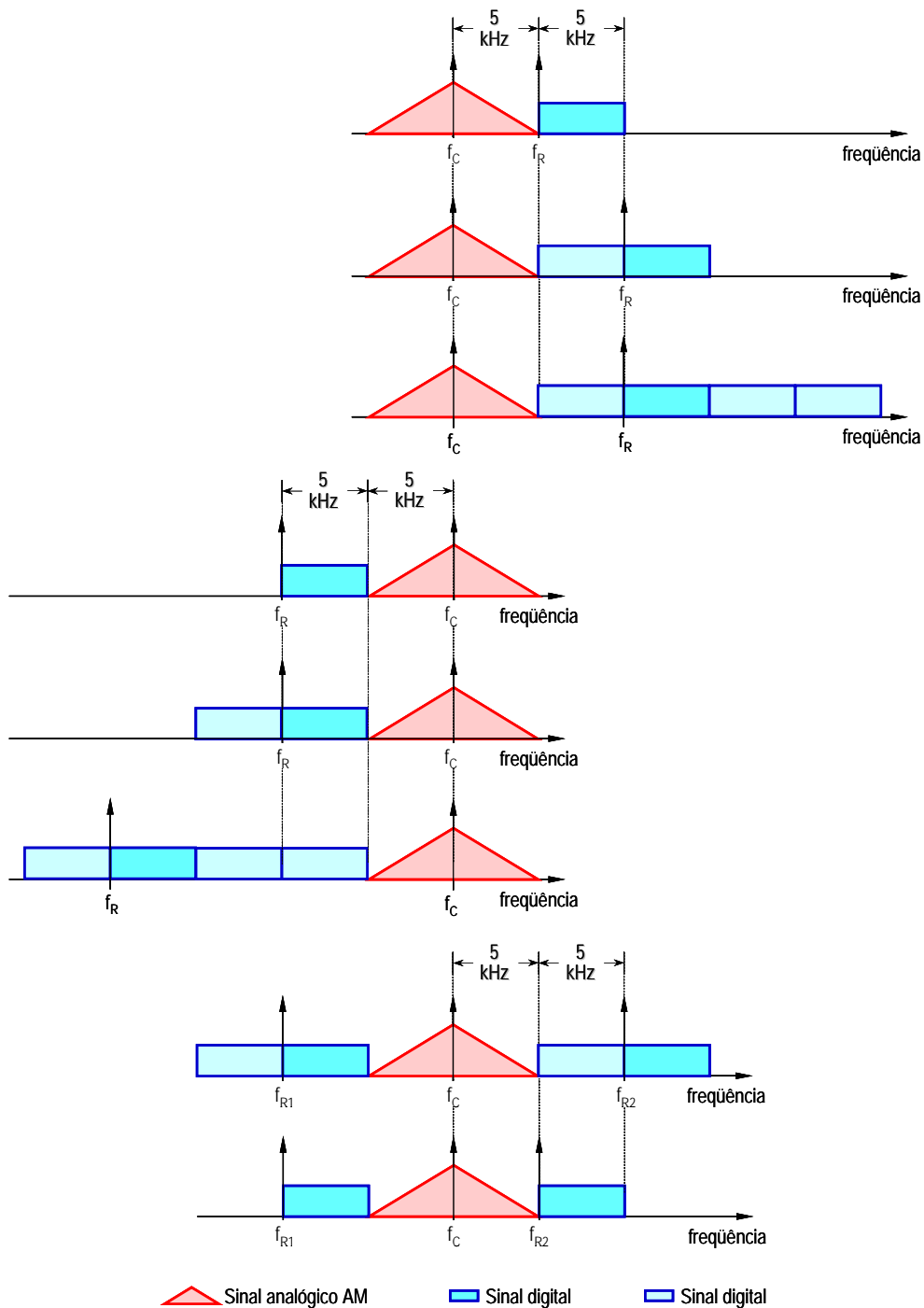


Figura A.3 – Exemplos de configurações *simulcast* DRM. (Adaptado de [12])