



Serviço Público Federal

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR
INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO

NOTA TÉCNICA

Número: Dimci/Ditel/022/2012

Referência: Medições de Campo do Sistema HD Radio na Faixa de FM em Belo Horizonte com a Rádio UFMG Educativa

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO.....	1
SUMÁRIO EXECUTIVO	4
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. SISTEMA DE TRANSMISSÃO.....	8
2.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO	8
2.2. PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO	11
3. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA DE MEDIÇÃO.....	12
3.1. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	12
3.2. PARÂMETROS DE MEDIÇÃO	16
3.3. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO.....	17
3.4. PLANEJAMENTO DAS ROTAS.....	18
4. RESULTADOS DOS TESTES	20
4.1. COMPARAÇÃO DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO DO SINAL ANALÓGICO MEDIDA COM A PREVISÃO TEÓRICA.....	20
4.2. AVALIAÇÃO DA ÁREA DE COBERTURA DO SINAL DIGITAL COM RECEPTOR PROFISSIONAL.....	21
4.2.1. AVALIAÇÃO DA ÁREA DE COBERTURA DO SINAL DIGITAL COM RECEPÇÃO ESTÁTICA	21
4.2.2. AVALIAÇÃO DA ÁREA DE COBERTURA DO SINAL DIGITAL COM RECEPÇÃO MÓVEL	26
4.3. AVALIAÇÃO OBJETIVA DO ÁUDIO DIGITAL DE RECEPTORES COMERCIAIS	31
4.3.1. AVALIAÇÃO DO ÁUDIO DIGITAL DE RECEPTOR COMERCIAL NAS MEDIÇÕES ESTÁTICAS	31
4.3.2. AVALIAÇÃO DO ÁUDIO DIGITAL DE RECEPTOR COMERCIAL EM MOBILIDADE.....	33
4.4. RESULTADOS DA RECEPÇÃO ANALÓGICA FM	33
4.4.1. AVALIAÇÃO DA ÁREA DE COBERTURA EM RECEPÇÃO ESTÁTICA	33
4.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA RECEPÇÃO DOS ÁUDIOS ANALÓGICO E DIGITAL	36
4.6. IMPACTO DO SINAL DIGITAL HD RADIO SOBRE O ÁUDIO ANALÓGICO	38
APÊNDICE	39
I. SISTEMA HD RADIO	39
I.1. HISTÓRICO E PADRONIZAÇÃO	39
I.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA HD RADIO	41
I.2.1. MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA HD RADIO NA FAIXA FM	41
I.2.2. DIVERSIDADES NO TEMPO E NA FREQUÊNCIA.....	42
I.2.3. MECANISMO <i>BLEND</i>	43
I.2.4. LIMITES DE EMISSÕES ESPECTRAIS FM	43
I.2.5. CANAL DE CONTROLE DO SISTEMA	45
I.2.6. CANAIS LÓGICOS	46
I.2.7. PARTIÇÕES DE FREQUÊNCIA E CONVENÇÕES ESPECTRAIS NOS MODOS DE TRANSMISSÃO.....	47
I.2.8. NÍVEIS DAS BANDAS LATERAIS DIGITAIS.....	52
II. RESULTADOS TABELADOS.....	55
II.1. DETALHES DAS ROTAS UTILIZADAS NAS MEDIÇÕES HD RADIO	55
II.2. DETALHES DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES HD RADIO	57
III. PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO DIGITAL	60
III.1. METODOLOGIA PROPOSTA PELA IBQUITY	60
III.2. MELHORIAS NA METODOLOGIA PROPOSTA PELA IBQUITY.....	66

IV. ARQUIVO DE MEDIÇÃO DO SISTEMA HD RADIO	68
BIBLIOGRAFIA.....	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características técnicas da emissora UFMG Educativa e transmissões analógica e digital.....	10
Tabela 2 – Modo de transmissão do IBOC utilizado durante os testes	11
Tabela 3 – Características técnicas dos dispositivos e equipamentos de medição	14
Tabela 4 – Descrição dos parâmetros de medição do software HD Radio.....	15
Tabela 5 – Parâmetros de Avaliação	17
Tabela 6 – Descrição das rotas	18
Tabela 7 – Resultados da recepção estática.....	22
Tabela 8 – Pontos onde Rx_Mode=0/1	24
Tabela 9 – Resultados da recepção móvel nas rotas radiais Rádio UFMG Educativa	27
Tabela 10 – Resultados da recepção móvel nas rotas circulares da Rádio UFMG	30
Tabela 11 – Medições fixas com receptores comerciais	31
Tabela 12 – Ocorrências de <i>blends</i> nos receptores comerciais em mobilidade.....	33
Tabela 13 – Escala de avaliação da qualidade de áudio da Recomendação UIT-R BS 1284	33
Tabela 14 – Classificação das notas subjetivas do áudio adotadas neste trabalho	34
Tabela 15 – Resultados do FM analógico em recepção estática	35
Tabela 16 – Resultados comparativos entre FM e HD Radio na recepção estática.	36
Tabela 17 – Resumo dos resultados comparativos entre os áudios analógico e digital na recepção estática.....	38
Tabela I.1-Limites de emissão do modo Híbrido HD Radio FM (*)	44
Tabela I.2-Limites de emissão do Modo Todo Digital HD Radio FM	45
Tabela I.3-Taxa de informação aproximada dos canais lógicos primários	46
Tabela I.4-Taxa de informação aproximada dos canais lógicos secundários.....	46
Tabela I.5-Resumo da forma de onda Híbrida, modo de serviço MP1	49
Tabela I.6-Resumo da forma de onda Híbrida Estendida, modos de serviço MP2, MP3, MP11, MP5 e MP6	51
Tabela I.7-Escalonamento de subportadoras OFDM	53

Tabela II.1-Detalhes da localização dos pontos de medições HD Radio	55
Tabela II.2-Detalhes dos trechos para medições móveis	56
Tabela II.3-Resultados do HD Radio para recepção em pontos fixos.....	57
Tabela II.4-Resultados do áudio FM para recepção em pontos fixos	58
Tabela II.5-Resultados para recepção móvel.	59
 Tabela III.1-Exemplo da metodologia proposta pela iBiquity	 62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do centro de transmissão da Rádio UFMG Educativa	8
Figura 2 – Diagrama de bloco do sistema de transmissão	9
Figura 3 – Visão do transmissor HD Radio (esq.) e o transmissor FM (dir.)	10
Figura 4 – Detalhe da tela do gerador de sinal digital.....	10
Figura 5 – Detalhe do excitador (esq.) e dos amplificadores (dir.).	11
Figura 6 – Visão do mastro (esq.) e detalhe da antena de dois elementos (dir.) da emissora UFMG Educativa utilizada nos testes	11
Figura 7 – (a) Laboratório móvel de telecomunicações do Inmetro e detalhe da antena; (b) equipamentos de medição	12
Figura 8 – Diagrama dos equipamentos de medição.....	13
Figura 9 – Antena de recepção modelo Kathrein	13
Figura 10 – Tela do programa do receptor HD Radio.....	14
Figura 11 – Espectro registrado no ponto de referência.....	15
Figura 12 – Receptores analógicos comerciais NKS (esq) e TOSHIBA (dir)	16
Figura 13 – Receptores digitais comerciais SONY (esq) e JVC (dir).....	16
Figura 14 – Receptor digital profissional HD Radio.....	16
Figura 15 – Rotas radiais (em roxo) acrescidas das rotas circulares (em vermelho) utilizadas nos testes com a Rádio UFMG Educativa	19
Figura 16 – Detalhamento da rotas circulares utilizadas nos testes com a Rádio UFMG Educativa.....	19
Figura 17 – Previsão teórica vs medições de intensidade de campo elétrico analógico	20
Figura 18 – Resultados da recepção em pontos fixos ilustrados no mapa	22
Figura 19 – Altitude do terreno entre transmissor e pontos da rota R2.....	23
Figura 20 – Intensidade de campo digital em função da distância do transmissor.	25
Figura 21 – Intensidade de campo digital versus SNR	26
Figura 22 – Parâmetro Rx_Mode registrado nas medições em mobilidade.....	27
Figura 23 – (a) Mapa da região que inclui a antena transmissora e a rota R1 até o ponto P3; (b) Perfil do terreno do segmento que une a antena transmissora ao R1P3	28
Figura 24 – Registro de medição móvel no trecho R2P2 a R2P3.	29

Figura 25 – Detalhe do registro Rx_Mode dentro do raio de 7 km.....	30
Figura 26 – Áudio SONY das medições fixas.	32
Figura 27 – Áudio JVC das medições fixas.	32
Figura 28 – Avaliação subjetiva do áudio analógico FM da Rádio UFMG Educativa	34
Figura 29 – Recepção estática do áudio analógico no mapa; detalhe para o raio de 7 km (dir) .	35
Figura 30 – Gráfico de notas da avaliação dos áudios analógico e digital.....	37
Figura 31 - Registro do espectro com sinal digital desligado (esq) e ligado (dir).....	38
Figura I.1-Limites de emissão do Modo Híbrido e Híbrido Estendido HD Radio FM.....	44
Figura I.2-Limites de emissão do Modo Todo Digital HD Radio FM.....	45
Figura I.3-Partição de frequência – Ordenação A.....	47
Figura I.4-Partição de frequência – Ordenação B	47
Figura I.5-Mapeamento espectral de subportadoras de referência da banda lateral inferior.....	48
Figura I.6-Mapeamento espectral de subportadoras de referência da banda lateral superior.....	48
Figura I.7-Inserção do sinal digital junto ao sinal FM, Modo Híbrido, modo de serviço MP1 ..	49
Figura I.8-Inserção do sinal digital junto ao sinal FM, modo híbrido estendido	50
Figura I.9-Espectro do Modo Digital Total, modos de serviço MP5 e MP6, MS1 até MS4	52
Figura I.10-Modo Híbrido Estendido.....	54
Figura III.1-Raio para determinação da relação de potência entre os sinais analógico e digital.	60
Figura III.2-Ponto 1: distância ao transmissor de 1060 m	62
Figura III.3-Ponto 2: distância ao transmissor de 1100 m	63
Figura III.4-Ponto 3: distância ao transmissor de 996 m	64
Figura III.5-Ponto 4: distância ao transmissor de 1134 m	65
Figura III.6-Ponto 5: distância ao transmissor de 1150 m	66

Apresentação

O Ministério das Comunicações publicou no Diário Oficial da União o Aviso de Chamamento Público nº 1/2009, em 22 de maio de 2009, com o objetivo de efetuar testes e avaliações com sistemas de radiodifusão sonora digital, visando à futura decisão para a escolha do Padrão de Rádio Digital a ser adotado no País.

A Portaria Nº 290 de 30 de março de 2010, promulgada pelo Ministério das Comunicações, criou o Sistema Brasileiro de Rádio Digital – SBRD, autorizando as emissoras AM e FM a realizarem testes para avaliar o desempenho dos sistemas de radiodifusão digitais e a compatibilidade com os sistemas analógicos existentes.

Posteriormente, em junho de 2011, foi publicado um novo Chamamento Público, Ato de Chamamento Público n.º 01/2011, de 13 de junho de 2011, ampliando assim o prazo para a realização de testes com Rádio Digital.

A empresa iBiquity Digital Corporation, a partir do Chamamento Público, apresentou o sistema de Rádio Digital HD Radio para testes no Brasil. Os testes foram realizados por meio do esforço conjunto e da cooperação entre diversas entidades como o Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e o INCT-CSF (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicações sem Fio), composto pela UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), UFPA (Universidade Federal do Pará), UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte) e CETUC (Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC/Rio), criando uma equipe de trabalho composta por diversos profissionais, sob coordenação do Ministério das Comunicações, por meio da Secretaria de Serviços de Comunicação Eletrônica, e com apoio da Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações).

O presente trabalho relata os testes do sistema HD Radio com a emissora de radiodifusão sonora UFMG Educativa localizada em Contagem, cidade vizinha a Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. A transmissão híbrida da UFMG Educativa foi realizada por um período de doze dias, de 30 de abril a 18 de maio de 2012, tendo sido realizados testes diurnos.

Para a realização dos testes foi instalado um transmissor HD Radio na estação da Rádio UFMG Educativa para a transmissão do sinal digital, constituindo assim um sinal híbrido com o sinal FM analógico, ambos transmitindo a mesma programação.

A realização desses testes foi autorizada pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) por meio do Ato Nº 2535, de 3 de maio de 2012, sob a classificação de Serviço Especial para Fins Científicos ou Experimentais.

Este documento tem como objetivo oferecer a fundamentação técnica de futuros trabalhos para apoio à elaboração de Normas e Regulamentos dos Serviços de Radiodifusão.

Coordenação dos trabalhos

Coordenação-Geral de Avaliação de Outorgas (CGOU) do Departamento de Acompanhamento e Avaliação (DEAA) da Secretaria de Serviços de Comunicação Eletrônica (SCE) do Ministério das Comunicações (MC)

Entidades executantes

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)
Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (CSF)

Equipe de engenheiros e técnicos do Ministério das Comunicações que participaram dos testes

Engenheiros e técnicos do Departamento de Acompanhamento e Avaliação (DEAA)
Engenheiros da Coordenação-Geral de Radiodifusão Comunitária (CGRC) do Departamento de Outorga de Serviços de Comunicação Eletrônica (DEOC), da Secretaria de Serviços de Comunicação Eletrônica (SCE)
Engenheiros da Delegacia Regional do Ministério das Comunicações em Minas Gerais (DRMC-MG)

Equipe de engenheiros e técnicos do Inmetro que participaram dos testes

Augusto Pereira da Soledade
Jaci Rodrigues Nascimento Junior
João Alfredo Cal Braz
Tiago de Pina Almeida
Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos
Winicius Rosa Evangelista

Equipe de engenheiros e técnicos da UFMG

Cláudio Garcia Batista
Judson Porto

Locais dos testes

Contagem – MG

Emissoras envolvidas

Rádio UFMG Educativa – MG

Instituições de Ensino e Pesquisa envolvidas

Universidade de Brasília – UnB
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Universidade Federal do Pará – UFPA
Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC / Rio

Entidades internacionais parceiras

iBiquity Digital Corporation



Responsáveis pela Análise dos Dados

Flávio Ferreira Lima, PhD (Ministério das Comunicações): Doutor em Radiodifusão Digital, Propagação, Eletromagnetismo, Processamento de Sinais e Sistemas de Telecomunicações.

Cássio Gonçalves do Rego, PhD (UFMG): Doutor em Eletromagnetismo Aplicado.

Ronaldo de Andrade Martins, PhD (UFRN): Doutor em Propagação, Eletromagnetismo e Comunicações Móveis.

Luiz A. R. da Silva Mello, PhD (CETUC/PUC-Rio): Doutor em Sistemas de Telecomunicações

Rodolfo Saboia Lima de Souza, PhD (Inmetro): Doutor em Sistemas de Comunicações

Cláudio Garcia Batista, MSc (UFMG): Mestre em Sistemas de Telecomunicações, doutorando em Sistemas de Telecomunicações

Marta Pudwell Chaves de Almeida, PhD (Inmetro): Doutora em Eletromagnetismo Aplicado.

Rodrigo Pereira David, MSc (Inmetro): Mestre em Sistemas de Telecomunicações, doutorando em Sistemas de Comunicações

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, PhD (Inmetro): Doutor em Eletromagnetismo Aplicado.

João Alfredo Cal Braz, MSc (Inmetro): Mestre em Sistemas de Telecomunicações, doutorando em Sistemas de Comunicações

Sumário Executivo

Neste documento são apresentados os resultados dos testes feitos com a emissora de Rádio UFMG Educativa, localizada em Contagem, região metropolitana de Belo Horizonte/MG, durante o período diurno, com a tecnologia HD Radio na faixa de frequência em VHF na banda II (banda FM). O objetivo dos testes era avaliar a área de cobertura do sinal digital comparada à cobertura do sinal analógico, bem como a robustez do sistema em diversos ambientes, de forma a verificar o funcionamento do mesmo diante da realidade brasileira.

Os testes foram conduzidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) com a colaboração da emissora Rádio UFMG Educativa, resultado da parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Empresa Brasileira de Comunicação (EBC), a empresa *iBiquity Digital Corporation* com o apoio da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), e a supervisão do Ministério das Comunicações (MC).

O sistema de transmissão estava localizado na cidade de Contagem (MG), em uma pequena colina a aproximadamente 70 metros em relação ao nível médio do terreno da cidade de Belo Horizonte. O sinal digital HD Radio foi transmitido no modo híbrido combinado com o sinal analógico, com separação de 163,8 kHz entre a portadora do sinal analógico FM e as portadoras do sinal digital HD Radio nas sub-bandas laterais inferior e superior. A potência utilizada no transmissor para o sinal analógico foi de 1,8 kW e, para o sinal digital, de 125,775 W. O sistema HD Radio foi acoplado na mesma antena de transmissão do sistema FM. A Potência Isotrópica Efetivamente Irradiada (EIRP) do sinal analógico foi de 1,68 kW e a do sinal digital, de 0,0168 kW. Assim, a relação de proteção (relação de potência EIRP entre os sinais analógico e digital) foi de 20 dB. Durante a campanha de medição, dois receptores FM comerciais foram utilizados na análise da recepção analógica, tanto para verificar eventuais impactos na sua recepção devido à introdução do sinal digital, como para auxiliar na verificação da área de cobertura do sinal.

Durante os testes foram realizadas medições nas situações de recepção estática e recepção móvel. As medições percorreram dois tipos de rotas, a saber: rotas radiais, nas quais a viatura afastava-se do ponto de transmissão, e rotas circulares, nas quais a viatura deslocava-se em um mesmo ambiente (urbano, industrial, rural, etc.), evitando se afastar do transmissor. As rotas radiais foram planejadas para avaliar a área de cobertura dos sinais analógico e digital, enquanto que as rotas circulares foram utilizadas para avaliar a recepção em diferentes ambientes.

As medições de intensidade de campo elétrico do sistema analógico são comparadas com valores teóricos para fins de validação. Esse parâmetro teve o comportamento previsto pelo modelo teórico no que tange ao decaimento com a distância. De uma forma geral os valores medidos estiveram inferiores aos valores previstos, em virtude do modelo utilizar o perfil do terreno sem incluir a ocupação urbana e a vegetação, as quais contribuem para a atenuação da intensidade de campo.

O sistema HD Radio utiliza o mecanismo denominado *blend* que faz a comutação automática entre os sinais digital e analógico quando há falha na recepção do sinal digital. Considerando que o processamento digital insere um atraso no sinal transmitido, o áudio digital naturalmente fica defasado em relação ao analógico, com atraso correspondente ao tempo de processamento. Sendo assim, na transição do sinal digital para o analógico, e vice-versa, essa diferença é notada pelo ouvinte, podendo ser amenizada atrasando-se o sinal analógico em relação ao digital no transmissor.



Durante as medições em mobilidade, o áudio gravado com o receptor profissional permitiu observar o funcionamento do mecanismo *blend*. Como no centro de transmissão não houve nenhum processo de atraso do áudio analógico em relação ao digital, ficou claro durante a campanha de medição que os áudios na recepção têm uma diferença de aproximadamente 8 segundos, com o áudio analógico sempre adiantado em relação ao digital.

Para o ouvinte, quando o *blend* se inicia, a percepção é de que houve perda de parte da informação. No retorno do sinal digital (final do *blend*), o ouvinte percebe a repetição de um trecho de 8 segundos do áudio escutado anteriormente no formato analógico. Portanto, é necessário o tratamento adequado do tempo de atraso do áudio digital em relação ao analógico no centro de transmissão para que o efeito do *blend* não acarrete desconforto para o ouvinte.

Na medição estática faz-se o registro da recepção digital em cada local de medição. Com a utilização do receptor profissional, foram realizadas 34 medições em toda região, havendo decodificação do áudio digital em 17 pontos (50%). Foram definidas duas regiões, delimitadas por circunferências com raios de valores 7 e 12 km. Dentro do raio de 7 km a partir do transmissor houve 15 medições, das quais 14 (93%) tiveram a decodificação do áudio digital. Já na região compreendida pelo círculo com raio de 12 km houve 30 medições, sendo 17 (57%) com decodificação do áudio digital.

Os resultados da recepção estática do sinal digital com o receptor profissional indicam que a recepção do sinal digital é praticamente uniforme dentro de um raio de 7 km. A partir dessa distância nota-se a não decodificação do sinal digital nas direções noroeste, nordeste e sudoeste (em relação ao local da emissora). Houve três pontos com alternância de recepção digital e analógica, localizados próximo do centro de Belo Horizonte. Na direção sul, a recepção de sinal digital estendeu-se até 12 km. Atribui-se isso ao fato de, nesta direção, a rota de medição percorrer uma região de subida e, portanto o sinal sofre menos atenuação causada pelos obstáculos naturais.

O limiar de intensidade de campo elétrico digital para boa recepção digital em medições estáticas com receptor profissional foi de aproximadamente 43 dB μ V/m. Cabe salientar que este limiar é válido apenas quando o limiar de relação sinal-ruído (SNR) para a decodificação do sinal HD Radio é respeitado. No teste em questão, o menor valor de SNR medido para boa recepção foi de 9,3 dB. Abaixo de 1,4 dB não foi possível realizar a decodificação do sinal digital. No intervalo de 1,4 a 9,3 dB foram registrados três pontos de medição (nominalmente, com valores de SNR iguais a 2,3, 2,6 e 8,7 dB) nos quais houve alternância da recepção digital com a analógica. Desta forma, não houve a possibilidade de definir com mais precisão um limiar mínimo de SNR para a recepção estática com o sistema HD Radio.

Na avaliação do áudio digital em medições estáticas com receptores comerciais foram usados um receptor de mesa da marca SONY e um receptor automotivo JVC, que possuem mecanismo de *blend*. Utilizando-se o critério de ocorrência ou não de *blends* no áudio gravado durante medições estáticas, obteve-se dentro do raio de 7 km recepção digital em 93% dos locais com o receptor JVC e 87% com o receptor SONY. Dentro do raio de 12 km, 60% dos locais com recepção digital para o JVC e 57% com o SONY. Em relação ao limiar de intensidade de campo elétrico para recepção digital com receptores SONY e JVC, para ambos os modelos o valor é de aproximadamente 42 dB μ V/m, respeitando-se o limiar necessário de SNR do sistema HD Radio para recepção.

A recepção do áudio analógico foi avaliada por meio de medições estáticas realizadas com dois receptores comerciais, um da marca NKS e outro da marca TOSHIBA, utilizando-se a classificação de qualidade de recepção como “Recepção Boa” (áudio com presença de ruído, desde imperceptível a leve), “Recepção Pobre” (presença de ruído ao ponto da informação tornar-se ininteligível) e “Recepção Ruim” (somente ruído). Dentro do raio de 7 km em relação ao transmissor obtiveram-se 12 pontos (80%) com “Recepção Boa” e 3 pontos (20%) com “Recepção Pobre”. Quando se considera a região dentro do raio de 12 km, obteve-se 16 pontos (55%) com “Recepção Boa”, 5 pontos (17%) com “Recepção Pobre” e 8 pontos (28%) com “Recepção Ruim”. Então, constata-se que até a distância de 7 km em relação ao transmissor, a recepção analógica é predominantemente boa. Para distâncias superiores a 7 km, não foi verificada tendência na avaliação, tendo ocorrido os três tipos de recepção. Sobre as rotas radiais R2 (sul) e R4 (noroeste) houve recepção analógica boa até 12 km. O limiar de intensidade de campo elétrico do sistema analógico obtido para uma boa recepção de áudio ficou compreendido no intervalo entre 60 e 64 dB μ V/m. Este valor está próximo do valor de 66 dB μ V/m definido no regulamento técnico brasileiro para áreas urbanas.

Comparando as recepções dos sinais analógico e digital, verificou-se por meio dos testes que a decodificação do áudio digital ocorreu em 17 (dezesete) pontos e a recepção do sinal analógico com “Recepção Boa” também ocorreu em 17 (dezesete) pontos, porém não necessariamente os mesmos pontos. Dentro do raio de 7 km houve mais pontos com decodificação do sinal digital do que com o áudio analógico com qualidade de recepção boa, caracterizando bom desempenho do sistema digital nessa região. Após 7 km e até a distância aproximada de 20 km, houve atendimento similar dos dois sistemas, quando comparada a recepção digital à recepção analógica com qualidade de “Recepção Boa”, de onde se conclui que a cobertura do HD Radio é similar à cobertura do FM nessa área.

A análise do impacto da presença do sinal digital HD Radio sobre o áudio analógico foi realizada com base na avaliação subjetiva dos áudios analógicos. Esses áudios foram obtidos em medições estáticas por meio de receptores comerciais. Os áudios analógicos registrados nas situações com o transmissor digital ligado e desligado foram avaliados. Os valores mostraram que a presença do sinal digital não causou impacto na qualidade do áudio analógico FM.

Nas medições em mobilidade com receptor profissional verifica-se a decodificação do sinal digital, as ocorrências de *blends* (comutação automática entre os sinais digital e analógico) e a estimativa da área de cobertura digital em cada uma das rotas, as quais sendo essas divididas em trechos entre pontos fixos. Avaliando as 4 (quatro) rotas radiais, verifica-se que, nos trechos mais próximos do transmissor (trechos P1 a P2 de cada rota), cuja distância máxima varia de 6 a 8 km, ocorreram as maiores percentagens de tempo em que houve decodificação do sinal digital, variando de 65,4% a 99,6% do tempo, a depender da rota. Nos trechos intermediários (trecho P2 a P3), cuja distância máxima é de 11 a 12 km em relação ao transmissor, a percentagem de tempo com efetiva decodificação do áudio digital sofreu grande variação dependendo da rota analisada, desde 0,2% na rota R1 (sudoeste), no trecho localizado na cidade de Contagem, até 83% do tempo, ocorrido na rota R2 (sul), cuja vantagem foi identificada nos resultados de recepção estática como sendo devido ao deslocamento em subida do percurso. No último trecho de cada rota, que atinge distâncias de 16 a 22 km em relação ao transmissor, a percentagem de decodificação do sinal digital foi baixa em todas as rotas radiais.

Então, verificou-se por meio dos testes que a cobertura digital obtida com medições em mobilidade com receptor profissional foi melhor até a distância de 7 km da emissora, sendo que na rota R2, na direção sul, houve recepção digital ainda no trecho entre 7 e 12 km.

Em relação aos resultados em mobilidade sobre as rotas circulares, as rotas C3 a C4, situadas dentro do raio de 7 km do transmissor, tiveram decodificação do sinal digital na maioria dos seus trechos. Já as rotas C1 e C2, situadas além do raio de 7 km nas direções leste e nordeste do transmissor respectivamente, apresentaram decodificação do áudio digital em poucos trechos.

Para a avaliação da recepção móvel com receptores comerciais, a unidade móvel percorreu duas rotas (R2 e R4), com velocidade até 80 km/h, tendo sido observada a estabilidade do áudio digital na recepção, mesmo com variação de velocidade e aceleração do veículo. Verificou-se, como comportamento comum a ambos os receptores, a tendência a número maior de ocorrências de *blends* no trecho final das rotas avaliadas (trechos de P3 a P4), cuja distância ao transmissor ultrapassava 11 km, se comparados ao número de ocorrências no trecho inicial (trechos de P1 a P2).

Concluindo, os resultados dos testes com o sistema HD Radio em Belo Horizonte em transmissão híbrida mostraram que o sistema digital, de uma forma geral, tem área de cobertura similar à do sistema analógico, possuindo um desempenho melhor que o sistema FM no raio de 7 km a partir do transmissor, estando 20 dB abaixo do FM (1% da potência EIRP do sinal analógico).

Rio de Janeiro, 22 de outubro de 2012

Rodolfo Saboia Lima de Souza

Chefe de Divisão de Metrologia em Telecomunicações
Dimci – Ditel
Inmetro



1. Introdução

Este documento apresenta o resultado dos testes realizados na região metropolitana de Belo Horizonte/MG, em Contagem, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema HD Radio de radiodifusão sonora digital [1] [2] para aplicação nas faixas de frequências de radiodifusão em frequência modulada.

Os testes foram realizados em conjunto com a emissora de radiodifusão sonora em frequência modulada em VHF banda II (usualmente conhecida como banda de FM), Rádio UFMG Educativa.

A estrutura do documento é definida da maneira detalhada a seguir. O Capítulo 2 descreve o sistema de transmissão instalado na emissora UFMG Educativa para irradiar os sinais digital e analógico durante os testes. O Capítulo 3 descreve a unidade móvel, os equipamentos e a metodologia de medições utilizados para caracterizar o sinal recebido. O Capítulo 4 relata os resultados dos testes, apresentando a comparação entre a intensidade de campo prevista e a obtida nas medições, a avaliação da cobertura de sinal digital com receptor profissional e com receptores comerciais, os resultados da recepção analógica FM e a comparação entre resultados da recepção dos áudios analógico e digital. No Apêndice é apresentado o histórico e uma visão geral das características técnicas do sistema HD Radio, os detalhes das medições e os seus respectivos resultados, a descrição do procedimento para obtenção da intensidade do campo elétrico digital e um exemplo do arquivo de medições do receptor profissional HD Radio.

2. Sistema de Transmissão

2.1. Características Técnicas do Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão da Rádio UFMG Educativa está localizado na cidade de Contagem/MG, dentro da região metropolitana de Belo Horizonte/MG, em uma pequena colina a aproximadamente 70 m de altitude em relação ao nível médio do terreno. A Figura 1 ilustra a localização do centro de transmissão.



Figura 1 – Localização do centro de transmissão da Rádio UFMG Educativa

A configuração do centro de transmissão instalada para esse teste é denominada de Combinação em Alto Nível, em virtude dos sinais FM analógico e HD Radio já estarem em alta potência no instante da combinação entre ambos, sendo realizada através de um combinador, conforme ilustra a Figura 2. Nessa configuração, 90% da potência do sinal digital e 10% da potência do sinal analógico fornecidas pelos respectivos transmissores são perdidas no processo de combinação dos sinais digital e analógico, sendo encaminhadas para uma carga fantasma, que as transformando em calor. Assim, ambos os sinais utilizam a mesma antena de transmissão, bem como os mesmos guias de onda. O diagrama de bloco do sistema de transmissão é mostrado na Figura 2 e os principais componentes do sistema de transmissão são descritos na Tabela 1.

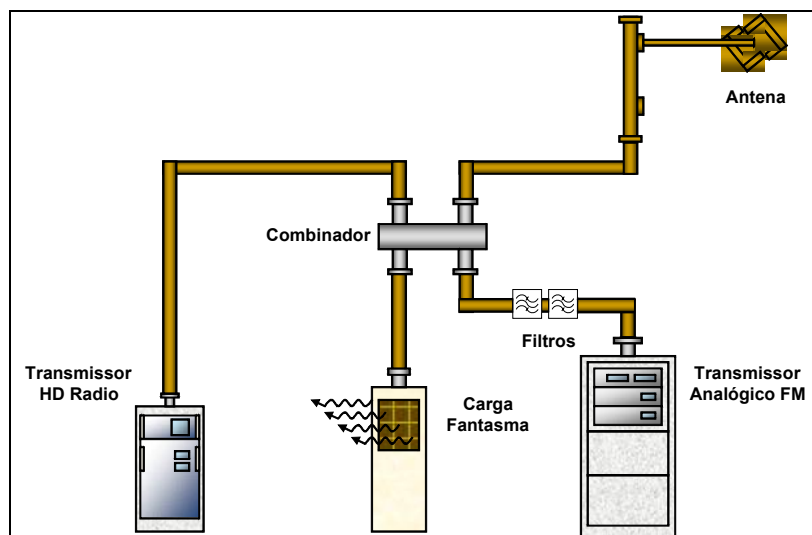


Figura 2 – Diagrama de bloco do sistema de transmissão

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE OPERAÇÃO DA EMISSORA	
ANALÓGICO	DIGITAL
FREQUÊNCIA: 104,5 MHz CLASSE: A1 CANAL: 283E	FREQUÊNCIA: 104,5 MHz
LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO TRANSMISSORA	
CIDADE / ESTADO: Contagem / MG COORDENADAS GEOGRÁFICAS: 19° 55' 11" S, 44° 01' 48" W	
TRANSMISSOR	
FABRICANTE: LYS Electronic LTDA MODELO: LT-2, 5kW-FM POTÊNCIA NOMINAL: 2,5 kW POTÊNCIA UTILIZADA DURANTE OS TESTES: 1,8 kW	FABRICANTE: Harris Broadcasting Communications MODELO: FAX10K POTÊNCIA NOMINAL DIGITAL: 0,3 k W a 3,4 kW POTÊNCIA UTILIZADA DURANTE OS TESTES: 125,775 Watts
ANTENA	
FABRICANTE: TRANSTEL MODELO: TTFM3A-2 (2 elementos) POLARIZAÇÃO: Circular DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO: omnidirecional GANHO: 0,02 dBd ALTURA DA ANTENA EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO SOLO: 25 m POTÊNCIA MÁXIMA: 5 kW AZIMUTE: 120° NV	FABRICANTE: TRANSTEL MODELO: TTFM3A-2 (2 elementos) POLARIZAÇÃO: Circular DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO: omnidirecional GANHO: 0,02 dBd ALTURA DA ANTENA EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO SOLO: 25 m POTÊNCIA MÁXIMA: 5 kW AZIMUTE: 120° NV
LINHA DE TRANSMISSÃO	
FABRICANTE: Andrew Antenas - Helix MODELO: LDF5-50A 7/8" COMPRIMENTO: 45 m IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA: 50 Ohms ATENUAÇÃO DA LINHA: 1,2 dB/100m	FABRICANTE: Andrew Antenas - Helix MODELO: LDF5-50A 7/8" COMPRIMENTO: 45 m IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA: 50 Ohms ATENUAÇÃO DA LINHA: 1,2 dB/100m

AT. DOS ACESSÓRIOS (CONECTORES E FILTROS, ETC): 1,5 dB	AT. DOS ACESSÓRIOS (CONECTORES E FILTROS, ETC): 1,5 dB
POTÊNCIA IRRADIADA	
EIRP: 1680 W ERP: 1019 W	EIRP: 16,8 W ERP: 10,19 W
RELAÇÃO ENTRE OS SINAIS DIGITAL E ANALÓGICO	
RELAÇÃO DE PROTEÇÃO NO AR (FM ERP / HD Radio ERP): 20 dB	

Tabela 1 – Características técnicas da emissora UFMG Educativa e transmissões analógica e digital.

O sinal HD Radio ocupa as bandas laterais superior e inferior em relação ao sinal analógico. A frequência central das sub-bandas possui espaçamento de canal de $\pm 163,89$ kHz da frequência central FM, sendo que cada sub-banda ocupa uma largura de canal adjacente de 69,041 kHz.

A relação de proteção entre as potências utilizadas na saída das antenas, EIRP, foi de 20 dB, conforme Tabela 1.

O transmissor utilizado para o teste do sinal digital é fabricado pela Harris Broadcasting Communications. Nesse equipamento os áudios são codificados e os parâmetros de transmissão são programados. O equipamento é mostrado na Figura 3 até a Figura 5.



Figura 3 – Visão do transmissor HD Radio (esq.) e o transmissor FM (dir.)



Figura 4 – Detalhe da tela do gerador de sinal digital.



Figura 5 – Detalhe do excitador (esq.) e dos amplificadores (dir.).

A Figura 6 mostra a torre com o sistema irradiante e o detalhe da antena instalada.



Figura 6 – Visão do mastro (esq.) e detalhe da antena de dois elementos (dir.) da emissora UFMG Educativa utilizada nos testes

2.2. Parâmetros de transmissão

O sistema HD Radio oferece três configurações para transmissão do sinal digital [19] [20], apresentadas no item I do Apêndice desta Nota Técnica. Os testes descritos neste documento foram realizados com o modo híbrido, com a configuração apresentada na Tabela 2.

Ocupação Espectral	Modo de Serviço	Canais Disponíveis	Modulação	Taxa de transmissão	Taxa de Codificação
Híbrido	MP1	MPS	64 QAM	98 kbps	2/5

Tabela 2 – Modo de transmissão do IBOC utilizado durante os testes

3. Equipamentos e Metodologia de Medição

3.1. Equipamentos de Medição

As medições do sistema IBOC foram realizadas com o laboratório móvel de telecomunicações do Inmetro, um veículo totalmente preparado e configurado para execução de trabalhos em campo, conforme Figura 7. A estrutura disponível para o laboratório móvel conta com o compartilhamento dos equipamentos e recursos do laboratório de comunicações sem fio do Inmetro, ampliando as possibilidades de configurações de medição do veículo. Esse laboratório possui facilidade de adaptação de novos equipamentos e conjuntos de antenas para realizar todos os tipos de experimentos em diferentes sistemas de comunicações e frequências.



(a)



(b)

Figura 7 – (a) Laboratório móvel de telecomunicações do Inmetro e detalhe da antena; (b) equipamentos de medição

A Figura 7 apresenta a disposição dos equipamentos de medição no interior do laboratório móvel. Os dois equipamentos principais de medição são o receptor profissional HD Radio e o analisador de espectro. O equipamento profissional para coleta dos dados nas medições consiste no software *HD Prospector Field Test System*, instalado no laptop, e no receptor profissional de áudio digital HD Radio.

Na Figura 8 o primeiro bloco apresenta todos os equipamentos utilizados nas medições em campo que coletam dados que são avaliados objetivamente, e o segundo bloco apresenta

equipamentos preparados para gravação de áudio de receptores analógicos e digitais, que geram dados que são avaliados subjetivamente.

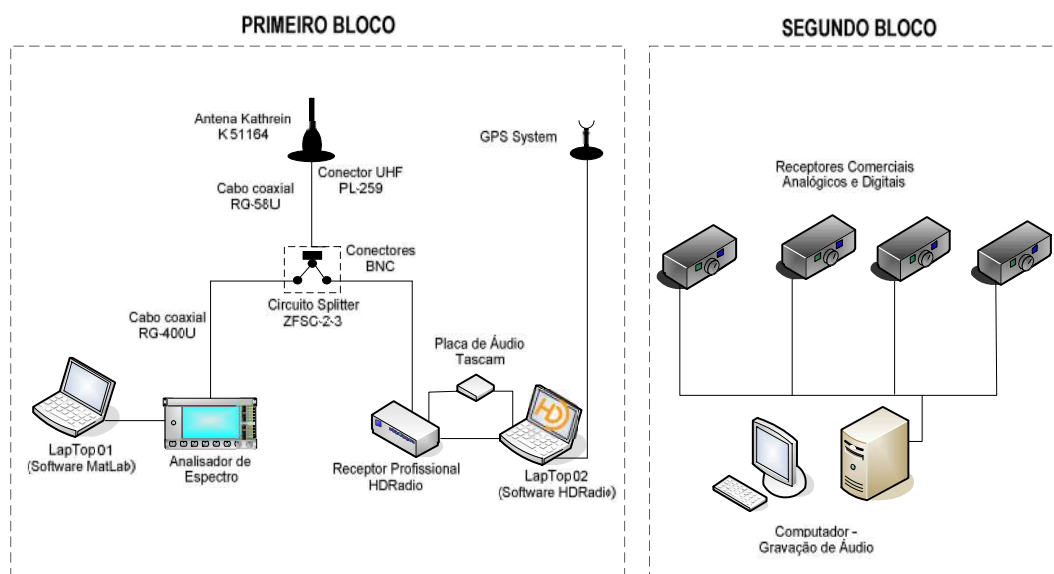


Figura 8 – Diagrama dos equipamentos de medição

No primeiro bloco, o analisador de espectro e o receptor HD Radio foram conectados à antena Kathrein (Figura 9), por meio de um divisor de potência, permitindo que o sistema realizasse simultaneamente as medições de recepção de sinal (com o receptor HD Radio) e de intensidade do sinal (com o analisador de espectro). Cada um desses equipamentos tem um laptop dedicado. Na Tabela 3 são apresentadas as características técnicas dos equipamentos utilizados.



Figura 9 – Antena de recepção modelo Kathrein

Dispositivo / Equipamento	Descrição
Antena	Kathrein K51164 Magnet-Haftantenne Tipo monopolo, 58-300 MHz, Ganho 0dB, comprimento 1380mm Fator K=7,708 dBm-1(50 Ω) @95,7MHz
Divisor	Mini Circuits Model ZFSC-2-4+ Perda 3,31 dB@1 MHz & 100 MHz
Cabo da antena para divisor	Tipo RG58U Perda 0.01dB/m@ 1MHz Comprimento 4 m
Cabo do divisor para analisador	Tipo RG-400U Perda 0.01dB/m@1MHz Comprimento 1 m

Cabo do divisor para receptor HD Radio	Tipo RG-400U Perda 0.012dB/m@1MHz Comprimento 1.3 m
Analizador de espectro	ANRITSU MS2724B (9 kHz-20GHz)
GPS	Garmin GPS-18X
Laptops	Laptop com Matlab para analisador de espectro Laptop para receptor HD Radio
Desktop	Computador de mesa com software para gravação de áudio
Acessórios	Cabos seriais

Tabela 3 – Características técnicas dos dispositivos e equipamentos de medição

O receptor profissional HD Radio contempla diversos parâmetros oriundos da configuração do modo de operação, seja da transmissão ou da recepção do sinal. A Figura 10 ilustra a tela do software do receptor profissional, onde são apresentados os parâmetros de operação e seus valores instantâneos. Os principais parâmetros são descritos na Tabela 4.

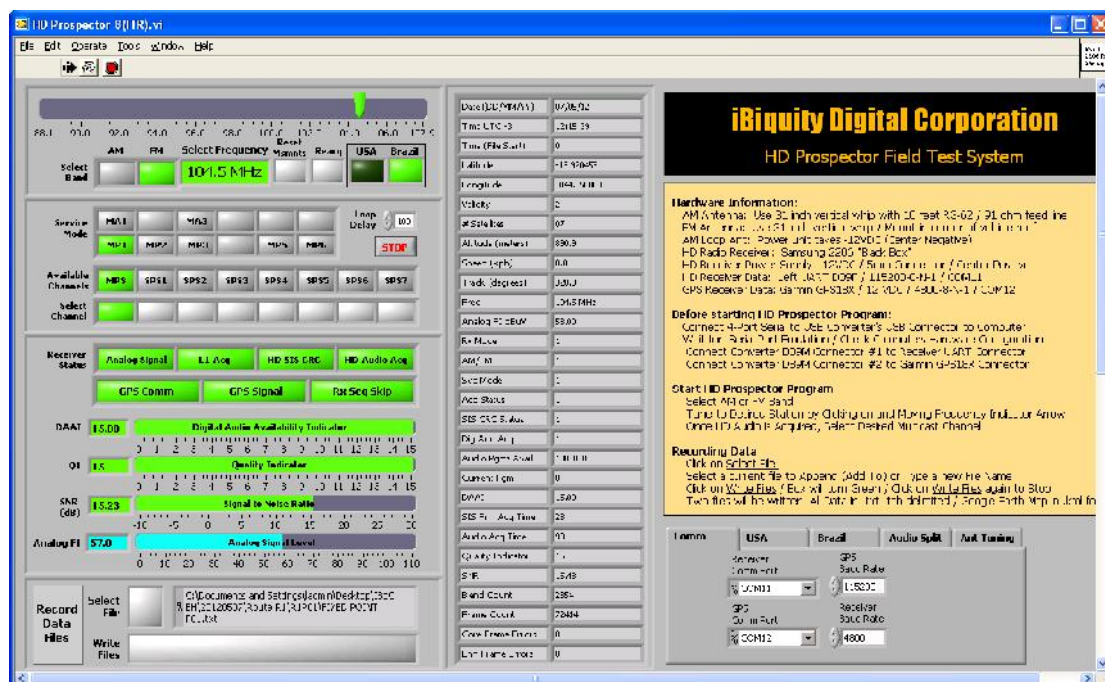


Figura 10 – Tela do programa do receptor HD Radio

Parâmetro	Descrição
Rx_Mode	Indica status de recepção: 0 = não decodifica áudio digital Para modo de serviço MPS (<i>Main Program Service</i>) indica que receptor fez <i>blend</i> para analógico e no modo SPS (<i>Supplemental Program Service</i>) o receptor fica mudo 1 = decodifica áudio digital em FM
Svc Mode	1 indica Modo Híbrido MP1. Apenas a partições de portadoras primárias (± 129 a 199 kHz da portadora) são transmitidas. Vazão de dados (<i>Throughput</i>) de 98 kbps 2 indica Modo Híbrido MP2. Apenas a partições de portadoras primárias mais duas partições estendidas são transmitidas. Vazão de dados (<i>Throughput</i>) de 98 kbps + 12 kbps 3 indica Modo Híbrido MP3. Apenas a partições de portadoras primárias mais duas partições estendidas são transmitidas. Vazão de dados (<i>Throughput</i>) de 98 kbps + 24 kbps 5 e 6 indicam Modo Digital Total MP5 e MP6.
AM/FM	0 indica AM, 1 indica FM

comerciais com o intuito de avaliar a recepção analógica. São eles os modelos de rádio portátil NKS AC122 FM/AM/OC 12 Faixas Digital Bivolt e TOSHIBA TR449SP Bivolt, Figura 12. O áudio digital HD Radio foi gravado com os receptores comerciais JVC KW-NT30HD (receptor automotivo) e SONY XDR-S3HD (receptor de mesa), Figura 13, havendo também a gravação com o receptor digital profissional HD Radio, conforme Figura 14.



Figura 12 – Receptores analógicos comerciais NKS (esq) e TOSHIBA (dir)



Figura 13 – Receptores digitais comerciais SONY (esq) e JVC (dir)



Figura 14 – Receptor digital profissional HD Radio

3.2. Parâmetros de Medição

Os equipamentos e o sistema de medição fornecem uma ampla gama de parâmetros registrados durante os testes. A Tabela 5 mostra os parâmetros obtidos durante os testes e que serão utilizados na avaliação. Eles são divididos em três tipos: parâmetros que fornecem informações de radiofrequência (RF) e propagação do canal, parâmetros de banda básica e parâmetros auxiliares que ajudam na compreensão das causas e efeitos dos diferentes problemas de recepção.

Parâmetros	Tipos	Equipamentos	Intervalo de Medição
SNR	RF e canal de propagação	Receptor profissional HD Radio	100 ms
Intensidade de campo elétrico analógico	RF e canal de propagação		100 ms
Rx_Mode	Banda Básica		100 ms
QI (<i>Quality Indicator</i>)	Banda Básica		100 ms
Intensidade de campos elétricos digital e analógico	RF e canal de propagação	Analizador de Espectro	Medição Estática e Dinâmica
Localização	Auxiliar	GPS	1 s
Tempo	Auxiliar		1 s
Velocidade	Auxiliar		1 s
Gravação do áudio FM	Banda Básica	Receptores analógicos comerciais FM	Medição Estática
Gravação do áudio HD Radio	Banda Básica	Receptor profissional e receptores digitais comerciais HD Radio	Medição Estática e Dinâmica
Eventos (Registros de ocorrências)	Auxiliar	Equipe	Cada evento e Caracterização do ambiente
Fotos	Auxiliar	Equipe	Medição Estática

Tabela 5 – Parâmetros de Avaliação

Dentre todos os parâmetros, os três mais importantes são: as intensidades dos campos elétricos digital e analógico obtidas por meio do analisador de espectro juntamente com o software *HD Prospector Field Test System*, o SNR e o parâmetro Rx_Mode (que define quando ocorre a decodificação do sinal digital).

Os espectros gravados permitem estudos sobre interferência e ruído, bem como cálculos de potência e intensidade de campo dos sinais.

O GPS fornece informações a respeito da posição e do tempo de cada amostra coletada. Assim, é possível plotar os dados em mapas, identificando os ambientes de recepção e possíveis localizações de fontes interferentes, como por exemplo, outras estações, bem como analisar as medidas em função da distância em relação ao transmissor.

Os áudios FM gravados são utilizados para avaliar subjetivamente a qualidade da recepção do sinal analógico.

Os eventos e as fotos coletados pela equipe em campo ajudam a encontrar as causas dos problemas na recepção e os efeitos que elas causam no sinal e na qualidade do áudio.

3.3. Metodologia de Medição

A campanha de testes foi realizada com a unidade móvel do Inmetro, realizando medições estáticas e móveis em dois tipos de rotas, radiais e circulares, conforme recomendado pela Anatel [26]. A primeira medição diária era realizada no ponto de referência para determinar se os parâmetros de transmissão estavam corretos mediante comparação com os dados coletados no dia da caracterização da van naquele ponto. Também era verificado se o equipamento de recepção estava com funcionamento adequado.

As atividades realizadas durante as medições nos pontos fixos são apresentadas a seguir.

- Captura do espectro do sinal *simulcast*.
- Captura dos dados do sinal digital HD Radio com o receptor profissional, por um período de 5 minutos.
- Gravação do áudio digital com receptor profissional, por um período de 5 minutos.
- Gravação do áudio digital com receptores comerciais, por um período de 2 minutos.
- Gravação do áudio analógico FM com receptores comerciais, por um período de 2 minutos.
- Captura de fotografias do ambiente, considerando o ponto cardeal norte como referência.
- Caracterização do ambiente, por meio de software.
- Gravação dos eventos ocorridos durante a medição, por meio de software (registro de ocorrências).

Com a viatura em movimento, as seguintes atividades foram realizadas.

- Captura do espectro do sinal *simulcast*.
- Captura dos dados do sinal digital HD Radio com receptor profissional durante toda a rota.
- Gravação do áudio digital com receptor profissional
- Gravação do áudio digital com receptores comerciais
- Gravação dos eventos ocorridos durante a rota, por meio de software (registro de ocorrências).

3.4. Planejamento das Rotas

As rotas radiais planejadas para os testes do sistema HD Radio foram escolhidas em função da orientação azimutal e atingem cerca de 20 km em relação ao transmissor da Rádio UFMG Educativa. As rotas circulares foram definidas em diferentes ambientes da cidade, os quais são classificados conforme a Recomendação ITU-R 1411 [28]. A Tabela 6 descreve as rotas realizadas, podendo as mesmas serem visualizadas na Figura 15, rotas radiais e circulares, e na Figura 16, os detalhes das rotas circulares. As localizações dos pontos fixos de medição ao longo das rotas estão detalhadas no item II do Apêndice deste documento.

Rota	Descrição
Rota Radial R1	Direção Sudoeste
Rota Radial R2	Direção Sul
Rota Radial R3	Direção Nordeste
Rota Radial R4	Direção Noroeste
Rota Circular C1	Rota Urbana (Bairro Savassi)
Rota Circular C2	Rota Urbana (Campus da UFMG)
Rota Circular C3	Rota Urbana
Rota Circular C4	Rota Urbana (área industrial)

Tabela 6 – Descrição das rotas

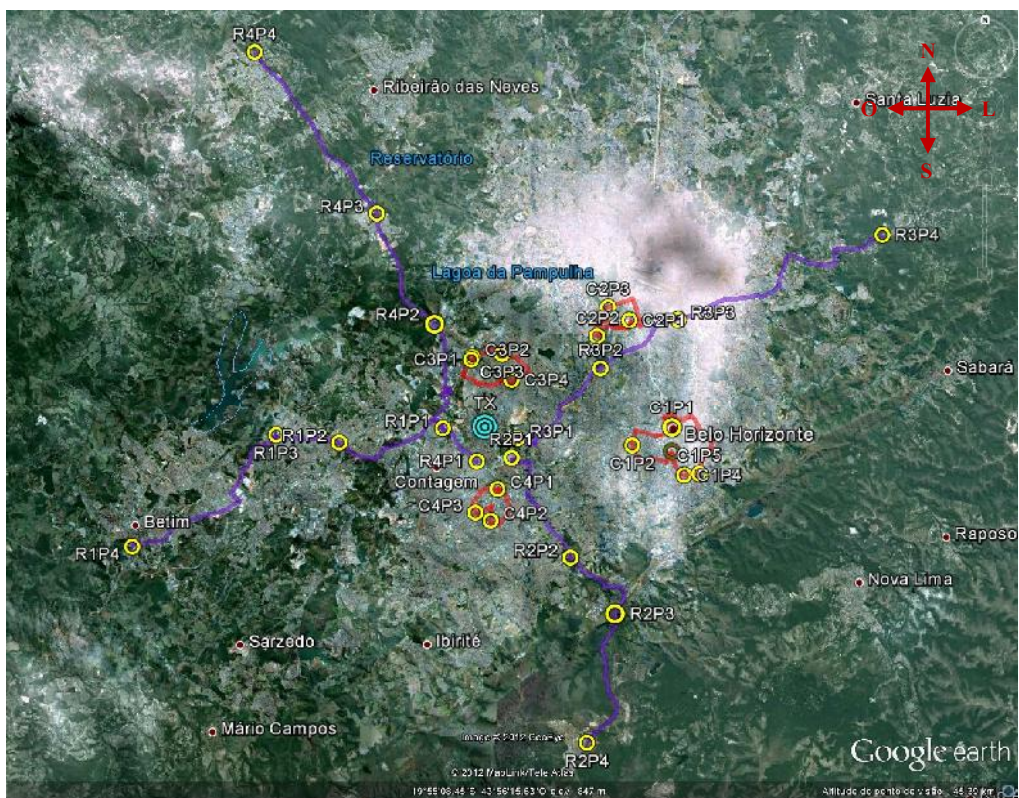


Figura 15 – Rotas radiais (em roxo) acrescidas das rotas circulares (em vermelho) utilizadas nos testes com a Rádio UFMG Educativa

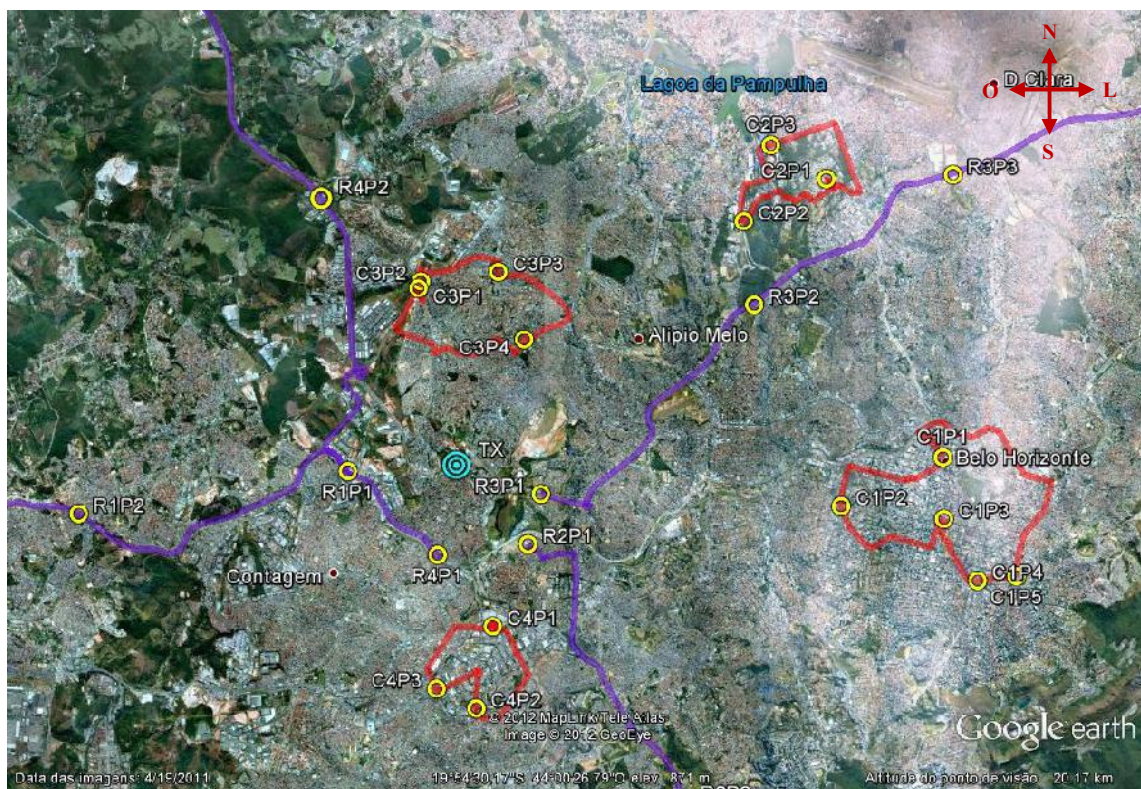


Figura 16 – Detalhamento da rotas circulares utilizadas nos testes com a Rádio UFMG Educativa

4. Resultados dos Testes

Com base nos dados coletados, foram realizadas as seguintes análises: comparação de medições de intensidade de campo elétrico do sinal analógico com valores teóricos e definição das áreas de cobertura dos sinais analógico e digital para recepções estática e móvel, em função dos limiares de recepção da intensidade de campo elétrico e do valor da SNR.

A recepção analógica FM foi estudada, da mesma maneira que a do sinal digital HD Radio, exceto para recepção móvel. Assim, dois estudos foram realizados: recepção estática e limiares de recepção.

4.1. Comparação da intensidade de campo elétrico do sinal analógico medida com a previsão teórica

A intensidade de campo elétrico analógico medida é comparada com a previsão teórica para fins de verificação dos valores registrados durante os testes. A intensidade de campo teórica é obtida com o Sistema de Informações da Anatel (SIGAnatel) [25], ferramenta que possui um banco de dados geográficos do Brasil que, entre vários recursos, permite analisar a cobertura do sinal de uma estação de rádio e/ou TV, analisar a propagação em um enlace ponto-a-ponto e gerar o perfil de terreno. O modelo de previsão usa como dado de entrada o perfil do terreno entre o local do transmissor e o ponto de interesse, além da potência transmitida (EIRP), para cálculo da intensidade de campo recebida, empregando a atenuação de espaço livre e a difração causada pelos obstáculos existentes no perfil de terreno.

A Figura 17 apresenta a intensidade de campo elétrico do sinal analógico medida e os valores teóricos calculados, bem como a previsão de espaço livre. A curva da intensidade de campo considerando somente a atenuação de espaço livre é utilizada como referência. A diferença desta curva para os pontos teóricos deve-se ao perfil do terreno que é considerado no modelo de previsão utilizado no SIGAnatel. Os valores medidos estão inferiores aos teóricos porque o modelo de previsão utiliza o perfil do terreno sem incluir a ocupação urbana, por isso o gráfico da Figura 17 mostra que em vários pontos de medição existe alguma discrepância entre valores teóricos e medidos. No entanto, observa-se que os dois conjuntos de pontos possuem decaimento similar com a distância, como esperado.

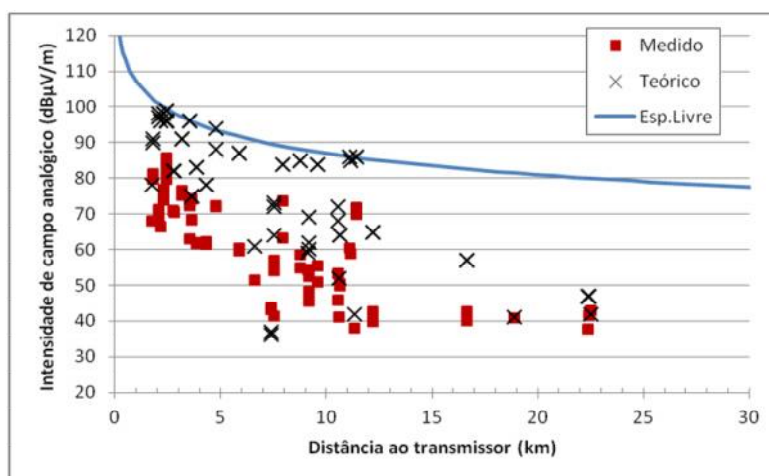


Figura 17 – Previsão teórica vs medições de intensidade de campo elétrico analógico

Com a digitalização do serviço de rádio faz-se necessário utilizar um modelo de previsão mais eficiente devido à variabilidade do sinal recebido. Ressalta-se a necessidade da proposição de um novo modelo para ser usado na faixa de frequência FM, uma vez que no sistema digital a grande diferença entre a previsão e o sinal medido (por exemplo, 20 dB em algumas distâncias no gráfico) pode impactar o planejamento do sistema introduzindo erro no cálculo da cobertura, comprometendo o atendimento do serviço proposto.

4.2. Avaliação da área de cobertura do sinal digital com receptor profissional

4.2.1. Avaliação da área de cobertura do sinal digital com recepção estática

Na medição estática faz-se o registro da recepção digital em cada local de medição. Os resultados são apresentados com o parâmetro Rx_Mode de cada quadro de áudio recebido, que indica a decodificação do áudio digital (Rx_Mode=1) ou a não decodificação (Rx_Mode=0). Nas medições estáticas realizadas com o receptor profissional ocorreu alternância entre a recepção digital e a analógica (*blend*) durante o tempo de registro em alguns pontos.

Uma visão global dos resultados pode ser observada na Figura 18. Os pontos em verde representam uma recepção digital estável, ou seja, Rx_Mode=1 durante todo o intervalo de medição em cada ponto, sem ocorrência de *blends*, os pontos em vermelho indicam a ausência de recepção digital, ou seja, Rx_Mode=0 durante todo o intervalo de medição em cada ponto, e os pontos em amarelo representam as ocasiões em que a recepção digital ocorreu com intermitência, indicando que o sinal digital recebido não possui qualidade suficiente para possibilitar que a recepção pudesse ser feita na integralidade do tempo. Esse fato leva o sistema a efetuar *blends* para evitar a ocorrência de períodos com ausência de áudio tendo assim uma alternância de recepção digital com recepção analógica durante o tempo de registro da medida (valores de Rx_Mode=1 ou 0).

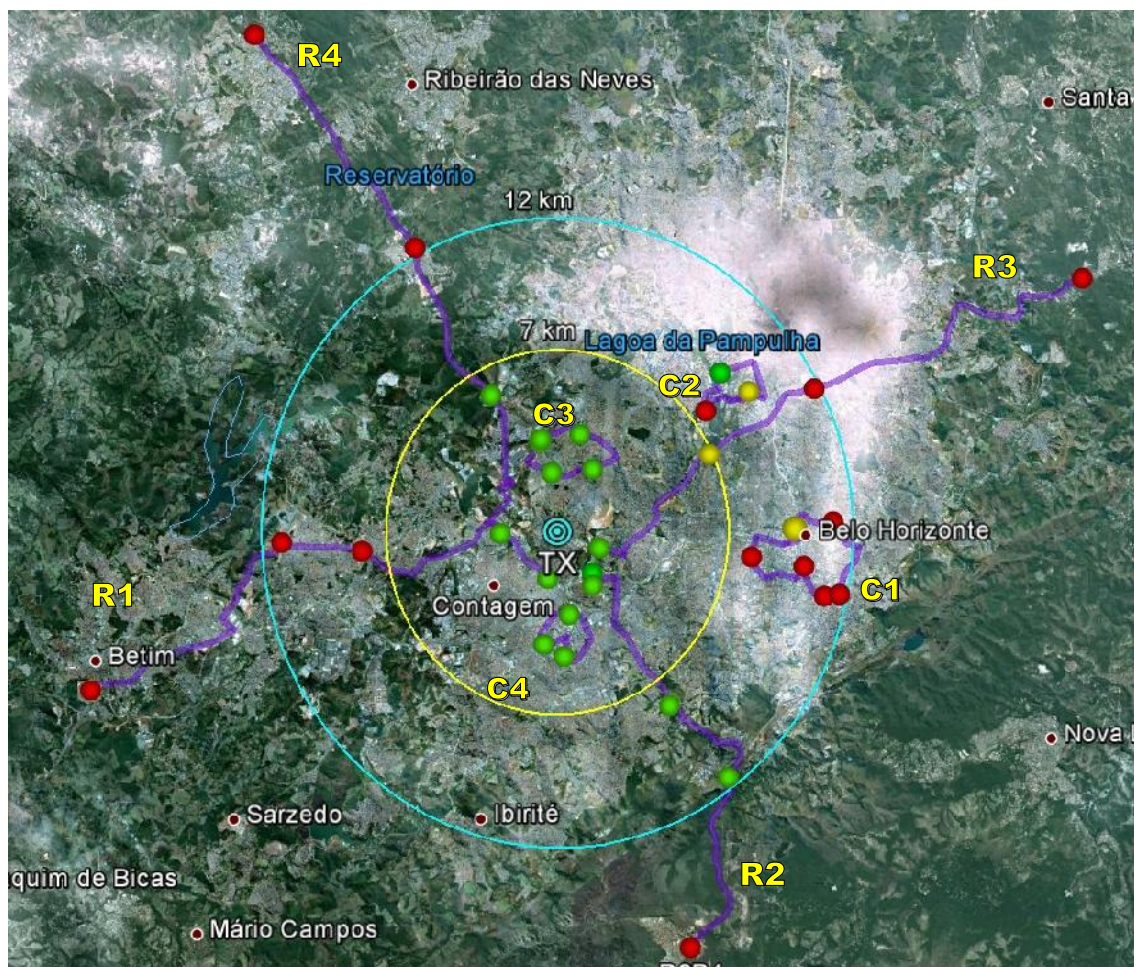


Figura 18 – Resultados da recepção em pontos fixos ilustrados no mapa

Com base nos resultados da cobertura do sinal digital com recepção estática, foram definidas duas regiões sobre o mapa, a partir das quais foram realizadas as análises subsequentes. A primeira corresponde a uma região circular centrada na estação transmissora e com raio de 7 km. Nesta região, nenhum ponto de medição teve ausência de decodificação de áudio digital (não ocorreu $Rx_Mode=0$). A região definida por um círculo com raio de 12 km corresponde à segunda região. Essa área engloba todos os pontos de medição em que houve decodificação do sinal digital ($Rx_Mode=1$).

A Tabela 7 apresenta os resultados da recepção digital nos pontos fixos. Em relação aos 15 pontos medidos dentro do raio de 7 km, foram obtidos 14 pontos com recepção digital, o que corresponde a 93%. Em relação ao total de pontos medidos (34), houve recepção digital em 17 deles (50%).

Recepção do Áudio Digital	Raio de 7 km	Raio de 12 km	Toda a região de testes
	Pontos	Pontos	Pontos
Sim	14 (93%)	17 (57%)	17 (50%)
Alternância com áudio analógico	1 (7%)	3 (10%)	3 (9%)
Não	0	10 (33%)	14 (41%)
<i>Total de medições</i>	15 (100%)	30 (100%)	34 (100%)

Tabela 7 – Resultados da recepção estática.

Os resultados obtidos mostram que a recepção do sinal digital é praticamente uniforme dentro de um raio de 7 km. A partir desta distância nota-se a não decodificação do sinal digital nos pontos situados nas rotas nas direções noroeste (R4), nordeste (R3) e sudoeste (R1).

Na direção sul, a recepção de sinal digital estendeu-se até 12 km ao longo da rota R2, até o ponto R2P3. Esse comportamento se deve provavelmente ao fato de que a rota R2 percorre uma região de subida, em direção a uma região montanhosa ao sul. Então, entre 7 km e 12 km os pontos fixos da rota R2 estão em uma região com menos obstrução no perfil do terreno em relação ao transmissor devido à altitude. A variação da altitude na rota R2 pode ser vista por meio do gráfico da Figura 19, que exibe a altitude do terreno entre o transmissor e os pontos desta rota.

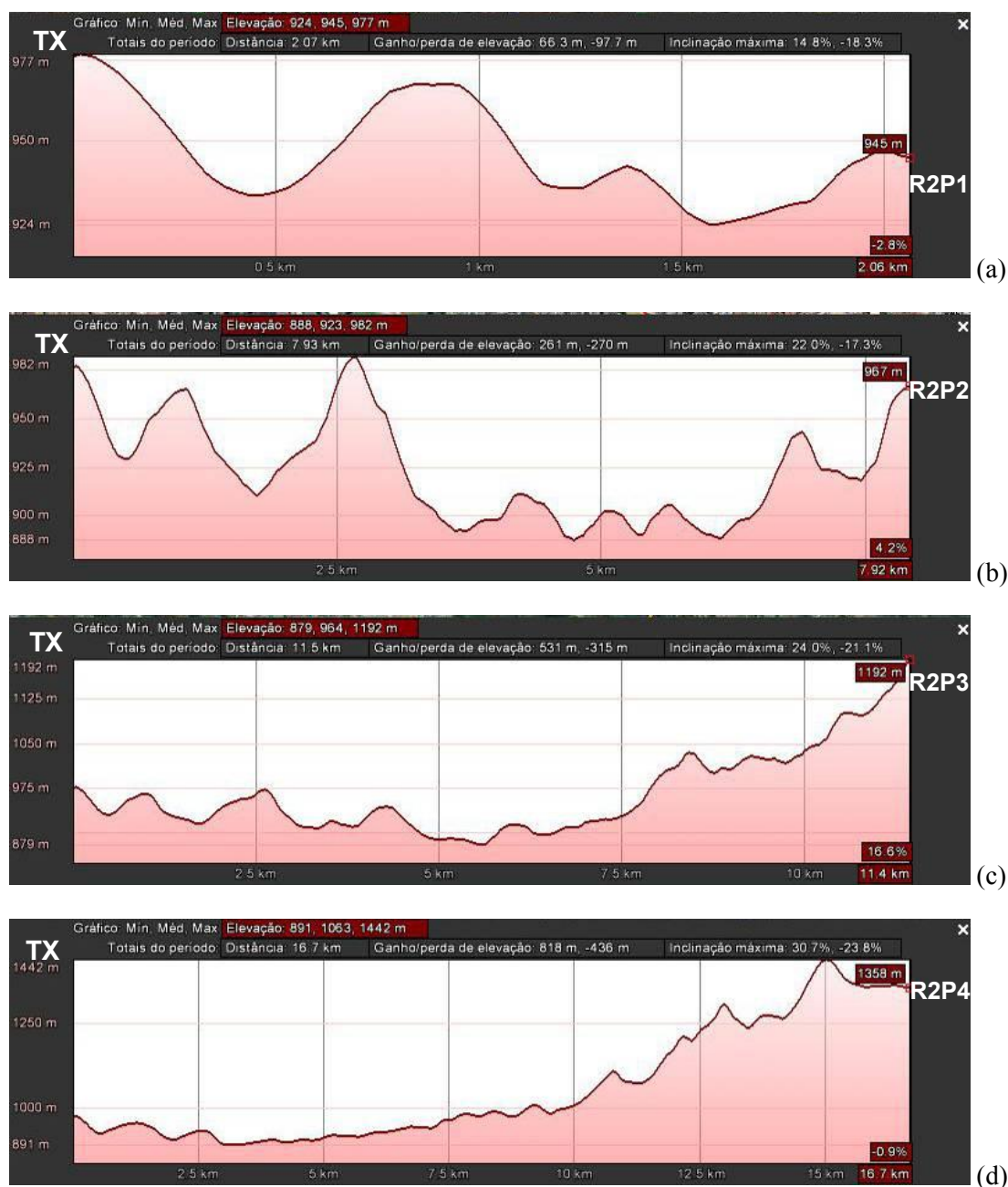


Figura 19 – Altitude do terreno entre transmissor e pontos da rota R2

Os três pontos da região de testes onde houve alternância de recepção digital e analógica (Rx_Mode=0 ou 1) são os pontos marcados em amarelo na Figura 18. A Tabela 8 apresenta para cada um dos pontos onde houve alternância o percentual de quadros de áudio que tiveram Rx_Mode=1 e a duração desses quadros, que corresponde ao tempo em que ocorreu a decodificação do áudio digital, além da duração total da medição no ponto e sua distância ao transmissor.

Pontos	Distância ao transmissor (km)	Intensidade de campo elétrico mediano (dB μ V/m)	SNR mediano (dB)	Intervalo de medição (min)	Quadros com Rx_Mode=1	
					Quantidade (%)	Duração (min)
R3P2	6,6	29,5	2,31	4,91	38,52	1,89
C1P1	9,2	36,7	8,69	4,92	94,73	4,65
C2P1	9,2	32,8	2,63	4,94	89,34	4,41

Tabela 8 – Pontos onde Rx_Mode=0/1

As características do ambiente de recepção nesses pontos podem ter influenciado na decodificação do sinal digital. O ponto de medição R3P2 está localizado ao lado de posto de gasolina, em rodovia com tráfego intenso, enquanto que o ponto de medição C1P1 está localizado em uma rua com tráfego intenso e com prédios no entorno com 2, 7 e 13 andares, e o ponto de medição C2P1 está em um ambiente bastante arborizado.

O gráfico da Figura 20 apresenta a intensidade do campo elétrico mediano classificado conforme os resultados de recepção do parâmetro Rx_Mode em função da distância ao transmissor. O limiar de intensidade de campo elétrico digital para decodificação do sinal digital é de aproximadamente 43 dB μ V/m. O ponto mais distante com recepção digital no qual a intensidade de campo elétrico foi de 53 dB μ V/m (R2P3) fica na rota R2 que se estende para a região sul, a qual possui menos atenuações provavelmente devido à elevação do terreno que deixa a região menos susceptível ao efeito das obstruções do perfil do terreno na direção do transmissor.

Nos registros de ocorrência há relatos da presença de ruído com intensidade muito forte no ponto C1P5, que corresponde ao ponto em vermelho da Figura 20 situado aproximadamente a 11 km em relação ao transmissor, com intensidade de campo elétrico de 53,9 dB μ V/m.

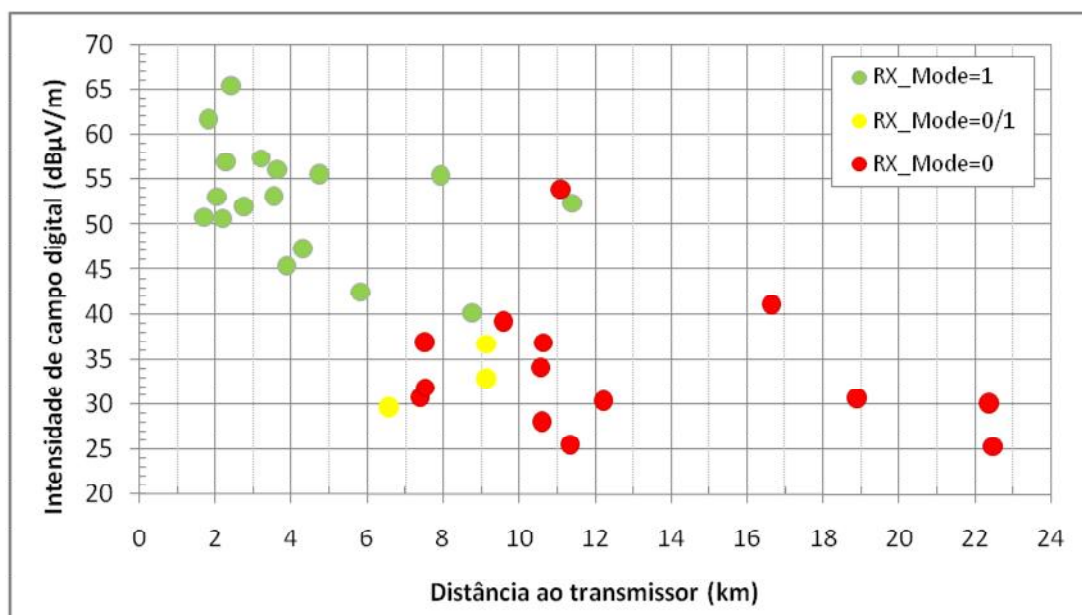


Figura 20 – Intensidade de campo digital em função da distância do transmissor.

A relação sinal-ruído (SNR) mediana registrada pelo receptor profissional HD Radio nos testes estáticos em função da distância é apresentada na Figura 21. Nesse gráfico os pontos vermelhos indicam medições em que não houve decodificação do sinal digital, devido à severa degradação do sinal recebido.

A Figura 21 ilustra ainda que não há recepção do sinal digital com valores do parâmetro SNR abaixo de 1,4 dB. Acima de 9,3 dB, a recepção digital é perfeita. Não houve registro de dados no intervalo entre 2,6 e 8,7 dB. Devido à existência de um intervalo tão grande fica impossível definir um valor ou intervalo aceitável para a SNR para boa recepção estática com o sistema HD Radio nos ambientes testados. No entanto, de acordo com a recomendação ITU-R BS. 1114-7, o valor mínimo de SNR para recepção digital com o sistema HD Radio pode variar de 2,64 dB com taxa de erro de bloco de 0,16 em ambiente puramente gaussiano (melhor caso), até 9,94 dB com taxa de erro de bloco de 0,0202 em ambiente com desvanecimento (pior caso). Ressalte-se que os resultados ilustrados na Figura 21 são referentes aos diversos ambientes das medições.

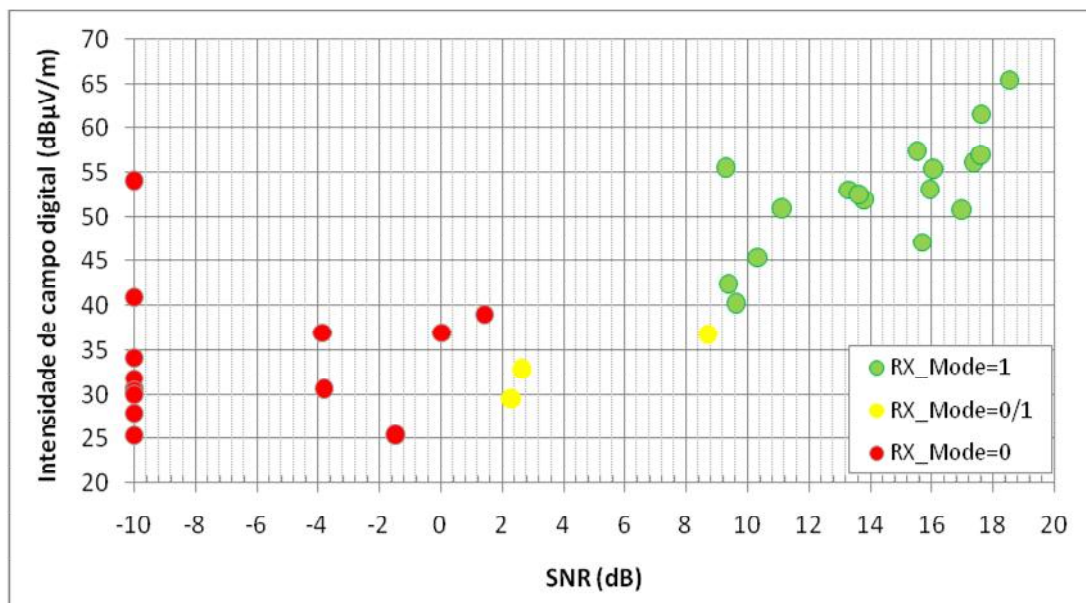


Figura 21 – Intensidade de campo digital versus SNR

4.2.2. Avaliação da área de cobertura do sinal digital com recepção móvel

Na avaliação da mobilidade foi empregada a contagem do parâmetro Rx_Mode, o qual indica presença ou ausência do sinal digital. Os percentuais apresentados correspondem ao total de ocorrências de Rx_Mode=1 (presença de sinal digital) dentro de cada trecho avaliado.

Quando há falha na recepção do sinal digital, o receptor HD Radio comuta automaticamente para o sinal analógico, por meio de um mecanismo denominado *blend*. Considerando que o processamento digital insere um atraso no sinal transmitido, o áudio digital naturalmente ficará defasado em relação ao analógico, com atraso correspondente ao tempo de processamento. Sendo assim, na transição do sinal digital para o analógico, e vice-versa, essa diferença é notada pelo ouvinte, podendo ser amenizada atrasando-se o sinal analógico em relação ao digital no transmissor.

O áudio gravado com o receptor profissional durante as medições em mobilidade permitiu observar o funcionamento do mecanismo *blend*, tanto na transição do sinal digital para o analógico quanto no retorno para o sinal digital. No centro de transmissão, não houve nenhum processo de atraso do áudio analógico em relação ao digital. Portanto, ficou claro durante a campanha de medição que os áudios na recepção têm uma diferença de aproximadamente 8 segundos, com o áudio analógico sempre adiantado em relação ao digital, independentemente da existência de *blends*.

Para o ouvinte, quando o *blend* se inicia, a percepção é de que houve perda de parte da informação, devido ao fato de o áudio analógico estar adiantado em relação ao digital de aproximadamente 8 segundos; no retorno do sinal digital (final do *blend*), o ouvinte percebe a repetição de 8 segundos do áudio escutado anteriormente no formato analógico. Portanto, é necessário o tratamento adequado do tempo de atraso do áudio digital em relação ao analógico no centro de transmissão para que o efeito do *blend* não acarrete desconforto para o ouvinte.

O registro do parâmetro Rx_Mode em mobilidade é apresentado na Figura 22, onde a coloração verde indica onde Rx_Mode=1 e vermelha indica onde Rx_Mode=0.

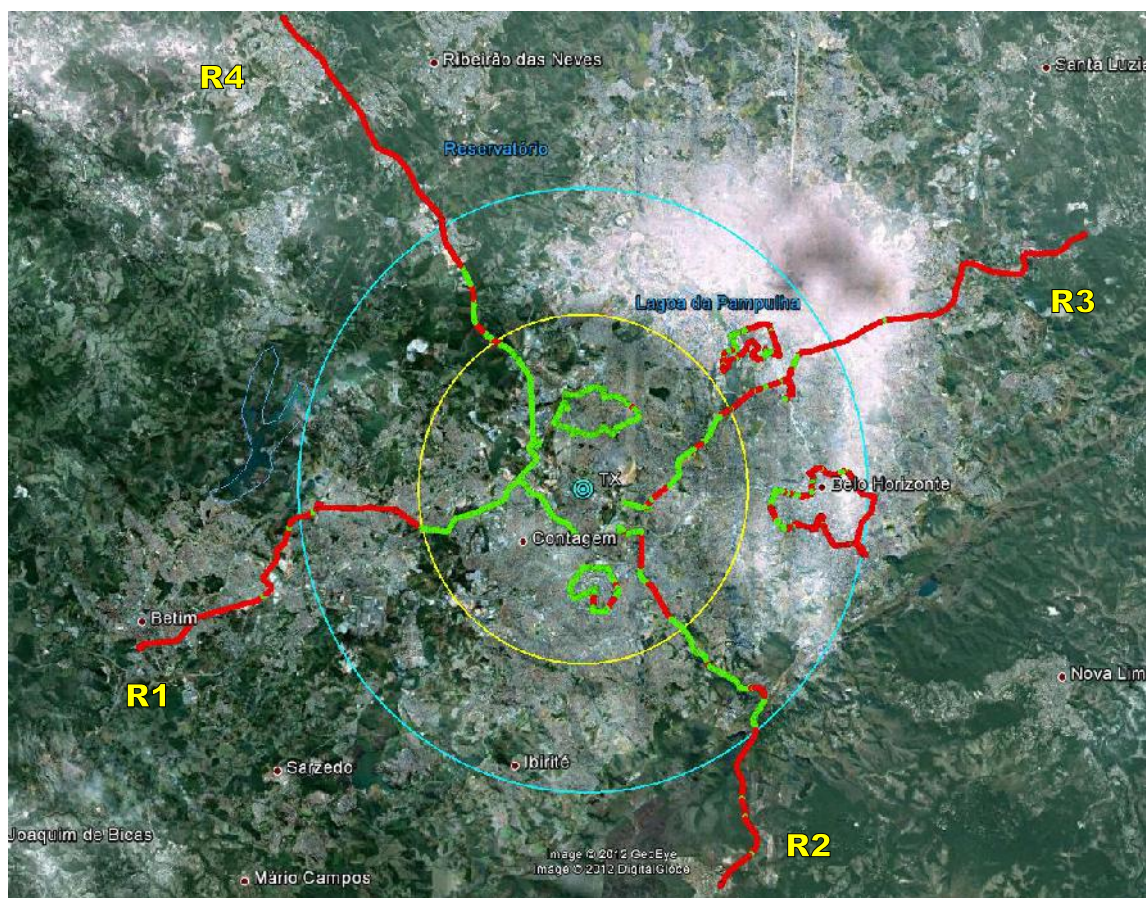


Figura 22 – Parâmetro Rx_Mode registrado nas medições em mobilidade

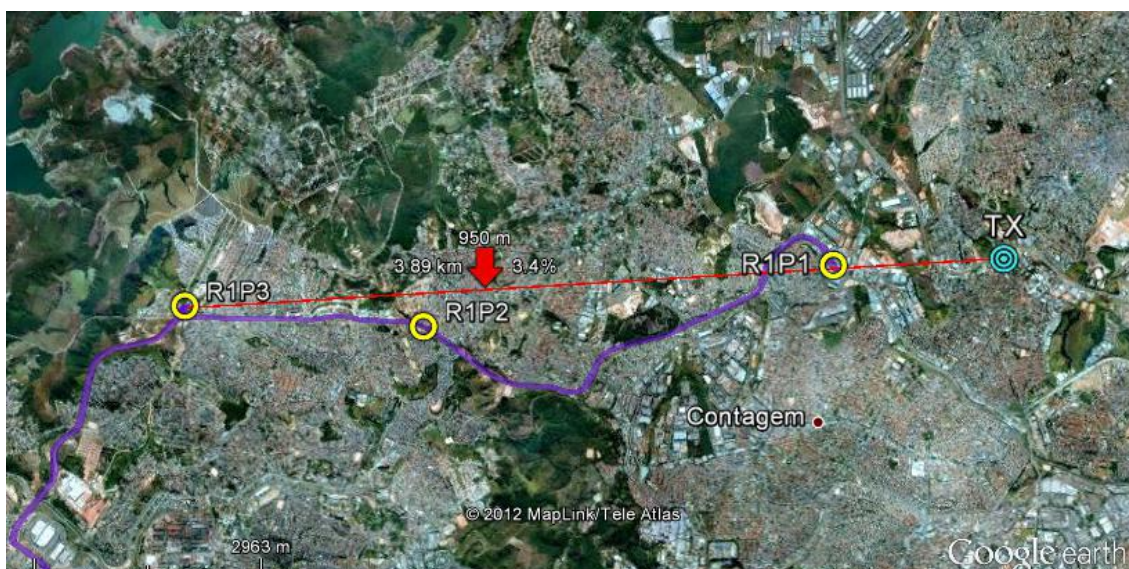
A Tabela 9 apresenta os resultados gerais da recepção móvel em rotas radiais.

Rota	Trecho	Distância ao último ponto do trecho (km)	Rx_Mode=1 (%)
Radial 1	P1 a P2	7,5	76,8 %
	P2 a P3	10,6	0,2 %
	P3 a P4	18,9	7,5 %
Radial 2	P1 a P2	7,9	65,4 %
	P2 a P3	11,4	82,9 %
	P3 a P4	16,6	10,8 %
Radial 3	P1 a P2	6,6	82,7 %
	P2 a P3	11,3	15,9 %
	P3 a P4	22,5	1,8 %
Radial 4	P1 a P2	5,9	99,6 %
	P2 a P3	12,2	50,0 %
	P3 a P4	22,4	0,0 %

Tabela 9 – Resultados da recepção móvel nas rotas radiais Rádio UFMG Educativa.

Ao longo das quatro rotas radiais R1, R2, R3 e R4 houve presença de sinal digital nos trechos P1 a P2 variando entre 65,4% (rota R2) e 99,6% (rota R4) do tempo. Esses trechos possuem distâncias do transmissor que variam entre 6 km e 8 km o que está coerente com medições estáticas que indicaram uma região de cobertura principal de 7 km. Já no segundo trecho entre P2 e P3, as radiais R1, R3 e R4 possuem pouca presença de sinal digital, a saber 0,2%, 15,9% e 50,0% do tempo respectivamente. Nos trechos P3 a P4, a porcentagem de decodificação do sinal digital foi baixa em todas as radiais.

A baixa porcentagem do percurso com efetiva demodulação do sinal digital na rota R1 no trecho P2 a P3 (0,2%) pode ser atribuída ao perfil do terreno da região. A Figura 23 exibe em (a) o mapa da região indicando o local da emissora e dos pontos de medição P1, P2 e P3, e em (b) o gráfico com o perfil do terreno entre a emissora e P3. É possível verificar que a região indicada pela seta vermelha no mapa apresenta uma altitude de 950 m, praticamente 100 m acima do ponto P3, constituindo assim uma obstrução natural do relevo capaz de afetar a decodificação do áudio digital neste trecho.



(a)



(b)

Figura 23 – (a) Mapa da região que inclui a antena transmissora e a rota R1 até o ponto P3; (b) Perfil do terreno do segmento que une a antena transmissora ao R1P3

O trecho P2 a P3 da rota R2 possui recepção de sinal digital em 83% do tempo. Conforme visto na análise da recepção estática, este trecho da rota R2 está em uma região mais elevada que o

restante da rota, o que faz com que essa região esteja menos obstruída, favorecendo a recepção do sinal digital.

A Figura 24 exibe o comportamento dos parâmetros do sinal digital recebido ao longo do intervalo de medição para o trecho P2 a P3 da rota R2. O gráfico que descreve o comportamento do Rx_Mode indica a ocorrência de três *blends* com duração de alguns segundos no período que vai de 0 até 150 s, seguidos de 3 *blends* mais longos entre 230 e 270 s, ocorridos na aproximação do ponto de medição P3. A despeito da ocorrência pontual dos *blends*, o trecho P2 a P3 da rota R2 teve desempenho superior ao mesmo trecho das demais rotas, para uma distância inferior a 12 km.

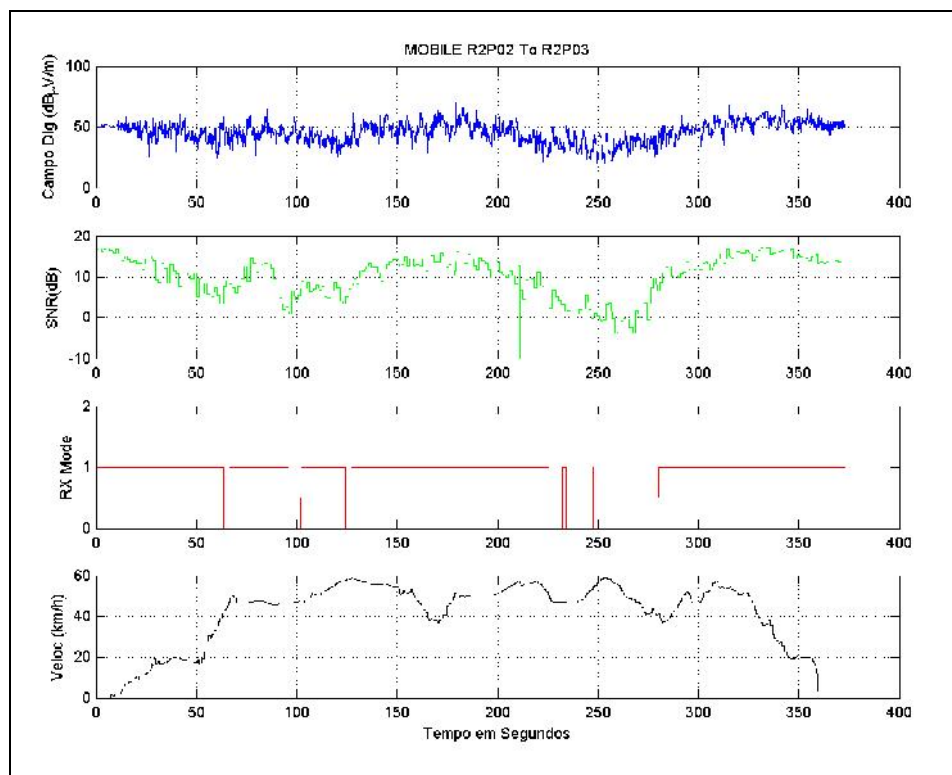


Figura 24 – Registro de medição móvel no trecho R2P2 a R2P3.

No detalhe da área urbana mostrado na Figura 25 é possível visualizar o comportamento do parâmetro Rx_Mode nas rotas circulares.

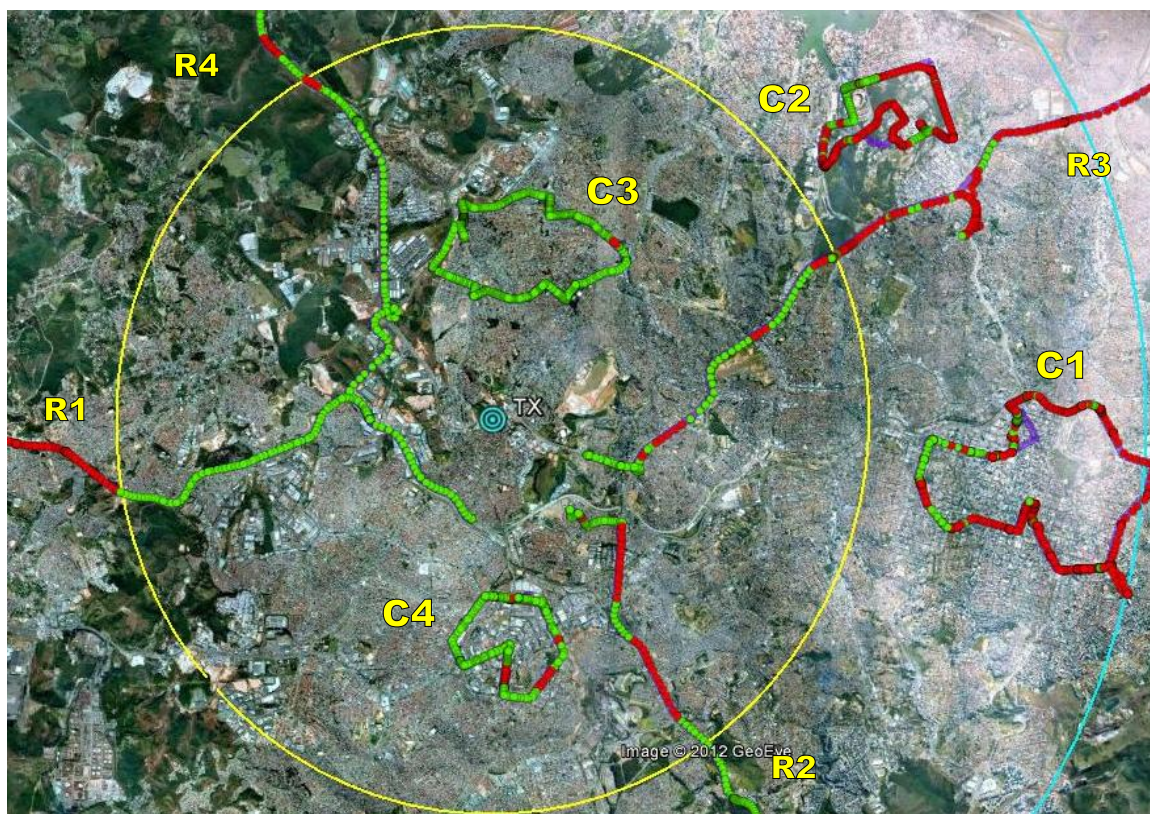


Figura 25 – Detalhe do registro Rx_Mode dentro do raio de 7 km

A Tabela 10 apresenta os resultados gerais da recepção móvel nas rotas circulares.

Rota	Tipo/Local	Trecho	Maior distância do transmissor à rota (km)	Duração da medição (min)	Rx_Mode=1 (%)
Circular 1	Urbana (Bairro Savassi)	P1 a P2	11,1	17,4	47,2
		P2 a P3		12,3	16,1
		P3 a P4		8,3	7,1
		P4 a P5		2,9	26,6
		P5 a P6		20,9	3,3
		P6 a P1		9,0	38,9
Circular 2	Urbana (Campus UFMG)	P1 a P2	9,2	13,4	17,2
		P2 a P3		6,5	53,0
		P3 a P1		8,9	27,6
Circular 3	Urbana	P1 a P2	3,9	1,4	100
		P2 a P3		6,6	100
		P3 a P4		10,5	97,0
		P4 a P5		7,1	99,7
		P5 a P1		6,9	100
Circular 4	Urbana (área industrial)	P1 a P2	4,8	8,6	90,4
		P2 a P3		3,9	87,4
		P3 a P1		10,4	100

Tabela 10 – Resultados da recepção móvel nas rotas circulares da Rádio UFMG

Conforme apresentado na Figura 18, as rotas circulares C3 e C4 estão situadas dentro do raio de 7 km do transmissor e tiveram decodificação do sinal digital na maior parte do tempo em cada

um dos seus trechos. Já as rotas C1 e C2 estão situadas além do raio de 7 km, respectivamente nas direções leste e nordeste do transmissor, as quais estão em região com elevação inferior à elevação da região da rota R2, o que justifica os resultados de pouco tempo de decodificação do sinal digital em cada trecho dessas rotas, conforme apresentado na Tabela 10.

Diante do exposto, com relação à recepção em mobilidade, os resultados dentro da área de 7 km foram considerados bons, no entanto no trecho de 7 a 12 km o desempenho não foi o mesmo.

4.3. Avaliação objetiva do áudio digital de receptores comerciais

4.3.1. Avaliação do áudio digital de receptor comercial nas medições estáticas

A avaliação do áudio HD Radio com receptores comerciais é feita para verificação do áudio recebido pelo grande público. O mecanismo *blend* desses receptores evita o silenciamento do áudio quando não ocorre decodificação do sinal digital, comutando-o para recepção analógica. Sendo assim, essa avaliação é feita objetivamente por meio da verificação da ocorrência de *blends* no áudio gravado durante o intervalo de medição em cada ponto fixo, sendo a recepção do sinal classificada como “Recepção Digital” quando houve decodificação do sinal digital em todo o período de gravação, “Recepção Mista” quando houve ocorrências de *blends* e “Recepção Analógica” quando não houve decodificação do sinal digital.

Na avaliação dos 34 pontos fixos foram utilizados dois modelos de receptores comerciais, Sony (receptor de mesa) e JVC (automotivo). A Tabela 11 apresenta o percentual de medições fixas onde houve recepção digital, mista e analógica nestes receptores comerciais dentro das áreas de interesse (7 e 12 km) e em toda a região onde houve a campanha de testes.

Recepção	Raio de 7 km		Raio de 12 km		Toda região de testes	
	SONY	JVC	SONY	JVC	SONY	JVC
Digital	13 (87%)	14 (93%)	17 (57%)	18 (60%)	17 (50%)	18 (53%)
Mista (Alternância com áudio analógico)	1 (6,5%)	0 (0%)	1 (3%)	0 (0%)	1 (3%)	0 (0%)
Analógica	1 (6,5%)	1 (7%)	12 (40%)	12 (40%)	16 (47%)	16 (47%)
Total de medições fixas	15 (100%)		30 (100%)		34 (100%)	

Tabela 11 – Medições fixas com receptores comerciais

Dos resultados infere-se que os dois modelos de receptores comerciais tiveram desempenho semelhante. A Figura 26 e Figura 27 apresentam estes resultados considerando a localização dos pontos de medição e a intensidade de campo elétrico digital mediano. Por meio desses resultados verifica-se que ocorreu recepção digital com os receptores comerciais na grande maioria dos pontos de medição internos ao raio de 7 km, e que os equipamentos foram eficazes na decodificação do áudio digital para valores de intensidade de campo elétrico superiores a 42 dB μ V/m, a exceção de um ponto de medição, a 11 km do transmissor com intensidade de campo de 53,9 dB μ V/m, que é o ponto C1P5, localizado na região do centro comercial da cidade. Nesta localidade foram registrados altos níveis de interferência eletromagnética que dificultaram a boa recepção do sinal de rádio digital. Analisando a qualidade de recepção dos equipamentos comerciais, verifica-se que a recepção digital é bem sucedida em pouco mais da

metade dos pontos de medição. A máxima distância ao transmissor em que houve recepção digital foi de 11 km para ambos os modelos de receptores comerciais utilizados.

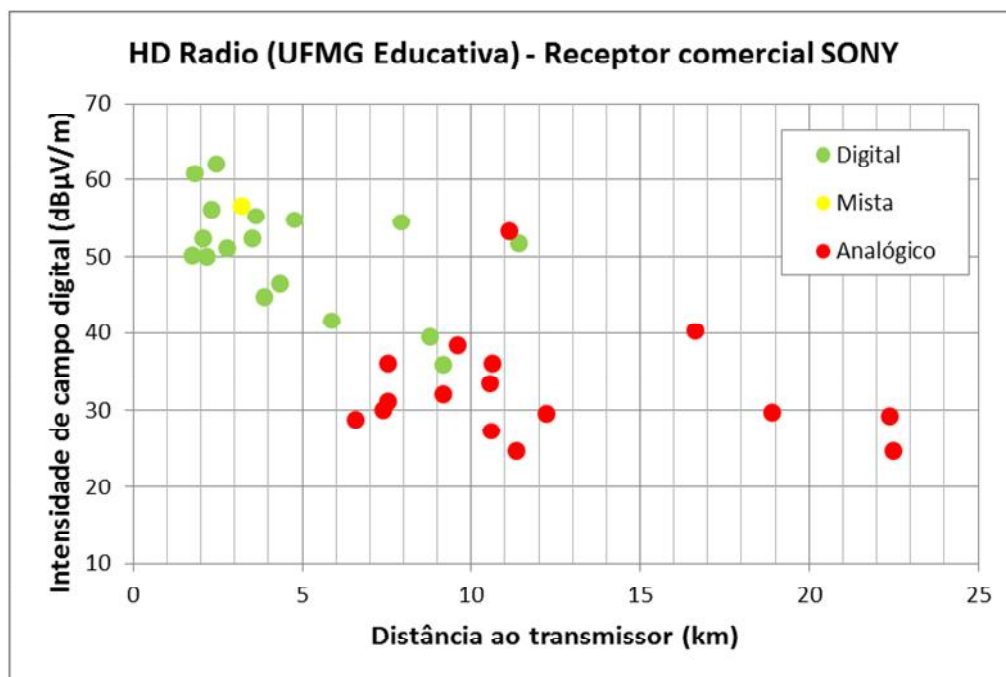


Figura 26 – Áudio SONY das medições fixas.

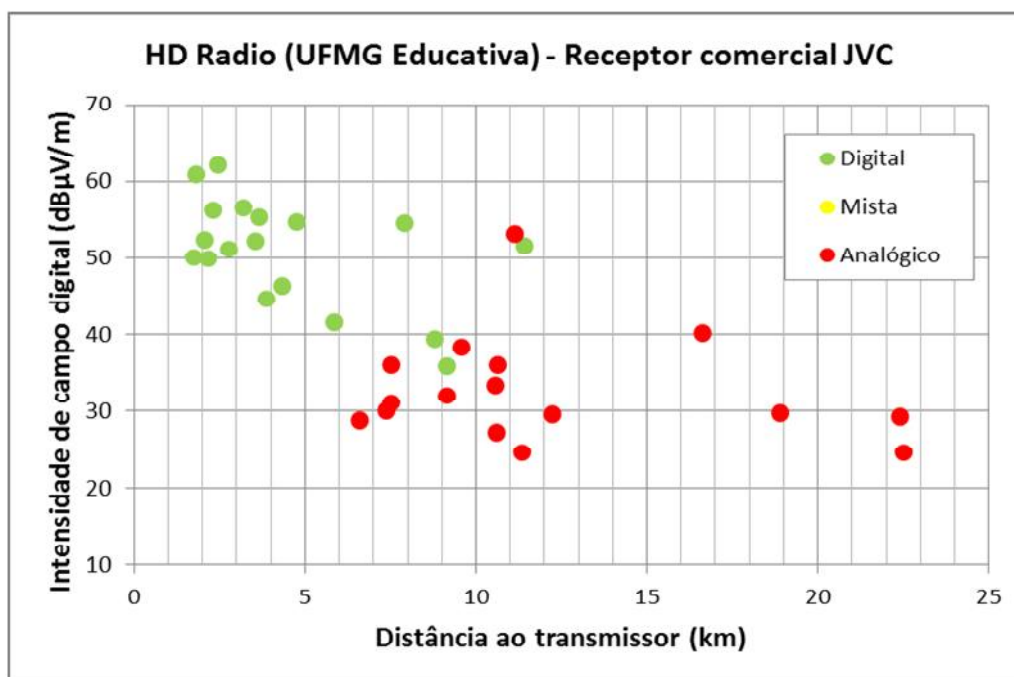


Figura 27 – Áudio JVC das medições fixas.

Nesses gráficos, observa-se que o limiar de intensidade de campo elétrico para recepção digital para ambos os receptores é de aproximadamente 42 dBμV/m.

4.3.2. Avaliação do áudio digital de receptor comercial em mobilidade

Para analisar a recepção móvel do áudio digital em condições mais realistas no tocante ao usuário, os áudios dos receptores comerciais JVC (automotivo) e SONY (receptor de mesa) foram avaliados ao longo das rotas radiais R2 e R4. Nestes testes a unidade móvel percorreu as rotas com velocidade até 80 km/h, com variação de velocidade e aceleração do veículo.

A Tabela 12 apresenta um resumo das ocorrências de *blends*, com estimativa de quantidade e do maior intervalo de duração dos *blends* em cada trecho percorrido.

Trecho	Duração da medição (min)	SONY		JVC	
		Blend (no. de ocorrências)	Maior duração (segundos)	Blend (no. de ocorrências)	Maior duração (segundos)
R2P1 a R2P2	12:14	5	6	2	16
R2P2 a R2P3	8:13	4	6	0	-
R2P3 a R2P4	9: 19	(*)	-	3	5
R4P1 a R4P2	15:18	5	6	0	-
R4P2 a R4P3	08:16	1	11	1	5
R4P3 a R4P4	11:08	(*)	-	2	6

Tabela 12 – Ocorrências de *blends* nos receptores comerciais em mobilidade

(*) Não foi possível identificar os *blends*, pois o áudio esteve todo o tempo em analógico.

4.4. Resultados da Recepção Analógica FM

4.4.1. Avaliação da área de cobertura em recepção estática

A cobertura do sinal analógico FM da estação UFMG Educativa foi estimada para permitir a comparação com a cobertura do sinal digital. Essa estimativa é feita com base na qualidade do áudio analógico, o qual é avaliado subjetivamente seguindo as orientações da Recomendação UIT-R BS 1284 [22]. Foram utilizadas as gravações de áudio analógico feitas em pontos fixos de medições, de dois receptores comerciais, NKS e TOSHIBA. Esses áudios foram avaliados por um grupo de pessoas, que atribuíram notas variando de 1 a 5, conforme a classificação da Recomendação UIT-R BS 1284 (Tabela 13). A partir das notas atribuídas para cada áudio referente a cada receptor, obteve-se a média aritmética da qualidade do áudio tanto para o NKS como para o TOSHIBA. Para determinar um valor único para a qualidade do áudio analógico em cada ponto, foi realizada a média aritmética dos valores de cada receptor. Em seguida, os valores de qualidade calculados foram utilizados na análise da área de cobertura analógica. A Tabela II.4 do item II do Apêndice apresenta as médias das notas atribuídas aos áudios referentes aos receptores comerciais. É importante ressaltar que não foram realizadas medições móveis do áudio analógico FM.

<i>Quality</i>	<i>Impairment</i>
5 Excellent	5 Imperceptible
4 Good	4 Perceptible, but not annoying
3 Fair	3 Slightly annoying
2 Poor	2 Annoying
1 Bad	1 Very annoying

Tabela 13 – Escala de avaliação da qualidade de áudio da Recomendação UIT-R BS 1284

Para consolidação dos resultados obtidos neste trabalho, foram definidos três limiares de recepção: “Recepção Boa” contém as notas entre 5 e 3 inclusive, “Recepção Pobre” com notas entre 3 e 2, e “Recepção Ruim” com notas iguais ou menores que 2. A Tabela 14 apresenta a definição da classificação das notas empregadas neste trabalho.

Notas	Classificação	Definição
$3 \leq \text{Nota} \leq 5$	Recepção Boa	Áudio com presença de ruído, desde imperceptível a leve
$2 < \text{Nota} < 3$	Recepção Pobre	Presença de ruído ao ponto da informação do áudio tornar-se ininteligível
$\text{Nota} \leq 2$	Recepção Ruim	Somente ruído

Tabela 14 – Classificação das notas subjetivas do áudio adotadas neste trabalho

A classificação da qualidade do áudio analógico FM diurno obtido em cada ponto fixo a partir de medições da UFMG Educativa é apresentada na Figura 28, com a intensidade de campo analógico em função da distância ao transmissor, e na Figura 29 os mesmos pontos são apresentados no mapa. A qualidade do áudio em cada ponto fixo é representada da seguinte forma: os pontos em verde representam “Recepção Boa”, em amarelo, “Recepção Pobre” e em vermelho, “Recepção Ruim”.

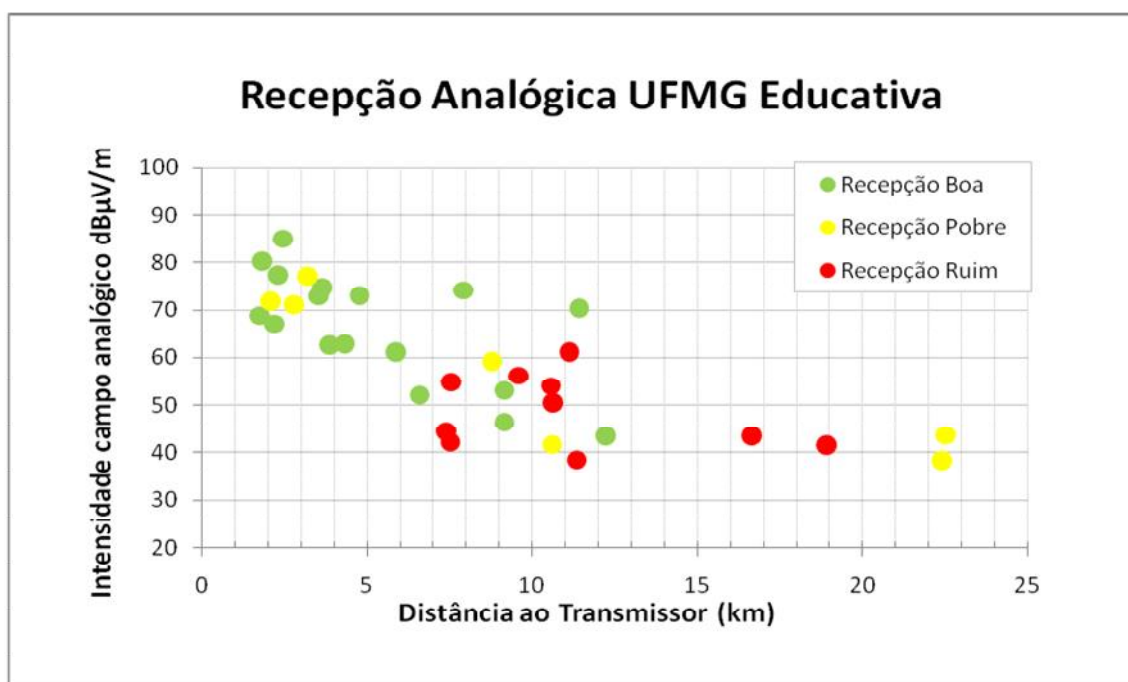


Figura 28 – Avaliação subjetiva do áudio analógico FM da Rádio UFMG Educativa

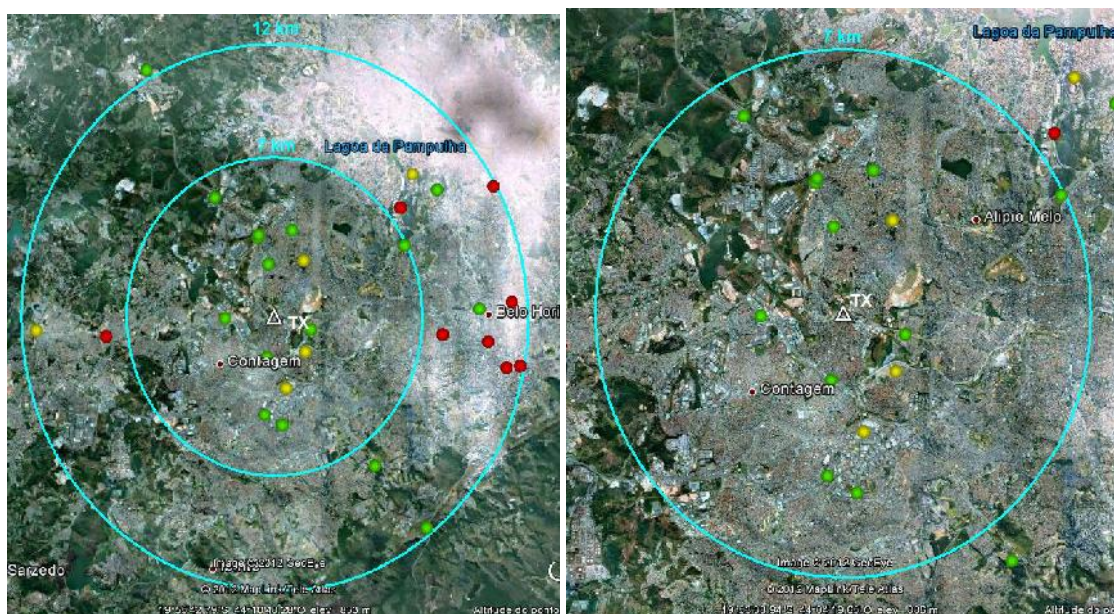


Figura 29 – Recepção estática do áudio analógico no mapa; detalhe para o raio de 7 km (dir)

Por meio do gráfico e dos mapas apresentados, é possível verificar que, até a distância de 7 km em relação ao transmissor, a recepção analógica foi avaliada na maioria dos pontos como “Recepção Boa” e nos outros como “Recepção Pobre”.

Para distâncias superiores a 7 km, não foi verificada tendência na avaliação, tendo ocorrido os três tipos de recepção, como ilustra a Figura 29. As rotas circulares C1 e C2 apresentaram recepção “Ruim” quase na totalidade dos seus pontos, vale ressaltar que a intensidade do campo elétrico nessa região foi atenuada devido ao ambiente do entorno dos pontos, no qual havia prédios de altura mediana a grande.

Nos pontos situados além da distância de 12 km, é observado que a maioria teve “Recepção Ruim”, salvo nos pontos R2P2, R2P3, R4P2 e R4P3 das rotas R2 e R4, onde houve “Recepção Boa”, cujos locais de medição encontram-se em regiões com edificações baixas, o que favorece a recepção do sinal.

Observa-se no gráfico da Figura 28 que o limiar de intensidade de campo elétrico do sistema analógico está aproximadamente entre 60 e 64 dB μ V/m. Esta faixa está próxima do valor de 66 dB μ V/m definido no regulamento técnico brasileiro e UIT para as áreas urbanas [23] [24].

O áudio analógico foi registrado em 34 locais e a distribuição das notas está na Tabela 15.

Recepção Analógica	Raio de 7 km	Raio de 12 km	Toda região de testes
	Pontos	Pontos	Pontos
Boa	12 (80%)	16 (55%)	17 (50%)
Pobre	3 (20%)	5 (17%)	7 (21%)
Ruim	0 (0%)	8 (28%)	10 (29%)
Total de medições fixas	15 (100%)	29 (100%)	34 (100%)

Tabela 15 – Resultados do FM analógico em recepção estática

4.5. Comparação entre os resultados da recepção dos áudios analógico e digital

Os resultados referentes à qualidade do áudio analógico (sistema FM) e à recepção digital profissional (sistema HD Radio) podem ser comparados para fins de verificação de atendimento nos pontos fixos e extensão de cobertura. A Tabela 16 apresenta os resultados em cada ponto fixo.

Pontos	Distância ao transmissor (km)	RX Mode	Qualidade de áudio FM
Ponto de referência	2,45	1	4,4
R1P1	2,18	1	4,3
R1P2	7,53	0	1,9
R1P3	10,6	0	2,3
R1P4	18,91	0	1,8
R2P1	2,08	1	2,9
R2P2	7,92	1	3,5
R2P3	11,42	1	3,5
R2P4	16,64	0	1,8
R3P1	1,74	1	3,6
R3P2	6,59	0/1	3,0
R3P3	11,34	0	1,5
R3P4	22,5	0	2,0
R4P1	1,81	1	4,6
R4P2	5,86	1	4,0
R4P3	12,22	0	4,5
R4P4	22,39	0	2,2
C1P1	9,16	0/1	3,1
C1P2	7,54	0	2,0
C1P3	9,58	0	1,0
C1P4	10,56	0	1,1
C1P5	11,12	0	1,0
C1P6	10,63	0	1,2
C2P01	9,16	0/1	3,5
C2P02	7,39	0	1,7
C2P03	8,78	1	2,8
C3P01	3,54	1	4,4
C3P02	3,65	1	3,9
C3P03	3,87	1	3,7
C3P04	2,78	1	2,5
C3P05	2,31	1	4,2
C4P01	3,19	1	2,8
C4P02	4,77	1	4,3
C4P03	4,33	1	3,3

Tabela 16 – Resultados comparativos entre FM e HD Radio na recepção estática.

Os resultados mostram que, a partir do total de pontos fixos medidos (34 pontos fixos), sendo levada em consideração a região de cobertura de aproximadamente 20 km a partir do transmissor, houve atendimento similar dos serviços digital e analógico. Foram contabilizados 17 pontos com recepção do áudio digital e 17 pontos com áudio analógico com qualidade boa (não sendo necessariamente os mesmos pontos). Ao se considerar a região interna do círculo de raio 7 km, verifica-se melhor atendimento do serviço digital, em relação ao analógico. Nesta região foi obtido um total de 14 pontos com decodificação do áudio digital e 12 pontos com áudio analógico com qualidade boa.

O parâmetro Rx_Mode do sinal digital e o tipo de recepção do sinal analógico podem ser comparados para fins de verificação de atendimento nos pontos fixos e extensão de cobertura. A

Tabela 15 apresenta os resultados em cada ponto fixo e a Tabela 16 mostra o resumo dos resultados, na qual, para fins de comparação com o digital, as classificações do áudio analógico FM como Recepção Pobre ou Recepção Ruim são agrupadas.

Os valores da Tabela 16 são apresentados na Figura 30. Conforme a classificação definida na Tabela 14, o limiar para “Recepção Boa” do áudio analógico corresponde à nota 3. Nessa avaliação, quando o Rx_Mode foi igual a 1, atribuiu-se a nota máxima para a qualidade do áudio digital, devido às características intrínsecas do sistema digital HD Radio com a configuração utilizada. Apenas para fins de visualização dos pontos onde Rx_Mode foi 0/1, esses estão indicados como uma nota “média” igual a 2,5 no áudio digital.

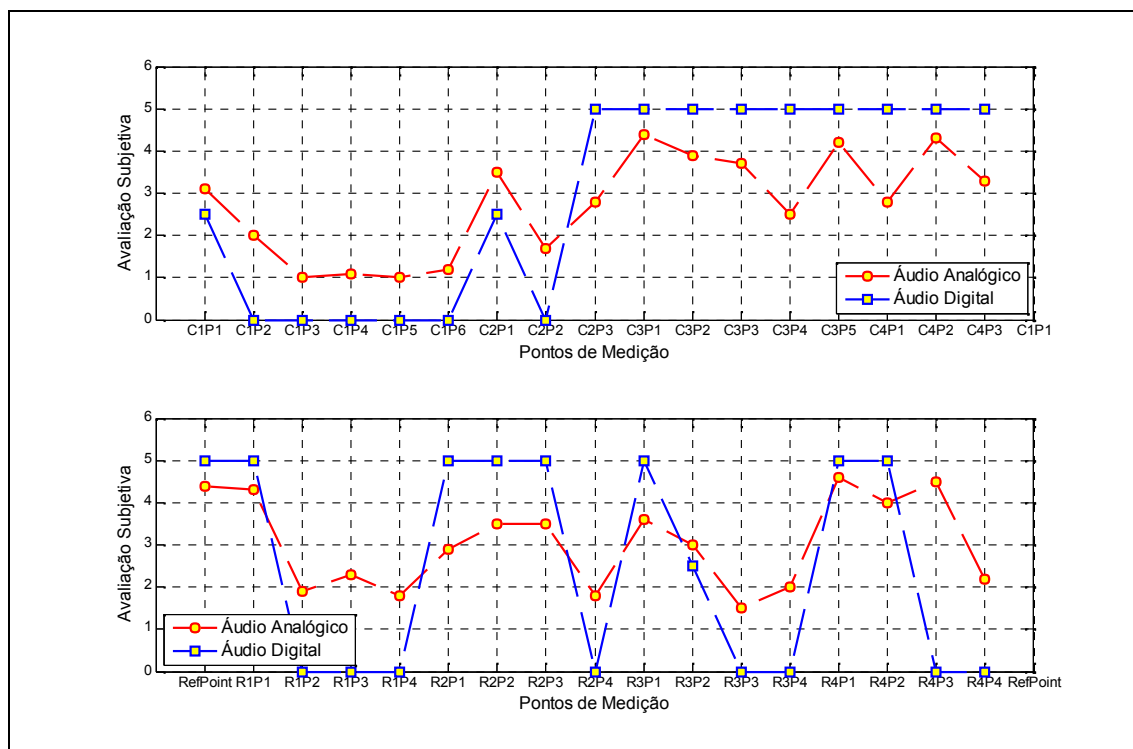


Figura 30 – Gráfico de notas da avaliação dos áudios analógico e digital

A Tabela 17 mostra a consolidação dos resultados da Tabela 16, indicando a quantidade de pontos em cada situação de recepção em relação à decodificação do áudio digital e à qualidade de recepção do áudio analógico correspondente:

- pontos onde houve áudio digital e o analógico estava bom;
- pontos onde houve áudio digital, porém o áudio analógico estava pobre e ruim;
- pontos onde não houve áudio digital e onde Rx_Mode=0/1, porém o áudio analógico estava bom;
- pontos onde não houve áudio digital e onde Rx_Mode=0/1, e o áudio analógico estava pobre e ruim.

		Recepção do Áudio Analógico		
		Boa	Pobre e Ruim	Totais
Recepção do Áudio Digital	Sim (Rx_Mode=1)	13 (38%)	4 (12%)	17 (50%)
	Não (Rx_Mode=0) e Rx_Mode=0/1	4 (12%)	13 (38%)	17 (50%)
Totais		17 (50%)	17 (50%)	34 (100%)

Tabela 17 – Resumo dos resultados comparativos entre os áudios analógico e digital na recepção estática

Em 13 locais (38%) houve recepção digital e recepção analógica boa simultaneamente. Em 4 locais (12%) houve recepção digital enquanto que a analógica estava classificada como “Recepção Pobre”.

Verificou-se por meio dos testes que dentro do raio de 7 km houve mais pontos com decodificação do sinal digital do que com recepção analógica com “Recepção Boa”, caracterizando bom desempenho do sistema digital nessa região. Após o raio de 7 km houve atendimento similar dos dois sistemas, quando comparada a recepção digital à recepção analógica com qualidade boa, de onde se conclui que a cobertura do HD Radio é similar à cobertura do FM nessa área.

4.6. Impacto do sinal digital HD Radio sobre o áudio analógico

A avaliação do impacto da presença do sinal digital HD Radio sobre o áudio analógico é realizada por meio da avaliação subjetiva de áudios analógicos de receptores comerciais, que foram gravados durante medições com o transmissor digital ligado e desligado. Para este fim, foram feitas medições, em cada situação do transmissor, em onze pontos das rotas circulares. Os áudios gravados de dois receptores analógicos comerciais (modelos NKS e TOSHIBA) foram analisados subjetivamente conforme orientações da Recomendação UIT-R BS 1284. Foi verificado que a presença do sinal digital HD Radio não causou impacto na qualidade do áudio analógico FM. A Figura 31 ilustra os registros obtidos do analisador de espectro em um dos pontos de medição, nas situações de sinal digital desligado (esq) e ligado (dir).

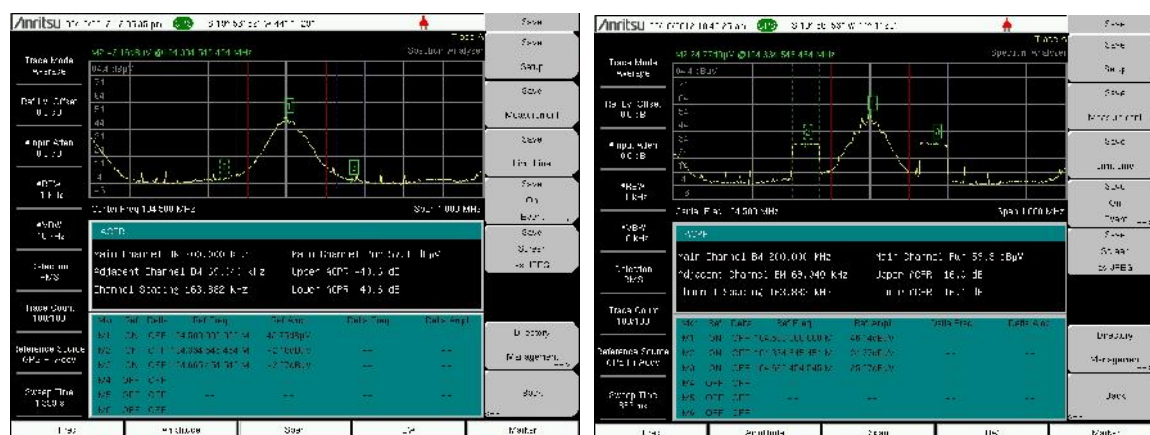


Figura 31 - Registro do espectro com sinal digital desligado (esq) e ligado (dir)

APÊNDICE

I. Sistema HD Radio

I.1. Histórico e padronização

O sistema HD Radio, marca comercial pertencente à empresa norte-americana *iBiquity Digital Corporation*, teve seu desenvolvimento iniciado na década de 1990 e até a data atual é a única tecnologia licenciada pela *Federal Communications Commission* (FCC) para realizar a radiodifusão sonora digital nas faixas de MF e VHF nos EUA.

À época de seu desenvolvimento, a tecnologia empregada no HD Radio se configurava como a principal alternativa às tecnologias correntes para a implantação da radiodifusão sonora digital no país que oferecesse qualidade superior de áudio sem a necessidade de alocação de uma faixa separada de espectro de frequências para sua alocação. Esta realização se dá pelo HD Radio ter sido o pioneiro na geração de um sistema híbrido¹ que implementa o chamado *in-band on-channel* (IBOC) e permite a transmissão dos sinais analógico e digital a receptores fixos, portáteis e móveis dentro da mesma canalização destinada à emissora radiodifusora. A transmissão deste sinal digital agregado ocorre pela adição de subportadoras nas bandas laterais ao sinal analógico que devem obedecer a máscaras de transmissão estabelecidas pelo FCC que limitam a potência digital transmitida relativa ao sinal analógico e aos sinais em canais adjacentes [2] [3].

O *National Radio Systems Committee* (NRSC) é a organização responsável pelo desenvolvimento de padrões técnicos para a indústria de radiodifusão sonora nos EUA. A norma atual, emitida em 2005 e com sua mais recente revisão de setembro de 2011 [1], prevê a implantação do sistema de radiodifusão sonora digital em: canais de radiodifusão MW (540 a 1700 kHz) utilizando largura de banda de aproximadamente 10 kHz e 20 kHz para o sinal digital, de acordo com a configuração escolhida. Com essas configurações é possível utilizar larguras de banda de áudio analógico de 5, 8 e 9,4 kHz [27]; canais em VHF (88,1 a 107,9 MHz) utilizando largura de banda de aproximadamente 200 kHz e 400 kHz para o sinal digital, de acordo com a configuração escolhida. O sinal digital transmitido em MW no modo híbrido apresenta-se dividido em duas bandas laterais (superior e inferior em relação ao sinal analógico). A configuração denominada “padrão” utiliza aproximadamente 10 kHz de largura de banda em cada lateral, totalizando aproximadamente 20 kHz para a transmissão do sinal digital. Além dessa configuração, o sistema permite reduzir as bandas laterais para aproximadamente 5 kHz, totalizando aproximadamente 10 kHz para a transmissão do sinal digital. A taxa de dados alcançada no canal lógico destinado ao áudio e dados atinge 36,4 kbit/s, distribuídos em 3 (três) canais lógicos [20].

O sinal digital transmitido em VHF no modo híbrido apresenta-se dividido em duas bandas laterais (superior e inferior em relação ao sinal analógico), possibilitando duas configurações: híbrida e híbrida estendida (com uma, duas ou quatro partições). Neste caso, a taxa de dados nos canais lógicos destinada ao áudio e dados depende da configuração escolhida, variando de aproximadamente 99,4 kbit/s até 148 kbit/s.

¹ Alternativamente à versão híbrida, existe o sistema *all-digital*, que não contém componente analógica modulada.

Fontes de áudio digitais devem ser inseridas nos chamados serviços de programação para então serem encapsuladas e multiplexadas, fases que antecedem a codificação e a transmissão do sinal digital. A norma vigente não especifica mecanismos de codificação e de compressão das fontes de áudio, mas a *iBiquity* desenvolveu o algoritmo *HD Radio Audio Compression* (HDC) [4], baseado no codificador MPEG-4 HE-AAC, para ser utilizado nos sistemas MW e VHF de HD Radio [5].

A disseminação do padrão pelo mundo está se dando em diferentes estágios em vários países. Em abril de 2012 foi anunciado o lançamento da primeira emissora HD Radio no México, na capital federal, como a primeira de uma série de outras emissoras programadas para adoção no país [8]. Além desse, diversos outros países operam de forma limitada, como República Dominicana, Suíça, Ucrânia e Indonésia. Países como Canadá, Argentina e China estão realizando testes de campo com o padrão [9].

Um grande número de testes de campo com o sistema HD Radio, a fim de avaliar o desempenho do sistema em variadas condições, foi realizado nos EUA. O NRSC criou um fórum para todos os interessados em radiodifusão digital terrestre avaliarem o sistema e proverem informações ao FCC. Em 1999 e 2000, o NRSC desenvolveu seu primeiro conjunto de guias de teste, que foram desenvolvidos para validação do sistema HD Radio, incluindo ensaios de laboratório e de campo. Em 2001, a *iBiquity* completou um extensivo programa de testes da tecnologia nas faixas de AM e FM, seguindo os procedimentos de testes definidos pelo NRSC. Em 2002, o NRSC completou a avaliação do sistema e recomendou à FCC autorizar a tecnologia para operação.

Entre os testes realizados pela *iBiquity* estão incluídos a avaliação da transmissão na faixa de AM no período noturno [10] e o estudo da compatibilidade com o serviço analógico [11]. Nesses documentos é relatado que o sinal digital não foi capaz de cobrir todas as áreas correntemente servidas pelo serviço analógico, mas atendeu às áreas primárias das estações avaliadas. Quanto à compatibilidade, foram detectados impactos mínimos em estações transmissoras regionais e nenhum impacto foi detectado em estações locais. Em sequência a estes, a *iBiquity* realizou estudos na transmissão *all-digital* nas faixas de AM [12] e FM [13]. Ambos os relatórios atestaram o desempenho aprimorado do sistema nessas condições. Foram realizadas pela *iBiquity*, em [14] [15], medições para estudo de desempenho do sistema na faixa de FM, no modo híbrido, realizados nas cidades de São Francisco e Las Vegas, nos Estados Unidos. Os resultados apresentados demonstraram qualidade de recepção do sinal digital superior à experimentada pelo serviço analógico e, além disso, nas localidades onde ocorreu ausência de sinal digital, a comutação automática (*blend*) para recepção do sinal analógico ocorreu de forma satisfatória. No mesmo período, testes de campo foram realizados pela *National Public Radio* (NPR) [16], com o objetivo de avaliar o desempenho da recepção móvel do padrão, na faixa de FM. Os testes foram conduzidos em quatro cidades americanas e os resultados são exibidos graficamente, ilustrando a recepção do sinal e o campo elétrico recebido ao longo das rotas. A partir desses resultados foram traçados contornos da área de recepção do sinal acima de 95% do tempo. Inferiu-se então que sua área de serviço recai normalmente sobre a área de serviço de 60 a 70 dB μ V/m de uma estação FM típica. Um estudo da cobertura do serviço digital na faixa de FM foi conduzido nos Estados Unidos [17], onde foi realizada a avaliação do campo elétrico recebido em função da qualidade da recepção do sinal digital, também com a finalidade de definir áreas de cobertura para taxas de 90 e 97% de serviço.

1.2. Características técnicas do Sistema HD Radio

O IBOC (*In-Band On-Channel*) é uma tecnologia de rádio digital conhecida internacionalmente como Sistema Digital C [18]. Esta tecnologia, desenvolvida pela *iBiquity Digital Corporation*, é apropriada para a introdução da Radiodifusão Sonora Digital (DSB-Digital Sound Broadcasting) porque permite que estações FM existentes transmitam o mesmo conteúdo de programação nos sinais analógico e digital sem a necessidade de novas alocações de espectro para o sinal digital. O sinal digital é posicionado dentro da máscara espectral analógica FM.

O sinal digital IBOC ocupa as bandas laterais inferior e superior da máscara de emissão de radiofrequência (RF) da transmissão analógica convencional em FM. O conteúdo transmitido na banda superior é o mesmo transmitido na banda inferior de modo que a perda de informação em uma das bandas laterais, causadas por exemplo por interferência de canal adjacente, não afete a performance de recepção do sinal IBOC, caracterizando uma diversidade de frequência. Além da diversidade de frequência o sistema apresenta também diversidade de atraso. Assim o receptor escolhe qual palavra código recebida da banda lateral inferior e superior possui a menor probabilidade de conter erros.

Esta tecnologia híbrida transmite simultaneamente o sinal analógico e sinal digital, com o mesmo conteúdo de áudio. Devido aos atrasos de processamento do sinal digital do sistema HD Radio, recomenda-se atrasar o áudio analógico para haver sincronização (alinhamento no tempo) com o áudio digital. Esse alinhamento no tempo é necessário para atender às transições (*blends*) do receptor HD Radio. Os níveis de áudio entre os dois *streams* de áudio também devem ser ajustados para que ocorra uma transição suave durante o *blend* do receptor. Quando o atraso e o ajuste do nível do áudio são feitos adequadamente, o *blend* entre os *streams* digital e analógico é imperceptível.

Como exemplos de aplicações, o IBOC pode transmitir serviços de áudio e serviços de dados, permitindo desde informações básicas relativas à programação (título da música, nome do artista), informações da estação, até a visualização de texto e o oferecimento de serviços adicionais que são previstos para apresentar informações de trânsito, previsão do tempo, resultados esportivos, bolsa de valores e comerciais.

1.2.1. Modos de operação do sistema HD Radio na faixa FM

O sistema IBOC oferece três modos de operação: Modo Híbrido (*Hybrid Mode*), Modo Híbrido Estendido (*Extended Hybrid Mode*) e Modo Todo Digital (*All Digital Mode*). Os dois primeiros modos são adequados para o período de transição no qual o sistema analógico permanece em operação, pois contêm o sinal analógico FM, enquanto que no terceiro modo somente existe o sinal digital. Os três modos estão de acordo com a máscara de emissão espectral do serviço em FM da FCC. Em cada modo o espectro é dividido em diversas bandas laterais que representam os vários grupos de subportadoras.

O sinal digital é transmitido nas bandas laterais principais primárias (PM-*Primary Main*) nos dois lados do sinal analógico no Modo Híbrido. O nível de potência em cada banda lateral é inferior à potência total do sinal analógico FM. Este pode ser monofônico ou estéreo e pode incluir canais auxiliares de comunicação (*Subsidiary Communications Authorization, SCA*).

No Modo Híbrido Estendido a largura de faixa das bandas laterais híbridas pode ser estendida na direção do sinal analógico FM para aumentar a capacidade de transmissão (kbps) do sinal

digital. Este espectro adicional, alocado no limite interno das bandas primárias principais, é denominado banda lateral primária estendida (*PX-Primary Extended*).

O Modo Todo Digital oferece a característica mais diferenciada do sistema, na qual o sinal analógico é removido e a largura de faixa das bandas laterais digitais primárias é totalmente estendida, conforme o modo Híbrido Estendido. Além disso, a forma de onda permite bandas laterais secundárias de baixa potência que são transmitidas no espectro liberado pelo sinal analógico FM.

1.2.2. Diversidades no tempo e na frequência

O sistema HD Radio apresenta diversidade de frequência e diversidade temporal a fim tornar o sistema mais robusto em relação à ação deletéria do canal de propagação RF.

A diversidade de frequência é feita transmitindo-se a mesma informação nas bandas laterais superior e inferior. A diversidade de frequência é utilizada a fim de se mitigar os efeitos do canal de desvanecimento plano. O princípio da diversidade de frequência para combater os efeitos deletérios do canal de desvanecimento plano considera que os sinais recebidos separados em frequência com uma distância maior que a banda de coerência do canal são descorrelatados. Assim a probabilidade de que ambos os sinais recebidos estejam fortemente atenuados no mesmo instante de tempo é menor que a probabilidade de que apenas um sinal de uma determinada banda de frequência esteja fortemente atenuado.

Já a diversidade temporal é utilizada para mitigar os efeitos da variação temporal do canal. Aqui dois sinais idênticos são transmitidos em diferentes instantes de tempo. Quando o receptor está em movimento (por exemplo, um veículo), os sinais recebidos nos dois instantes de tempo estarão descorrelatados quando a diferença de tempo corresponder a no mínimo metade do comprimento de onda de RF. A distância requerida depende da velocidade do receptor de modo que a diversidade temporal não é efetiva no combate a canal de desvanecimento plano quando o receptor está parado.

No sistema transmissor, antes da modulação dos dados das subportadoras pelos bits das palavras códigos, uma réplica de cada palavra código a ser transmitida redundantemente é gerada e atrasada por uma certa quantidade de tempo que depende da velocidade esperada do receptor, porém um atraso entre 10ms a 500ms deve ser adequado em muitas circunstâncias. A réplica atrasada das palavras códigos é utilizada para modular as subportadoras localizadas na banda lateral superior (inferior) enquanto que as palavras códigos originais são utilizada para modular as subportadoras localizadas na banda lateral inferior (superior). Como resultado o sinal composto pelas bandas laterais redundantes superior e inferior que correspondem ao sinal de uma palavra código específica possui diversidade temporal e em frequência.

No sistema receptor, o sinal recebido nas bandas laterais superior e inferior distorcido pelo canal e somado a ruído e interferência é demodulado para gerar a estimativa da palavra código transmitida. A demodulação da banda lateral superior é independente da demodulação da banda lateral inferior (exceto pelos intervalos entre os sinais que são conhecidos), sendo geradas duas estimativas da palavra código. Quando o transmissor utiliza uma réplica atrasada da palavra código para modular a banda lateral superior ou inferior, ou seja, utiliza diversidade temporal, a implementação do sistema de recepção inclui um atraso da mesma quantidade de tempo depois da demodulação da banda lateral superior ou inferior. Assim as duas estimativas da palavra

código correspondente à mesma palavra código transmitida (e consequentemente às mesmas fontes de bits de informação) devem ser comparadas no mesmo instante de tempo. O sistema receptor então: 1-combina as duas estimativas de palavras códigos para formar uma única estimativa que é então decodificada, ou 2-seleciona a estimativa de palavra código com menor probabilidade de possuir erros e a utiliza na decodificação.

A determinação do par “palavra código recebido-palavra código decodificada” é feita com base em uma palavra código por vez e não requer conhecimento prévio de qual palavra código (correspondente ao sinal na banda lateral superior ou inferior) que possui maior probabilidade de ser perturbado por ruído, interferência ou distorção do canal de propagação RF.

I.2.3. Mecanismo *Blend*

Nos sistemas de transmissão Híbrido e Híbrido Estendido, além das diversidades em frequência e temporal aplicadas no sinal digital HD Radio, o sistema também utilizam um método chamado de *blending* para mitigar os efeitos de interrupções intermitentes na recepção do sinal digital. Como no sistema HD Radio o sinal analógico e o digital transmitem a mesma informação, esse método utiliza-se da informação transmitida no sinal analógico quando há uma interrupção na recepção do sinal digital, realizando comutação entre os dois sinais.

A métrica utilizada pelo sistema para determinar se um sinal digital está interrompido e chavear para o modo analógico é a MER (*Modulation Error Ratio*) das subportadoras de referência. Um valor típico de MER de 11 dB na subportadora de dados e de referência é considerado para que o sistema entre no modo de *blend* [21].

I.2.4. Limites de emissões espectrais FM

Os requisitos para os limites de emissões espectrais nas transmissões Híbridas e na transmissão Digital Total são apresentados neste item [19].

Considera-se que zero (0) dBc é definido como a potência total da portadora analógica FM. Nas transmissões Híbridas o requisito é que o ruído e os sinais espúrios originados de todas as fontes, incluindo ruído de fase e produtos de intermodulação, devem atender aos limites de densidade espectral de potência apresentados na Figura I.1 e na Tabela I.1. Esses limites são aplicáveis para todos os níveis de potência permissíveis das bandas laterais superior e inferior.

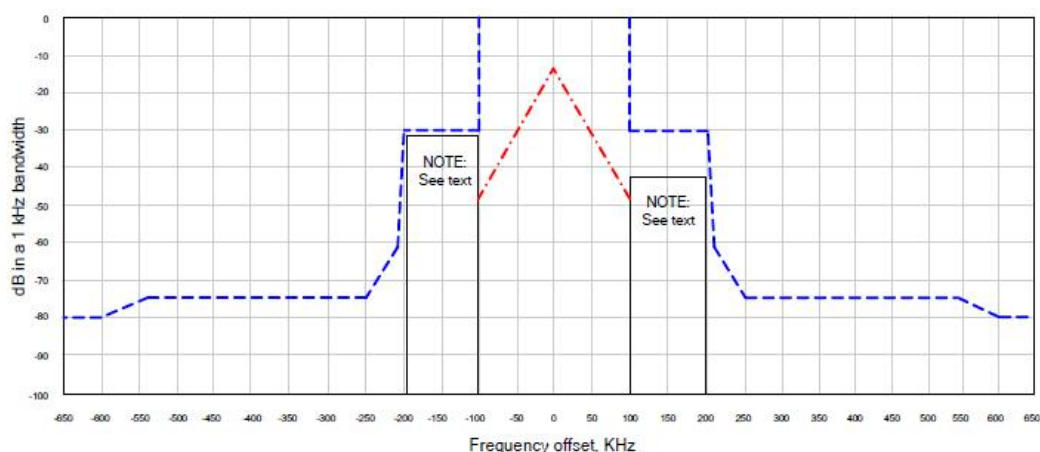


Figura I.1-Limites de emissão do Modo Híbrido e Híbrido Estendido HD Radio FM

Frequency Offset Relative to Carrier	Level, dBc/kHz
100 – 200 kHz offset	-30.0
200 – 207.5 kHz offset	$[-30.0 - (\text{frequency in kHz} - 200 \text{ kHz}) \cdot 4.187]$
207.5 – 250 kHz offset	$[-61.4 - (\text{frequency in kHz} - 207.5 \text{ kHz}) \cdot 0.306]$
250 – 540 kHz offset	-74.4
540 – 600 kHz offset	$[-74.4 - (\text{frequency in kHz} - 540 \text{ kHz}) \cdot 0.093]$
>600 kHz offset	-80.0

Tabela I.1-Limites de emissão do modo Híbrido HD Radio FM (*)

(*) Os requisitos de limites e emissão de ruído e espúrios refletem critérios aceitáveis de desempenho. Em certas circunstâncias, medidas adicionais (filtragem, supressão de emissão ativa) podem ser necessárias para reduzir as emissões espectrais dentro dos limites com o objetivo de reduzir interferências entre estações radiodifusoras.

As bandas laterais superiores e inferiores podem diferir em até 10 dB (bandas assimétricas). Normalmente os níveis de potência das bandas laterais são iguais, porém em determinados cenários as bandas assimétricas podem ser úteis para mitigação de interferência de canal adjacente. A Figura I.1 apresenta a diferença de 10 dB apenas como ilustração. Mesmo que elas tenham níveis diferentes de potência, o limite das emissões espectrais para as duas bandas é o mesmo.

Na transmissão do modo Todo Digital os requisitos também envolvem o ruído e os sinais espúrios. Os limites de densidade espectral de potência devem estar conforme a Figura I.2 e a Tabela I.2.

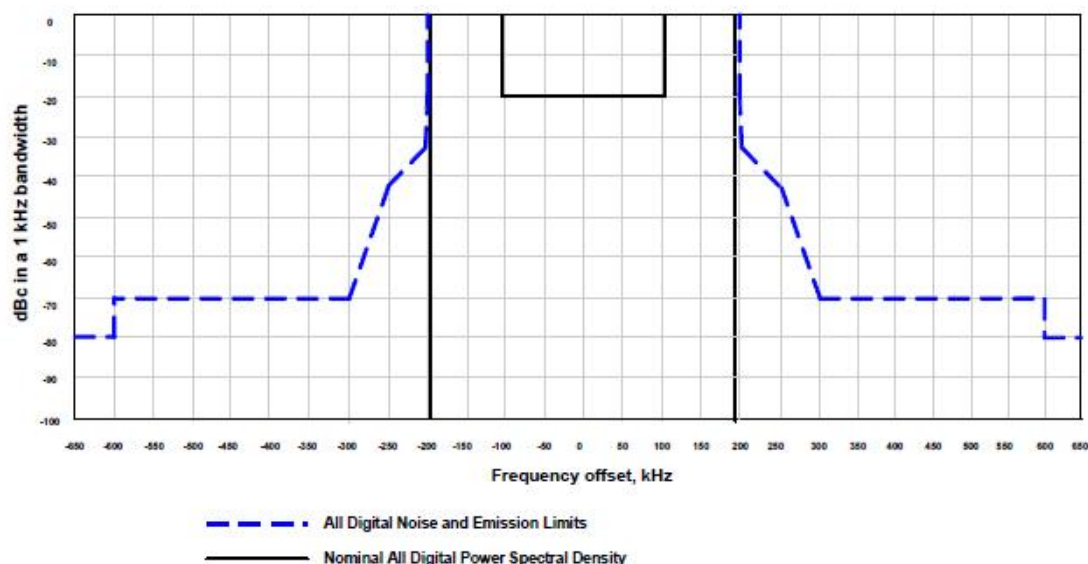


Figura I.2-Limites de emissão do Modo Todo Digital HD Radio FM

Frequency Offset Relative to Carrier	Level, dBc/kHz
200 – 207.5 kHz offset	$[-20 - (\text{frequency in kHz} - 200 \text{ kHz}) \cdot 1.733]$
207.5 – 250 kHz offset	$[-33 - (\text{frequency in kHz} - 207.5 \text{ kHz}) \cdot 0.2118]$
250 – 300 kHz offset	$[-42 - (\text{frequency in kHz} - 250 \text{ kHz}) \cdot 0.56]$
300 – 600 kHz offset	-70
>600 kHz offset	-80

Tabela I.2-Limites de emissão do Modo Todo Digital HD Radio FM

No Modo Todo Digital a região dentro de 100 kHz a partir do centro do canal deve ser reservada para subportadoras secundárias de baixo nível.

I.2.5. Canal de Controle do Sistema

O Canal de Controle do Sistema (SCCH) transporta informações de status e controle [20]. O controle do modo de serviços primário e secundários e o fator de escala de amplitude são enviados da Administração de Configuração para a Camada 1, enquanto que informação de sincronização é enviada da Camada 1 para Camada 2. Além disso, vários bits da sequência de dados de controle do sistema designados “reservados” são controlados nas camadas acima de L1 através da interface de controle de dados reservada primário e secundário.

Informações e controle são transportados em quadros discretos de transferência através de múltiplos canais lógicos. Esses quadros de transferência são também denominados como Unidades de Protocolo de Dados de Camada 2 (Layer 2 Protocol Data Units, L2 PDUs).

Os L2 PDUs variam em tamanho e formato dependendo do modo de serviço. O modo de serviço, o principal componente do controle do sistema, determina as características de transmissão de cada canal lógico. Após a avaliação dos requisitos das aplicações candidatas, camadas de protocolo mais altas selecionam modos de serviço que configuram os canais lógicos mais adequadamente. A variedade de canais lógicos reflete a flexibilidade intrínseca do sistema, o qual suporta entrega simultânea de várias combinações de dados e áudio digital.

Os modos de serviço determinam todas as configurações possíveis dos canais lógicos. Os modos de serviço primários ativos são MP1, MP2, MP3, MP11, MP5 e MP6, que configuram os canais lógicos primários. Os modos de serviço secundários ativos são MS1, MS2, MS3 e MS4, que configuram os canais lógicos secundários.

I.2.6. Canais Lógicos

Um canal lógico conduz L2 PDUs em quadros de transferência dentro da Camada 1 com um grau de serviço específico determinado pelo modo de serviço. A Camada 1 da interface aérea FM oferece onze (11) canais lógicos para protocolos de camadas mais altas. Nem todos os canais lógicos são usados em cada modo de serviço.

I.2.6.1. Canais Lógicos Primários

Existem cinco (5) canais lógicos primários que podem ser usados com as formas de onda Híbrida, Híbrida Estendida e Digital Total. Eles são denominados como P1, P2, P3, P4 e PIDS. O canal PIDS transmite informação de serviço da estação (*Station Information Service, SIS*). A Tabela I.3 apresenta a taxa de informação aproximada suportada por cada canal lógico primário como função do modo de serviço primário.

Service Mode	Approximate Information Rate (kbit/s)					Waveform
	P1	P2	P3	P4	PIDS	
MP1	98	N/A	N/A	N/A	1	Hybrid
MP2	98	N/A	12	N/A	1	Extended Hybrid
MP3	98	N/A	25	N/A	1	Extended Hybrid
MP11	98	N/A	25	25	1	Extended Hybrid
MP5	25	74	25	N/A	1	Extended Hybrid, All Digital
MP6	50	49	N/A	N/A	1	Extended Hybrid, All Digital

Tabela I.3-Taxa de informação aproximada dos canais lógicos primários

I.2.6.2. Canais Lógicos Secundários

Existem seis (6) canais lógicos secundários que são utilizados somente na forma de onda Digital Total. Eles são denominados S1, S2, S3, S4, S5 e SIDS. A Tabela I.4 apresenta a taxa de informação aproximada suportada por cada canal lógico secundário como função do modo de serviço secundário.

Service Mode	Approximate Information Rate (kbit/s)						Waveform
	S1	S2	S3	S4	S5	SIDS	
MS1	0	0	0	98	6	1	All Digital
MS2	25	74	25	0	6	1	All Digital
MS3	50	49	0	0	6	1	All Digital
MS4	25	98	25	0	6	1	All Digital

Tabela I.4-Taxa de informação aproximada dos canais lógicos secundários.

I.2.6.3. Funcionalidade de Canais Lógicos

Os canais lógicos P1 a P4 e S1 a S5 são designados para transmitir áudio e dados, enquanto que os canais Serviço de Dados Primário do IBOC (PIDS) e Serviço de Dados Secundário do IBOC

(SIDS) são designados para transmitir dados do Serviço de Informação da Estação (*Station Information Service*, SIS).

O desempenho de cada canal lógico é completamente descrito através de três parâmetros de caracterização: transferência, latência e robustez. A codificação de canal, o mapeamento espectral, a profundidade de entrelaçamento e o atraso de diversidade digital são os componentes destes parâmetros de caracterização. O modo de serviço configura exclusivamente estes componentes dentro da Camada 1 para cada canal lógico ativo, assim determinando a caracterização apropriada de parâmetros.

Além disso, o modo de serviço especifica o enquadramento e a sincronização dos quadros de transferência por meio de cada canal lógico ativo. No documento “HD Radio Air Interface. Design Description Layer 1 FM” [20], capítulo 7, há a descrição detalhada dos canais lógicos e suas configurações.

I.2.7. Partições de frequência e convenções espectrais nos modos de transmissão

O sinal digital é modulado utilizando OFDM (multiplexação por divisão ortogonal de frequência). O OFDM é um esquema de modulação paralela no qual o fluxo de dados modula um grande número de subportadoras ortogonais, que são transmitidas simultaneamente. O OFDM é flexível e permite mapeamento de canais lógicos de diferentes grupos de subportadoras.

As subportadoras OFDM são estruturadas em partições de frequências. Cada partição consiste de dezoito subportadoras de dados e uma subportadora de referência conforme apresentado na Figura I.3 (Ordenação A) e Figura I.4 (Ordenação B). A posição de cada subportadora de referência (Ordenação A ou B) varia com o local da partição de frequência dentro do espectro.

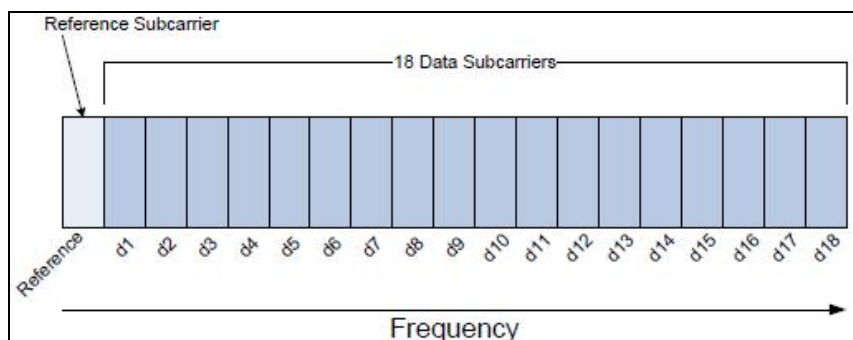


Figura I.3-Partição de frequência – Ordenação A

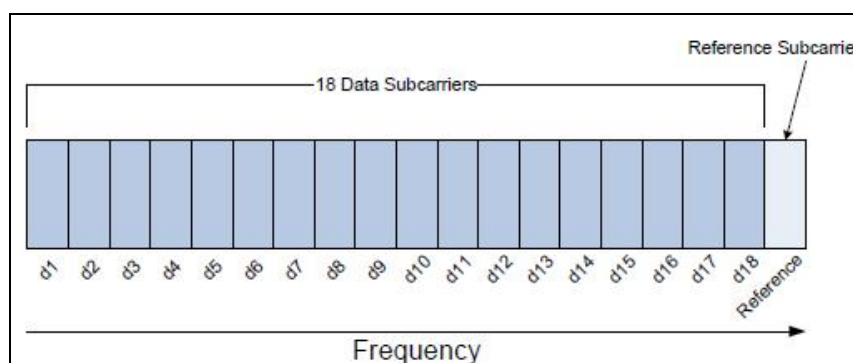


Figura I.4-Partição de frequência – Ordenação B

Para cada partição de frequência, as subportadoras de dados d1 até d18 transportam dados ou áudio codificado da Camada 2, enquanto que as subportadoras de referência transportam informações de controle do sistema da Camada 1. As subportadoras são numeradas de -546 até 0, que é a frequência central, e até 546 na parte superior final da alocação de frequências do canal.

Além das subportadoras de referência fixas dentro de cada partição de frequência, dependendo do modo de serviço, até cinco (5) subportadoras de referência adicionais podem ser inseridas no espectro nos seguintes números de subportadoras: -546, -279, 0, +279 e +546. O efeito geral é uma distribuição regular de subportadoras de referência pelo espectro. Para conveniência de notação, cada subportadora de referência possui identificação única entre 0 e 60. Todas as subportadoras de referência da banda lateral inferior são apresentadas na Figura I.5 e todas as superiores estão na Figura I.6. As figuras indicam a relação entre números de subportadoras de referência e número de subportadoras OFDM.

Cada espectro a ser descrito apresenta um número de subportadoras e uma frequência central de um certo conjunto de portadoras OFDM. A frequência central de uma subportadora é calculada multiplicando-se o número da subportadora pelo espaçamento de subportadora OFDM Δf . O centro da subportadora 0 é localizado em 0 Hz. Neste contexto, a frequência central é relativa ao canal alocado de radiofrequência (RF).

Como exemplo, a banda lateral superior primária principal (*Primary Main*) está localizada entre as subportadoras 356 e 546 cujas frequências centrais são localizadas em 129,361 Hz e 198,402 Hz respectivamente. A largura de frequência da banda lateral superior primária principal é 69,041 Hz (198,402 Hz a 129,361 Hz).

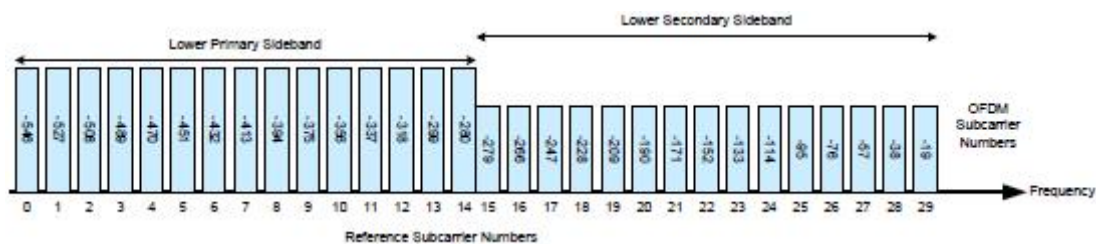


Figura I.5-Mapeamento espectral de subportadoras de referência da banda lateral inferior

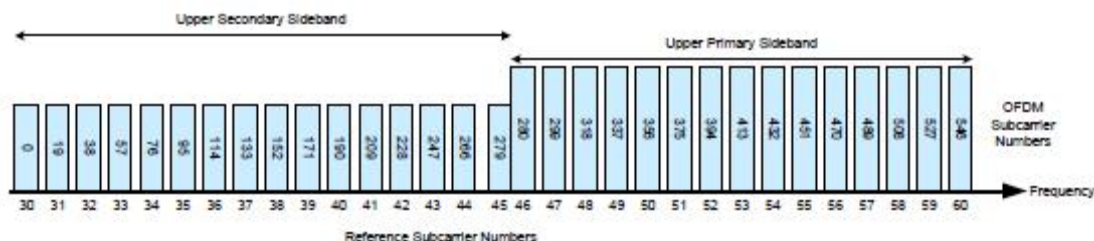


Figura I.6-Mapeamento espectral de subportadoras de referência da banda lateral superior

I.2.7.1. Modo Híbrido

Neste modo o sinal digital é inserido em largura de faixa de 69.041 Hz, localizada a 129.361 Hz em cada lado do sinal analógico FM, tendo como referência a frequência da portadora [20]. A Figura I.7 apresenta a inserção do sinal digital.

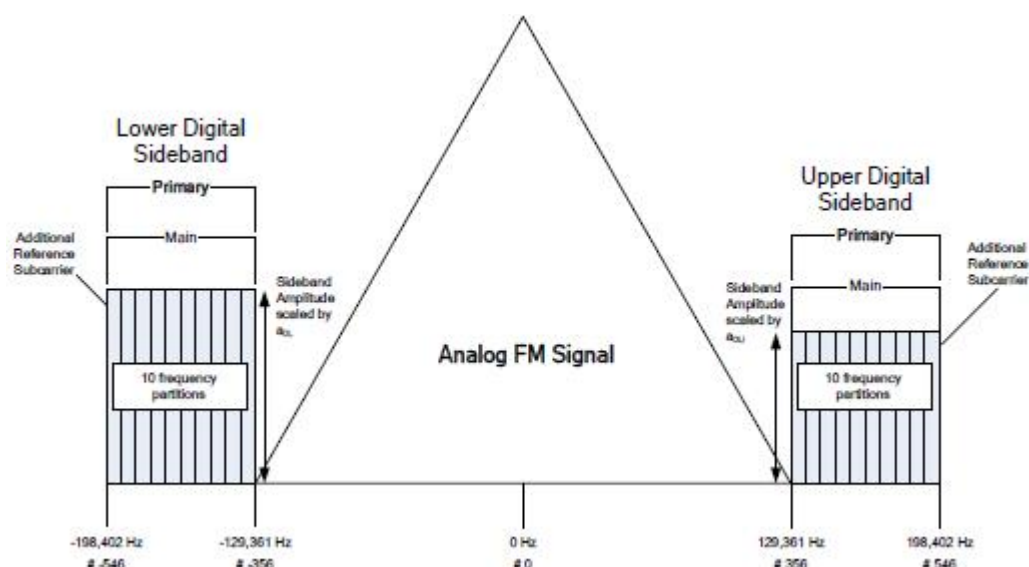


Figura I.7-Inserção do sinal digital junto ao sinal FM, Modo Híbrido, modo de serviço MP1

O sinal digital no Modo Híbrido IBOC é transmitido nas bandas laterais ao sinal analógico FM e cada banda está aproximadamente 23 dB abaixo da potência total do sinal FM. Estas bandas híbridas são denominadas de bandas laterais Primárias Principais (PM – *Primary Main*). Cada banda lateral PM consiste de 10 partições de frequência que são alocadas entre subportadoras 356 até 545, ou -356 a -545. As subportadoras 546 e -546, também incluídas nas bandas laterais PM, são adicionais. A amplitude de cada subportadora é escalonada por um fator de escala de amplitude, como indicado na Tabela I.5, que apresenta as características das bandas laterais primárias principais (PM) superior e inferior para o modo Híbrido.

Banda Lateral	Número de partições de frequência	Ordenação da partição de frequência	Faixa de subportadoras	Frequência de subportadoras (Hz em relação ao centro do canal)	Largura de banda (Hz)	Fator de escala de amplitude (*)	Observação
Primária Principal Superior	10	A	356 a 546	129,361 a 198,402	69,041	a0U	Inclui subport. ref. adicional 546
Primária Principal Inferior	10	B	-356 a -546	-129,361 a -- 198,402	69,041	a0L	Inclui subport. ref. adicional - 546

Tabela I.5-Resumo da forma de onda Híbrida, modo de serviço MP1

(*) A Referência [19] apresenta detalhes sobre os fatores de escala de amplitude.

Todas as subportadoras dentro da banda lateral inferior utilizam um fator de escala comum a0L, assim essas subportadoras têm a mesma amplitude relativa entre si. O mesmo ocorre na parte superior, com fator de escala a0U. Entretanto, a0L e a0U podem ser diferentes; as bandas laterais superior e inferior podem diferir no nível médio de potência em até 10 dB (bandas laterais assimétricas). Normalmente os níveis de potência das bandas laterais são iguais, mas em certos cenários, bandas assimétricas podem ser úteis para mitigação da interferência de canal

adjacente. O documento “HD Radio FM Transmission System Specifications” [19] apresenta mais detalhes.

O sinal analógico hospedeiro pode ser tipo monofônico ou estéreo, podendo incluir canais de comunicação auxiliares (SCA).

I.2.7.2. Modo Híbrido Estendido

As bandas laterais digitais desse modo são estendidas em direção ao sinal analógico FM para aumento da capacidade digital. A forma de onda desse modo é criada pela adição de bandas laterais primárias estendidas (*PX - Primary Extended*) às bandas laterais primárias principais do Modo Híbrido. A Figura I.8 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o espectro dessa forma de onda. Dependendo do modo de serviço, uma, duas ou quatro partições de frequência podem ser adicionadas no limite das bandas laterais primárias principais, próximas ao sinal analógico.

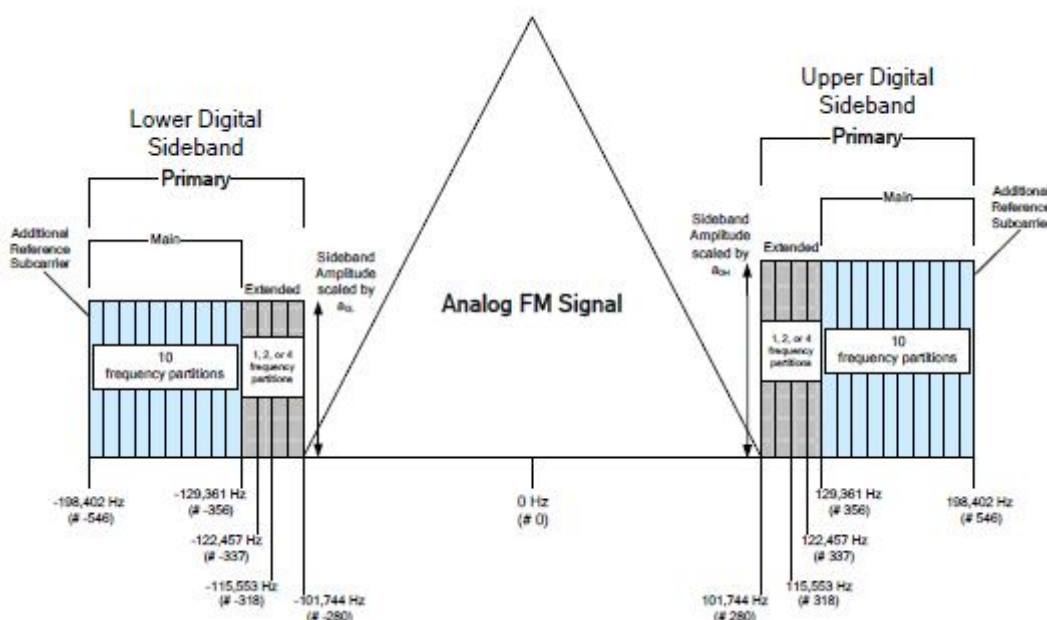


Figura I.8-Inserção do sinal digital junto ao sinal FM, modo híbrido estendido

Cada banda lateral primária consiste de 10 partições de frequência e uma subportadora de referência adicional abrangendo subportadoras 356 a 546, ou -356 a -546. As bandas laterais PX superiores incluem subportadoras 337 a 355 (uma partição de frequência), 318 a 355 (duas partições de frequência), ou 280 a 355 (quatro partições de frequência). As bandas laterais PX inferiores incluem subportadoras -337 a -355 (uma partição de frequência), -318 a -355 (duas partições de frequência), ou -280 a -355 (quatro partições de frequência).

A amplitude de cada subportadora é escalonada por um fator de escala em amplitude conforme indicado na Tabela I.6. Todas as subportadoras dentro da banda lateral inferior utilizam um fator de escala comum a_{0L} , então elas tem mesma amplitude relativa em relação às outras. O mesmo acontece na banda lateral superior, em que as subportadoras utilizam o mesmo fator de escala a_{0U} . Entretanto esses dois fatores podem ser diferentes, e as bandas laterais superiores e inferiores podem diferir em potência em 10 dB (bandas assimétricas). Tal como empregado na

configuração híbrida, tem-se normalmente os níveis iguais de potência, mas em certos cenários, as bandas laterais assimétricas podem ser úteis para mitigação de interferência de canal adjacente [19].

A Tabela I.6 apresenta as características das bandas laterais primárias principais (PM) superior e inferior para o modo Híbrido Estendido.

Banda Lateral	Número de partições de frequência	Ordenação da partição de frequência	Faixa de subportadoras	Frequência de subport. (Hz em relação ao centro do canal)	Faixa de frequências (Hz)	Fator de escala de amplitude (*)	Observação
Primária Principal Superior	10	A	356 a 546	129,361 a 198,402	69,041	a0U	Inclui subport. ref. adicional 546
Primária Principal Inferior	10	B	-356 a -546	-129,361 a -198,402	69,041	a0L	Inclui subport. ref. adicional - 546
Primária Estend. Superior (1 partição freq)	1	A	337 a 355	122,457 a 128,997	6,540	a0U	----
Primária Estend. Inferior (1 partição freq)	1	B	-337 a -355	-122,457 a -128,997	6,540	a0L	----
Primária Estend. Superior (2 partições freq)	2	A	318 a 355	155,553 a 128,997	13,444	a0U	----
Primária Estend. Inferior (2 partições freq)	2	B	-318 a -355	-155,553 a - 128,997	13,444	a0L	----
Primária Estend. Superior (4 partições freq)	4	A	280 a 355	101,744 a 128,997	27,253	a0U	----
Primária Estend. Inferior (4 partições freq)	4	B	-280 a -355	-101,744 a - 128,997	27,253	a0L	----

Tabela I.6-Resumo da forma de onda Híbrida Estendida, modos de serviço MP2, MP3, MP11, MP5 e MP6

I.2.7.3. Modo Todo Digital

Esse modo substitui o sinal analógico com sinais digitais adicionais e também inclui os sinais digitais dos Modos Híbrido e Híbrido Estendido. As bandas laterais digitais são estendidas da mesma forma que ocorre no Modo Híbrido Estendido e o sinal analógico é removido e substituído por bandas laterais secundárias de baixa potência, promovendo o aumento da capacidade digital. O espectro dessa forma de onda é apresentado na Figura I.9.

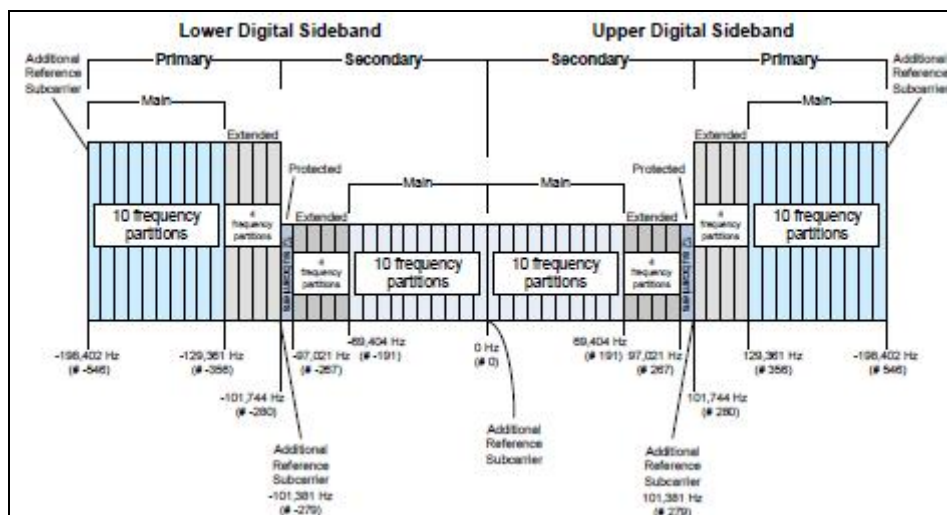


Figura I.9-Espectro do Modo Digital Total, modos de serviço MP5 e MP6, MS1 até MS4

Além das 10 (dez) principais partições de frequência, todas as 4 (quatro) partições de frequência estendidas estão presentes em cada banda lateral primária de toda a forma de onda Todo Digital. Cada banda secundária também possui 10 (dez) partições de frequência principais secundárias principais (*Secondary Main*, SM) e 4 (quatro) secundárias estendidas (*Secondary Extended*, SX). Diferentemente das bandas laterais primárias, entretanto, as partições de frequência secundárias principais são mapeadas próximas ao centro do canal, com as partições secundárias estendidas mais distantes do centro.

Cada banda lateral secundária também suporta uma pequena região denominada Protegida Secundária (SP) que consiste em 12 (doze) subportadoras OFDM e as subportadoras de referência #279 e #279. Essas subportadoras são referidas como “protegidas” porque estão localizadas na área do espectro menos provável de ser afetada por interferência digital ou analógica. Uma subportadora de referência adicional é colocada no centro do canal (#0). A ordenação da partição de frequência da região SP não se aplica, uma vez que a região SP não contém partições como definidas nas Figura I.1 e Figura I.2.

A faixa espectral total do modo Digital Total é 396,803 Hz. A amplitude de cada subportadora é escalonada por um fator de escala de amplitude conforme detalhado na Referência [20]. Os fatores de escala de amplitude das bandas laterais secundárias, a2 até a5, são selecionadas pelo usuário.

I.2.8. Níveis das bandas laterais digitais

O escalonamento de amplitude de cada subportadora OFDM dentro de cada banda lateral é dado na Tabela I.7 para os 3 (três) modos de operação. Os valores dos Modos Híbrido e Híbrido Estendido são especificados em relação à potência analógica FM. O valor 1 (um) produziria potência de subportadora igual à potência total da portadora FM analógica não modulada. Os valores para o Modo Todo Digital são relativos à potência digital autorizada alocada para este modo.

Waveform	Service Mode	Sidebands	Amplitude Scale Factor Notation	Power Spectral Density, dBc per Subcarrier		Power Spectral Density in a 1 kHz Bandwidth, dBc	
				Min	Max	Min	Max
Hybrid	MP1	Primary	a_{0L}	-45.8	-35.8	-41.4	-31.4
			a_{0U}	-45.8	-35.8	-41.4	-31.4
Extended Hybrid	MP2, MP3, MP11, MP5, MP6	Primary	a_{0L}	-45.8	-35.8	-41.4	-31.4
			a_{0U}	-45.8	-35.8	-41.4	-31.4
All Digital	MP5, MP6	Primary	a_1	-27.3		-22.9	
	MS1 – MS4	Secondary	a_2	-32.3		-27.9	
		Secondary	a_3	-37.3		-32.9	
		Secondary	a_4	-42.3		-37.9	
		Secondary	a_5	-47.3		-42.9	

Tabela I.7-Escalonamento de subportadoras OFDM

Para os Modos Híbrido e Híbrido Estendido os valores mínimos de a_{0U} e a_{0L} foram escolhidos para que a potência média total na banda lateral primária principal (superior ou inferior) seja 23 dB abaixo da potência da portadora FM analógica não modulada. A potência de cada banda lateral primária pode ser individualmente aumentada de acordo com os valores máximos mostrados na Tabela I.7. Entretanto a potência média total em cada banda lateral primária principal (superior ou inferior) está sujeita ao limite superior de 13 dB abaixo da potência da portadora FM analógica não modulada.

Para o Modo Todo Digital, o valor de a_1 foi escolhido de tal forma que a potência média de todas as subportadoras digitais primárias combinadas é igual a 1 (um). Os valores de a_2 a a_5 foram escolhidos de tal forma que a potência média total nas subportadoras digitais secundárias (superior e inferior) estejam na faixa de 5 a 20 dB abaixo da potência total nas subportadoras digitais primárias. A escolha de um valor de a_2 até a_5 é determinada pela seleção do fator de escala de amplitude (ASF) recebida de L2.

I.2.8.1. Potência da portadora digital FM Híbrida e Híbrida Estendida

As transmissões Híbridas utilizam dois conjuntos de subportadoras OFDM localizadas até 198 kHz acima e abaixo da frequência central da portadora analógica. O Modo de serviço Híbrido básico (MP1) utiliza 191 subportadoras por banda lateral na frequência aproximadamente ± 129 kHz da frequência central. Os modos de serviço híbrido estendido MP2, MP3, e MP11 adicionam subportadoras adicionais próximas à portadora analógica, com subportadoras MP11 iniciando em aproximadamente ± 101 kHz.

Como apresentado na Figura I.10, cada partição de frequência consiste de 19 subportadoras (exceto por 2 subportadoras de referência extras no limite das partições primárias principais). Na banda lateral digital inferior, a Figura I.10 também detalha cada grupo de bandas laterais para cada modo de serviço híbrido. A potência de cada subportadora é colocada em -45.8 dBc

(dB abaixo da portadora analógica de referência) para razão de potência total integrada digital para analógica de -20 dBc no modo de serviço MP1.

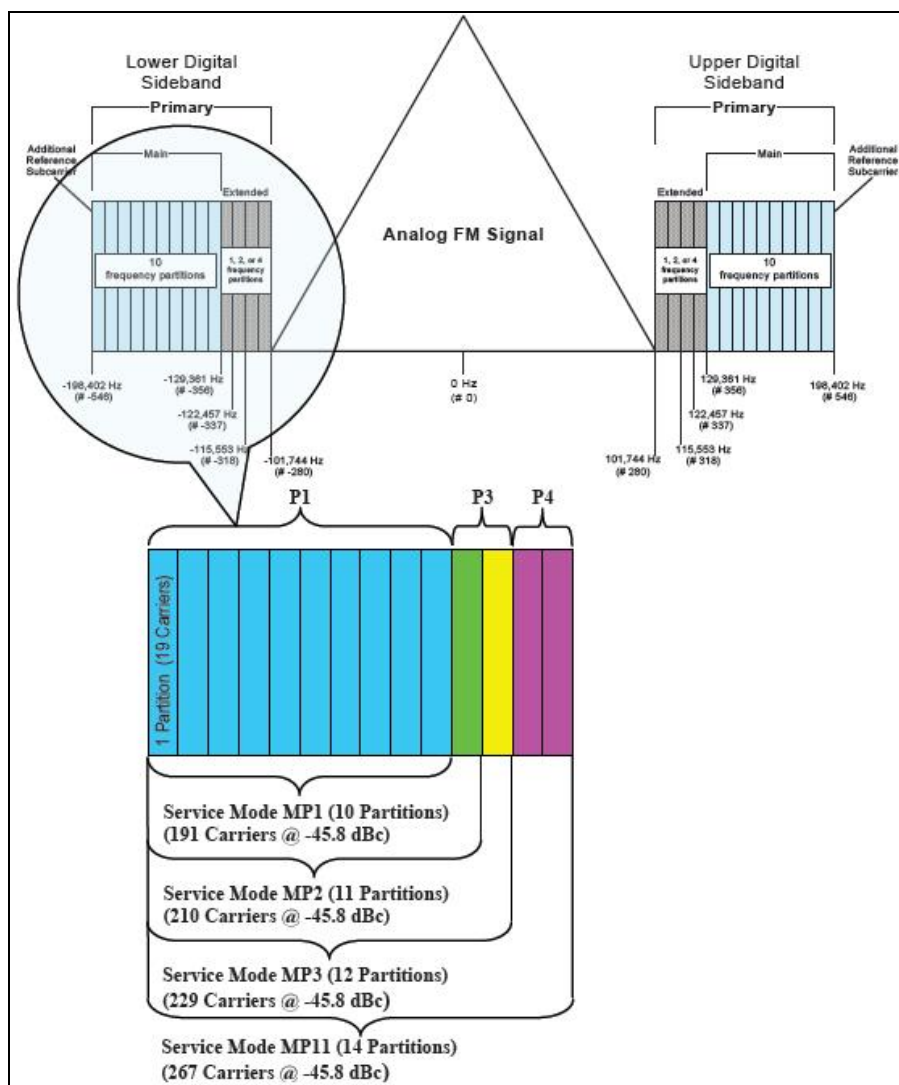


Figura I.10-Modo Híbrido Estendido

II. Resultados tabelados

II.1. Detalhes das rotas utilizadas nas medições HD Radio

Neste apêndice são descritos os detalhes sobre a localização e as medições das rotas.

Pontos	Distância ao transmissor (km)	Latitude	Longitude
Ponto de referência	2,45	-19°56'15.8568"	-44°0'59.6268"
R1P1	2,18	-19°55'13.6308"	-44°3'3.096"
R1P2	7,53	-19°55'39.252"	-44°6'5.418"
R1P3	10,60	-19°55'30.6192"	-44°7'52.4568"
R1P4	18,91	-19°58'39"	-44°12'0.5868"
R2P1	2,08	-19°56'1.014"	-44°1'0.1452"
R2P2	7,92	-19°58'42.8808"	-43°59'14.2332"
R2P3	11,42	-20°0'9.378"	-43°57'55.494"
R2P4	16,64	-20°3'40.3092"	-43°58'41.016"
R3P1	1,74	-19°55'29.208"	-44°0'51.4512"
R3P2	6,59	-19°53'29.76"	-43°58'28.3008"
R3P3	11,34	-19°52'5.358"	-43°56'11.0112"
R3P4	22,50	-19°49'39.9972"	-43°50'17.9592"
R4P1	1,81	-19°56'8.718"	-44°1'58.8972"
R4P2	5,86	-19°52'21.7992"	-44°3'19.2312"
R4P3	12,22	-19°49'20.7372"	-44°5'3.588"
R4P4	22,39	-19°44'59.4888"	-44°8'41.838"
C1P1	9,16	-19°55'0.012"	-43°56'32.8992"
C1P2	7,54	-19°55'36.5088"	-43°57'29.808"
C1P3	9,58	-19°55'46.65"	-43°56'20.148"
C1P4	10,56	-19°56'23.316"	-43°55'52.5468"
C1P5	11,12	-19°56'20.796"	-43°55'32.2608"
C1P6	10,63	-19°54'50.634"	-43°55'42.618"
C2P1	9,16	-19°52'10.452"	-43°57'37.8432"
C2P2	7,39	-19°52'36.048"	-43°58'34.2948"
C2P3	8,78	-19°51'48.1608"	-43°58'16.014"
C3P1	3,54	-19°53'19.0428"	-44°2'13.4808"
C3P2	3,65	-19°53'15.036"	-44°2'12.0408"
C3P3	3,87	-19°53'8.25"	-44°1'20.5608"
C3P4	2,78	-19°53'51.468"	-44°1'2.8308"
C3P5	2,31	-19°53'56.5872"	-44°1'56.8308"
C4P1	3,19	-19°56'52.8972"	-44°1'29.244"
C4P2	4,77	-19°57'45.1332"	-44°1'35.4432"
C4P3	4,33	-19°57'30.5208"	-44°2'2.4648"

Tabela II.1-Detalhes da localização dos pontos de medições HD Radio

Percurso	Rota	Comprimento (km)
R1P1 a R1P2	Radial 1	7,53
R1P2 a R1P3	Radial 1	10,6
R1P3 a R1P4	Radial 1	18,91
R2P1 a R2P2	Radial 2	7,92
R2P2 a R2P3	Radial 2	11,42
R2P3 a R2P4	Radial 2	16,64
R3P1 a R3P2	Radial 3	6,59
R3P2 a R3P3	Radial 3	11,34
R3P3 a R3P4	Radial 3	22,50
R4P1 a R4P2	Radial 4	5,86
R4P2 a R4P3	Radial 4	12,22
R4P3 a R4P4	Radial 4	22,39
C1P1 a C1P2	Circular 1	7,54
C1P2 a C1P3	Circular 1	9,57
C1P3 a C1P4	Circular 1	10,56
C1P4 a C1P5	Circular 1	11,12
C1P5 a C1P6	Circular 1	10,63
C1P6 a C1P1	Circular 1	9,16
C2P1 a C2P2	Circular 2	7,38
C2P2 a C2P3	Circular 2	8,78
C2P3 a C2P1	Circular 2	9,16
C3P1 a C3P2	Circular 3	3,65
C3P2 a C3P3	Circular 3	3,87
C3P3 a C3P4	Circular 3	2,79
C3P4 a C3P5	Circular 3	2,31
C3P5 a C3P1	Circular 3	3,53
C4P1 a C4P2	Circular 4	4,77
C4P2 a C4P3	Circular 4	4,33
C4P3 a C4P1	Circular 4	3,19

Tabela II.2-Detalhes dos trechos para medições móveis

II.2. Detalhes dos Resultados das Medições HD Radio

Nas tabelas a seguir são apresentados os detalhes dos resultados,

Pontos	Distância ao transmissor (km)	Rx_Mode	Campo Digital Mediano (dBμV/m)	SNR Mediano (dB)	Campo Analógico Mediano (dBμV/m)
Ponto de	2,45	1	62,06	16,71	77,73
R1P1	2,18	1	49,95	17,01	67,73
R1P2	7,53	0	31,17	-10,00	40,73
R1P3	10,60	0	27,24	-10,00	39,73
R1P4	18,91	0/1	29,79	-3,84	33,73
R2P1	2,08	1	52,35	13,31	67,73
R2P2	7,92	1	54,56	16,09	69,73
R2P3	11,42	1	51,66	13,66	69,73
R2P4	16,64	0	40,22	-10,00	45,73
R3P1	1,74	1	50,08	11,15	64,73
R3P2	6,59	0/1	28,84	2,31	52,73
R3P3	11,34	0	24,67	-10,00	39,73
R3P4	22,50	0	24,62	-1,44	41,73
R4P1	1,81	1	60,86	17,61	76,73
R4P2	5,86	1	41,61	9,37	61,73
R4P3	12,22	0	29,53	-10,00	41,73
R4P4	22,39	0	29,26	-10,00	37,73
C1P1	9,16	0/1	35,99	8,69	53,73
C1P2	7,54	0	36,09	0,07	55,73
C1P3	9,58	0	38,37	1,41	51,73
C1P4	10,56	0	33,43	-10,00	49,73
C1P5	11,12	0	53,24	-10,00	59,73
C1P6	10,63	0	36,13	-3,84	46,73
C2P1	9,16	0/1	32,06	2,63	45,73
C2P2	7,39	0	30,01	-10,00	47,73
C2P3	8,78	1	39,43	9,62	60,73
C3P1	3,54	1	52,28	15,94	68,73
C3P2	3,65	1	55,33	17,35	70,73
C3P3	3,87	1	44,68	10,36	63,73
C3P4	2,78	1	51,14	13,83	70,73
C3P5	2,31	1	56,20	17,64	72,73
C4P1	3,19	1	56,63	15,52	72,73
C4P2	4,77	1	54,73	9,29	68,73
C4P3	4,33	1	46,43	15,68	64,73

Tabela II.3-Resultados do HD Radio para recepção em pontos fixos

Ponto	Distância em relação ao transmissor (km)	Média Aritmética das Notas do receptor NKS	Média Aritmética das Notas do receptor TOSHIBA	Qualidade do Áudio FM	Intensidade do Campo Elétrico Analógico Mediano (dBμV/m)
Ponto de	2,45	4,0	4,8	4,4	77,73
R1P1	2,18	4,0	4,5	4,3	67,73
R1P2	7,53	2,4	1,5	1,9	40,73
R1P3	10,60	2,4	2,3	2,3	39,73
R1P4	18,91	1,3	2,3	1,8	33,73
R2P1	2,08	3,9	2,0	2,9	67,73
R2P2	7,92	3,2	3,8	3,5	69,73
R2P3	11,42	3,3	3,8	3,5	69,73
R2P4	16,64	2,3	1,2	1,8	45,73
R3P1	1,74	3,3	3,9	3,6	64,73
R3P2	6,59	2,1	3,9	3,0	52,73
R3P3	11,34	1,2	1,8	1,5	39,73
R3P4	22,50	3,0	1,0	2,0	41,73
R4P1	1,81	4,5	4,8	4,6	76,73
R4P2	5,86	3,9	4,1	4,0	61,73
R4P3	12,22	4,4	4,6	4,5	41,73
R4P4	22,39	2,3	2,0	2,2	37,73
C1P1	9,16	3,6	2,6	3,1	53,73
C1P2	7,54	1,0	3,0	2,0	55,73
C1P3	9,58	1,0	1,0	1,0	51,73
C1P4	10,56	1,2	1,0	1,1	49,73
C1P5	11,12	1,0	1,0	1,0	59,73
C1P6	10,63	1,0	1,4	1,2	46,73
C2P1	9,16	3,1	3,9	3,5	45,73
C2P2	7,39	1,4	2,0	1,7	47,73
C2P3	8,78	1,6	4,1	2,8	60,73
C3P1	3,54	4,2	4,6	4,4	68,73
C3P2	3,65	3,6	4,2	3,9	70,73
C3P3	3,87	3,2	4,1	3,7	63,73
C3P4	2,78	3,7	1,4	2,5	70,73
C3P5	2,31	4,2	4,3	4,2	72,73
C4P1	3,19	2,2	3,4	2,8	72,73
C4P2	4,77	4,0	4,5	4,3	68,73
C4P3	4,33	3,6	3,0	3,3	64,73

Tabela II.4-Resultados do áudio FM para recepção em pontos fixos

Percurso	Rx_Mode=1 (%)	SNR Mediano (dB)
R1P1 a R1P2	76,78	12,36
R1P2 a R1P3	0,17	-3,84
R1P3 a R1P4	7,47	-3,84
R2P1 a R2P2	65,35	9,31
R2P2 a R2P3	82,93	11,61
R2P3 a R2P4	10,80	-3,84
R3P1 a R3P2	82,77	10,95
R3P2 a R3P3	15,89	-3,84
R3P3 a R3P4	1,81	-10
R4P1 a R4P2	99,61	13,94
R4P2 a R4P3	50,02	4,12
R4P3 a R4P4	0	-10
C1P1 a C1P2	47,21	3,73
C1P2 a C1P3	16,14	-1,13
C1P3 a C1P4	7,10	-3,84
C1P4 a C1P5	26,56	-3,84
C1P5 a C1P6	3,26	-3,84
C1P6 a C1P1	38,94	2,61
C2P1 a C2P2	17,19	-3,84
C2P2 a C2P3	53,00	5,11
C2P3 a C2P1	27,62	-0,4
C3P1 a C3P2	100	16,95
C3P2 a C3P3	100	13,15
C3P3 a C3P4	96,98	14,85
C3P4 a C3P5	99,72	16,9
C3P5 a C3P1	100	15,16
C4P1 a C4P2	90,40	13,76
C4P2 a C4P3	87,37	14,28
C4P3 a C4P1	100	12,95

Tabela II.5-Resultados para recepção móvel.

III. Procedimento para obtenção da Intensidade de Campo Elétrico Digital

O receptor profissional HD Radio registra a intensidade do campo elétrico da portadora do sinal analógico. No entanto não disponibiliza a intensidade de campo elétrico do sinal digital. Como a relação de proteção entre o sinal analógico e digital, definido para a transmissão simulcast com antenas separadas, não se mantém à medida que os sinais se propagam, variando de acordo com o ambiente, faz-se necessário o registro de medição do sinal digital em cada ponto de medida, para que a intensidade de campo elétrico possa ser calculada nesses pontos.

Este item descreve o procedimento utilizado para cálculo da intensidade de campo elétrico referente ao sinal digital. Antes do início dos testes oficiais, o engenheiro da empresa iBiquity sugeriu uma metodologia para a obtenção desse parâmetro, a qual se encontra descrita logo abaixo. No entanto, após análise da metodologia pela equipe técnica de medição, melhorias foram propostas, sendo essa metodologia modificada utilizada durante toda a campanha de medição. A seguir será detalhada a metodologia proposta pela iBiquity bem como as melhorias implementadas pela equipe técnica de medição.

III.1. Metodologia proposta pela iBiquity

A metodologia proposta pela iBiquity consiste nos seguintes passos:

- a) Escolher um raio entre 1 a 2 km do transmissor e traçar um círculo, conforme Figura III.1.

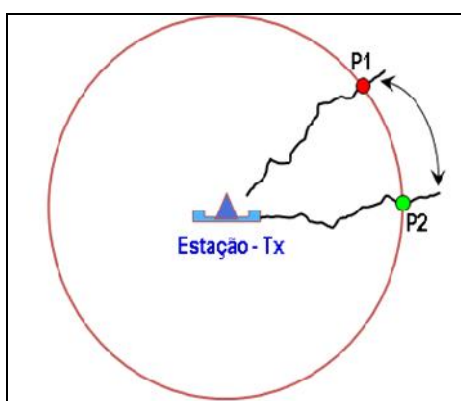


Figura III.1-Raio para determinação da relação de potência entre os sinais analógico e digital

- b) Escolher na direção de cada radial do planejamento da campanha de medição um ponto com visada direta, e em cada ponto escolhido capturar 6 (seis) telas (*print screen*) do analisador de espectro no modo ACPR (*Adjacent Channel Power Ratio*), sendo 5 (cinco) delas com detecção instantânea e uma no modo *average*.
- c) Por meio das cinco telas do analisador de espectro com detecção instantânea, calcular o valor do ACPR médio para cada banda lateral do sinal digital, ou seja, para suas bandas laterais superior e inferior, por meio da seguinte equação:

$$ACPR_{Avg} = 10 * \log_{10}(Z),$$

onde

$$Z = \frac{10^{\frac{ACPR_1}{10}} + 10^{\frac{ACPR_2}{10}} + 10^{\frac{ACPR_3}{10}} + 10^{\frac{ACPR_4}{10}} + 10^{\frac{ACPR_5}{10}}}{5},$$

sendo $ACPR_n$ o valor da medida de potência existente nos canais adjacentes, referente a cada *print screen* coletado com o analisador de espectro com detecção instantânea.

- d) Determinar a potência total do sinal digital por meio dos valores dos $ACPR_{Avg}$ calculado para cada banda lateral, conforme equação abaixo:

$$Pot_{Total} = 10 * \log_{10} \left(10^{\frac{ACPR_{Avg}(Banda Superior)}{10}} + 10^{\frac{ACPR_{Avg}(Banda Inferior)}{10}} \right)$$

- e) De posse da última tela (*print screen*), obtida com o analisador de espectro no modo *average*, calcula-se a potência média total, da seguinte maneira:

$$Pot_{MédiaTotal} = 10 * \log_{10} \left(10^{\frac{ACPR_a}{10}} + 10^{\frac{ACPR_b}{10}} \right)$$

sendo:

$ACPR_a$ o valor ACPR da banda superior do sinal digital obtida com o analisador de espectro no modo *average*; e

$ACPR_b$ o valor ACPR da banda inferior do sinal digital obtida com o analisador de espectro no modo *average*.

- f) Por fim, calcula-se a diferença entre a potência média total e a potência total, que corresponde à diferença das potências recebidas entre o sinal analógico e digital, conforme equação abaixo:

$$Dif = Pot_{MédiaTotal} - Pot_{Total}$$

- g) O valor de Dif pode, então, ser aplicado à intensidade de campo elétrico analógico para se obter o valor da intensidade de campo elétrico do sinal digital.

Pelo método proposto, o valor de Dif seria aplicado para toda a radial. No entanto, a relação de proteção dos sinais analógico e digital se altera de um ponto para outro, o que poderia prejudicar a análise final da campanha.

A seguir, um exemplo de cálculo proposto pela metodologia da iBiquity para obtenção da intensidade do campo elétrico digital é mostrado. Por meio da Tabela III.1 é possível verificar passo a passo a aplicação de todas as equações acima, obtendo assim a diferença entre as intensidades de campo elétrico dos sinais analógico e digital. A Figura III.2 até a Figura III.6 correspondem aos cinco pontos, que foram escolhidos na direção das radiais planejadas para a realização dos testes.

Ponto	Banda	ACPR #1	ACPR #2	ACPR #3	ACPR #4	ACPR #5	ACPR Avg	Potência Total	Potência Média	Potência Média Total	Diff
Ponto 1	*USB	-7.2	-3.6	-10.5	-3.5	-8.1	-5.791362373	0.106703546	1.5	5.20876	5.10205
	**LSB	-7.2	4.2	-5.6	-4.7	-4.3	-1.184308992		2.8		
Ponto 2	USB	-10	-10.6	-10.6	-9	-8.2	-9.574706489	-6.379899235	-4.8	-1.63711	4.74278
	LSB	-8.9	-10.9	-9.4	-9.5	-7.9	-9.213212162		-4.5		
Ponto 3	USB	-5.4	-5.9	-3.3	-4	-5.9	-4.766894458	-1.220976364	0	2.96058	4.18156
	LSB	-5.2	-4.6	-1.9	-3.4	-4.5	-3.754522858		-0.1		
Ponto 4	USB	-2.7	-4.4	-3.3	-2.3	-3	-3.084100564	0.319285974	5	8.01029	7.69101
	LSB	-2.7	-3.2	-1.9	-1.9	-2.1	-2.330571985		5		
Ponto 5	USB	-11.6	-15	-9.7	-11.3	-12.6	-11.71284801	-10.50124734	-8	-6.39626	4.10498
	LSB	-16	-16.6	-18.5	-16.9	-15.7	-16.63722094		-11.5		

Tabela III.1-Exemplo da metodologia proposta pela iBiquity

*Banda Lateral Superior

** Banda Lateral Inferior

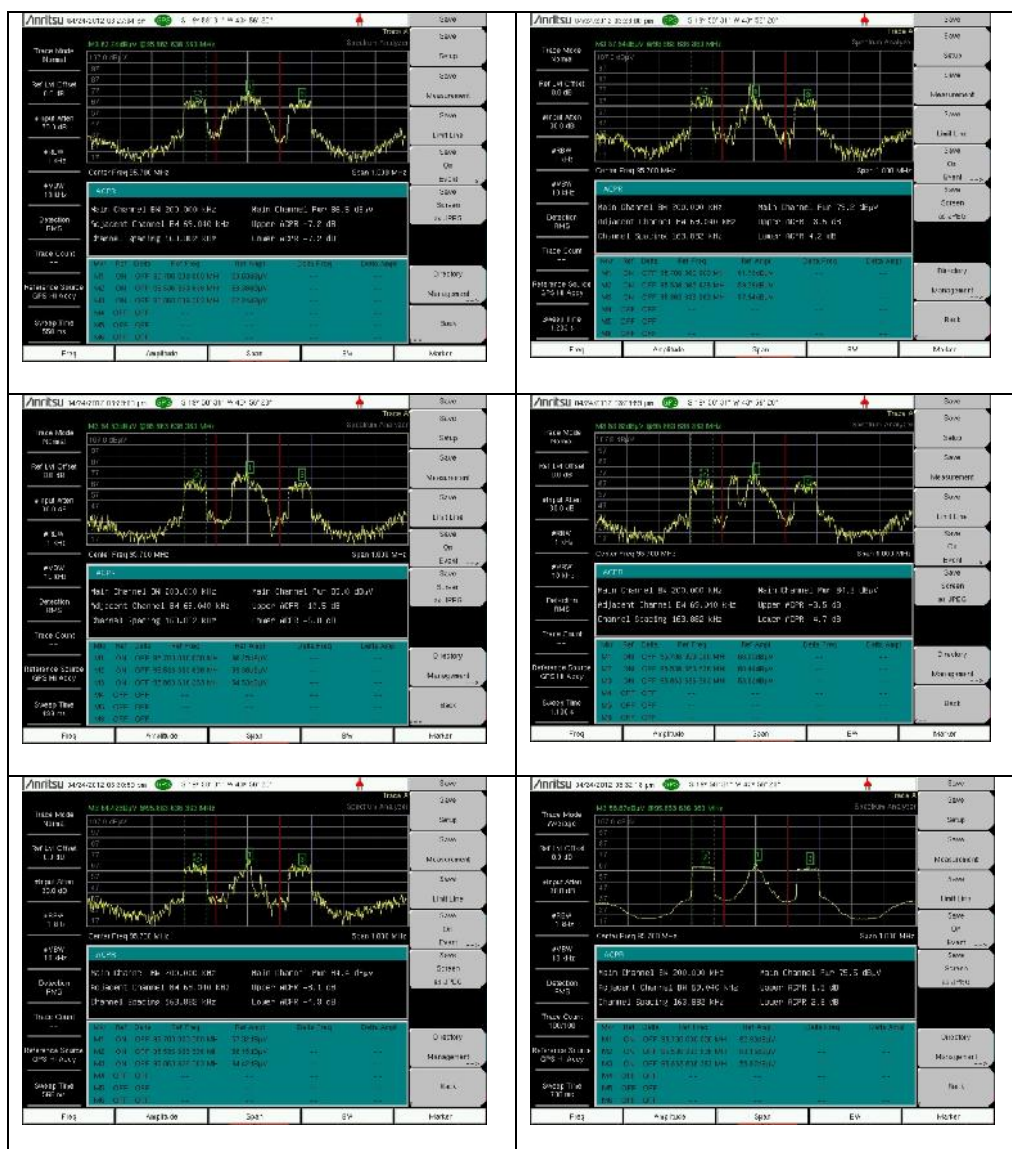


Figura III.2-Ponto 1: distância ao transmissor de 1060 m

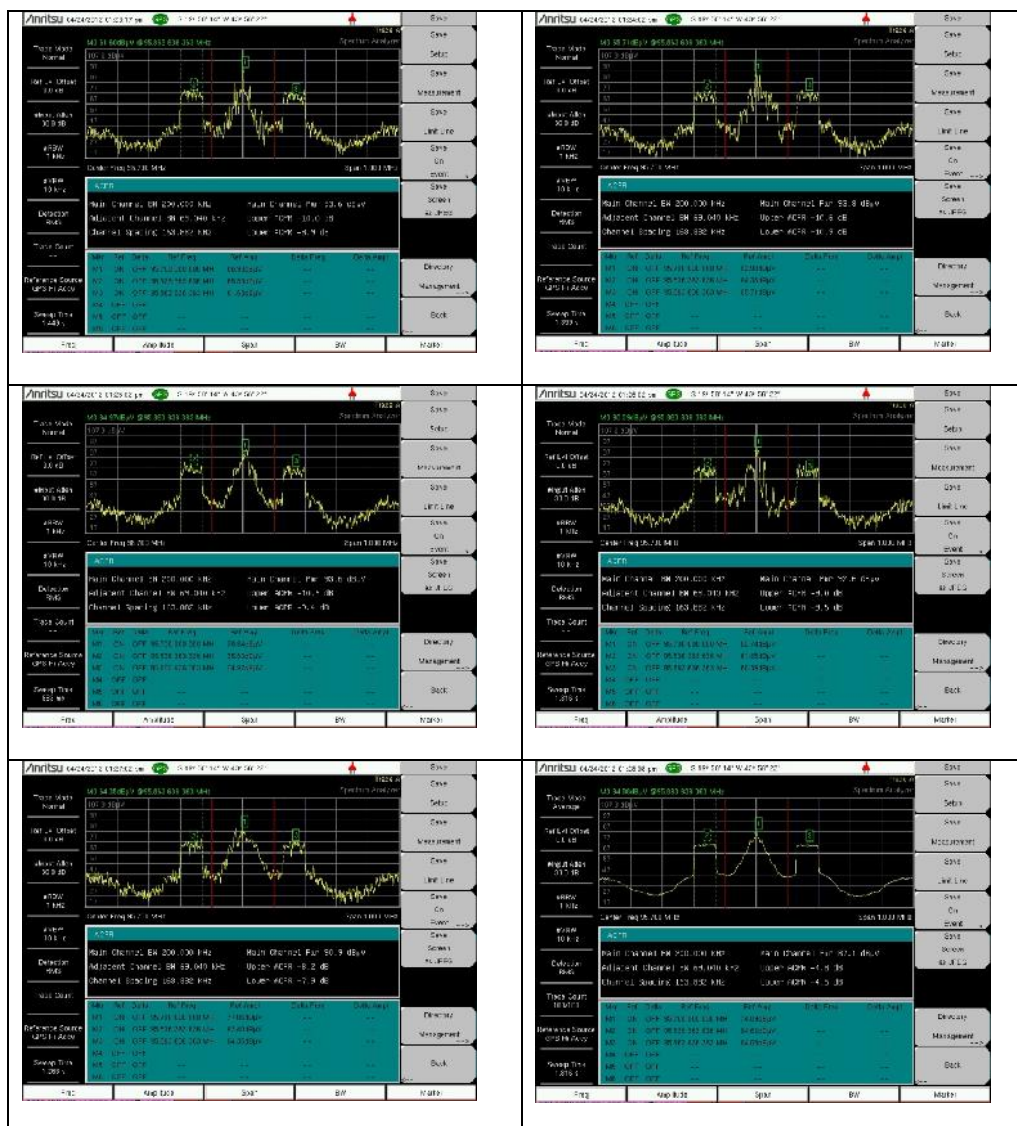


Figura III.3-Ponto 2: distância ao transmissor de 1100 m

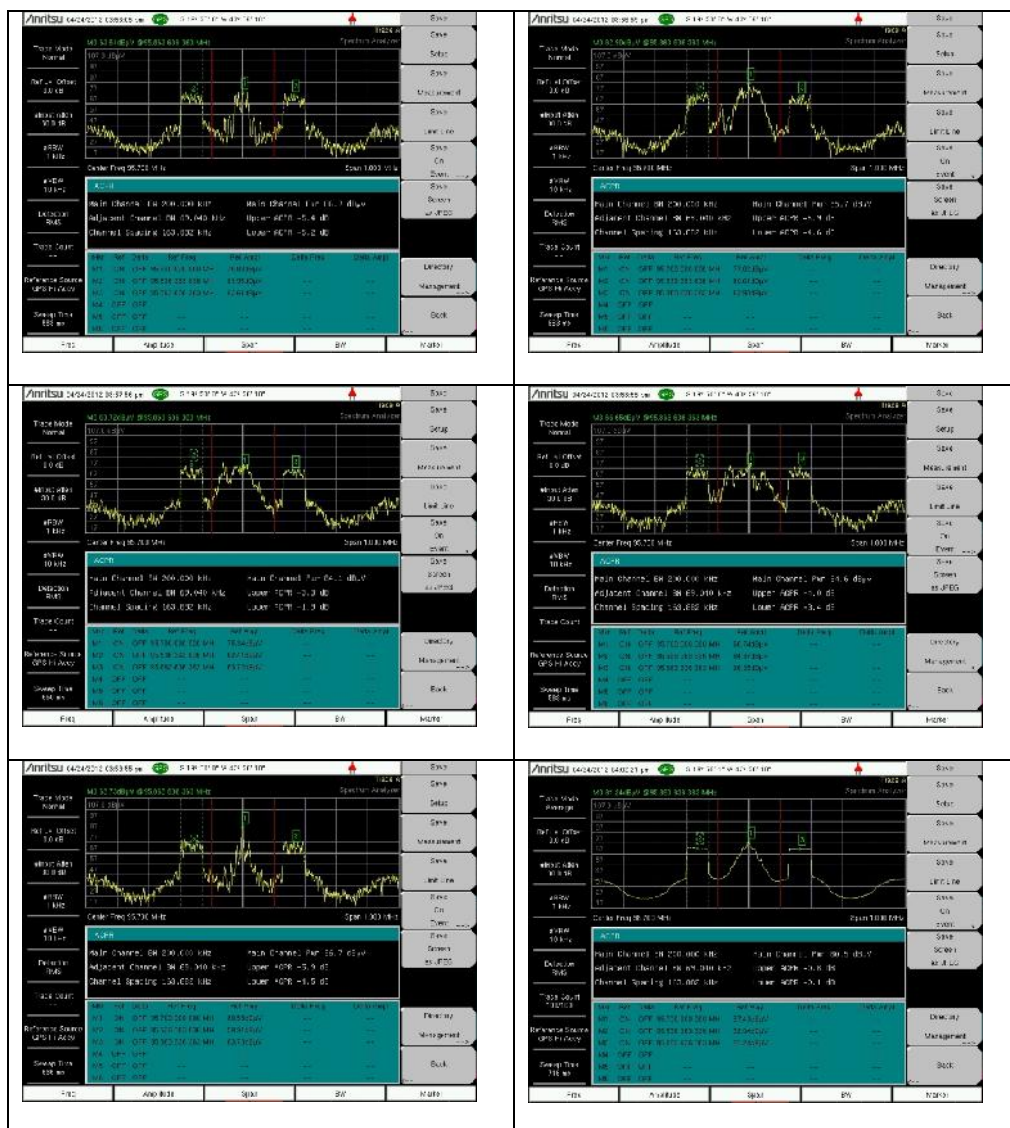


Figura III.4-Ponto 3: distância ao transmissor de 996 m

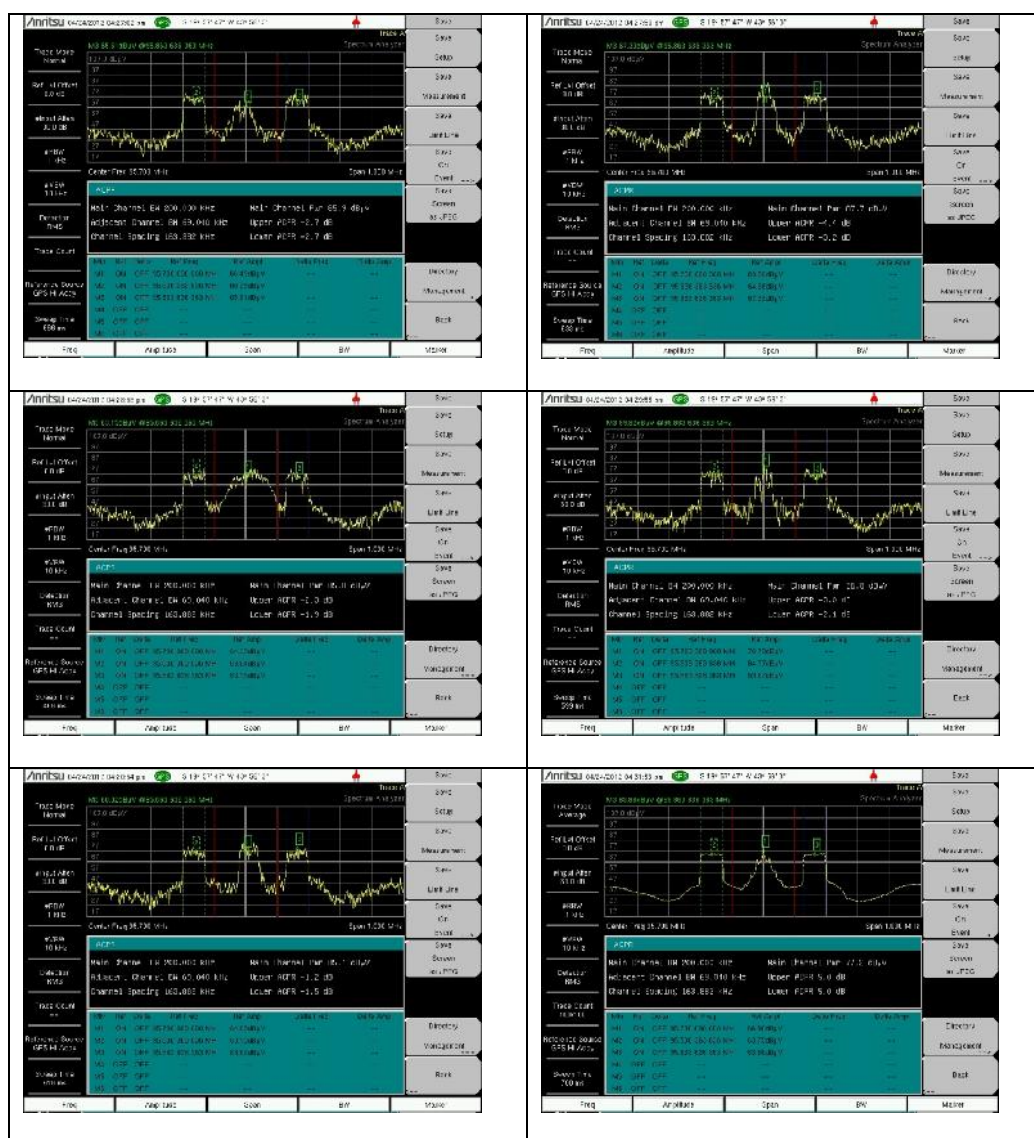


Figura III.5-Ponto 4: distância ao transmissor de 1134 m

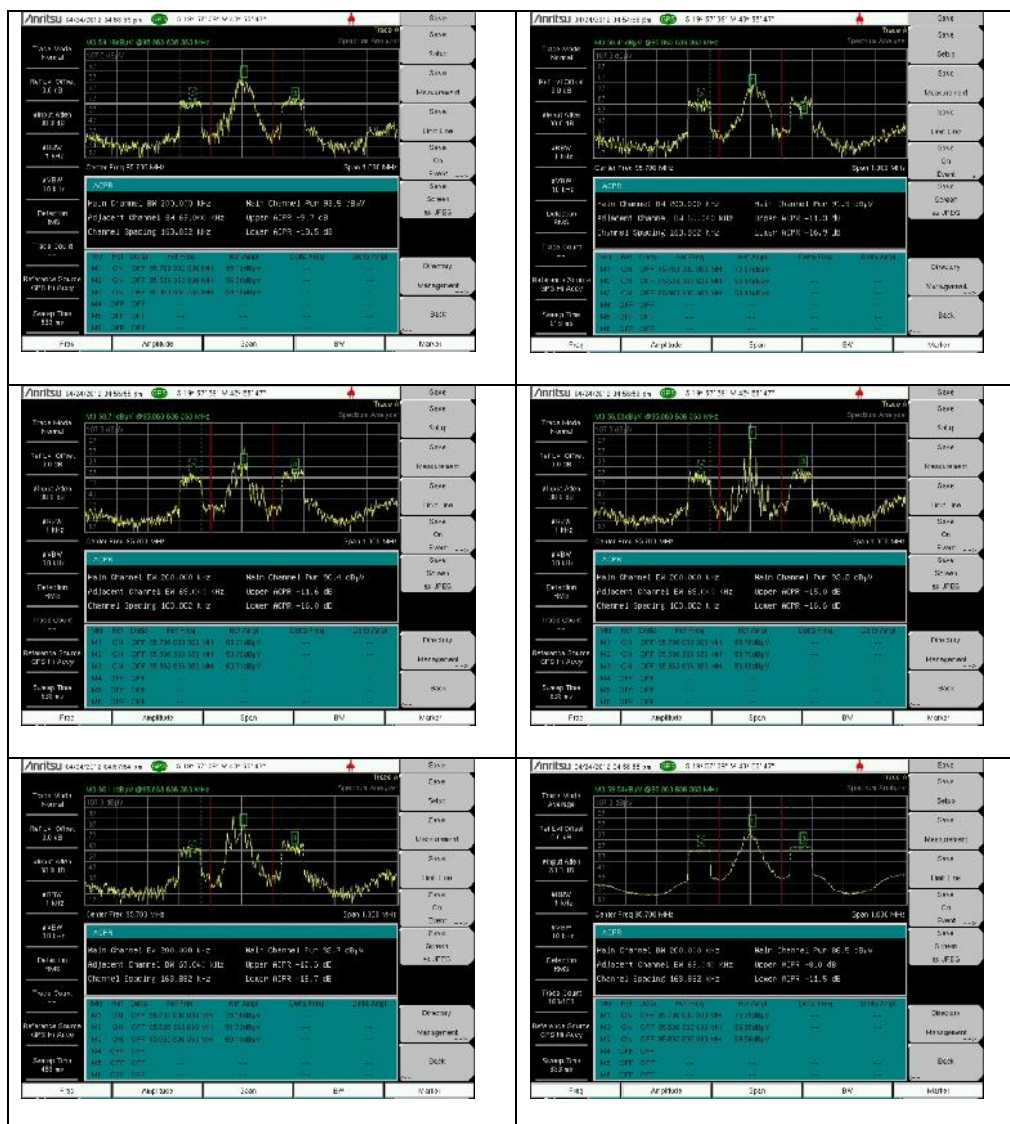


Figura III.6-Ponto 5: distância ao transmissor de 1150 m

III.2. Melhorias na Metodologia proposta pela iBiquity

Com o intuito de melhorar a metodologia proposta pela iBiquity foram realizadas as seguintes alterações:

- Um software de captura de traços do analisador de espectro foi desenvolvido pela equipe do Inmetro com a ferramenta MatLab. Assim, a cada 1,2 segundos, todas as informações da tela do analisador eram armazenadas em arquivo Excel para posterior processamento com o software desenvolvido. Assim, ao invés de ter cinco telas *print screen* com detecção instantânea em cada ponto, tem-se o equivalente a 150 telas num período de 3 minutos de medição com o analisador de espectro com detecção instantânea e mais 3 minutos de medição com o analisador no modo *average*, melhorando consideravelmente a precisão do valor Dif.
- O software HD Radio Profissional fornece os dados a cada 100 milissegundos. Assim na campanha móvel não foi possível sincronizar diretamente as amostras do software

HD Radio Profissional com o analisador de espectro. Nesse caso, o valor mediano de cada 12 amostras do software HD Radio Profissional foi sincronizado com um traço do analisador de espectro.

- c) Para validar o item “b”, as intensidades de campo elétrico do sinal analógico oriundas do software HD Radio e do analisador de espectro foram comparadas e o erro ocorreu na décima casa decimal, sendo, portanto, considerado aceitável.

Com a automatização, foi possível determinar o valor da intensidade de campo elétrico digital em cada ponto fixo e em movimento, sendo, portanto, um método mais preciso do que o proposto pela iBiquity, que iria atribuir o valor Dif para toda a radial.

IV. Arquivo de Medição do Sistema HD Radio

Este apêndice apresenta uma parte do arquivo de medições (30 amostras) do ponto R1P1 com todos os campos coletados pelo software *HD Prospector Field Test System* do receptor profissional HD Radio. Em cada ponto fixo a medição coleta aproximadamente 3000 amostras. Na medição em mobilidade a quantidade de amostras depende da distância entre dois pontos fixos.

Date (DD/MM/YY)	Time UTC -3	Time (File Start)	Distance to TX	Latitude	Longitude	Vali dity	# Satellites	Altitude (meters)	Speed (kph)	Track (degrees)	Freq	Analog FI dBuV	Rx Mode	AM/FM	Svc Mode	Acq Status	SIS CRC Status	Dig Aud Acq	Audio Pgms Avail	Current Pgm	DAAI	SIS Frm Acq	Audio Acq Time	Quality Indicator	SNR	Blend Count	Frame Count	Core Frame Errors	Enh Frame Errors
14/04/2012	11:11:51	600	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74589	0	0
14/04/2012	11:11:51	600	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74589	0	0
14/04/2012	11:11:51	600	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74594	0	0
14/04/2012	11:11:52	800	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	68	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74594	0	0
14/04/2012	11:11:52	900	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	68	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74598	0	0
14/04/2012	11:11:52	900	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74598	0	0
14/04/2012	11:11:52	1000	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74602	0	0
14/04/2012	11:11:52	1202	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	68	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74602	0	0
14/04/2012	11:11:52	1400	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	68	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74607	0	0
14/04/2012	11:11:52	1500	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74607	0	0
14/04/2012	11:11:52	1600	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74611	0	0
14/04/2012	11:11:52	1600	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74611	0	0
14/04/2012	11:11:52	1703	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74615	0	0
14/04/2012	11:11:53	1800	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,49	28	74615	0	0
14/04/2012	11:11:53	1900	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74619	0	0
14/04/2012	11:11:53	1900	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74619	0	0
14/04/2012	11:11:53	2000	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74624	0	0
14/04/2012	11:11:53	2203	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74624	0	0
14/04/2012	11:11:53	2400	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74628	0	0
14/04/2012	11:11:53	2500	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74628	0	0
14/04/2012	11:11:53	2600	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74632	0	0
14/04/2012	11:11:53	2600	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74632	0	0
14/04/2012	11:11:53	2600	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,5	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74637	0	0
14/04/2012	11:11:54	2800	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,6	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74637	0	0
14/04/2012	11:11:54	2900	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,6	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74641	0	0
14/04/2012	11:11:54	2900	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,6	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74641	0	0
14/04/2012	11:11:54	3000	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,6	0	26,2	95,7	67	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74645	0	0
14/04/2012	11:11:54	3202	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,6	0	26,2	95,7	66	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,43	28	74645	0	0
14/04/2012	11:11:54	3400	2,05438571	-19,957825	-43,91381	2	7	1127,6	0	26,2	95,7	66	1	1	1	1	1	1	10000000	0	15	23	110	15	15,56	28	74650	0	0

BIBLIOGRAFIA

- [1] Doc. NRSC-5-C, In-band/on-channel Digital Radio Broadcasting Standard. Set. 2011.
- [2] Doc. No. SY_SSS-1026s rev. F, HD Radio FM Transmission System Specifications, iBiquity Digital Corporation, 8/25/11.
- [3] Doc. No. SY_SSS-1082s rev. F, HD Radio AM Transmission System Specifications, iBiquity Digital Corporation, 8/24/11.
- [4] Ibiquty Digital Corporation. HD Radio: How it Works, Disponível em: http://www.ibiquity.com/hd_radio/hdradio_how_does_it_work, Data de acesso: 27 de abril de 2012.
- [5] Shuldiner, Albert, [Memorando] 13 abr. 2005, Columbia [para] IBOC Standards Development Working Group e DAB Subcommittee, 6f, iBiquity patent disclosure.
- [6] FCC MM Docket No. 99-325, First report and order: Digital Audio Broadcasting Systems and their impact on the terrestrial radio broadcast service, 11 out. 2002
- [7]Ibiquty Digital Corporation, 2010 Station Guide. Disponível em: http://www.ibiquity.com/i/pdfs/HDRadio_Station_%20Guide_lores_Dec2009.pdf. Data de acesso: 27 de abril de 2012.
- [8] HD Radio Alliance. New HD Radio technology launches in Mexico. Disponível em: <http://www.hdradio.com/news-buzz/new-hd-radio-technology-launches-in-mexico>, Data de acesso: 27 de abril de 2012.
- [9] Ibiquty Digital Corporation. HD Radio Broadcasting Around the World, Disponível em: <http://www.ibiquity.com/international>, Data de acesso: 27 de abril de 2012.
- [10] Ibiquty Digital Corporation, Field report – AM IBOC nighttime performance. 20 out. 2003.
- [11] Ibiquty Digital Corporation. AM nighttime compatibility study report. 23 maio 2003.
- [12] Ibiquty Digital Corporation. AM All-digital IBOC field test report. 12 abril 2002.
- [13] Ibiquty Digital Corporation. FM All-digital IBOC field test report. 1 fev. 2002.
- [14] Ibiquty Digital Corporation. FM Hybrid IBOC field test results. Dez. 2000.
- [15] Ibiquty Digital Corporation. Experimental test report on IBOC DAB field tests using KWNR-FM, Las Vegas, Nevada, 2000.
- [16] National Public Radio. Tomorrow Radio field testing in the Washington, D.C., New York City, San Francisco, and Los Angeles (Long Beach) Radio Markets, 6 fev., 2004.
- [17] Kean, J, HD Radio coverage measurement and prediction, Proceedings of the International Symposium on Advanced Radio Technologies, pp,123-130, fev., 2007.
- [18] Recommendation ITU-R BS,1114-7 Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3000 MHz, 2011.

- [19] Ibiquty Digital Corporation, HD Radio FM Transmission System Specifications, SY_SSS_1026s Revisão F, August 24, 2011.
- [20] Ibiquty Digital Corporation, HD Radio Air Interface, Design Description Layer 1 FM, SY_IDD_1011s Revision G, August 23, 2011.
- [21] Ibiquty Digital, Transmission Signal Quality Metrics for FM IBOC Signals, SY_TN_2646s Revision 02, August 24, 2011.
- [22] Recommendation ITU-R BS,1284-1: General methods for the subjective assessment of sound quality, 2003.
- [23] Anatel, Regulamento Técnico para Emissoras de Radiodifusão Sonora em Frequência Modulada (Resolução nº67, de 12 de novembro de 1998, D,O,U, 26/03/1999 – Alterada pela resolução nº 349, de 25 de setembro de 2003).
- [24] Rec, ITU-R BS,412-9: Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF, 1998.
- [25] Anatel (2008), “SIGAnatel - Sistema de Informações Geográficas”, Disponível em <http://sistemas.anatel.gov.br/siganatel>
- [26] Guia para Avaliação do Sistema de Rádio Digital FM IBOC, Junho 2007, Disponível em <http://www.anatel.gov.br/Portal/>
- [27] Ibiquty Digital, HD Radio Air Interface Design Description Layer 1 AM, SY_IDD_1012s Revision F, August 23, 2011
- [28] Rec. ITU-R P.1411-3 Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor communications systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, 2005