UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

IGOR HOFFMANN COELHO

PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UMA REDE DE FREQUÊNCIA ÚNICA PARA RADIODIFUSAO SONORA DIGITAL CONFORME O PADRÃO DRM+

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2014

IGOR HOFFMANN COELHO

PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UMA REDE DE FREQUÊNCIA ÚNICA PARA RADIODIFUSAO SONORA DIGITAL CONFORME O PADRÃO DRM+

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Igor Hoffmann Coelho, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Coorientador: Msc. Carlos Alberto Dalarmelina

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2014

IGOR HOFFMANN COELHO

PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UMA REDE DE FREQUÊNCIA ÚNICA PARA RADIODIFUSAO SONORA DIGITAL CONFORME O PADRÃO DRM+

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Igor Hoffmann Coelho, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 19, de dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

MSc. Carlos Alberto Dalarmelina
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientador

Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Eng. Paulo Roberto Monfrim Canno
Rede Gazeta
Examinador

Aos familiares e amigos – em especial aos meus pais: Andréia Hoffmann Chagas e Reinaldo Louredo Coelho, meus avós: Evanilde Luzia Hoffmann e Augustinho Floriano Chagas e minha companheira Fernanda Amorim Ludgero, responsáveis pelo apoio necessário durante essa longa caminhada.

Dedico meus sinceros agradecimentos:

- a Deus por mais uma conquista.
- aos amigos e familiares que sempre estiveram ao meu lado durante todos esses anos.
- ao meu Orientador Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva pelo apoio incondicional prestado durante todos os meses de desenvolvimento desse trabalho. Mesmo em momentos de incertezas, sempre demonstrou confiança em mim.
- ao meu Co-orientador Carlos Alberto Dalarmelina pela plena ajuda concedida sempre que solicitada.
- aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo.
- ao Engenheiro Paulo Roberto Monfrim Canno, por ministrar a empolgante disciplina de TV Digital, essencial para quem almeja ingressar no ramo das Telecomunicações.
- ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPQ) pela bolsa de estudos concedida a mim, para que pudesse estudar em tempo integral na Monash University, na Austrália.
- à Fernanda Amorim Ludgero pela paciência, compreensão e companheirismo.

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho um estudo sobre a tecnologia de rádio digital, amplamente utilizada em outras partes do mundo, mas que no Brasil ainda está em fase de testes para a adoção do Sistema Brasileiro de Rádio Digital (SBRD). É apresentada uma introdução aos aspectos da tecnologia de rádio digital como modulação, ocupação espectral, vantagens com relação ao rádio analógico, e ainda as características dos padrões existentes e respectivas justificativas para adoção no Brasil. São abordados os conceitos de funcionamento das redes de frequência única SFN *(Single Frequency Networks*) aplicadas aos serviços de radiodifusão digital terrestre. Também é apresentado um estudo de predição de cobertura de radiofrequência da Rádio Universitária 104.7 FM localizada na UFES, com intuito de cobrir as áreas urbanas dos municípios de Vitória, Vila Velha, Cariacica e Serra. Essa predição é realizada com o auxílio do software de simulação *Radio Mobile* v.11.5.0, com transmissores e estações retransmissoras estrategicamente posicionadas e integradas em uma rede SFN. Por último, é feita uma simulação em software de computação MATLAB de uma transmissão digital utilizando-se um modelo de canal com multipercurso, visando a obtenção da influência do canal de comunicação sem fio no sistema de modulação por multiportadoras ortogonais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), seguindo as especificações técnicas do padrão DRM+ (*Digital Radio Mondiale*).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Informações sobre o tráfego.....17
Figura 2 - Exemplo de arquivo .png transmitido.....18
Figura 3 – Sistemas de rádio digital disponíveis no mercado. 19
Figura 4 – Divisão do espectro de frequências em N subcanais.....23
Figura 5 – Espectro de um sinal OFDM contendo três portadoras ortogonais.....25
Figura 6 – Modelo de um transmissor multiportadora. 25
Figura 7 – Configuração básica de um transmissor OFDM. 27
Figura 8 – Modelo de um receptor multiportadora.....28
Figura 9 – Configuração básica de um receptor OFDM.....29
Figura 10 – Comparação entre transmissões com e sem prefixo cíclico.....31
Figura 11 – Transceptor OFDM básico.....32
Figura 12 – Faixas de operação do DRM. 33
Figura 13 – Utilização dos serviços no DRM.....34
Figura 14 – Esquema de transmissão DRM. 35
Figura 15 – DRM *Content Server*.....36
Figura 16 – Modulação em um sistema DRM.....37
Figura 17 – Parâmetros do Padrão DRM+. 38
Figura 18 – Espectro no modo de transmissão *simulcasting*.....38
Figura 19 – Combinação das Antenas para Transmissão Simultânea DRM+ e FM Analógico. 39
Figura 20 – Principais Parâmetros de Camada Física do Padrão DRM+.....40
Figura 21 – Modelo de canal DRM+: zona urbana. 43
Figura 22 – Modelo de canal DRM+: zona rural.....43
Figura 23 – Modelo de canal DRM+: zona urbana obstruída. 44
Figura 24 – Modelo de canal DRM+: terreno montanhoso.....44
Figura 25 – Modelo de canal DRM+: rede SFN. 44
Figura 26 – Zonas de Fresnel.....46
Figura 27 – Recepção com multipercurso 49
Figura 28 – Similaridade entre recepção com multipercurso e recepção SFN.....49
Figura 29 – Diferença entre rede MFN (à esquerda) e SFN (à direita). 50
Figura 30 – Ganho aditivo em redes SFN. 51
Figura 31 – Área de sobreposição crítica 52

Figura 32 – Rede SFN do tipo Por Repetição.....54
Figura 33 – TX principal instalado no morro da Fonte Grande. 56
Figura 34 – Enlace micro-ondas entre o estúdio na UFES e o TX no morro da Fonte Grande. 57
Figura 35 – Informações do enlace ponto-a-ponto em micro-ondas entre o estúdio na UFES e o TX no morro da Fonte Grande.....59
Figura 36 – Cobertura do TX principal localizado no morro da Fonte Grande. 62
Figura 37 – Região de sombra no município de Vila Velha.....62
Figura 38 – Região de sombra no município da Serra.....63
Figura 39 – Repetidora no Morro do Moreno em Vila Velha. 64
Figura 40 – Repetidora próxima ao Mestre Álvaro na Serra.....64
Figura 41 – Diagrama azimutal da antena da repetidora no Morro do Moreno em Vila Velha.....65
Figura 42 – Diagrama azimutal da antena da repetidora próxima ao Mestre Álvaro na Serra.....66
Figura 43 – Enlace entre o TX principal e a repetidora em Vila Velha. 66
Figura 44 – Enlace entre o TX principal e a repetidora na Serra 67
Figura 45 – Cobertura da repetidora no Morro do Moreno em Vila Velha.....67
Figura 46 – Cobertura da repetidora na Serra.....68
Figura 47 – Melhor cobertura por equipamento transmissor.....69
Figura 48 – Cobertura total da rede SFN projetada.....69
Figura 49 – Espalhamento do atraso relativo entre o TX principal e a repetidora em Vila Velha.....71
Figura 50 – Espalhamento do atraso relativo entre o TX principal e a repetidora em Vila Velha.....72
Figura 51 – Espalhamento do atraso relativo entre o TX principal e a repetidora na Serra... 72
Figura 52 – Espalhamento do atraso relativo entre o TX principal e a repetidora na Serra... 73
Figura 53 – Modelo de canal DRM+: zona urbana 75
Figura 54 – Modelo de canal DRM+: zona rural.....75
Figura 55 – Modelo de canal DRM+: zona urbana obstruída 76
Figura 56 – Modelo de canal DRM+: terreno montanhoso.....76
Figura 57 – Modelo de canal DRM+: rede SFN 76
Figura 58 – Quatro representações do Canal 8. Resposta no tempo e na frequência. 77

Figura 59 – Representações dos Canais 9, 10, 11, e 12 nos domínios do tempo e da frequência. 78
Figura 60 – Parâmetros do DRM+. 79
Figura 61 – Canal 8: diagrama de constelação com SNR = 30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM. 81
Figura 62 – Canal 9: diagrama de constelação com SNR=30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM. 82
Figura 63 – Canal 10: diagrama de constelação com SNR = 30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM. 83
Figura 64 – Canal 11: diagrama de constelação com SNR = 30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM. 84
Figura 65 – Canal 12: diagrama de constelação com SNR = 30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM. 85
Figura 66 – Recepção SEM EQUALIZAÇÃO. Canal 8: diagrama de constelação com SNR=30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM. 86
Figura 67 - Espectro do sinal transmitido e recebido para os canais 8 e 12. 87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Configuração do rádio enlace ponto-a-ponto. 57
Quadro 2 – Configuração do transmissor no morro da Fonte Grande..... 60
Quadro 3 – Premissas estabelecidas para a recepção 61
Quadro 4 – Características da repetidora no Morro do Moreno – Vila Velha. 65
Quadro 5 – Características da repetidora próxima ao Mestre Álvaro – Serra. 65
Quadro 6 – Projeto de sistema OFDM. 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Projeto de sistema OFDM para o canal 8 e 9. 89
Tabela 2 – Projeto de sistema OFDM para o canal 10 90
Tabela 3 – Projeto de sistema OFDM para o canal 11 90
Tabela 4 – Projeto de sistema OFDM para o canal 12 91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Amplitude Modulation
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CP	Cyclic Prefix
DAB	Digital Audio Broadcasting
DFT	Direct Discrete Fourier Transform
DRM	Digital Radio Mondiale
FAC	Fast Access Channel
FDM	Frequency Division Multiplexing
FM	Frequency Modulation
HD	High Definition
IBOC	In-Band On-Channel
ICI	Inter-Carrier Interference
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ISDB	Integrated Services Digital Broadcasting
ISI	Inter-Symbol Interference
MDI	Multiplex Distribution Interface
MER	Modulation Error Rate
MFN	Multi-Frequency Networks
MSC	Main Service Channel
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PSK	Phase-Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RX	Receptor
SBRD	Sistema Brasileiro de Rádio Digital
SDC	Service Description Channel
SFN	Single Frequency Networks
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TX	Transmissor
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UHF	Ultra High Frequency
US	Uncorrelated Scattering

VHF	Very High Frequency
WSS	Wide-Sense Stationary
WSSUS	Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

1.1 Histórico do rádio 15

1.2 Vantagens do Rádio Digital 16

1.3 Tecnologias de radiodifusão digital 18

1.4 Implantação do Rádio Digital no Brasil 20

1.5 Objetivos deste Projeto 21

1.6 Propostas deste Projeto 21

2 MODULAÇÃO MULTIPORTADORA 22

2.1 Evolução FDM, OFDM e COFDM 22

2.2 Princípios Básicos da Modulação OFDM 24

2.2.1 A Multiplexação OFDM 24

2.2.2 O Transmissor OFDM 25

2.2.3 O Receptor OFDM 28

2.2.4 Extensão cíclica 30

3 A TECNOLOGIA DE RÁDIO DIGITAL MUNDIAL DRM 33

3.1 Características Gerais 33

3.2 Codificação e Multiplexação no DRM 35

3.3 O Esquema de Modulação segundo a Tecnologia DRM 36

3.4 Características do Modelo de Camada Física do Padrão de Transmissão DRM+ 37

4 MODELAGEM DOS CANAIS DE TRANSMISSÃO DRM 41

4.1 Modelo de Canal WSSUS 41

4.2 Perdas no Enlace de Rádio 45

4.2.1 O Modelo de Okumura 45

4.2.2 O Modelo de Okumura-Hata 45

4.2.3 Zona de Fresnel 46

4.3 Atenuação no Espaço Livre 47

5 AS REDES DE FREQUÊNCIA ÚNICA – SFN 48

5.1 Introdução 48

5.2 O Fenômeno dos Múltiplos Percursos 48

5.3 Funcionamento 50

5.4 Áreas de Sobreposição 51

5.5 Categorias de Redes SFN 53
5.5.1 Tipo Distribuída 53
5.5.2 Tipo Por Repetição 53
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PREDIÇÃO DE COBERTURA 55
6.1 O Software Radio Mobile 55
6.2 Predição de Cobertura da Rede SFN – Estudo de Caso 55
6.2.1 O Projeto da Rede 55
6.2.1.1 O Enlace de Rádio em Micro-ondas 56
6.2.1.2 Cobertura do Transmissor Principal 60
6.2.1.3 Adição de Repetidoras 63
6.2.1.4 Cobertura das Repetidoras 67
6.2.1.5 Cobertura Total da Rede SFN 68
6.2.1.6 Análise dos Atrasos e Intervalo de Guarda 70
6.2.2 Comentários 73
7 SIMULAÇÃO DA MODULAÇÃO OFDM CONFORME O PADRÃO DRM+ 75
7.1 Canais Rádio Móvel para o DRM+ 75
7.2 Transmissão e Recepção de Símbolos OFDM 79
7.3 Projeto dos Sistemas OFDM para Cada um dos Canais DRM 87
7.4 Comentários 91
8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 95
ANEXO A 98
ANEXO B 100

1 INTRODUÇÃO

O rádio digital, da mesma forma que o rádio analógico, é um sistema de radiodifusão que utiliza o espectro eletromagnético para transmitir informação sonora. Para o rádio analógico, a modulação de uma portadora pelo sinal de áudio é feita diretamente empregando-se ou a modulação de amplitude AM (*Amplitude Modulation*) ou a modulação de frequência FM (*Frequency Modulation*). Este é o tipo de transmissão usado todos os dias quando uma estação de rádio FM é sintonizada dentro de um veículo, por exemplo. Já no rádio digital, a principal diferença está no fato de que o áudio é primeiramente digitalizado, tendo sua sequência binária codificada por algum padrão de codificação digital. Em seguida, é transmitido pelo ar de maneira quase idêntica à uma rádio analógica, envolvendo elementos característicos de transmissão de rádio, como torres e antenas [1-4].

Dentre as principais vantagens do rádio digital, quando comparado com o analógico, pode-se mencionar: áudio com qualidade de CD (*Compact Disc*) para estações FM e com qualidade de FM estéreo para estações de rádio AM, multiprogramação, transmissão de dados como textos, fotos, informações de trânsito e alerta de emergência para o ouvinte, bem como da otimização do espectro eletromagnético [1], [3], [4].

1.1 Histórico do rádio

O século XX foi marcado mundialmente pela tecnologia do rádio. No Brasil, a radiodifusão sonora estreou-se no ano de comemoração do Centenário da Independência, em 1922 [1]. Na Era de Ouro do rádio, nos anos de 1930 a 1950 o rádio incorporou-se ao cotidiano das pessoas de todas as classes sociais: era uma fonte de entretenimento e informação para uma audiência cada dia maior.

Nos anos 50, com a implantação da televisão Brasileira, havia o temor de que a radiodifusão sonora poderia vir a ser extinta. No entanto, naquela época os custos para uma emissora de rádio migrar para a transmissão televisiva eram elevadíssimos. Percebeu-se que o rádio então não seria extinto, mas passaria a coexistir com a televisão daquele momento em diante [1]. A industrialização massiva dos transistores bipolares permitiu a miniaturização dos rádios e a

aplicação de fontes de energia pequenas e descartáveis. Isso representou a viabilidade de transportar um receptor para qualquer lugar em qualquer hora – a portabilidade.

Desde os anos 1960, passou-se à aplicação dos sistemas de rádio com modulação em frequência, que, aos poucos, veio tomando audiência e dominando as transmissões para cobertura em área local. Os principais argumentos voltaram-se para a qualidade sonora, com menor nível de ruído, maior robustez às interferências e efetivação de estereofonia em alta fidelidade. Somente na década de 70 os radiodifusores migraram em profusão para o VHF/FM (*Very-High Frequency/Frequency Modulation*) [1]. Desde então, aqueles que se mantiveram no rádio AM, especialmente em ondas médias, por circunstâncias diversas, observaram uma significativa queda de audiência. A distinção entre radiodifusores se refinou: televisão – a classe especial; radiodifusão sonora FM – dominante na cobertura local; radiodifusão sonora AM – a alternativa na cobertura local e única em serviço à distância [1].

1.2 Vantagens do Rádio Digital

O rádio (no Brasil e em muitos outros países) é o único meio de comunicação eletrônico que ainda utiliza o mesmo sistema de transmissão há 90 anos [2]. Então, isso coloca o rádio numa situação difícil quando concorrendo com as novas mídias digitais. Consequentemente, o rádio vem perdendo cada vez mais espaço e a digitalização é um passo muito importante para o rádio no Brasil.

O que impede que muitas pessoas escutem emissoras de rádio em AM em casa ou no carro é o "chiado" oriundo de tal transmissão. Para solucionar esta questão, alguns dos padrões de rádio digital existentes no mercado, como o DRM (*Digital Radio Mondiale*), por exemplo, transmitem áudio em ondas curtas e médias com qualidade de FM estéreo na recepção. Já para as emissoras de rádio FM, o mesmo padrão, assim como outros, tem a capacidade de transmitir áudio com qualidade de CD e sem ruídos ou interferência, uma vez que, ou a emissora é sintonizada com qualidade excelente, ou ela não é sintonizada. Durante o processo de transição, as emissoras transmitirão ambos os sinais: analógico e digital (*simulcasting*). Daí, caso o receptor não consiga, porventura, receber o sinal digital, ele automaticamente buscará pelo sinal analógico. Além disso, o ouvinte escolhe as emissoras de rádio pelos seus respectivos nomes

mostrados na tela e não mais tem que sintonizá-las girando o *tuning* ou sabendo as frequências de transmissão de cor.

Sem dúvida, a maior vantagem do rádio digital para os ouvintes e emissoras é a capacidade de transmitir dados. Diferentemente dos receptores analógicos, os receptores de rádio digital, tanto para veículos automotores quanto residenciais ou portáteis, possuem pequenas telas para exibição de conteúdos transmitidos pelas emissoras. Então, através deste canal de dados podem ser exibidas na tela do receptor, informações em tempo real sobre o tráfego ou previsão do tempo como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Informações sobre o tráfego.

Fonte: Google Images, (2014).

Ainda nesse mesmo canal de dados, há várias opções quanto ao que transmitir. Se a emissora desejar, podem ser transmitidas informações da música sendo executada naquele momento, como nome do cantor, álbum e a letra da canção apararecendo na tela em sincronia com o áudio. Mais excitante ainda é a possibilidade de transmitir pequenos arquivos .png ou .jpg pelo canal de dados. Estes podem conter a imagem da capa do álbum do artista cuja música está em execução no momento ou ainda o placar de um jogo de futebol ao vivo, conforme visto na Figura 2.

Figura 2 - Exemplo de arquivo .png transmitido.

Fonte: Google Images, (2014).

Outra grande vantagem do rádio digital é a possibilidade de interatividade com o usuário. O caminho de volta é via internet, normalmente através do aparelho do usuário, como um celular ou *tablet*. Para melhor entendimento, a interatividade funciona da forma descrita a seguir. A emissora deseja fazer uma promoção de descontos em ingressos para um *show*, por exemplo. Através do canal de dados a emissora de rádio envia um *link* por meio do qual o usuário será direcionado para uma página onde poderá comprar os ingressos. Desta forma, a empresa que vende os ingressos saberá que o ouvinte está comprando o ingresso porque ouviu no rádio a promoção da emissora em questão e oferecerá o desconto. Similarmente, a emissora pode usar a interatividade para fazer com que os ouvintes votem na música preferida ou em qual música eles desejam ouvir na sequência. A emissora de rádio envia uma lista de músicas e um *link* para que o usuário vote. Vale ressaltar novamente que a comunicação do usuário com a emissora é feita pela internet, mas inicializada por um *link* enviado ao ouvinte pelo canal de dados.

1.3 Tecnologias de radiodifusão digital

Com o passar dos anos, surgiram diversos sistemas de radiodifusão digital que propõem a melhoria na qualidade sonora, maior resistência a interferências e preços acessíveis aos usuários. O melhor sistema é obviamente aquele que atende os aspectos tecnológicos, econômicos, sociais e estratégicos dos ouvintes, fabricantes e emissoras. Por isso, é crucial a escolha de um sistema com provável vida longa, que atenda aos requisitos técnicos desejados e que tenha o potencial de abranger o maior número de pessoas possível, sendo um meio de divulgação de conteúdos de interesse para a população e para o país [2]. Atualmente, os sistemas mostrados na Figura 3 são usados em países que adotaram a tecnologia de transmissão em rádio digital.

Figura 3 – Sistemas de rádio digital disponíveis no mercado.

Sistema	**Origem**	**Faixa de Frequência**	***Simulcasting***
DAB - Eureka 147 Digital Audio Broadcasting	Europa	VHF e UHF (banda L)	Em outro canal e faixa
IBOC HD Radio	EUA- ibiquity	HF(OM) e VHF (FM e OM)	No mesmo canal
ISDB-Tsb	Japão	UHF (TV)	Em outro canal e faixa
DRM	Consórcio EUA-Europa	HF (OM,OT,OC) VHF(FM[6])	Em outro ou no mesmo[7] canal
FM Extra	EUA - Digital Radio Express	VHF(FM)	No mesmo canal, em sub-portadora na banda base

Fonte: YAMADA; SUCKYS et al, (2009).

O DAB – Eureka 147 (*Digital Audio Broadcasting*) é amplamente difundido na Europa e teve seus primeiros receptores comercializados em 1999. Esse sistema oferece uma alternativa ao modelo de distribuição atual. Seu potencial é maximizado quando aplicado em conjunção aos serviços de satélite e redes terrestres de repetição do sinal [2]. Parece bem distante da realidade Brasileira. Para o HD Radio, é possível a transmissão durante o período de *simulcasting* dos sinais analógicos e digitais no mesmo canal. A indústria de receptores é ativa [2] e o sistema é bastante robusto no que diz respeito à recepção veicular e residencial. O ISDB-Tsb, que é proveniente do Japão, assemelha-se ao sistema de televisão digital Brasileiro. Contudo, seu verdadeiro potencial concentra-se na mobilização da TV digital, razão para a qual foi criado. O FM Extra de origem americana possui a limitação de apenas transmitir em VHF, deixando de lado a possibilidade de transmissão em ondas curtas, médias e tropicais [2]. Sequer foi considerado em debates ocorridos no Brasil. O DRM, que é o objeto de estudo deste projeto, é capaz de transmitir em AM e FM, inclusive nas faixas frequência de transmissão de rádio AM e FM habituais. Assim como no HD Radio, o *simulcasting* acontece no mesmo canal.

Durante o período de transição da tecnologia analógica para a digital, é prevista, da mesma forma que para a TV digital, um período de transmissões simultâneas, período de *simulcasting*. Sendo assim, o sistema digital ideal a ser escolhido seria aquele que permitisse substituir as transmissões analógicas AM em ondas médias e curtas e FM, que são os três tipos de transmissão adotados na radiodifusão aberta, exatamente na mesma banda de frequência, ocupando a mesma largura de banda e que pudesse conviver com o sistema atual durante o

longo período de transição [2]. Dessa maneira, os dois únicos sistemas que eventualmente atendem essas características são o DRM e o HD Radio. É importante reiterar que o sistema estudado neste trabalho é o DRM+, uma vertente do padrão DRM, voltada para a transmissão digital FM, conforme discutido nos capítulos subsequentes.

1.4 Implantação do Rádio Digital no Brasil

A Implantação do rádio digital no Brasil vem caminhando a passos curtos. Segundo relatos de especialistas no assunto, o rádio digital começou a ser “discutido” no Brasil em meados de 2005 [3]. Ao deixar o Ministério, o então Ministro das Comunicações Hélio Costa, através de portaria, criou o Sistema Brasileiro de Rádio Digital, sem definir nenhum padrão e deixando uma porta para os estudos terem continuidade pela "Academia" [3]. A portaria Nº290, de 30 de março de 2010 institui o Sistema Brasileiro de Rádio Digital – SBRD (ANEXO A). São alguns dos objetivos desse novo sistema:

I - propiciar a transferência de tecnologia para a indústria Brasileira de transmissores e receptores, garantida, onde couber, a isenção de *royalties*;
II - possibilitar a emissão de *simulcasting*, com boa qualidade de áudio e com mínimas interferências em outras estações;
III - permitir a transmissão de dados auxiliares.

Em agosto de 2012, o governo criou o Conselho Consultivo de Rádio Digital, através da portaria Nº365 (ANEXO B). Este, constituído de dezenove conselheiros, tem o objetivo de assessorar o Ministro de Estado das Comunicações na implantação do Rádio Digital no Brasil [3]. É composto por representantes de entidades públicas federais, entidades do setor de radiodifusão e do setor industrial.

Em 25 de junho de 2013 o Conselho Consultivo realizou mais uma reunião para decidir o cronograma dos novos testes para a escolha do padrão para a digitalização do rádio no Brasil. A reunião contou com membros do conselho e representantes dos padrões DRM (Europeu) e HD Radio (Norte-Americano) [3]. Os dois sistemas ainda passam por testes supervisionados pelo Ministério das Comunicações para, enfim, este optar por um dos dois sistemas e estabelecer uma data oficial para a implantação no Brasil.

1.5 Objetivos deste Projeto

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar novos recursos que podem ser agregados a tecnologia de radiodifusão sonora terrestre no Brasil, especialmente na região da Grande Vitória. Particularmente, a transmissão em rádio digital conforme o padrão DRM+ dentro do contexto de redes de frequência única SFN. Ademais, também é de interesse avaliar o desempenho de sistemas OFDM em canais com multipercurso e efeito Doppler de maneira a validar os parâmetros do padrão DRM+ na predição de cobertura de radiofrequência da Rádio Universitária 104.7 FM da UFES.

1.6 Propostas deste Projeto

A primeira proposta do trabalho consiste na realização de uma possível implantação de um sistema de transmissão FM em rádio digital na região central da Grande Vitória (Vitória, Vila Velha, Cariacica e Serra) adotando-se o padrão DRM+ e maximizando-se a área de cobertura através do uso de redes de frequência única, SFN. Para isto, deve-se escolher os transmissores e estações retransmissoras, os parâmetros da rede, o tipo de enlace entre o estúdio gerador de conteúdo e o transmissor central, entre outros. Após definidos todos os parâmetros e características da rede, é essencial que seja elaborada a predição de cobertura via software e feito um estudo dos dados obtidos para a validação do sistema proposto.

A segunda proposta concentra-se nas características técnicas da modulação OFDM para o padrão de rádio digital DRM+. Deve ser desenvolvido um estudo em software de computação MATLAB visando a obtenção de gráficos e diagramas que ilustrem o desempenho de um sistema OFDM com as características utilizadas no padrão DRM+, durante a transmissão e recepção dos símbolos OFDM. Deve-se investigar o comportamento do sistema OFDM do padrão DRM+ em ambientes que sofrem os severos efeitos oriundos da propagação com multipercurso e efeito Doppler, de acordo com adequados modelos de canal. Ao final, técnicas didáticas de projeto de sistemas OFDM hão de ser examinadas buscando-se comparar quantitativamente os parâmetros obtidos com os parâmetros reais usados na modulação OFDM do padrão DRM+.

2 MODULAÇÃO MULTIPORTADORA

2.1 Evolução FDM, OFDM e COFDM

Somente a partir da evolução do uso de técnicas digitais, os sistemas de telecomunicações passaram a utilizar a modulação multiportadora, substituindo os convencionais sistemas de modulação uniportadora. Diferentemente da técnica com uma única portadora modulada, cada símbolo na modulação multiportadora pode ter seu período de transmissão aumentado para que o mesmo seja maior que a duração dos distúrbios de ruído e também maior que o espalhamento por dispersão do canal [4].

Os sistemas de multiplexação por divisão de frequências, sob a sigla FDM (*Frequency Division Multiplexing*) evoluíram amplamente após a segunda guerra mundial. Particularmente, o sistema FDM é caracterizado por multiplexar sinais em frequência para transmissão simultânea de múltiplos canais. Cada canal nessa banda possui sua própria portadora que é recuperada ao final, desde que não se sobreponha em frequência com as portadoras dos demais canais. Esta técnica recebe o nome de modulação multiportadora porque há diversas portadoras transmitindo múltiplos canais. A técnica FDM, que deu origem posteriormente às técnicas OFDM e COFDM, vem sendo empregada em telefonia analógica desde a metade do século XX [4].

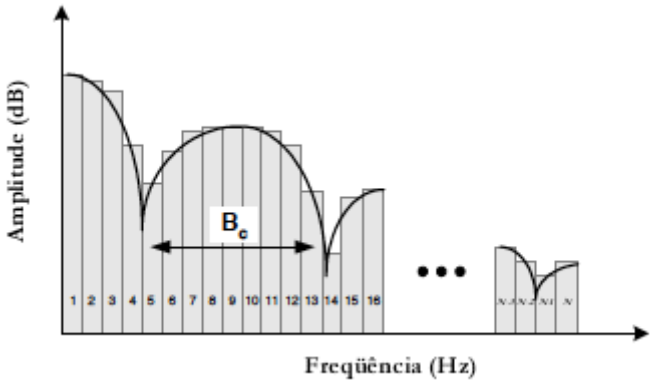
Outra técnica largamente consolidada no cenário das telecomunicações é a técnica de multiplexação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Por meio desta, as várias portadoras são ortogonais entre si e, por conseguinte, podem ser recuperadas individualmente mesmo com a inerente superposição espectral. Entretanto, na multiplexação/modulação OFDM, um mesmo sinal digital é transmitido pelas várias portadoras, dando origem assim, às subportadoras que compões um símbolo OFDM.

Duas grandes contribuições de estudiosos e cientistas de décadas passadas foram fundamentais para difusão da técnica OFDM nos sistemas de Telecomunicações em geral. A primeira delas ocorreu quando Chang, citado por [4], demonstrou ser factível a transmissão de vários canais limitados em banda sem ocorrência de interferência entre símbolos (ISI – *Inter-Symbol Interference*) e interferência entre portadoras (ICI – *Inter Carrier Interference*). A segunda e maior delas, foi compartilhada por Weinstein e Ebert, em 1971 [5]. A proposta era usar a transformada discreta de Fourier, DFT, para a geração e recepção de sinais OFDM. O efeito

dessa nova proposta acabaria com a utilização de bancos de osciladores analógicos na transmissão e recepção, reduzindo enormemente a complexidade de implementação dos modems. A fim de se evitar completamente a ICI e a ISI, surgiu o conceito de intervalo de guarda, um espaço "vazio" entre os símbolos. Mais tarde, Ruiz e Peled, citados por [4] resolveram o problema da ortogonalidade e introduziram o conceito de prefixo cíclico.

É sabido que os principais problemas que assolam os sistemas uniportadora são a alta sensibilidade ao ruído impulsivo e desvanecimento seletivo em frequência, gerados pelo efeito de propagação com multipercursos. Por este motivo, os sistemas multiportadora tornaram-se tão populares, visto que dispõem de meios para contornar esses fenômenos, como por exemplo, aumentar a duração do símbolo, ampliar o intervalo de guarda, aumentar o número de portadoras, entre outros. A Figura 4 ilustra a divisão do espectro de frequências em N subcanais.

Figura 4 – Divisão do espectro de frequências em N subcanais.



Fonte: SILVA, (2006).

Contudo, é preciso ter em mente que sistemas OFDM apresentam alta complexidade se comparado com sistemas uniportadora, uma vez que é necessário garantir que determinados parâmetros estejam estritamente configurados e permaneçam entre certos limites durante a transmissão.

Com respeito ao COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), este difere em parte do OFDM por utilizar codificação de canal, uma técnica que visa a detecção e correção de erros inseridos por ruídos de diversas naturezas. É amplamente aplicado em tecnologias de *broadcasting* por apresentar boa imunidade aos efeitos gerados por multipercurso.

2.2 Princípios Básicos da Modulação OFDM

A modulação OFDM é muito bem explicada em livros destinados exclusivamente a este assunto, conforme visto em [6] e [7], bem como na literatura em geral, por exemplo, em [4], [5], [8]. Nesta seção, portanto, são abordados os pontos básicos de um sistema OFDM, suas vantagens em ambientes com multipercurso e ainda os aspectos do intervalo de guarda.

2.2.1 A Multiplexação OFDM

A multiplexação ou modulação multiportadora OFDM, consiste de uma técnica de multiplexação por divisão de frequências, onde a modulação e demodulação são realizadas via transformada discreta de Fourier inversa (IDFT – *Inverse Discrete Fourier Transform*) e direta (DFT – *Direct Discrete Fourier Transform*) respectivamente. Conforme apresentado por [5] e [7], o pulso retangular é usado na transmissão e na recepção visando combater distorções relacionadas à ISI e à ICI. A equação de tal filtro é dada por:

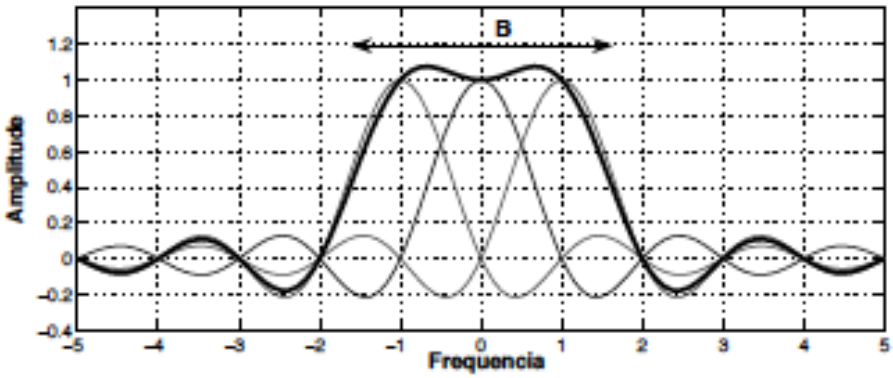
$$g_{Tx}(t) = g_{Rx}(t) = rect\left(\frac{t}{T_N}\right), \tag{1}$$

onde T_N é o período de duração do símbolo. No domínio da frequência, a equação é dada por

$$G_{Tx}(f) = G_{Rx}(f) = T_N . sinc(\pi f T_N). \tag{2}$$

Pela Figura 5, pode-se perceber que os zeros da função *sinc* de uma subportadora estão sempre posicionados nas frequências centrais das demais subportadoras. Isso é feito para que haja ortogonalidade entre as portadoras, ou em outras palavras, para que não haja interferência intercanal. Consegue-se assim economizar banda, recurso este leiloado por valores astronômicos.

Figura 5 – Espectro de um sinal OFDM contendo três portadoras ortogonais.

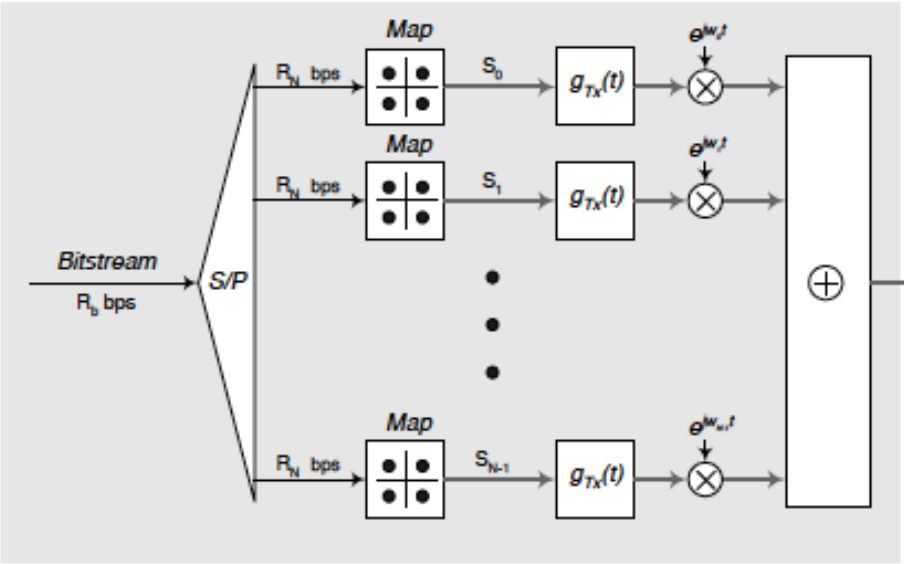


Fonte: SILVA, (2006).

2.2.2 O Transmissor OFDM

Parte essencial de qualquer sistema OFDM, o transmissor é responsável por receber o sinal digital a ser transmitido, modulá-lo e, no caso de um sistema de comunicação sem fio, entregá-lo ao transmissor na forma de um símbolo OFDM. O diagrama de blocos de um modelo simples de transmissor multiportadora é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Modelo de um transmissor multiportadora.



Fonte: SILVA, (2006).

Na entrada do bloco serial para paralelo, o sinal digital representado por uma sequência de bits é transformado em N feixes de símbolos. O bloco Map realiza a modulação em algum sistema de modulação digital, tipicamente QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ou PSK (*Phase-*

Shift Keying). Desta forma, o sinal $s_i = a_i + jb_i$ representa o sinal binário original mapeado em fase e quadratura com determinado índice de modulação M. Em seguida, o filtro $g_{Tx}(t)$ faz a conversão de tempo discreto para tempo contínuo e cada subsímbolo é posteriormente modulado por uma subportadora de frequência f_i ocupando uma largura de banda B_N. Ao final do processo, há um conversor paralelo para serial que realiza a conversão dos subsímbolos somados no estágio anterior. Pela Figura 6 é possível perceber que cada feixe de bits ou subsequência possui taxa de transmissão de $R_N = \frac{R_b}{N}$ e a largura de banda de cada subcanal é $B_N = \frac{B}{N}$ onde B é a largura de banda total, necessária à transmissão do sinal digital inicial. Klenner, citado por [5], mostra que o sinal na saída do transmissor é dado por

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} s_i . g_{Tx}(t) e^{j2\pi f_i t}, \tag{3}$$

onde s_i é o símbolo associado a subportadora *i* do subcanal *i* centrado na frequência:

$$f_i = f_0 + i(B_N). \tag{4}$$

Conforme citado anteriormente, o grande avanço que contribuiu para a popularização de sistemas OFDM foi a descoberta de que era possível substituir os bancos de osciladores analógicos da transmissão e recepção com o uso da transformada de Fourier inversa e direta respectivamente. Para tal, substituindo-se $g_{Tx}(t)$ na Figura 6 pelo impulso retangular, obtém-se:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} s_i . rect\left(\frac{t}{T_N}\right) e^{j2\pi f_i t} \tag{5}$$

Segundo [5], sendo $t = n\left(\frac{T_N}{n}\right)$ $(0 < t < T_N)$ com um símbolo de duração T_N amostrado N vezes e lembrando que $f_i = i\left(\frac{1}{T_N}\right)$, o símbolo de tempo discreto saída do transmissor, para o caso ideal de $rect\left(\frac{t}{T_N}\right) = 1$, é dado como

$$s[n] = \sum_{i=0}^{N-1} s_i . e^{j2\pi \frac{n.i}{N}}, \tag{6}$$

para $0 \leq n \leq T_N$.

Então, é correto afirmar que a última equação corresponde a transformada discreta inversa de Fourier (IDFT). Normalmente, opta-se por usar o algoritmo rápido IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). Desta forma, a equação (6) pode ser reescrita como

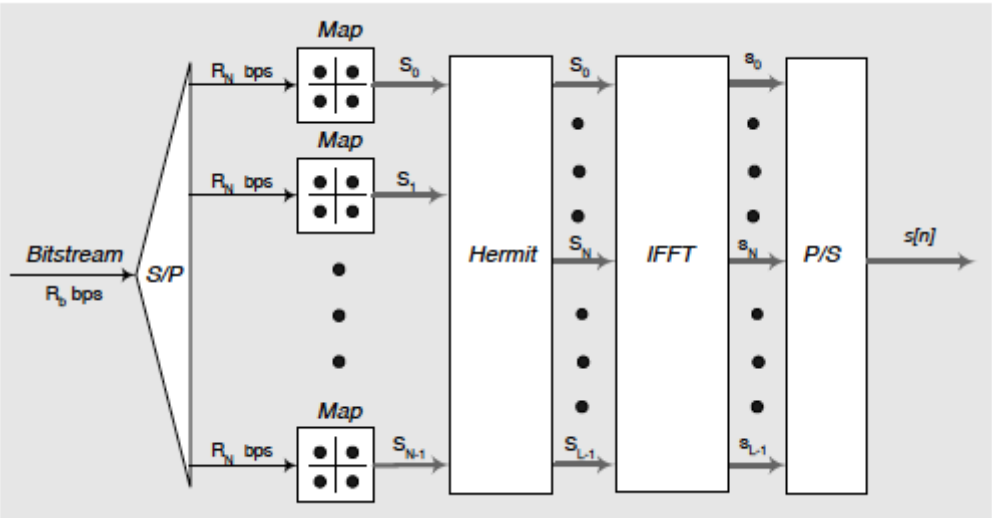
$$s[n] = IFFT\{s_i\}. \tag{7}$$

As vantagens advindas da utilização da transformada de Fourier são a linearidade, convolução circular, ortonormalidade dos autovetores da matriz de transformação, simetria, entre outras, segundo Diniz, Silva e Netto citados por [5].

Quando precisa-se de sinais reais na saída do bloco IDFT, frequentemente é usada a simetria Hermitiana após o mapeamento dos subsímbolos (consulte [5] para maiores detalhes), como mostrado na Figura 7.

Reiterando, o bloco Hermit realiza a simetria Hermitiana para que a operação IFFT resulte em coeficientes reais na saída.

Figura 7 – Configuração básica de um transmissor OFDM.

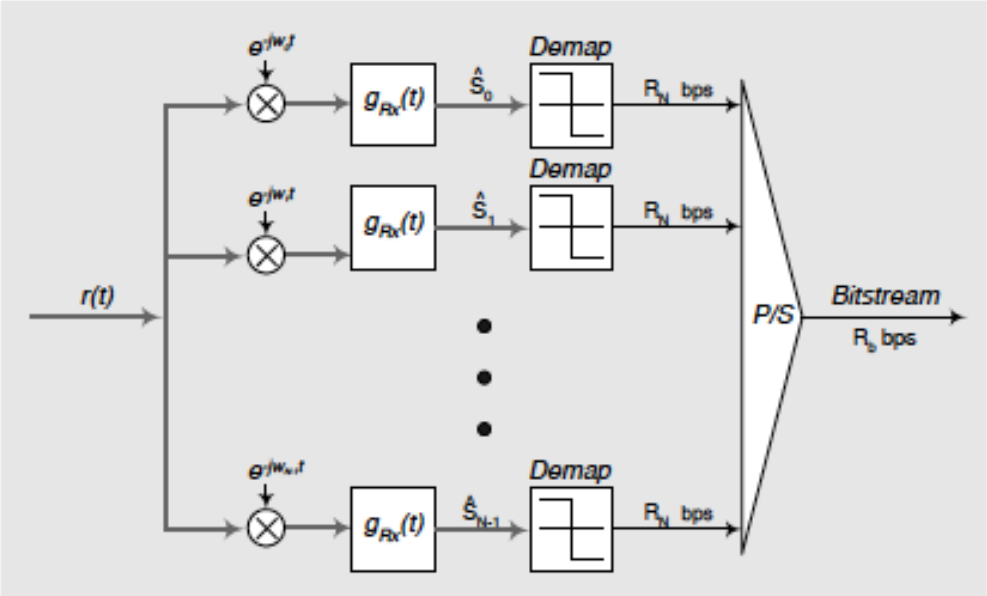


Fonte: SILVA, (2006).

2.2.3 O Receptor OFDM

Um receptor realiza, em termos simples, o processo contrário ao do transmissor. Para que o receptor consiga distinguir cada subportadora em um sinal com subportadoras sobrepostas, é necessário um modelo idêntico ao da Figura 8.

Figura 8 – Modelo de um receptor multiportadora.



Fonte: SILVA, (2006).

Cada subportadora passa por um filtro de recepção idêntico àquele do transmissor. Então, o bloco Demap realiza o demapeamento e em seguida os bits são convertidos de paralelo para serial. É facilmente demonstrado em [5] que, quando desprezado os efeitos do canal e do ruído sobre o sinal, cada subsímbolo na entrada do demapeador corresponde ao mesmo subsímbolo s_i da saída do mapeador do modelo de transmissor multiportadora da Figura 6.

É evidente, por meio da Figura 8 que

$$\hat{s}_i(t) = \left[r(t).\, e^{-j2\pi f_i t}\right] * g_{Rx}(t). \tag{8}$$

Substituindo-se $g_{Rx}(t) = rect\left(\frac{t}{T_N}\right)$, $f_i = i\left(\frac{1}{T_N}\right)$ é possível obter a seguinte equação para $\hat{s}_i(t)$ com o auxílio da integral de convolução e para $t = 0$:

$$\hat{s}_i(t)|_{t=0} = \frac{1}{T_N}\int_0^{T_N} r(\tau).e^{-j2\pi i\frac{\tau}{T_N}}\,d\tau \tag{9}$$

A equação acima é análoga a equação de série de Fourier, visto que o espectro *r(t)* é amostrado em frequências $f_n = \frac{n}{T_a}$ [5]. Manipulando a equação acima algebricamente, isto é, aproximando-se a equação por um somatório e fazendo-se algumas substituições de variáveis, obtém-se

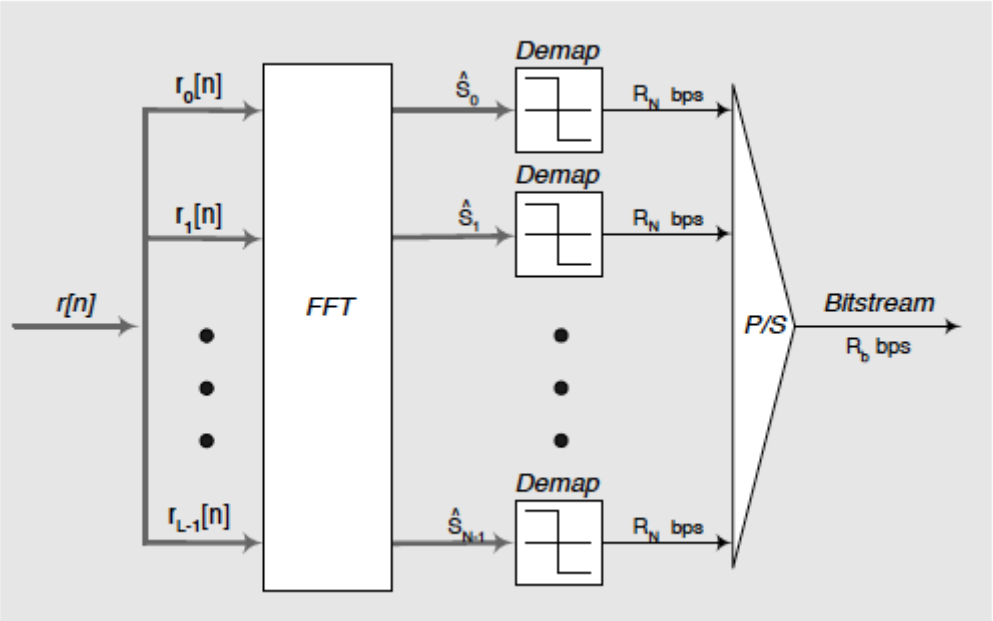
$$\hat{s}[i] = \frac{1}{N}.\sum_{n=0}^{N-1} r[n].e^{-2\pi i\frac{n}{T_N}}, \tag{10}$$

em que a parcela correspondente ao somatório equivale a equação da transformada discreta de Fourier (DFT), onde $0 \leq i \leq N-1$. [5]. Portanto,

$$\hat{s}[i] = \frac{1}{N}\,.FFT\{r[i]\} \tag{11}$$

A configuração de um receptor OFDM é mostrada na Figura 9.

Figura 9 – Configuração básica de um receptor OFDM



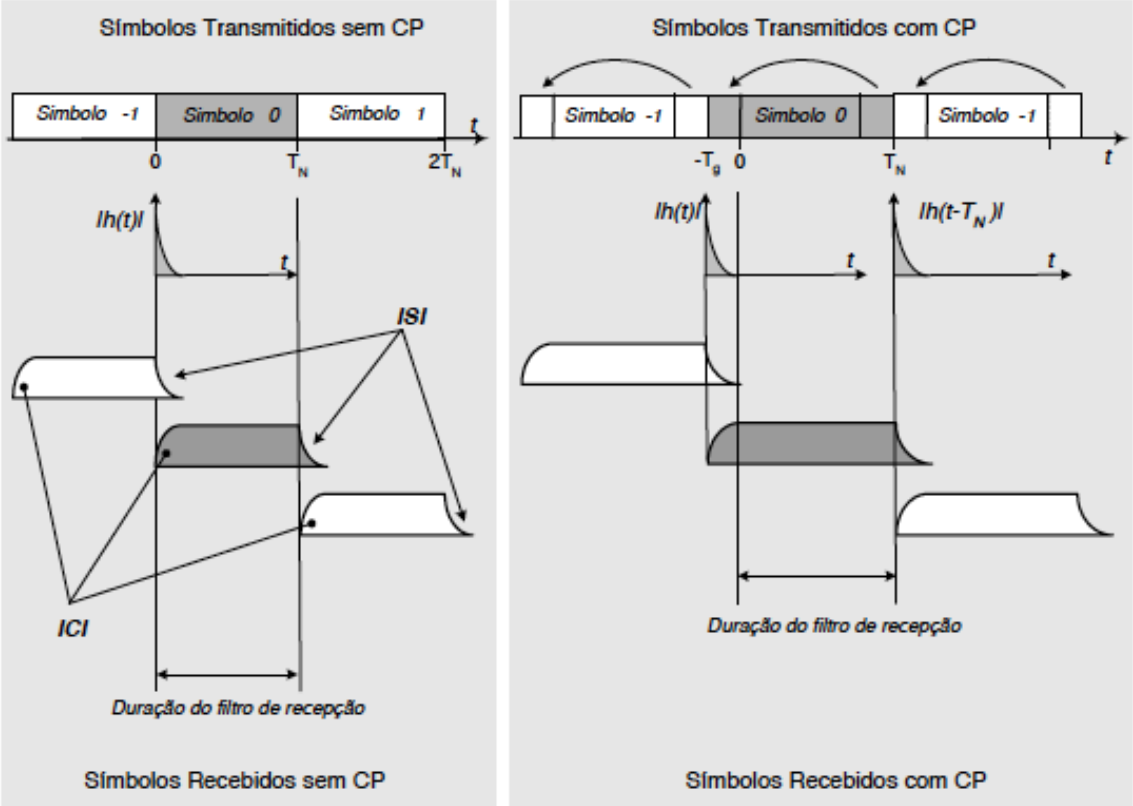
Fonte: SILVA, (2006).

2.2.4 Extensão cíclica

Após a modulação OFDM, é inserido um intervalo de guarda que consiste geralmente na extensão cíclica do símbolo OFDM. Comprova-se em [7] e [8] que o melhor a ser usado é a extensão cíclica do sinal ao invés de ausência de sinal (espaço vazio) para o intervalo de guarda, pois desse modo elimina-se a ICI, mantendo-se a ortogonalidade entre as subportadoras. A extensão cíclica também é comumente conhecida como prefixo cíclico (CP – *Cyclic Prefix*). A Figura 10 ilustra a inserção do CP em diversos símbolos OFDM subsequentes.

Para que a técnica do intervalo de guarda seja usada de forma a melhorar o sistema, é indispensável que a duração do intervalo de guarda T_g seja igual ou maior que máximo atraso sofrido ao passar pelo canal, τ_{max}. Mas, como se trata de Engenharia, existe sempre uma relação de compromisso. Quanto maior o intervalo de guarda com prefixo cíclico, maior o tempo de símbolo, dado por $T = T_N + T_g$. Por sua vez, a resposta impulsiva do filtro de transmissão g_{Tx} usado em cada subportadora passa a ser $g_{Tx} = rect\left(\frac{t}{T_N+T_g}\right)$. Essa alteração na resposta do filtro causa a perda na SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) devido ao descasamento dos filtros de transmissão e recepção [5]. Outra consequência do uso de CP é a redução da eficiência espectral, uma vez que O CP é apenas uma repetição e, portanto, não representa informação útil a ser recuperada na recepção.

Figura 10 – Comparação entre transmissões com e sem prefixo cíclico



Fonte: SILVA, (2006).

Uma importante propriedade decorrente do uso do intervalo de guarda é a de que, com ele, a convolução linear do sinal de saída do transmissor $s[n]$ com a resposta impulsiva do canal $h[n]$, é agora uma convolução circular [5], representada por

$$r[n] = s[n] \otimes h[n] \tag{12}$$

Conhecendo-se $h[n]$ no receptor, o sinal transmitido $s[n]$ pode ser recuperado com o uso de

$$\hat{s}[n] = IDFT\left\{\frac{R[i]}{H[i]}\right\}. \tag{13}$$

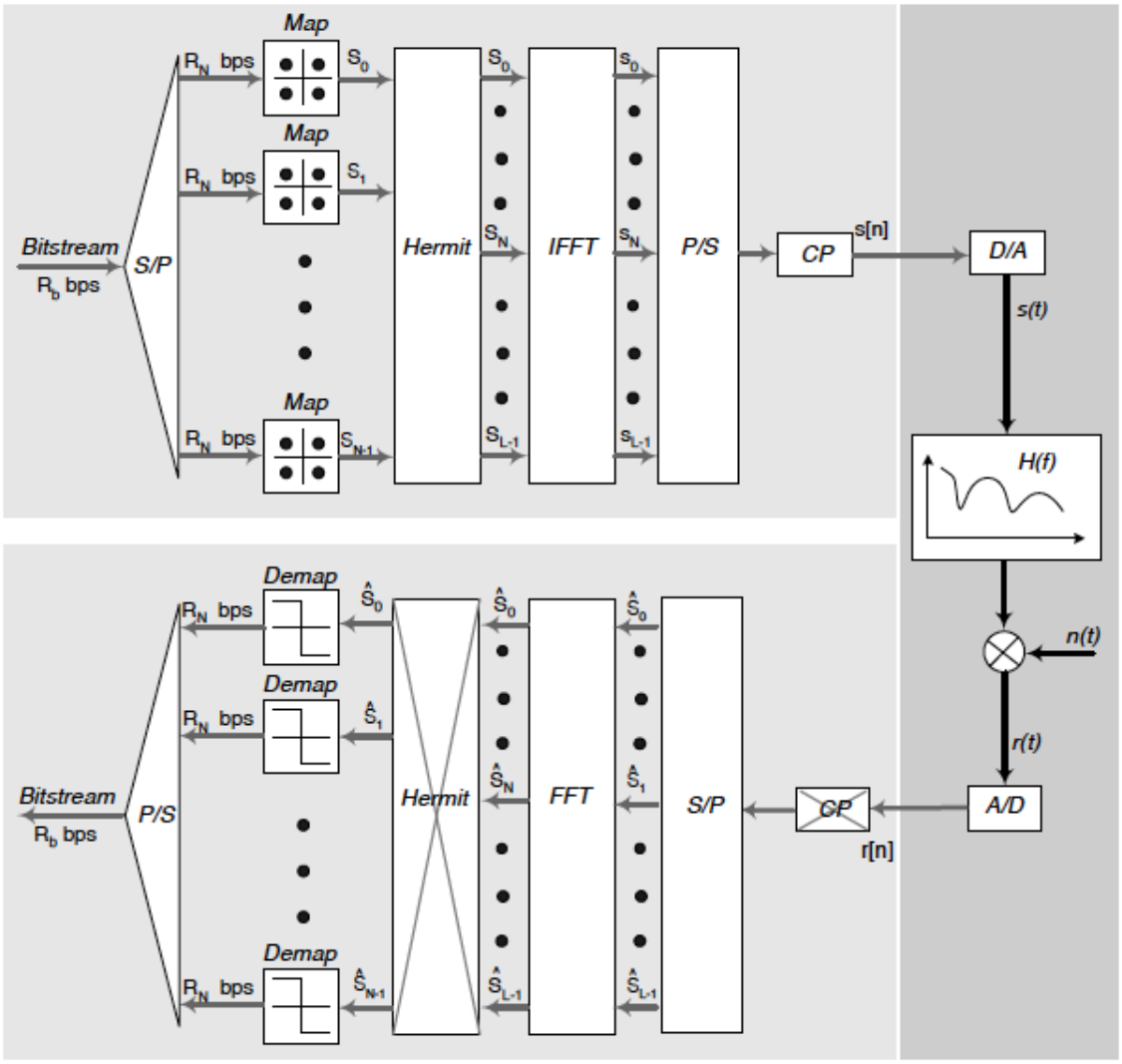
Já que pela definição de DFT fazer a convolução circular no tempo de dois termos é o mesmo que multiplica-los no domínio da frequência,

$$DFT\{r[n]\} = DFT\{s[n] \otimes h[n]\} \Rightarrow R[i] = S[i].H[i] \quad (14)$$

para $0 \leq i \leq N - 1$.

Um sistema básico de comunicação OFDM mostrando a influência do canal na comunicação é mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Transceptor OFDM básico.



Fonte: SILVA, (2006).

3 A TECNOLOGIA DE RÁDIO DIGITAL MUNDIAL DRM

3.1 Características Gerais

De acordo com o guia de implementação do sistema DRM, o mesmo foi criado como um sistema digital de alta qualidade visando a substituição dos sistemas de radiodifusão sonora nas bandas de AM e FM/VHF. Ele pode ser operado nas mesmas faixas dos sistemas analógicos, como mostrado na Figura 12 [9].

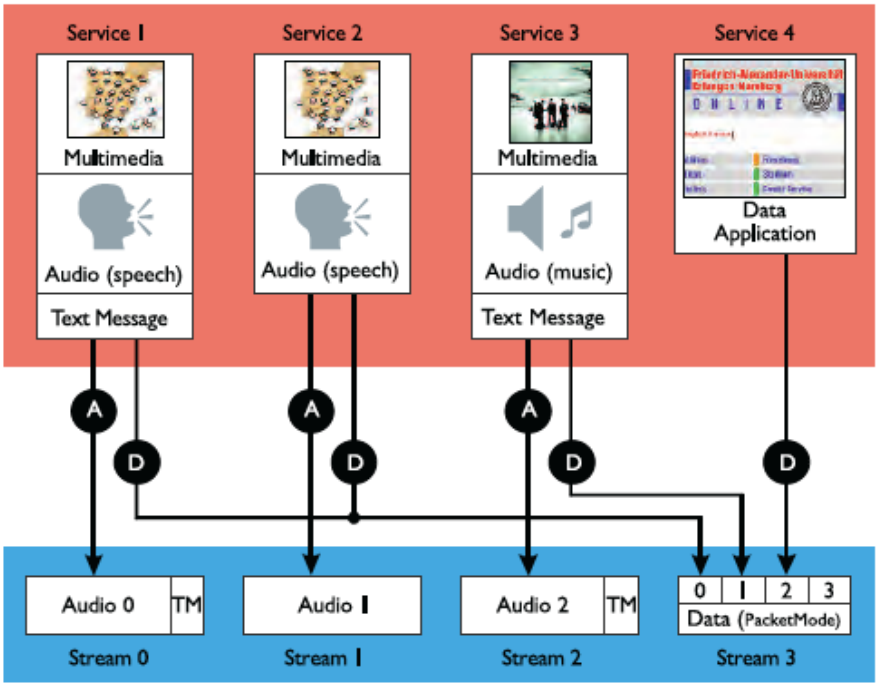
Figura 12 – Faixas de operação do DRM.

Fonte: LAFLIN, (2012).

Observa-se pela Figura 12 que o DRM possui dois modos, quais sejam o DRM30 e o DRM+. O DRM30 foi projetado especificamente para utilizar faixas de AM abaixo de 30 MHz. Por outro lado o DRM+ utiliza o espectro de 30MHz até VHF faixa III, centrado na faixa II de FM [10].

Quando comparado com outros sistemas, o DRM possui muitos pontos positivos: permite o chamado *simulcasting*, que consiste em transmitir ambos os conteúdos digitais e analógicos durante o período de transição de implementação absoluta do sistema digital. É um dos poucos que permite também a digitalização e transmissão em faixas de AM. Outro benefício é o de que DRM permite até 4 serviços operando na mesma frequência, como 3 serviços de áudio distintos e um serviço de dados como visto na Figura 13 [9].

Figura 13 – Utilização dos serviços no DRM.

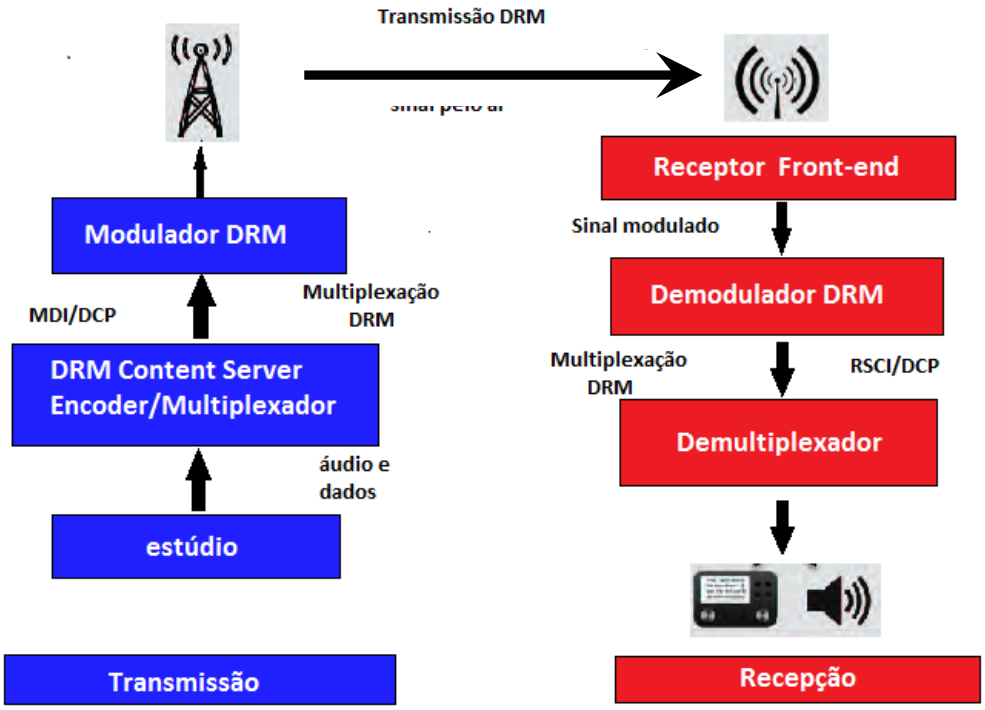


Fonte: LAFLIN, (2012).

O sistema de rádio digital mundial adota modulação COFDM que é uma variação da modulação OFDM, mas codificada. Vários parâmetros da modulação OFDM e da codificação podem ser ajustados para encontrar a melhor combinação de potência de transmissão, robustez do sistema e taxa de transmissão, permitindo que o DRM opere satisfatoriamente em diferentes ambientes de propagação. O sistema DRM permite também que a transmissão seja realizada por meio de redes de multi-frequências MFN (*Multi-Frequency Networks*) ou por redes de frequência única SFN.

A Figura 14 mostra um simples esquema de transmissão utilizando um único transmissor e retrata o conteúdo DRM, desde a etapa de produção no estúdio até a recepção pelo ouvinte. A informação a ser transmitida é gerada no estúdio. Posteriormente, passa pelo bloco *Content Server* onde é feita a codificação e multiplexação do sinal. Na sequência o sinal é modulado e então transmitido pelo espaço livre.

Figura 14 – Esquema de transmissão DRM.



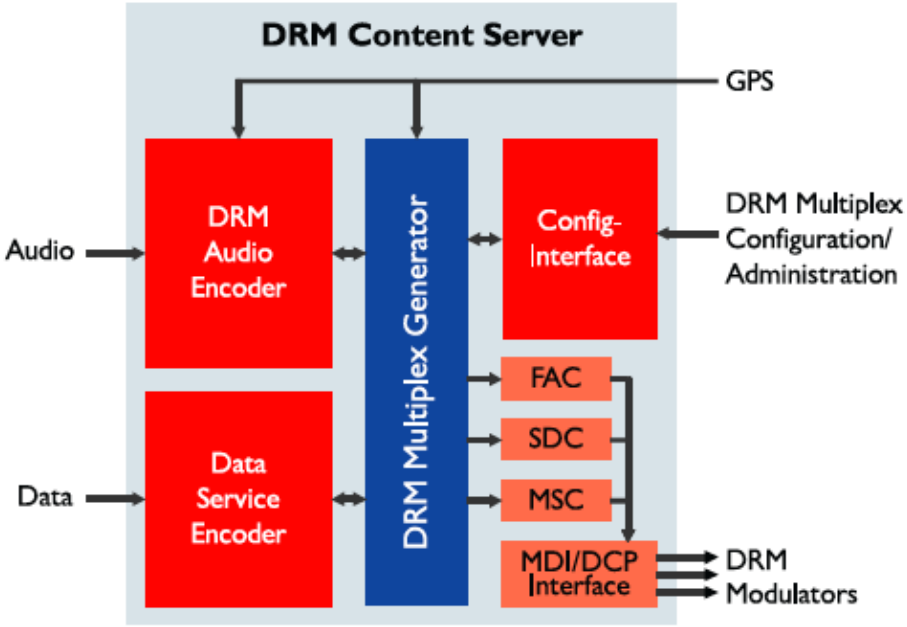
Fonte: LAFLIN, (2012).

3.2 Codificação e Multiplexação no DRM

Estas duas funções são executadas no bloco *Content Server*, mostrado na Figura 15. Há dois tipos principais de informação na saída do bloco: o MSC (*Main Service Channel*) que é o canal de serviço principal, formado pelo áudio e dados codificados e o outro é o de informação que trafega pelo FAC (*Fast Access Channel*) e pelo SDC (*Service Description Channel*). Estes canais comunicam os parâmetros do sistema e asseguram que o receptor saberá decodificar a informação [9].

Os blocos codificadores de áudio e dados asseguram a adaptação do fluxo de dados ao formato digital. Quando a multiplexação e a codificação de áudio são feitas em um lugar diferente do site de transmissão, o que acontece normalmente, o sinal é distribuído através do protocolo MDI (*Multiplex Distribution Interface*) [9].

Figura 15 – DRM *Content Server*.



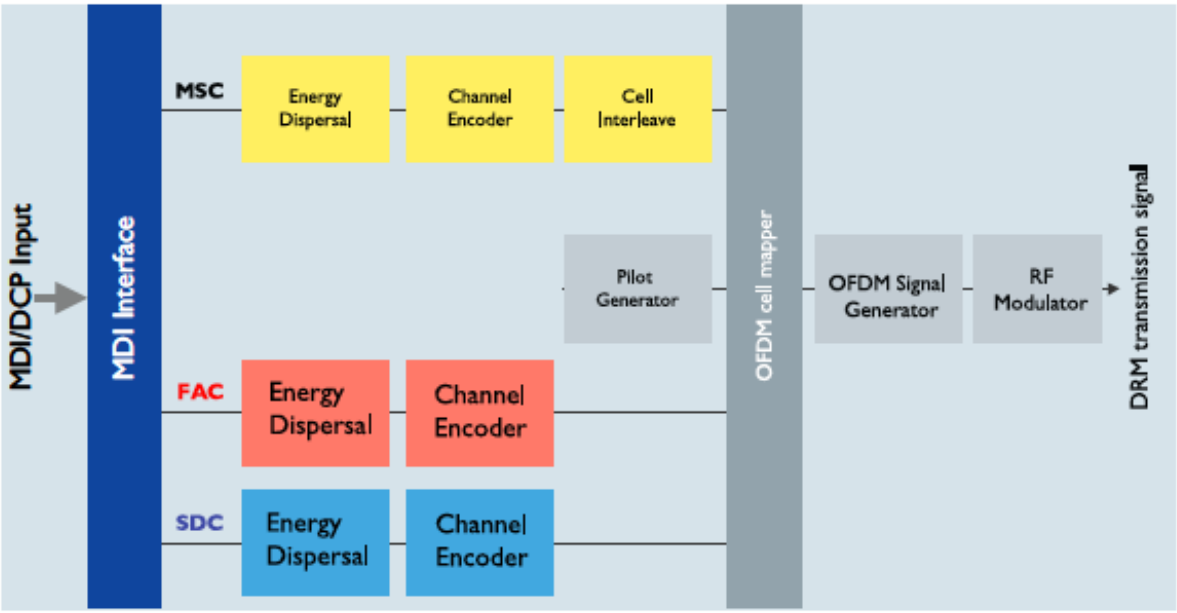
Fonte: LAFLIN, (2012).

3.3 O Esquema de Modulação segundo a Tecnologia DRM

A Figura 16 apresenta o diagrama correspondente a modulação em um sistema DRM. O bloco *Energy Dispersal* é responsável por evitar que longas cadeias de bits sejam geradas [9]. O codificador de canal adiciona bits redundantes de uma maneira padronizada propiciando a detecção e correção de erros e também faz o mapeamento da informação digital já codificada para células QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). O bloco denominado *Cell Interleaver* nada mais é do que um embaralhador de células no tempo. Como alguns distúrbios neste tipo de transmissão ocorrem em rajadas, o embaralhamento é usado para que o erro em rajada afete uma sequência de bits que não seja de fato uma sequência na informação a ser reproduzida. Com isso, evita-se que um trecho inteiro do áudio transmitido seja perdido ou distorcido.

Segundo [9], um bloco essencial para o funcionamento do sistema é o gerador de portadoras-piloto (*Pilot Generator*). Este é responsável por gerar portadoras com determinada amplitude e fase e que não carregam dados, para que o receptor ao recebê-las possa estimar o comportamento do canal em tempo real e aplicar a equalização de canal. O mapeador de células OFDM distribui o conjunto de subportadoras na sua entrada, de forma a preparar a multiplexação conforme exigida pela IFFT.

Figura 16 – Modulação em um sistema DRM



Fonte: LAFLIN, (2012).

Embora o DRM opere em diferentes faixas de frequência, este trabalho limita-se em simular o desempenho e propor uma possível implantação de uma rede de transmissão SFN utilizando a faixa de FM. Portanto, a próxima subseção trata especificamente dos detalhes do DRM+, que é a parte do padrão DRM voltada para a transmissão em FM/VHF.

3.4 Características do Modelo de Camada Física do Padrão de Transmissão DRM+

O DRM+ (ou DRM Plus), que é a extensão do padrão DRM para a faixa do VHF, e que pode realmente vir a ser o sistema utilizado para a faixa do FM no contexto do Rádio Digital Brasileiro, dispõe de uma vasta gama de possibilidades a serem escolhidas [11]. Definindo-se o tipo de modulação, é possível escolher a taxa de código para o sistema, fazendo com que o mesmo fique mais ou menos redundante. Consequentemente, a taxa de transmissão (*bit-rate*) é alterada. O quadro da Figura 17 ilustra este fato.

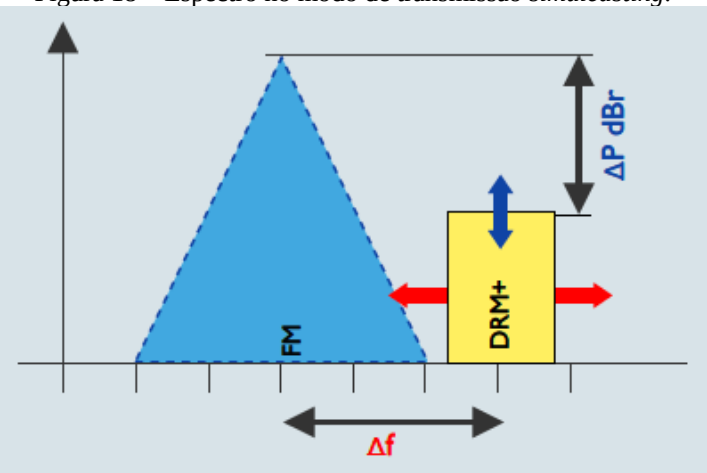
Figura 17 – Parâmetros do Padrão DRM+.

DRM+ Parâmetros do Modo E			Taxa Transmissão (kbit/s)	
		Taxa de código	4-QAM	16-QAM
Banda ocupada	95 KHz	0.25	37.3	
Número de subportadoras	213	0.333	49.7	99.4
Espaçamento entre subportadoras	444.44 Hz	0.4	59.6	
Duração útil do símbolo T_u	2.25 ms	0.411		122.4
Intervalo de Guarda T_g	0.25 ms	0.5	74.5	149.1
Duração total do símbolo $T_u + T_g$	2.5 ms	0.625		186.4

Fonte: LAFLIN, (2012).

No modo *simulcasting* quando o sinal oriundo do DRM+ é adicionado a um transmissor de FM analógico já existente, o espectro da nova configuração e as duas variáveis principais, *offset* da frequência e a amplitude relativa são ilustradas na Figura 18.

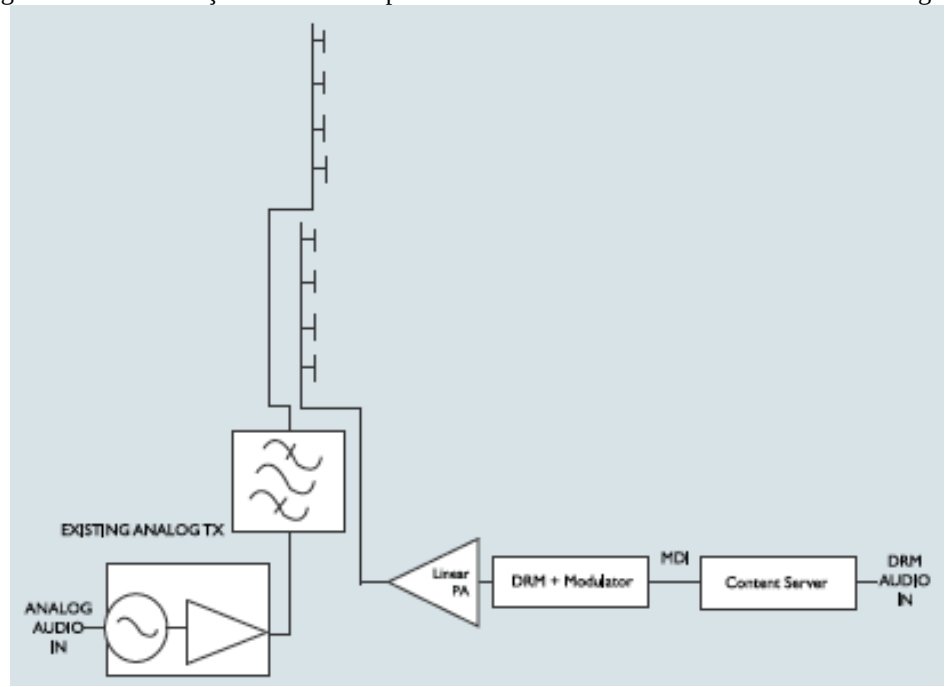
Figura 18 – Espectro no modo de transmissão *simulcasting*.



Fonte: LAFLIN, (2012).

Uma combinação interessante para transmissão simultânea é o uso de duas antenas, sendo uma para o sinal DRM+ e outra para o sinal FM analógico. As duas devem estar no mesmo mastro e devem possuir também diagramas de irradiação similares para que possam preservar a relação de amplitude entre o sinal analógico e o digital [11]. A Figura 19 mostra o diagrama para essa combinação.

Figura 19 – Combinação das Antenas para Transmissão Simultânea DRM+ e FM Analógico.



Fonte: LAFLIN, (2012).

Uma maneira bastante eficiente de caracterizar o desempenho de um sistema DRM é medir a taxa de erro de modulação (MER – *Modulation Error Rate*). Conforme explicado anteriormente, cada subportadora é modulada em termos de amplitude e fase. Entretanto, erros inerentes à modulação, distorções na fase devido ao ruído e distorções introduzidas pelo canal de RF (*Radio Frequency*) provocam erros no processo de decodificação no receptor. A taxa de erro de modulação indica a relação entre o sinal desejado e o sinal com erros introduzidos pelo sistema nas subportadoras que compõem o mesmo. Ela é expressa em decibéis e, para um transmissor DRM funcionando de acordo com o padrão, deve ser de 30 dB ou superior [10].

Um transmissor DRM+ pode operar juntamente com outros transmissores em uma rede de frequência única. Nesta situação, a máxima distância entre transmissores depende do tamanho do intervalo de guarda do sistema OFDM. Para o DRM+, o tempo do intervalo de guarda *Tg* é de 250µs [9]. Então, multiplicando-se *Tg* pela velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no ar, 3×10^8 m/s, obtém-se 75km. Portanto, a máxima distância entre transmissores não deve exceder o limite de 75km. O quadro da Figura 20 proporciona uma visão geral dos principais parâmetros do DRM+.

Figura 20 – Principais Parâmetros de Camada Física do Padrão DRM+.

Período de tempo elementar T	83 1/3 μs
Duração da parte útil (ortogonal) $T_u = 27 \times T$	2.25 ms
Duração do intervalo de guarda $T_g = 3 \times T$	0.25 ms
Duração do símbolo $T_s = T_u + T_g$	2.5 ms
Razão T_g / T_u	1/9
Duração do frame de transmissão T_f	100 ms
Número de símbolos por frame N_s	40
Largura de banda do canal B_w	96 KHz
Espaçamento entre subportadoras $1/T_u$	444 4/9 Hz
Número de subportadoras	Kmin = –106; Kmax = 106
Subportadoras não utilizadas	nenhuma

Fonte: LAFLIN, (2012).

4 MODELAGEM DOS CANAIS DE TRANSMISSÃO DRM

4.1 Modelo de Canal WSSUS

Diferentemente de outros tipos de propagação, a propagação de ondas de rádio em VHF nas bandas I e II é caracterizada por intensa difração, reflexão e *scattering* ao longo do caminho entre o transmissor e o receptor. Normalmente, as ondas eletromagnéticas sendo transmitidas nesses modos chegam ao receptor em diferentes instantes de tempo, consequência direta do efeito chamado de multipercurso. O resultado desse efeito é o desvanecimento seletivo em frequência, mais ou menos intenso dependendo da largura de banda do sistema [5]. Além disso, o movimento relativo do transmissor, no caso de um receptor em veículo trafegando em uma estrada, por exemplo, causa o conhecido efeito Doppler.

Para que seja obtido um modelo matemático do canal, o método aqui consiste em usar processos estocásticos variantes no tempo e definir modelos para boa, moderada e péssimas condições de propagação. Muitos canais físicos que sofrem desvanecimento podem ser considerados como estacionários em curtos períodos de tempo ou pequenas distâncias. Embora estes canais não sejam estacionários no sentido estrito, eles podem ser categorizados como estacionários no sentido amplo (*Wide-Sense Stationary* - *WSS*). Canais WSS têm a propriedade que suas funções de correlação são invariantes com respeito à translação no tempo, isto é, as estatísticas de desvanecimento não mudam em curtos períodos de tempo [12]. Ainda segundo [12], também é fundamental que os processos sejam descorrelacionados entre si (do inglês US – *Uncorrelated Scattering*). Utilizando-se as duas restrições de WSS e US, obtém-se uma classe de canais conhecido como (*Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering* - WSSUS), que mostra dispersividade descorrelacionada nos retardos e nos espalhamentos Doppler [12].

O modelo de canal é então desenvolvido a partir da equação (15), onde e(t) e s(t) são as envoltórias complexas dos sinais de entrada e saída, respectivamente [13]. Assim,

$$\mathrm{s(t)} = \sum_{k=1}^{n} \rho_k c_k(\mathrm{t})\mathrm{e}(\mathrm{t} - \Delta_k), \tag{15}$$

onde, ρ_k é a atenuação do k-ésimo percurso, Δ_k é o atraso do k-ésimo percurso e os coeficientes de cada *tap* variante no tempo, $c_k(\mathrm{t})$, são definidos como variáveis aleatórias complexas Gaussianas, mutuamente independentes e de média nula. A magnitude $|c_k(\mathrm{t})|$ é uma distribuição Rayleigh ou Ricean, dependendo se o sistema a ser estudado possui ou não linha de visada entre o transmissor e o receptor. A fase $\Phi(\mathrm{t})$ é distribuída uniformemente.

Para cada coeficiente $c_k(\mathrm{t})$ há um processo estocástico caracterizado pela sua variância e seu perfil de densidade de potência $P_k(\mathrm{f})$. A variância, neste caso, é usada para obter a potência média do sinal que é recebido no k-ésimo percurso, representada por ρ_k [13]. Por outro lado, $P_k(\mathrm{f})$ é conhecido como perfil Doppler (*Doppler spectrum*) e representa a influência do efeito Doppler nos sinais que chegam atrasados de Δ_k [13].

Alguns métodos usados para calcular os parâmetros oriundos do efeito Doppler influenciam o modelo de canal. Um parâmetro básico é a máxima frequência de Doppler, denotada por f_d,

$$f_d = \frac{v}{\lambda}, \tag{16}$$

onde v é a velocidade do receptor e λ é o comprimento de onda do sinal transmitido. De acordo com [13], no caso em que todas as ondas chegam a antena receptora com aproximadamente a mesma potência, o perfil Doppler pode ser aproximado pela equação,

$$P_k(\mathrm{f}) = \frac{\mathrm{A}}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathrm{f}}{f_d}\right)^2}} \qquad para\ f\ \in\ ]-f_d, f_d[. \tag{17}$$

A equação (17) é conhecida como o espectro clássico “de Jakes” e é referida nas Figuras subsequentes de tipos de canais como “*Classical*”.

Segundo [13], um outro tipo de espectro, usado quando o canal apresenta percursos com grandes atrasos de propagação, pode ser obtido com o uso da função gaussiana $G(f, A, f_1, f_2)$

$$G(f, A, f_1, f_2) := A\, exp\left(\frac{(f - f_1)^2}{2{f_2}^2}\right). \tag{18}$$

Os espectros chamados de Gauss1 e de Gauss2 nas Figuras 21 a 25 a seguir são obtidos a partir da função Gaussiana acima com as seguintes características:

$$G(f, A, \pm 0{,}7 \times f_d,\ 0{,}1 \times f_d), \tag{19}$$

onde o sinal de positivo é referente ao espectro Gauss1 e o negativo ao espectro Gauss2.

Figura 21 – Modelo de canal DRM+: zona urbana.

Channel no 8: Urban			
Velocities: 2 and 60 km/h (pedestrian and vehicle speed)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	-2,0	Classical
2	0,2	0,0	Classical
3	0,5	-3,0	Classical
4	0,9	-4,0	Classical
5	1,2	-2,0	Classical
6	1,4	0,0	Classical
7	2,0	-3,0	Classical
8	2,4	-5,0	Classical
9	3,0	-10,0	Classical

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Figura 22 – Modelo de canal DRM+: zona rural.

Channel no 9: Rural			
Velocity: 150 km/h (vehicle speed on highways)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	-4,0	Classical
2	0,3	-8,0	Classical
3	0,5	0,0	Classical
4	0,9	-5,0	Classical
5	1,2	-16,0	Classical
6	1,9	-18,0	Classical
7	2,1	-14,0	Classical
8	2,5	-20,0	Classical
9	3,0	-25,0	Classical

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Figura 23 – Modelo de canal DRM+: zona urbana obstruída.

Channel no 10: Terrain obstructed			
Velocity: 60 km/h (speed within built-up areas)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	-8,0	Classical
2	1,0	-2,0	Classical
3	2,5	0,0	Classical
4	3,5	-1,0	Classical
5	5,0	-2,0	Classical
6	8,0	-3,0	Classical
7	12,0	0,0	Classical
8	14,0	-6,0	Classical
9	16,0	-3,0	Classical

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Figura 24 – Modelo de canal DRM+: terreno montanhoso

Channel no 11: Hilly terrain			
Velocity: 100 km/h (vehicle speed along country roads)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	0,0	Classical
2	0,5	-5,7	Classical
3	1,3	-12,7	Classical
4	1,9	-20,6	Classical
5	30,0	-3,1	Gauss1
6	31,3	-5,4	Gauss1
7	34,9	-11,6	Gauss1
8	37,2	-15,9	Gauss1
9	39,1	-18,9	Gauss1
10	40,0	-25,7	Gauss1
11	80,0	-4,5	Gauss2
12	82,7	-11,5	Gauss2

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Figura 25 – Modelo de canal DRM+: rede SFN.

Channel no 12: SFN			
Velocity: 150 km/h (vehicle speed on highways)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	0,0	Classical
2	100,0	-13,0	Gauss1
3	220,0	-18,0	Gauss2
4	290,0	-22,0	Gauss1
5	385,0	-26,0	Gauss2
6	480,0	-31,0	Gauss1
7	600,0	-32,0	Gauss2

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

4.2 Perdas no Enlace de Rádio

4.2.1 O Modelo de Okumura

O modelo de Okumura é um modelo empírico que teve sua origem no Japão baseado em testes cobrindo os mais diversos tipos de ambientes nas frequências de 150-3000 MHz. O modelo abrange células com raio entre 1 e 100 km e com alturas das antenas de transmissão e recepção de 30 a 1000 metros [14]. As características do terreno bem como os tipos de ambiente também são levadas em consideração no cálculo usando este modelo. A equação básica para a perda de propagação dada por Okumura é da forma [14],

$$L = L_o + A(f,d) - G_{area} - G(h_t) - G(h_r), \tag{20}$$

onde L_o é a perda de propagação em espaço livre, definida como a razão entre a potência recebida e a potência transmitida. O termo G_{area} é um fator de correção aplicado em função do tipo de ambiente no qual o sistema opera. A função $A(f,d)$ corresponde a uma atenuação adicional média, para áreas urbanas (vide [14] para mais detalhes). Os termos $G(h_t)$ e $G(h_r)$ são fatores de correção para antenas com alturas diferentes daquelas de referência. Tais fatores são facilmente obtidos pelas equações:

$$G(h_t) = 20.log\left(\frac{h_t}{200}\right) \qquad h_t > 10m \tag{21}$$

$$G(h_r) = 10.log\left(\frac{h_r}{3}\right) \qquad h_t > 10m \tag{22}$$

$$G(h_r) = 20.log\left(\frac{h_r}{3}\right) \qquad 3m < h_t < 10m. \tag{23}$$

4.2.2 O Modelo de Okumura-Hata

Com o uso cada vez maior dos computadores em problemas de Engenharia, Hata desenvolveu um método que possibilita o uso de ferramentas computacionais para o cálculo de perda de propagação em uma rede. Seu método faz uso de fórmulas matemáticas originadas do modelo de Okumura. Segundo [14], essas fórmulas são limitadas a uma faixa de frequência de 150MHz a 1500MHz e para terrenos quase planos. Ainda segundo [14], para ambientes urbanos, pode-se encontrar a atenuação por meio da equação,

$$E = 69{,}82 - 6{,}16.\log(f) + 13{,}82.\log(h_1) - a(h_2) + [44{,}9 - 6{,}55.log(h_1)].[\log(d)] \quad (24)$$

onde E é a intensidade de campo elétrico em dB(μV/m); f é a frequência em MHz; h_1 é a altura da antena transmissora, de 30 a 200m; h_2 é a antena da antena receptora, de 1 a 10m; d é a distância do enlace em km, de até 20km; $a(h_2)$ é um fator de correção dado em dB, determinado por

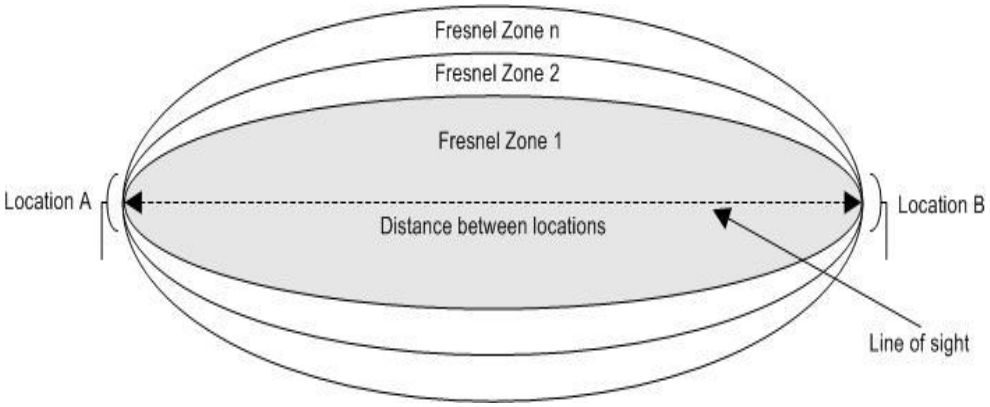
$$a(h_2) = [1{,}1.\log(f) - 0{,}7]h_2 - 1{,}56.\log(f) - 0{,}8. \quad (25)$$

Novamente, vale ressaltar que o método descrito anteriormente é limitado a faixa de frequência de 150MHz a 1500MHz e para enlaces que não excedam a distância de 20km [15].

4.2.3 Zona de Fresnel

Para uma ligação via rádio entre os pontos A e B, a região entre os dois pontos pode ser subdividida em uma família de elipsóides, conhecidas como elipsóides de Fresnel com pontos focais em A e B. São denominadas zonas de Fresnel os anéis circulares resultantes do corte transversal das elipsóides de Fresnel [16], conforme visto na figura a seguir:

Figura 26 – Zonas de Fresnel



Fonte: MIYOSHI; SANCHES, (2006).

Pode-se considerar um enlace com visada direta como sendo aquele que não possui nenhum obstáculo dentro da primeira zona de Fresnel, ou seja, o fenômeno de difração é desprezível. O raio da primeira elipsóide de Fresnel que determina a primeira zona de Fresnel, pode ser obtido pela expressão matemática

$$R_1 = 17{,}32\sqrt{\frac{d}{4f}}, \tag{26}$$

onde R_1 é o raio (em m), f é a frequência (em GHz) e d é a distância do enlace (em km)

Se há obstáculos dentro da primeira zona de Fresnel, as ondas de rádio refletindo esses objetos podem chegar fora de fase com os sinais que viajam diretamente, reduzindo, assim, a potência do sinal recebido [16]. Por isso, obstruções na primeira zona de Fresnel devem ser evitadas. Como uma regra geral, a obstrução máxima permitida é de 40%, mas a recomendação é que, se houver alguma obstrução, ela seja menor que 20% [16].

4.3 Atenuação no Espaço Livre

Toda onda eletromagnética propagando-se no espaço livre sofre uma atenuação contínua [16]. A medida que a onda se propaga e consequentemente se afasta da fonte, tem-se a mesma quantidade de energia sendo distribuída em uma área cada vez maior. A atenuação de espaço livre pode ser calculada pela equação de Friis na forma logarítmica conforme,

$$A_o(dB) = 32{,}4 + 20.\log(f) + 20.\log(d), \tag{27}$$

onde d é a distância do enlace (km), f é a frequência (MHz) e A_o representa a atenuação no espaço livre (dB).

5 AS REDES DE FREQUÊNCIA ÚNICA – SFN

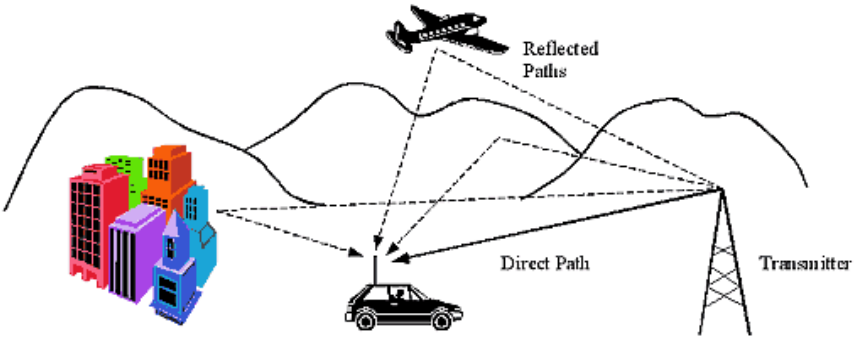
5.1 Introdução

É intuitivo pensar que quanto maior a potência transmitida, melhor é a cobertura do sinal. Este conceito sempre foi aplicado a uma mesma antena. No entanto, o mesmo efeito pode ser obtido mandando essa potência extra para uma nova antena. Este é o princípio fundamental das redes de frequência única ou, em inglês, *Single Frequency Networks*. Redes SFN conseguem cobrir uma mesma área utilizando menos potência [17] [18]. Portanto, em teoria, a adição de transmissores contribui para uma melhora significativa do desempenho do sistema. Acrescenta-se também que as redes SFN utilizam, como o próprio nome já diz, uma única frequência. Desta forma, aumentam a eficiência na utilização do espectro de rádio frequência se comparadas as tradicionais redes MFN (*Multi-Frequency Networks*) [17]. Some-se a isto tudo o fato de que elas ainda aumentam a área de cobertura e reduzem significativamente falhas na recepção, visto que operam sincronizadas e são cuidadosamente planejadas para que haja uma interferência construtiva nas áreas de sobreposição de sinal.

5.2 O Fenômeno dos Múltiplos Percursos

Um problema que assola as comunicações sem fio é o chamado multipercurso ou multicaminho [17]. Neste, o sinal principal chega ao receptor juntamente com outras amostras atenuadas e defasadas no tempo do sinal principal, as quais sofreram difração, reflexão, espalhamento e refração. Este problema é ainda mais evidenciado em grandes centros urbanos onde edifícios, arbustos, aviões e etc, agem como obstáculos no que concerne a propagação do sinal. A Figura 27 ilustra este fenômeno.

Figura 27 – Recepção com multipercurso

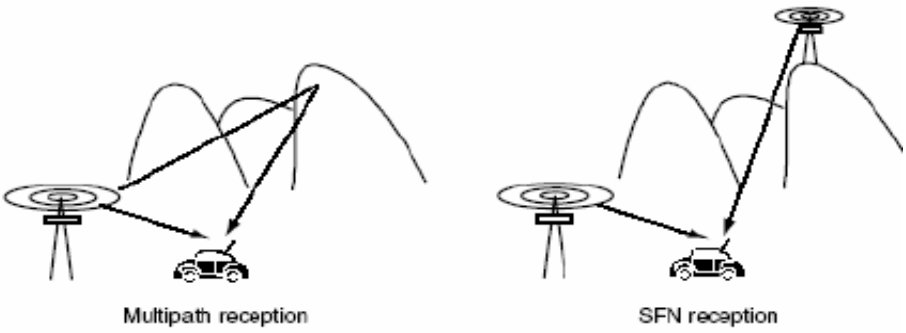


Fonte: Google *Images*, (2014).

Porém, nenhum receptor é capaz de distinguir um sinal refletido proveniente de um único transmissor de um sinal oriundo de vários transmissores [19]. Do ponto de vista do receptor, é independente estar em uma zona onde ocorre o efeito de multipercurso ou dentro de uma rede SFN. Em princípio, se um sistema funciona em um ambiente multipercurso, o mesmo tem potencial para lidar com redes SFN.

Como mostrado na Figura 28, o efeito de uma recepção com multipercurso e de uma recepção SFN é o mesmo para o receptor, ou seja, várias versões de um mesmo sinal chegam até ele em instantes de tempo diferentes. Como consequência, aparece a chamada interferência entre símbolos ou intersimbólica (ISI – *Intersymbol Interference*). Este tipo de interferência não é sanado com o aumento da potência transmitida, que melhora apenas a relação sinal-ruído.

Figura 28 – Similaridade entre recepção com multipercurso e recepção SFN



Fonte: Google *Images*, (2014).

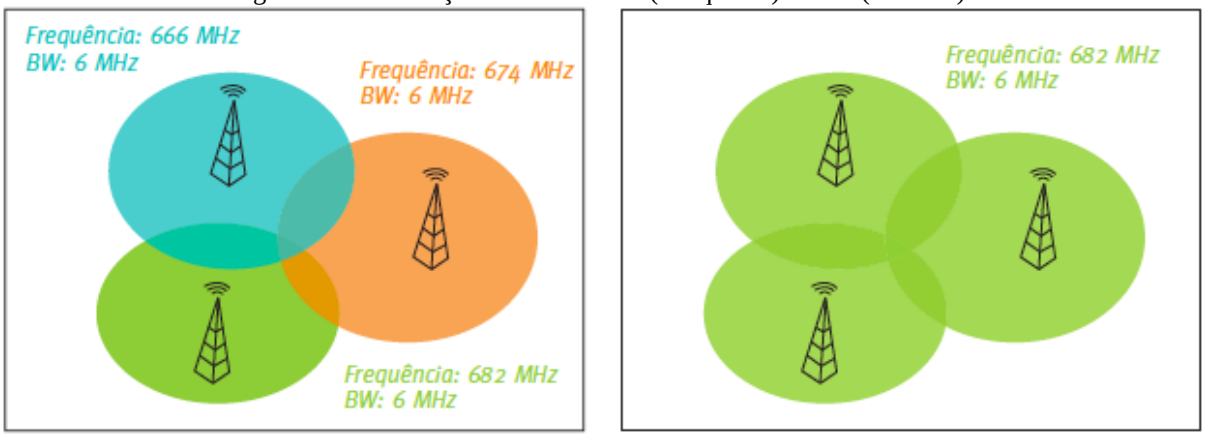
Sabendo que quanto menor for a duração de cada símbolo, mais severa será a interferência intersimbólica, o efeito líquido dos multipercursos é o aparecimento de desvanecimentos

seletivos em frequência (também chamados de *fading*) no sinal recebido [20]. Em ambientes urbanos, esses ecos na recepção do sinal são responsáveis pelos famosos “fantasmas” na imagem de um televisor analógico. Já em transmissões analógicas de rádio, eles causam distorções e *cross-talk*. Diferentemente das transmissões analógicas, os ecos são usados em favor de uma melhor recepção nas transmissões digitais que empregam redes SFN.

5.3 Funcionamento

O princípio de funcionamento de uma rede SFN é em suma, bastante simples. Todos os transmissores devem transmitir o mesmo sinal exatamente na mesma frequência. A Figura 29 ilustra uma rede MFN à esquerda e sua possível substituição por uma rede SFN, à direita. Pela Figura, percebe-se que há na rede MFN três transmissores de três emissoras de TV, por exemplo, operando em frequências diferentes. Ao passo que na rede SFN, os sinais dessas três emissoras são transmitidos em uma mesma frequência.

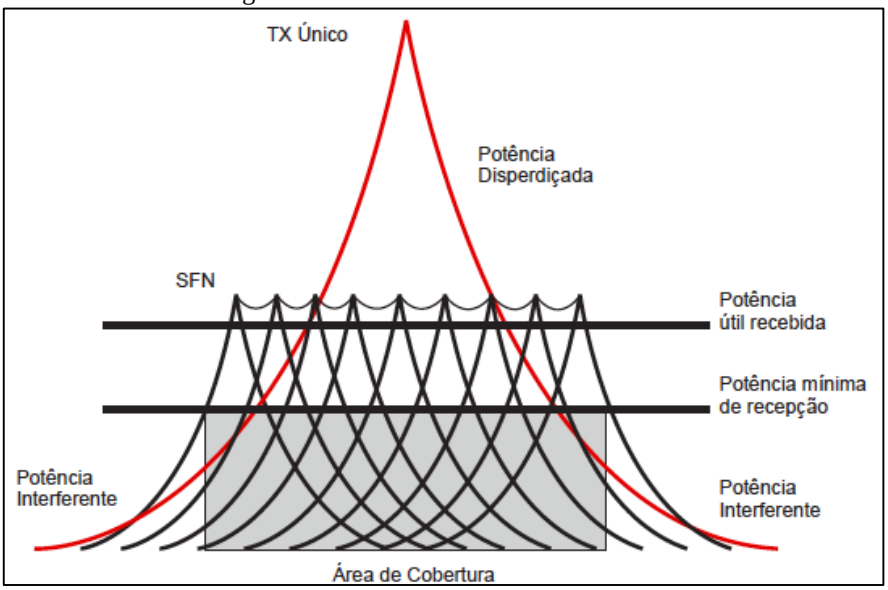
Figura 29 – Diferença entre rede MFN (à esquerda) e SFN (à direita).



Fonte: BARCIA; LIMA; MACHADO, (2013).

Para aumentar a área de cobertura de um único transmissor, deve-se modificar a altura da antena, aumentar a potência do transmissor ou utilizar uma antena com diagrama de irradiação diferente [20] [21]. No caso de redes SFN, a cobertura pode ser ampliada com a simples adição de transmissores de baixa potência ou repetidoras (*Gap Fillers*) em vários *sites* ao longo da área de cobertura desejada. Desta forma, uma rede SFN proporciona um ambiente de sinal mais uniforme para a recepção, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Ganho aditivo em redes SFN.



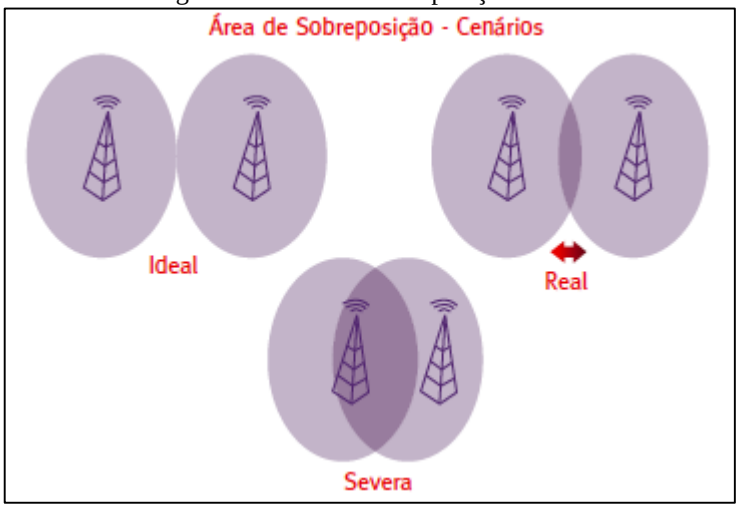
Fonte: BARCIA; LIMA; MACHADO, (2013).

Dois fatores são fundamentais para o planejamento de uma rede de frequência única. O primeiro deles é o conhecimento de como o sistema lidará com a interferência intersimbólica, que no caso do Rádio Digital baseado em OFDM, é combatida com o uso do intervalo de guarda. O segundo ponto é a estratégia de sincronização dos transmissores e/ou repetidoras. Quanto melhor o planejamento destes dois fatores, mais robusta e eficaz será a cobertura da rede SFN.

5.4 Áreas de Sobreposição

Nas redes SFN, pelo fato dois ou mais transmissores funcionarem na mesma frequência, haverá regiões que serão cobertas por dois ou mais transmissores simultaneamente. O impacto dessa cobertura simultânea para o receptor dependerá da diferença de potência entre os sinais interferentes de mesma frequência e também do atraso relativo entre eles, que deve ser menor ou igual ao intervalo de guarda. A referência [17] define que a área de sobreposição é a região do espaço geográfico onde a diferença de potência entre os sinais de mesma frequência é maior ou igual a -30 dB. Segundo [17], existem três cenários típicos de área de sobreposição: ideal, real e crítico conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Área de sobreposição crítica



Fonte: BARCIA; LIMA; MACHADO, (2013).

Na área Ideal, a área de sobreposição igual a zero e por isso não há necessidade de sincronismo. Já na Real os transmissores devem garantir o alinhamento do sinal no centro da área de sobreposição. Há por isso a necessidade de sincronismo. A situação é crítica na área Severa, uma vez que os transmissores devem estar ajustados de maneira a garantir o alinhamento do sinal para a área de maior concentração de receptores.

Neste tipo de rede, três parâmetros definem os ajustes das áreas de sobreposição: o número de pontos da transformada discreta de Fourier, o ajuste de atraso (*delay*) e é claro, o intervalo de guarda [17]. No caso em que, porventura, um receptor estiver fora da área coberta pelo intervalo de guarda, mas em uma região onde a diferença entre os dois ou mais sinais recebidos for inferior a 30 dB, os sinais recebidos fora da janela do intervalo de guarda passarão a ser sinais interferentes e destrutivos, podendo vir a comprometer a recepção como um todo, dependendo dos seus níveis de potência [20] [21]. Isto exemplifica o cuidado que se deve ter ao projetar uma rede de frequência única.

O ajuste do atraso relativo dos transmissores, permite que a área protegida pelo intervalo de guarda seja movida. Esta aplicação é crucial quando há uma região entre os transmissores fora do intervalo de guarda e existe a necessidade de que a mesma também seja coberta.

5.5 Categorias de Redes SFN

As redes SFN são divididas em duas categorias, quais sejam do tipo Distribuída ou Por Repetição [17]. A diferença fundamental entre elas está relacionada a como o sinal BTS (*Broadcast Transport Stream*) chega até os transmissores e repetidoras. Na de tipo Distribuída, existe um enlace de distribuição, enquanto que, para a do tipo Por Repetição, o BTS chega a uma única estação transmissora que o transmite para o ar. Esta diferença conceitual inicial acarreta outras divergências significativas entre os dois tipos.

5.5.1 Tipo Distribuída

Neste tipo de rede SFN, o sinal BTS chega aos vários transmissores da rede por meio de um *link* de distribuição independente referente a cada transmissor. O operador da rede pode optar entre enlaces por fibra ótica, via satélite ou micro-ondas, de acordo com a necessidade do sistema e sua preferência [18].

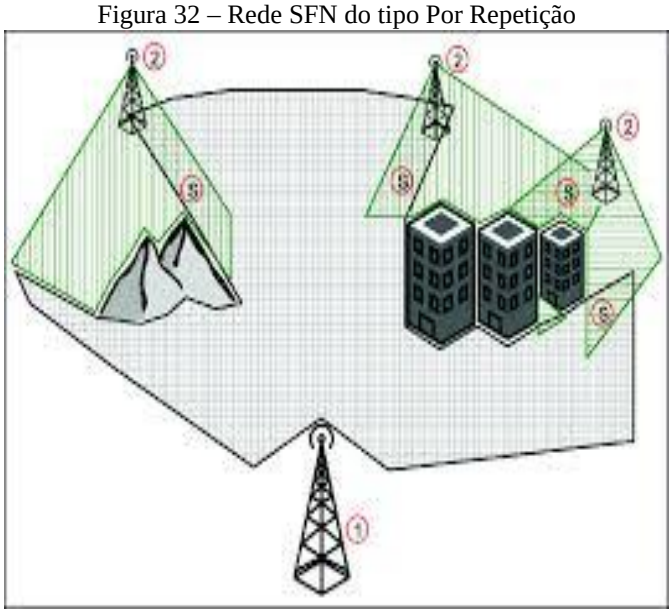
Uma vez que os transmissores operam de forma independente, este tipo de rede propicia confiabilidade ao sistema como um todo [18]. Em caso de falha em um dos transmissores, os outros continuam operando normalmente e, desta forma, apenas parte da área anteriormente coberta ficará sem sinal. Outra vantagem é a possibilidade de atraso zero, visto que não há o chamado *delay* de trânsito, inerente ao tipo Por Repetidora. Em contrapartida, a grande desvantagem deste tipo de rede é a necessidade de um *link* de distribuição para cada transmissor [18], o que custa caro e demanda alta infraestrutura por parte da empresa operadora.

5.5.2 Tipo Por Repetição

Para este tipo de rede SFN, existe um transmissor TX principal. Este é responsável diretamente pelo correto funcionamento do sistema. Ele recebe o sinal BTS via um link de distribuição da mesma forma como acontece com os transmissores da rede SFN do tipo Distribuída. Porém, na rede SFN do tipo Por Repetição, as demais estações recebem do ar, em UHF, o sinal transmitido pelo TX principal. Estas estações secundárias apenas repetem este sinal recebido amplificando-o mas sem realizar o processo de demodulação [18]. Para tanto, é preciso garantir que o sinal do TX principal possa ser recebido com qualidade mínima para repetição. Pela forma como

operam, estas estações secundárias são comumente conhecidas como repetidoras. A Figura 32 ilustra este tipo de rede SFN.

Figura 32 – Rede SFN do tipo Por Repetição



Fonte: BARCIA; LIMA; MACHADO, (2013).

Redes SFN da categoria Por Repetição tornaram-se muito populares pelo fato de conseguirem cobrir áreas de sombra de cobertura de forma razoavelmente simples, com o acréscimo de repetidoras de baixa potência na região de interesse [18]. Devido a essa característica, as repetidoras foram batizadas de *Gap Fillers*, o que equivale em português à “tapa-buracos”. Inexoravelmente, se o transmissor TX principal falhar, toda rede estará comprometida. Outra desvantagem reside no fato de que o *delay* mínimo para este tipo de rede é o *delay* de trânsito. Também, acontece a degradação da relação sinal-ruído do sinal recebido por uma repetidora. Por último, a potência de amplificação do sinal pela repetidora é limitada devido ao acoplamento da saída para a entrada [18].

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PREDIÇÃO DE COBERTURA

6.1 O Software Radio Mobile

A predição de cobertura da rede SFN foi realizada utilizando-se o software Radio Mobile v.11.5.0. Desenvolvido por Roger Coudé, é um programa gratuito, mas não *open-source*, que permite criar estações de rádio e configurá-las em redes de diferentes topologias.

Segundo [22], o software usa o modelo de propagação Longley-Rice, que é um modelo bastante complexo, originado do tradicional modelo de Okumura-Hata. Através deste software é possível ajustar os parâmetros inerentes a operação de uma estação de rádio, tais como potência transmitida, diagrama de irradiação das antenas dentre outros. Ele opera na faixa de frequências de 20 MHz até 20 GHz [22].

Arquivos com a topografia da região de interesse são obtidos a partir de base de dados topográficos, disponibilizadas online por outras entidades, como a SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

6.2 Predição de Cobertura da Rede SFN – Estudo de Caso

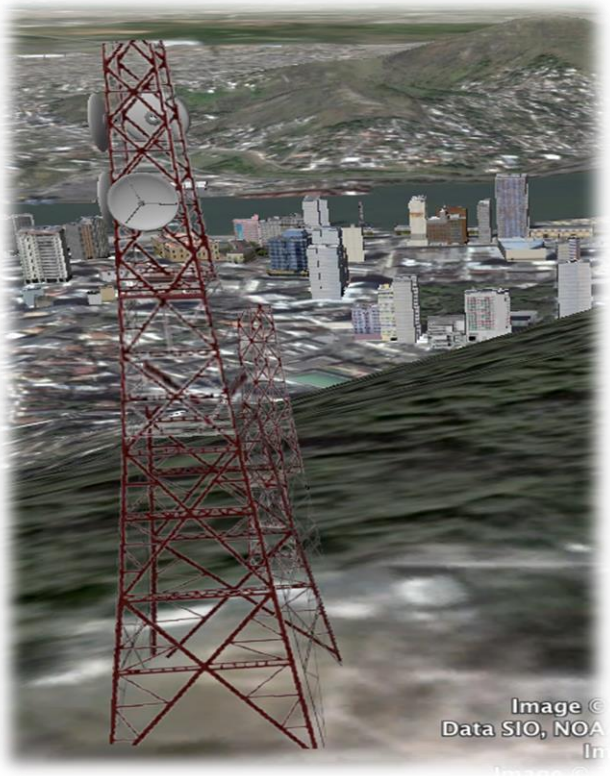
6.2.1 O Projeto da Rede

É realizado nesta seção um estudo da cobertura de um sistema de difusão terrestre de rádio digital na faixa de FM, na região central da Grande Vitória, abrangendo os municípios de Vitória, Cariacica, Serra e Vila Velha, visando demonstrar as aplicações das redes de frequência única SFN em uma possível operação de sistemas de transmissão de rádio digital na referida região. O enlace de rádio ponto-a-ponto em micro-ondas, opção escolhida para o projeto entre o local de geração do conteúdo (estúdio da emissora FM) e o transmissor principal, também é apresentado.

A ideia central do projeto é a de transmitir de forma digital a Rádio Universitária 104,7 FM, que possui frequência central de 104,7MHz e está localizada no campus de Goiabeiras, na UFES. A área de cobertura deve abranger as partes urbanas dos municípios de Vitória, Cariacica, Serra e Vila Velha. O padrão adotado é o DRM+ e a frequência de transmissão

permanecerá inalterada, ou seja, 104,7 MHz. Inicialmente, um transmissor robusto e de alta potência de transmissão, localizado no Morro da Fonte Grande em Vitória conforme mostrado na Figura 33, recebe o sinal enviado do estúdio da Rádio Universitária através de um enlace de rádio ponto-a-ponto em micro-ondas e é responsável por transmitir o sinal de FM na frequência de 104,7 MHz para toda a região de interesse. Como se trata de uma rede SFN, em caso de falhas na cobertura da área de interesse repetidoras serão inseridas em pontos estratégicos, completando, desta forma, a rede SFN.

Figura 33 – TX principal instalado no morro da Fonte Grande.

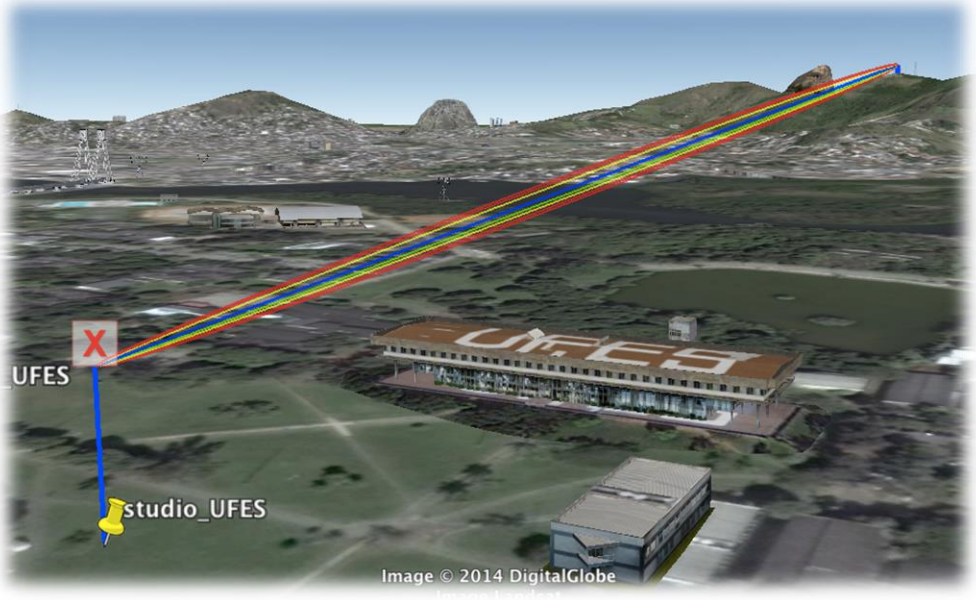


Fonte: Produção do próprio autor.

6.2.1.1 O Enlace de Rádio em Micro-ondas

O enlace de rádio em micro-ondas entre o estúdio na UFES e o transmissor principal na Fonte Grande é implementado na frequência de **7,**428 GHz. Segundo a PORTARIA 140 de 17/05/1995, a faixa de frequências entre 7,425 e 7,725GHZ é destinada a aplicações digitais ponto-a-ponto, com taxas de 2 até 155 Mbit/s. A Figura 34 mostra o enlace em questão, sendo que as linhas coloridas apenas indicam as zonas de Fresnel, que serão melhor examinadas adiante.

Figura 34 – Enlace micro-ondas entre o estúdio na UFES e o TX no morro da Fonte Grande.



Fonte: Produção do próprio autor.

O quadro 1 indica a configuração do referido enlace e contém valores em grandezas apresentadas que serão justificadas em seguida.

Quadro 1 – Configuração do rádio enlace ponto-a-ponto.

Configuração do Rádio Enlace Ponto-a-Ponto – (Frequência 7,428 GHz)		
Estúdio UFES – coordenadas	20°16'35.10"S	40°18'12.06"W
TX Fonte Grande – coordenadas	20°18'32.50"S	40°20'25.87"W
Potência de Transmissão	25 dBm	
Limiar de Recepção	- 85 dBm	
Ganho da Antena	30 dBi	
Perdas na Transmissão (cabos e conectores)	7 dB	
Altura da torre (rel. ao solo)	TX_FG = 40 m	
Altura das antenas (rel. ao solo)	TX_FG = 15m	Studio UFES = 30 m

Fonte: Produção do próprio autor.

A antena escolhida é a antena diretiva UHP-MW-7-2 do fabricante ARC Wireless para a faixa de frequência adotada. Ela possui um ganho em torno de 30 dBi na frequência de operação especificada para o projeto. Já para o rádio digital ponto-a-ponto, foi escolhido o Rádio SMART, do fabricante wi2be. Com faixa de operação de 6,5 à 23 GHz e até 404Mbps, o mesmo

possui na frequência escolhida para o projeto uma potência de transmissão de 25 dBm e sensibilidade de recepção de -85 dBm, com capacidade de transmissão de dados de 45Mbps.

A altura usada para as torres é respaldada pela Prática Telebrás [16] que recomenda que as torres destinadas a Telecomunicações não tenham altura inferior a 15m e nem superior a 130m. As perdas na transmissão são decorrentes do cabo utilizado.

Para o enlace, foi escolhido o cabo A150 UFP do Fabricante GigaLink que possui atenuação ultra baixa de 0,20 dB/m para frequência de 7 a 8 GHz. Como a antena encontra-se à 15m do solo no TX da Fonte Grande, a atenuação é dada por $A_c(dB) = 15 \times 1{,}1 \times 0{,}2 = 3{,}3\ dB$ onde o fator de projeto 1,1 significa ter margem de 10% no comprimento do cabo utilizado. Já para o transmissor no estúdio, a antena é alocada em cima de algum prédio, desta forma usando apenas 10m de cabo. A atenuação é $A_c(dB) = 10 \times 1{,}1 \times 0{,}2 = 2{,}2\ dB$. Somando-se às perdas nos conectores, estima-se uma perda total de 7 dB.

Um cálculo simples de rádio enlace pode ser feito com o uso das equações apresentadas no capítulo 4. Em um primeiro momento, é calculada a perda no espaço livre através da equação

$$A_o(dB) = 32{,}4 + 20.\log(f) + 20.\log(d), \tag{28}$$

onde d é a distância do enlace (em km), f é a frequência (em MHz) e A_o representa a atenuação em espaço livre (em dB).

Para os valores escolhido no enlace do caso estudado,

$$A_o(dB) = 32{,}4 + 20.\log(7428) + 20.\log(5{,}3) = 124.3\ dB.$$

Em seguida, com todos os dados do enlace em mãos, pode-se obter o nível de recepção do sinal no receptor RX e comprovar se tal nível está dentro do limiar de recepção, ou seja, se o *link* de rádio está projetado adequadamente. Para tal utiliza-se a equação

$$RX_{limiar} < P_{TX} + G_{antena1} - A_0 + G_{antena2} - P_{cabos} - M_{desvanecimento}, \tag{29}$$

onde, RX_{limiar} é o limiar de recepção do RX (em dBm), P_{TX} é a potência de transmissão (em dBm), $G_{antena1}$ e $G_{antena2}$ são os ganhos das antenas (em dBi), A_0 é a perda no espaço livre (em dB), P_{cabos} é a perda total nos cabos e conectores (em dB) e $M_{desvanecimento}$ é a margem de desvanecimento do sinal, tipicamente 10 dB.

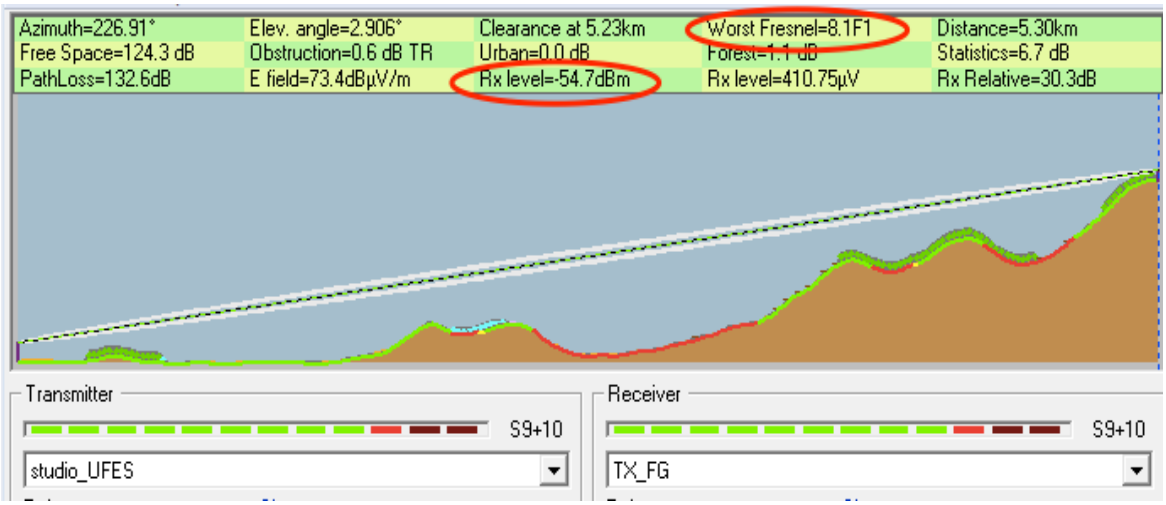
Então, para os valores do enlace em questão, deve-se obter

$$-85 < 25 + 30 - 124{,}3 + 30 - 7 - 10$$
$$-85 < -56{,}3.$$

Portanto, pode-se concluir pelos cálculos realizados que o sinal efetivo recebido tem um nível de potência de -56,3 dBm, que é maior que o nível de sensibilidade do receptor RX. Então, está quase garantido o funcionamento do enlace nas condições referentes ao projeto. O software *Radio Mobile* também fornece resultados semelhantes como vistos na Figura 35.

Para que se possa garantir o funcionamento do enlace, é necessário que seja avaliada ainda a obstrução da primeira zona de Fresnel. Circulados na Figura 35 estão o nível recepção, analisado anteriormente, e o ponto de "pior Fresnel". Este último indica que o ponto mais próximo do raio direto (linha preta) está distante do mesmo de 8,1 vezes o comprimento do raio do 1° elipsóide de Fresnel (8,1F1). A regra prática utilizada no projeto de enlaces de micro-ondas com linha de visada é manter pelo menos 55% da zona de Fresnel limpa (0,55F1)

Figura 35 – Informações do enlace ponto-a-ponto em micro-ondas entre o estúdio na UFES e o TX no morro da Fonte Grande.



Fonte: Produção do próprio autor.

Portanto, todas as condições de projeto foram atendidas para o correto funcionamento do enlace de rádio ponto-a-ponto em micro-ondas do sistema.

6.2.1.2 Cobertura do Transmissor Principal

O próximo passo consiste em avaliar a área de cobertura do transmissor TX na Fonte Grande, transmitindo com frequência central de 104,7 MHz. O Quadro 2 fornece as configurações do sistema. A escolha dos parâmetros é baseada em sistemas de radiodifusão terrestres convencionais, usados no dia-a-dia por emissoras de rádio. Vale salientar que não há neste trabalho, o intuito de se especificar valores monetários para os equipamentos utilizados no projeto em geral. Contudo, impera o bom senso de que sejam adotados somente equipamentos com especificações que se assemelhem àquelas de sistemas de transmissão equivalentes. Exemplificando, um TX no morro da Fonte Grande com potência de 1000 kW cobriria a região de interesse na Grande Vitória. Porém, a capacidade de potência do equipamento torná-lo-ia bem distante de outros transmissores empregados em projetos do mesmo gênero. Consequentemente, haveria uma enorme discrepância entre projetos praticáveis e o sugerido nesse trabalho.

Quadro 2 – Configuração do transmissor no morro da Fonte Grande.

Características do transmissor no morro da Fonte Grande (Frequência 104,7MHz)		
TX Fonte Grande - coordenadas	20°18'32.50"S	40°20'25.87"W
Potência do Transmissor	2 kW	
Ganho da Antena (omni)	8 dBd	
Perdas na Transmissão (cabos e conectores)	1,5 dB	
Altura da antena (rel. ao solo)	40 m	
Altura do sistema irradiante	299 + 40 = 339 m	

Fonte: Produção do próprio autor.

Algumas considerações de projeto foram feitas para que se pudesse realizar a predição de cobertura. A primeira e mais importante delas, é a de que o nível adotado para o limiar de sensibilidade dos receptores de rádio digital do padrão DRM+ é de $-80\ dBm$. Como não há até o presente momento regulamentação específica para transmissão em rádio digital no Brasil, haja vista que testes ainda estão sendo realizados, o valor adotado foi estipulado pelo autor. A

justificativa para o referido valor, entretanto, é fundamentada em parte na regulamentação do sistema de TV digital Brasileiro. A norma ABNT NBR 15604 que regulamenta os receptores de TV digital, determina que o nível de sensibilidade dos receptores deva ser melhor ou igual a $-77\ dBm$. Por se tratarem de serviços parecidos, o valor de $-80\ dBm$ para o rádio digital parece aceitável. Além disso, a referência [9] discrimina níveis de potência de recepção de acordo com o tipo de recepção, variando caso a recepção seja veicular, fixa em aparelho de rádio portátil a 1,5 m de altura, fixa em aparelho de som dentro da residência, mas com antena externa, dentre muitas outras. A mesma referência determina que, de maneira geral, a potência na entrada do receptor não deva ser menor que $-120\ dBW$ ou $-90\ dBm$, para que o receptor consiga demodular o sinal corretamente. Desta forma, um valor único de limiar de recepção foi empregado neste trabalho visando à simplificação das simulações.

A segunda consideração é a de que o receptor está a 1 m do solo. A terceira e última consideração é de que a antena do receptor tenha ganho de $-15\ dBd$, que é próximo ao ganho de antenas de dispositivos portáteis em áreas urbanas com condições ruins de recepção, que de acordo com [9], pode chegar a $-23\ dBd$. O Quadro 3 reitera as premissas aqui estabelecidas.

Quadro 3 – Premissas estabelecidas para a recepção

Características do receptor (Frequência 104,7MHz)	
Limiar de Recepção	- 80 dBm
Ganho da Antena	- 15 dBd
Altura (rel. ao solo)	1 m

Fonte: Produção do próprio autor.

Então, com o auxílio do software Radio Mobile, obtém-se a área de cobertura do transmissor situado no morro da Fonte Grande com as características acima descritas para a condição de recepção, conforme mostrado na Figura 36.

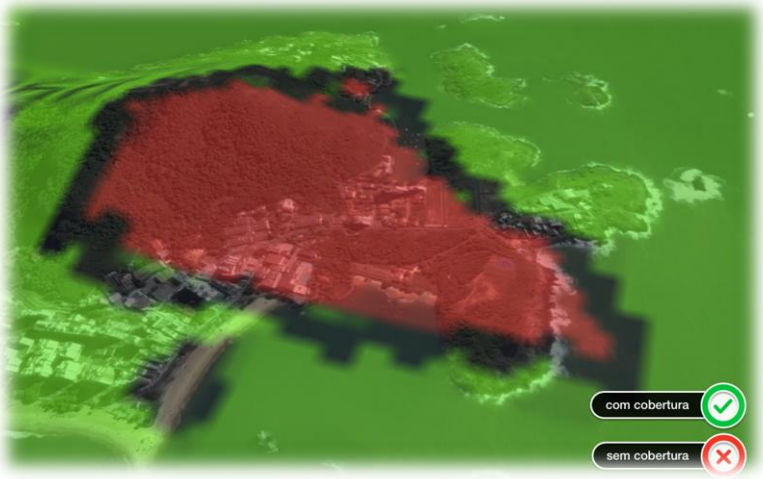
Na Figura 36, a região de cor verde indica que o sinal é igual ou superior aos $-80\ dBm$ equivalentes ao limiar de recepção. Por outro lado, a região vermelha indica buracos na cobertura, ou seja, zonas de sombra onde o limiar de recepção não é alcançado. Foi considerado no estudo um raio de avaliação de cobertura de 25 km.

Figura 36 – Cobertura do TX principal localizado no morro da Fonte Grande.

Fonte: Produção do próprio autor.

Há claramente um buraco na região próxima ao Morro do Moreno em Vila Velha, como mostra a Figura 37. É importante lembrar que para as simulações, foram utilizadas apenas informações da variação do relevo da região, não levando em consideração a incidência de árvores ou construções civis que pudessem vir a comprometer a recepção do sinal proveniente da estação geradora.

Figura 37 – Região de sombra no município de Vila Velha.

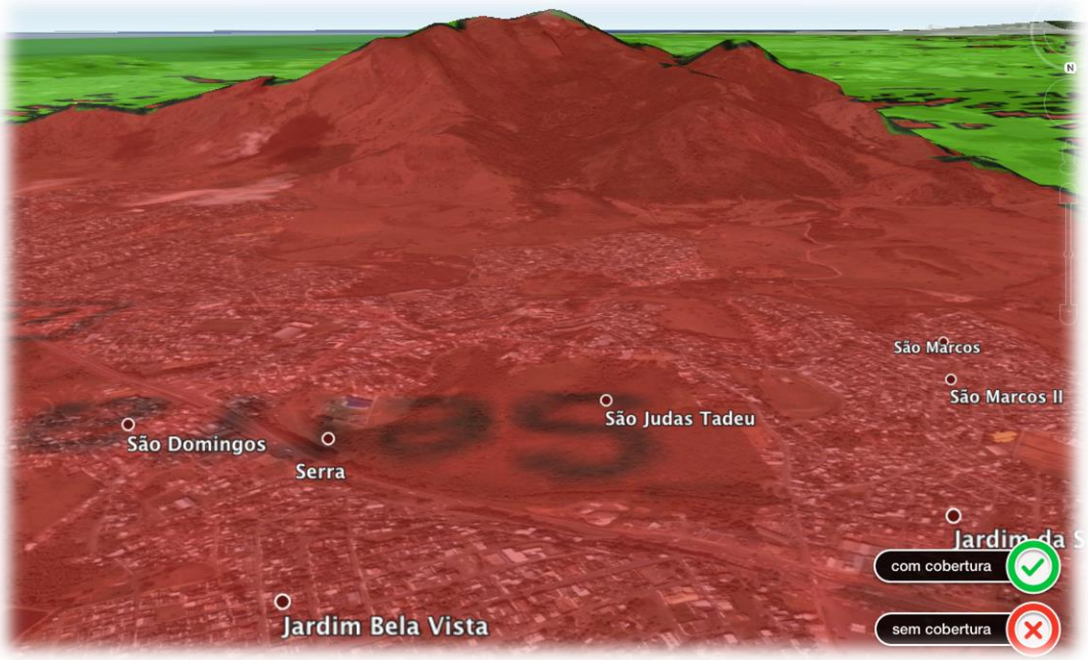


Fonte: Produção do próprio autor.

Há também toda uma região de sombra abrangendo a região central do município da Serra que, aparentemente, está desprovida de cobertura. A Figura 38 confirma esta suspeita.

Por ser uma região tradicional de Vila Velha, existe o interesse de que os moradores da mesma usufruam dos serviços prestados pela emissora de rádio em questão. Similarmente, devido à alta concentração de pessoas, a região central da Serra é provavelmente de interesse da emissora de rádio. Por assim ser, as duas regiões hão de ser cobertas de alguma forma. A solução para este problema está diretamente relacionada ao uso de redes SFN com repetidoras, constituindo dessa forma uma rede SFN do tipo Por Repetição, conforme descrito na Seção 5.5.2.

Figura 38 – Região de sombra no município da Serra.



Fonte: Produção do próprio autor.

6.2.1.3 Adição de Repetidoras

Já com a fundamentada justificativa para a adição de repetidoras, agora é necessário a escolha de locais para o posicionamento das mesmas de forma estratégica. Para a região próxima ao Morro do Moreno em Vila Velha, é imediata a ideia de instalação de uma repetidora no próprio morro. Para a região da Serra, o ponto escolhido foi um morro próximo ao morro do Mestre Álvaro.

Figura 39 – Repetidora no Morro do Moreno em Vila Velha.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 40 – Repetidora próxima ao Mestre Álvaro na Serra

Fonte: Produção do próprio autor.

Os Quadros 4 e 5 abaixo indicam as configurações das repetidoras instaladas, enquanto que os diagramas azimutais das repetidoras no Morro do Moreno e no Mestre Álvaro são mostrados nas Figuras 41 e 42 respectivamente .

Quadro 4 – Características da repetidora no Morro do Moreno – Vila Velha.

Características da repetidora no Morro do Moreno – Vila Velha		
Coordenadas Geográficas	20°19'34.21"S	40°16'38.24"W
Potência do Transmissor	35 W	
Ganho da Antena	7 dBd	
Perdas na Transmissão (cabos e conectores)	1 dB	
Altura da antena (rel. ao solo)	25 m	
Distância ao TX principal	7 km	

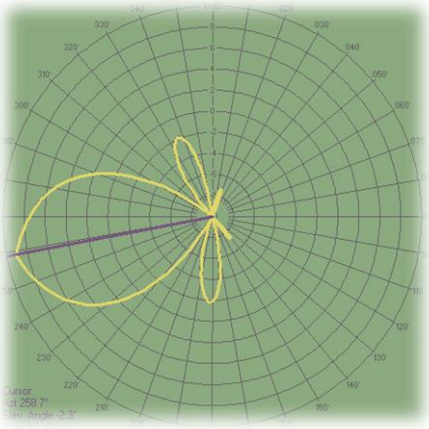
Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 5 – Características da repetidora próxima ao Mestre Álvaro – Serra.

Características da repetidora próxima ao Mestre Álvaro – Serra		
Coordenadas Geográficas	20° 9'50.94"S	40°17'12.25"W
Potência do Transmissor	250 W	
Ganho da Antena	8 dBd	
Perdas na Transmissão (cabos e conectores)	1,5 dB	
Altura da antena (rel. ao solo)	30 m	
Distância ao TX principal	17 km	

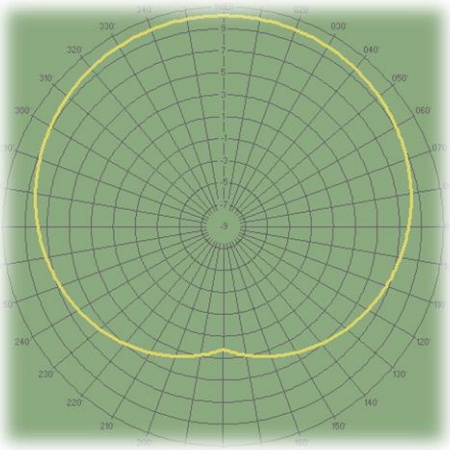
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 41 – Diagrama azimutal da antena da repetidora no Morro do Moreno em Vila Velha



Fonte: Produção do próprio autor.

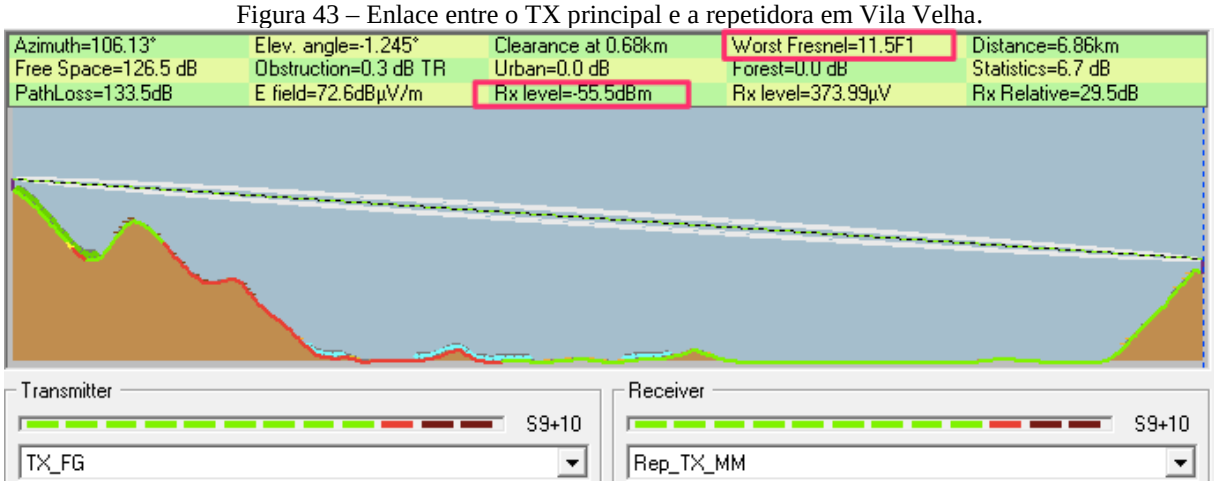
Figura 42 – Diagrama azimutal da antena da repetidora próxima ao Mestre Álvaro na Serra.



Fonte: Produção do próprio autor.

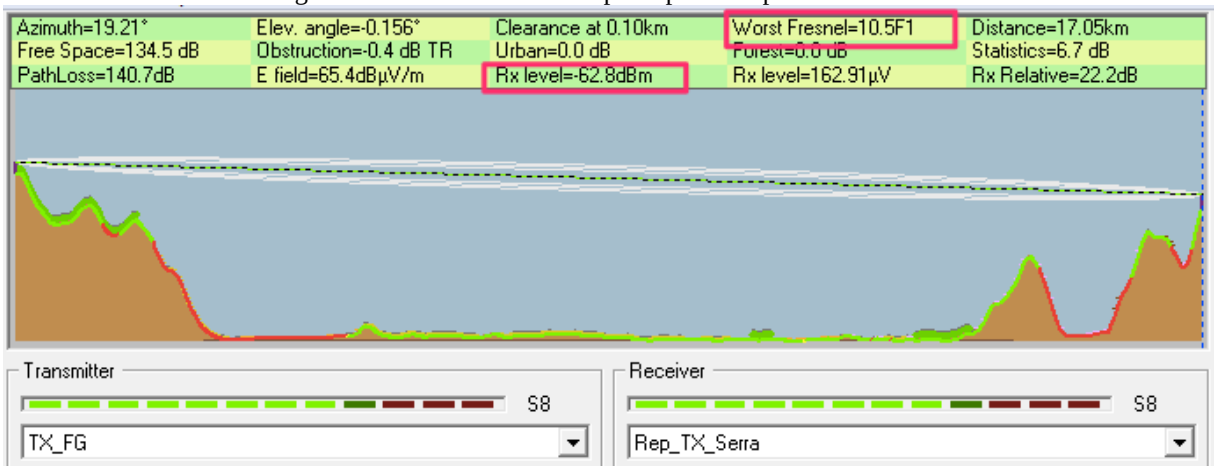
Em uma rede SFN do tipo Por Repetição, é indispensável que as repetidoras tenham linha de visada com o transmissor TX principal. A justificativa é que repetidoras SFN recebem o sinal a ser repetido em alta frequência, sendo o mesmo proveniente do TX principal. Assim, utilizando-se equipamentos idênticos aos especificados para o rádio enlace entre o estúdio da emissora e o TX principal, obtém-se os enlaces de rádio entre o TX principal e as repetidoras conforme demonstrado nas Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Enlace entre o TX principal e a repetidora em Vila Velha.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 44 – Enlace entre o TX principal e a repetidora na Serra



Fonte: Produção do próprio autor.

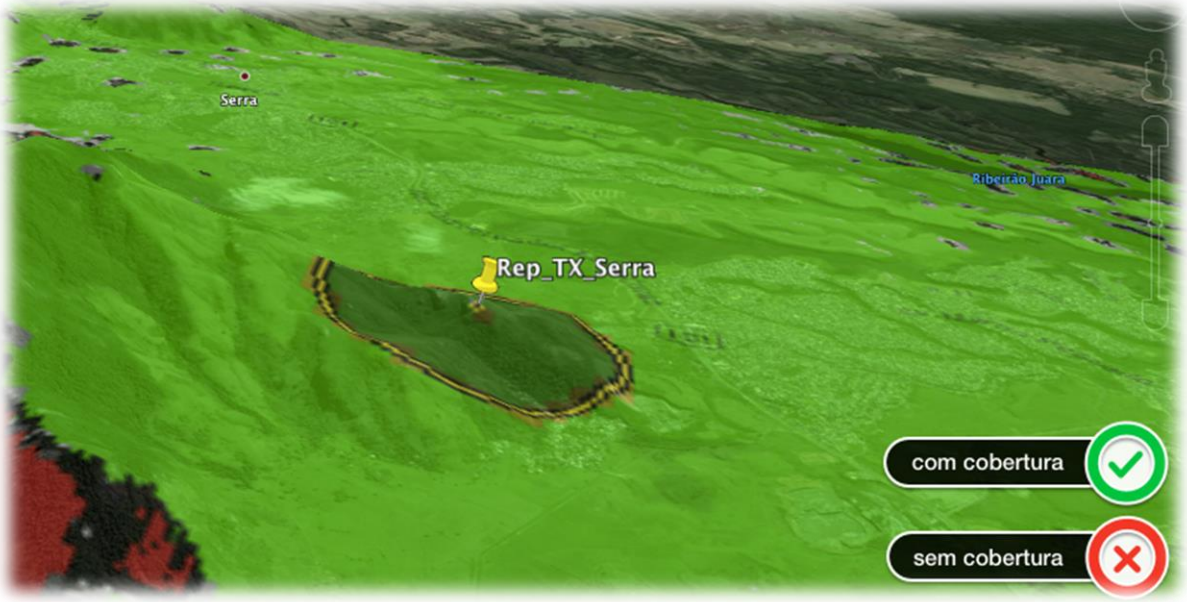
6.2.1.4 Cobertura das Repetidoras

Definidas as especificações das repetidoras, é simulada a cobertura das mesmas via software. Vale ressaltar que ainda não são analisadas as questões referentes ao intervalo de guarda para o padrão DRM+, que é de 250 μs. Os resultados destas simulações são mostrados nas Figuras 45 e 46, para as coberturas no Morro do Moreno e no município da Serra respectivamente.

Figura 45 – Cobertura da repetidora no Morro do Moreno em Vila Velha.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 46 – Cobertura da repetidora na Serra.



Fonte: Produção do próprio autor.

6.2.1.5 Cobertura Total da Rede SFN

Ainda sem avaliar as questões referentes ao cumprimento do intervalo de guarda para o padrão DRM+, é simulada a cobertura total da emissora de rádio na área de interesse, com o uso do transmissor principal e de repetidoras. A Figura 47 indica qual transmissor ou repetidora fornece o maior nível de potência para um determinado ponto da área de interesse de cobertura. Por outro lado, a Figura 48 ilustra a cobertura da rede SFN somando-se as contribuições individuais do transmissor e das repetidoras.

Conforme esperado, o TX principal é o equipamento da rede que fornece o sinal com maior intensidade para a maioria dos pontos da região de interesse de cobertura. Seguido pela repetidora na Serra e pela repetidora em Vila Velha respectivamente.

Figura 47 – Melhor cobertura por equipamento transmissor.

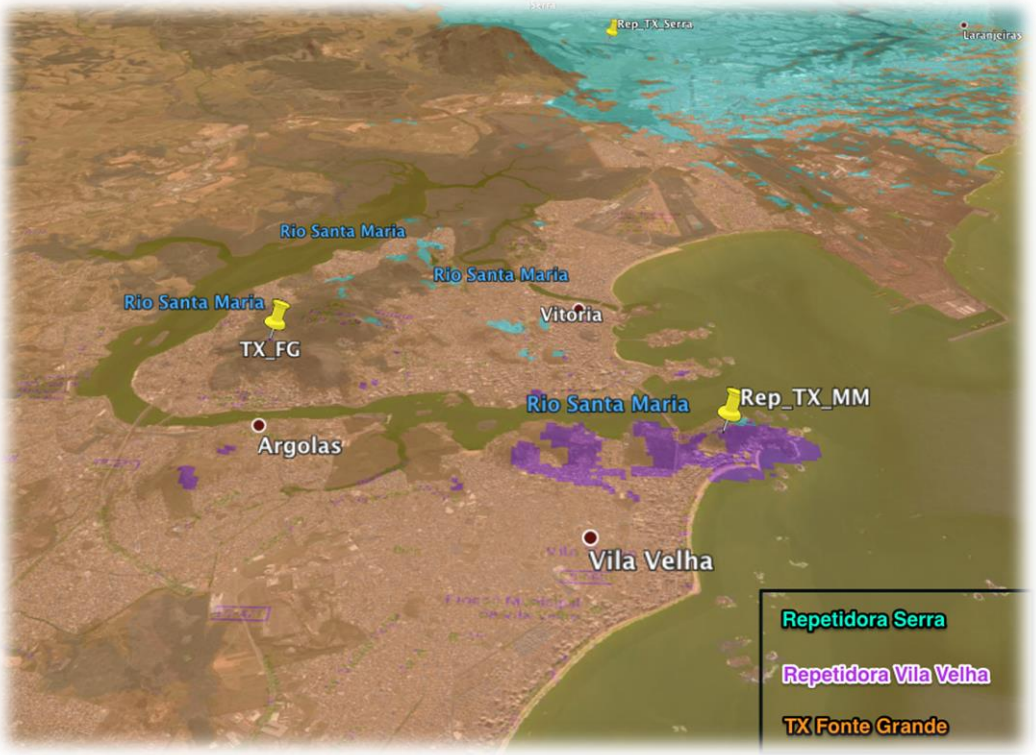
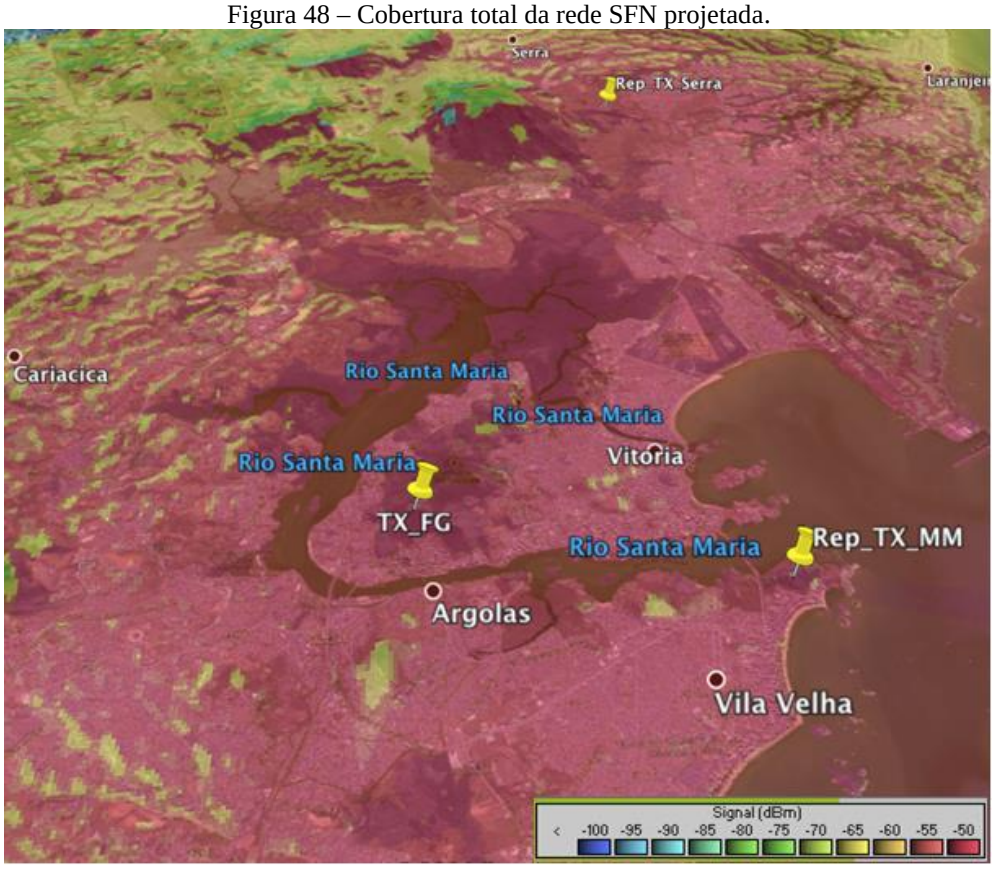


Figura 48 – Cobertura total da rede SFN projetada.



Fonte: Produção do próprio autor.

6.2.1.6 Análise dos Atrasos e Intervalo de Guarda

A referência [9] define o intervalo de guarda para o padrão DRM+ como sendo de $250\ \mu s$. Sabendo-se que o intervalo de guarda deve ser maior que o máximo atraso do sistema para que não haja interferência destrutiva e consequentemente deterioração do sinal transmitido, é preciso garantir que o transmissor e as repetidoras funcionem em sincronia e com atraso relativo entre eles menor que $250\ \mu s$ em qualquer ponto da área de cobertura.

Para começar, as repetidoras recebem o sinal emitido do transmissor principal que se propaga pelo ar. Desta forma, existe um atraso inerente a este tipo de rede SFN. Para a repetidora localizada no Morro do Moreno em Vila Velha e distante 7 km do TX principal, o atraso é dado por

$$rep_VV_{delay} = \frac{7000}{3.10^8} \approx 23\ \mu s. \tag{30}$$

Para a repetidora instalada na Serra e distante 17 km do TX principal, o atraso é dado por

$$rep_Serra_{delay} = \frac{17000}{3.10^8} \approx 57\ \mu s. \tag{31}$$

As contas acima indicam que as repetidoras começam a transmitir atrasadas do TX principal, ou seja, com um *offset* maior ou menor dependendo da distância ao transmissor do morro da Fonte Grande.

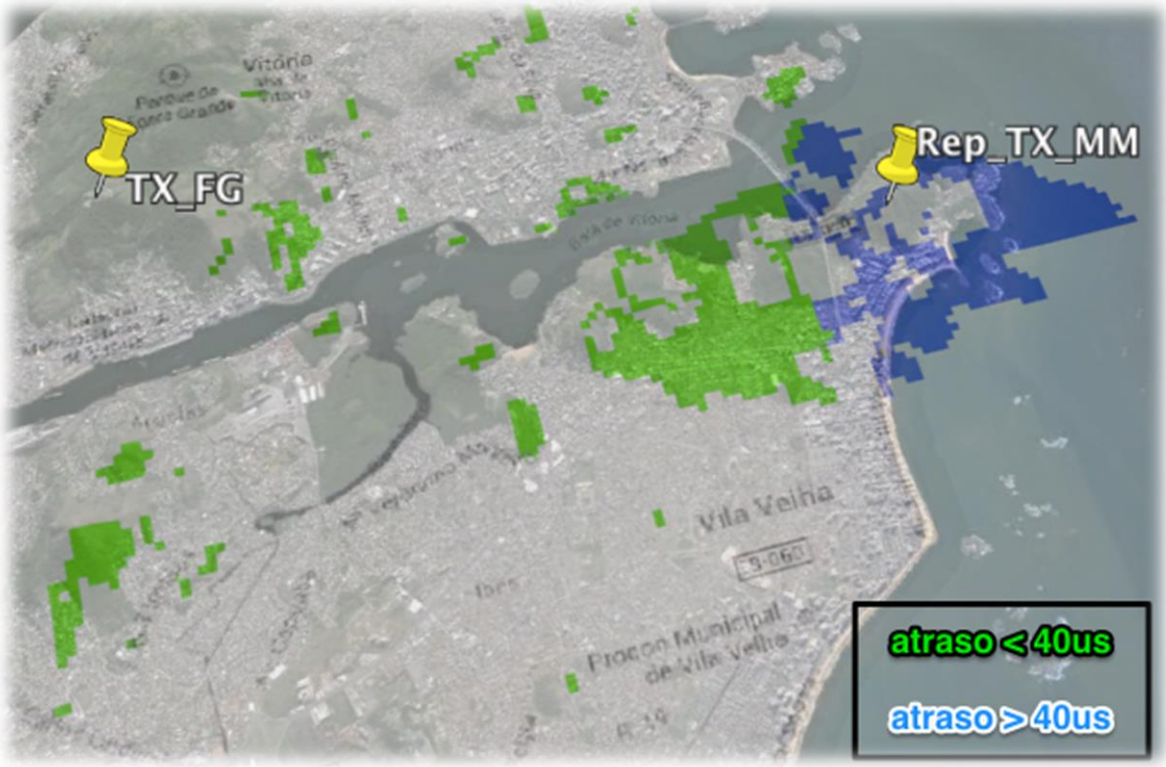
Para o projeto, foi elaborado o estudo do máximo atraso dos sinais das estações envolvidas. Nesta instância foram realizados os cálculos de atraso dos sinais, considerando apenas os pontos da região de cobertura onde o nível de potência dos sinais difere em até $10\ dB$, pois esta margem já pode oferecer problemas para o algoritmo de decisão do receptor [21]. Quando a diferença entre os níveis de potência dos sinais é muito grande, eles não são mais considerados sinais interferentes, pois esta diferença é muito fraca se comparado ao outro. Portanto, nas Figuras 49, 50, 51 e 52, a região colorida é definida pelos pontos onde os sinais provenientes dos transmissores analisados diferem em nível de potência em até 10 dB.

Devido à limitação do software, não é possível visualizar os diferentes valores dos atrasos em cada ponto da região colorida simultaneamente. É possível, apenas, definir um valor de atraso máximo para a simulação e obter os pontos onde o atraso é superior ao atraso máximo definido. Sendo assim, a região em azul nas figuras representa os pontos que diferem em até 10dB mas são maiores que o atraso máximo escolhido. Já a região em verde representa os pontos que diferem em até 10 dB mas são menores que o atraso máximo escolhido.

Para a repetidora na Serra, o atraso relativo é maior, principalmente, devido a distância entre o transmissor TX principal e a repetidora.

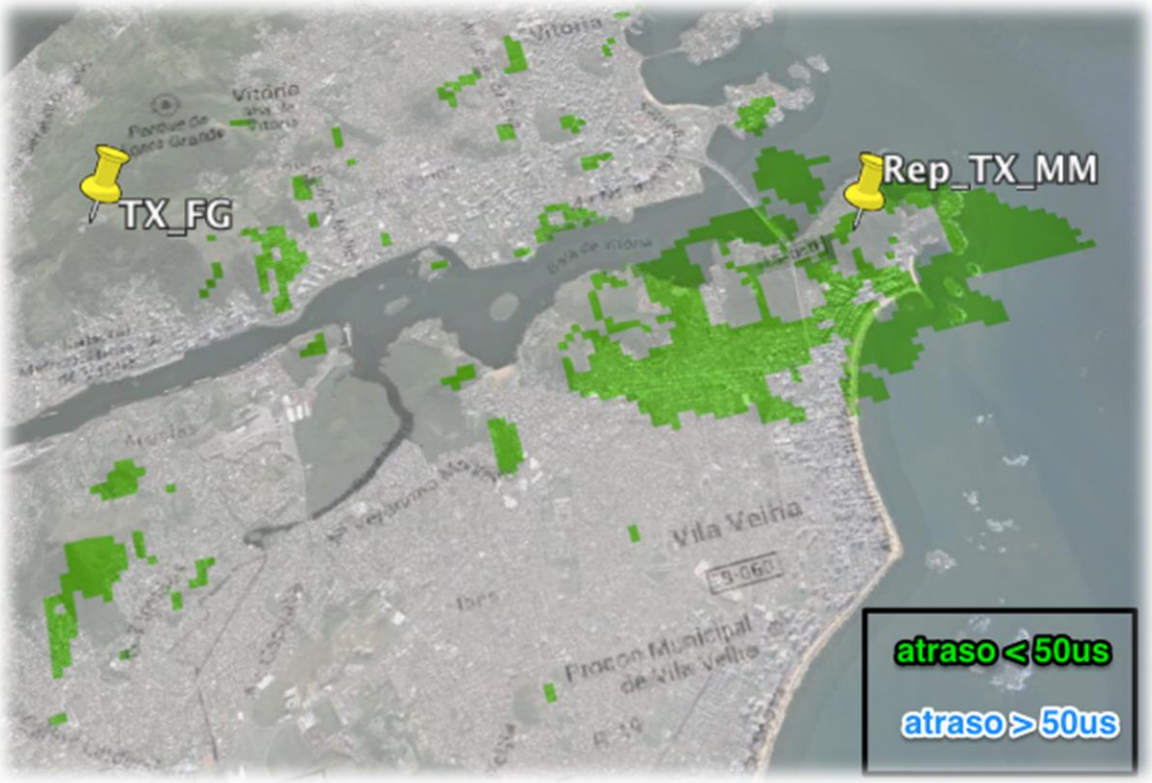
É possível perceber que o atraso máximo na rede SFN proposta é menor que $120\ \mu s$, valor inferior ao intervalo de guarda de $250\ \mu s$ característico do padrão DRM+.

Figura 49 – Espalhamento do atraso relativo entre o TX principal e a repetidora em Vila Velha. A região colorida representa os sinais que diferem um do outro em até 10 dB.



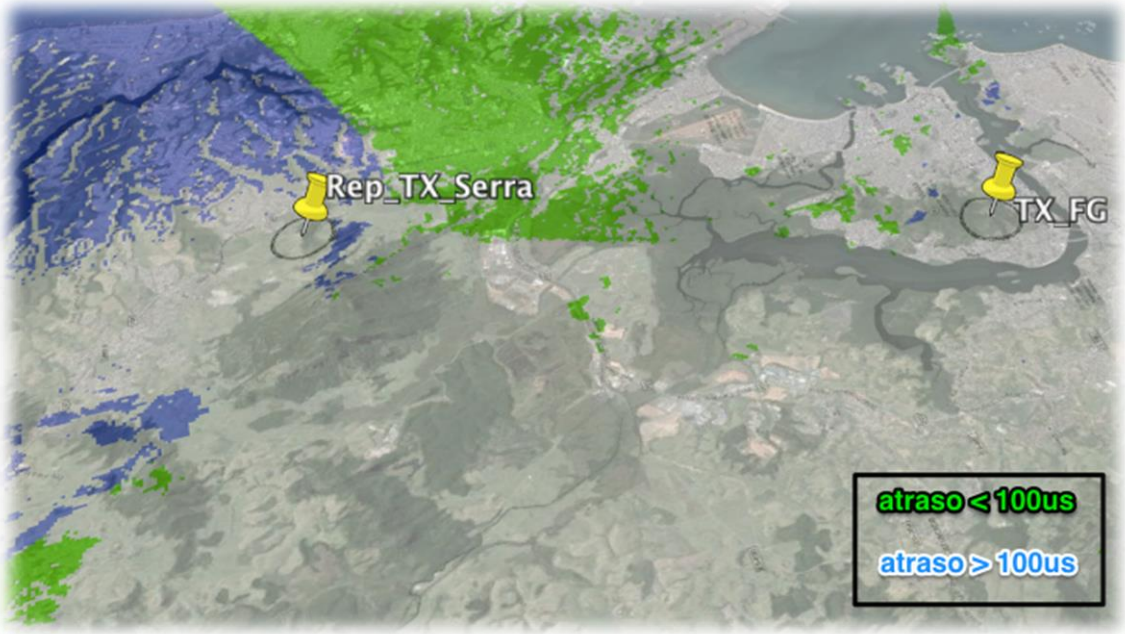
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 50 – Espalhamento do atraso relativo entre o TX principal e a repetidora em Vila Velha. A região colorida representa os sinais que diferem um do outro em até 10 dB.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 51 – Espalhamento do atraso relativo entre o TX principal e a repetidora na Serra. A região colorida representa os sinais que diferem um do outro em até 10 dB.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 52 – Espalhamento do atraso relativo entre o TX principal e a repetidora na Serra. A região colorida representa os sinais que diferem um do outro em até 10 dB.

Fonte: Produção do próprio autor.

6.2.2 Comentários

De acordo com os estudos realizados, conclui-se que é perfeitamente possível a adoção do sistema de transmissão FM em rádio digital DRM+ (*Digital Radio Mondiale*) para a região da Grande Vitória. Com apenas um transmissor principal de potência relativamente baixa para a vasta área que se deseja cobrir e duas repetidoras, todas as zonas urbanas dos municípios de Cariacica, Serra, Vila Velha e Vitória seriam cobertas com níveis de potência bem superiores ao mínimo exigido. Esta é, portanto, uma condição essencial para que haja recepção do sinal e que o ouvinte possa desfrutar do conteúdo oferecido pela emissora com qualidade.

Com respeito ao enlace de rádio ponto-a-ponto em micro-ondas entre o local de geração do sinal e o transmissor principal, tanto os resultados do software quanto os calculados convergem, indicando que um *link* de rádio com as características definidas é perfeitamente factível e viável. Com desobstrução da primeira zona de Fresnel muito maior que o mínimo exigido para projetos com enlaces ponto-a-ponto, os dados enviados seriam recebidos corretamente mesmo em situações climáticas adversas.

Conforme foi definido, o limiar de recepção para a correta demodulação dos símbolos OFDM é de $-80dBm$. Esta é uma condição necessária, porém não suficiente para que a informação transmitida seja recebida pelo receptor e decodificada sem problemas. A outra condição essencial está relacionada a MER (*Modulation Error Rate*) da transmissão. Ela é expressa em decibéis e, para um transmissor DRM+ funcionando de acordo com o padrão, é imprescindível que seja de 30 dB ou superior [10].

Diferentemente de outras tecnologias de radiodifusão, a tecnologia de rádio digital DRM+ não permite que o intervalo de guarda dos símbolos OFDM seja ajustado, fixando o mesmo em $250\ \mu s$. Desta forma, toda a rede SFN deverá ser mantida operando em sincronia. É vital, portanto, que todos os equipamentos transmissores da rede possuam a mesma referência de tempo, fornecida usualmente por satélites.

Evidencia-se, através das simulações, que o atraso em pontos da área de cobertura onde possa haver interferência destrutiva dos sinais, pontos estes com sinais cujas potências diferem em até 10 dB, são muito menores que o intervalo de guarda do padrão DRM+. Então, contanto que os demais parâmetros estejam em conformidade com o padrão, a rede SFN do tipo Por Repetição da maneira proposta neste trabalho é realizável e viável economicamente.

7 SIMULAÇÃO DA MODULAÇÃO OFDM CONFORME O PADRÃO DRM+

7.1 Canais Rádio Móvel para o DRM+

Apesar de realizada a simulação da área de cobertura abrangida pela rede SFN proposta, nada foi discutido ainda sobre as características da técnica de modulação OFDM empregada no padrão de rádio digital DRM+. Também não foi abordado de forma objetiva até aqui, os efeitos severos da propagação dos símbolos OFDM, oriundos do sistema DRM+, em ambientes com multipercurso. Para que se possa simular sistemas OFDM em canais com multipercurso, é necessário que se conheça o perfil de atraso do canal rádio móvel, incluindo o atraso e a atenuação de cada *tap* (réplica do sinal original no receptor). O perfil de atraso do canal em sistemas de radiodifusão DRM+ varia de acordo com as condições do terreno e de deslocamento do receptor, como é descrito no Capítulo 4. O perfil de atraso dos cinco canais, adequados para simulação dos efeitos interferentes em sinais da tecnologia DRM são aqui identificados como canal 8, canal 9, canal 10, canal 11 e canal 12, e mostrados novamente nas tabelas das Figuras 53 a 57.

Figura 53 – Modelo de canal DRM+: zona urbana

Channel no 8: Urban			
Velocities: 2 and 60 km/h (pedestrian and vehicle speed)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	-2,0	Classical
2	0,2	0,0	Classical
3	0,5	-3,0	Classical
4	0,9	-4,0	Classical
5	1,2	-2,0	Classical
6	1,4	0,0	Classical
7	2,0	-3,0	Classical
8	2,4	-5,0	Classical
9	3,0	-10,0	Classical

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Figura 54 – Modelo de canal DRM+: zona rural

Channel no 9: Rural			
Velocity: 150 km/h (vehicle speed on highways)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	-4,0	Classical
2	0,3	-8,0	Classical
3	0,5	0,0	Classical
4	0,9	-5,0	Classical
5	1,2	-16,0	Classical
6	1,9	-18,0	Classical
7	2,1	-14,0	Classical
8	2,5	-20,0	Classical
9	3,0	-25,0	Classical

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Figura 55 – Modelo de canal DRM+: zona urbana obstruída

Channel no 10: Terrain obstructed			
Velocity: 60 km/h (speed within built-up areas)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	-8,0	Classical
2	1,0	-2,0	Classical
3	2,5	0,0	Classical
4	3,5	-1,0	Classical
5	5,0	-2,0	Classical
6	8,0	-3,0	Classical
7	12,0	0,0	Classical
8	14,0	-6,0	Classical
9	16,0	-3,0	Classical

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Figura 56 – Modelo de canal DRM+: terreno montanhoso

Channel no 11: Hilly terrain			
Velocity: 100 km/h (vehicle speed along country roads)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	0,0	Classical
2	0,5	-5,7	Classical
3	1,3	-12,7	Classical
4	1,9	-20,6	Classical
5	30,0	-3,1	Gauss1
6	31,3	-5,4	Gauss1
7	34,9	-11,6	Gauss1
8	37,2	-15,9	Gauss1
9	39,1	-18,9	Gauss1
10	40,0	-25,7	Gauss1
11	80,0	-4,5	Gauss2
12	82,7	-11,5	Gauss2

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Figura 57 – Modelo de canal DRM+: rede SFN

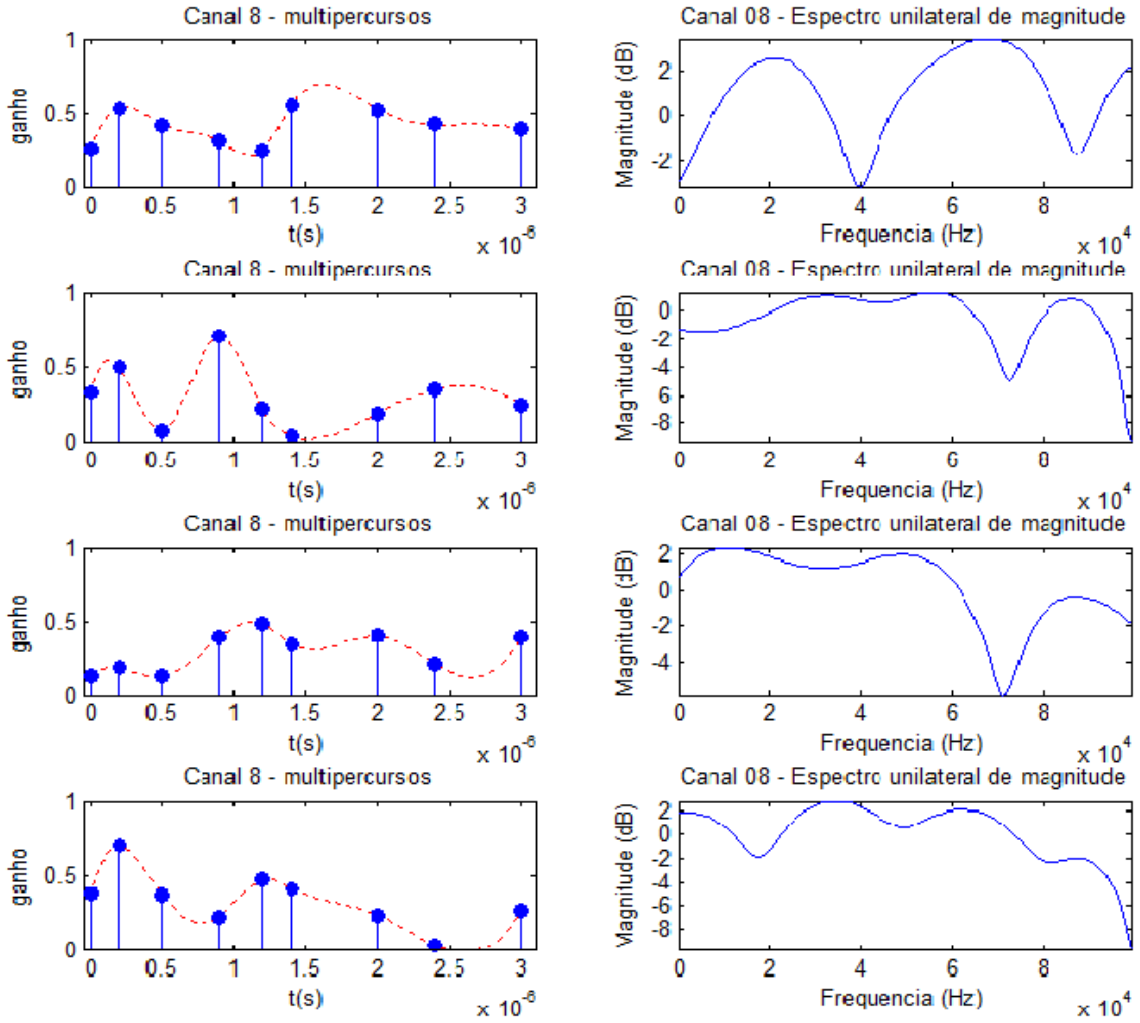
Channel no 12: SFN			
Velocity: 150 km/h (vehicle speed on highways)			
Path no, *k*	Delay (μs)	Rel. power (dB)	Path type
1	0,0	0,0	Classical
2	100,0	-13,0	Gauss1
3	220,0	-18,0	Gauss2
4	290,0	-22,0	Gauss1
5	385,0	-26,0	Gauss2
6	480,0	-31,0	Gauss1
7	600,0	-32,0	Gauss2

Fonte: ESTSI ES 201, (2009).

Com base no modelo matemático descrito também no Capítulo 4 para a adequada modelagem estatística dos canais, foram obtidas com o auxílio do software Matlab as respostas no tempo e em frequência dos mesmos. Para melhor compreensão da natureza estatística dos canais, o canal 8 é gerado quatro vezes, como mostrado na Figura 58. A Figura 59 evidencia as respostas dos demais canais.

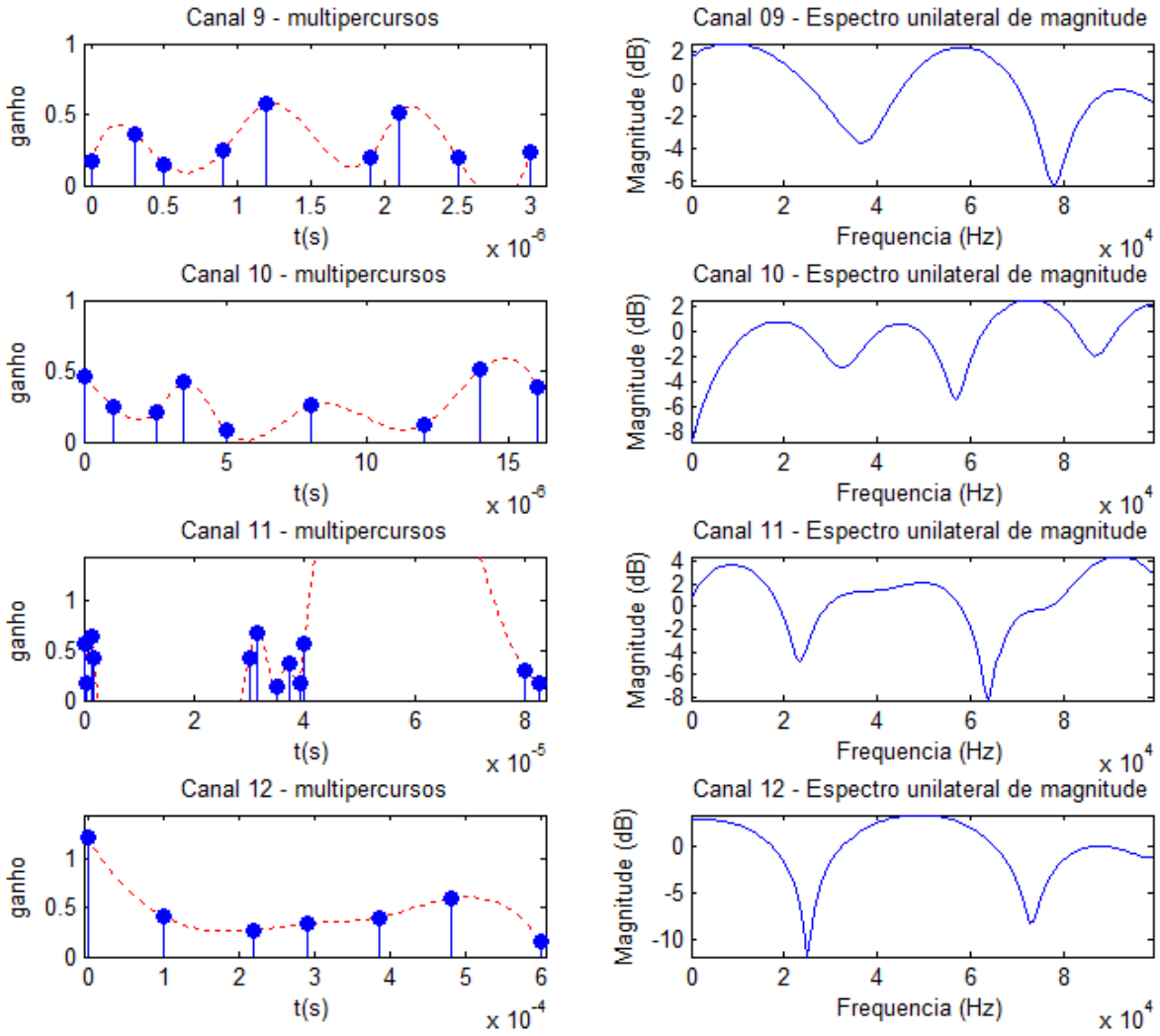
O efeito devastador dos canais multipercurso pode ser observado nas Figuras 58 e 59. É notória a seletividade em frequência de todos os canais, com *fadings* de até 15 dB.

Figura 58 – Quatro representações do Canal 8. Resposta no tempo e na frequência.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 59 – Representações dos Canais 9, 10, 11, e 12 nos domínios do tempo e da frequência.



Fonte: Produção do próprio autor.

7.2 Transmissão e Recepção de Símbolos OFDM

O passo seguinte consiste na simulação de um sistema OFDM com as especificações do padrão DRM+. Os símbolos OFDM são gerados com os parâmetros mostrados na Figura 60 e conforme o diagrama da Figura 11, com exceção da inserção e remoção da simetria Hermitia. Após propagação pelos diversos modelos de canal, os sinais são demodulados conforme o demodulador OFDM típico do padrão de camada física do DRM.

Figura 60 – Parâmetros do DRM+.

Período de tempo elementar T	83 1/3 μs
Duração da parte útil (ortogonal) $T_u = 27 \times T$	2.25 ms
Duração do intervalo de guarda $T_g = 3 \times T$	0.25 ms
Duração do símbolo $T_s = T_u + T_g$	2.5 ms
Razão T_g/T_u	1/9
Duração do frame de transmissão T_f	100 ms
Número de símbolos por frame N_s	40
Largura de banda do canal B_w	96 KHz
Espaçamento entre subportadoras $1/T_u$	444 4/9 Hz
Número de subportadoras	Kmin = –106; Kmax = 106
Subportadoras não utilizadas	nenhuma

Fonte: LAFLIN, (2012).

A avaliação do desempenho do sistema implementado em linguagem de computação Matlab deu-se medindo a quantidade de bits errados recebidos a partir da transmissão de sequências de 3 milhões de bits modulados em OFDM, nos canais seletivos acima referidos, também com efeito de ruído Gaussiano com potência definida por diversos valores de relação sinal-ruído.

As Figuras 61 a 65 ilustram a avaliação taxa de erro de bits por relação sinal-ruído BER x SNR, bem como os diagramas de constelação para valores de SNR iguais a 30 dB, medidos a cada *frame* do padrão DRM+ para os mapeamentos 4-QAM e 16-QAM nas subportadoras de informação.

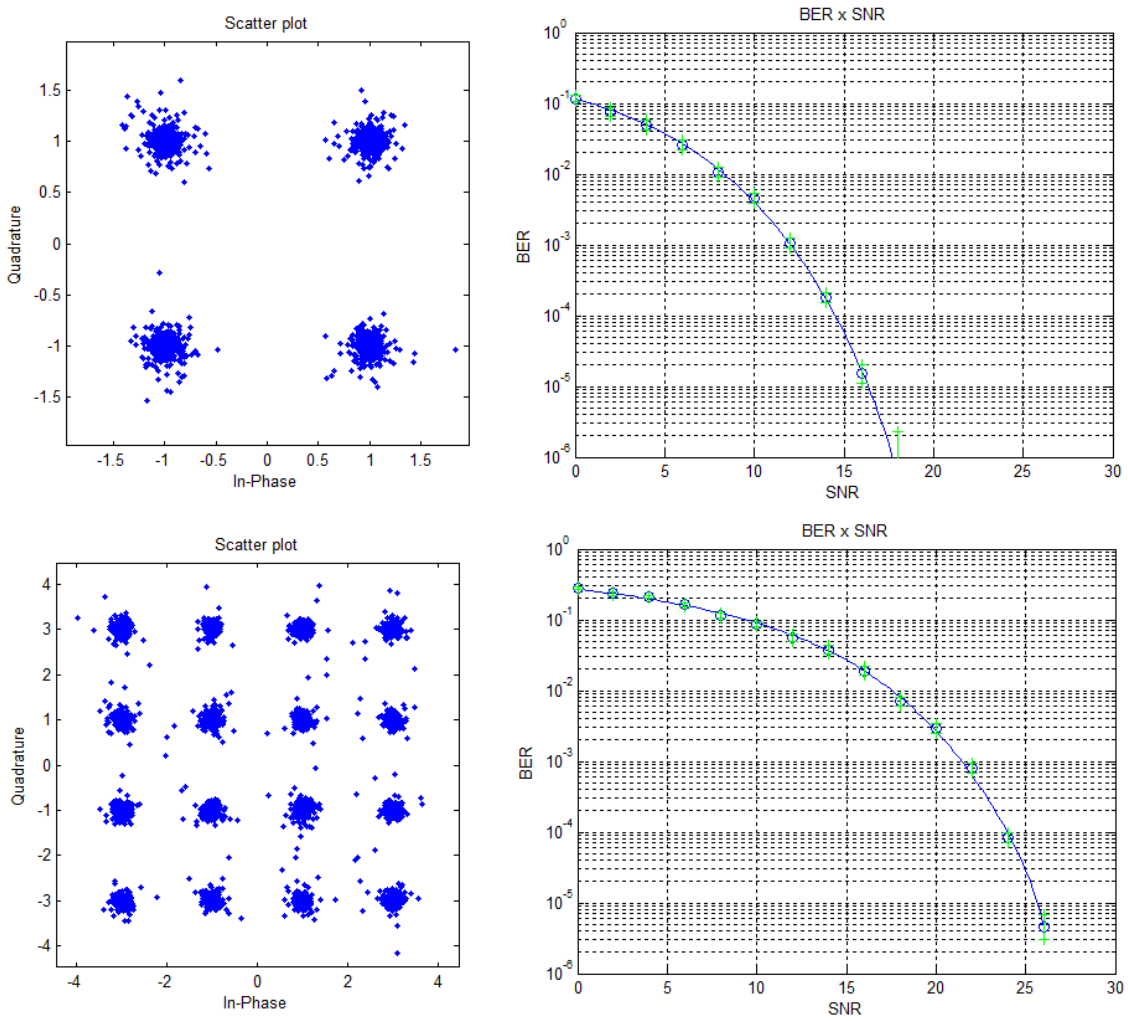
É importante salientar que na recepção é implementada um equalizador ideal, que tem por objetivo anular os efeitos indesejados decorrentes da passagem do sinal transmitido pelo canal

de comunicação. Na prática, subportadoras específicas transportam informações previamente conhecidas pelo receptor, com o intuito de obter as características do canal rádio móvel para a adequada equalização.

A ineficácia de um sistema multiportadora OFDM sem equalização pode ser observada na Figura 66 pela avaliação de desempenho BER x SNR do sistema mediante transmissão no canal 8. O espalhamento dos símbolos no diagrama de constelação da Figura corrobaram com esta afirmativa. Nas transmissões com equalização dos canais, a comunicação foi realizada com êxito para valores de SNR maiores ou menores dependentes da modulação por subportadora e do perfil de atenuação de cada canal. Pode-se notar na Figura 67 o espectro do sinal imediatamente antes de passar pelo canal (transmitido) e imediatamente após passar pelo canal (recebido).

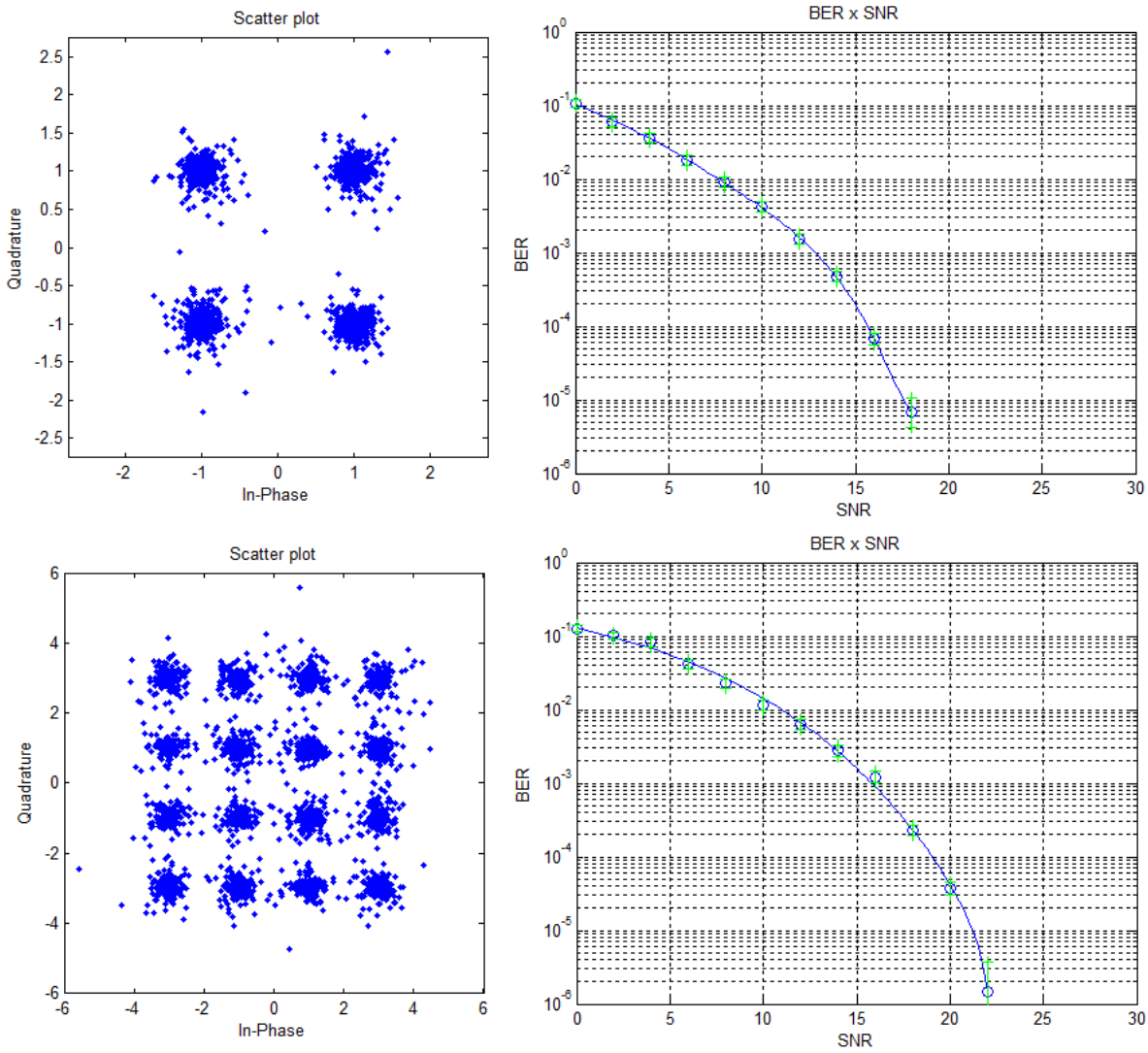
Ressalta-se que o emprego de esquemas de codificação de canal, conforme designado na modulação COFDM, certamente reduzirão as taxas de erro de bits, reduzindo o espalhamento dos pontos da constelação através de codificadores específicos para cada configuração.

Figura 61 – Canal 8: diagrama de constelação com SNR = 30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM.



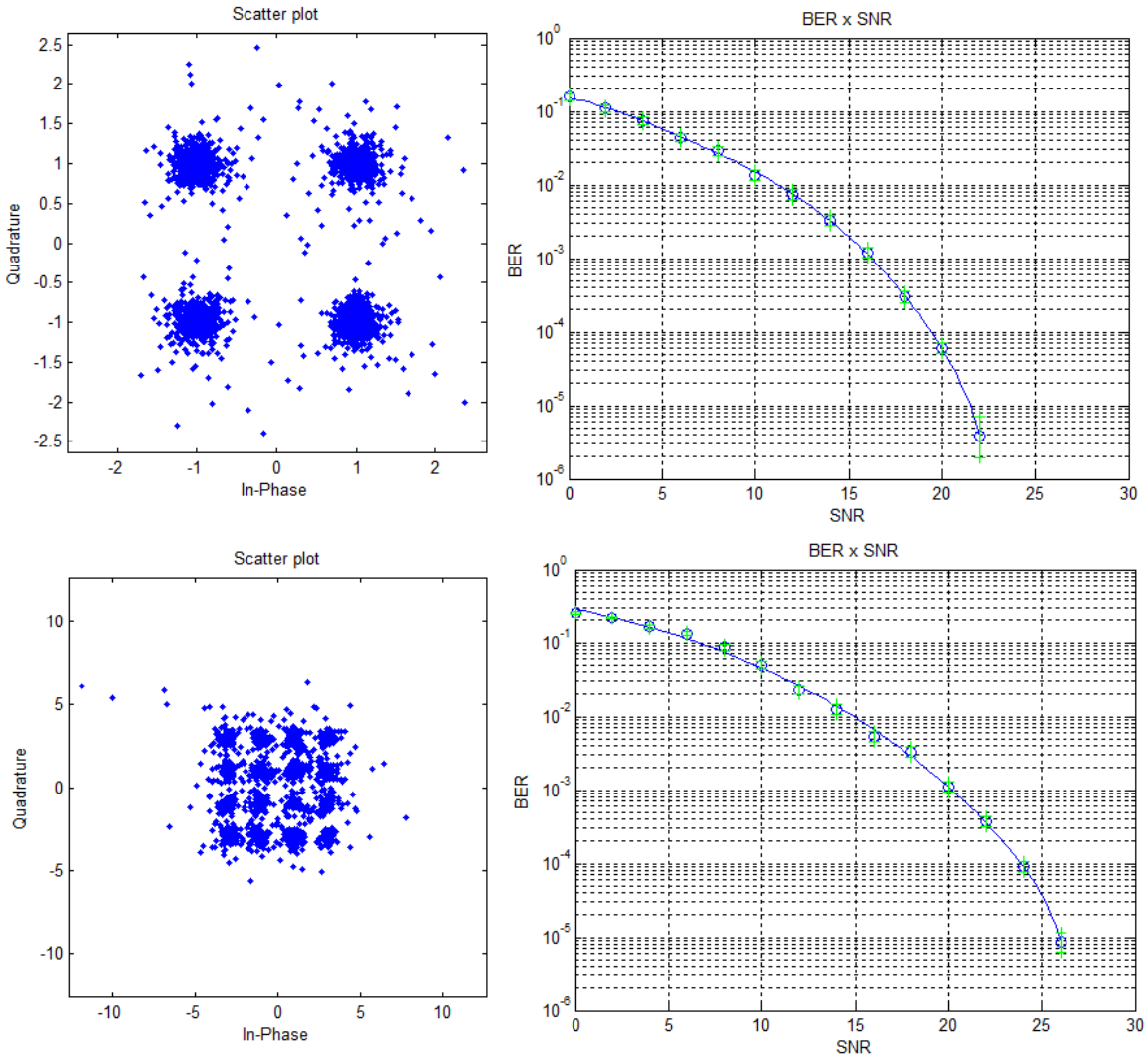
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 62 – Canal 9: diagrama de constelação com SNR=30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM.



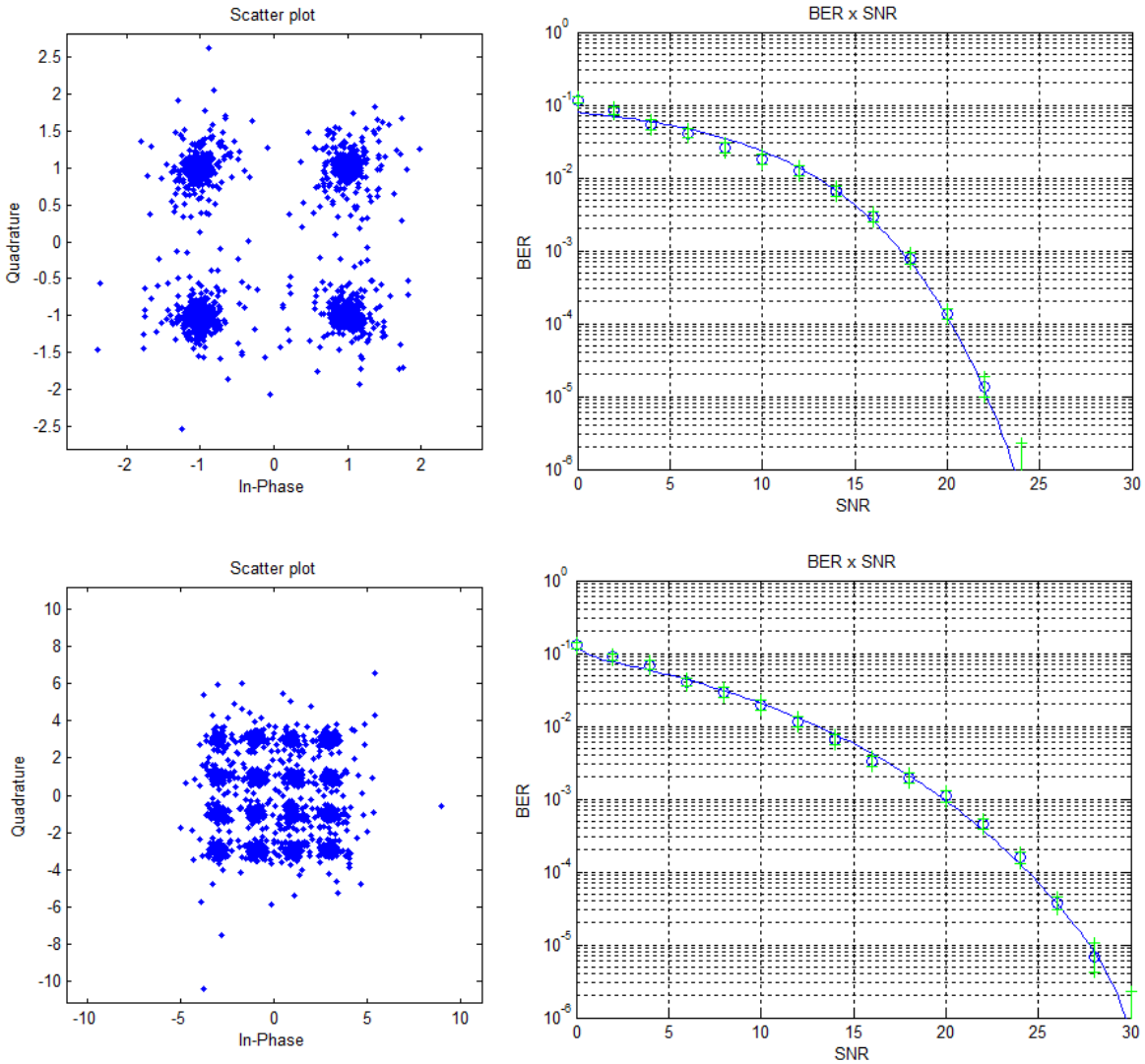
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 63 – Canal 10: diagrama de constelação com SNR = 30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM.



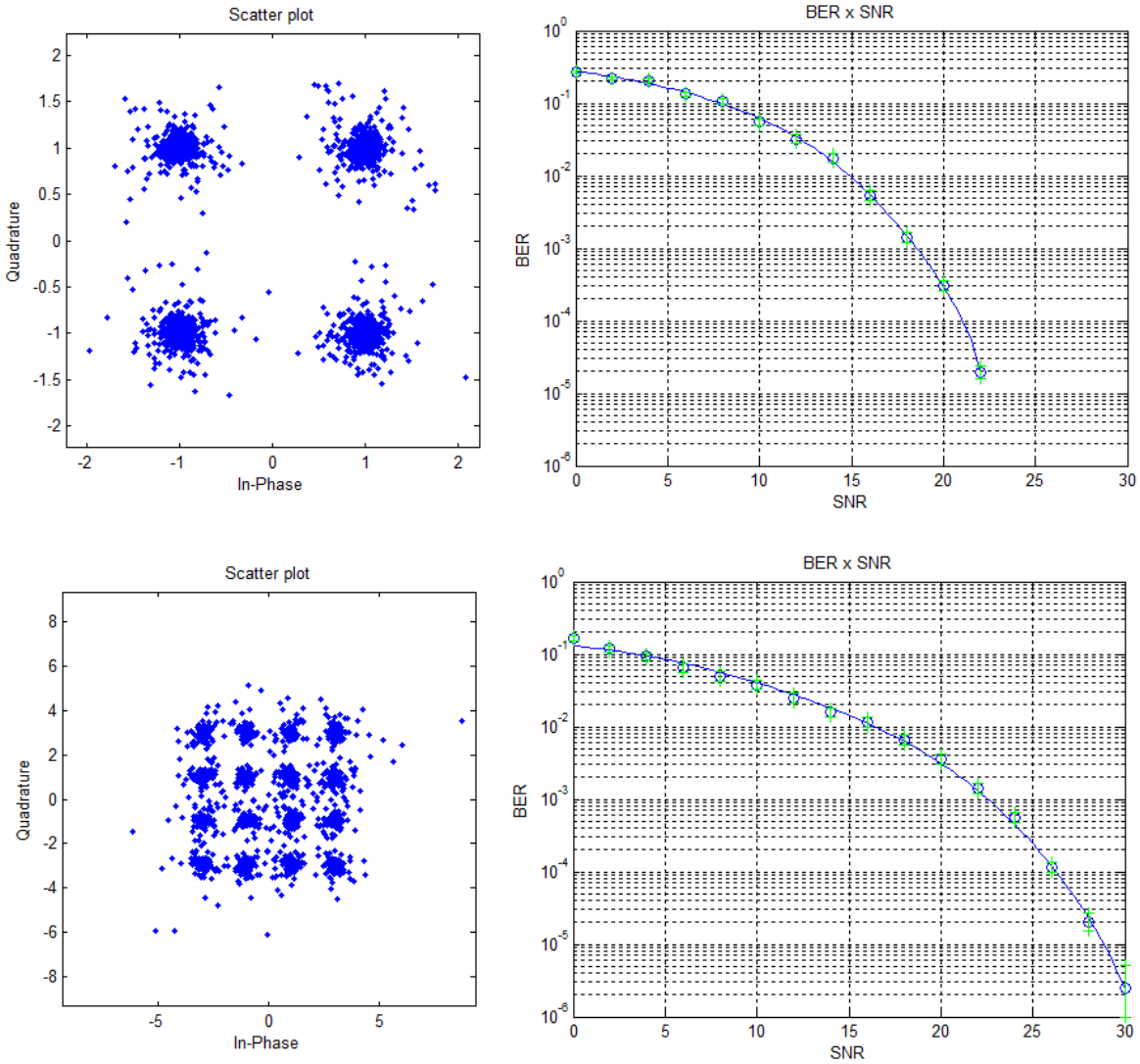
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 64 – Canal 11: diagrama de constelação com SNR = 30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM



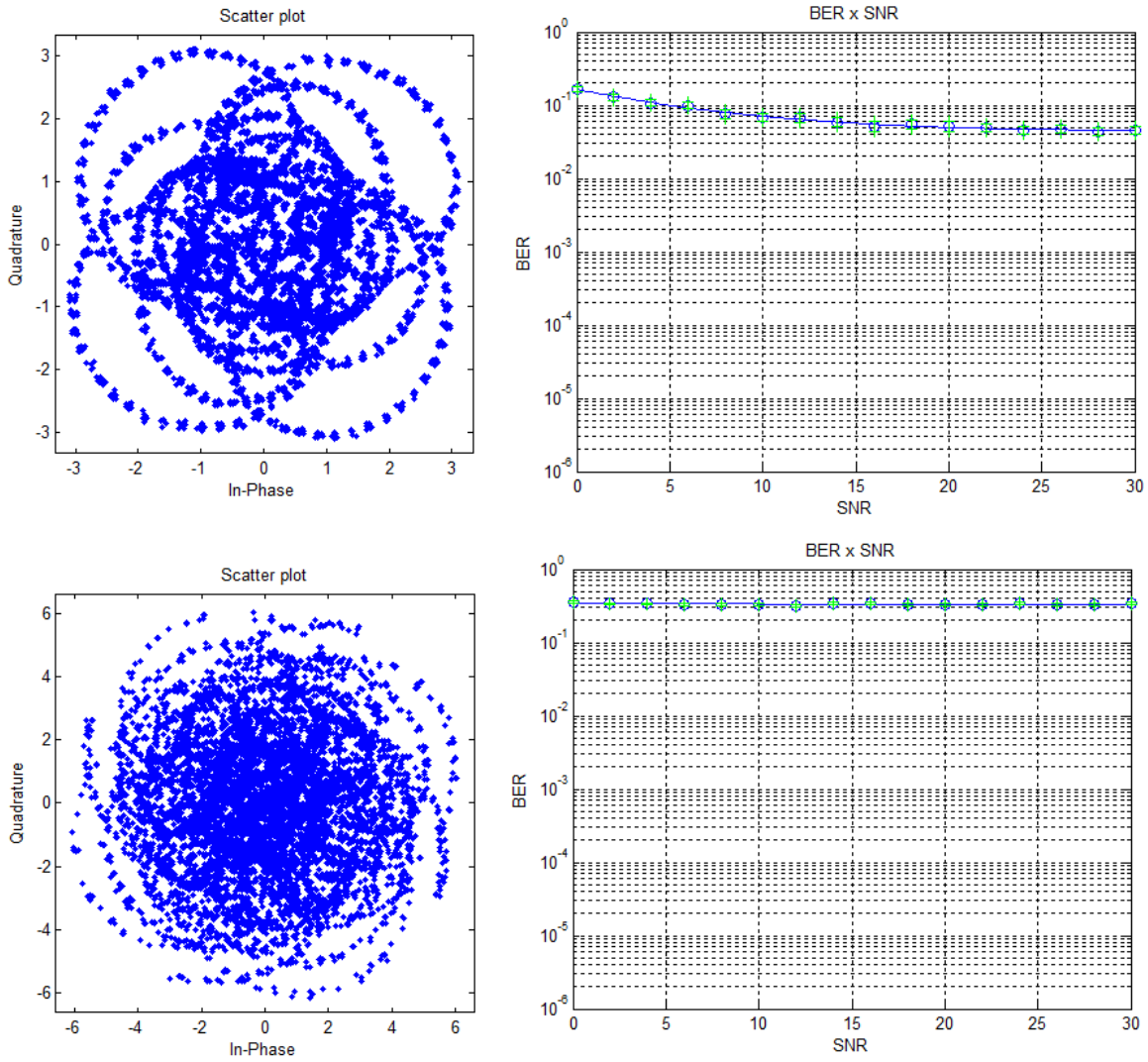
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 65 – Canal 12: diagrama de constelação com SNR = 30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM.



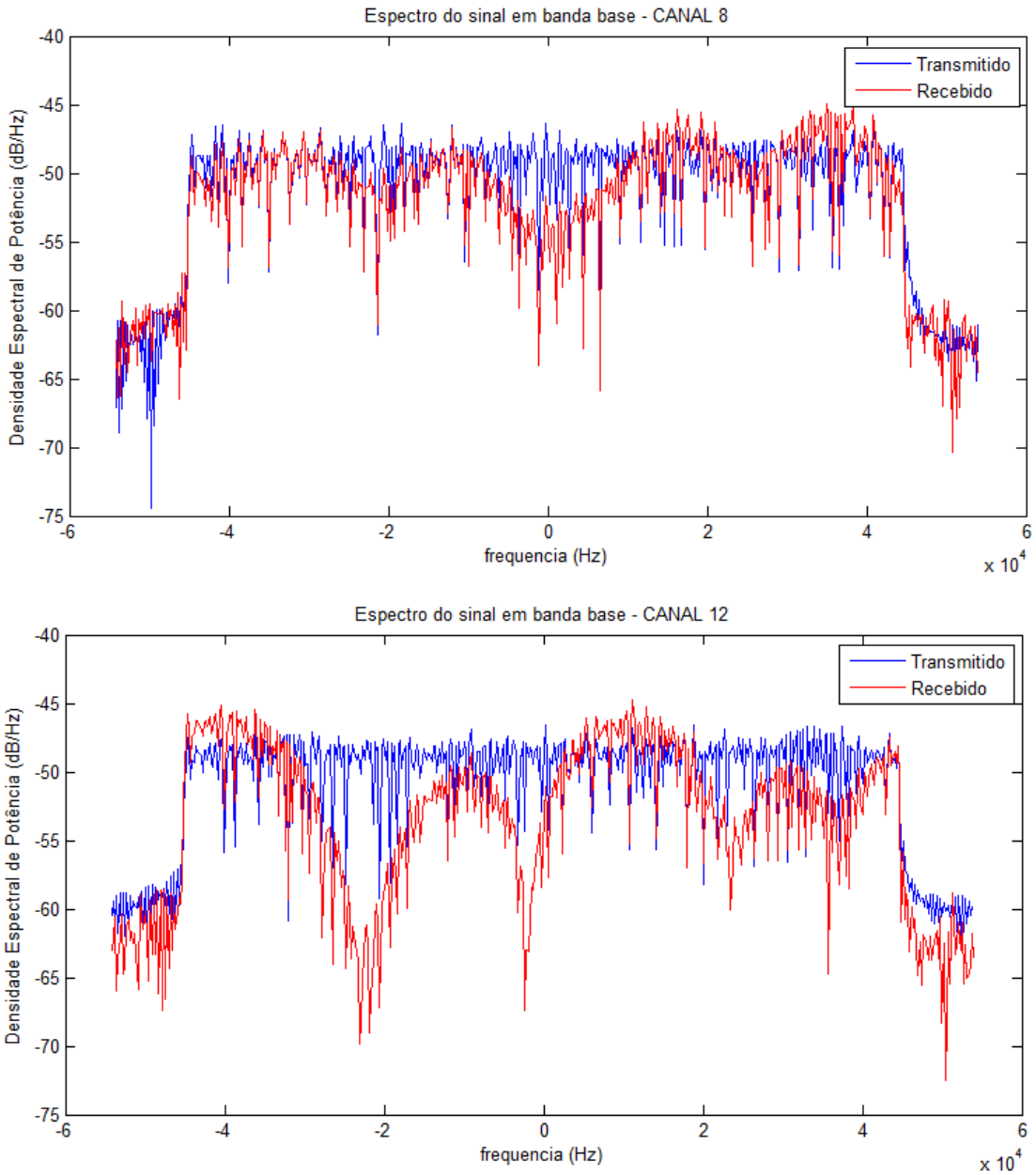
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 66 – Recepção SEM EQUALIZAÇÃO. Canal 8: diagrama de constelação com SNR=30dB e BER x SNR para modulação 4-QAM e 16-QAM.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 67 - Espectro do sinal transmitido e recebido para os canais 8 e 12.



Fonte: Produção do próprio autor.

7.3 Projeto dos Sistemas OFDM para Cada um dos Canais DRM

Na disciplina Comunicação de Dados ministrada durante o curso de Engenharia Elétrica, foram aprendidos métodos de projeto de sistemas OFDM. Partindo do pressuposto de que a largura de banda e o índice de modulação são premissas do projeto, os demais parâmetros são estabelecidos através de equações matemáticas, como mostrado no Quadro 6.

É crucial que se conheça previamente o τ_{max} do canal, essencial para a utilização do referido método. Desta forma, foram calculados os parâmetros mínimos de um sistema OFDM desenvolvido para cada canal, com as especificações de largura de banda e índice de modulação idênticas as utilizadas no padrão de rádio digital DRM+. O intuito é o de comparar os valores dos parâmetros T_g, T_u e T_s do padrão DRM+ com os do sistema OFDM mínimo obtidos a partir da técnica de projeto de sistemas OFDM.

Se maiores, pode-se afirmar pela técnica utilizada, que o sistema DRM+ atende aos valores mínimos de intervalo de guarda, duração útil do símbolo e duração total do símbolo OFDM para o canal calculado. Em outras palavras, pode-se concluir que o padrão DRM+ funciona no âmbito da modulação OFDM, no canal estudado. Se menores, deve-se justificar o valor encontrado.

É obvio que o padrão DRM+, já consolidado no mercado, opera de forma satisfatória em quase qualquer canal de comunicação real. A ideia é apenas fazer o processo inverso, ou seja, obter os valores mínimos para cada canal e mostrar que o DRM+, assim como outras tecnologias semelhantes, são geralmente superdimensionadas visando garantir o funcionamento mesmo em eventuais condições adversas.

Quadro 6 – Projeto de sistema OFDM.

Equações de projeto de sistemas OFDM	
Largura de banda (DRM+)	$BW = 96KHz$
Índice de modulação (DRM+)	$M = 4 \ e \ M = 16$
Atraso máximo do canal	τ_{max}
Intervalo de guarda	$T_g = (2 \ a \ 4) \ x \ \tau_{max}$
Duração útil do símbolo	$T_u = 10 \ x \ T_g$
Duração total do símbolo	$T_s = T_u + T_g$
Espaçamento entre subportadoras	$\Delta f = {}^{1}/_{T_u}$
Número de subportadoras	$N = \frac{BW}{\Delta f}$
Taxa de transmissão de dados	$R_b = \frac{BW \ x \ N \ x \ \log_2 M}{Nfft \ x \ (1 + \frac{T_g}{T_u})}$ Onde Nfft é a potência de 2 superior a N

Fonte: Produção do próprio autor.

Empregando-se as equações apresentadas, foram geradas as Tabelas1, 2, 3 e 4.

Tabela 1 – Projeto de sistema OFDM para o canal 8 e 9.

	Canal 8 e 9 $\tau_{max} = 3\mu s$		**DRM+**	**Atendeu** T_g, T_u, T_s
	4-QAM	**16-QAM**		
$T_g \ (\mu s)$	12	12	250	SIM
$T_u \ (\mu s)$	120	120	2500	
$T_s \ (\mu s)$	132	132	2250	
$\Delta f \ (Hz)$	8334	8334	444,44	
N	12	12	256	
$R_b (Kbps)$	126	251	50 (M=4) 149 (M = 16)	

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 2 – Projeto de sistema OFDM para o canal 10

	Canal 10 $\tau_{max} = 16\mu s$		**DRM+**	**Atendeu** T_g, T_u, T_s
	4-QAM	**16-QAM**		
T_g (μs)	64	64	250	SIM
T_u (μs)	640	640	2500	
T_s (μs)	704	704	2250	
Δf (Hz)	1562	1562	444,44	
N	62	62	256	
$R_b(Kbps)$	167	335	50 (M=4) 149 (M = 16)	

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 3 – Projeto de sistema OFDM para o canal 11

	Canal 11 $\tau_{max} = 82,7\mu s$		**DRM+**	**Atendeu** T_g, T_u, T_s
	4-QAM	**16-QAM**		
T_g (μs)	165	165	250	SIM
T_u (μs)	1650	1650	2500	
T_s (μs)	1815	1815	2250	
Δf (Hz)	605	605	444,44	
N	158	158	256	
$R_b(Kbps)$	108	216	50 (M=4) 149 (M = 16)	

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 4 – Projeto de sistema OFDM para o canal 12

	Canal 12 $\tau_{max} = 600\mu s$		**DRM+**	**Atendeu** T_g, T_u, T_s
	4-QAM	**16-QAM**		
T_g (μs)	1200	1200	250	NÃO
T_u (μs)	12000	12000	2500	
T_s (μs)	13200	13200	2250	
Δf (Hz)	83	83	444,44	
N	1152	1152	256	
$R_b(Kbps)$	98	98	50 (M=4) 149 (M = 16)	

Fonte: Produção do próprio autor.

7.4 Comentários

Pode-se perceber que a amplitude da resposta em frequência dos canais na Figura 58 e na Figura 59 varia com a frequência, com *fadings* de até 15 dB. A este efeito, dá-se o nome de desvanecimento seletivo em frequência. O canal é denominado canal seletivo em frequência.
Para a modulação 16-QAM, é necessária uma relação sinal-ruído maior para obter a mesma BER da modulação 4-QAM. Isto acontece devido à diminuição da distância Euclidiana entre os subsímbolos da constelação QAM. Consequentemente, a probabilidade de um subsímbolo ser demapeado erroneamente é maior.

A Figura 66 ilustra a recepção OFDM sem equalização. É notório que os subsímbolos QAM são rotacionados entre símbolos OFDM adjacentes. Este efeito devastador para a recepção acontece independentemente da presença de um equalizador. Entretanto, para a recepção com equalização, os subsímbolos são rotacionados de volta para a posição original, amenizando os efeitos gerados pelo canal de comunicação. Também é importante salientar que um acréscimo na potência de transmissão, ou seja, maior relação sinal-ruído, não diminui os erros decorrentes da ausência de equalização.

Na parte de projeto de sistemas OFDM, como pode ser observado na Tabela 4, os tempos de intervalo de guarda, duração útil e total do símbolo OFDM foram maiores que aqueles

referentes ao padrão DRM+. Com um atraso $\tau_{max} = 600\mu s$, o canal 12 experimenta *taps* que chegam ao receptor com atrasos que excedem o intervalo de guarda do padrão DRM+, definido como $250\mu s$. No entanto, as atenuações sofridas por esses *taps* são da ordem de 30 dB. Desta forma, com potência bastante reduzida, eles não interferem nos sinais recebidos dentro do intervalo de guarda.

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

De uma maneira geral, este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Elétrica da UFES abordou as vantagens e desafios da transmissão em rádio digital propondo a possível implantação de um sistema de transmissão FM em rádio digital na região central da Grande Vitória.

Os vários aspectos referentes a rádio enlaces ponto-a-ponto, propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre, estratégias de cobertura para redes SFN e intervalo de guarda, além de outros, foram analisados. Ademais, foi de grande valia também o estudo do modelo do canal de comunicação, e a partir dele, as simulações de um sistema OFDM similar ao empregado no padrão *Digital Radio Mondiale* DRM + foram conduzidas.

Examinou-se as curvas de desempenho e diagramas de constelação gerados com o intuito de aferir o grau de influência do canal de comunicação sem fio no comportamento do sistema de modulação OFDM.

A possibilidade da implantação das redes SFN para a transmissão de rádio com conteúdo digital e utilizando as especificações do padrão DRM+, foi considerada viável na Grande Vitória do ponto de vista técnico. Através de simulações usando o software *Radio Mobile*, foram obtidas áreas de cobertura e seus respectivos níveis de potência que claramente vão ao encontro dos propostos no trabalho. Isto ocorre graças ao fato de haver um transmissor central, responsável por cobrir grande parte da área de interesse, operando em sincronismo com duas repetidoras alocadas em pontos estratégicos e com o objetivo de suprir as regiões com buracos na cobertura.

Do ponto de vista econômico, as características de potência dos equipamentos usados na simulação foram adequadas à realidade de redes SFN existentes. A união da necessidade técnica com a financeira é condição ideal para a viabilização de redes SFN.

O uso de esquemas de modulação multiportadora são essenciais em sistemas de comunicação sem fio. Em especial, o esquema de modulação OFDM, cujas subportadoras são ortogonais entre si e a largura de banda de cada subcanal é menor que a largura de banda do canal de

comunicação, proporcionando eficiência espectral e garantindo maior robustez à interferência intersimbólica.

Outro ponto discutido no trabalho foi a influência do canal de comunicação na modulação OFDM com os parâmetros do DRM+. Através dos canais gerados para situações em que há multipercurso e deslocamento do receptor, ficou evidente a seletividade em frequência do canal. Mesmo com o uso de equalização e relação sinal-ruído bastante alta, o diagrama de constelação dos subsímbolos QAM ainda não é perfeito. Na ausência de equalização, os subsímbolos que compõem o símbolo OFDM são rotacionados devido às réplicas atenuadas do sinal principal que chegam atrasadas na recepção, fazendo com que o diagrama de constelação na recepção fique totalmente defasado do original gerado na transmissão.

Sugere-se como trabalho futuro a implementação de códigos definidos em esquemas de modulação COFDM com o intuito de melhorar o desempenho do sistema DRM+, minimizando-se as taxas de erro de bits ocorridos nos mais diversos tipos de canais retratados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MANHÃES, M. **A Nova Era da Radiodifusão Sonora Digital.** 2007. Disponível em: <http://www.obore.com.br/utilitarios/editor2.0/UserFiles/File/novaeradoradio.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2014.

[2] YAMADA, F.; SUKYS, F.; AKAMINE, C.; RAUNHEITTE, L.T. **Rádio Digital.** Revista de Radiodifusão, São Paulo, v. 3, n. 3, p.91-100, set. 2009. Disponível em: <http://www.set.org.br/revistaeletronica/index.php/revistaderadiodifusao/article/view/166>. Acesso em: 11 out. 2014.

[3] ROSA, H. **Matérias sobre "Rádio Digital".** 2013. Disponível em: <http://www.wirelessbrasil.org/bloco/websites_tecnologia/radio_digital/pagina_inicial.html>. Acesso em: 05 ago. 2014.

[4] CARVALHO, S. R. M. **Utilização da Rede SFN para Expansão da Rede de Retransmissão Regional da TV Digital Aberta Terrestre**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2006. Disponível em: < http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000391821>

[5] SILVA, J. A. L. **Análise de Desempenho de um Sistema COFDM para Comunicação via Rede Elétrica.** Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2006. Disponível em: < https://drive.google.com/viewerng/viewer?url=http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_2351_Dissertacao%2520de%2520Mestrado%2520Jair%2520Adriano%2520Lima%2520Silva.pdf >

[6] SCHULZE, H.; LUDERS, C. **Theory and Applications of OFDM and CDMA: Windeband Wireless Communications**. 1° Edição. John Wiley & Sons, Ltd, England. 2005.

[7] YANG, W. Y.; CHO, Y. S.; JEON, W. G.; LEE, J. W.; PAIK, J. H.; KIM, J. K.; LEE, M.; LEE, K. I.; PARK, K. W.; WOO, K. S. **MATLAB®/ Simulink® for Digital Communication**. 1° Edição. A-Jin Publishing Co, Coréia. 2009

[8] SINGH, S.; PANI, R. R. **Software implementation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Scheme for Mobile Radio Channel**. Projeto de Conclusão do Curso de Bacharel de Tecnologia em Engenharia Elétrica. Instituto de Tecnologia de Rourkela. Rourkela, Índia. 2010. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/43941026_Software_Implementation_of_Orthogonal_Frequency_Division_Multiplexing_%28OFDM%29Scheme_for_Mobile_Radio_Channel>. Acesso em: 03 nov. 2014.

[9] LAFLIN, N. **The DRM Digital Broadcasting System - Introduction and Implementation Guide.** Geneva, Switzerland: Drm Consortium, 2012.

[10] ITU-R REC. BS.412: **Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF.**

[11] **Argumentos pela adoção do padrão DRM para o Rádio Digital no Brasil.** Disponível em: <http://www.drm-brasil.org/content/argumentos-pela-adoção-do-padrão-drm-para-o-rádio-digital-no-brasil>. Acesso em: 20 nov. 2014.

[12] GUIMARÃES, A. G.; PINTO, E. N. **Técnicas de Simulação de Canais Rádio Móveis. Telecomunicações**, São Paulo, v. 4, n. 1, p.24-34, maio 2001.

[13] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. ETSI ES 201 980 V3.1.1: **Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification**. France: European Broadcasting Union, 2009. Disponível em: <http://www.etsi.org>. Acesso em: 15 out. 2014.

[14] PIRES, E. V. T.; SILVA, F. J; VEIGA, L. O.; **Redes LTE: Comparação Entre os Modelos de Predição Okumura Hata e ITU-R.** 2012**.** Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeslte/default.asp>. Acesso em: 01 dez. 2014.

[15] ITU, **"Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz.** Disponível em: <https://drive.google.com/viewerng/viewer?url=https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-1-200304-S!!PDF-E.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2014.

[16] MIYOSHI, E. M.; SANCHES, C. A. **Projetos de Sistemas Rádio**. 3. ed. São Paulo-sp: Érica, 2006. 534 p.

[17] BARCIA, F. A.; LIMA, V.; MACHADO, L. E. **Redes de Frequência Única – Parte 01.** Revista da SET. São Paulo. v. 23, n. 132, p. 92 – 96, abril 2013. Disponível em:<https://drive.google.com/viewerng/viewer?url=http://www.set.org.br/artigos/ed132/132_revistadaset_redes.pdf>

[18] BARCIA, F. A.; LIMA, V.; MACHADO, L. E. **Redes de Frequência Única – Parte 02**. Revista da SET. São Paulo. v. 23, n. 134, p. 82 – 92, jul. 2013. Disponível em:<https://drive.google.com/viewerng/viewer?url=http://www.set.org.br/artigos/ed134/134_revistadaset_redes.pdf>

[19] JALBANI, A. A. **Single Frequency Networks.** Apostila do Instituto de Informática. *University of Goettingen*. 2011. Disponível em:<https://drive.google.com/viewerng/viewer?url=http://user.informatik.uni-goettingen.de/~seminar/dvb/AkhtarJalbani-reportOnSFN.pdf>

[20] FARIA, R. M. **Rede de Frequência única Microrregionais.** Dissertação para obtenção de Título de Mestrado em Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas. 2008. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=446>

[21] DE SOUZA, E. E. P. **Planejamento da Expansão do Serviço de Retransmissão da Televisão Digital no Brasil utilizando Redes de Frequência Única** Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica. Área 1 Faculdade de Ciência e Tecnologia. Salvador. 2011. Disponível em: <http://www.academia.edu/2782222/Planejamento_da_Expans%C3%A3o_do_Servi%C3%A

7o_de_Retransmiss%C3%A3o_da_Televis%C3%A3o_Digital_no_Brasil_Utilizando_Redes_de_Frequ%C3%AAncia_%C3%9Anica>

[22] COUDÉ, Roger. **Radio Mobile.** 2014. Disponível em: <http://www.g3tvu.co.uk/Radio_Mobile.htm>. Acesso em: 11 set. 2014.

[23] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Biblioteca Central. **Normalização e apresentação de trabalhos científicos e acadêmicos**. Vitória, 2006a.

ANEXO A

Publicada no Diário Oficial da União em 31 de março de 2010. Institui o Sistema Brasileiro de Rádio Digital – SBRD e dá outras providências.

O MINISTRO DE ESTADO DAS COMUNICAÇÕES, no uso das atribuições que lhe confere o art. 87, parágrafo único, inciso IV, da Constituição, e considerando o disposto no art. 27, inciso IV, alínea "b", da Lei no 10.683, de 27 de maio de 2003, resolve:

Art. 1o Fica instituído, por esta Portaria, o Sistema Brasileiro de Rádio Digital - SBRD.

Art. 2o Para o serviço de radiodifusão sonora em Onda Média (OM) e em Frequência Modulada (FM) deve ser adotado padrão que, além de contemplar os objetivos de que trata o art. 3o, possibilite a operação eficiente em ambas as modalidades do serviço.

Art. 3o O SBRD tem por finalidade alcançar, entre outros, alcançar os seguintes objetivos:

I - promover a inclusão social, a diversidade cultural do País e a língua pátria por meio do acesso à tecnologia digital, visando à democratização da informação;

II - propiciar a expansão do setor, possibilitando o desenvolvimento de serviços decorrentes da tecnologia digital como forma de estimular a evolução das atuais exploradoras do serviço;

III - possibilitar o desenvolvimento de novos modelos de negócio adequados à realidade do País;

IV - propiciar a transferência de tecnologia para a indústria brasileira de transmissores e receptores, garantida, onde couber, a isenção de royalties;

V - possibilitar a participação de instituições brasileiras de ensino e pesquisa no ajuste e melhoria do sistema de acordo com a necessidade do País;

VI - incentivar a indústria regional e local na produção de instrumentos e serviços digitais;

VII - propiciar a criação de rede de educação à distância;

VIII - proporcionar a utilização eficiente do espectro de radiofrequências;

IX - possibilitar a emissão de simulcasting, com boa qualidade de áudio e com mínimas interferências em outras estações;

X - possibilitar a cobertura do sinal digital em áreas igual ou maior do que as atuais, com menor potência de transmissão;

XI - propiciar vários modos de configuração considerando as particularidades de propagação do sinal em cada região brasileira;

XII - permitir a transmissão de dados auxiliares;

XIII - viabilizar soluções para transmissões em baixa potência, com custos reduzidos; e

XIV - propiciar a arquitetura de sistema de forma a possibilitar, ao mercado brasileiro, as evoluções necessárias.

Art. 4o Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação.

ANEXO B

PORTARIA Nº 365, DE 14 DE AGOSTO DE 2012 O MINISTRO DE ESTADO DAS COMUNICAÇÕES, no uso das atribuições que lhe confere o art. 87, parágrafo único, inciso II, da Constituição, resolve:

Art. 1º Criar o Conselho Consultivo do Rádio Digital, constituído de dezenove conselheiros, na forma do art. 2º, com o objetivo de assessorar o Ministro de Estado das Comunicações na implantação do Rádio Digital no Brasil.

Art. 2º O Conselho Consultivo do Rádio Digital será composto por representantes:

I - dos seguintes órgãos e entidades públicas federais:
a) Ministério das Comunicações;
b) Secretaria de Comunicação Social da Presidência da República;
c) Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação;
d) Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior;
e) Agência Nacional de Telecomunicações;
f) Comissão de Ciência e Tecnologia, Comunicação e Informática da Câmara dos Deputados; e
g) Comissão de Ciência, Tecnologia, Inovação, Comunicação e Informática do Senado Federal;

II - das seguintes entidades do setor de radiodifusão:
a) Associação Brasileira de Emissoras de Rádio e Televisão (ABERT);
b) Associação Brasileira de Radiodifusão, Tecnologia e Telecomunicações (ABRATEL);
c) Associação Brasileira de Radiodifusores (ABRA);
d) Associação Brasileira de Radiodifusão Comunitária (ABRAÇO);
e) Associação Mundial de Rádios Comunitárias (AMARC);
f) Associação das Rádios Públicas do Brasil (ARPUB); e
g) Associação Brasileira de TVs e Rádios Legislativas (ASTRAL);

III - das seguintes entidades representativas do setor industrial:

a) Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Eletroeletrônicos (ELETROS);
b) Associação Brasileira da Indústria da Radiodifusão (ABIRD); e c) Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE).

§ 1º Cada entidade ou órgão referido nos incisos I, II e III deste artigo indicará um conselheiro titular e um suplente para compor o Conselho Consultivo do Rádio Digital, salvo quanto ao Ministério das Comunicações, que será representado pelos seguintes servidores:

I - Secretário de Serviços de Comunicação Eletrônica;
II - Diretor do Departamento de Acompanhamento e Avaliação de Outorgas da Secretaria de Serviços de Comunicação Eletrônica; e
III - Diretor do Departamento de Indústria, Ciência e Tecnologia da Secretaria de Telecomunicações.

§ 2º Os membros do Conselho Consultivo do Rádio Digital serão indicados pelos titulares dos órgãos e responsáveis legais pelas entidades referidas neste artigo e designados pelo Secretário de Serviços de Comunicação Eletrônica do Ministério das Comunicações.

§ 3º Os órgãos e entidades referidos neste artigo deverão apresentar suas indicações no Protocolo Geral do Ministério das Comunicações no prazo de trinta dias contados da publicação desta Portaria.

§ 4º A não indicação de representante no prazo estabelecido no §2º implicará a desistência de participação por parte do órgão ou entidade.

§ 5º O Presidente e o Vice-Presidente do Conselho Consultivo do Rádio Digital serão, respectivamente, o Secretário de Serviços de Comunicação Eletrônica e o Diretor do Departamento de Acompanhamento e Avaliação da Secretaria de Serviços de Comunicação Eletrônica do Ministério das Comunicações.

§ 6º O Presidente e, na sua ausência, o Vice-Presidente do Conselho Consultivo do Rádio Digital poderão convidar especialistas para o acompanhamento dos trabalhos.

Art. 3º O Conselho poderá constituir, a qualquer tempo, câmaras temáticas com a finalidade de desenvolver estudos e propostas específicas em cumprimento aos objetivos estabelecidos nesta Portaria.

Art. 4º A participação em quaisquer atividades do Conselho será considerada prestação de serviço relevante e não será remunerada.

Art. 5º As recomendações do Conselho serão apresentadas ao Ministro de Estado das Comunicações, na forma de relatório final.
Parágrafo único. Para integrar o relatório final dos trabalhos do Conselho, qualquer recomendação deverá ser aprovada pela maioria absoluta do colegiado.

Art. 6º Revoga-se a Portaria nº 83, de 13 de março de 2007.

Art. 7º Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação.