



Jussif Junior Abularach Arnez

**Avaliação das interferências intra-sistema em
redes 4G LTE e entre TV Digital e LTE –
simulação e medidas em campo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Luiz Da Silva Mello

Co-Orientador: Carlos Rodríguez Ron

Rio de Janeiro

Março de 2014



Jussif Junior Abularach Arnez

**Avaliação das interferências intra-sistema em
redes 4G LTE e entre TV Digital e LTE –
simulação e medidas em campo**

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

Prof. Luiz Da Silva Mello

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC Rio

Carlos Rodríguez Ron

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC Rio

Prof. Gláucio Lima Siqueira

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC Rio

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

Instituto Nacional de Meteorologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO

Marta Pudwell Chaves de Almeida

Instituto Nacional de Meteorologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO

Prof. José Eugênio Legal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de março de 2014

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

Jussif Junior Abularach Arnez

Engenheiro em Telecomunicações graduado pela Universidade Católica Boliviana, La Paz-Bolívia em 2010

Ficha Catalográfica

Abularach Arnez, Jussif Junior

Avaliação das interferências intra-sistema em redes 4G LTE e entre TV digital e LTE – Simulação e Medidas em campo/ Jussif Junior Abularach Arnez; orientador: Luiz Da Silva Mello. -2014.

v., 286 f: il. ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica-Tese. 2. Interferência rádio. 3. Rádio Cognitivo. 4. LTE-femtocélulas. 5. TV digital. I. Da Silva Mello, Luiz. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD:621.3

A mi mamá, a mi papá y a mi hermano

Agradecimentos

A Deus por todos os dias da minha vida pois até aqui me sustentou, e nunca me abandonou, por estar comigo em todas as situações, pois é fiel a mim e a todos que buscam lhe com Fé.

Ao meu orientador Professor Luiz da Silva Mello e meu co-orientador Carlos Rodríguez Ron pelo estímulo e parceria para a realização desse trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, pela educação, apoio, atenção, compreensão e carinho de todas as horas. Ao meu irmão, pelo todo seu apoio e compreensão durante a realização deste trabalho.

A minha namorada Vanessa, pela toda sua ajuda, parceria, apoio, paciência e compreensão durante toda a realização deste trabalho.

Aos meus amigos José Mauricio, Jennifer, Marcelo, Romar, Leonel, Alex, Alberth, Américo, César, Diego, Daniel por todo o seu apoio.

Aos meus colegas do CETUC e do INMETRO pelas importantes contribuições neste trabalho e pelas palavras de apoio.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os professores do Departamento de Elétrica pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Abularach Arnez, Jussif Junior; Da Silva Mello, Luiz. **Avaliação das interferências intra-sistema em redes 4G LTE e entre TV Digital e LTE – simulação e medidas em campo.** Rio de Janeiro, 2014. 286 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação é investigada, por meio de simulações computacionais, a utilização do conceito de rádio cognitivo considerando a técnica de sensoriamento espectral aplicada às femtocélulas do sistema móvel LTE Release 10 para reduzir os problemas de interferência entre camadas (*cross-tier*) existentes em um cenário de coexistências das redes heterogêneas (femtocélulas e macrocélulas).

Além disso, é investigada a interferência gerada por parte das femtocélulas LTE Release 10 em receptores de TV Digital operando em bandas de frequência adjacentes. Neste caso, além da simulação computacional foram realizadas medições em cenários de coexistência da femtocélula LTE e do Sistema Brasileiro de TV Digital na banda de frequência de 700 MHz.

Palavras-Chaves

Interferência rádio; Rádio Cognitivo; LTE-femtocélulas; TV Digital.

Abstract

Abularach Arnez, Jussif Junior; Da Silva Mello, Luiz (Advisor). **Evaluation of intrasystem interference in 4G LTE Networks and between Digital TV and LTE – simulations and field measurements.** Rio de Janeiro, 2014. 286 p. Msc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation investigates, using computer simulation, the use of spectrum sensing Cognitive Radio concept applied in femtocells of the LTE Release 10 mobile system in order to reduce the interference cross-tier problems that exists in the coexistence scenario of a heterogeneous network (femto-macrocells).

Furthermore, the interference produced by LTE Release 10 femtocells in TV Digital receivers operating in adjacent frequency bands was investigated. In this case, besides the computer simulations measurements were performed in an experimental setup implementing coexistence scenarios of the LTE femtocell and the Brazilian Digital TV System at the 700 MHz frequency band.

Keywords

Radio interference; Cognitive Radio; LTE Femtocell; Digital TV.

Sumário

1 Introdução	29
1.1. Redes de Rádio Cognitivo	30
1.2. <i>Small Cells</i> (Femtocélulas)	32
1.3. TV White Spaces (IEEE 802.22)	33
1.4. Motivação	35
1.5. Visão Geral da Dissertação	36
1.5.1. Objetivo da Dissertação	36
1.6. Publicações	37
1.7. Estrutura da Dissertação	38
2 Descrição dos Sistemas	40
2.1. Introdução	40
2.2. O Sistema Móvel LTE Release 10 e as Femtocélulas	41
2.2.1. Introdução	41
2.2.2. LTE Release 10	43
2.2.3. Características LTE – Release 10	44
2.2.4. Requisitos e Aspectos Técnicos	45
2.2.5. HeNB (<i>Home enhanced Node B</i>)	52
2.3. Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD)	56
2.3.1. Características Técnicas do SBTVD	57

2.4. O Simulador Seamcat	61
2.4.1. Intensidade do Sinal Desejado Recebido e Intensidade do Sinal Interferente	64
2.4.2. Intensidade do Sinal de Sensoriamento Recebido (sRSS, <i>Sensing Received Signal Strength</i>)	66
2.4.3. Algoritmo de Rádio Cognitivo	68
2.5. Modelos de Propagação	70
2.5.1. Modelo de Propagação Okumura Hata	71
2.5.2. Modelo de Propagação Hata SRD	75
2.6. Modelo de Propagação da ITU-R P. 1546	76
3 Simulações Sistema Móvel LTE Macro – LTE Femto	78
3.1. Introdução	78
3.2. Simulações LTE Macro – LTE Femto	79
3.2.1. Cenário 1: “Usuário Macro célula LTE e HeNBs localizados na mesma frequência”	79
3.2.2. Cenário 2: “Usuário LTE e HeNBs localizados em diferentes frequências”	99
4 Simulações LTE e SBTVD na faixa de frequência de 700 MHz	114
4.1. Introdução	114
4.2. Cenário de Interferência das LTE femtocélulas e coexistência com o SBTVD na banda de 700 MHz	114
4.2.1. Parâmetros e Cenários de Simulação	115
4.2.2. Resultados das Simulações	121
5 Medições	142

5.1. Introdução	142
5.2. Cenário das Medições	142
5.3. Cenário e Características das Medições	144
5.3.1. Cenários para avaliação da interferência na TV digital	146
5.3.2. <i>Universal Software Radio Peripheral</i> (USRP)	147
5.3.3. GNU RADIO – GNU RADIO COMPANION	155
5.3.4. Avaliação da Potência de Transmissão da USRP	159
5.3.5. Equipamentos de Televisão Digital	162
6 Análise dos Resultados das Medições	176
6.1. Introdução	176
6.2. Resultados e Análise das Medições	177
6.2.1. Avaliação da máxima potência do sistema interferente	177
7 Comparação dos Resultados das Simulações e Medições	194
7.1. Introdução	194
7.2. Análise do Cenário de Coexistência para 700 MHz	195
7.3. Análise do Cenário de Coexistência em 702 MHz	197
7.4. Análise do Cenário de Coexistência em 705 MHz	198
8 Conclusões e Trabalhos Futuros	201
8.1. Trabalhos e Desenvolvimentos Futuros	207
9 Referências Bibliográficas	210
A Instalação USRP, exemplos em GRC, e resultados de avaliação dos parâmetros MER e BER	218

A.1 Instalação de GNU Radio e GNU Radio Companion	218
A.2 Indicadores LEDs da USRP	227
A.3 Instalação firmware e configuração IP das USRP	231
A.4 Calibração da USRP	233
A.5 Testes dos Cenários das Medições	235
A.6 Exemplos desenvolvidos no GNU Radio Companion	240
A.7 Problemas apresentados na USRP	270
A.8 Avaliação dos parâmetros MER e BER para as distâncias de separação de 2, 6, 12, 18 e 25 metros	271
A.8.1 Cenário de Coexistência a 2 metros de separação	271
A.8.2 Cenário de Coexistência a 6 metros de separação	274
A.8.4 Cenário de Coexistência a 18 metros de separação	280
A.8.5 Cenário de Coexistência a 25 metros de separação	283

Lista de Figuras

Fig. 1 O Ciclo de Cognição	31
Fig. 2 Linha de Tempo dos Sistemas de Comunicação Móvel	43
Fig. 3 Faixa de Frequências em 2500 MHz	47
Fig. 4 Máscara de emissão espectral da HeNB para 2 e 20 dBm	54
Fig. 5 Problemas de Interferência no enlace de descida	55
Fig. 6 Problemas de Interferência no enlace de subida	55
Fig. 7 Máscara do espectro de transmissão para radiodifusão de televisão digital terrestre	59
Fig. 8 <i>Emissões não Desejadas e Potência de Bloqueio do Receptor</i>	62
Fig. 9 Cenário típico de Interferência entre a Vítima e o Interferente	63
Fig. 10 Cenário típico de Interferência entre os enlaces Vítima e Interferente	66
Fig. 11 Descrição de um sistema de Rádio Cognitivo	67
Fig. 12 Configuração da Máscara de Bloqueio LTE UE (10 MHz)	81
Fig. 13 Máscara de Bloqueio do usuário da macrocélula LTE	81
Fig. 14 Cenário Redes Heterogêneas	84
Fig. 15 Cenário Redes Heterogêneas (execução da simulação no programa Seamcat)	85
Fig. 16 Execução de uma Simulação (simulador Seamcat)	86
Fig. 17 Configuração básica de um evento (zoom no cenário)	87

Fig. 18 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (10 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)	88
Fig. 19 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Sem uso de Rádio Cognitivo)	90
Fig. 20 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Com uso de Rádio Cognitivo)	91
Fig. 21 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (50 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)	93
Fig. 22 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Sem uso de Rádio Cognitivo)	93
Fig. 23 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Com uso de Rádio Cognitivo)	94
Fig. 24 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (100 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)	95
Fig. 25 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Sem uso de Rádio Cognitivo)	95
Fig. 26 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Com uso de Rádio Cognitivo)	96
Fig. 27 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Sensibilidade do Receptor	97
Fig. 28 Ambiente de Radio Cognitivo	98
Fig. 29 Cenário de simulação	101
Fig. 30 Simulação de redes heterogêneas (Execução da simulação no programa Seamacat)	102

Fig. 31 Fim da Simulação	103
Fig. 32 Cenário de Avaliação Interferência	104
Fig. 33 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (10 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)	105
Fig. 34 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Sem uso de Rádio Cognitivo)	107
Fig. 35 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Com uso de Rádio Cognitivo)	107
Fig. 36 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (30 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)	108
Fig. 37 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Sem uso de Rádio Cognitivo)	109
Fig. 38 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Com uso de Rádio Cognitivo)	109
Fig. 39 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (50 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)	110
Fig. 40 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Sem uso de Rádio Cognitivo)	110
Fig. 41 Níveis Médios de dRSS, iRSSunwanted e iRSSblocking (Com uso de Rádio Cognitivo)	111
Fig. 42 Ambiente de Radio Cognitivo a 120 metros de separação.	112
Fig. 43 Ambiente de Radio Cognitivo a 270 metros de separação.	113

Fig. 44 Cenário Coexistência entre SBTVD e LTE Femtocell HeNB	118
Fig. 45 Cenário Coexistência LTE – SBTVD em 700 MHz (execução simulação no programa SEAMCAT)	119
Fig. 46 Execução de uma Simulação	120
Fig. 47 Configuração Básica de um Evento (zoom simulação SEAMCAT)	121
Fig. 48 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs. Distância de Separação entre SBTVD e LTE Femtocell (700 MHz)	122
Fig. 49 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs. Distância de Separação entre SBTVD e LTE Femtocell (701 MHz)	123
Fig. 50 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs. Distância de Separação entre SBTVD e LTE Femtocell (702 MHz)	123
Fig. 51 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs. Distância de Separação entre SBTVD e LTE Femtocell (703 MHz)	124
Fig. 52 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs. Distância de Separação entre SBTVD e LTE Femtocell (704 MHz)	124
Fig. 53 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs. Distância de Separação entre SBTVD e LTE Femtocell (705 MHz)	125
Fig. 54 Probabilidade de Interferência a 2 metros de separação (700 MHz)	126

Fig. 55 Probabilidade de Interferência a 2 metros de separação (701 MHz)	126
Fig. 56 Probabilidade de Interferência a 2 metros de separação (702 MHz)	127
Fig. 57 Probabilidade de Interferência a 2 metros de separação (703 MHz)	127
Fig. 58 Probabilidade de Interferência a 2 metros de separação(704 MHz)	128
Fig. 59 Probabilidade de Interferência a 2 metros de separação (705 MHz)	128
Fig. 60 Probabilidade de Interferência a 6 metros de separação (700 MHz)	129
Fig. 61 Probabilidade de Interferência a 6 metros de separação (701 MHz)	129
Fig. 62 Probabilidade de Interferência a 6 metros de separação (702 MHz)	130
Fig. 63 Probabilidade de Interferência a 6 metros de separação (703 MHz)	130
Fig. 64 Probabilidade de Interferência a 6 metros de separação (704 MHz)	131
Fig. 65 Probabilidade de Interferência a 6 metros de separação (705 MHz)	131
Fig. 66 Probabilidade de Interferência a 12 metros de separação (700 MHz)	132
Fig. 67 Probabilidade de Interferência a 12 metros de separação (701 MHz)	132

Fig. 68 Probabilidade de Interferência a 12 metros de separação (702 MHz)	133
Fig. 69 Probabilidade de Interferência a 12 metros de separação (703 MHz)	133
Fig. 70 Probabilidade de Interferência a 12 metros de separação (704 MHz)	134
Fig. 71 Probabilidade de Interferência a 12 metros de separação (705 MHz)	134
Fig. 72 Probabilidade de Interferência a 18 metros de separação (700 MHz)	135
Fig. 73 Probabilidade de Interferência a 18 metros de separação (701 MHz)	135
Fig. 74 Probabilidade de Interferência a 18 metros de separação (702 MHz)	136
Fig. 75 Probabilidade de Interferência a 18 metros de separação (703 MHz)	136
Fig. 76 Probabilidade de Interferência a 18 metros de separação (704 MHz)	137
Fig. 77 Probabilidade de Interferência a 18 metros de separação (705 MHz)	137
Fig. 78 Probabilidade de Interferência a 25 metros de separação (700 MHz)	138
Fig. 79 Probabilidade de Interferência a 25 metros de separação (701 MHz)	138
Fig. 80 Probabilidade de Interferência a 25 metros de separação (702 MHz)	139

Fig. 81 Probabilidade de Interferência a 25 metros de separação (703 MHz)	139
Fig. 82 Probabilidade de Interferência a 25 metros de separação (704 MHz)	140
Fig. 83 Probabilidade de Interferência a 25 metros de separação (705 MHz)	140
Fig. 84 Campus de Laboratórios do Inmetro	143
Fig. 85 Corredor Prédio #2, Inmetro.	143
Fig. 86 Setup de Medição	146
Fig. 87 USRP versão 1	148
Fig. 88 USRP versão N200/210	148
Fig. 89 USRP N210	149
Fig. 90 Diagrama de Blocos da Interface USRP – Computador	150
Fig. 91 RF Motherboard e Daughterboard	152
Fig. 92 RF Motherboard ou Placa Mãe	152
Fig. 93 Placa <i>Daughterboard</i> WBX (Placa Filha Desmotável)	154
Fig. 94 GNU Radio Companion (GRC)	156
Fig. 95 Pastas no GNURADIO	157
Fig. 96 Transmitindo Sinal OFDM	158
Fig. 97 Transmitindo Sinal OFDM	158
Fig. 98 Fim da Transmissão do Sinal OFDM	158
Fig. 99 Sem Transmitir	159
Fig. 100 Setup de Teste	160
Fig. 101 Avaliação da Potência	161

Fig. 102 R&S SFU Broadcast Test System	163
Fig. 103. Set Top Box e TV	166
Fig. 104 Analisador de Redes Anritsu MS8901A	167
Fig. 105 Seleção do Software para avaliação da MER ou do BER	168
Fig. 106 Antena Log Periodic 0410	169
Fig. 107 Soldando o conector SMA na antena	170
Fig. 108 Antena Omnidirecional	171
Fig. 109 Antena Omnidirecional e o USRP	171
Fig. 110. Antena Diretiva 419C/419C1 e Diagrama de Irradiação	173
Fig. 111. a) Antena de Recepção b) Diagrama de Irradiação	174
Fig. 112 Telêmetro a Laser	175
Fig. 113 Nível de Potência da Femtocélula em diferentes frequências para uma Modulação QPSK.	177
Fig. 114 Nível de Potência da Femtocélula em diferentes frequências para uma modulação 16 QAM.	179
Fig. 115 Nível de Potência da Femtocélula em diferentes frequências para uma modulação 64 QAM	180
Fig. 116 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 2 metros.	181
Fig. 117 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 6 metros.	181
Fig. 118 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 12 metros.	182
Fig. 119 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 18 metros.	182

Fig. 120 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 25 metros	182
Fig. 121 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	184
Fig. 122 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	185
Fig. 123 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	186
Fig. 124 Avaliação da MER em função da potência da femtocélula e frequência de guarda	187
Fig. 125 Avaliação da MER em função da potência da femtocélula e frequência de Guarda	187
Fig. 126 Avaliação da MER em função da potência da femtocélula e frequência de Guarda	188
Fig. 127 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 2 metros de separação	189
Fig. 128 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 12 metros de separação	190
Fig. 129 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 25 metros de separação	190
Fig. 130 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 2 metros de separação	191

Fig. 131 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 12 metros de separação	192
Fig. 132 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 25 metros de separação	192
Fig. 133 GNU Radio Companion (GRC) - Versão 3.6.5.1	223
Fig. 134 Site GNU Radio	224
Fig. 135 Tópico CONTENT	224
Fig. 136 Build GNU Radio	225
Fig. 137 Código do Script a salvar	225
Fig. 138 Pasta Descargas e build-gnuradio	226
Fig. 139 Autorização e Privilégios	226
Fig. 140 Execução do script	227
Fig. 141 LEDs USRP	228
Fig. 142 MIMO Cable Link	228
Fig. 143 Duas USRP em configuração Mimo	229
Fig. 144 Placa GPS	229
Fig. 145 Placa GPS montada na USRP N210	230
Fig. 146 Configuração do Endereço IP (Ubuntu - Linux)	231
Fig. 147 Identificando os Equipamentos conectados	232
Fig. 148 LED D e LED F acesos	232
Fig. 149 Programas de Calibração	233
Fig. 150 Calibração do Equipamento de Rádio USRP	234

Fig. 151	Calibração do Equipamento de Rádio USRP	234
Fig. 152	Primer Set-up de Medição	235
Fig. 153	Testes de Recepção	236
Fig. 154	Testes de Transmissão	236
Fig. 155	Primeiros Testes em laboratório	237
Fig. 156	Primeiros Testes em laboratório	238
Fig. 157	Equipamento Transmissor e Receptor de TV Digital	238
Fig. 158	Antena Transmissora Log Periodic USRP	239
Fig. 159	Antenas Transmissora e Receptora de TV Digital	239
Fig. 160	Histereses GRC	240
Fig. 161	Execução do Fluxograma	241
Fig. 162	Fluxograma no GRC	243
Fig. 163	Fluxograma em Execução	244
Fig. 164	Cálculo da BER	245
Fig. 165	Cálculo da BER (limiar próximo a zero)	245
Fig. 166	Cálculo da BER (limiar igual a zero)	246
Fig. 167	Porcentagem de bit igual a 1 e 0 gerados (limiar 310m)	246
Fig. 168	Porcentagem de bit igual a 1 e 0 gerados (limiar 1)	247
Fig. 169	Comportamento dos valores da BER	247
Fig. 170	Fluxograma	248
Fig. 171	Geração do Sinal Randômica	248
Fig. 172	Fast Autocorrelation sem Ruído Gaussiano	249

Fig. 173 FFT e Fast Autocorrelation em presença de Ruído Gaussiano	249
Fig. 174 Constelação da modulação QPSK sem Ruído Gaussiano	250
Fig. 175 Constelação da modulação QPSK em presença de Ruído Gaussiano	250
Fig. 176 Espectrograma sem Ruído Gaussiano	250
Fig. 177 Espectrograma em presença de Ruído Gaussiano	251
Fig. 178 Componentes em fase e quadratura do sinal DPSK sem Ruído Gaussiano	251
Fig. 179 Componentes em fase e quadratura do sinal DPQSK em presença de Ruído Gaussiano	251
Fig. 180 Histograma do Ruído Gaussiano	252
Fig. 181 Fluxograma em GRC	252
Fig. 182 Criação dos Arquivos .dat	253
Fig. 183 Diretório em GRC	253
Fig. 184 Geração da densidade espectral de potência (OFDM)	254
Fig. 185 Componentes em Fase e Quadratura, constelação 16 QAM e 64 QAM	254
Fig. 186 Fluxograma no GRC	255
Fig. 187 Programa em execução	255
Fig. 188 Variação dos valores do ganho de recepção e volume em tempo de execução	256
Fig. 189 Mudando de Emissora FM	256
Fig. 190 Sinal FM demodulada	257

Fig. 191	Transmissor	258
Fig. 192	Receptor	259
Fig. 193	Receptor	260
Fig. 194	Sistema de Comunicação Modulação BPSK	261
Fig. 195	Cenário de Teste	262
Fig. 196	Mapeamento dos dados gerados	263
Fig. 197	Após da filtragem (<i>Root Cosine Filter</i>) -Transmissão	263
Fig. 198	Quantidade de bits igual a 1 e a 0 transmitidos	264
Fig. 199	Recepção do sinal depois da filtragem (RCF)	265
Fig. 200	Recepção do sinal depois da filtragem (RCF) – Constelação	266
Fig. 201	Recuperadora de Relógio e Portadora	266
Fig. 202	Modulação BPSK após recuperação de Relógio e Portadora	267
Fig. 203	Modulação BPSK após recuperação de Relógio e Portadora	267
Fig. 204	Bloco Detector	268
Fig. 205	Transmissor	269
Fig. 206	Receptor	269
Fig. 207.	Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	271
Fig. 208.	Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	272
Fig. 209	Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	272

Fig. 210 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	273
Fig. 211. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	273
Fig. 212. Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	274
Fig. 213. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	274
Fig. 214. Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	275
Fig. 215. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	275
Fig. 216. Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	276
Fig. 217. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	276
Fig. 218 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	277
Fig. 219. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de	277
Fig. 220 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	278
Fig. 221 Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	278
Fig. 222 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e da Frequência de Guarda	279

Fig. 223 Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	279
Fig. 224. Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda.	280
Fig. 225. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	280
Fig. 226. Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	281
Fig. 227. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	281
Fig. 228. Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência	282
Fig. 229. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	282
Fig. 230. Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	283
Fig. 231 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	284
Fig. 232 Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	284
Fig. 233. Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	285
Fig. 234. Avaliação da BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	285
Fig. 235 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda	286

Lista de Tabelas

Tabela 1. Designação de sub-faixas	46
Tabela 2. Designação de Frequências	47
Tabela 3. Parâmetros Receptor LTE UE	49
Tabela 4. Característica e Parâmetros do LTE UE	50
Tabela 5. Parâmetros da HeNB	53
Tabela 6. Diferenças sinal analógico e digital	56
Tabela 7. Parâmetros do Sistema de Transmissão	58
Tabela 8. Características do Receptor TV digital	60
Tabela 9. Considerações do Modelo de Propagação	73
Tabela 10. Parâmetros da Macro célula	80
Tabela 11. Parâmetros da Femto célula	80
Tabela 12. Parâmetros de Rádio Cognitivo	82
Tabela 13. Característica e Parâmetros do LTE UE	83
Tabela 14. Requisitos do nível de potência do sinal desejada para um sistema com largura de faixa de 10 MHz	88
Tabela 15. Parâmetros da Macro célula	99
Tabela 16. Parâmetros da Femto célula	99
Tabela 17. Parâmetros de Televisão Digital	116
Tabela 18. Parâmetros Femto célula HeNB	116
Tabela 19. Parâmetros e características técnicas do SBTVD	117
Tabela 20. Características e Diferenças USRP 1/N200/210	148
Tabela 21. Modelos da Placa Daughterboard [55]	153
Tabela 22. Características placa WBX	154
Tabela 23. Aplicações e Placas Daughterboard sugeridas	155

Tabela 24. LTE Requisitos	157
Tabela 25. Características Técnicas Gerador Rohde & Schwarz	165
Tabela 26. Características da Antena	168
Tabela 27. Probabilidade de Interferência para 700 MHz (QPSK)	195
Tabela 28. Probabilidade de Interferência para 700 MHz (16QAM)	195
Tabela 29. Probabilidade de Interferência para 700 MHz (64QAM)	196
Tabela 30. Probabilidade de Interferência em 702 MHz (QPSK)	197
Tabela 31. Probabilidade de Interferência em 702 MHz (16 QAM)	197
Tabela 32. Probabilidade de Interferência em 702 MHz (64 QAM)	198
Tabela 33. Probabilidade de Interferência em 705 MHz (QPSK)	199
Tabela 34. Probabilidade de Interferência em 705 MHz (16 QAM)	199
Tabela 35. Probabilidade de Interferência em 705 MHz (64 QAM)	199