

8 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos neste trabalho baseados nos cenários de simulação desenvolvidos no programa Seacat versão 4.0.1, considerando a aplicação de rádio cognitivo nas redes heterogêneas do sistema móvel LTE Release 10 na faixa de 700 MHz. São apresentadas também as conclusões sobre os resultados obtidos nos cenários de simulação e medição da coexistência entre os sistemas SBTVD e LTE Femtocell na banda de 700 MHz.

Os cenários de simulação desenvolvidos para análise da interferência intra-sistema LTE foram de dois tipos. O primeiro cenário foi definido com os usuários da Macro célula LTE e HeNBs operando na mesma frequência e o segundo cenário com usuários LTE e HeNBs operando em frequências adjacentes.

O primeiro cenário é formado por quatro femtocélulas HeNBs próximas à posição do usuário da macro célula LTE UE que pertence a um sistema móvel LTE com 10 MHz de banda operando em 700 MHz. O sistema interferente é formado pelas redes das femtocélulas HeNB localizadas em um ambiente de propagação fechado (*indoor*) e o LTE UE posicionado aleatoriamente dentro da área de cobertura da femtocélula.

O sistema vítima é formado pelo usuário da macro célula localizado aleatoriamente assumindo diferentes distâncias médias de separação entre 10 e 100 metros em relação à localização das quatro redes de femtocélulas HeNB.

Neste contexto pode-se concluir que a fim de satisfazer os requisitos do sistema móvel LTE de que o nível de sinais interferentes seja inferior a -95.5 dBm, a distância de separação mínima entre estes sistemas é igual ou superior a 10 metros com qualquer modulação.

Nesta distância este requisito só é atendido com o uso de rádio cognitivo. A esta distância a probabilidade de interferência não desejada é sempre superior a 15% mesmo com o uso de rádio cognitivo.

A uma distância de separação de 50 metros, o nível de $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$ fica abaixo de -95,5 dBm mas o de $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$ ainda não atende a este requisito. As probabilidades de interferência são ainda elevadas, embora menores do que no primeiro caso.

A uma distância de separação de 100 metros, no caso da avaliação do parâmetro de interferência $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$ usando rádio cognitivo, obtêm-se valores abaixo do limiar de interferências quando são utilizados os esquemas de modulação QPSK 2/3, QPSK 4/5, 16 QAM 1/2, 16 QAM 2/3, 16 QAM 4/5, 64 QAM 2/3, 64 QAM 3/4 e 64 QAM 4/5.

Nos cenários onde não se utilizou rádio cognitivo obtiveram-se resultados favoráveis apenas para as modulações 64 QAM 3/4 e 64 QAM 4/5. Ainda assim, neste contexto não se garantiu uma probabilidade de interferência de bloqueio menor que 1%.

A interferência de canal adjacente ($\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$) apresenta valores mais satisfatórios com probabilidade de interferência reduzida para 2.13% para uma modulação QPSK 1/5 assumindo a implementação de rádio cognitivo.

Para obter uma probabilidade de interferência de canal adjacente menor do que 1% em um cenário cognitivo, a distância média de separação entre o sistema vítima (LTE UE) e o sistema interferente (Femtocell HeNBs) deve ser igual de 200 metros, considerando qualquer dos esquemas de modulação. Quando a distância diminui para 10 metros de separação, a probabilidade de interferência aumenta até 27% para uma modulação QPSK 1/8 e de 17% para uma modulação 64 QAM 4/5, sendo este o pior cenário de coexistência.

O segundo cenário, com a LTE e HeNBs operando em diferentes frequências considera quatro femtocélulas HeNB com frequências escolhidas

aleatoriamente na faixa de 695 a 715 MHz interferindo no LTE UE operando em 700 MHz com largura de faixa do canal igual a 10 MHz.

Cada femtocélula HeNB foi configurada com diferentes valores de potência de transmissão 20, 17, 14 e 11 dBm. Além disso, cada rede da femtocélula foi localizada em um cenário fechado (*indoor*) com um usuário LTE posicionado aleatoriamente dentro da área de cobertura da femtocélula com diferentes distâncias médias de separação (10, 30, 50, 120 e 270 metros) em relação às quatro redes da femtocélula HeNB.

A uma distância de separação de 10 metros e utilizando rádio cognitivo, a interferência de canal adjacente é reduzida, mas os valores de probabilidade de interferência ainda são superiores a 1%. Além disso, a probabilidade de interferência de bloqueio apresenta altos valores mesmo quando é utilizado rádio cognitivo no cenário de simulação.

Para uma distância de separação de 30 metros a probabilidade de interferência $\mathbf{IRSS}_{\text{unwanted}}$ foi menor, obtendo-se melhores resultados quando utilizou-se rádio cognitivo. Além disso, o parâmetro $\mathbf{IRSS}_{\text{blocking}}$ ainda manteve altos valores de probabilidade de interferência, a pesar da utilização de rádio cognitivo.

Para 50 metros de separação utilizando a modulação 16 QAM 2/3 e modulações de ordem superior a probabilidade de interferência $\mathbf{IRSS}_{\text{blocking}}$, fornece resultados mais satisfatórios. Neste contexto, quando se usa rádio cognitivo na simulação a probabilidade de interferência de canal adjacente diminui apresentando valores próximos a 1% e satisfazendo ao requisito.

Para obter uma probabilidade de interferência de canal adjacente menor do que o 1%, a distância média de separação entre o sistema vítima (LTE UE) e o sistema interferente (Femtocell HeNB) deve ser superior a aproximadamente 120 metros para todos os esquemas de modulação. Quando a distância de separação se reduz a 10 metros de separação, a probabilidade de interferência aumenta até 19.9% para uma modulação QPSK 1/8 e de 13% para uma modulação 64 QAM 4/5, mesmo considerando o cenário de rádio cognitivo.

De modo general, a avaliação da interferência nas redes heterogêneas no Sistema Móvel LTE Release 10 considerando a aplicação de radio cognitivo, mostram resultados favoráveis com o uso desta tecnologia para reduzir a interferência *cross layer* na banda de 700 MHz.

O segundo caso de interferência analisado, considerou o cenário de coexistência do sistema móvel LTE Femtocell e o Sistema Brasileiro de TV Digital na faixa de 700 MHz. Tanto o cenário de simulação desenvolvido no programa Seacat 4.0.1 como a implementação experimental consideram um ambiente controlado fechado (*indoor*) sem a aplicação de rádio cognitivo. O principal objetivo destes cenários foi avaliar a interferência de canal adjacente produzida pela femtocélula LTE (USRP) no canal de televisão 51 Sistema Brasileiro de Televisão Digital operando em 695 MHz.

Os cenários de interferência consideram dois sistemas. O primeiro deles, o sistema vítima, é formado pelo Sistema de Televisão Digital Brasileiro, incluindo os equipamentos transmissor e receptor. No lado do transmissor, configurou-se o gerador de sinal sintonizado na frequência 695.142857 MHz, com uma largura de banda igual a 5.7 MHz. Em cada um dos cenários foram utilizados três tipos esquemas de modulação 64 QAM, 16 QAM e QPSK.

No lado do receptor, utilizou-se o decodificador do sinal de TV digital e uma televisão, com o objetivo de facilitar a avaliação subjetiva do efeito da interferência. Além disto, um analisador de espectro foi usado para permitir a avaliação de rendimento quantitativa do sinal de televisão de teste.

O transmissor interferente é a femtocélula LTE. Neste caso foi configurado o equipamento de rádio USRP, com a instalação do software livre GNU Radio/ GNU Radio Companion (GRC). O equipamento de rádio USRP versão 2 N210 operou na banda de 700 MHz e foi equipado com uma placa *daughterboard* tipo WBX.

O equipamento de rádio transmitiu um sinal OFDM com diferentes níveis de potência de transmissão e operando com diferentes frequências offset entre 700 até 705 MHz configuradas com um passo de 1 MHz. Este cenário de teste teve como objetivo estabelecer o raio de proteção entre os sistemas estudados para

satisfazer os requisitos exigidos pela ABNT e garantir o cenário de coexistência na banda de 700 MHz.

O cenário de avaliação de interferência consistiu em assumir diferentes distâncias de separação entre os sistemas vítima e interferente, de 2 a 25 metros. Além disto, diferentes níveis de potências de transmissão do sistema interferente foram variados até a potência máxima do equipamento (aproximadamente 15 – 16.5 dBm).

De acordo com o estabelecido pela ABNT, o principal requisito corresponde a um valor do BER menor ou igual a $2 * 10^{-4}$, que garante a correta recepção do sinal de TV Digital. Além disso, avaliou-se o MER, que deve apresentar valores de interferência intersímbolo mínimos de modo de conseguir uma boa qualidade do sinal de TV digital recebido. Foi ainda realizada a avaliação subjetiva do sinal de TV digital recebido a fim de interpretar as flutuações dos valores do BER e da MER associados a cada cenário de coexistência estudado.

O pior cenário de coexistência se apresenta com 2 metros de separação entre o sistema vítima (SBTVD) e o sistema interferente (LTE Femtocell) em 700 MHz, considerando a potência máxima do equipamento de 16.5 dBm. Neste cenário não foi possível receber o sinal de TV digital, independentemente do esquema de modulação utilizado (64 QAM, 16 QAM, QPSK). Este comportamento foi também corroborado pelos valores obtidos do BER e da MER, que não satisfazem com o exigido pela ABNT e pelos cenários de simulação que mostraram valores de probabilidade de interferência de canal adjacente muito elevados.

Neste mesmo cenário e utilizando a modulação QPSK, o cenário de coexistência mais satisfatório é obtido com uma potência máxima permissível da femtocélula LTE é de 2.16 dBm. Para a modulação 16 QAM, deve-se assumir uma potência máxima permissível de -2,9 dBm, mostrando congruência com os resultados obtidos no cenário de simulação com valores de probabilidade de interferência de canal adjacente próximos a zero. No caso de utilizar a modulação 64 QAM, a potência máxima permissível é igual a -12,26 dBm para garantir a recepção do sinal de TV digital.

Com 6 metros de separação em 700 MHz, as potências máximas permissíveis são de 7.54 dBm, -2.9 dBm e -7.81 dBm para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM, respectivamente. Neste contexto, a probabilidade de interferência de canal adjacente em para todas as modulações foi menor do que 1%.

Em 702 MHz e com uma distância de separação de 12 metros, a modulação QPSK foi menos sensível à interferência permitindo utilizar a potência máxima do USRP de 16.5 dBm. Neste cenário, os valores obtidos do BER próxima a zero e da MER de 14.95 dB satisfizeram com o valor requerido. No cenário de simulação obtém-se resultados coerentes, sendo a probabilidade de interferência de canal adjacente igual a 0.8%. Para as modulações 16 QAM e 64 QAM as potências máximas permissíveis da femtocélula LTE são de 11.9 dBm e de 7.54 dBm para garantir a recepção do sinal de TV digital. Estes resultados têm congruência com as simulações, que fornecem valores de probabilidade de interferência de canal adjacente menores que 1%.

Com 18 metros de separação, para a modulação 16 QAM obtém-se valores mais satisfatórios quando o interferente opera em 702 MHz assumindo a potência máxima permissível do USRP (16.5 dBm), obtendo-se valores do BER de $1.72 * 10^{-5}$ e de 18.07 dB da MER, que garantem a recepção do sinal de TV digital.

No cenário de simulação, o valor de probabilidade de interferência de canal adjacente ($iRSS_{unwanted}$) tem congruência com estes resultados, sendo igual a 0.23 % em 702 MHz. Neste contexto, utilizando a modulação 64 QAM a potência máxima permissível da femtocélula LTE deve ser igual a 11.9 dBm tendo coerência com o cenário de simulação que apresenta uma probabilidade de interferência $iRSS_{unwanted}$ de 0.13 %.

Para distâncias de separação maiores que 18 metros, os resultados das simulações desenvolvidas no simulador indicaram que a probabilidade de interferência de canal adjacente ($iRSS_{unwanted}$) é consideravelmente reduzida para 1%. No cenário de medição, para as modulações QPSK e 16 QAM pode-se utilizar a potência máxima da USRP (>16.5 dBm) mas, para a modulação 64

QAM deve se utilizar uma potência de 11.9 dBm para garantir a recepção do sinal de TV digital.

Uma vez analisados todos os cenários estudados de avaliação de coexistência entre o Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD) e o Sistema LTE Femtocell USRP na banda de frequência de 700 MHz, pode-se concluir que, o melhor cenário para garantir a correta recepção do sinal de TV digital no canal 51 operando em 695 MHz, obteve-se quando o interferente (LTE Femtocell USRP) esta operando em 705 MHz com uma distancia de separação de 18 metros. Neste caso, independentemente do esquema de modulação configurado no sistema vítima e assumindo a potência máxima da femtocélula (>16.5 dBm), a probabilidade de interferência de canal adjacente obtida no cenário de simulação é menor que 1%. Este valor tem congruência com os resultados obtidos nas medições, já que tanto a MER como a BER apresentam menores níveis de interferência de canal adjacente, garantindo desta maneira a coexistência destas duas tecnologias e, portanto, a correta recepção do sinal de TV digital na faixa de 700 MHz satisfazendo assim com o requisito exigido pela ABNT.

8.1. Trabalhos e Desenvolvimentos Futuros

A seguir são apresentados os trabalhos e desenvolvimentos futuros que podem surgir a partir desta dissertação e que se baseiam principalmente na utilização do equipamento de rádio USRP e do simulador Seamcat na sua versão 4.0.1.

No site oficial da USRP ETTUS têm-se diversos tutoriais e exemplos de utilização no manejo deste equipamento e do GNU-GRC. Estes tutoriais são de grande ajuda para entender mais um pouco sobre o uso do USRP e do funcionamento do simulador.

Por ser o GNU Radio um recurso de acesso livre (*open source*) e a USRP um equipamento de custo acessível têm-se uma quantidade de informação em blogs, e fóruns que compartilham informação sobre a utilização do equipamento e de diversos projetos de estudo que se encontram em andamento.

Um dos programas de pesquisa mais importantes, conhece-se como o projeto CGRAN (*The Comprehensive GNU Radio Archive Network*). O projeto CGRAN é um repositório de acesso livre para aplicações de GNU Radio que fornece um repositório de aplicações para os usuários a fim de desenvolver ou compartilhar novas aplicações, provendo ademais, de uma completa documentação e acesso dos projetos disponíveis no site.

Entre os principais projetos disponíveis no site da CGRAN sugerem-se os seguintes projetos de pesquisa:

- ***Dynamic Spectrum Sharing.***- Corresponde a um sistema de compartilhamento de espectro dinâmico baseado na técnica de acesso conhecida como OFDMA.
- ***Wi-fi Localization.***- Corresponde a um software que executa localização sem fio utilizando o tempo de chegada e as medições de intensidade do sinal recebido.
- ***Open Relaying Demonstrator.***- Uma plataforma que consiste na avaliação de estratégias de cooperação Relaying. Este projeto, tem sido desenvolvido pela Universidade Linköping (Suécia) como parte do seu projeto RAMCOORAN (*Resource Allocation and Multi-node Cooperation in Radio Access Networks*).
- ***FOI-MIMO.***- Projeto de pesquisa baseado na implementação das técnicas MIMO e SISO. Este projeto foi desenvolvido para demonstrar os efeitos das técnicas MIMO em comparação com sistema SISO.
- ***OPEN LTE.***- Projeto baseado na implementação das especificações da capa física do 3GPP LTE.
- ***Funcube Dongle Source.***- Consiste em um pacote que contém o bloco para ser implementado no programa GRC. O *Funcube Dongle Source* é um receptor SDR em um USB que cobre a faixa de frequência entre 64 MHz até 1.7 GHz.
- ***Spectral Estimation Toolbox.***- O objetivo deste projeto é fornecer a GNU Radio de técnicas de estimação espectral. Este projeto inclui uma série de algoritmos como os métodos de Welch, Burg, Thompson dentre outros.

- **Compressed Sensing Toolbox.-** O projeto tenta fornecer à plataforma GNU Radio com algoritmos de sensoriamento baseado em *Compressed Sensing* (CS) para aplicações de Radio Cognitivo utilizando um *trade-off* entre a razão sinal ruído e a taxa de amostragem.
- **Architecture Latency Measurements.-** Projeto que tem como objetivo realizar diversas medições das latências existentes entre GNU Radio e o USRP.
- **GNSS-SDR.-** É um software de acesso livre para recepção e processamento do sinal dos sistemas de navegação de satélite, *Global Navigation Satellite System* (GNSS)

Além disso, são sugeridas as seguintes abordagens e tópicos de pesquisa:

- Desenvolver um setup de medição aplicando a tecnologia de rádio cognitivo baseado na utilização e configuração do equipamento USRP.
- Desenvolver outras aplicações baseadas na utilização da USRP e do programa GNU Radio e GRC.
- Implementar um cenário de teste utilizando rádio cognitivo baseado no *setup* de medição entre o Sistema Brasileiro de TV Digital e o Sistema Móvel LTE Macro célula.
- Considerar a utilização do simulador Seamcat versão 4.0.1 a fim de avaliar a implementação do módulo de Rádio Cognitivo e do algoritmo de Sensoriamento Espectral no programa e comparar estes resultados com os obtidos em um cenário de medição.
- Considerar a utilização e implementação dos projetos disponíveis no site da CGRAN a fim de definir a partir destes projetos um cenário de medição.