Trabalho de Conclusão de Curso

Gerenciando o Espectro em Redes 5G: Mitigação de Interferência com Redes Cognitivas

Bruno Berbert de Carvalho

JUIZ DE FORA

AGOSTO, 2021

Gerenciando o Espectro em Redes 5G: Mitigação de Interferência com Redes Cognitivas

Bruno Berbert de Carvalho

Universidade Federal de Juiz de Fora

Instituto de Ciências Exatas

Departamento de Ciência da Computação

Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Eduardo Pagani Julio

JUIZ DE FORA

AGOSTO, 2021

Gerenciando o Espectro em Redes 5G: Mitigação de Interferência com Redes Cognitivas

Bruno Berbert de Carvalho

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Eduardo Pagani Julio
Doutor em Computação

Mario Antônio Ribeiro Dantas
Doutor em Computação

Marcelo Ferreira Moreno
Doutor em Informática

JUIZ DE FORA
25 DE AGOSTO, 2021

Resumo

Os avanços de tecnologias como IoT (Internet of Things, ou Internet das Coisas) e redes 5G trazem alguns desafios associados. Por parte de IoT, cada vez mais aparelhos e dispositivos serão conectados, principalmente às redes residenciais, comerciais e industriais. Portanto, espera-se uma densidade de dispositivos cada vez maior em áreas urbanas, o que pode causar problemas de interferência entre os dispositivos. A tecnologia de redes móveis 5G possui padrões e especificações que suportam a operação de dispositivos de IoT. Porém, devido às limitações de uso do espectro eletromagnético, mecanismos de gestão de acesso às faixas de frequência eletromagnética são necessários para comportar o funcionamento de redes com alta densidade de dispositivos, bem como controlar a interferência esperada entre eles. O conceito de Redes Cognitivas surge para auxiliar no controle de acesso às frequências eletromagnéticas, permitindo que usuários não licenciados acessem faixas de frequência licenciadas de forma oportuna. O objetivo deste trabalho é comparar diferentes mecanismos de mitigação de interferência utilizando o conceito de Redes Cognitivas, no cenário de IoT e redes 5G. Simulações foram realizadas em diferentes cenários de redes, considerando diferentes tipos de ambientes e números de dispositivos. Os resultados foram comparados e analisados em busca do entendimento do comportamento da interferência no ambiente proposto.

Palavras-chave: 5G, Redes Móveis, Redes Cognitivas, Compartilhamento de Espectro, IoT, Internet das Coisas.

Abstract

The advances of technologies such as IoT (Internet of Things) and 5G mobile network, are followed by some associated challenges. With IoT, more and more devices and machines will be connected, mainly to residential, commercial and industrial networks. Therefore, an increasing device density is expected in urban areas, which can cause interference problems between those devices. The 5G mobile network technology has standards and specifications that supports the operation of IoT devices. However, due to limitations in the use of the electromagnetic spectrum, mechanisms for managing access to the electromagnetic frequency bands are necessary to support the operation of networks with high density of devices, as well as to control the expected interference between them. The concept of Cognitive Networks is useful to help control access to electromagnetic frequencies, allowing unlicensed users to access licensed frequency bands in a timely manner. The objective of this project is to compare different interference mitigation mechanisms using the concept of Cognitive Networks, in the scenario of IoT and 5G networks. Simulations will be performed in different network scenarios, and the results will be compared and analyzed in order to understand the interference behavior in the proposed environment.

Keywords: 5G, Mobile Network, Cognitive Network, Spectrum Sharing, IoT, Internet of Things.

Conteúdo

Lista de Figuras **5**

Lista de Tabelas **6**

Lista de Abreviações **7**

1 Introdução **8**
1.1 Problema . . . 8
1.2 Justificativa . . . 9
1.3 Objetivos . . . 9

2 Revisão Bibliográfica **11**
2.1 Redes Móveis . . . 11
2.2 Redes 5G . . . 12
2.2.1 Femtocell . . . 12
2.3 Internet das Coisas . . . 13
2.4 Redes Cognitivas . . . 13
2.5 Mitigação de Interferência em Redes Cognitivas . . . 15
2.6 Trabalhos Relacionados . . . 15

3 Estudo de Caso **17**
3.1 Ambiente de Simulação . . . 17
3.1.1 Componentes da Arquitetura . . . 18
3.1.2 Funcionamento do CM . . . 18
3.1.3 Adaptação da Arquitetura para Redes Móveis . . . 21
3.2 Algoritmos Simulados . . . 22
3.2.1 Algoritmo SCPC . . . 22
3.2.2 Algoritmo UserCPC . . . 23
3.2.3 Algoritmo MinCPC . . . 24
3.2.4 Algoritmo HybridCPC . . . 24
3.3 Cenários Propostos . . . 25
3.3.1 Cenários *Indoor* . . . 25
3.3.2 Cenários *Outdoor* . . . 27
3.4 Detalhes da Simulação . . . 29

4 Resultados **31**
4.1 Interferência . . . 31
4.1.1 Cenário 1 . . . 32
4.1.2 Cenário 2 . . . 33
4.1.3 Comparativo dos Cenários *Indoor* . . . 34
4.1.4 Cenário 3 (*Outdoor*) . . . 34
4.2 SIR . . . 36
4.2.1 Cenário 1 . . . 36
4.2.2 Cenário 2 . . . 37
4.2.3 Cenário 3 . . . 38

4.3 Reassociações 39

5 Conclusão e Trabalhos Futuros **40**

Referências Bibliográficas **42**

Lista de Figuras

2.1 Exemplo de Arquitetura de Redes Cognitivas. (Akyildiz et al., 2006) . . . 14

3.1 Arquitetura do Padrão IEEE 802.19.1. (IEEE, 2014) 17
3.2 Diagrama de Mudança de Estado. (Julio, 2016) 20
3.3 Diagrama de Funcionamento do Algoritmo SCPC. (Julio, 2016) 23
3.4 Diagrama de Funcionamento do Algoritmo UserCPC. (Julio, 2016) 23
3.5 Diagrama de Funcionamento do Algoritmo HybridCPC. (Julio, 2016) . . . 25

4.1 Média da Interferência Total - Cenário 1 32
4.2 Média da Interferência Total - Cenário 2 33
4.3 Comparativo de Interferência entre os Cenários 1 e 2 (dBm) 34
4.4 Média da Interferência Total - Cenário 3 35
4.5 Média do SIR - Cenário 1 36
4.6 Média do SIR - Cenário 2 37
4.7 Média do SIR - Cenário 3 38
4.8 Mudanças Opcionais de Canal - Total de Clientes - Cenário 1 39

Lista de Tabelas

3.1 Cenário 1 26
3.2 Cenário 2 27
3.3 Cenário 3 (*Outdoor*) 28

Lista de Abreviações

DCC	Departamento de Ciência da Computação
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
5G	Quinta Geração de Redes Móveis
4G	Quarta Geração de Redes Móveis
IoT	*Internet of Things* (Internet das Coisas)
RC	Redes Cognitivas
mMTC	*Massive Machine-Type Communication*
AP	*Acess Point*
BS	*Base Station*
CDIS	*Coexistence Discovery and Information Server*
CE	*Coexistence Enabler*
CM	*Coexistence Manager*
DSATUR	*Degree of Saturation*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
DSATUR	*Degree of Saturation*
SIR	*Signal-to-Interference Ratio*
TVWS	*TV White Space*
WSO	*White Space Object*
E-CRN	*Enhanced Cognitive Radio Networks*
NOMA	*Non-Orthogonal Multiple Access*

1 Introdução

A quinta geração de redes móveis, o 5G, surge como uma evolução da tecnologia 4G (quarta geração), trazendo avanços significativos quando comparada às tecnologias anteriores. Dentre as melhorias em relação ao 4G, conforme mostrado por Ni et al. (2018), a tecnologia 5G prevê um aumento de até 1000 vezes no volume de dados por unidade de área, melhoria de 10 a 100 vezes em velocidade de conexão e densidade de dispositivos, e latências abaixo dos 5ms. Outro benefício da nova geração de redes móveis é sua capacidade de operar em diversas camadas, seja em faixas de frequência mais baixas (como as faixas sub 6GHz), até faixas mais altas, as chamadas *millimeter waves* (faixa de ondas milimétricas), operando em frequências que variam de 28 a 100GHz.

Acompanhando as novas possibilidades proporcionadas pelo 5G, o novo paradigma de comunicação, a Internet das Coisas (IoT, ou *Internet of Things*), pretende tirar proveito da robustez de recursos oferecidos pela quinta geração de redes móveis. O IoT emerge como um novo modelo de comunicação entre pessoas e objetos, buscando uma operação inteligente, preditiva e automatizada.

1.1 Problema

Por ser uma tecnologia de rede sem fio, o 5G requer o uso de um recurso limitado e escasso: o espectro eletromagnético. Portanto, o desenvolvimento da quinta geração de redes móveis é acompanhado da necessidade de se elaborar e se beneficiar de outras tecnologias que dão apoio à exploração do espectro de radiofrequências. As Redes Cognitivas se mostram uma candidata plausível para suprir esta demanda (Hong et al., 2014; Zhang et al., 2018; Liu et al., 2017), uma vez que tal tecnologia permite o acesso oportuno e eficiente às faixas de frequências eletromagnéticas.

Além disso, em cenários onde há uma alta densidade de dispositivos conectados à rede (como por exemplo, ambientes de IoT massivos), são esperados problemas de interferência entre estes aparelhos (Wang et al., 2016). Portanto, mecanismos de tratamento

de interferência são necessários para garantir um bom funcionamento de aplicações que utilizam a tecnologia de rede 5G.

1.2 Justificativa

Como aponta Miraz et al. (2018), há um avanço gradual na implementação de dispositivos de IoT, e espera-se que esta tecnologia esteja cada vez mais presente em nosso dia a dia. O 5G oferece recursos que permitem uma comunicação eficiente para dispositivos IoT, e em sua especificação, possui padrões de funcionamento para suportar aplicações que utilizam Internet das Coisas, como por exemplo, mMTC (*massive machine-type communication*, ou IoT em larga escala), mostrado por Ni et al. (2018).

Dentre os cenários onde a concepção de Internet das Coisas está presente, pode-se destacar o uso doméstico (com o conceito de automação residencial), industrial (automação e controle de fábricas e indústrias) e urbano (com cidades inteligentes e carros autônomos). Portanto, a carência da elaboração de mecanismos de tratamento de interferência neste tipo de aplicação é justificada pela importância da eficiência na comunicação entre os dispositivos de IoT, que muitas vezes são utilizados em aplicações com baixa tolerância à falhas.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o entendimento do regime de interferência no contexto de Redes 5G que utilizam a tecnologia de Redes Cognitivas. Desta forma, busca-se entender como as variações dos diferentes parâmetros da rede (número de estações base, número de usuários, número de vizinhos e frequência de transmissão) afetam a qualidade do sinal da rede em diferentes tipos de ambientes.

Para tal, alguns objetivos específicos são necessários:

- Adaptar o contexto de Redes 5G à arquitetura de Redes Cognitivas e seus diferentes componentes lógicos;
- Propor diferentes cenários de funcionamento de Redes 5G Cognitivas, em um am-

biente de simulação no contexto de Internet das Coisas;

- Simular a utilização de diferentes mecanismos e algoritmos de controle de interferência entre dispositivos nos cenários propostos;

- Analisar os resultados das simulações em termos de interferência geral da rede, razão sinal-interferência, e número de reassociações de usuários.

Este trabalho surge como uma adaptação de Julio (2016) para o ambiente de redes móveis, 5G e Internet das Coisas.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo é reservado para apresentação dos principais temas envolvendo este projeto. Os conceitos fundamentais sobre redes móveis, redes 5G, Internet das Coisas e Redes Cognitivas serão abordados, bem como o papel da interferência entre dispositivos nestes tipos de rede.

2.1 Redes Móveis

As primeiras tecnologias envolvendo redes móveis celulares foram introduzidas no início da década de 1970. A sua primeira geração padronizada, denominada 1G, foi lançada próxima ao ano de 1980. Seu principal foco foi permitir a comunicação por voz entre aparelhos celulares, com tecnologia sem fio, ainda que sem muita segurança e com limitações de alcance, operando de forma analógica (Dekleva et al., 2007).

A segunda geração de redes móveis (2G), introduzida em 1990, foi marcada pela migração para um sistema digital, com melhor qualidade de voz nas ligações, mais segurança, introdução do envio de SMS (*Short Messaging Service*, ou serviço de envio de mensagens curtas) e o primeiro contato com acesso móvel à Internet, ainda que de forma limitada e lenta.

Posteriormente, o foco da terceira e quarta geração (3G e 4G), lançadas em meados 2001 e 2010, respectivamente, foi o aumento gradativo na capacidade de lidar com dados, oferecendo velocidades de conexão à Internet cada vez maiores (até 2Mbps no 3G e 1Gbps no 4G). Além disso, houve um aumento significativo de cobertura destas redes, bem como melhorias na segurança e redução de latência, especialmente no 4G (Ezhilarasan et al., 2017).

2.2 Redes 5G

Surgindo como um avanço em relação ao 4G, a nova geração de redes móveis, o 5G, tem como principal objetivo o aumento na capacidade da rede, em diversos sentidos, bem como a heterogeneidade do seu funcionamento, permitindo sua utilização em diferentes cenários e dispositivos.

A tecnologia 5G especifica um aumento significativo em velocidades de conexão à Internet, podendo chegar a 100 vezes o alcançado pela tecnologia 4G, ou seja, 100Gbps. Além disso, há algumas melhorias voltadas para o suporte à IoT e comunicação entre máquinas, como o aumento na capacidade do número de dispositivos por unidade de área, chegando a marca de até 100 vezes o que a tecnologia 4G oferece. Além disso, o 5G oferece conexões com latências de até 1ms e redução do consumo de energia (Caso et al., 2017).

O 5G também permite o acesso às novas faixas de frequência. A tecnologia é capaz de operar tanto em frequências mais baixas (sub 6GHz) quanto em frequências mais altas (20 à 100GHz), as chamadas *milimiter waves*, ou faixa de ondas milimétricas, que apesar de proporcionar um alcance reduzido (Teixeira et al., 2019), possibilita a transmissão de dados com uma velocidade significativamente maior.

2.2.1 Femtocell

Buscando atender as demandas de alta densidade de conexões, operação em altas frequências e baixo consumo de energia do 5G, temos a presença das micro células, ou *Femtocell's*. As *Femtocell's* são pequenas células com baixo consumo de energia e baixo custo, e que apesar de possuírem um curto alcance, permitem a criação de redes domésticas e empresariais conectando diversos dispositivos sem fio num raio de 10 a 25 metros (Hindia et al., 2016). Desta forma, com a utilização de pontos de acesso que utilizam *Femtocell's*, é possível se obter uma rede com instalações de baixo custo e alta capacidade de conexão.

Femtocell's tem a capacidade de operar se conectando às macro células (ou estações bases celulares), bem como com redes cabeadas e fibra ótica. São capazes também de funcionar em diversas faixas do espectro eletromagnético, utilizando a tecnologia de Redes Cognitivas, que será abordada na Seção 2.4 (Gur et al., 2010).

2.3 Internet das Coisas

Beneficiando-se das melhorias oferecidas pelo 5G, o conceito de IoT poderá se mostrar cada vez mais presente em nosso dia a dia, como aponta Hindia et al. (2016).

A concepção de IoT se dá por uma extensão do conceito de Internet. É um paradigma de comunicação entre pessoas e máquinas, bem como entre máquinas e máquinas, porém, com uma operação mais inteligente. Segundo Zheng et al. (2011), é uma solução com capacidade de estender e aprimorar o funcionamento de mecanismos de sensoreamento, comunicação, computação, processamento de informação e controle de tecnologias.

Dispositivos que antes não eram comuns em ambientes de rede e Internet, como dispositivos e aparelhos domésticos, máquinas industriais e até mesmo veículos, começam a ser adaptados para operar de maneira inteligente, preditiva e conectada.

Portanto, com uma maior gama de aparelhos e dispositivos conectados à Internet, há um aumento considerável na densidade de conexões nas redes sem fio, o que demanda novas tecnologias que suportem a operação e conexão destes dispositivos, como é o caso das *Femtocell's*, abordadas na Seção 2.2.1.

2.4 Redes Cognitivas

O 5G é uma rede heterogênea e sem fio, e portanto, requer a utilização do espectro de frequências de rádio em seus diferentes modos de operação. Apesar de operar como rede de Telefonia Móvel, utilizando frequências licenciadas do espectro, a tecnologia 5G também pode ser utilizada em redes privadas, e desta forma, surge a necessidade de operação em faixas de frequências não licenciadas. Este cenário de uso demanda algum tipo de coordenação de acesso ao espectro eletromagnético.

A tecnologia de Redes Cognitivas se mostra uma boa candidata para suprir esta necessidade (Julio, 2016). Este tipo de rede permite o compartilhamento do espectro eletromagnético, permitindo que um usuário não licenciado (usuário secundário) acesse determinadas faixas de frequência quando o usuário primário (licenciado) não se mostra ativo nesta faixa. A Figura 2.1 ilustra a arquitetura de uma Rede Cognitiva (Akyildiz et al., 2006).

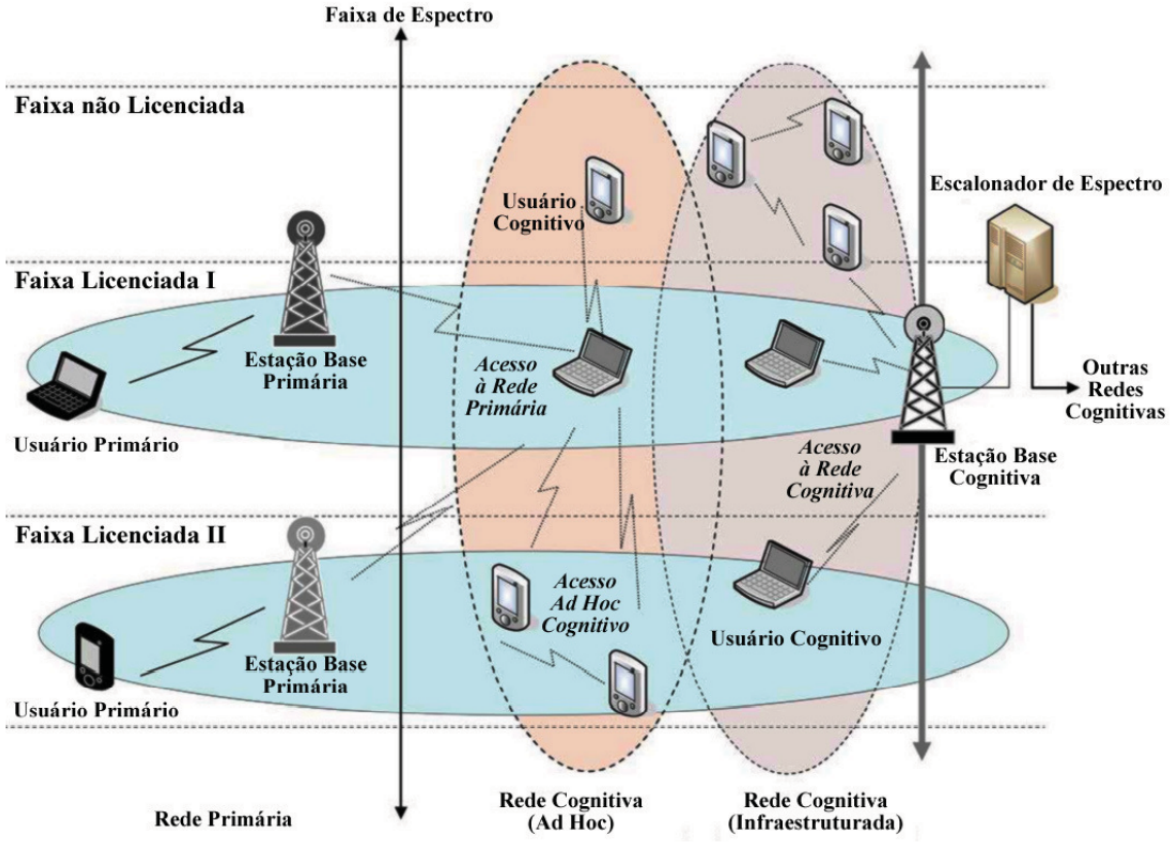


Figura 2.1: Exemplo de Arquitetura de Redes Cognitivas. (Akyildiz et al., 2006)

Observa-se que a rede primária é voltada para utilização dos usuários primários, ou seja, aqueles que possuem acesso prioritário em determinadas faixas de frequência (faixas licenciadas). Já as Redes Cognitivas compreendem os usuários secundários (*Secondary User*, ou simplesmente SU) ou cognitivos. Estes realizam o acesso oportuno às Faixas Licenciadas e Não Licenciadas.

O funcionamento das Redes Cognitivas compreende a realização de diferentes processos (Hu et al., 2018). (1) O sensoreamento do espectro, onde é realizada a identificação da configuração atual da rede e das atividades do usuário primário. (2) A alocação do espectro, na qual são definidas as estratégias e mecanismos para alocar os usuários secundários em determinadas faixas de frequência. (3) Acesso e não interferência ao espectro, onde são estipuladas as configurações necessárias da rede, dependendo da atividade do usuário primário, para que os usuários secundários mudem de configuração a fim de não interferir na operação do usuário licenciado.

2.5 Mitigação de Interferência em Redes Cognitivas

A busca pela redução da interferência em redes sem fio é amplamente estudada (Lee et al., 2010; Lv et al., 2018; Noura et al., 2016).

Em cenários de redes sem fio com alta densidade de aparelhos, é esperado que estes dispositivos causem interferência entre si (Noura et al., 2016; Rebato et al., 2016). Sendo assim, em ambientes onde há a utilização da tecnologia 5G voltada para o uso em IoT, também há a demanda de utilização de mecanismos que buscam a diminuição e mitigação de interferência entre os dispositivos.

A utilização de técnicas para mitigação de interferência com Redes Cognitivas já é bastante difundida (Julio, 2016), e apresenta melhorias significativas na relação sinal-interferência da rede.

Como mostra Teixeira et al. (2019), diversos fatores afetam o regime de interferência em redes 5G, como altura das antenas de transmissão (estações bases), o número de estações base, número de usuários, potência de transmissão, dentre outros. A variação destes parâmetros afeta diretamente na razão sinal-interferência da rede, e portanto, exigem uma certa cautela em sua manipulação.

2.6 Trabalhos Relacionados

A associação do contexto de Redes 5G e Redes Cognitivas é um tema de pesquisa recorrente, ainda que na maioria dos casos não esteja relacionada diretamente com mitigação de interferência.

Em Zhang et al. (2018), o 5G é associado à tecnologia E-CRN (*Enhanced Cognitive Radio Networks*, ou Redes Aprimoradas de Rádio Cognitivo), baseadas em compartilhamento e agregação do espectro. No contexto deste trabalho, os usuários primários são ambientados nas bandas licenciadas de sistemas de TV, bem como em bandas não licenciadas como WiFi e sistemas Industriais, Científicos e Médicos. O trabalho mostra que com a utilização de um algoritmo que utiliza a técnica de *Water-Filling* (encher de água) é possível aprimorar significativamente a performance da rede em termos de taxa de transferência de dados, probabilidade de interrupção e eficiência espectral.

A associação de Redes Cognitivas com a tecnologia NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*, ou Acesso Múltiplo Não-Ortogonal) no contexto de Redes 5G é proposta por Lv et al. (2018). Nesta abordagem, a técnica de NOMA é utilizada para estimular o compartilhamento do espectro por múltiplos usuários em um único bloco de recursos através da multiplexação de domínio de potência. O autor propõe diferentes abordagens da utilização da tecnologia NOMA, com e sem a associação ao conceito de Redes Cognitivas. Através das análises e simulações, observou-se a maior eficiência da abordagem cooperativa de NOMA Cognitiva.

Por fim, em Tseng et al. (2015) o conceito de Redes 5G Cognitivas foi explorado em cenários ultra densos de micro células, buscando o aumento da taxa de transferência e da razão sinal-interferência-ruído da rede. Algoritmos genéticos e baseados em grafos foram utilizados para redução de interferência e ruído. Observou-se a melhora significativa nos parâmetros esperados, principalmente com a utilização de Algoritmos Genéticos.

3 Estudo de Caso

Visando o estudo do regime de interferência em redes 5G, este capítulo é reservado para a apresentação do ambiente de simulação de redes cognitivas (*Cognetsim*), os cenários de IOT propostos, e por fim, os algoritmos de controle de potência e seleção de canais utilizados para gerenciar a coexistência entre os usuários primários e secundários.

3.1 Ambiente de Simulação

O Software de simulação utilizado neste trabalho é o *Cognetsim* (Julio, 2016), implementado na linguagem Java, utilizando a arquitetura do padrão IEEE 802.19.1 (IEEE, 2014), que propõe a estruturação de coexistência em redes sem fio. A figura 3.1 representa a arquitetura do padrão IEEE 802.19.1 utilizada neste trabalho.

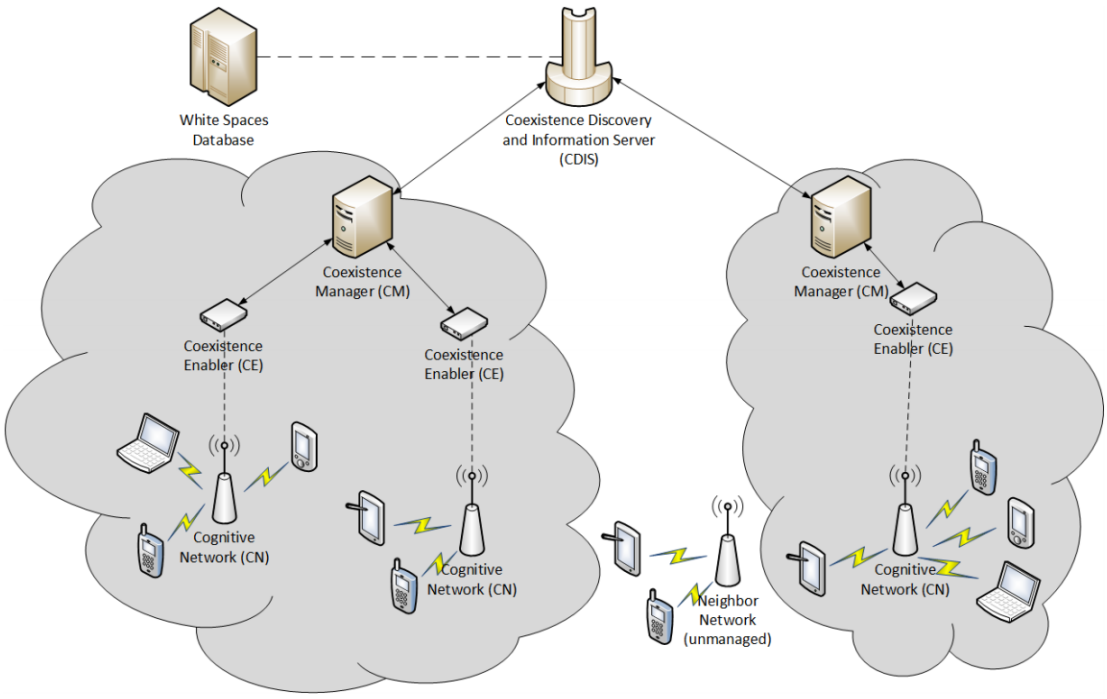


Figura 3.1: Arquitetura do Padrão IEEE 802.19.1. (IEEE, 2014)

As cinco entidades lógicas da arquitetura IEEE 802.19.1 são: o Gerenciador de Coexistência (CM, ou *Coexistence Manager*), o Facilitador de Coexistência (CE, ou *Co-*

existence Enabler), o Servidor de Informações e Descoberta de Coexistência (CDIS, ou *Coexistence Discovery and Information Server*), o Banco de Dados de Espaços em Branco (WSD, ou White Spaces Database) e a Rede Cognitiva (CN, ou Cognitive Network).

3.1.1 Componentes da Arquitetura

No contexto deste trabalho, o CE (*Coexistence Enabler*) se faz necessário para garantir o funcionamento e coexistência de cada usuário secundário da rede. Ele representa uma estação base secundária (*Base Station*, ou BS) que acessa de forma oportunista os canais e faixas de frequência licenciadas.

Desta forma, a rede é composta por um conjunto de CE's, que por sua vez são gerenciados e coordenados por um CM (*Coexistence Manager*). Neste trabalho, o CM é o principal dispositivo de gerência da rede cognitiva. Ele é responsável por coletar informações de cada CE, bem como os dados de disponibilidade do espectro provenientes do CDIS (*Coexistence Discovery and Information Server*). O CM tem o papel de definir as configurações e parâmetros necessários para garantir a coexistência entre os usuários da rede. Por fim, o CM coordena o funcionamento de cada CE através de solicitações de ajustes e reconfigurações nestes dispositivos.

O conjunto de informações gerais sobre a rede, ou seja, os parâmetros de operação dos CE's e os canais utilizados pelos usuários primários são armazenados no CDIS, que é o servidor frequentemente acessado pelo CM.

3.1.2 Funcionamento do CM

O Algoritmo 1 representa o funcionamento do Gerenciador de Coexistência, e pode ser visto detalhes em Julio (2016).

Algorithm 1 Funcionamento do CM

0: 1: Busca informações de canais do CDIS;
0: 2: Busca informações de vizinhança dos CEs;
0: 3: Classifica os canais;
0: 4: Executa, em conjunto, a seleção de canais e o controle de potência em todos os CEs;
0: 5: Reconfigura os CEs que tiveram seus parâmetros modificados para manter a coexistência;
0: 6: Reporta ao CDIS as decisões tomadas. =0

Conforme explicado brevemente na Subseção 3.1.1, o papel do CM é garantir a coexistência na rede, buscando gerenciar a operação dos usuários secundários. Para isso, utiliza as informações obtidas através do CDIS e dos CE's e seus vizinhos (linhas 1 e 2). Posteriormente, o CM classifica os estados de cada canal da rede, para que posteriormente utilize algum mecanismo de seleção de canal e controle de potência para realizar a atribuição dos novos canais dos CE's, enviando-os as informações de reconfiguração. Após o processo de coleta de informações, execução do algoritmo e reconfiguração dos CE's, o CM reporta ao CDIS o novo estado geral da rede.

Conforme visto na linha 3 do Algoritmo 1, os canais da arquitetura possuem diferentes classificações, e desta forma, o CM é capaz de gerenciar quais canais podem ser atribuídos aos CE's, mantendo assim, a coexistência da rede. Os canais são classificados como:

- ***Unclassified***: canal ainda não classificado;
- ***Available***: disponível para uso;
- ***Protected***: protegido por atividade do usuário primário;
- ***Restricted***: restrito para operação de equipamentos com baixa potência;
- ***Operating***: canal em uso por um único CE;
- ***Coexistent***: canal compartilhado por mais de um CE;

As possíveis mudanças de estado dos canais podem ser vistas no diagrama da Imagem 3.2.

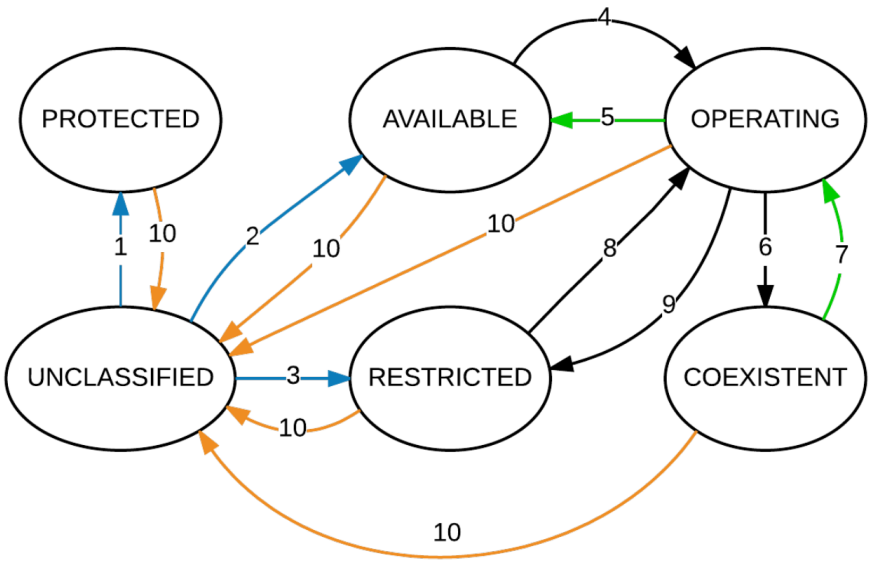


Figura 3.2: Diagrama de Mudança de Estado. (Julio, 2016)

Dentre as mudanças de estado de canais, pode-se destacar:

- ***Unclassified*** → ***Protected***: Usuário primário inicia a operação no canal, impossibilitando seu uso pelo usuário secundário;
- ***Unclassified*** → ***Available***: Canal se torna disponível para uso secundário;
- ***Available*** → ***Operating***: CE passa a operar em um canal anteriormente disponível;
- ***Operating*** → ***Coexistent***: Canal que anteriormente comportava apenas um CE, passa a ser utilizado por mais de um CE;
- ***Coexistent*** → ***Operating***: Canal que operava em coexistência, passa a ser utilizado por apenas um CE;
- ***Operating*** → ***Available***: Canal deixa de ser utilizado, tornando-se disponível.
- ***Protected*** → ***Unclassified***: Mudança de disponibilidade dos canais, a depender da presença do usuário primário;

Com o processo de mudança de disponibilidade de canais, até que seja realizada atribuição dos estados, todos eles admitem a transição para o estado *Unclassified*, como

pode ser observado pela transição 10 do diagrama da Imagem 3.2. As demais mudanças de estado estão relacionadas ao uso de dispositivos de baixa potência, e portanto, as transições do estado *Restricted*.

Durante o procedimento de seleção de canais e controle de potência (linha 4 do Algoritmo 1), o CM tem a capacidade de utilizar diferentes estratégias para realizar a atribuição de canais para os CE's. Na Seção a seguir, serão abordados os diferentes mecanismos utilizados pelo CM, bem como suas respectivas finalidades.

3.1.3 Adaptação da Arquitetura para Redes Móveis

As propostas de cenários de simulação desenvolvidas na Seção 3.3 representam a aplicação de uma rede 5G privada. Neste modelo, considera-se um conjunto de estações base *Femtocell* que se conectam à operadora de redes móveis através da tecnologia 5G, e operam como um replicador de sinal para um ambiente comercial, residencial ou industrial. Ou seja, as estações *Femtocell* se conectam às macrocélulas de um provedor 5G e replicam o sinal localmente em um ambiente interno, melhorando o sinal obtido pelos usuários do local.

No contexto deste trabalho, os componentes da arquitetura IEEE 802.19.1 assumem atribuições específicas com os dispositivos que compõe o cenário de redes móveis 5G.

O CM pode ser associado às macrocélulas da operadora que fornece o sinal 5G. Desta forma, fica a cargo da operadora de redes móveis a gestão e coordenação dos dispositivos *Femtocell* (CE's) instalados em seus clientes.

Por sua vez, o CDIS pode ser implementado de diferentes formas. Uma implementação coerente poderia ser proposta através de um servidor com acesso colaborativo entre as diferentes operadoras de redes móveis, o que proporcionaria uma gestão cooperativa global das estações base que utilizam microcélulas.

Por fim, os usuários primários e secundários são representados por quaisquer dispositivos que se conectam às estações *Femtocell*. Ou seja, dispositivos do contexto de Internet das Coisas, como sensores, atuadores, smartphones, computadores pessoais, *wearables* (dispositivos vestíveis), utensílios domésticos dentre outros.

3.2 Algoritmos Simulados

Nesta sessão serão elucidados os 4 algoritmos de seleção de canal propostos por (Julio, 2016). Para cada algoritmo, será dada uma breve explicação do seu funcionamento e seus principais objetivos de intervenção no regime de interferência da rede.

3.2.1 Algoritmo SCPC

Buscando mitigar a interferência entre os usuários da rede, o algoritmo SCPC *Stateless Channel and Power Control Algorithm*) utiliza a estratégia de coloração em grafos para realizar a seleção de canais para os dispositivos da rede. Desta forma, a cada mudança de disponibilidade de canais em função da presença dos usuários primários, o algoritmo reinicializa os canais de todos os dispositivos, e desconsidera as informações anteriores sobre os estados dos canais, conforme mostrado em Julio (2016). Durante a seleção de canais para os usuários secundários, um grafo de interferência é utilizado.

O grafo de interferência é definido da seguinte forma: os vértices representam os CE's e seus vizinhos, e as arestas representam a interferência entre os vértices. As arestas são ponderadas, sendo o peso representado pela interferência que um vértice gera em seu vizinho.

Para o Algoritmo SCPC, o processo de seleção de canais é dado por um algoritmo de coloração, que realiza uma atribuição de peso para os vértices do grafo através do grau de saturação (DSATUR, ou *Degree of Saturation*) (Brélaz, 1979). O grau de saturação do vértice é calculado pela soma dos pesos das arestas interferentes. Sendo assim, durante o processo de ordenação dos vértices pela heurística de coloração, a estratégia gulosa sempre prioriza o canal com menor interferência dos vizinhos (o menor valor de DSATUR). O diagrama da Figura 3.3 representa o funcionamento do Algoritmo SCPC.

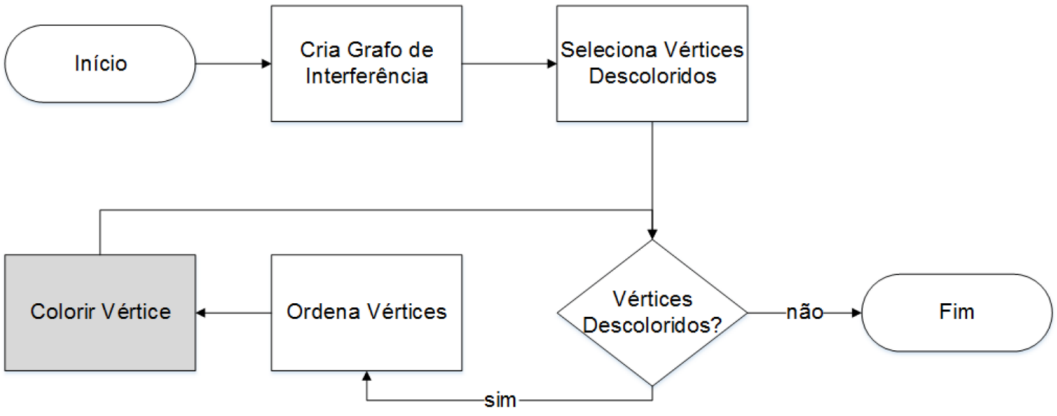


Figura 3.3: Diagrama de Funcionamento do Algoritmo SCPC. (Julio, 2016)

3.2.2 Algoritmo UserCPC

O Algoritmo *UserCPC* (*User Channel and Power Control Algorithm*) tem como principal objetivo a redução do número de reassociações de clientes. Para isso, utiliza a estratégia de coloração em grafos, assim como o Algoritmo SCPC abordado na Seção 3.2.1, porém, diferente deste, ordena os vértices do grafo considerando o número de clientes associados ao CE. O CE com maior número de clientes associados tem maior impacto no processo de reassociação quando há a necessidade de troca de canal do mesmo, e portanto, possui maior prioridade na atribuição de novos canais. O diagrama da Figura 3.4 apresenta o funcionamento do algoritmo *UserCPC*.

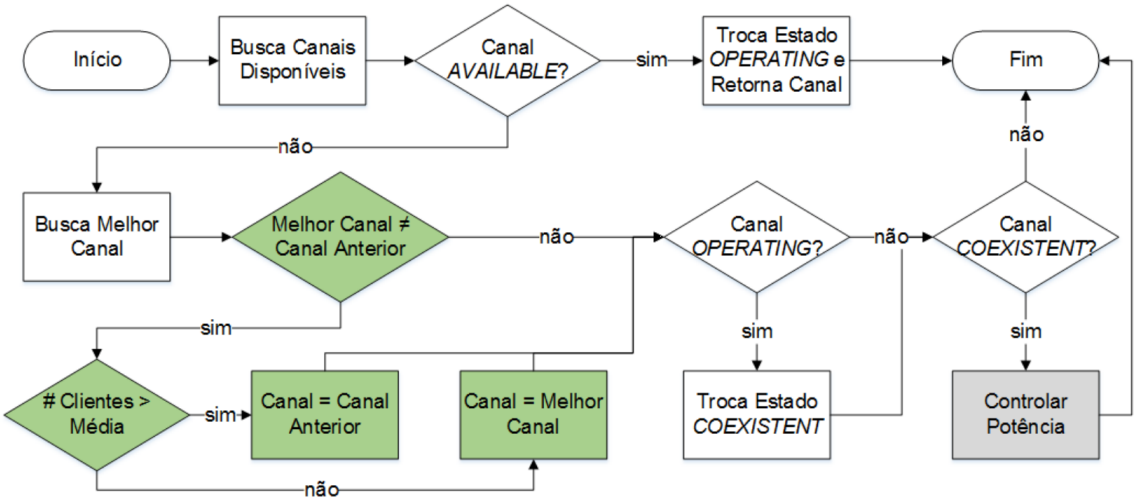


Figura 3.4: Diagrama de Funcionamento do Algoritmo UserCPC. (Julio, 2016)

Como visto na Figura 3.4, além de considerar o número de reassociações de clientes para escolha do canal, o algoritmo *UserCPC* também pondera o impacto da interferência entre os usuários. Para tal, o algoritmo utiliza a estratégia de verificar, durante a coloração, se o número de clientes associados ao CE é maior que a média de clientes associados na arquitetura de coexistência. Em caso positivo, o CE mantém o canal, diminuindo o número de reassociações. Caso contrário, o canal com menor interferência é atribuído ao CE. Portanto, a troca de canais é priorizada para os CE's com menor número de clientes associados.

Outra etapa importante do Algoritmo UserCPC é a estratégia de Controlar Potência, conforme aponta o fluxograma da Figura 3.4. Este mecanismo é utilizado quando um canal está no estado *Coexistent*, ou seja, quando há 2 ou mais CE's operando em coexistência neste canal. Neste caso, há um ajuste de potência de operação dos CE's buscando o controle da área de interferência do mesmo, reduzindo assim a interferência da vizinhança. O mecanismo de controle de potência também pode ser visto em detalhes em Julio (2016).

3.2.3 Algoritmo MinCPC

O Algoritmo *Minimal Channel and Power Control Algorithm* ou simplesmente *MinCPC* busca realizar o menor número de troca de canais possível. Para isso, a troca de canal de um CE é feita apenas se o canal em que está operando se torna indisponível (estado *Protected*), ou seja, caso um usuário primário comece a utilizar este canal.

3.2.4 Algoritmo HybridCPC

Buscando o equilíbrio entre o controle de interferência e reassociações, o Algoritmo *HybridCPC* (*Hybrid Channel and Power Control Algorithm*) combina a utilização do Algoritmo SCPC e *UserCPC*. O diagrama da Figura 3.5 representa o fluxo de funcionamento do algoritmo.

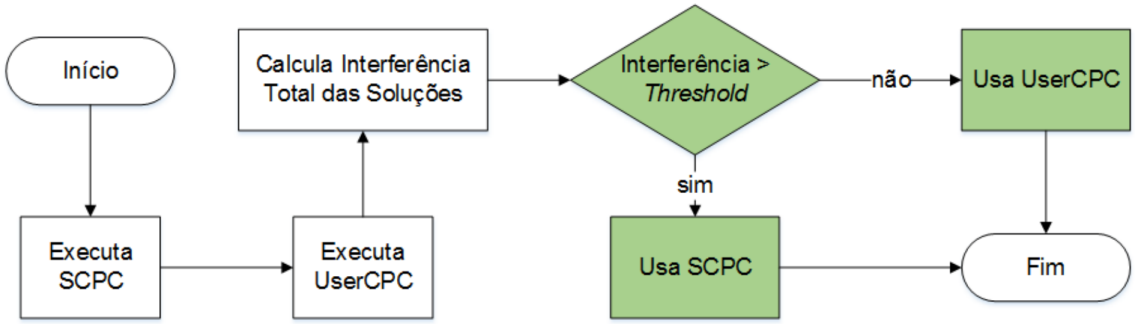


Figura 3.5: Diagrama de Funcionamento do Algoritmo HybridCPC. (Julio, 2016)

Como indicado no fluxograma da Figura 3.5, o Algoritmo *HybridCPC* realiza a execução de ambos os Algoritmos (SCPC e *UserCPC*). Após a execução destes, a interferência total de cada algoritmo é calculada. Em seguida, calcula-se a diferença entre a interferência original (SCPC) e a interferência obtida pelo algoritmo *UserCPC*. Se a diferença calculada estiver acima de um limiar definido, utiliza-se o algoritmo SCPC. Caso Contrário, o algoritmo *UserCPC*.

3.3 Cenários Propostos

Conforme elucidado na Seção 2.5, em um contexto de redes 5G e IoT massivo, são esperados problemas de interferência entre dispositivos. Portanto, os cenários de simulação foram propostos considerando um ambiente urbano com diferentes graus de conectividade (densidade de dispositivos). As Subseções 3.3.1 e 3.3.2 dividem os cenários propostos entre Indoor (interno) e Outdoor (externo).

3.3.1 Cenários *Indoor*

Os cenários do tipo *Indoor* consideram dispositivos de usuários secundários e estações base *Femtocell* (CE's) em um andar de um prédio comercial. Os dispositivos vizinhos são considerados como aqueles que estão localizados em andares acima e abaixo dos SU's e CE's. A variação de parâmetros de cada cenário é dada pelo número máximo de usuários, o número de CE's, o número mínimo e máximo de CE's vizinhos e o número mínimo e máximo de WSOScans (número de dispositivos identificados pelos CE's entre as rodadas

de mudança de disponibilidade de canais), e por fim, a área do ambiente.

Os cenários foram divididos em duas classificações: pelo tamanho (área) do ambiente e pelo grau de conectividade (densidade de dispositivos), sendo que cada classificação possui três variações, compondo assim, nove variações em cada cenário.

Num	**#Disp**	**#CE's**	**#Min CE's Vizinhos**	**#Max CE's Vizinhos**	**#Min WSO Scans**	**#Max WSO Scans**	**Área**
1	150	5	3	5	5	10	$150m^2$
2	300	10	3	5	5	10	$150m^2$
3	450	15	3	5	5	10	$150m^2$
4	450	15	6	10	10	20	$450m^2$
5	600	20	6	10	10	20	$450m^2$
6	750	25	6	10	10	20	$450m^2$
7	750	25	15	20	20	35	$900m^2$
8	900	30	15	20	20	35	$900m^2$
9	1050	35	15	20	20	35	$900m^2$

Tabela 3.1: Cenário 1

Num	**#Disp**	**#CE's**	**#Min CE's Vizinhos**	**#Max CE's Vizinhos**	**#Min WSO Scans**	**#Max WSO Scans**	**Área**
1	150	1	1	1	1	2	$150m^2$
2	300	2	1	2	2	4	$150m^2$
3	450	3	1	3	2	5	$150m^2$
4	450	3	2	3	3	5	$450m^2$
5	600	4	2	3	3	6	$450m^2$
6	750	5	2	4	4	7	$450m^2$
7	750	5	3	4	4	8	$900m^2$
8	900	6	3	5	5	9	$900m^2$
9	1050	7	3	6	6	10	$900m^2$

Tabela 3.2: Cenário 2

O Cenário 1 (Tabela 3.1) compreende o caso onde há um grande número de CE's para gerenciar a coexistência entre usuários. Neste cenário são considerados até 30 usuários secundários por CE.

Já no Cenário 2, como mostra a Tabela 3.2, considera-se o mesmo número máximo de usuários em cada variação, porém, um número menor de CE's. Neste caso, cada CE pode comportar até 150 usuários secundários conectados.

Portanto, os Cenários *Indoor* foram desenvolvidos com o intuito de analisar se a utilização de um maior número de CE's (*Femtocell's*) impacta na redução da interferência geral entre os dispositivos da rede, além de se observar o efeito do uso dos diferentes algoritmos de controle de interferência e seleção de canais, abordados na Seção 3.2.

3.3.2 Cenários *Outdoor*

O cenário do tipo *Outdoor*, por sua vez, inclui soluções urbanas implementadas atualmente por algumas operadoras de redes móveis, onde há instalações de microcélulas em estruturas semelhantes à postes de luz, em locais estratégicos da cidade (Landertshamer et al., 2019). Neste tipo de implementação, pode-se considerar diferentes tamanhos de

grids (grades) de postes com antenas 5G em ambientes urbanos.

Num	**#Disp**	**#CE's**	**#Min CE's Vizinhos**	**#Max CE's Vizinhos**	**#Min WSO Scans**	**#Max WSO Scans**	**Área**
1	100	4	2	4	4	8	$22500m^2$
2	200	4	2	4	4	8	$22500m^2$
3	400	4	2	4	4	8	$22500m^2$
4	225	9	4	8	10	16	$40000m^2$
5	450	9	4	8	10	16	$40000m^2$
6	900	9	4	8	10	16	$40000m^2$
7	400	16	8	14	12	20	$62500m^2$
8	800	16	8	14	12	20	$62500m^2$
9	1600	16	8	14	12	20	$62500m^2$

Tabela 3.3: Cenário 3 (*Outdoor*)

O Cenário 3, representado na Tabela 3.3 possui 9 variações, assim como os cenários *Indoor*. As três primeiras variações (de números 1, 2 e 3) consideram um *grid* de 2x2, ou seja, 4 postes (CE's). Já as variações 4, 5 e 6 representam um *grid* de 3x3 (9 CE's) e por fim, as variações 7, 8 e 9, 16 CE's (*grid 4x4*).

Outra variação de parâmetro do Cenário *Outdoor* é o tamanho (área) do *grid*. Segundo a proposta de Landertshamer et al. (2019), as estações base (postes) com células que operam a 28GHz devem estar separadas em 50 metros entre si. Portanto, considerando que uma célula tenha como alcance um raio de 50m, para o *grid* de 2x2 estima-se uma área total de 22.500m^2 (150m x 150m) de cobertura. De forma equivalente, o *grid* de 3x3 representa uma área de 40.000m^2 (200m x 200m), e por fim, o *grid* de 4x4, 62.500m^2 (250m x 250m).

Além das variações de número de CE's e tamanho do *grid*, o Cenário 3 também considera diferentes números máximos de usuários por CE. As variações 1, 4 e 7 representam os casos de até 25 usuários por CE. Já nas variações 2, 5 e 8, há no máximo 50

usuários por CE. O máximo de 100 usuários por CE é definido para as variações 3, 6 e 9.

3.4 Detalhes da Simulação

As simulações dos cenários *Indoor* consideram o modelo de propagação *ITU Indoor Propagation Model* (ITU-R, 2012), adequado para estimar as perdas de propagação em ambientes fechados. Os CE's são considerados como Femtocells com 13 canais homogêneos, operando à 2300Mhz, potência de transmissão de 20dBm e antenas com ganho de 5dBi (Clerckx et al., 2013).

O cenário *Outdoor* conta com simulações que utilizam o modelo de propagação *Extended Hata* (Hata, 1980), considerado eficiente para o cálculo de perdas de propagação em cenários urbanos (Abhayawardhana et al., 2005). Os CE's representam as microcélulas instaladas nas estações bases do *grid* de antenas. Os parâmetros de simulação incluem a operação em 28Ghz, com 15 canais homogêneos, potência de transmissão de 41dBm e ganho das antenas em 14dBi (Kibaroglu et al., 2017).

Neste trabalho, considera-se 25 diferentes simulações para cada variação de cenário, cada uma com 25 rodadas de troca de estados dos canais. As trocas de estados dos canais não possuem relação de tempo e mudança de disponibilidade. Desta forma, cada rodada representa apenas a necessidade de execução dos algoritmos propostos, buscando a reconfiguração dos canais para os usuários secundários, dependendo da presença do usuário primário, e consequentemente, a disponibilidade de canais.

Para cada execução do simulador, temos como entrada: o modelo de propagação, o número de CE's (com informações de potência e número de máximo de clientes associados), o número máximo e mínimo de CE's vizinhos, número de canais e suas respectivas frequências, e as informações sobre as disponibilidades de canais, a depender da presença o usuário primário.

Como saída das simulações temos o comportamento dos CE's e estados dos canais a cada rodada, além dos resultados numéricos de interferência total, número de reassociações e a razão sinal-interferência dos CE's.

As simulações são realizadas através de 25 execuções para cada variação de cenário, com um conjunto de 5 *seed's* diferentes, totalizando 125 simulações para cada

variação de cenário. Os resultados apresentados no Capítulo 4 representam, portanto, uma média de 125 execuções de cada cenário, com um intervalo de confiança de 95%.

4 Resultados

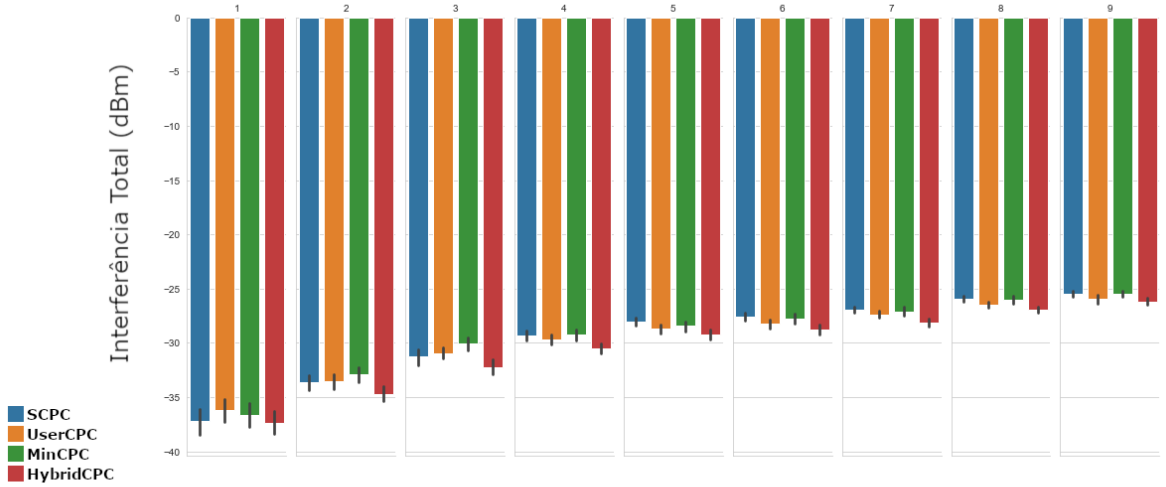
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados das simulações propostas no ambiente descrito no Capítulo 3. A Seção 4.1 apresenta a análise dos resultados de interferência das simulações nos cenários propostos. Já a Seção 4.2 aborda os resultados em termos da razão de sinal-interferência dos CE's. Por fim, a Seção 4.3 inclui os resultados referentes ao número de reassociações dos clientes.

4.1 Interferência

Através das simulações realizadas, o regime de interferência pôde ser estudado, e os resultados obtidos para os Cenários *Indoor* são divididos em duas Subseções 4.1.1 e 4.1.2, separando os resultados dos Cenários 1 e 2, respectivamente. A Subseção 4.1.3 apresenta uma análise comparativa da interferência obtida estes os dois cenários. Por fim, a Subseção 4.1.4 inclui a análise dos resultados das simulações do Cenário *Outdoor*.

4.1.1 Cenário 1

Figura 4.1: Média da Interferência Total - Cenário 1



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SCPC	-37.22	-33.65	-31.28	-29.30	-28.07	-27.54	-26.92	-25.92	-25.48
UserCPC	-36.18	-33.51	-30.94	-29.68	-28.70	-28.25	-27.40	-26.49	-25.95
MinCPC	-36.62	-32.89	-30.07	-29.27	-28.45	-27.75	-27.10	-26.00	-25.47
HybridCPC	-37.34	-34.71	-32.21	-30.51	-29.26	-28.77	-28.10	-26.94	-26.18

Na Figura 4.1 pode-se observar os resultados obtidos nas simulações das 9 variações do Cenário 1. De forma geral, houve uma gradual redução da interferência à medida que há o aumento da densidade e tamanho do cenário. Isso pode ser explicado pelo maior número de CE's presentes nos cenários mais densos, possibilitando que os usuários sejam distribuídos entre os canais de forma mais eficiente, além do fato de haver um aumento na área entre as variações dos cenários e a redução na potência de transmissão dos CE's.

Apesar de se esperar que o algoritmo SCPC apresente os menores valores de interferência, os resultados observados mostram que apenas nos cenários mais densos (a partir da variação 4) o algoritmo SCPC se torna mais atrativo para mitigação de interferência. Nas variações menos densas do Cenário 1, os algoritmos *UserCPC* e *MinCPC* se mostram mais eficientes para redução da interferência total da rede.

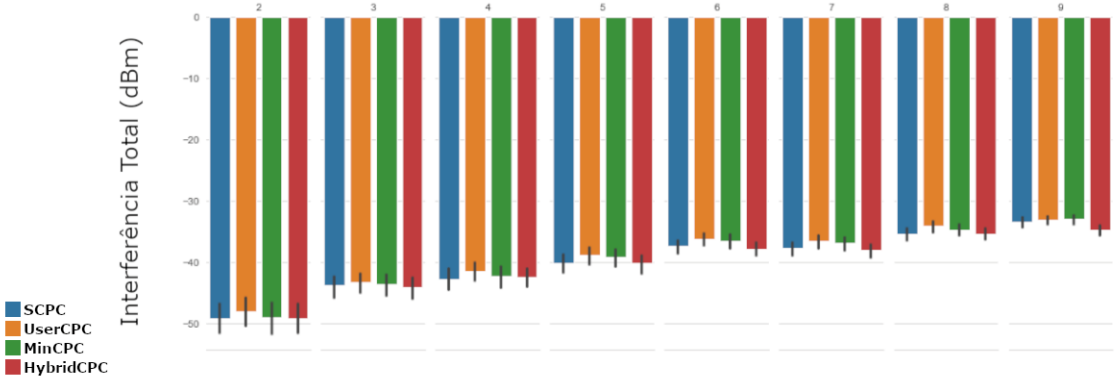
Assim como o Algoritmo SCPC, o *HybridCPC* não se mostra eficiente na mitigação de interferência em ambientes com baixa densidade de dispositivos. Porém, com

o aumento da densidade, o mesmo se aproxima dos demais algoritmos, apresentando resultados similares ao *UserCPC* e *MinCPC*.

4.1.2 Cenário 2

Para o Cenário 2, não foi possível a execução das simulações da variação Número 1 devido as limitações de geração de cenários do simulador. Os resultados a seguir representam as simulações referentes às variantes de 2 a 9 deste cenário.

Figura 4.2: Média da Interferência Total - Cenário 2



	2	3	4	5	6	7	8	9
SCPC	-49.15	-43.81	-42.78	-40.13	-37.42	-37.71	-35.39	-33.36
UserCPC	-48.07	-43.27	-41.38	-38.81	-36.27	-36.55	-34.14	-33.10
MinCPC	-49.06	-43.63	-42.26	-39.10	-36.54	-36.92	-34.65	-32.97
HybridCPC	-49.13	-44.07	-42.43	-40.11	-37.78	-38.08	-35.39	-34.67

Os resultados mostrados na Figura 4.2 apresentam um comportamento similar da interferência em relação ao Cenário 1. Ou seja, há uma redução na interferência a medida que se aumenta a densidade do cenário. A mesma justificativa se aplica neste caso: o maior número de CE's, o controle de potência e o aumento da área nas variações do cenário implicam na redução da interferência em maiores densidades.

Em relação à comparação entre os diferentes algoritmos, o comportamento observado no Cenário 1 se mantém no Cenário 2. O Algoritmo SCPC, em casos de menor densidade, não se mostra tão eficiente quanto o *UserCPC* e *MinCPC* na redução da interferência. O *UserCPC* se mostrou mais eficaz na maioria das variações do cenário. Porém, a diferença da interferência entre os resultados obtidos pelo SCPC e *UserCPC* diminui

gradualmente com o aumento da densidade do cenário, e como mostrado nas simulações do Cenário 1, em determinada situação de densidade da rede, o Algoritmo SCPC se torna mais adequado para o processo de mitigação de interferência.

4.1.3 Comparativo dos Cenários *Indoor*

A tabela da Figura 4.3 apresenta os resultados comparativos entre as simulações dos Cenários 1 e 2 (Cen1 e Cen2) para os quatro algoritmos simulados.

Figura 4.3: Comparativo de Interferência entre os Cenários 1 e 2 (dBm)

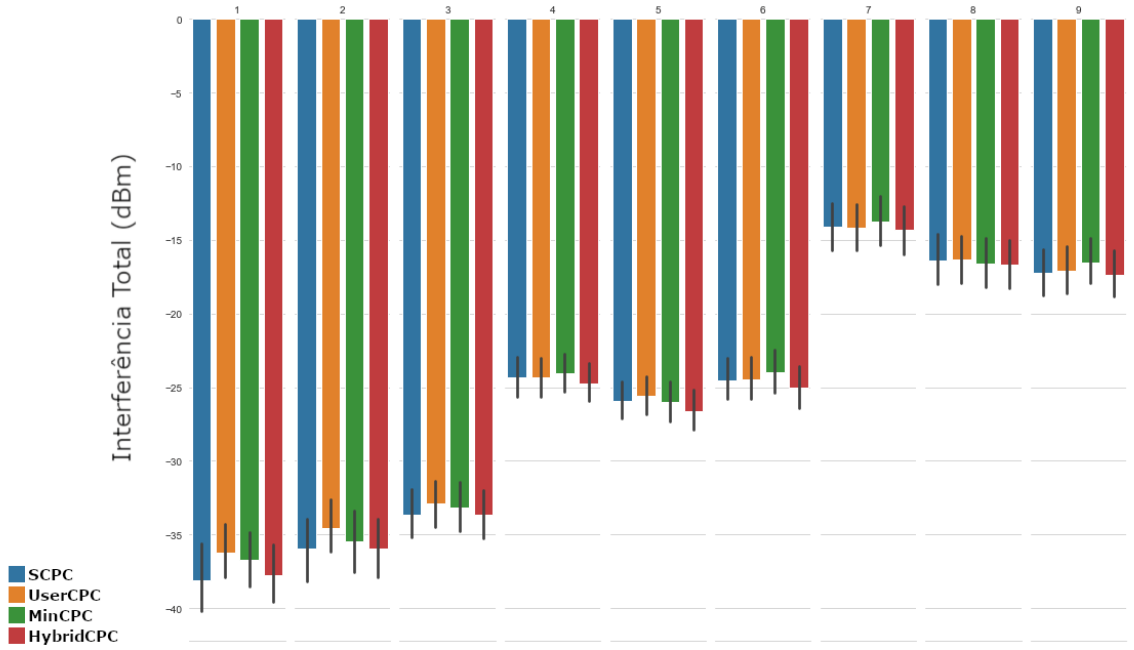
	SCPC		UserCPC		MinCPC		HybridCPC	
Variação	**Cen1**	**Cen2**	**Cen1**	**Cen2**	**Cen1**	**Cen2**	**Cen1**	**Cen2**
1	-37.22	--//--	-36.18	--//--	-36.62	--//--	-37.34	--//--
2	-33.65	-49.15	-33.51	-48.07	-32.89	-49.06	-34.71	-49.13
3	-31.28	-43.81	-30.94	-43.27	-30.07	-43.63	-32.21	-44.07
4	-29.3	-42.78	-29.68	-41.38	-29.27	-42.26	-30.51	-42.43
5	-28.07	-40.13	-28.7	-38.81	-28.45	-39.1	-29.26	-40.11
6	-27.54	-37.42	-28.25	-36.27	-27.75	-36.54	-28.77	-37.78
7	-26.92	-37.71	-27.4	-36.55	-27.1	-36.92	-28.1	-38.08
8	-25.92	-35.39	-26.49	-34.14	-26	-34.65	-26.94	-35.39
9	-25.48	-33.36	-25.95	-33.1	-25.47	-32.97	-26.18	-34.67

Conforme demonstrado nas análises individuais do regime de interferência dos Cenários 1 e 2 (Subseções 4.1.1 e 4.1.2), os cenários com menor número de CE's apresentam os maiores valores de interferência. Em todos as variações propostas, o Cenário 2 demonstrou interferências maiores entre os dispositivos, uma vez que comporta um maior número de usuários por CE's, e portanto, uma gama menor de distribuição de canais do ambiente da rede, forçando grande porções de usuários em um mesmo canal, operando em coexistência.

4.1.4 Cenário 3 (*Outdoor*)

Os resultados da simulação do terceiro cenário são apresentados na Figura 4.4.

Figura 4.4: Média da Interferência Total - Cenário 3



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SCPC	-38.07	-35.93	-33.63	-24.33	-25.90	-24.52	-14.08	-16.36	-17.23
UserCPC	-36.22	-34.52	-32.92	-24.35	-25.58	-24.48	-14.18	-16.31	-17.10
MinCPC	-36.74	-35.44	-33.14	-24.06	-25.99	-24.00	-13.76	-16.59	-16.55
HybridCPC	-37.75	-35.93	-33.65	-24.74	-26.60	-25.01	-14.33	-16.69	-17.38

Os valores de interferência obtidos reduzem proporcionalmente à medida que há o aumento do tamanho do *grid* de antenas, e portanto, a área de funcionamento da rede, assim como observado nos Cenários 1 e 2.

Os resultados observados para o *grid* 2x2 (variações 1, 2 e 3) demonstram que há a redução da interferência total com o aumento da densidade de dispositivos, o que pode ser explicado pela redução da potência dos CE's, e consequentemente, redução da razão sinal-interferência, como será mostrado na Seção 4.2.3. Já para o *grid* 4x4 (variações 7, 8 e 9) observa-se um comportamento contrário. Há um aumento gradativo da interferência para maiores densidades de dispositivos. O *grid* de tamanho 3x3 representado pelas variações 4, 5 e 6 do cenário, não apresenta um padrão de comportamento da interferência em relação ao aumento da densidade de dispositivos.

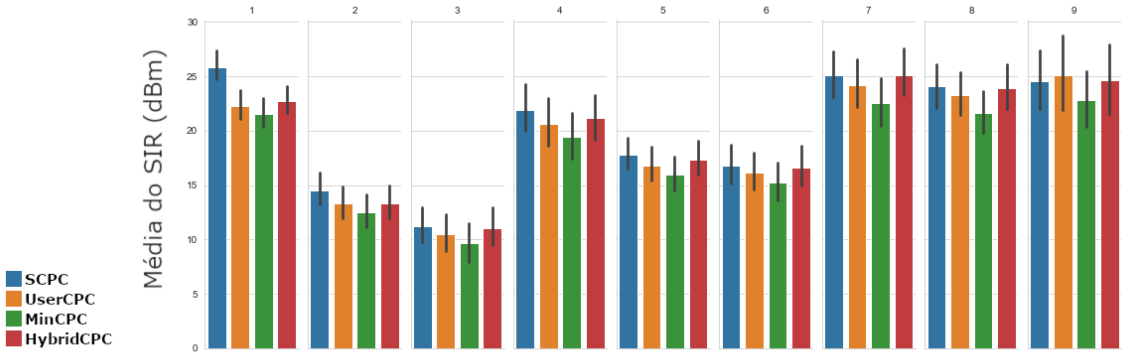
Em relação ao algoritmos simulados, para o ambiente *Outdoor* proposto, os melhores resultados são atribuídos, de forma geral, para o *UserCPC* e *MinCPC*.

4.2 SIR

Esta Seção aborda os resultados referentes à razão sinal-interferência obtidas através das simulações. Os resultados da simulações do Cenário 1 são apresentadas na Subseção 4.2.1. Já a Subseção 4.2.2 demonstra e analisa os resultados das simulações do Cenário 2. Os resultados para o Cenário 3 são apresentados na Subseção 4.2.3.

4.2.1 Cenário 1

Figura 4.5: Média do SIR - Cenário 1



	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SCPC	25.83	14.51	11.23	21.92	17.80	16.77	25.10	24.08	24.56
UserCPC	22.29	13.28	10.47	20.64	16.80	16.12	24.19	23.27	25.06
MinCPC	21.55	12.48	9.66	19.47	15.99	15.24	22.49	21.59	22.82
HybridCPC	22.71	13.30	11.06	21.16	17.36	16.63	25.13	23.92	24.61

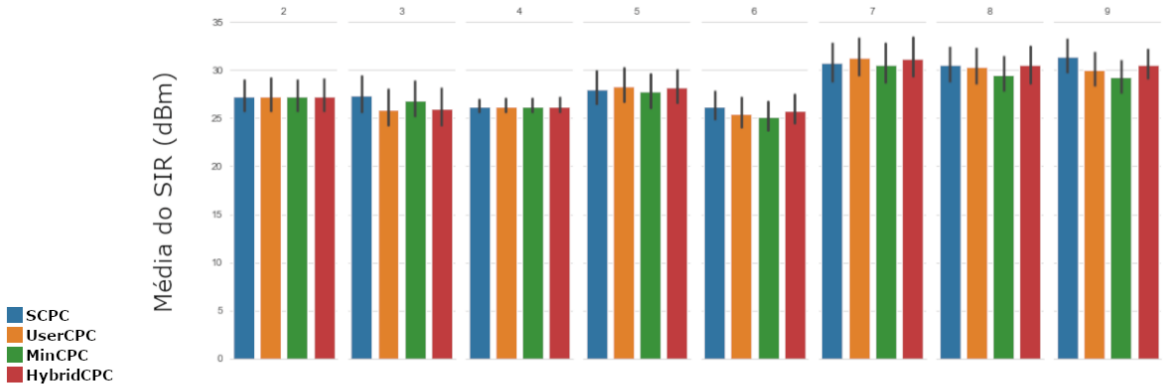
A Figura 4.5 apresenta os resultados referentes às simulações do Cenário 1. As métricas obtidas mostram a diminuição do SIR em razão do aumento de densidade em variações do cenário com a mesma área (por exemplo, a variação 1, 2 e 3, em uma área de 150m^2). Este comportamento é esperado, uma vez que durante o processo de controle de interferência, a potência dos CE's é reduzida para mitigar a interferência causada na vizinhança, e portanto, há uma diminuição do sinal de transmissão.

4.2.2 Cenário 2

Os valores obtidos da média de SIR para o Cenário 2 se diferem ligeiramente do comportamento observado no Cenário 1 em alguns aspectos, como observado na Figura 4.6. Nas variações de ambientes de 450m^2 (variações 3, 4 e 5) não houve a redução gradual do SIR com o aumento de densidade de dispositivos. Já as variações 7, 8 e 9 (ambiente de 900m^2) demonstram a redução do SIR em função do aumento do número de dispositivos da rede.

Este comportamento pode ser explicado pelo fato de não haver disputa por canais quando há um número menor de CE's no ambiente. Desta forma, os CE's conseguem se distribuir em diferentes canais disponíveis (sem a presença do usuário primário), e portanto, a potência de transmissão dos CE's não é afetada diretamente, como é o caso da coexistência de diversos CE's em um mesmo canal. Porém, conforme observado na Seção 4.1, a interferência entre os dispositivos é afetada drasticamente, uma vez que um número pequeno de CE's é responsável pelo funcionamento de diversos usuários secundários.

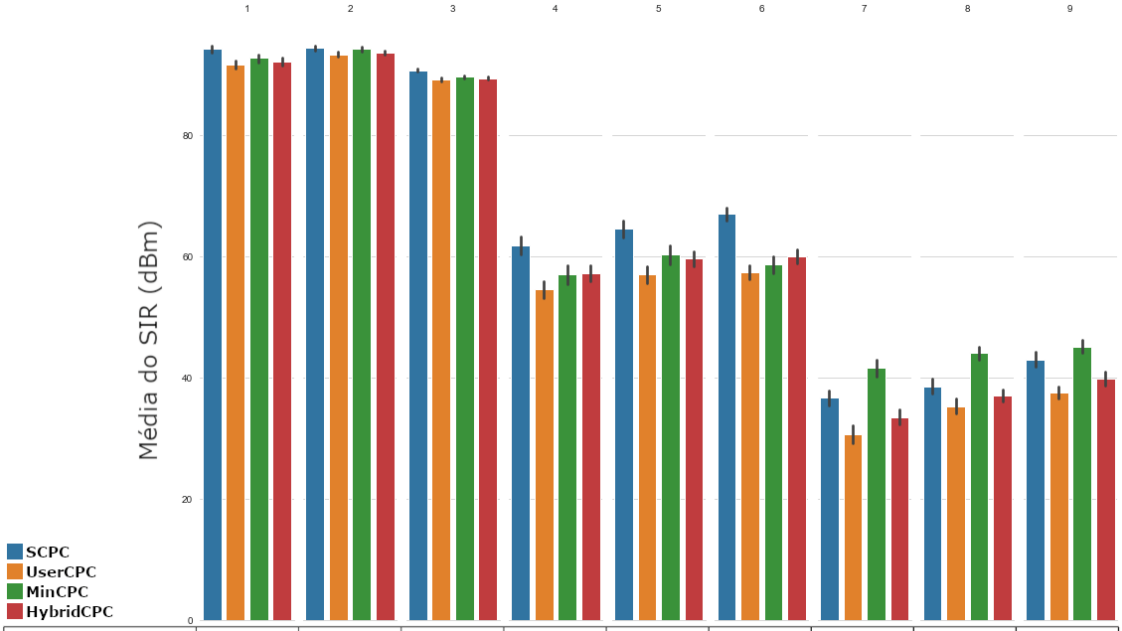
Figura 4.6: Média do SIR - Cenário 2



	2	3	4	5	6	7	8	9
SCPC	27.26	27.41	26.18	28.06	26.23	30.73	30.57	31.41
UserCPC	27.26	25.93	26.22	28.28	25.49	31.30	30.38	30.06
MinCPC	27.26	26.80	26.22	27.81	25.13	30.54	29.54	29.28
HybridCPC	27.26	25.97	26.23	28.24	25.77	31.23	30.50	30.57

4.2.3 Cenário 3

Figura 4.7: Média do SIR - Cenário 3



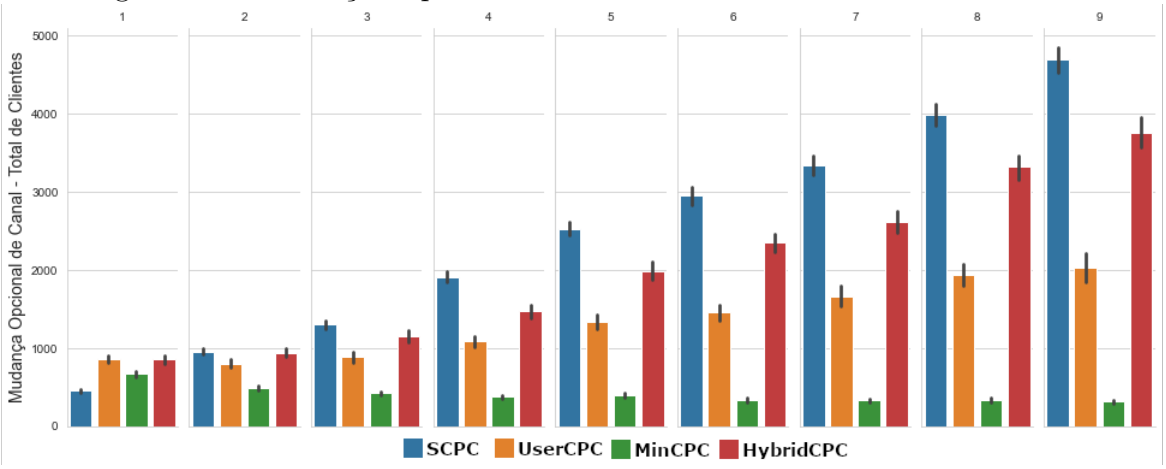
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SCPC	94.14	94.28	90.65	61.69	64.45	66.96	36.66	38.49	42.92
UserCPC	91.52	93.29	89.06	54.52	56.92	57.36	30.59	35.24	37.54
MinCPC	92.65	94.16	89.56	56.95	60.21	58.57	41.52	43.98	45.06
HybridCPC	92.04	93.52	89.34	57.15	59.58	59.99	33.46	37.01	39.84

A Figura 4.7 mostra que o valor da média do SIR nas simulações do cenário *Outdoor* são reduzidas com o aumento do *grid*, pois com um número maior de CE's, a coexistência em um mesmo canal se torna necessária, e portanto, há a redução da potência de transmissão dos CE's.

Para os *grid's* de 2x2 e 3x3, o SCPC demonstrou os melhores valores de SIR. Porém, para a variação 4x4, o *MinCPC* se mostrou mais eficiente que os demais algoritmos.

4.3 Reassociações

Figura 4.8: Mudanças Opcionais de Canal - Total de Clientes - Cenário 1



Os resultados apresentados na Figura 4.8 mostram o número total de mudanças opcionais de canal por parte dos CE's em cada uma das 9 variações do Cenário 1. Os resultados dos Cenários 2 e 3 apresentaram o mesmo comportamento do Cenário 1.

Conforme esperado, o Algoritmo MinCPC possui um número significativamente menor de mudanças opcionais de canais em relação demais algoritmos, uma vez que só realiza a reassociações de clientes em situações específicas (principalmente com a presença do usuário primário).

Já o Algoritmo SCPC, de forma geral, apresenta os maiores valores de clientes com mudanças opcionais de canal, uma vez que não se preocupa em reduzir o número de reassociações de clientes. Ao contrário do SCPC, Algoritmo *UserCPC* realiza o balanceamento entre controle de interferência e reassociações de clientes, e portanto, se aproxima dos resultados do Algoritmo *MinCPC*.

Por fim, como previsto, ao realizar o uso alternado dos algoritmos SCPC e UserCPC, o Algoritmo HybridCPC apresenta resultados intermediários entre os dois algoritmos que o compõe.

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, o conceito de Redes Cognitivas foi aplicado ao contexto de Redes Móveis 5G e Internet das Coisas. Através das simulações propostas, foi possível observar que as futuras instalações de Estações Base *Femtocell* em uso *Indoor* poderiam se beneficiar da operação cognitiva. Houve uma melhoria da interferência total da rede com a utilização dos algoritmos analisados.

Com os diferentes cenários propostos, os resultados das simulações mostram que a densidade da rede tem um importante papel no regime de interferência da rede, e consequentemente, na relação sinal-interferência da mesma. De maneira geral, pode-se concluir que em cenários de maior densidade de usuários e estações base, há uma redução da interferência da rede devido ao controle da potência de transmissão das estações base, e portanto, a redução da razão sinal-interferência.

Foi possível observar que o uso de um número maior de Estações Bases (Femtocell's) pode ser conveniente para Redes Privadas de 5G, principalmente considerando operações que utilizam frequências mais altas (como por exemplo, *millimiter waves*). Neste caso, é esperada a necessidade de uso de um número maior de estações base para cobrir toda a área do ambiente, uma vez que frequências mais altas são mais afetadas por barreiras físicas e climáticas, e possuem um menor alcance quando comparada à propagação de frequências mais baixas.

Para trabalhos futuros, o regime de interferência em redes móveis 5G pode ser abordado através das seguintes propostas:

- Estudar o impacto dos Algoritmos SCPC, UserCPC, MinCPC e HybridCPC em cenários *Outdoor* com *grids* que consideram uma área significativamente maior. Tal abordagem exige simulações mais robustas, uma vez que o número máximo de usuários e CE's aumenta significativamente considerando ambientes urbanos densos com IoT massivo;

- Aplicar o estudo em cenários com faixas de ondas milimétricas (frequências acima de

28GHz) em ambientes *Indoor*. Por tratar-se de frequências mais altas, há a redução no alcance do sinal, e portanto, surge o interesse em analisar como os CE's afetariam o regime de interferência entre seus vizinhos.

- Desenvolver novos algoritmos, utilizando diferentes técnicas para mitigação de interferência e controle de reassociação de usuários, focado no contexto de redes móveis 5G e Internet das Coisas.

Bibliografia

Abhayawardhana, V.; Wassell, I.; Crosby, D.; Sellars, M. ; Brown, M. **Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems**. In: 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference, volume 1, p. 73–77. IEEE, 2005.

Akyildiz, I. F.; Lee, W.-Y.; Vuran, M. C. ; Mohanty, S. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. **Computer networks**, v.50, n.13, p. 2127–2159, 2006.

Brélaz, D. New methods to color the vertices of a graph. **Communications of the ACM**, v.22, n.4, p. 251–256, 1979.

Caso, G.; Le, M. P.; De Nardis, L.; Di Benedetto, M.-G. ; Zhang, W. Non-cooperative and cooperative spectrum sensing in 5g cognitive networks. **Handbook of Cognitive Radio**, p. 1–21, 2017.

Clerckx, B.; Oestges, C. **MIMO wireless networks: channels, techniques and standards for multi-antenna, multi-user and multi-cell systems**. Academic Press, 2013, 637–674p.

Dekleva, S.; Shim, J. P.; Varshney, U. ; Knoerzer, G. Evolution and emerging issues in mobile wireless networks. **Communications of the ACM**, v.50, n.6, 2007.

Ezhilarasan, E.; Dinakaran, M. **A review on mobile technologies: 3g, 4g and 5g**. In: 2017 second international conference on recent trends and challenges in computational models (ICRTCCM), p. 369–373. IEEE, 2017.

Gur, G.; Bayhan, S. ; Alagoz, F. Cognitive femtocell networks: an overlay architecture for localized dynamic spectrum access [dynamic spectrum management]. **IEEE Wireless Communications**, v.17, n.4, 2010.

Hata, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. **IEEE transactions on Vehicular Technology**, v.29, n.3, p. 317–325, 1980.

Hindia, M.; Rahman, T.; Ojukwu, H.; Hanafi, E. ; Fattouh, A. Enabling remote healthcaring utilizing iot concept over lte-femtocell networks. **PloS one**, v.11, n.5, 2016.

Hong, X.; Wang, J.; Wang, C.-X. ; Shi, J. Cognitive radio in 5g: a perspective on energy-spectral efficiency trade-off. **IEEE Communications Magazine**, v.52, n.7, p. 46–53, 2014.

Hu, F.; Chen, B. ; Zhu, K. Full spectrum sharing in cognitive radio networks toward 5g: A survey. **IEEE Access**, v.6, p. 15754–15776, 2018.

IEEE. IEEE standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems – local and metropolitan area networks – specific requirements – part 19: Tv white space coexistence methods. IEEE standard 802.19.1-2014. p. 1–326, 2014.

ITU. Recommendation ITU-R p.1238-7: Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 mhz to 100 ghz. **P Series Radiowave Propagation**, p. 1–28, 2012.

Julio, E. P. Alocação de canais e controle de potência aplicados à coexistência em redes cognitivas sem fio. **Universidade Federal Fluminense - UFF**, 2016.

Kibaroglu, K.; Sayginer, M. ; Rebeiz, G. M. **An ultra low-cost 32-element 28 ghz phased-array transceiver with 41 dbm eirp and 1.0–1.6 gbps 16-qam link at 300 meters**. In: 2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), p. 73–76. IEEE, 2017.

Landertshamer, O.; Benseny, J.; Hämmäinen, H. ; Wainio, P. **Cost model for a 5g smart light pole network**. In: 2019 CTTE-FITCE: Smart Cities & Information and Communication Technology (CTTE-FITCE), p. 1–6. IEEE, 2019.

Lee, H.-C.; Oh, D.-C. ; Lee, Y.-H. **Mitigation of inter-femtocell interference with adaptive fractional frequency reuse**. In: 2010 IEEE International Conference on Communications, p. 1–5. IEEE, 2010.

Liu, X.; Jia, M.; Na, Z.; Lu, W. ; Li, F. Multi-modal cooperative spectrum sensing based on dempster-shafer fusion in 5g-based cognitive radio. **IEEE Access**, v.6, p. 199–208, 2017.

Lv, L.; Chen, J.; Ni, Q.; Ding, Z. ; Jiang, H. Cognitive non-orthogonal multiple access with cooperative relaying: A new wireless frontier for 5g spectrum sharing. **IEEE Communications Magazine**, v.56, n.4, p. 188–195, 2018.

Miraz, M. H.; Ali, M.; Excell, P. S. ; Picking, R. Internet of nano-things, things and everything: future growth trends. **Future Internet**, v.10, n.8, 2018.

Ni, J.; Lin, X. ; Shen, X. S. Efficient and secure service-oriented authentication supporting network slicing for 5g-enabled iot. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v.36, n.3, p. 644–657, 2018.

Noura, M.; Nordin, R. A survey on interference management for device-to-device (d2d) communication and its challenges in 5g networks. **Journal of Network and Computer Applications**, v.71, p. 130–150, 2016.

Rebato, M.; Mezzavilla, M.; Rangan, S.; Boccardi, F. ; Zorzi, M. **Understanding noise and interference regimes in 5g millimeter-wave cellular networks**. In: European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference, p. 1–5. VDE, 2016.

Teixeira, F. P. A.; others. Análise da coexistência entre sistemas 5g e serviços fixos na faixa de ondas milimétricas. 2019.

Tseng, F.-H.; Chao, H.-c.; Wang, J. ; others. Ultra-dense small cell planning using cognitive radio network toward 5g. **IEEE Wireless Communications**, v.22, n.6, p. 76–83, 2015.

Wang, Z.; Hu, B.; Wang, X. ; Chen, S. Interference pricing in 5g ultra-dense small cell networks: a stackelberg game approach. **Iet Communications**, v.10, n.15, p. 1865–1872, 2016.

Zhang, W.; Wang, C.-X.; Ge, X. ; Chen, Y. Enhanced 5g cognitive radio networks based on spectrum sharing and spectrum aggregation. **IEEE Transactions on Communications**, v.66, n.12, p. 6304–6316, 2018.

Zheng, J.; Simplot-Ryl, D.; Bisdikian, C. ; Mouftah, H. T. The internet of things [guest editorial]. **IEEE Communications Magazine**, v.49, n.11, 2011.