



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Gerência de Largura de Banda do Reúso Fracionário de Frequência em Cenários Dinâmicos com Hotspots utilizando Aprendizado por Reforço

Eriberto de Souto Silva

Orientador: Vicente A. de Sousa Jr.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Número de ordem PPgEEC: M690
Natal, RN, Junho de 2025

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Eriberto de Souto.

Gerência de Largura de Banda do Reúso Fracionário de
Frequência em Cenários Dinâmicos com Hotspots utilizando
Aprendizado por Reforço / Eriberto de Souto Silva. - 2025.
63f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande
do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2025.

Orientação: Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior.

1. Inter-cell Interference Coordination (ICIC) - Dissertação.
2. Fractional Frequency Reuse (FFR) - Dissertação. 3. Hotspot -
Dissertação. 4. Multi Armed Bandit (MAB) - Dissertação. 5.
Aprendizado de Máquina - Dissertação. I. Sousa Junior, Vicente
Angelo de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 004

Agradecimentos

Agradecer com citações de pessoas nunca foi o meu forte, pois sempre acho que vou esquecer alguém ou que não farei o devido balanço de palavras em relação a cada um. Sendo assim, serei grato a todos, mas citarei alguns nomes daqueles que foram bem presentes neste trabalho.

Inicialmente, agradeço a Deus, pois Ele sabe, melhor do que qualquer um, o valor de cada conquista em minha vida, além de me sustentar nos momentos em que me senti exausto.

Em seguida, meus sinceros agradecimentos são direcionados à minha família, pois cada um, do mais experiente ao mais novo, é parte fundamental da base que me sustenta e ensina-me todos os dias o verdadeiro significado do amor incondicional.

Registro aqui a minha imensa gratidão ao professor Vicente Sousa, uma pessoa admirável pela dedicação à sua vida profissional e familiar. Ter a oportunidade de ser seu aluno e orientando foi sensacional, pois cada reunião de alinhamento (apesar de sua agenda lotada) e seus *feedbacks* me fizeram evoluir profissionalmente e como ser humano. Obrigado por tudo.

Outra pessoa a quem devo imensa gratidão é o Iago Diógenes. Não conto as inúmeras vezes em que me ajudou, pacientemente, durante este trabalho, guiando-me de forma assertiva e iluminando minhas diversas dúvidas nas simulações no ns-3, além de disponibilizar o seu tempo para aquelas reuniões curtas durante o horário de almoço. Fica aqui o meu muito obrigado; você é um ser de luz.

Finalizo agradecendo ao Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD), o qual teve papel primordial nesse trabalho, pois foi o uso dos recursos computacionais disponíveis que possibilitou a obtenção dos resultados dessa pesquisa em tempo hábil. Agradeço, também, ao CNPq pelo apoio financeiro, e aos professores do PPgEEC/UFRN pelos ensinamentos fundamentais para a conclusão deste trabalho. Espero que eu não tenha esquecido de ninguém, mas se não o citei, saiba que você é parte importante desse trabalho.

Resumo

Este trabalho aborda o uso das técnicas de coordenação de interferência entre células, *Inter-Cell Interference Coordination (ICIC)*, baseadas no reuso fracionário de frequência, *Fractional Frequency Reuse (FFR)*, voltadas para a mitigação de um dos principais desafios enfrentados no projeto de redes móveis: a interferência co-canal (*ICI*). A *ICI* é um dos principais fatores de degradação do desempenho do sistema de comunicação móvel, especialmente em cenários dinâmicos com a presença de aglomerações aleatórias de usuários, os *hotspots*. Inicialmente, o problema é caracterizado pela exploração da técnica *ICIC* escolhida sem uma parametrização automatizada, bem como o desempenho do sistema no cenário supracitado. Em seguida, levando em consideração a dinamicidade do ambiente, propõe-se como solução a utilização de técnicas de aprendizado de máquina, de forma mais específica, o *Multi Armed Bandit (MAB)*, customizado para otimização do gerenciamento da largura de banda das técnicas de *ICIC* para sistemas 3GPP. O objetivo da proposta é adaptar a alocação espacial de largura de banda, tendo a variação de carga do sistema e o dinamismo dos *hotspots* como parâmetros de tomada de decisão. Os experimentos de prova de conceito foram realizados utilizando o simulador de redes *ns-3*. Os resultados obtidos demonstram que a abordagem do *MAB* na solução proposta por esta dissertação supera, em termos de *throughput*, a configuração estática de distribuição de largura de banda, inclusive em condições variadas de taxas ofertadas pelo sistema, comprovando ganhos significativos.

Palavras-chave: *ICIC*, *FFR*, *Hotspot*, *MAB*, Aprendizado de Máquina.

Abstract

The present work approaches the use of Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) techniques, based on techniques Fractional Frequency Reuse (FFR) aimed at mitigating one of the main challenges faced when designing mobile networks: co-channel interference (CCI). ICIC is one of the primary factors contributing to the degradation of mobile communication system performance, especially in dynamic scenarios with randomly distributed user clusters, known as hotspots. Initially, the problem is characterized by the exploration of the chosen ICIC technique without automated parameterization, as well as the system's performance in the aforementioned scenario. Then, considering the dynamic nature of the environment, the proposed solution involves the use of machine learning techniques—more specifically, the Multi-Armed Bandit (MAB)—customized for optimizing bandwidth management in ICIC techniques for 3GPP systems. The objective of the proposal is to adapt the spatial allocation of bandwidth, using system load variation and hotspot dynamics as decision-making parameters. Proof-of-concept experiments were conducted using the ns-3 network simulator. The results demonstrate that the MAB-based approach proposed in this dissertation outperforms static bandwidth distribution configurations in terms of throughput, even under varying system load conditions, showing significant gains.

Keywords: ICIC, FFR, Hotspot, MAB, Machine Learning.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
Lista de Siglas	v
1 Introdução	1
1.1 Escopo do Trabalho	3
1.2 Trabalhos Relacionados	4
1.2.1 Análise Quantitativa	4
1.2.2 Análise Qualitativa	6
1.3 Objetivos do Trabalho	8
1.4 Organização da Dissertação	8
2 Exposição do Problema e Soluções Existentes	9
2.1 ICI no Long-Term Evolution (LTE)	9
2.2 Soluções Existentes para ICI	10
2.2.1 Técnicas de Coordenação de Interferência entre Células (ICIC) . .	11
2.2.2 Strict Frequency Reuse (SFR)	12
3 Metodologia e Caracterização do Problema	16
3.1 Metodologia de Avaliação	17
3.1.1 Alocação de recursos na eNB	19
3.2 Reúso Fracionário de Frequência no ns-3	20
3.3 Cenário de Avaliação de Referência	24
3.4 Resultados de Caracterização do Problema	27
3.5 Conclusões da Caracterização do Problema	32
4 Proposta de Solução	33
4.1 Aprendizado de máquina	33
4.1.1 Aprendizado por Reforço	35
4.2 Solução ICIC Proposta com MAB	37
4.2.1 Implementação da Solução no ns-3	39

5	Resultados de Prova de Conceito	42
5.1	Cenário de Avaliação	42
5.2	Resultados	43
6	Conclusões	48
6.1	Produtos Tangíveis do Trabalho	49
	Referências bibliográficas	50

Lista de Figuras

1.1	Crescimento global de usuários de redes móveis.	1
1.2	Tráfego global de redes móveis.	2
1.3	Proporção de artigos por técnica ICIC.	6
2.1	Cenário de ICI.	10
2.2	Técnicas de combate a ICI.	10
2.3	Principais esquemas de ICIC.	12
2.4	Comparação entre Reúso 1, Reúso 3 e HFR,SFR.	13
3.1	Cenário com presença de <i>hotspots</i>	16
3.2	Modelo <i>LTE-EPC</i>	18
3.3	Pilha de protocolos <i>LTE-EPC</i> (plano do usuário).	19
3.4	Algoritmos de ICIC implementados no ns-3.	21
3.5	Exemplo de configuração de potência para cada sub-banda das eNBs no <i>ns-3</i> usando SFR.	22
3.6	Exemplo de configuração de sub-banda eNB 1 no <i>ns-3</i> usando SFR.	23
3.7	Exemplo de configuração de sub-banda eNB 2 no <i>ns-3</i> usando SFR.	24
3.8	Exemplo de configuração de sub-banda eNB 3 no <i>ns-3</i> usando SFR.	25
3.9	Posicionamento dos <i>hotspots</i> nos cenários avaliados.	25
3.10	ECDF da <i>RSRQ</i> - <i>RSRQThreshold</i> 30.	27
3.11	Cenário 1: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 30.	28
3.12	Cenário 2: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 30.	29
3.13	Cenário 1: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 31.	29
3.14	Cenário 2: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 31.	30
3.15	Cenário 1: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 32.	30
3.16	Cenário 2: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 32.	31
4.1	Ciclo do aprendizado por reforço.	35
4.2	Mapeamento das Ações no ns-3.	39
4.3	Uso do método ϵ -greedy.	40
4.4	Avaliando a recompensa pela média do <i>throughput</i>	40
5.1	Posicionamento dos <i>hotspots</i> no cenário 3	42
5.2	Cenário 3: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 30.	44
5.3	Cenário 3: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 31.	45
5.4	Cenário 3: <i>Throughput</i> de célula - <i>RSRQThreshold</i> 32.	46
5.5	ECDF do <i>throughput</i> - <i>RSRQThreshold</i> 30 e taxa oferecida de 2 Mbps.	46

Lista de Tabelas

1.1	Número de artigos por grupo de palavras-chaves.	4
2.1	Mapeamento 3GPP $RSRQ$ x Potência absoluta.	14
3.1	Opções de largura de banda do LTE.	20
3.2	Parâmetros do Experimento.	27
3.3	Redução do <i>Throughput</i> entre os Cenários 1 e 2.	32
4.1	Alocação de Largura de Banda por Ação.	39
5.1	Parâmetros de Alocação de Sub-bandas.	43
5.2	Parâmetros do Experimento.	43
5.3	Ganho de <i>throughput</i> com a aplicação do algoritmo proposto.	47

Lista de Siglas

3GPP *3rd Generation Partnership Project*. 3, 5, 8, 9, 11, 14, 18, 19

CoMP *Coordinated Multi-Point transmission*. 10, 11

e-ICIC *enhanced Inter-Cell Interference Coordination*. 5, 12

ECDF *Empirical Cumulative Distribution Function*. 27, 46

eNB *evolved Node B*. 18, 19, 22, 26

EPC *Evolved Packet Core*. 18

Fe-ICIC *Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination*. 5, 12

FFR *Reúso Fracionário de Frequência*. 3, 7, 8, 48

FTIF *First Tier Interference Free* . 7

FWA *Fixed Wireless Access*. 2

GppCom *Grupo de Pesquisa em Prototipagem Rápida de Soluções para Comunicação*.
33

HFR *Hard Frequency Reuse*. 12, 13

HII *High Interference Indicator*. 5

HSPA *High Speed Packet Access*. 9

ICI *Interferência Co-canal*. 2–4, 7, 9–12, 17, 49

ICIC *Inter-Cell Interference Coordination*. 3–8, 10–12, 17, 21, 34, 48

LTE *Long Term Evolution*. 7, 9, 17, 18, 34

LTE-U *Long Term Evolution Unlicensed* . 33

MAB *Multi-Armed Bandit*. 7, 8, 33, 35, 37–39, 41–49

MDP *Markov Decision Process*. 35

MIMO *Multiple Input Multiple Output*. 3, 9–11

ML *Machine Learning*. 5, 33, 34

MME *Mobility Management Entity*. 18, 19

ns-3 *Network Simulator 3*. 33, 39, 48, 49

OFDM *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*. 19

OFDMA *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*. 9, 17, 19

OI *Overload Indication*. 5

PDSCH *Physical Downlink Shared Channel*. 22

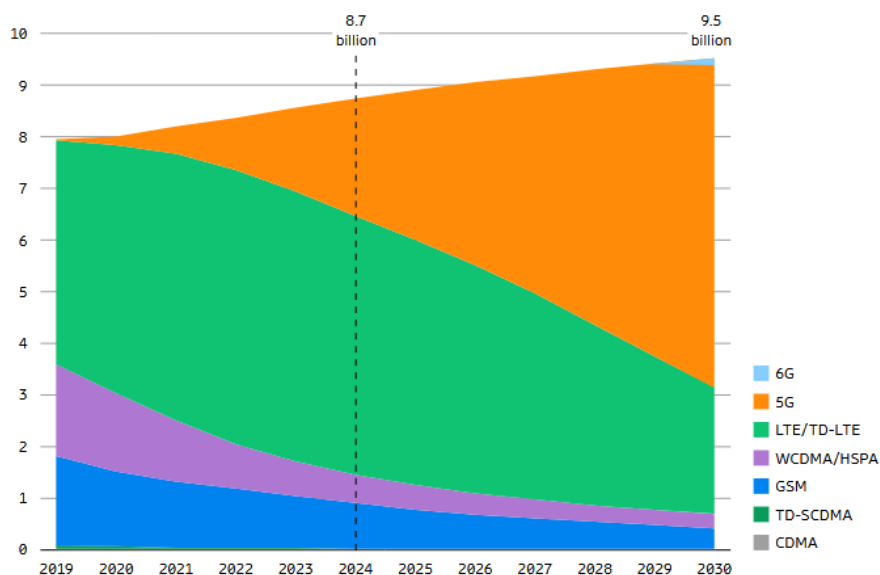
PGW *Packet Data Network Gateway*. 18, 19
PRB *Physical Resource Blocks*. 19, 21, 22, 25, 26, 38, 43
QL *Q-Learning*. 33, 37, 49
QoS *Qualidade de Serviço*. 2, 14, 18
RAN *Rede de Acesso de Rádio*. 18
RB *Resource Block*. 5, 13, 14, 22
RL *Reinforcement Learning*. 33, 35, 37, 39
RNTP *Relative Narrowband Transmit Power*. 5
RS *Reference Signal*. 14
RSRQ *Reference Signal Received Quality*. 14, 15, 20, 26–28
SFR *Strict Frequency Reuse*. 7, 12–14, 16, 17, 21, 22, 37, 48, 49
SGW *Serving Gateway*. 18, 19
SINR *Signal to Interference and Noise Ratio*. 2, 14, 17
UE *equipamento de usuário*. 1, 7, 9, 11, 12, 16, 18, 19
WoS *Web of Science*. 4

Capítulo 1

Introdução

A quantidade de equipamento de usuários (UEs) e dos serviços ofertados pelas novas gerações de redes móveis aumenta e exige cada vez mais largura de banda com o decorrer dos anos. De acordo com a Figura 1.1, extraída do relatório da (Ericsson, 2024), a quantidade de usuários de redes móveis da quinta geração (5G) deverá alcançar os 6,3 bilhões em 2030, representando 67% de todas as assinaturas do ano citado. Além disso, o relatório enfatiza que, apesar da redução do número de usuários das gerações anteriores, 2G, 3G e 4G, decorrente da migração para as gerações mais recentes, a quantidade de usuários ainda é bem significativa, por exemplo, o número de assinaturas do 4G totaliza um pouco menos de 5,1 bilhões até a data de publicação do documento.

Figura 1.1: Crescimento global de usuários de redes móveis.

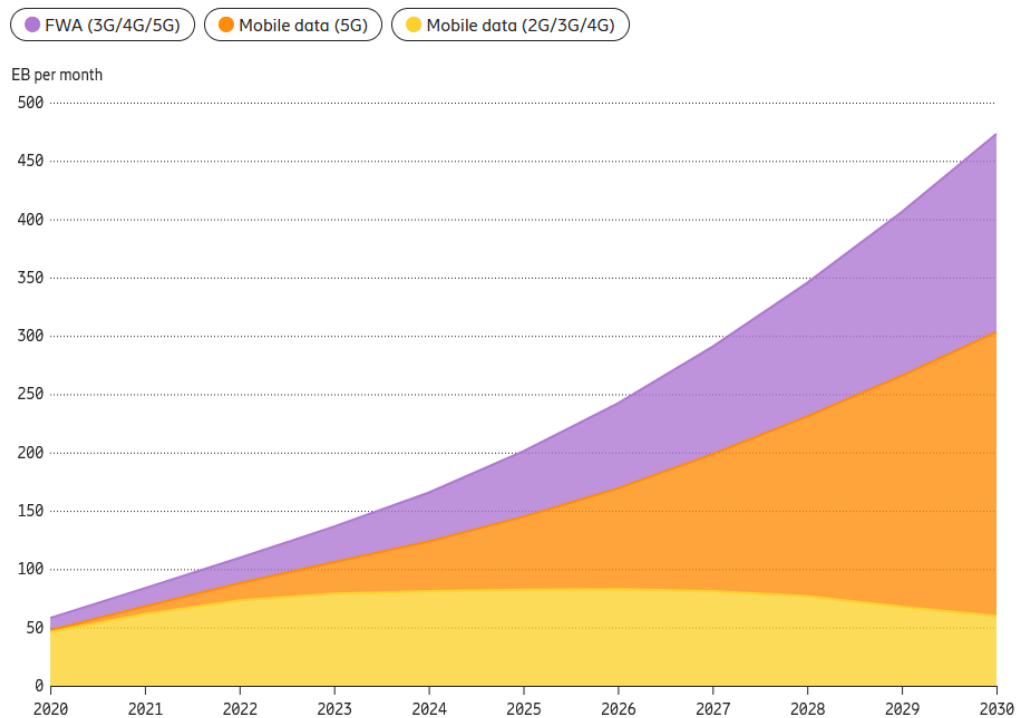


Fonte: (Ericsson, 2024).

Do mesmo modo, é possível notar na Figura 1.2, extraída do (Ericsson, 2025), que o tráfego de dados nas redes de gerações anteriores ao 5G ainda compõe boa parte da previsão de crescimento do tráfego global dos usuários de redes móveis. Esse tráfego

poderá atingir 303 EB por mês no ano de 2030, podendo alcançar 473 EB mensal se contabilizado o tráfego gerado pelo *Fixed Wireless Access* (FWA).

Figura 1.2: Tráfego global de redes móveis.



Fonte: (Ericsson, 2025).

O crescimento exponencial no volume de dados faz com que haja a necessidade de ampliação da capacidade do canal das redes móveis. Segundo o teorema de *Shannon*, a taxa máxima de dados de um canal sem fio é diretamente proporcional à sua largura de banda (TANENBAUM and WETHERALL, 2011), ou seja, o aumento de largura de banda é uma alternativa para atender à demanda crescente por tráfego de dados. Porém, o espectro de frequência é um recurso limitado, exigindo que a maioria dos sistemas modernos de comunicação usem técnicas de reutilização de frequência, geralmente com fator de reuso igual a 1. Essas técnicas fazem com que as células reutilizem todo o espectro disponível, visando obter a máxima eficiência espectral possível.

Diante disso, torna-se vital o gerenciamento da largura de banda disponível, pois essa maneira de reutilização de frequência não traz somente benefícios e deve ser utilizada com cuidado, especialmente em redes com muitas estações bases próximas. Nessa situação, a Interferência Co-canal (ICI), causada pela colisão nas transmissões sem fio que usam o mesmo espectro, pode aumentar de maneira descontrolada. Como consequência, a *Signal to Interference and Noise Ratio* (SINR) diminui, gerando perda de Qualidade de Serviço (QoS), em termos de taxa útil e taxa de erro, principalmente dos usuários que se encontram na borda da estação base. Por outro lado, um bom planejamento do fator de reuso reduz a ICI e aumenta a SINR, levando a melhor QoS, mesmo considerando a

diminuição de largura de banda útil da célula, devido a um reuso de frequência maior que 1 (YASSIN et al., 2017).

Além dos fatores já mencionados, vale ressaltar, também, o surgimento aleatório de aglomerações de usuários, os *hotspots*. Eles são decorrentes de eventos imprevisíveis, como campanhas promocionais, protestos e emergências, ou até mesmo por eventos previsíveis, como festivais, feiras, jogos e feriados. Esses eventos podem provocar picos abruptos de dados em regiões específicas, demandando um tráfego atípico para a rede de telecomunicações planejada.

As empresas responsáveis pelo planejamento e projeto de redes móveis, geralmente, consideram uma demanda média de tráfego fixa para cada região. Ainda que essa estimativa inclua uma margem percentual de segurança, lidar com as variações de tráfego sazonais não é algo trivial, pois uma estimativa superdimensionada poderá resultar em desperdício de recurso de rádio e, em caso contrário, degradação do serviço. A combinação de uma arquitetura rígida com o surgimento inesperado de zonas de alta densidade de usuários pode comprometer a qualidade do sinal e degradar, consideravelmente, a capacidade da rede de atender adequadamente os usuários, principalmente os dispositivos que se encontram distantes da estação rádio base.

1.1 Escopo do Trabalho

Os sistemas *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) têm flexibilidade no gerenciamento de banda e de interferência utilizando, por exemplo, estratégias como *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) *beamforming* (KIMURA et al., 2011), controle de potência, *bandwidth parts* (SOYSAL et al., 2016), uso de *small cells* (CHEN et al., 2016) e o Reuso Fracionário de Frequência (FFR) (KIMURA et al., 2011). Técnicas de coordenação de ICI foram desenvolvidas pelo 3GPP como forma de mitigar os efeitos da interferência, atuando na alocação de banda, na potência de transmissão e na distribuição de usuários por regiões da célula. Dessa forma, a célula é subdividida em regiões distintas e com diferentes fatores de reuso de frequência, larguras de banda e níveis de potência de transmissão. Essas técnicas são chamadas de *Inter-Cell Interference Coordination* (ICIC).

O gerenciamento de interferência torna-se ainda mais complexo em cenários dinâmicos, nos quais surgem picos de tráfego inesperados oriundos dos *hotspots* (HOLMA and TOSKALA, 2011). A aleatoriedade do *hotspot* ocorre tanto em posição quanto em quantidade de dispositivos, bem como em tráfego oferecido por cada dispositivo, sendo o seu surgimento capaz de alterar a capacidade projetada do sistema e aumentar a disputa dos usuários pelos recursos de rádio. Além disso, é possível experimentar um aumento de ICI, principalmente para os usuários que se encontram próximos à borda da célula, que geralmente têm maior degradação do sinal recebido (REGO and SOUSA JR., 2021). É perceptível a necessidade do uso de técnicas capazes de mitigar a interferência co-canal em sistemas de comunicações móveis, além disso, nota-se também que é crescente a busca por soluções inteligentes e adaptativas aplicadas no gerenciamento de recursos de rádio. Diante do contexto, diversas pesquisas explorando as técnicas de ICIC e estratégias de aprendizado de máquina estão sendo

desenvolvidas. A seção a seguir reforça a importância do tema desta dissertação ao apresentar alguns trabalhos relacionados com o desta proposta.

1.2 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta uma pesquisa bibliométrica por artigos relacionados às técnicas de mitigação de ICI, feita nas bases científicas *Scopus* e *Web of Science* (WoS). A Subseção 1.2.1 quantifica a relevância do tema pelo número de trabalhos encontrados, enquanto a Subseção 1.2.2 apresenta as contribuições dos principais artigos relacionados com a proposta central desta dissertação, delimitando o estado da arte em técnicas de ICIC.

1.2.1 Análise Quantitativa

A análise quantitativa é materializada pela exposição da quantidade de artigos, fruto da busca por palavras-chave nas bases de dados *Scopus* e WoS, visando quantificar a relevância do tema abordado nesta dissertação. Como mostra a Tabela 1.1, a estratégia de busca foi definida em quatro grupos de palavras-chave e escopo.

Tabela 1.1: Número de artigos por grupo de palavras-chaves.

Grupo	Escopo da Busca/Palavras-Chaves	Scopus	WoS
#1	Title("ICIC") OR	699	471
	Title("Inter-Cell Interference Coordination") OR Title("fractional frequency reuse")		
#2	Title("ICIC") OR	382	383
	Title("Inter-Cell Interference Coordination") OR Title("fractional frequency reuse") AND Abstract("Performance")		
#3	Title("ICIC") OR	4	51
	Title("Inter-Cell Interference Coordination") OR Title("fractional frequency reuse") AND Abstract("Performance") AND All fields("ns-3")		
#4	Title("ICIC") OR	20	67
	Title("Inter-Cell Interference Coordination") AND All fields("Machine Learning")		

A busca do Grupo #1 retornou o maior número de artigos, tendo em vista que as palavras-chave não restringem a busca a um aspecto específico sobre ICIC, retornando publicações de assuntos dispersos ao tema desta dissertação.

Refinando a pesquisa ao incluir o termo *Performance* no campo *Abstract* dos artigos (Grupo #2), o número de publicações foi menor (menos 45% na *Scopus* e 18% na *WoS*), pois vários artigos do tipo *survey* foram excluídos, retornando somente os artigos com algum estudo de desempenho sendo explorado. Além disso, a redução evidencia, também, que boa parte dos trabalhos que retornaram dessa busca não foca em desempenho, ou seja, limita a aplicação em cenários reais.

O objetivo do Grupo #3 é restringir ainda mais a busca ao incluir o termo *ns-3*, simulador utilizado neste trabalho. A quantidade de artigos reduziu consideravelmente, especialmente na *Scopus*, com 4 trabalhos, em que somente um deles versa sobre *hotspot*. Pelos resultados dessa estratégia, nota-se que existe uma escassez de pesquisas que abordem ICIC simuladas no *ns-3*.

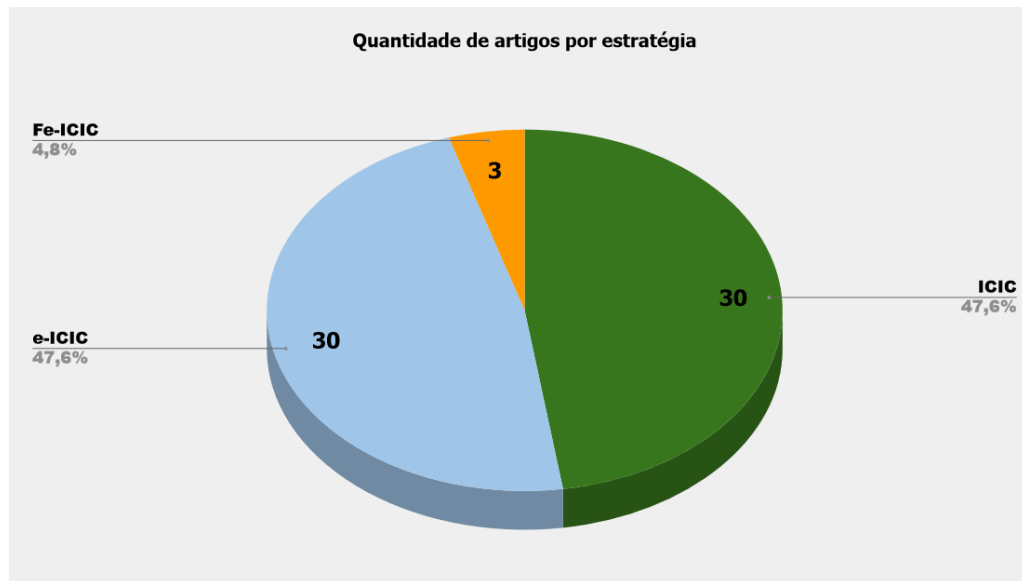
No Grupo # 4, o termo *Machine Learning* no campo "*All Fields*" foi incluído, e a quantidade de artigos teve uma redução bastante considerável, comparada ao Grupo # 1. Na *Scopus*, somente 1 dos 20 trabalhos versa sobre *hotspot*. Os resultados dessa estratégia mostram uma oportunidade de contribuição ao desenvolver uma pesquisa focada nas técnicas ICIC gerenciadas por um algoritmo de *Machine Learning* (ML) em cenários dinâmicos.

Os esquemas ICIC proporcionam a capacidade de distribuição de *Resource Blocks* (RBs) conforme demanda dos usuários por setor da célula, ou seja, há uma coordenação das subportadoras e níveis de potência entre as células adjacentes (HAMZA et al., 2013). No domínio da frequência, essa coordenação no *downlink* usa a informação de *Relative Narrowband Transmit Power* (RNTP), disponível a cada 200 ms. No *uplink* são utilizadas mensagens, a cada 20 ms, que indicam o nível de interferência e se há sobrecarga, respectivamente, pelo *High Interference Indicator* (HII) e pelo *Overload Indication* (OI) (HASSAN and ASSAAD, 2009).

Outros esquemas de ICIC exploram a dimensão temporal. O *enhanced Inter-Cell Interference Coordination* (e-ICIC) silencia *slots* em *downlink* de algumas células ou setores para evitar interferência co-canal, enquanto o *Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination* (Fe-ICIC) faz o mesmo para *uplink*.

A Figura 1.3 mostra a quantidade de artigos na base *WoS* para cada tipo de algoritmo de ICIC. É possível observar um número de artigos proporcional ao tempo que cada técnica foi proposta pelo 3GPP: ICIC foi proposto no *Release 8/9*, o e-ICIC no *Release 10* e o Fe-ICIC no *Release 11*. Vale a pena ressaltar que a equivalência no número de citações do esquema de coordenação de interferência entre células melhoradas (e-ICIC) e do esquema ICIC pode ser explicada pelo fato de que a maioria dos artigos aborda ambos os esquemas.

Figura 1.3: Proporção de artigos por técnica ICIC.



Fonte: Próprio autor.

Este trabalho explora o ICIC devido à sua simplicidade de implementação em sistemas 4G e 5G, bem como na escassez de trabalhos que explorem a distribuição de banda em cenários com *hotspot*.

1.2.2 Análise Qualitativa

Para essa subseção, foram selecionados os artigos diretamente relacionados a ICIC utilizando reuso de frequência com alocação dinâmica de banda, com e sem o uso de técnicas de aprendizado de máquina.

Os autores de (NARVÁEZ and PÉREZ, 2018) expõem um trabalho focado em alcançar redes auto-organizáveis usando técnicas de aprendizado de máquina (aprendizagem por reforço, *Q-Learning*, aprendizagem estatística, SVM, e classificação de padrões) juntamente às técnicas de reuso de frequência. O trabalho traz uma comparação das técnicas de reuso de frequência e explana como cada algoritmo de aprendizado de máquina pode ser aplicado a ICIC. Por fim, indicam a necessidade de criar um fluxograma do cenário de telecomunicações alvo da solução, definindo os parâmetros referentes à quantidade de usuários, potências, disposição das células, por exemplo, antes de escolher a técnica de aprendizado. Contribuindo com as ideias expostas, a solução proposta utiliza uma das técnicas de reuso de frequência particionada gerenciada por um algoritmo de aprendizado de máquina que não foi citado em (NARVÁEZ and PÉREZ, 2018).

O artigo (KIMURA et al., 2011) traz como proposta um novo método ICIC de coordenação dinâmica intercelular de interferência descentralizada, que pode alterar as bandas de borda da célula dinamicamente, levando em consideração a classificação do número de usuários e o uso da interface X2 para troca de informações entre células. De

forma semelhante, este trabalho propõe a alocação dinâmica de banda entre borda e centro da célula sem a troca de informações entre as estações, ou seja, com um menor nível de complexidade de sinalização.

O trabalho (WU et al., 2017) propõe um novo esquema de reuso e alocação de frequência chamado de *First Tier Interference Free* (*First Tier Interference Free* (FTIF)). A ideia é setorizar as células, sem precisar reduzir a potência de transmissão, eliminando a região de interferência entre a célula adjacente e a célula do centro. Seguindo essa linha de atuação, a abordagem desta dissertação fará uso de diferentes níveis de potência resultando em duas regiões distintas, centro e borda, de cobertura, mitigando a interferência e mantendo um maior alcance de sinal.

Em (YASSIN et al., 2017), os autores apresentam um *survey* acompanhado de uma análise de desempenho de técnicas de ICIC para diferentes condições de rádio e cargas da rede. O artigo apresenta uma análise comparativa entre o FFR e o *Soft Frequency Reuse*, discutindo a natureza estática de cada algoritmo e seus desempenhos perante aos reúsos 1 e 3. Por meio de simulação, os autores mostram o desempenho de cada técnica em função de indicadores, como: eficiência espectral, eficiência energética, *throughput* médio por zona, índice de equidade de *throughput* e satisfação do UE. Expandindo a proposta do trabalho (YASSIN et al., 2017), esta dissertação adota uma técnica ICIC que faz uso de diferentes fatores de reuso de frequência em uma mesma célula visando alcançar maiores valores de *throughput* em ambientes com variação na quantidade de usuários e de seus posicionamentos.

Por fim, os autores de (REGO and SOUSA JR., 2021) abordam a interferência entre células em cenários dinâmicos com e sem a presença de *hotspots*, avaliando os danos que eles causam no desempenho do sistema *Long Term Evolution* (LTE). Uma solução utilizando aprendizado de máquina é dedicada ao ajuste da distribuição de usuários entre as diferentes zonas de reuso da célula. A proposta é baseada em *Q-Learning*, que define dinamicamente o parâmetro de distribuição de usuários entre centro e borda da célula, conforme o surgimento dos *hotspots*. Em continuidade às ideias de (REGO and SOUSA JR., 2021), o presente trabalho implementa outro algoritmo de aprendizado de máquina, o *MAB*, que possui um menor nível de complexidade, se comparado ao *Q-Learning*, além disso, adota a estratégia de alocação de diferentes distribuições de banda como parâmetro de gerenciamento.

Apesar das publicações identificadas, a literatura é carente de trabalhos sobre técnicas de ICIC que façam alocação de banda dinâmica entre centro e borda da célula em cenários com presença de *hotspot*. Contribuir para o preenchimento dessa lacuna é o principal objetivo desta dissertação. Esse trabalho aborda o uso de um dos algoritmos FFR, o *Strict Frequency Reuse* (SFR), alocando diferentes distribuições de banda entre centro e borda das células, com o objetivo de mitigar os efeitos da ICI agravados pela presença dos *hotspots*. Além disso, será proposto o uso da técnica de aprendizado por reforço, *Multi-Armed Bandit* (MAB), para definição dinâmica e autônoma da distribuição de banda do ICIC, como forma de mitigar os efeitos dos *hotspots* e de seu dinamismo. O objetivo final é obter melhores valores de taxa útil, comprovados por meio de investigações utilizando o simulador de redes *ns-3*.

1.3 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral desse trabalho é propor uma estratégia adaptativa de alocação de largura de banda em um sistema de comunicação móvel da família do 3GPP utilizando FFR. O foco principal é a aplicação de aprendizado por reforço, especificamente o MAB, na parametrização autônoma dos recursos de banda, conforme o dinamismo dos *hotspots*, visando reduzir a degradação de *throughput* decorrente da demanda inesperada de tráfego da rede.

Como objetivos específicos, este trabalho propõe as perguntas a seguir, que serão discutidas no final desta dissertação:

- Como a presença de *hotspots* influenciam no desempenho do sistema? Existe alguma variação no nível de criticidade dependendo do seu posicionamento?
- Existe algum ganho de desempenho ao se aplicar técnicas de ICIC que utilizam FFR alocando banda de forma dinâmica entre borda e centro da célula?
- É possível aplicar o algoritmo MAB na alocação de banda de forma autônoma para evitar degradação de desempenho devido ao dinamismo dos *hotspots*?
- Existe variação no desempenho do sistema a depender da taxa de dados ofertada? A aplicação do MAB consegue superar tal variação?

1.4 Organização da Dissertação

Este documento está organizado como a seguir.

Enquanto no Capítulo 2 é feita a abordagem do problema e apresentadas as soluções já existentes, no Capítulo 3 são apresentados o ambiente de simulação e os módulos necessários para caracterizar o problema tecnicamente e avaliar o desempenho da solução proposta.

O Capítulo 4 traz uma discussão sobre a aplicação de aprendizado de máquina em problemas de gerência de recursos de rádio e apresenta a proposta de solução ICIC utilizando o MAB.

O cenário da avaliação de prova de conceito e os resultados obtidos com a solução proposta são apresentados no Capítulo 5.

Por fim, as conclusões, os trabalhos produzidos ao longo do mestrado e as perspectivas de trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6.

Capítulo 2

Exposição do Problema e Soluções Existentes

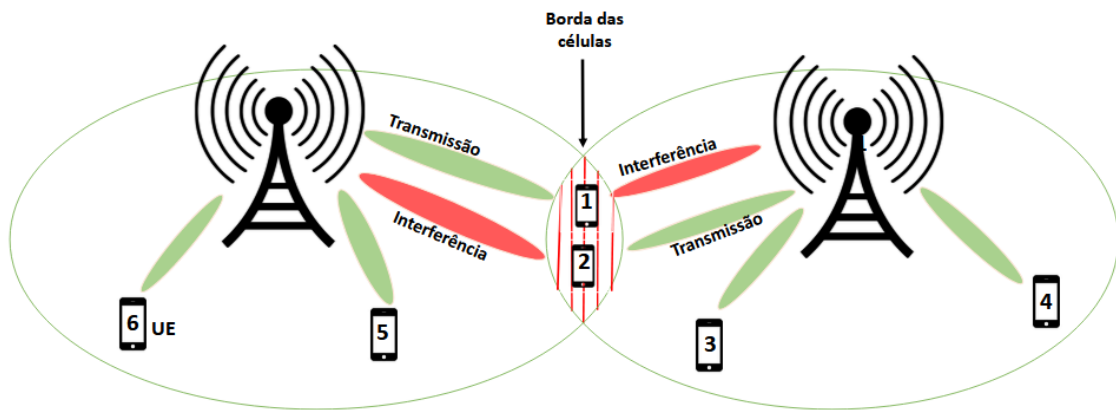
2.1 ICI no Long-Term Evolution (LTE)

O LTE, comumente chamado de 4G, surgiu em meados de 2004 com a definição de suas metas pelo 3GPP e tendo como principal objetivo superar as tecnologias anteriores, principalmente a *High Speed Packet Access* (HSPA), em relação a *throughput* de usuário, latência e consumo de potência (HOLMA et al., 2016). O padrão foi aprovado em 2007, mas apenas em 2010 é que teve suas primeiras redes comerciais colocadas em operação (HOLMA and TOSKALA, 2011).

Em sua versão inicial, dependendo da arquitetura da rede e do arranjo de antenas MIMO aplicado, o LTE pode atingir 300 Mbps para o *downlink* e 75 Mbps para o *uplink* (HOLMA and TOSKALA, 2012). Um grande dilema dos sistemas de comunicações móveis é conseguir gerenciar o uso dos recursos de rádio disponíveis, que são escassos, especialmente na presença de ICI, que pode degradar fortemente o desempenho do sistema. A ICI é decorrente do reuso de frequência das células adjacentes, que, por exemplo, pode ser feito por todas as células (reuso 1) ou a cada 3 células (reuso 3). Ao utilizar o reuso 1, células adjacentes interferem entre si, pois usam todo o espectro disponível. Com o reuso 3, o espectro destinado a cada célula é um terço do total, com a vantagem de distanciar células que compartilham a mesma porção do espectro, consequentemente, diminuindo a ICI ao preço de menor disponibilidade de espectro por célula.

Apesar dos sistemas de comunicações móveis contemporâneos, a partir do 4G, usarem uma estratégia de múltiplo acesso espectralmente eficiente como o *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) (HOLMA and TOSKALA, 2012), a ICI ainda é um ponto sensível quando se trata do gerenciamento eficiente de recursos de rádio. A Figura 2.1 apresenta um exemplo de cenário com interferência entre células, região em vermelho. A ICI é mais danosa à medida que os UEs (i.e., os usuários dos sistemas 3GPP) se aproximam da borda da célula. Um UE nessa região recebe menor nível de potência da estação base, devido à distância, e também está sujeito a maior nível de interferência por estar mais perto da estação base vizinha.

Figura 2.1: Cenário de ICI.

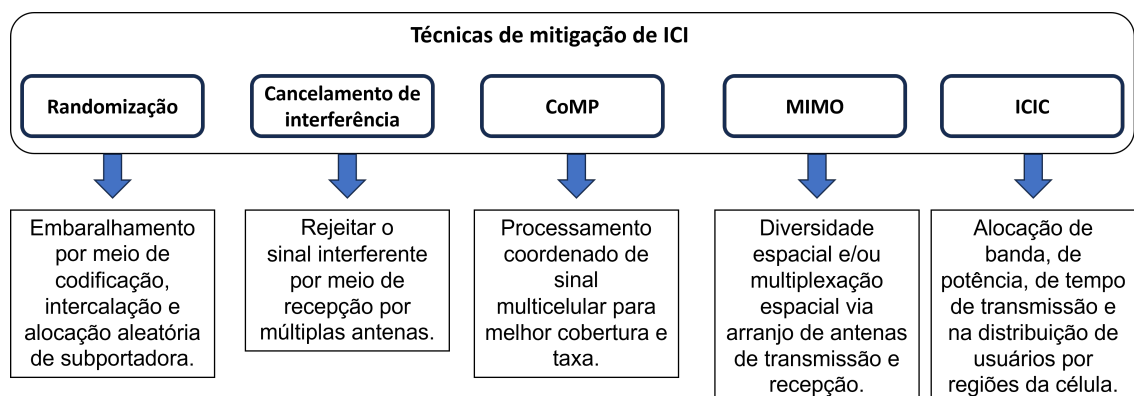


Fonte: Próprio autor.

2.2 Soluções Existentes para ICI

Partindo do princípio que existe a necessidade de investigação das técnicas de mitigação ICI, são encontradas na literatura, por exemplo (YASSIN et al., 2017), (NARVÁEZ and PÉREZ, 2018) e (REGO and SOUSA JR., 2021), diversas estratégias de coordenação de transmissão das múltiplas células em um sistema de comunicações móveis. Como ilustrado na Figura 2.2, inspirada em (REGO and SOUSA JR., 2021) e (XIAO et al., 2012), as principais estratégias encontradas foram: (i) randomização; (ii) cancelamento/rejeição de interferência; (iii) *Coordinated Multi-Point transmission* (CoMP); (iv) MIMO; e, finalmente, a ICIC, que é o alvo deste trabalho.

Figura 2.2: Técnicas de combate a ICI.



Fonte: Próprio autor.

A técnica de randomização (3GPP, 2024) baseia-se no embaralhamento dos sinais por meio de codificação, intercalação e alocação aleatória de subportadoras. Cada sinal

transmitido utiliza um esquema de codificação individual e exclusivo de cada célula, sem a necessidade de expansão ou gerência especial da largura de banda. Cada célula faz o uso de um intercalador específico e cada UE decodifica o sinal usando o padrão de intercalação da célula que está estabelecendo o seu serviço. A alocação aleatória de subportadoras, espalhadas por toda a banda, gera um ganho de diversidade que diminui a probabilidade de colisão de subportadoras (CHO et al., 2010).

A técnica de cancelamento/rejeição de interferência utiliza a correlação de interferência co-canal nos sinais recebidos em múltiplas antenas como forma de rejeitar o sinal interferente, mas a complexidade do receptor ainda é um desafio (CHO et al., 2010).

A técnica CoMP visa otimizar a cobertura e o *throughput* do sistema, especialmente para os usuários da borda, via esquema de processamento coordenado de sinal multicelular (KOSTA et al., 2013).

Múltiplas antenas na transmissão e recepção de sinais, denominadas MIMO, vêm sendo bastante empregadas em sistemas de comunicações móveis para obter aumento de cobertura (via diversidade espacial) e taxa de transmissão (via multiplexação espacial). Contudo, um grande desafio é a estimação de canal necessária para que o MIMO atinja seu apogeu de ganho (CHO et al., 2010).

Por fim, os sistemas 3GPP possibilitam o uso de técnicas de coordenação de ICI, que podem fazer alocação de banda particionada, subdividindo a célula em regiões distintas com diferentes fatores de reuso de frequência, larguras de banda e níveis de potência de transmissão, as técnicas de ICIC. Elas são o principal objeto desta proposta de dissertação de mestrado.

2.2.1 Técnicas de Coordenação de Interferência entre Células (ICIC)

Por padrão, sistemas do 3GPP utilizam todo o espectro de frequência disponível em cada célula (fator de reuso 1), com o objetivo de obter a maior taxa de transmissão possível por área. Contudo, como mencionado anteriormente, essa estratégia pode resultar em alto nível de interferência entre células adjacentes e, em especial, para UEs na borda da célula.

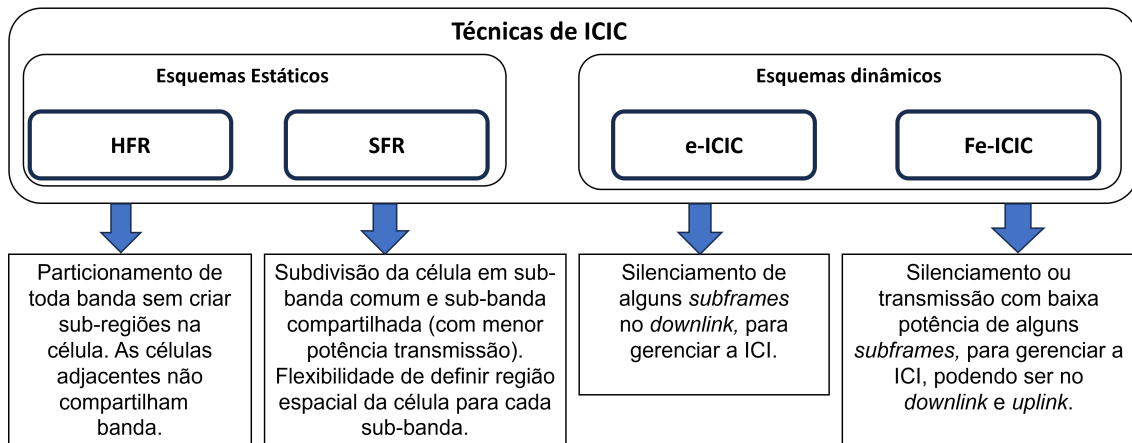
Assim, a partir do *Release 8*, o 3GPP padronizou uma interface de comunicação entre células (interface X2) que possibilita a troca de sinalização de forma rápida, sem a necessidade de usar o núcleo da rede. Isso deu início a uma família de técnicas de coordenação de interferência entre células (BOUJELBEN et al., 2014). A Figura 2.3 ilustra as principais técnicas, classificadas em duas categorias: ICIC estático e ICIC dinâmico (HASSAN and ASSAAD, 2009).

Nos esquemas ICIC estáticos, os recursos de rádio destinados a cada célula são definidos na etapa de planejamento, estabelecendo um ajuste de longo prazo ao decorrer da operação da rede. Assim, não existe a necessidade de cooperação entre as células adjacentes, pois a cada célula são destinadas larguras de banda, com potências correspondentes, a serem utilizadas em determinada região da célula (e.g., região do centro ou região de borda), que não se modificam ao passar do tempo (HASSAN and ASSAAD, 2009).

Os esquemas ICIC dinâmicos, diferentes dos estáticos, necessitam da troca de informações entre as estações bases adjacentes via interface X2. Eles exploram

o particionamento de recursos de rádio no tempo, proporcionando a capacidade de alocar alguns *subframes* com nível de potência adaptado, reduzido ou nulo, por setor, dependendo das informações recebidas dos UEs (HAMZA et al., 2013). A transmissão com menor potência e, até mesmo, o silenciamento completo do *subframe* ao longo do tempo, podem levar à redução de ICI.

Figura 2.3: Principais esquemas de ICIC.



Fonte: Próprio autor.

Os principais esquemas ICIC dinâmicos são o e-ICIC, que silencia *slots* em *downlink* de algumas células ou setores para evitar ICI e o Fe-ICIC, que também silencia *slots* ou os transmite com menor potência, em *uplink* ou *downlink*. Entre os diversos esquemas ICIC estáticos, o *Hard Frequency Reuse* (HFR) particiona toda a banda disponível, de modo que as células adjacentes não utilizem os mesmos recursos de rádio (e.g., utilizando reuso 3). Já o SFR faz o reuso de banda fracionada criando sub-regiões dentro de cada célula com potência de transmissão e reusos distintos.

A solução apresentada nesta dissertação se edifica na proposta de adaptação de um dos parâmetros do SFR utilizando aprendizado de máquina, como forma de manter sua simplicidade e ganhar em adaptabilidade às mudanças de rede de comunicações (variação do canal de comunicação, da concentração de UEs e do tráfego oferecido, por exemplo).

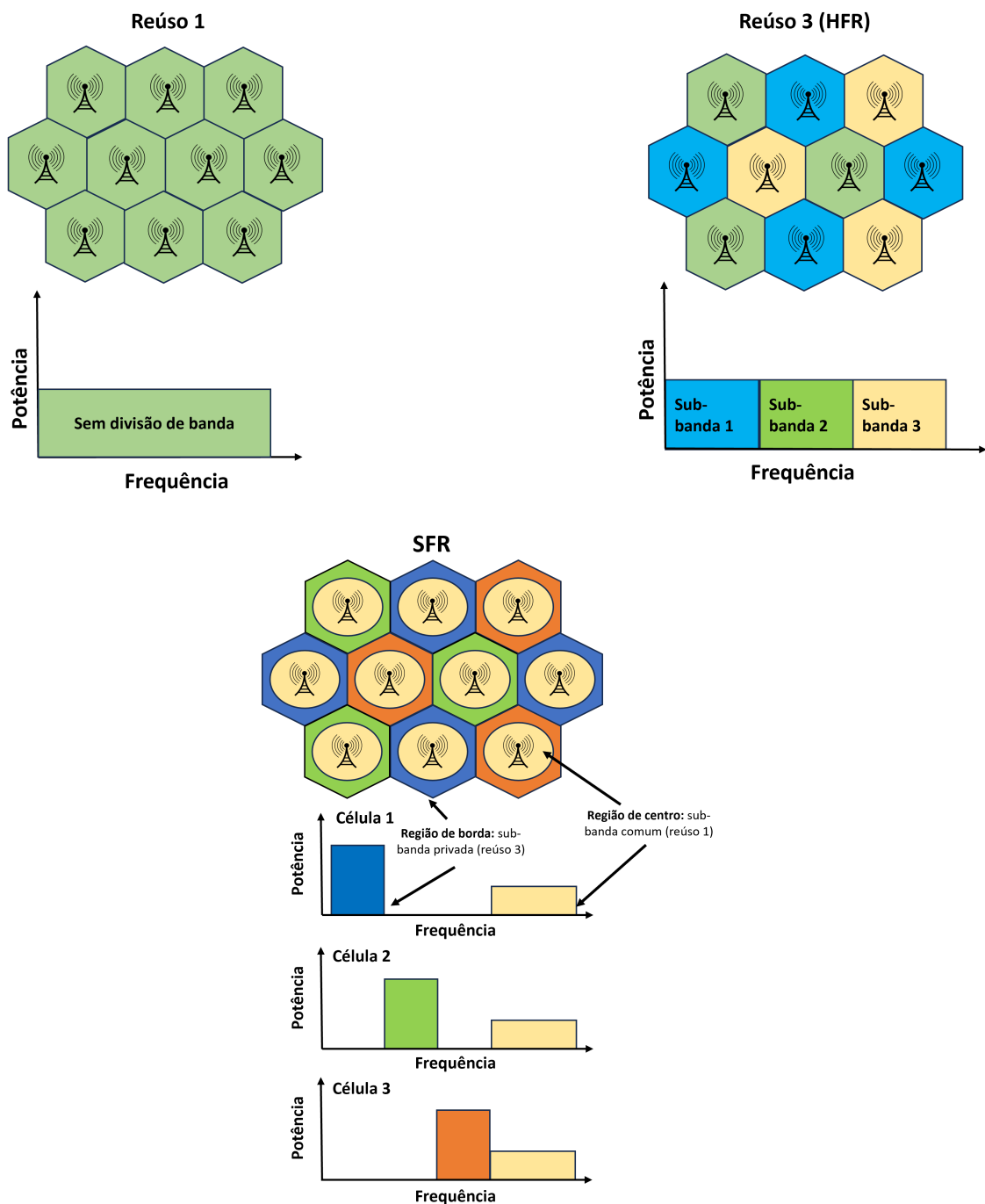
2.2.2 Strict Frequency Reuse (SFR)

O esquema *Strict Frequency Reuse* (SFR) consiste no particionamento da banda total do sistema em uma sub-banda central compartilhada e em uma sub-banda privada de borda, com larguras de banda e potências distintas.

A região do centro possui fator de reuso 1, enquanto que a região da borda da célula possui fator de reuso maior que 1. Geralmente, a sub-banda da borda da célula utiliza um fator de reuso k , geralmente $k = 3$, mantendo o mesmo nível de potência de transmissão para todos os setores. O comportamento do SFR pode ser ilustrado ao comparar as três partes da Figura 2.4, que apresentam 10 células divididas em *clusters* com 3 células. Enquanto as duas partes de cima da figura representam os reusos 1 e 3, a parte de baixo

apresenta o SFR. Note que o HFR é o reuso 3, com células transmitindo com a mesma potência e com a mesma largura de banda (quantidade de RBs). No SFR, tanto a potência quanto a largura de banda das duas regiões da célula podem ser diferentes.

Figura 2.4: Comparação entre Reuso 1, Reuso 3 e HFR,SFR.



Fonte: Próprio autor.

O particionamento da largura de banda total entre as sub-bandas de centro e da borda

é definido no momento do planejamento da rede. Embora o fator k maior que 1 aplicado à sub-banda de borda resulte em um *throughput* inferior, se comparado ao fator unitário, poderá resultar em ganho de SINR e, conseqüentemente, em uma melhor qualidade de canal, devido à maior potência de transmissão e menor nível de interferência, já que as estações vizinhas interferentes se encontram mais distantes entre si. Essa melhor qualidade de canal poderá ser traduzida em um melhor nível de QoS, devido à menor taxa de erro, e em uma maior taxa de entrega de pacotes, principalmente para os usuários de borda de célula (CHO et al., 2010). Adicionalmente, no SFR, a sub-banda compartilhada possui nível de potência de transmissão reduzido, visando mitigar a interferência nas células vizinhas, já que emprega fator de reuso 1.

É importante frisar que a escolha de alocação dos usuários entre as duas sub-bandas é feita baseada no indicador de qualidade do sinal conhecido como *Reference Signal Received Quality* (RSRQ). O RSRQ, baseado no sinal de referência (*Reference Signal* (RS)), leva em consideração no seu cálculo as características dos sinais interferentes, por exemplo, nível de ruído, RBs ocupadas e potência (ns-3, 2022b). Além disso, em sistemas de comunicações móveis baseados nos padrões da família 3GPP, é definido um limiar denominado *RsrqThreshold*. Esse limiar é utilizado para comparar o valor de RSRQ do usuário e o direcionar para a sub-banda privada caso o seu valor de RSRQ esteja abaixo do limite pré-definido (*RsrqThreshold*), caso contrário, o usuário é alocado para a região de sub-banda comum (ns-3, 2022b).

Este trabalho assume os valores RSRQ definidos na *Release 8* do 3GPP (3GPP, 2021; 3GPP, 2017; ns-3, 2019), de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Mapeamento 3GPP RSRQ x Potência absoluta.

<i>RSRQ</i>	De	Até	<i>RSRQ</i>	De	Até	Unidade
00	$-\infty$	-19.5	18	-11.0	-10.5	dB
01	-19.5	-19.0	19	-10.5	-10.0	dB
02	-19.0	-18.5	20	-10.0	-9.5	dB
03	-18.5	-18.0	21	-9.5	-9.0	dB
04	-18.0	-17.5	22	-9.0	-8.5	dB
05	-17.5	-17.0	23	-8.5	-8.0	dB
06	-17.0	-16.5	24	-8.0	-7.5	dB
07	-16.5	-16.0	25	-7.5	-7.0	dB
08	-16.0	-15.5	26	-7.0	-6.5	dB
09	-15.5	-15.0	27	-6.5	-6.0	dB
10	-15.0	-14.5	28	-6.0	-5.5	dB
11	-14.5	-14.0	29	-5.5	-5.0	dB
12	-14.0	-13.5	30	-5.0	-4.5	dB
13	-13.5	-13.0	31	-4.5	-4.0	dB
14	-13.0	-12.5	32	-4.0	-3.5	dB
15	-12.5	-12.0	33	-3.5	-3.0	dB
16	-12.0	-11.5	34	-3.0	∞	dB
17	-11.5	-11.0	-	-	-	-

Assim, considerando que os valores 30, 31 e 32 sejam utilizados como limiar de *RsrqThreshold*. Conforme a tabela, utilizar o limiar 30 significa que usuários com RSRQ menores que -4,5 dB são alocados na borda. Os usuários com RSRQ maiores usam os recursos de rádio da região central. A mesma regra é utilizada ao definir os limiares como 31 e 32 que são -4 dB e -3,5 dB, respectivamente.

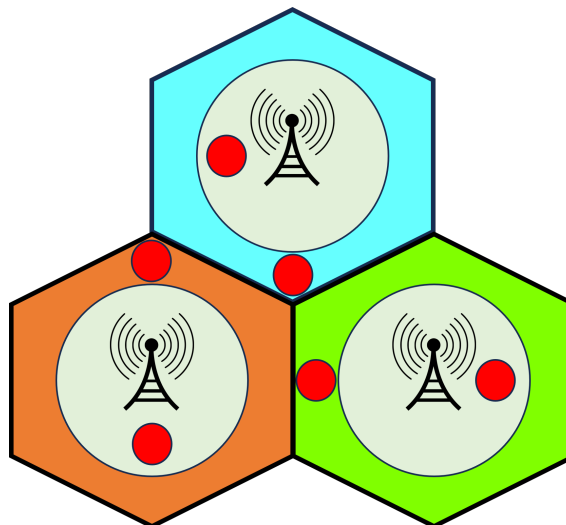
Capítulo 3

Metodologia de Investigação e Caracterização do Problema

Um dos fatores investigados neste trabalho é a demanda de tráfego que surge de aglomerações de usuários (*hotspots*) decorrentes, por exemplo, de eventos como jogos de futebol, festas e manifestações. Essa demanda pode resultar na redução do desempenho do sistema e, geralmente, acontece aleatoriamente em quantidade de dispositivos e posicionamento (HOLMA et al., 2016). O surgimento inesperado desses grupos de UEs aumenta a disputa por recursos de rádio, antes projetados para uma menor quantidade de equipamentos conectados na região. Além disso, essa situação aumenta a probabilidade de ocorrer interferência entre células, principalmente para os usuários que se encontram próximos à borda da célula.

Então, vale ressaltar que a degradação do sistema está correlacionada com a quantidade de dispositivos nos *hotspots*, assim como a sua localização (REGO and SOUSA JR., 2021). A Figura 3.1 ilustra um cenário com a aplicação do SFR com presença de *hotspots*.

Figura 3.1: Cenário com presença de *hotspots*.



Fonte: Próprio autor.

A região de sub-banda compartilhada da célula, representada por um círculo na Figura 3.1, apresenta a área de menor cobertura devido ao controle do nível de potência de transmissão. Os *hotspots*, representados por pequenos círculos vermelhos, afetam o desempenho do sistema de forma significativa, mesmo se localizados nesta região.

Por outro lado, a borda da célula, com ou sem a presença de *hotspot*, é uma área delicada para o sistema, tendo em vista que há interferência ocasionada por células adjacentes, situação agravada pelos *hotspots*. Com o SFR, a região da borda da célula é privilegiada por ter banda privada (com menor interferência) e maior nível de potência de transmissão. Contudo, a banda total utilizada para transmissão nesta região é reduzida a depender do fator de reuso.

Assim, o gerenciamento dos recursos de rádio e o controle eficiente da interferência entre células tornam-se mais complexos em redes com a presença dos *hotspots*. Para tal cenário, há evidências do benefício da aplicação de técnicas ICIC, especificamente as que fazem reuso fracionário de frequência (como o SFR), visando atingir o compromisso entre capacidade de transmissão (taxa de dados) e qualidade de serviço (melhor SINR e baixa taxa de erro) (REGO and SOUSA JR., 2021).

Outro aspecto a ser considerado é o caráter dinâmico da formação de um *hotspot*, considerando seu posicionamento e quantidade de dispositivos. Tal dinamismo eleva o desafio do gerenciamento dos recursos de rádio e é um dos aspectos que diferenciam esta proposta de dissertação dos trabalhos encontrados na literatura.

Esse trabalho encontra sua contribuição ao investigar e propor uma solução para mitigar a ICI agravada pela presença dos *hotspots*. A ideia central é propor autonomia paramétrica ao SFR, alocando diferentes distribuições de banda entre centro e borda das células conforme a demanda do cenário. O objetivo técnico é maximizar o *throughput* do sistema em diferentes configurações de distribuição de usuários por meio de técnicas de aprendizado por reforço. O valor agregado da solução proposta é mensurado por meio de experimentos utilizando o simulador de redes *ns-3*, que é o assunto da seção subsequente.

3.1 Metodologia de Avaliação

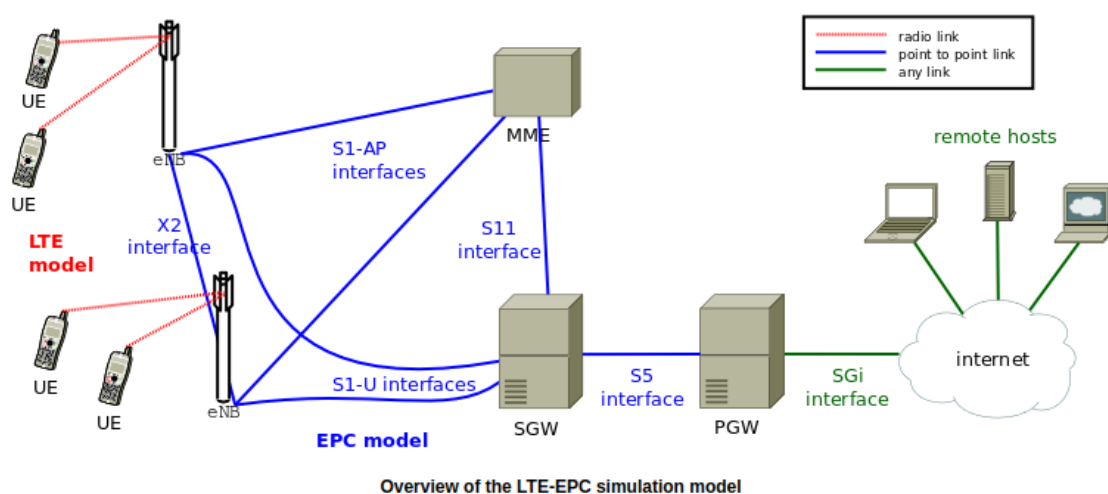
A concepção de novas tecnologias ou o aperfeiçoamento de protocolos já utilizados em redes móveis dependem de prototipagem por simulação. Na fase de concepção, é possível testar variantes de protocolos existentes e novos protocolos em situações de estresse como alta carga ou situações críticas do canal sem fio. Na etapa de implantação da rede, por meio de simulação, é possível efetuar possíveis correções de projeto antes da instalação da rede ou até mesmo depois da rede instalada. Essas correções podem evitar o alto custo da implantação de uma rede com a configuração inadequada ou a perda de clientes devido à rede não operar como desejado, por exemplo, depois de uma mudança no ambiente de propagação decorrente das novas construções.

A metodologia de prototipagem deste trabalho é baseada em simulação computacional de um cenário multicelular de uma rede de comunicação baseada em OFDMA. Por motivos de disponibilidade de código e tempo de simulação, foi utilizado o sistema 4G LTE, contudo, todos os problemas investigados e soluções propostas se estendem às redes 5G.

Existem vários simuladores de redes móveis, mas para esta dissertação, optou-se pelo *Network Simulator* (ns-3), devido a algumas de suas características. Ele é um simulador de acesso livre, gratuito e bastante utilizado em pesquisas no meio acadêmico e industrial de telecomunicações. Além disso, possui uma comunidade ativa e colaboradora na solução de problemas e discussões de relatos ocorridos com o uso do código e possíveis melhorias. Por ser um simulador muito popular, a sua comunidade realiza encontros anuais em forma de congresso para compartilhar novos módulos e experiências com o uso do simulador.

A documentação do ns-3 cita os modelos LTE e *Evolved Packet Core* (EPC) como sendo os principais componentes modelados para o sistema 4G (ns-3, 2022c). Como ilustrado na Figura 3.2, o módulo LTE é responsável pela modelagem sistêmica da Rede de Acesso de Rádio (RAN) do 4G (a *evolved Node B* (eNB)), envolvendo aspectos de toda a pilha de protocolos definida pelo 3GPP. Além de vários modelos de canal, o ns-3 oferece suporte para diversos algoritmos de gerenciamento de recursos de rádio, agendamento de pacotes com reconhecimento de QoS, coordenação de interferência intercelular e acesso dinâmico ao espectro. O módulo EPC é responsável pela conectividade dos UEs com serviços de telefonia e internet por meio das eNBs. Pelo EPC é possível simular conectividade IP fim-a-fim entre UEs LTE e *hosts* remotos de aplicação.

Figura 3.2: Modelo *LTE-EPC*.



Fonte: (ns-3, 2022c).

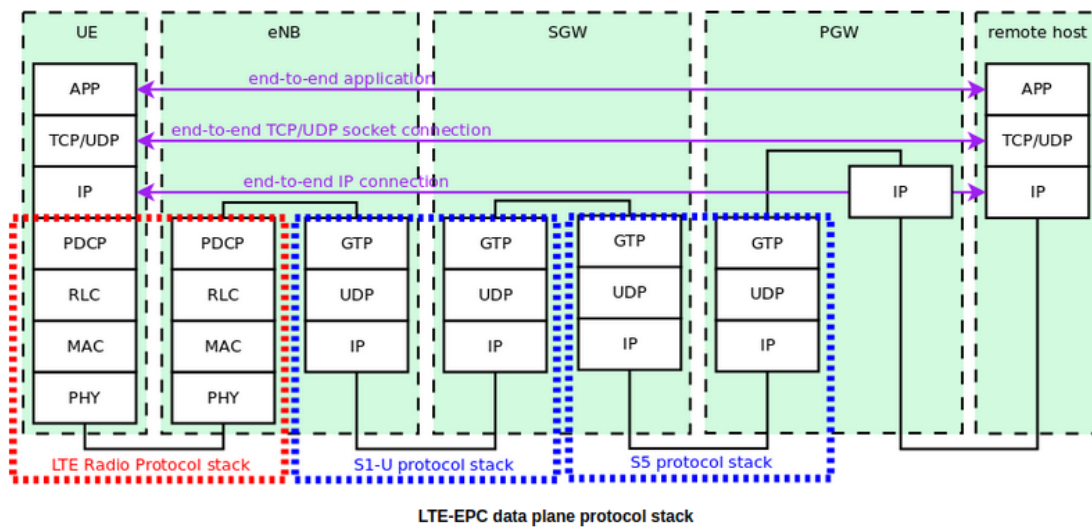
É possível identificar que o módulo LTE é composto pela eNB e os UEs, interligados por um *link* de rádio, ilustrados em cor vermelha na Figura 3.2. O módulo EPC é composto pelas *interfaces* de rede, protocolos e entidades do núcleo de rede interligados por link ponto a ponto, destacado na cor azul.

A pilha de protocolos do módulo LTE (camadas RRC, PDCP, RLC, MAC, PHY) está implementada na eNB e no UE, enquanto que os protocolos do módulo EPC estão implementados nas entidades *Mobility Management Entity* (MME), *Serving Gateway* (SGW) e *Packet Data Network Gateway* (PGW), bem como na eNB (ns-3, 2022a). O plano de controle modela explicitamente as interfaces S1-MME (entre eNB e MME), S11

(entre MME e SGW) e S5 (entre SGW e PGW). O plano do usuário modela toda a pilha de protocolos especificada pelo 3GPP, incluindo as pilhas S5 e S1-U, como ilustrado na Figura 3.3.

Com o *ns-3* é possível instanciar várias eNBs e UEs, controlando suas posições, mobilidade e protocolos instalados em sua pilha. É possível especificar o tráfego oferecido, o tempo de simulação e o modelo de canal sem fio, incluindo modelos de perda de percurso, sombreamento e desvanecimento de pequena escala. Também é possível modelar o diagrama de radiação das antenas e gerar células setorizadas, por exemplo.

Figura 3.3: Pilha de protocolos *LTE-EPC* (plano do usuário).



Fonte: (ns-3, 2022d).

3.1.1 Alocação de recursos na eNB

Por se tratar de um tema importante para a gerência de largura de banda vinculada a solução proposta nesta dissertação, essa seção apresenta uma breve exposição sobre a alocação de recursos do LTE.

Uma eNB utiliza o OFDMA como técnica de múltiplo acesso no *downlink*. O OFDMA divide o espectro em sub-portadoras ortogonais para multiplexar dados de diferentes UEs. Cada quadro *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) possui 10 ms e é composto por 10 sub-quadros, de 1 ms cada. Por fim, cada sub-quadro é formado por dois *timeslots* de 0,5 ms (HOLMA and TOSKALA, 2011). Cada sub-quadro carrega uma quantidade de blocos de recursos, chamados de *Physical Resource Blocks* (PRBs), dependendo da largura de banda total do sistema. Cada PRB tem 12 sub-portadoras, espaçadas em 15 kHz, resultando em 180 kHz. A Tabela 3.1 ilustra a quantidade de PRBs disponíveis a cada 1 ms (sub-quadro LTE) para cada opção de largura de banda total do 4G. Assim, existe uma correspondência direta entre a quantidade de PRBs e a largura de banda de transmissão (ns-3, 2022a; HOLMA and TOSKALA, 2012).

Tabela 3.1: Opções de largura de banda do LTE.

Largura de banda (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Duração do Sub-frame	1 ms					
Espaço entre subportadoras	15 kHz					
Tamanho da FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de PRBs	6	18	25	50	75	100

Entre os vários algoritmos de gerência de recursos de rádio, se destacam, para os objetivos desta dissertação, os modelos de reuso fracionário, que são explorados na próxima seção.

3.2 Reuso Fracionário de Frequência no ns-3

O *ns-3* suporta algoritmos para técnicas de reuso de frequência por intermédio da classe abstrata *LteFfrAlgorithm*. Até o momento deste trabalho, existem sete algoritmos implementados (ns-3, 2022a):

- **ns3::LteFrNoOpAlgorithm:**
 - Algoritmo padrão que faz uso do fator de reuso 1.
- **ns3::LteFrHardAlgorithm:**
 - Algoritmo com fator de reuso de frequência diferente de 1, geralmente 3, 4 ou 7. Nessa opção de algoritmo, todas as estações transmitem com o mesmo nível potência.
- **ns3::LteFrStrictAlgorithm:**
 - O algoritmo divide a banda total do sistema em duas sub-bandas, a central compartilhada e a privada de borda, cada uma com níveis distintos de potências.
 - A disposição dos usuários em cada região de sub-banda depende do seu RSRQ, que é comparado a um limite predefinido.
- **ns3::LteFrSoftAlgorithm:**
 - Esse algoritmo subdivide a banda em duas regiões (centro e borda), mas a sub-banda dedicada aos usuários da borda pode ser compartilhada com os usuários do centro da célula, caso esteja sem ocupação pelos dispositivos de usuários de borda.
- **ns3::LteFfrSoftAlgorithm:**
 - O algoritmo faz a subdivisão da célula em três regiões distintas: central, média (que utiliza fator de reuso de frequência 1) e externa (que utiliza fator de reuso de frequência 3);
 - A região central faz a reutilização das frequências das bordas da células adjacentes com o menor nível de potência de transmissão.

- **ns3::LteFfrEnhancedAlgorithm:**

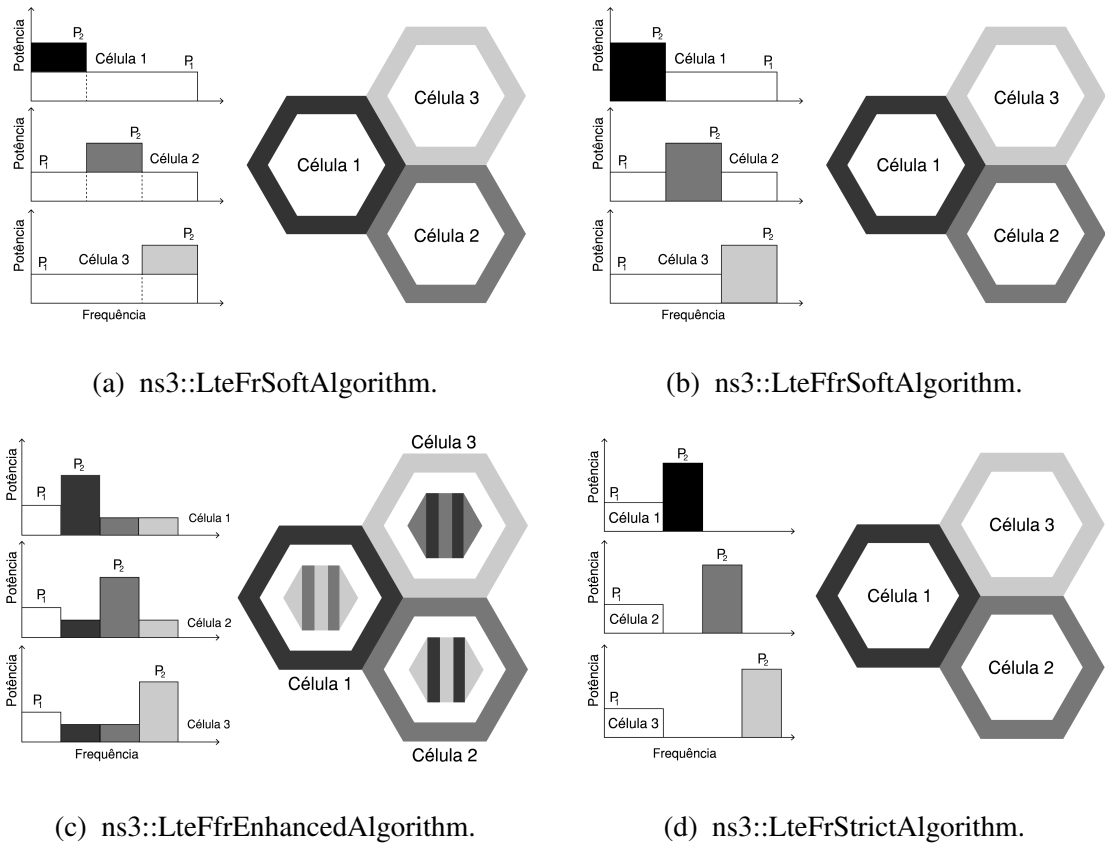
- cada célula adjacente recebe uma parte do espectro com frequências ortogonais (o segmento primário, que tem partes com reuso 1 e 3), e os demais canais são os segmentos secundários (compartilhados);

- **ns3::LteFfrDistributedAlgorithm:**

- O algoritmo seleciona os *PRBs* para os usuários de borda baseado nas informações de células adjacentes (especialmente a distribuição de *RSRP*).

Os três primeiros algoritmos estão ilustrados na Figura 2.4, e a Figura 3.4 ilustra outros, incluindo o SFR utilizado neste trabalho (Figura 3.4d). Em (de O. Nóbrega et al., 2018), foi realizada uma comparação extensa das técnicas de ICIC implementadas no ns-3, identificando o SFR como um bom compromisso entre complexidade e desempenho. Por esse motivo, o SFR é o algoritmo de ICIC alvo deste trabalho.

Figura 3.4: Algoritmos de ICIC implementados no ns-3.



Fonte: (do Rêgo, 2020).

Os esquemas ICIC disponíveis no ns-3 agem basicamente na alocação de banda (quantidade de *PRBs*) e no controle de potência, conforme técnica adotada (ns-3, 2022a). É possível selecionar o algoritmo e configurar os atributos necessários para seu

funcionamento. Os parâmetros disponíveis dependem de cada algoritmo, mas geralmente, exceto para as opções `ns3::LteFrNoOpAlgorithm` e `ns3::LteFrHardAlgorithm`, é possível definir a largura de banda e a potência de cada região de reuso da célula (centro e borda). Para o algoritmo SFR, que faz uso de diferentes níveis de potência por área, o algoritmo do *ns-3* utiliza dois parâmetros como *offsets* de potência. As variáveis `CenterPowerOffset` e `EdgePowerOffset`, ambas em dB, definem o nível de potência de cada região de reuso (*ns-3*, 2022b).

A Figura 3.5 apresenta um exemplo de alocação de potência. Nela é possível identificar que, por meio da classe `LteHelper`, é feita a alocação da potência de transmissão do *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) em relação ao sinal de referência. Para este trabalho foi adotado como potência *offset* de -6 dB para a sub-banda comum e de 3 dB para a sub-banda privada, ou seja, a sub-banda comum possui 6 dB abaixo da potência do sinal de referência, enquanto a sub-banda da borda possui 3 dB acima. Como esta dissertação é uma continuação da pesquisa desenvolvida em (REGO and SOUSA JR., 2021), os valores de potência mencionados foram mantidos iguais aos aplicados no trabalho de referência, sendo esse o principal motivo de escolha para tais valores.

Figura 3.5: Exemplo de configuração de potência para cada sub-banda das eNBs no *ns-3* usando SFR.

```
lteHelper->SetFfrAlgorithmAttribute("CenterPowerOffset",
                                   UIntegerValue(LteRrcSap::PdschConfigDedicated::dB_6));
lteHelper->SetFfrAlgorithmAttribute("EdgePowerOffset",
                                   UIntegerValue(LteRrcSap::PdschConfigDedicated::dB3));
```

Fonte: Próprio autor.

O parâmetro mais importante para este trabalho é a distribuição de banda entre as duas regiões. Tomando como exemplo a largura de banda de 100 PRBs (20 MHz), a largura de banda é distribuída pelo SFR na seguinte proporção: 1 fração direcionada ao centro e 3 frações da banda para cada borda das três células vizinhas (reuso 3). Por exemplo, na distribuição 16-28, existem 16 PRBs para a região do centro e 28 para cada região de borda de célula. As imagens a seguir mostram uma forma de configuração de SFR no *ns-3* para um cenário composto por três eNBs. As Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 mostram as configurações do SFR para a eNB1, eNB2 e eNB3, respectivamente. Os parâmetros `centerBW` e `edgeBW` definem o número de PRBs para as regiões do centro e da borda das células, respectivamente.

A configuração da distribuição de banda de cada eNB é composta por 06 comandos, sendo os 03 primeiros `Config::Set` referentes à sub-banda de *downlink* e os demais para a sub-banda de *uplink*. As variáveis `DlCommonSubBandwidth` e `DlEdgeSubBandwidth` são utilizadas para setar, subsequentemente, as sub-bandas de *downlink* comum e privada. Enquanto que as variáveis `UlCommonSubBandwidth` e `UlEdgeSubBandwidth` setam as sub-bandas de *uplink* de centro e borda. As variáveis `DlEdgeSubBandOffset` e `UlEdgeSubBandOffset` indicam o início do espectro destinado a cada sub-banda de borda, em termos de RBs. Esse procedimento evita que haja sobreposição dos RBs entre as bordas das três células adjacentes, possibilitando que cada eNB use partes distintas do

espectro e não sem atrapalhar as demais. Na próxima seção será detalhado o cenário de referência avaliado neste trabalho.

Figura 3.6: Exemplo de configuração de sub-banda eNB 1 no *ns-3* usando SFR.

```
// eNB 1
Config::Set("/NodeList/3/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlCommonSubBandwidth",
            UIntegerValue (centerBW));
Config::Set("/NodeList/3/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlEdgeSubBandOffset",
            UIntegerValue (0));
Config::Set("/NodeList/3/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlEdgeSubBandwidth",
            UIntegerValue (edgeBW));

Config::Set("/NodeList/3/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlCommonSubBandwidth",
            UIntegerValue (centerBW));
Config::Set("/NodeList/3/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlEdgeSubBandOffset",
            UIntegerValue (0));
Config::Set("/NodeList/3/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlEdgeSubBandwidth",
            UIntegerValue (edgeBW));
```

Fonte: Próprio autor.

Figura 3.7: Exemplo de configuração de sub-banda eNB 2 no *ns-3* usando SFR.

```
// eNB 2
Config::Set("/NodeList/4/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlCommonSubBandwidth",
            UIntegerValue (centerBW));
Config::Set("/NodeList/4/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlEdgeSubBandOffset",
            UIntegerValue (edgeBW));
Config::Set("/NodeList/4/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlEdgeSubBandwidth",
            UIntegerValue (edgeBW));

Config::Set("/NodeList/4/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlCommonSubBandwidth",
            UIntegerValue (centerBW));
Config::Set("/NodeList/4/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlEdgeSubBandOffset",
            UIntegerValue (edgeBW));
Config::Set("/NodeList/4/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlEdgeSubBandwidth",
            UIntegerValue (edgeBW));
```

Fonte: Próprio autor.

3.3 Cenário de Avaliação de Referência

Esta parte do trabalho analisa o comportamento do sistema quando os *hotspots* surgem próximos e distantes das estações base. Sendo assim, foram adotados dois cenários com diferentes posicionamentos dos *hotspots*, mas mantendo a dimensão de célula, bem como a distância entre elas. O cenário celular é composto por um *cluster* contendo 3 estações bases distanciadas entre si por 500 metros. Os usuários são distribuídos em dois grupos: (i) distribuição uniforme, com 30 usuários uniformemente distribuídos por toda a região da célula; e (ii) *hotspots*, que delimitam usuários distribuídos em círculos com raio de 50 m. Existem 3 *hotspots* com 20 usuários cada. A Figura 3.9 ilustra os dois cenários com os *hotspots* na cor vermelha, posicionados a 50 m da estação base, representando o Cenário 1. O Cenário 2 é representado pelos *hotspots* na cor preta, posicionados a 450 m da estação base.

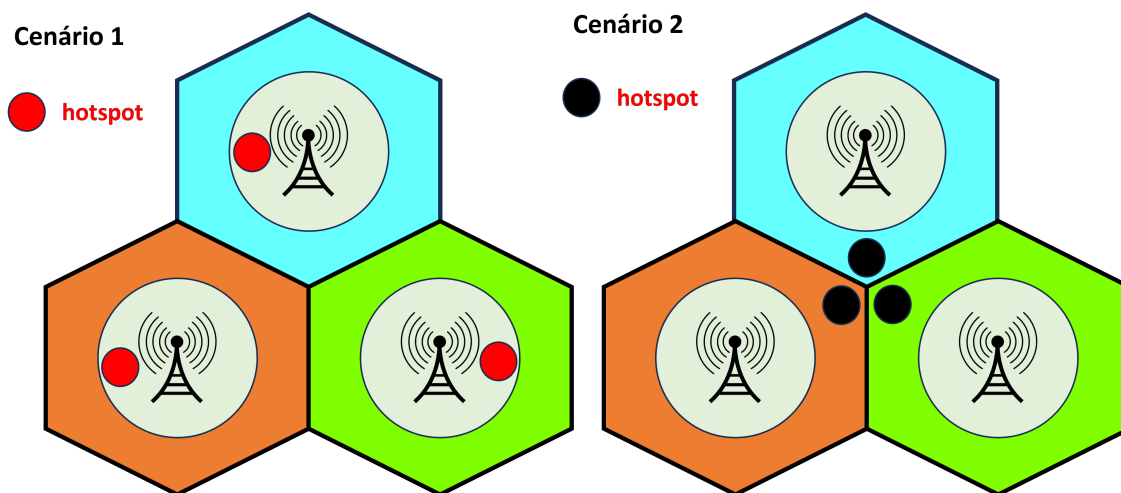
Figura 3.8: Exemplo de configuração de sub-banda eNB 3 no *ns-3* usando SFR.

```
// eNB 3
Config::Set("/NodeList/5/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlCommonSubBandwidth",
            UIntegerValue (centerBW));
Config::Set("/NodeList/5/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlEdgeSubBandOffset",
            UIntegerValue (2*edgeBW));
Config::Set("/NodeList/5/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/DlEdgeSubBandwidth",
            UIntegerValue (edgeBW));

Config::Set("/NodeList/5/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlCommonSubBandwidth",
            UIntegerValue (centerBW));
Config::Set("/NodeList/5/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlEdgeSubBandOffset",
            UIntegerValue (2*edgeBW));
Config::Set("/NodeList/5/DeviceList/*/ns3::LteEnbNetDevice/"
            "ComponentCarrierMap/*/LteFfrAlgorithm/"
            "ns3::LteFrStrictAlgorithm/UlEdgeSubBandwidth",
            UIntegerValue (edgeBW));
```

Fonte: Próprio autor.

Figura 3.9: Posicionamento dos hotspots nos cenários avaliados.



Fonte: Próprio autor.

Para todos os cenários, foi definida a largura de banda total do sistema de 100 PRBs, que corresponde a (20 MHz), conforme a Tabela 3.1. Essa banda é distribuída de maneira proporcional entre o centro e a borda da célula. Como explicado no capítulo anterior, a

proporção de alocação é: 1 fração da banda direcionada ao centro e 3 frações da banda para cada borda das três células vizinhas (reúso 3). Como a banda total é de 100 PRBs, a subdivisão dessa quantidade entre centro e borda da estação, utilizada no experimento, foi feita nas seguintes proporções:

- **Distribuição de banda 1: 16–28**

- 16 PRBs, refere-se à sub-banda compartilhada destinada ao centro da célula. Esses recursos são compartilhados pelas 03 estações que podem fazer uso simultâneo dos mesmos PRBs.
- 28 PRBs, refere-se à sub-banda privada destinada à borda de cada célula. Esses recursos são exclusivos à borda de cada estação, não se repetem, de modo que cada conjunto de 28 PRBs não ocasione interferência nas células adjacentes e nem sejam os mesmos utilizados na região do centro. .
- O somatório desses PRBs equivale à largura de banda total, ou seja, $16 + (3 \times 28) = 100$ PRBs.

As demais distribuições seguem a mesma explicação da anterior.

- **Distribuição de banda 2: 28–24**

- 28 PRBs destinados ao centro da eNB.
- 24 PRBs alocados a região de borda da eNB.
- Total: $28 + (3 \times 24) = 100$ PRBs.

- **Distribuição de banda 3: 40–20**

- 40 PRBs alocados ao centro da eNB.
- 20 PRBs alocados à borda da eNB.
- Total: $40 + (3 \times 20) = 100$ PRBs.

- **Distribuição de banda 4: 52–16**

- 52 PRBs alocados ao centro da eNB.
- 16 PRBs alocados à borda da eNB.
- Total: $52 + (3 \times 16) = 100$ PRBs.

- **Distribuição de banda 5: 64–12**

- 64 PRBs alocados ao centro da eNB.
- 12 PRBs alocados à borda da eNB.
- Total: $64 + (3 \times 12) = 100$ PRBs.

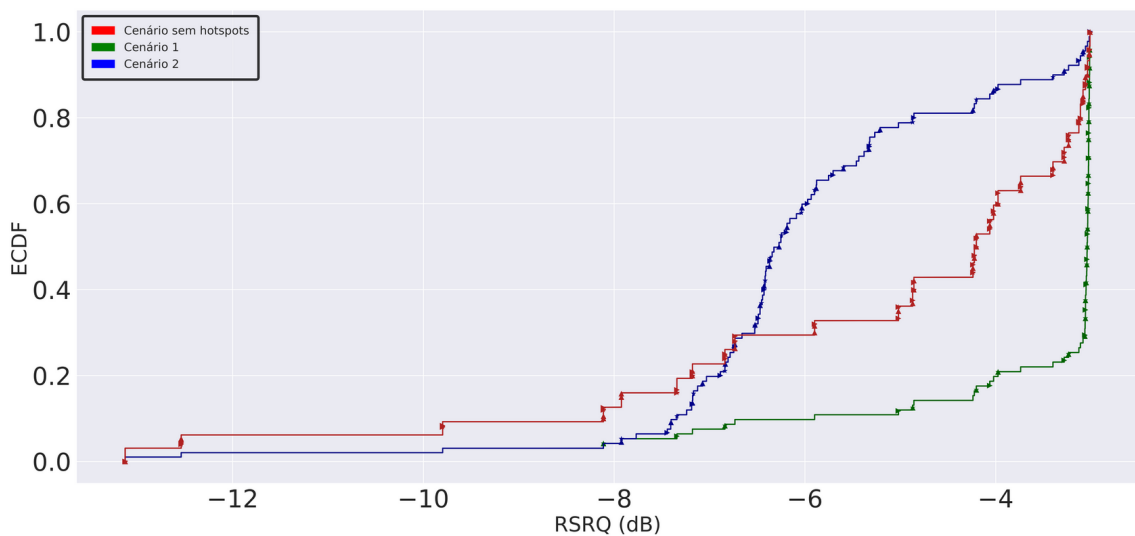
Os valores 30, 31 e 32 foram utilizados como limiar de *RsrqThreshold*. Como discutido no Capítulo 2, especificamente na Tabela 2.1, utilizar o limiar 30 significa que os usuários com valores de RSRQ menores que -4,5 dB são alocados na borda. Os usuários com valores de RSRQ maiores usam os recursos de rádio da região central. A mesma regra é utilizada ao definir os limiares como 31 e 32, que são -4 dB e -3,5 dB, respectivamente. O tráfego oferecido por usuário é constante durante todo o experimento e foram realizadas simulações com tráfego oferecido de 2, 1 e 0,5 Mbps. A Tabela 3.2 resume as demais configurações utilizadas nos experimentos.

Tabela 3.2: Parâmetros do Experimento.

Parâmetro	Valor
Usuários uniformes	30
Usuários por <i>hotspot</i>	20
Algoritmo escalonamento	<i>Proportional Fair</i>
Modo de transmissão (MIMO)	4x4
Taxas oferecidas (Mbps)	2, 1 e 0,5

3.4 Resultados de Caracterização do Problema

Esta seção apresenta os resultados de *throughput* obtidos com as simulações feitas nos Cenários 1 e 2. Contudo, antes de analisar os resultados de *throughput*, a Figura 3.10 apresenta a *Empirical Cumulative Distribution Function* (ECDF) da RSRQ para *RsrqThreshold* igual a 30 e mostra como esse limiar afeta a alocação dos usuários entre as diferentes regiões de célula e a qualidade de sinal percebida por eles.

Figura 3.10: ECDF da *RSRQ* - *RSRQThreshold* 30.

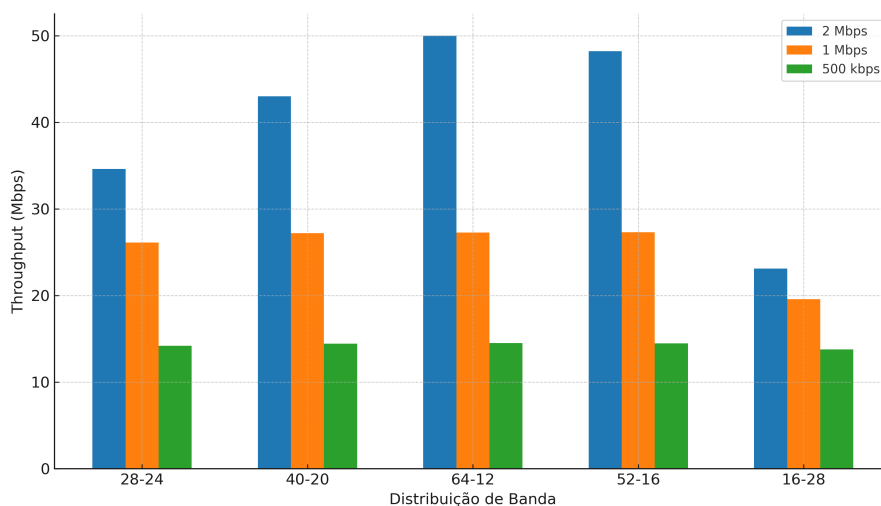
Conforme explicado na subseção 2.2.2, o *RsrqThreshold* é o limiar utilizado na comparação com o valor de RSRQ de cada usuário, cujo resultado definirá a qual sub-banda (centro ou borda) ele será alocado. O eixo X da Figura 3.10 mostra o valor de RSRQ em dB dos usuários e como eles estão concentrados. Quanto mais à direita a curva se encontra, melhor é a qualidade do sinal.

O cenário sem *hotspot* (somente com usuários distribuídos uniformemente) possui a curva identificada pela cor vermelha. Como esperado, é possível observar que o Cenário 2 (*hotspots* longe), curva destacada pela cor azul, tem os menores valores de RSRQ (curva de ECDF à esquerda), e o Cenário 1 (*hotspots* perto), curva destacada pela cor verde, tem os maiores valores (curva de ECDF à direita). A distribuição de

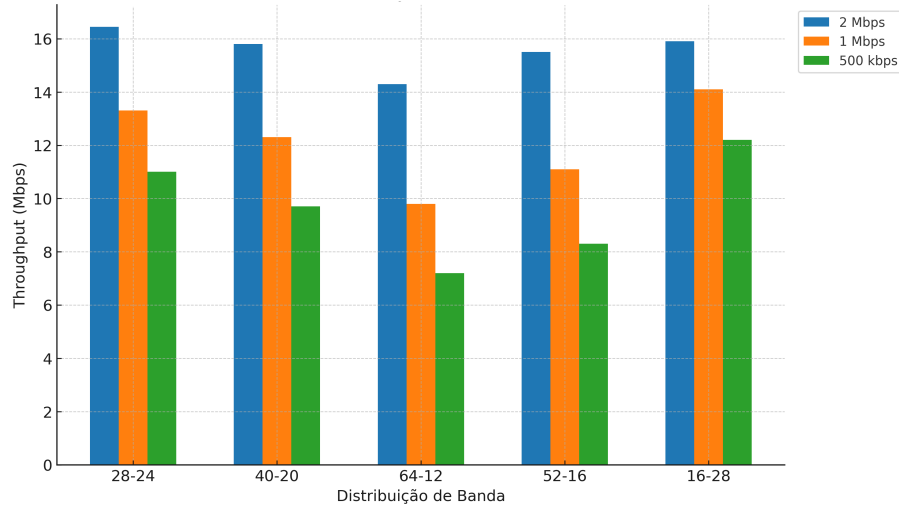
RSRQ tem comportamento similar para todas as cargas e limiares de RSRQ. Assim, ao variar o limiar entre 30 e 32, mais usuários são alocados para a borda da célula. Esse comportamento é mais evidente para o Cenário 2. Sendo assim, é possível notar que uma determinada distribuição de banda pode ter valores de *throughput* piores a depender do limiar escolhido.

Os resultados de *throughput* de célula são apresentados nas Figuras 3.11 e 3.12, para *RsrqThreshold* igual a 30; Figuras 3.13 e 3.14, para *RsrqThreshold* igual a 31; e, finalmente, Figuras 3.15 e 3.16, para *RsrqThreshold* igual a 32. Os pares de figuras apresentam resultados para os Cenários 1 e 2. Cada conjunto de três barras representa uma distribuição de banda, sendo cada barra desse conjunto, os resultados de *throughput* para os valores das taxas oferecidas 2 Mbps, 1 Mbps e 500 kbps da esquerda para a direita, respectivamente.

Figura 3.11: Cenário 1: *Throughput* de célula - RSRQThreshold 30.

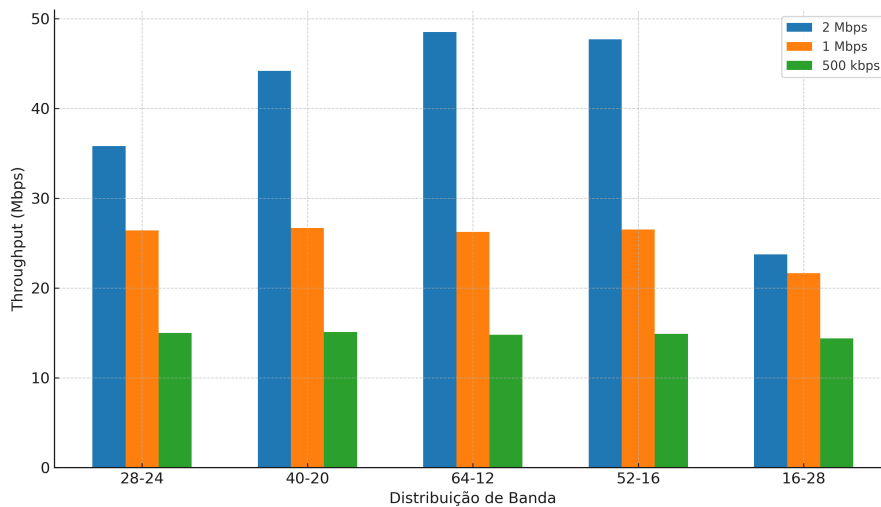


Fonte: Próprio autor.

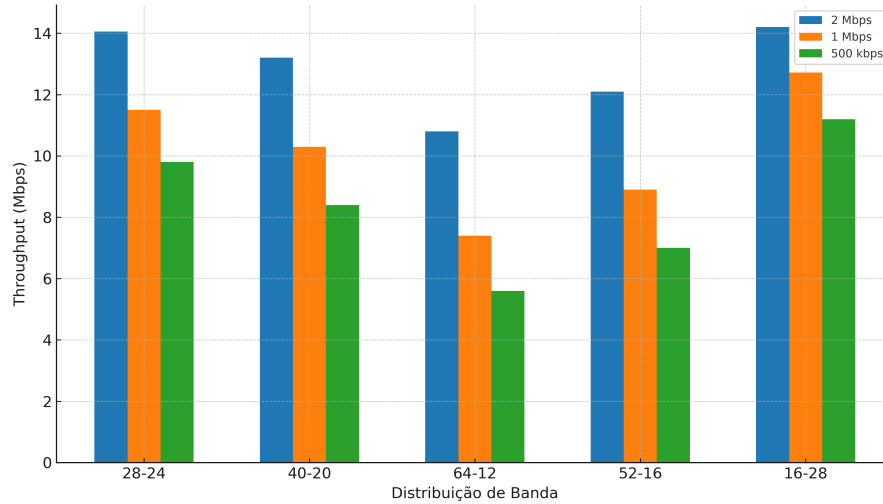
Figura 3.12: Cenário 2: *Throughput* de célula - RSRQThreshold 30.

Fonte: Próprio autor.

Os experimentos com *RSRQThreshold* igual a 30 revelam que ao comparar o *throughput* dos Cenários 1 e 2, o melhor desempenho é alcançado com diferentes configurações de distribuição de banda, como identificado nas Figs. 3.11 e 3.12. Se os *hotspots* estão próximos à estação base (Cenário 1), alocar mais banda para o centro da célula (distribuição 64-12) resulta em maior *throughput*. Contudo, quando os *hotspots* estão afastados, o maior valor de *throughput* é alcançado com a distribuição de banda 28-24, uma alocação equilibrada entre borda e centro da célula.

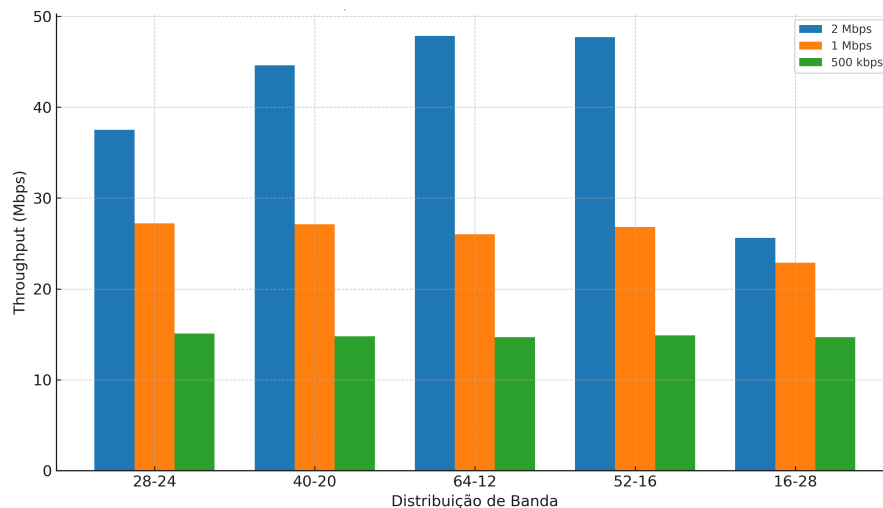
Figura 3.13: Cenário 1: *Throughput* de célula - RSRQThreshold 31.

Fonte: Próprio autor.

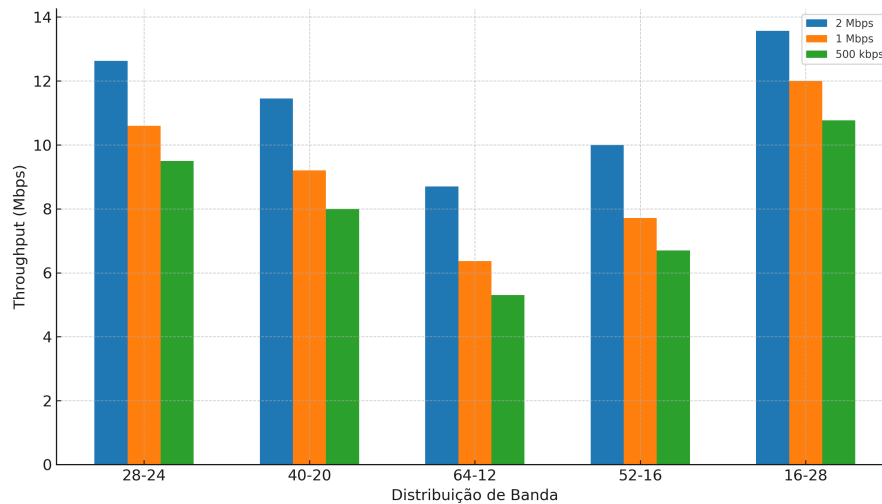
Figura 3.14: Cenário 2: *Throughput* de célula - RSRQThreshold 31.

Fonte: Próprio autor.

Os resultados do Cenário 1 para *RSRQThreshold* igual a 31 (Figs. 3.13 e 3.14) são semelhantes aos resultados para *RSRQThreshold* 30, com maior *throughput* para distribuição de banda 64-12 (mais banda para o centro da célula). Entretanto, diferente do primeiro conjunto de resultados do Cenário 2, a melhor distribuição de banda é a 16-28, uma configuração com mais banda para a borda da célula.

Figura 3.15: Cenário 1: *Throughput* de célula - RSRQThreshold 32.

Fonte: Próprio autor.

Figura 3.16: Cenário 2: *Throughput* de célula - RSRQThreshold 32.

Fonte: Próprio autor.

Por fim, os resultados dos experimentos para *RSRQThreshold* igual a 32 (Figuras 3.15 e 3.16) mostram que as mesmas distribuições de banda para *RSRQThreshold* igual a 31 resultam nos maiores valores de *throughput*. Esse conjunto de resultados indica que a variação da posição dos *hotspots* afeta significativamente o *throughput* do sistema, e que se agrava para maiores taxas oferecidas, chegando ao ponto de reduzir mais de 70% no desempenho ao comparar os dois cenários testados.

A Tabela 3.3 resume os resultados da caracterização do problema ao mostrar a porcentagem de redução do *throughput* do Cenário 1 (*hotspots* perto) em relação ao Cenário 2 (*hotspots* longe), i.e., quanto se perde ao mover o *hotspots* de perto para longe da estação base. A coluna *Melhor Escolha* mostra a redução de *throughput* ao se escolher a melhor distribuição de banda para ambos os cenários. A coluna *Escolha Fixa* mostra a redução de *throughput* ao se escolher a melhor distribuição de banda do Cenário 1 e aplicá-la ao Cenário 2.

Tabela 3.3: Redução do *Throughput* entre os Cenários 1 e 2.

<i>RSRQThreshold 30</i>		
Taxa Oferecida	Melhor Escolha	Escolha Fixa
2 Mbps	67,34%	71,48%
1 Mbps	48,55%	59,77%
500 kbps	16,57%	52,78%
<i>RSRQThreshold 31</i>		
2 Mbps	70,37%	77,15%
1 Mbps	52,55%	62,13%
500 kbps	22,69%	42,06%
<i>RSRQThreshold 32</i>		
2 Mbps	71,80%	82,05%
1 Mbps	56,44%	66,84%
500 kbps	27,27%	44,76%

3.5 Conclusões da Caracterização do Problema

Os resultados obtidos indicam que não existe um único valor ótimo de limiar *RSRQThreshold* e de distribuição de banda para todos os cenários de distribuição de *hotspots*.

É possível concluir, também, que manter a mesma distribuição de banda nos dois cenários pode aumentar as perdas de *throughput* em pelo menos 4% (para o caso de *RSRQThreshold 30* e 2 Mbps) e até 36,21% (para o caso de *RSRQThreshold 30* e 500 kbps), se comparada às reduções entre a *Melhor Escolha* e *Escolha Fixa*. Assim, é possível afirmar que não existe uma configuração de distribuição de banda fixa que seja melhor para todos os casos testados e que existe prejuízo de desempenho na escolha de uma distribuição de banda qualquer.

Esse resultado evidencia que existe possibilidade de ganho ao explorar a hipótese científica deste trabalho. Inspirado por essa evidência, o próximo capítulo apresenta uma solução para o ajuste dinâmico da distribuição de banda utilizando técnicas de aprendizado por reforço.

Capítulo 4

Proposta de Solução

O Grupo de Pesquisa em Prototipagem Rápida de Soluções para Comunicação (GppCom), do qual o autor desse trabalho faz parte, tem seu foco na concepção e prototipagem de soluções para sistemas de comunicação e processamento de sinais e imagens, possuindo diversas contribuições publicadas em livros, artigos de jornais e congressos. Dentre estas publicações, se destacam as que fazem uso de técnicas de *Reinforcement Learning* (RL) no *Network Simulator 3* (ns-3). Por exemplo, o trabalho (SANTANA et al., 2019a) emprega os conceitos de *Q-Learning* (QL), esquema do aprendizado por reforço, em um mecanismo de transmissão adaptativa com o objetivo de maximizar o *throughput* agregado do WiFi e *Long Term Evolution Unlicensed* (LTE-U). Os autores de (SANTANA et al., 2019b) abordam a coexistência entre múltiplas redes LTE-U e propõem um algoritmo de teoria dos jogos com aprendizado por reforço, visando alcançar *throughput* máximo. O trabalho (NETO et al., 2020) estende as soluções dos demais trabalhos para um cenário de coexistência LTE-U/Wi-Fi multicelular com alta interferência. Uma solução de menor complexidade com o MAB é apresentada em (REGO et al., 2023). Por fim, o trabalho (REGO and SOUSA JR., 2021) apresenta uma solução de QL para definir dinamicamente a quantidade de usuários em cada região de reuso em um cenário com *hotspot*. É notório o interesse pela aplicação de aprendizado de máquina no gerenciamento de recursos de rádio e controle de interferência, portanto, esta dissertação estende o estado da arte ao aplicar RL para definir dinamicamente a largura de banda de cada região da célula em cenários com a presença de *hotspots* dinâmico, visando mitigar o impacto negativo no desempenho do sistema decorrente do surgimento e dinamismo dessas aglomerações aleatórias.

4.1 Aprendizado de máquina

O gerenciamento dos recursos de rádio de forma eficiente é bastante complexo, principalmente em cenários que apresentam *hotspots*, como explicado no Capítulo 2. Diante desse problema e com o aperfeiçoamento das técnicas de aprendizado de máquina ML, a academia e a indústria desenvolvem pesquisas focadas na otimização automatizada das redes de telecomunicações em cenários dinâmicos, visando, em especial, o controle da interferência entre células (SALEM et al., 2025).

O aprendizado de máquina é definido como um subcampo da ciência da computação

capaz de resolver problemas, sem intervenção humana, por meio de previsões estatísticas baseadas em um conjunto de dados coletados (BURKOV, 2019). As categorias de aprendizado são definidas como supervisionado, não supervisionado, semi-supervisionado e por reforço.

As três primeiras categorias citadas acima são brevemente discutidas a seguir, enquanto que a última (aprendizado por reforço) terá uma subseção dedicada, devido o presente trabalho fazer uso do algoritmo MAB que se enquadra na categoria.

O aprendizado é dito supervisionado quando existe uma base de resultados de saída pré-definidos (saídas rotuladas) que servem de comparação com os valores obtidos, ou seja, uma referência que faz o algoritmo entender o que está correto ou incorreto para efetuar as possíveis ações para alcançar os objetivos desejados. Como esse tipo de algoritmo generaliza a resposta para que possa atuar em situações que não foram rotuladas, torna-se inadequada a sua aplicação em ambientes, por exemplo, o ambiente abordado neste trabalho, que exigem interações frequentes, pois é impraticável obter exemplos para todas as situações desconhecidas (SUTTON and BARTO, 2018).

Diferente do anterior, o aprendizado não supervisionado não possui conhecimento prévio da saída, ou seja, não existe a base de dados de comparação instruindo o algoritmo do que é certo ou errado, apenas os dados de entrada, dos quais o algoritmo deve extrair o seu aprendizado (MÜLLER and GUIDO, 2016). O algoritmo tenta encontrar estruturas ocultas em uma coleção de dados que não possui rótulos. Portanto, essas características tornam a avaliação do modelo mais desafiador (SUTTON and BARTO, 2018) e não atende ao cenário proposto neste trabalho, pois é necessário que haja interação do agente com o ambiente a cada tomada de decisão.

No caso do aprendizado semi-supervisionado, a base de dados utilizada no aprendizado é uma mistura entre as saídas conhecidas e desconhecidas, sendo a última a quantidade de maior proporção (BURKOV, 2019). No entanto, o ambiente da dissertação é dinâmico e não possui base de dados, ou seja, é inadequado para aplicação desse tipo de aprendizado.

Diferente dos algoritmos citados, o aprendizado por reforço é o mais adequado para o cenário proposto, pois visa à maximização da recompensa média obtida após as ações tomadas por um agente em ambientes distintos. Além de não precisar buscar padrões em estruturas ocultas, o algoritmo funciona por meio da tentativa e erro, ou seja, o estado do ambiente é percebido pelo agente, que toma uma ação e recebe uma recompensa. Como a recompensa pode ser boa ou ruim, ela irá ditar futuras ações, que, com o passar do tempo, convergirão para o estado de melhor recompensa (SUTTON and BARTO, 2018).

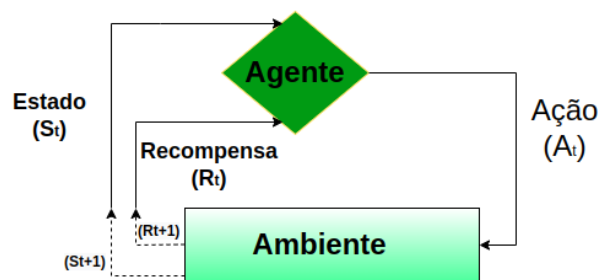
O trabalho (NARVÁEZ and PÉREZ, 2018) investiga os tipos de algoritmos ML aplicados ao ICIC em cenários estáticos. Quando aplicadas ao contexto dos sistemas LTE com surgimento de *hotspots* (cenários dinâmicos), os aprendizados supervisionado, não supervisionado e semi-supervisionado não satisfazem a necessidade do ICIC, pois necessitam do conhecimento antecipado dos dados de entrada e/ou levam muito tempo para que aprendam e se adaptem ao novo estado (SUTTON and BARTO, 2018). Por isso, o aprendizado por reforço mostra-se uma alternativa mais adequada para o ICIC.

4.1.1 Aprendizado por Reforço

O paradigma do RL é baseado na tomada de decisões sequenciais, ou seja, cada ação é tomada de acordo com o status do ambiente e por consequência, cada ação gerará uma recompensa ou punição. O RL é um tipo de algoritmo que aprende por meio das interações frequentes efetuadas com o ambiente sem receber nenhum tipo de orientação, ou seja, por tentativa e erro, mapeando todos os estados, ações tomadas e recompensas obtidas.

Os principais componentes do RL são o **agente**, o **ambiente**, o **estado**, a **política** e a **recompensa**. A Figura 4.1 ilustra o ciclo de aprendizado do RL, que tem sua convergência garantida ao ser escrito como um modelo *Markov Decision Process* (MDP) (SUTTON and BARTO, 2018).

Figura 4.1: Ciclo do aprendizado por reforço.



Fonte: Próprio autor.

O Agente é comparado a um aluno com um objetivo específico, o qual interage com o ambiente tomando decisões sobre as ações que deve efetuar. Cada ação irá resultar em uma recompensa, boa ou ruim (punição). As recompensas ou punições obtidas serão utilizadas como forma de aprendizado.

O Ambiente é a representação do problema a ser resolvido.

O Estado é a situação em que o ambiente e o agente se encontram em determinado momento. Ele poderá variar após a tomada de uma ação e, normalmente, é representado na literatura pela letra S .

O comportamento do agente é definido pela Política, ou seja, é ela que mapeia os estados do ambiente e regra as ações para o estado atual e para os próximos. A política é estocástica e tem um valor de probabilidade por ação. Ela é representada por π .

A Recompensa, R , direciona o agente na sua tomada de decisões por meio de um número que diz se a ação imediata foi boa ou ruim. Caso esse valor de recompensa seja baixo, a política poderá ser trocada, para que seja selecionada outra ação para esse estado em um momento futuro.

Considere o seguinte problema para exemplificar o agente MAB: um agente se depara com um conjunto de ações. Para cada ação escolhida, o agente recebe uma recompensa a partir de uma distribuição de probabilidade. O objetivo do agente é maximizar a recompensa total esperada durante um período de tempo. O problema descrito é a forma básica do *k-armed Bandit* e recebe esse nome devido a uma analogia com as máquinas

caça-níquel, que em inglês eram chamadas alternativamente como *one-armed bandits*. Dessa maneira, considerando o problema em questão, cada ação pode ser representada por uma jogada escolhendo uma das k alavancas, e as recompensas seriam os pagamentos por acertar o prêmio, sendo este bom ou ruim. Ao repetir as melhores ações selecionadas, é possível maximizar os ganhos, concentrando as ações nas melhores k alavancas. Portanto, para cada ação k , há uma recompensa média associada, uma vez que cada uma segue uma distribuição de probabilidade, e essa recompensa é chamada valor da ação (SUTTON and BARTO, 2018).

A Equação 4.1 o valor da ação ótima:

$$q_*(a) \doteq \mathbb{E}[R_t \mid A_t = a], \quad (4.1)$$

Cada ação selecionada no tempo t é representada por A_t , e sua correspondente recompensa por R_t . Dada uma ação qualquer a , o valor da ação ótima é denotado por $q^*(a)$, definido na Equação 4.1, sendo que o $\mathbb{E}$ representa o valor esperado (SUTTON and BARTO, 2018).

Assumindo que não há conhecimento dos valores certos das ações, é feita uma estimativa do valor da ação a no instante de tempo t , definida como $Q_t(a)$. É esperado que essa estimativa se aproxime do valor de $q^*(a)$ medida que as ações forem sendo escolhidas durante o período de tempo que o agente estiver aprendendo.

Com o valor aproximado $Q_{t \rightarrow \infty}(a)$, o agente pode, enfim, escolher sempre a ação que retorna a maior recompensa. Um método usado para aproximar o valor de $q^*(a)$ por $Q_t(a)$ e usar o valor aproximado para escolher as ações futuras é o *sample-average* (SUTTON and BARTO, 2018). Nele, os valores das ações são estimados pela média das recompensas recebidas:

$$Q_t(a) \doteq \frac{\sum_{i=1}^{t-1} R_i \cdot \mathbb{1}_{A_i=a}}{\sum_{i=1}^{t-1} \mathbb{1}_{A_i=a}}, \quad (4.2)$$

sendo $\mathbb{1}_{A_i=a}$ uma função que é 1 quando $A_i = a$ for verdadeiro, e 0 para quando for falso. Pela lei dos grandes números, na medida em que o denominador da Equação 4.2 tende ao infinito, o valor de $Q_t(a)$ aproxima-se de $q_*(a)$. Assim, garante-se que, se o algoritmo rodar por tempo suficiente, a convergência é alcançada. Por fim, a Equação 4.2 também pode ser representada pela sua forma incremental como:

$$\begin{aligned}
Q_{n+1}(a) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \\
&= \frac{1}{n} \left(R_n + \sum_{i=1}^{n-1} R_i \right) \\
&= \frac{1}{n} \left(R_n + (n-1) \cdot \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} R_i \right) \\
&= \frac{1}{n} (R_n + (n-1)Q_n(a)) \\
&= \frac{1}{n} (R_n + nQ_n(a) - Q_n(a)) \\
&= Q_n(a) + \frac{1}{n} [R_n - Q_n(a)],
\end{aligned}$$

em que n é o número de vezes que a ação a foi escolhida até o momento atual. O termo $\frac{1}{n}$ é o que garante a convergência do algoritmo, pois representa o método *sample-average*.

Para evitar soluções locais ou subótimas, pode ser utilizada a estratégia ϵ -greedy, na qual um valor ϵ é definido, e a cada passo t , o agente tem probabilidade ϵ de escolher uma ação aleatória, ou probabilidade $(1 - \epsilon)$ de escolher a ação com maior valor $Q_t(a)$ (*greedy*).

O método ϵ -greedy tem como vantagem a seleção eventual de todas as ações, garantindo que as estimativas $Q_t(a)$ converjam para $q_*(a)$ e que a probabilidade de selecionar a ação ótima converja para um valor próximo de $1 - \epsilon$ (SUTTON and BARTO, 2018).

Os algoritmos de RL que mais aparecem em buscas de artigos feitas em bases científicas estão os que envolvem os agentes QL e o MAB.

4.2 Solução ICIC Proposta com MAB

A proposta desse trabalho se materializa na aplicação do algoritmo MAB como solução na parametrização automática, especificamente da distribuição de banda da técnica SFR, com o objetivo de maximizar o *throughput* do sistema em situações de aparecimento dinâmico de *hotspots*.

Baseado na teoria fundamentada e análises feitas do problema até este momento, esta seção é dedicada a apresentar a solução baseada no MAB. O algoritmo opera controlando o parâmetro `BandwidthDistribution`, ou seja, alocando diferentes sub-bandas definidas pela técnica SFR, tendo como guia a variação do *throughput* médio do usuário. O algoritmo foi configurado com cinco ações possíveis:

- 16-28;
- 28-24;
- 40-20;

a é executada e a recompensa (*throughput*) é coletada. Os vetores Q e N são atualizados e uma nova iteração do laço recomeça. Em cada iteração, somente a posição da ação a é atualizada nos vetores Q e N .

A seção seguinte discute a implementação da solução no ns-3.

4.2.1 Implementação da Solução no ns-3

O MAB é um algoritmo de RL que se baseia na maximização do valor da recompensa recebida a longo prazo durante cada interação com o ambiente por meio de ações tomadas. A Tabela 4.1 resume os valores das ações.

Tabela 4.1: Alocação de Largura de Banda por Ação.

Ação	Alocação de Banda (RBs)
0	28-24
1	40-20
2	64-12
3	52-16
4	16-28

A Figura 4.2 mostra como a Tabela 4.1 foi revertida em código no ns-3.

Figura 4.2: Mapeamento das Ações no ns-3.

```
double
BsBandit::MapAction(int a)
{
    double action = 9999;
    switch (a)
    {
        case 0: action = 2824;
                bw1 = 28;
                bw2 = 24;
                break;
        case 1: action = 4020;
                bw1 = 40;
                bw2 = 20;
                break;
        case 2: action = 6412;
                bw1 = 64;
                bw2 = 12;
                break;
        case 3: action = 5216;
                bw1 = 52;
                bw2 = 16;
                break;
        case 4: action = 1628;
                bw1 = 16;
                bw2 = 28;
                break;
    }
    if (action == 9999)
    {
        std::cout << "Erro: No action selected from MapAction!!" << std::endl; exit(1);
    }
    return action;
}
```

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.3 mostra a implementação do método ϵ -greedy e como é feito o seu decaimento.

Figura 4.3: Uso do método ϵ -greedy.

```
float e = RandomRealUniform();
if (e < epsilon)
{
    actionIndex = RandomIntUniform(0, size - 1);
    epsilon /= 1.06;
    std::cout << "Exploração: escolhendo ação aleatória " << actionIndex << std::endl;
}
else
{
    actionIndex = GetMax();
    std::cout << "Exploração: escolhendo melhor ação " << actionIndex << std::endl;
}
```

Fonte: Próprio autor.

A expressão `epsilon /= 1.06` não representa exatamente um decaimento exponencial contínuo, mas pode ser usada para simular um comportamento de decaimento exponencial em iterações discretas. Um decaimento exponencial contínuo é, formalmente, definido como:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot e^{-kt}.$$

No entanto, em algoritmos discretos, como os utilizados em aprendizado por reforço, o decaimento costuma ser feito por meio de um fator multiplicativo constante por passo:

$$\epsilon_{t+1} = \epsilon_t \cdot \alpha, \quad \text{com } \alpha \in (0, 1).$$

Portanto, a expressão `epsilon /= 1.06` é equivalente a:

$$\epsilon_{t+1} = \epsilon_t \cdot \left(\frac{1}{1.06} \right) \approx \epsilon_t \cdot 0.9434,$$

o que caracteriza um decaimento exponencial discreto (LAPAN, 2020).

A decisão na tomada de ação é baseada no valor da recompensa, *throughput* médio, que é obtido dos valores de bits recebidos com sucesso oriundos das diversas medições consecutivas, conforme a Figura 4.4.

Figura 4.4: Avaliando a recompensa pela média do *throughput*.

```
void
BsBandit::UpdateMaxThroughput(double m_avgTput)
{
    if (m_avgTput != 0.0)
    {
        if (m_avgTput > m_maxTput)
        {
            m_maxTput = m_avgTput;
        }
        if (m_avgTput < m_minTput)
        {
            m_minTput = m_avgTput;
        }
    }
}
```

Fonte: Próprio autor.

O *throughput* do usuário é medido em Mbps, como na Equação 4.3, e sua média é calculada conforme a Equação 4.4.

$$T_i = \frac{8 \cdot B_t}{s \cdot 1000000}, \quad (4.3)$$

$$\bar{T}_i = \frac{1}{W} \sum_{i=t-W+1}^t T_i, \quad (4.4)$$

em que s representa o intervalo de amostragem, em segundos, que corresponde ao tempo de atuação do algoritmo MAB; B_t é a quantidade total de bytes recebidos no intervalo; e W é o tamanho da janela deslizando, definido como 10.

Capítulo 5

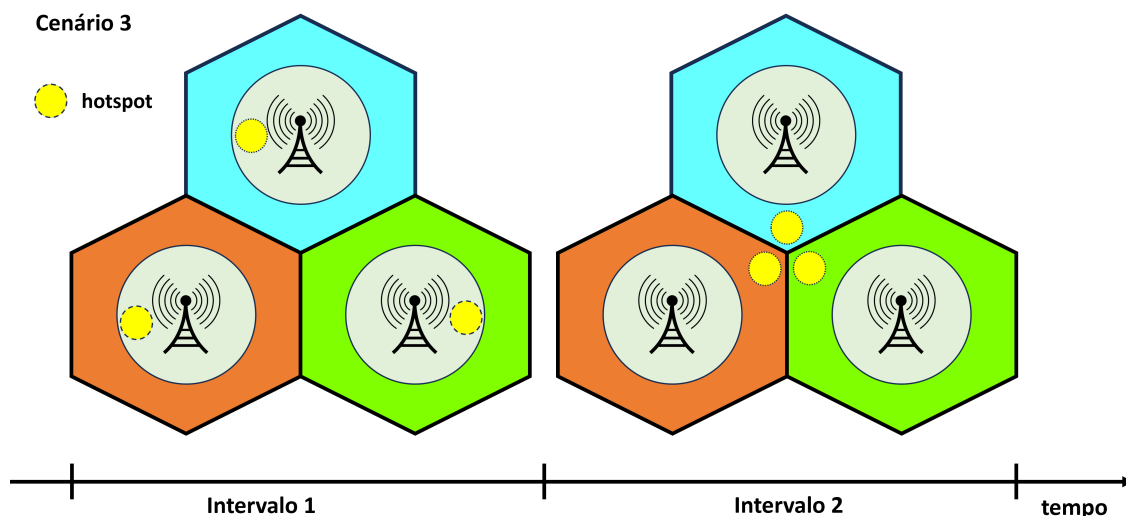
Resultados de Prova de Conceito

Este capítulo é dedicado aos resultados obtidos das 10 campanhas finais de simulação para avaliar o desempenho da solução proposta no capítulo anterior. Inicialmente, é feita a apresentação do cenário simulado, indicando seus principais parâmetros de configuração. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos e, por fim, as conclusões qualitativas ao analisá-los.

5.1 Cenário de Avaliação

A solução proposta neste trabalho usa o MAB para definir a distribuição de banda mais apropriada para o sistema, independente da taxa oferecida e da disposição do *hotspot*. Para avaliar essa habilidade, foi configurado um cenário dinâmico em relação ao posicionamento do *hotspot*. A Figura 5.1 ilustra o cenário dinâmico com os *hotspots* na cor amarela. A simulação possui um tempo total de 100 s, sendo que nos 50 s iniciais (Intervalo 1), os *hotspots* estão posicionados a 50 m da estação base. No Intervalo 2, os 50 s finais, os *hotspots* são reposicionados a 450 m da estação base.

Figura 5.1: Posicionamento dos hotspots no cenário 3 .



Fonte: Próprio autor.

O cenário celular é composto por 3 estações bases distanciadas entre si por 500 metros. Os usuários são distribuídos em dois grupos: (i) distribuição uniforme, com 30 usuários uniformemente distribuídos por toda a região da célula; e (ii) *hotspots*, que delimitam usuários distribuídos em círculos com raio de 50 m. Existem 3 *hotspots* com 20 usuários cada.

Visando evitar o retorno do leitor ao texto já discutido, na caracterização do problema no Capítulo 3, os parâmetros utilizados nos experimentos são reapresentados aqui. A largura de banda total do sistema é de 100 PRBs (20 MHz), e é distribuída de maneira proporcional entre o centro e a borda da célula. A proporção de alocação é uma fração da banda direcionada ao centro e três frações da banda para cada borda das três células vizinhas (reúso 3). Além disso, as proporções de banda utilizadas nos experimentos são mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros de Alocação de Sub-bandas.

Largura de Banda Total: 20 MHz (100 PRBs)		
Configuração	Sub-banda Comum (Centro)	Sub-banda Privada (Borda, 3x)
1	28	24
2	40	20
3	64	12
4	52	16
5	16	28

Os demais parâmetros são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros do Experimento.

Parâmetro	Valor
Usuários uniformes	30
Usuários por <i>hotspot</i>	20
Algoritmo escalonamento	<i>Proportional Fair</i>
<i>RsrqThreshold</i>	30, 31 e 32
Modo de transmissão (MIMO)	4x4
Taxas oferecidas (Mbps)	2, 1 e 0,5
Tempo total de simulação	100 s
Posicionamento dos <i>hotspots</i> no Intervalo 1	50 m
Posicionamento dos <i>hotspots</i> no Intervalo 2	450 m

5.2 Resultados

O desempenho do algoritmo MAB proposto é apresentado nas figuras a seguir. Cada figura mostra o desempenho da configuração fixa de largura de banda, bem como a do MAB (barra preta). As figuras estão organizadas na seguinte ordem: Figura 5.2 para *RSRQThreshold* 30, Figura 5.3 para *RSRQThreshold* 31 e Figura 5.4 para

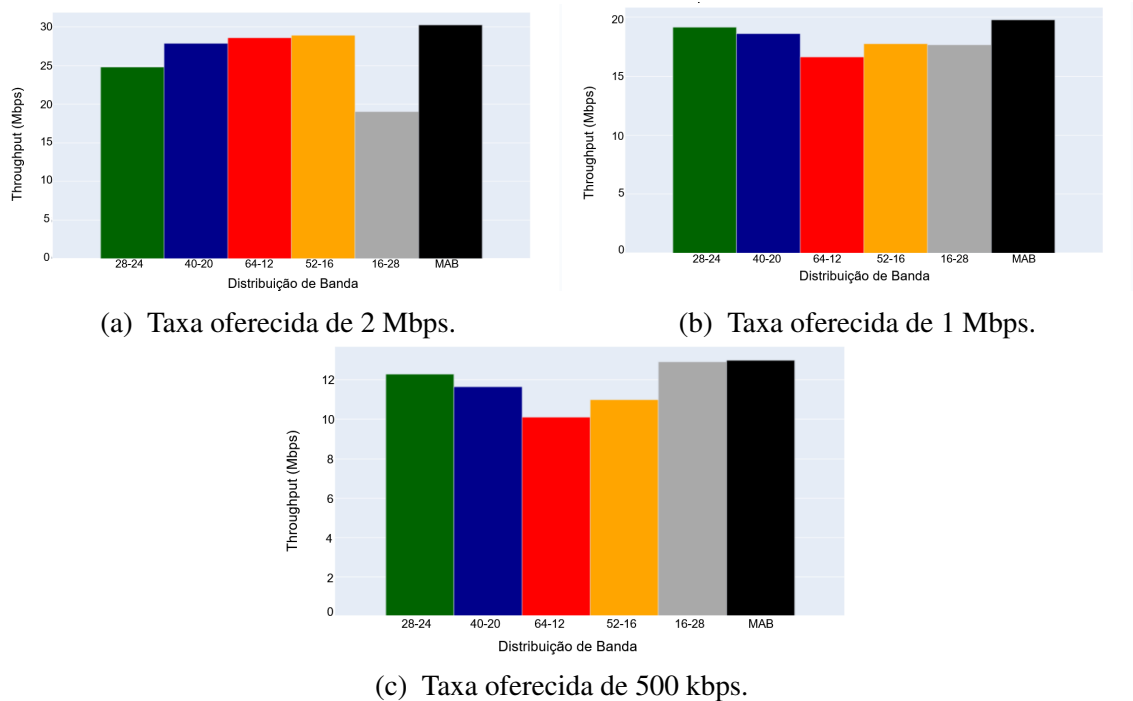
RSRQThreshold 32. Cada figura tem três subfiguras, uma para cada taxa oferecida. Por exemplo, as Figuras 5.2a, 5.2b e 5.2c mostram o *throughput* médio para *RSRQThreshold* 30 e taxas oferecidas de 2 e 1 Mbps e 500 kbps, respectivamente.

A Figura 5.2a (*RsrqThreshold* 30 e 2Mbps) mostra que a distribuição de banda 52-16, barra de cor amarela, apresentou o maior valor de *throughput* (28,91 Mbps), se comparado às demais distribuições de banda fixa. Para esse caso, o algoritmo proposto com MAB se destaca, atingindo o valor de 30,25 Mbps.

Na Figura 5.2b (*RsrqThreshold* 30 e 1Mbps), a distribuição de banda 28-24, barra de cor verde, apresentou o maior valor de *throughput* (19,15 Mbps) entre as demais distribuições fixas, enquanto que o MAB novamente é superior, atingindo o valor de 19,78 Mbps.

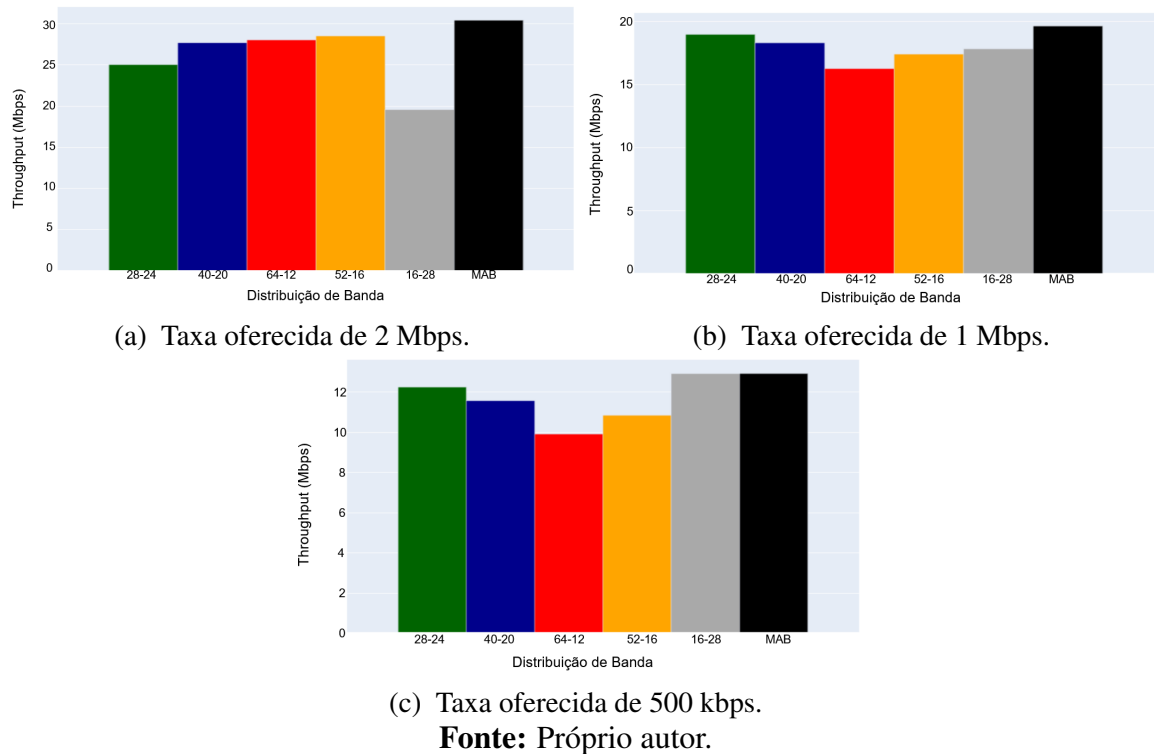
Ao considerar *RsrqThreshold* 30 e taxa oferecida de 500 kbps, a distribuição de banda 16-28, barra de cor cinza, se destaca entre as configurações fixas (Figura 5.2c). Neste caso, o ganho do MAB é marginal, atingindo *throughput* de 13 Mbps.

Figura 5.2: Cenário 3: *Throughput* de célula - *RSRQThreshold* 30.



Fonte: Próprio autor.

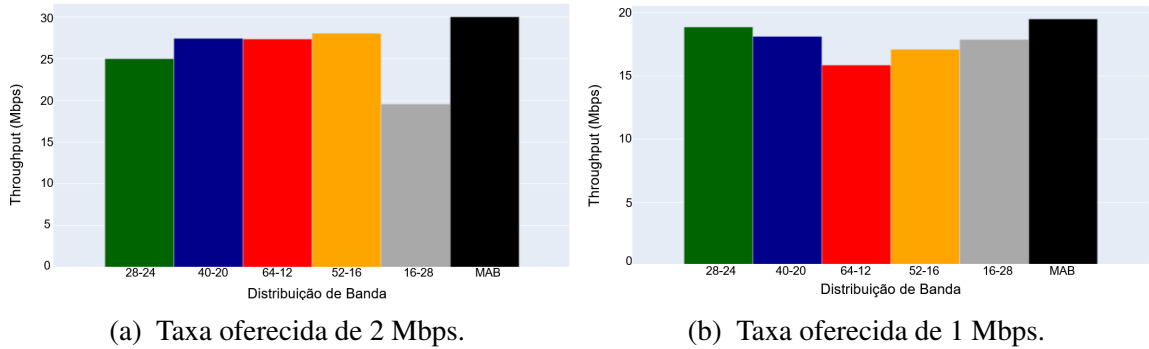
A Figura 5.3 mostra o desempenho referente ao *RsrqThreshold* 31. Nota-se que, semelhante ao caso de *RsrqThreshold* 30, as distribuições fixas que se destacaram foram a 52-16, 28-24 e 16-28, atingindo os valores de *throughput* de 28,53 Mbps, 18,98 Mbps e 12,91 Mbps, respectivamente. Similarmente, o MAB conseguiu obter valores de *throughput* acima de todos os casos: 30,43 Mbps, 19,65 Mbps e 12,92 Mbps, respectivamente.

Figura 5.3: Cenário 3: *Throughput* de célula - *RSRQThreshold* 31.

Fonte: Próprio autor.

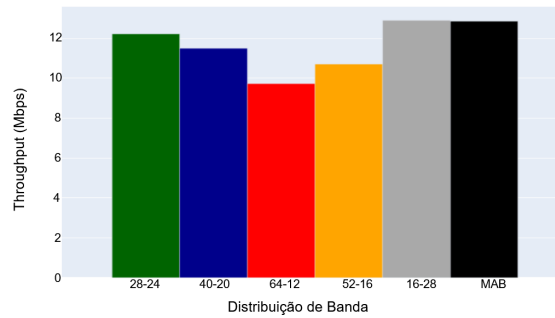
Por fim, o caso para *RsrqThreshold* 32 é mostrado na Figura 5.4. O algoritmo proposto com MAB manteve sua superioridade em relação às distribuições de banda fixa para as taxas de 2 e 1 Mbps, alcançando *throughputs* de 30 Mbps e 19,53 Mbps. Esses valores são maiores que os obtidos pelas melhores distribuições fixas (52-16 e 28-24), que atingiram 28,02 Mbps e 18,88 Mbps, respectivamente. No entanto, para a taxa de 500 kbps, o MAB obteve um valor levemente inferior de *throughput* (12,86 Mbps), em comparação à melhor configuração fixa (16-28), que registrou 12,91 Mbps.

Os resultados evidenciam ganho de *throughput* médio de célula do algoritmo proposto na maioria das configurações testadas. Considerando as diversas taxas oferecidas, o ganho do MAB segue o que foi mostrado na Tabela 3.3. Ao observar a coluna **Escolha Fixa**, as maiores reduções de *throughput* acontecem em ordem decrescente com a taxa oferecida. Assim, como previsto pelos resultados da Tabela 3.3, a expectativa de ganho de uma escolha de banda inteligente é maior para taxas oferecidas de 2 Mbps e menores para 500 kbps. Esse foi exatamente o resultado obtido ao aplicar a solução proposta.

Figura 5.4: Cenário 3: *Throughput* de célula - *RSRQThreshold* 32.

(a) Taxa oferecida de 2 Mbps.

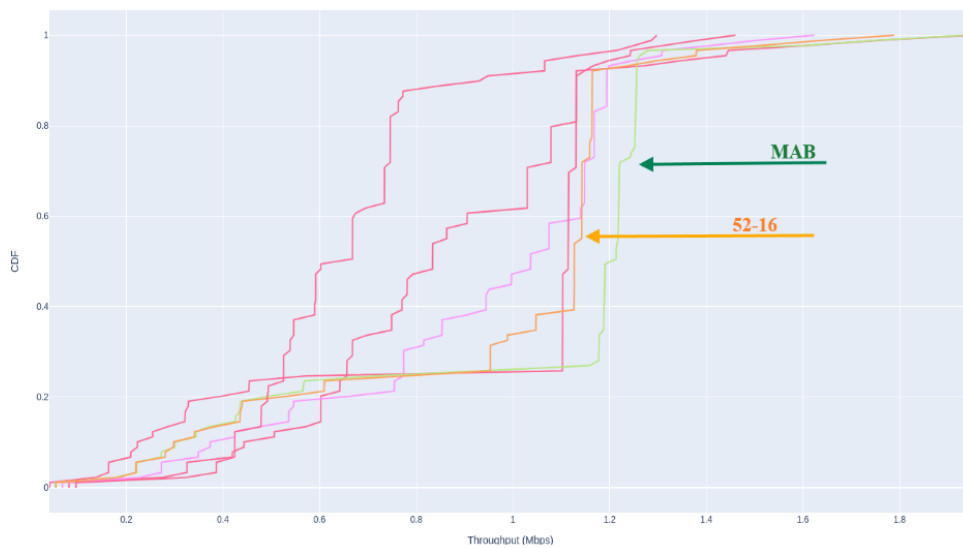
(b) Taxa oferecida de 1 Mbps.



(c) Taxa oferecida de 500 kbps.

Fonte: Próprio autor.

Adicionalmente, a ação do MAB em aprender a melhor distribuição de banda para os intervalos do cenário dinâmico se reflete em melhoria de *throughput* para uma parcela significativa de usuários (não só no *throughput* médio da célula). A Figura 5.5 mostra a ECDF do *throughput* para o caso de 2 Mbps e *RSRQThreshold* igual a 30.

Figura 5.5: ECDF do *throughput* - *RSRQThreshold* 30 e taxa oferecida de 2 Mbps.**Fonte:** Próprio autor.

É possível visualizar que existe ganho substancial entre o vigésimo e o nonagésimo *percentis* do *throughput* ao aplicar o MAB. Esse comportamento se repete nos demais casos, com diferença na magnitude do ganho, dependendo do caso.

A Tabela 5.3 sumariza os ganhos do algoritmo proposto para dois casos específicos:

- **Pior escolha fixa:** indicando qual é a distribuição de banda fixa que resultou no menor *throughput* e qual foi o ganho obtido ao aplicar o MAB no Cenário 3. Esse caso reflete a comparação do MAB com a situação de pior escolha manual possível, caso que o operador da rede foi negligente com a configuração de distribuição de banda.
- **Melhor escolha fixa:** indicando qual é a distribuição de banda fixa que resultou no maior *throughput* e o respectivo ganho em relação ao uso do MAB. Esse caso reflete a comparação do MAB com a situação de melhor escolha manual possível, caso que o operador da rede conseguisse prever o dinamismo do cenário e qual é a melhor configuração de distribuição de banda.

Ao analisar os ganhos do algoritmo MAB é necessário lembrar que, além de se basear em uma média de recompensas, a característica de tentativa e erro do aprendizado por reforço, aliada à estratégia ϵ -greedy, faz com que existam momentos em que o algoritmo MAB escolhe distribuições de banda não ótimas (momentos antes de sua convergência). Essa é a explicação para que o algoritmo não tenha obtido ganho significativo para o caso de taxa oferecida igual a 500 kbps, se comparado à melhor escolha fixa. Como a taxa oferecida é baixa, qualquer distribuição de banda atende os usuários no Intervalo 1, como comprovam os resultados de caracterização do problema (Figuras 3.11, 3.13 e 3.15). Assim, a melhor distribuição fixa do Intervalo 2 para 500 kbps é a escolha ótima. Isso demonstra que, mesmo com a característica de tentativa e erro do MAB, o algoritmo proposto empata ou melhora o desempenho, mas com a grande vantagem de funcionar de forma autônoma, sem a necessidade de intervenção do operador da rede.

Assim, observa-se a existência de ganhos significativos, como 58,95% quando comparado com a pior escolha fixa e 7,06% em relação à melhor escolha fixa. Esses resultados confirmam que o algoritmo proposto tem a capacidade de realizar escolhas autônomas de distribuição de banda, de forma consistente e vantajosa.

Tabela 5.3: Ganho de *throughput* com a aplicação do algoritmo proposto.

Taxa Oferecida	Pior Escolha Fixa				Melhor Escolha Fixa			
	Dist. Banda	Throughput (Mbps)	MAB	Ganho do MAB (%)	Dist. Banda	Throughput (Mbps)	MAB	Ganho do MAB (%)
RSRQThreshold 30								
2 Mbps	16-28	19,03	30,25	58,95	52-16	28,92	30,25	4,59
1 Mbps	64-12	16,62	19,78	19,01	28-24	19,15	19,78	3,28
500 kbps	64-12	10,1	13	28,71	16-28	12,9	13	0,77
RSRQThreshold 31								
2 Mbps	16-28	19,57	30,43	55,49	52-16	28,53	30,43	6,65
1 Mbps	64-12	16,25	19,65	20,92	28-24	18,98	19,65	3,53
500 kbps	64-12	9,91	12,92	30,37	16-28	12,91	12,92	0,08
RSRQThreshold 32								
2 Mbps	16-28	19,55	30	53,45	52-16	28,02	30	7,06
1 Mbps	64-12	15,88	19,53	22,98	28-24	18,88	19,53	3,44
500 kbps	64-12	9,73	12,86	32,16	16-28	12,91	12,86	-0,39

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho propõe a otimização do algoritmo ICIC utilizando aprendizado por reforço. Ao utilizar a técnica MAB, o algoritmo proposto ajusta automaticamente a distribuição de banda do algoritmo SFR baseado no *throughput* médio dos usuários. Uma análise sistêmica utilizando o ns-3 caracterizou o problema e demonstrou que o SFR clássico não é capaz de gerenciar a interferência em cenários dinâmicos com *hotspots*. Os resultados obtidos mostraram que a variação da posição dos *hotspots* afeta significativamente o *throughput* do sistema, e que o problema é agravado quando se aumenta a taxa oferecida, chegando ao ponto de reduzir mais de 70% do desempenho. A aplicação do algoritmo proposto neste trabalho resultou em ganhos de até 58,95% nos cenários avaliados.

Para concluir este trabalho, as questões levantadas no Capítulo 1 (Seção 1.1) são discutidas à luz das análises e dos resultados obtidos neste trabalho:

- **Como a presença de *hotspots* influenciam no desempenho do sistema? Existe alguma variação no nível de criticidade dependendo do seu posicionamento?**
Conforme apresentado no Capítulo 3, o surgimento do *hotspot* afeta de forma significativa o desempenho do sistema, aumentando o nível de interferência e da disputa pelos recursos projetados para os usuários de determinada região. Além disso, baseado nos resultados expostos na Seção 3.4, fica evidente a degradação no *throughput* ao existir variação no posicionamento do *hotspot*.
- **Existe algum ganho de desempenho ao se aplicar técnicas de ICIC que utilizam FFR alocando banda de forma dinâmica entre borda e centro da célula?**
Os resultados apresentados no Capítulo 3 mostram que as técnicas de ICIC que utilizam FFR quando ajustadas dinamicamente podem reduzir o grau de degradação do sistema com presença de *hotspots* dinâmicos. A Tabela 3.3 indica que, em se tratando do *throughput* médio por célula, existe uma expectativa de ganho ao mudar a distribuição de banda dinamicamente se comparado a escolha de banda fixa. Esse ganho depende do *RSRQThreshold* e da taxa oferecida.
- **É possível aplicar o algoritmo na alocação de banda de forma autônoma para evitar degradação de desempenho devido ao dinamismo dos *hotspots*?**
Foi possível comprovar pelos resultados apresentados no Capítulo 5 que a aplicação do algoritmo MAB na alocação de banda do SFR pode reduzir a degradação do *throughput* médio do sistema ocasionada pelo aparecimento dinâmico de *hotspots*,

podendo atingir ganhos de 58,95%, conforme a Tabela 5.3. Como mostrado na Figura 5.5, a aplicação do algoritmo proposto se reflete em melhoria de *throughput* para uma parcela significativa de usuários (não só no *throughput* médio da célula).

- **Existe variação no desempenho do sistema a depender da taxa de dados ofertada? O aplicação do MAB consegue superar tal variação?** Os resultados contidos na Tabela 3.3 comprovam que quanto maior a taxa ofertada, mais o desempenho do sistema é sensível, ou seja, quanto mais alta for a taxa, maior é a redução de *throughput* para o cenário dinâmico. Enquanto que os dados contidos na Tabela 5.3 mostram que a aplicação do MAB supera as alocações de banda fixa, especialmente para maiores taxas ofertadas. O algoritmo proposto empata ou melhora o desempenho, mas com a grande vantagem de funcionar de forma autônoma, sem a necessidade de intervenção do operador da rede.

Os resultados deste trabalho comprovam que os sistemas de comunicações móveis podem obter ganhos reais de desempenho se as técnicas de reuso fracionário de frequência sejam empregadas e gerenciadas de forma autônoma pelo algoritmo MAB. Além disso, contribui cientificamente para os estudos direcionados a mitigação da ICI e autonomia de redes em cenários com o desafio da variabilidade de tráfego. Por fim, a solução apresentada possui potencial de aplicação em cenários reais, tendo em vista que o ambiente de simulação foi implementado no ns-3, simulador adotado de maneira recorrente na indústria de telecomunicações.

Os trabalhos futuros podem envolver a avaliação de desempenho do algoritmo proposto em cenários mais desafiadores e um estudo aprofundado sobre a convergência do algoritmo, bem como a proposta de outros agentes de aprendizado (e.g., o QL).

6.1 Produtos Tangíveis do Trabalho

A avaliação de desempenho que envolve a gerência automatizada de largura de banda do SFR gerou os seguintes trabalhos:

- Título: *Solução para Gerenciamento de Largura de Banda usando Aprendizado por Reforço*. Veículo: SBrT 2025. Status: submetido e aceito para apresentação oral. Escopo do artigo: Fruto dos resultados desta dissertação.
- Título: *Gerenciamento de Largura de Banda em Sistemas 3GPP: Uma Análise de Desempenho*. Veículo: ENCOM 2024. Status: submetido, aceito e apresentado. Escopo do artigo: Fruto dos resultados de caracterização do problema desta dissertação.
- Título: *A Study on Bandwidth Management and User Classification in Hotspot Scenarios*. Veículo: IEEE VTC 2024. Status: submetido, aceito e apresentado.. Fruto de resultados de outra frente de investigação do ICIC em conjunto com aluno de doutorado do PPgEEC.

Referências Bibliográficas

- 3GPP (2017), 3GPP TS 36.214 V14.2.0: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer; Measurements, Relatório Técnico TS 36.214 V14.2.0, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136214/14.02.00_60/ts_136214v140200p.pdf
- 3GPP (2021), 3GPP TS 36.133 V14.20.0: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management, Relatório Técnico TS 36.133 V14.20.0, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136133/14.20.00_60/ts_136133v142000p.pdf
- 3GPP (2024), Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 18.0.1 Release 18), Relatório Técnico TS 36.211 V18.0.1, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/18.00.01_60/ts_136211v180001p.pdf
- BOUJELBEN, Maissa, Sonia BEN REJEB and Sami TABBANE (2014), ‘A Comparative Study of Interference Coordination Schemes for Wireless Mobile Advanced Systems’, *International Symposium on Networks, Computers and Communications, ISNCC 2014* 6866529 .
- BURKOV, Andriy (2019), *The Hundred-Page Machine Learning Book*, 2ª edição, Andriy Burkov.
- CHEN, Zhi, Gang CHUAA and Weidong GAO (2016), A novel ICIC scheme for reducing intra cluster interference in LTE-Hi network, *em* ‘2016 IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC), IEEE’, Beijing, China.
- CHO, Yong Soo, Jaekwon KIM, Won Young YANG and Chung G. KANG (2010), *MIMO-OFDM Wireless Communications with Matlab*, 1ª edição, Wiley-IEEE Press.
- de O. Nóbrega, Luciana F., Iago D. do Rêgo and Vicente A. de Sousa Jr. (2018), Análise de desempenho de técnicas ICIC usando o ns-3, *em* ‘Anais do Encontro de Ciência e Tecnologia do Oeste Potiguar (ECOP 2018)’, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, RN, Brasil, pp. 105–112. ISSN 2526-7574.
URL: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/ecop>

- do Rêgo, Iago Diógenes (2020), Solução para concentração de usuários (hotspots) aplicando q-learning em técnicas icic baseadas em ffr, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil.
URL: <https://repositorio.ufrn.br/items/539e85d5-6a02-41f3-90bd-55b08d805bb8>
- Ericsson (2024), 5G subscriptions to overtake 4G in 2027, Página da internet.
URL: <https://www.ericsson.com/4adb7e/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2024/ericsson-mobility-report-november-2024.pdf>
- Ericsson (2025), 5G will carry 80 percent of mobile data traffic globally in 2030, Página da internet, Ericsson.
URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/mobile-traffic-forecast>
- HAMZA, A., S. KHALIFA, H. HAMZA and K. ELSAYED (2013), ‘A Survey on Inter-Cell Interference Coordination Techniques in OFDMA-Based Cellular Networks’, *Communications Surveys Tutorials*, *IEEE* .
- HASSAN, Naveed UL and Mohamad ASSAAD (2009), ‘Optimal Fractional Frequency Reuse (FFR) and resource allocation in multiuser OFDMA system’, *International Conference on Information and Communication Technologies*, *IEEE* pp. 88–92.
- HOLMA, Harri and Antti TOSKALA (2011), *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced Second edition*, 2ª edição, Wiley.
- HOLMA, Harri and Antti TOSKALA (2012), *LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced*, 1ª edição, Wiley.
- HOLMA, Harri, Antti TOSKALA and Jussi REUNANEN (2016), *LTE Small Cell Optimization 3GPP Evolution to Release 13*, 1ª edição, Wiley.
- KIMURA, Dai, Yuya HARADA and Hiroyuki SEKI (2011), ‘De-Centralized Dynamic ICIC using X2 Interfaces for Downlink LTE Systems’, *IEEE, 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* .
- KOSTA, Chrysovalantis, Bernard HUNT, Atta UI QUDDUS and Rahim TAFAZOLLI (2013), ‘On Interference Avoidance Through Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) Based on OFDMA Mobile Systems’, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *IEEE* **15**(3), 973–995.
- LAPAN, Maxim (2020), *Deep Reinforcement Learning Hands-On: Apply modern RL methods with deep Q-networks, value iteration, policy gradients, TRPO, AlphaGo Zero and more*, 2ª edição, Packt Publishing, Birmingham, UK.
- MÜLLER, Andreas C. and Sarah GUIDO (2016), *Introduction to Machine Learning with Python. A Guide for Data Scientists*, 1ª edição, O’Reilly Media.

- NARVÁEZ, Omar Albeiro Trejo and Víctor Fabián Miramá PÉREZ (2018), ‘Machine learning algorithms for inter-cell interference coordination’, *Sistemas & Telemática* **16**(46), 37–57.
- NETO, José M. de C., Sildolfo F. G. NETO, Pedro M. de SANTANA and Vicente A. de SOUSA JR. (2020), ‘Multi-Cell LTE-U/Wi-Fi Coexistence Evaluation Using a Reinforcement Learning Framework’, *Sensors* **1**.
- ns-3 (2019), LTE Design Documentation, Página na internet, ns-3.
URL: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.29/models/html/lte-design.html>
- ns-3 (2022a), Alocação de recursos do model LTE-EPC, Página da internet, ns-3.
URL: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html>
- ns-3 (2022b), Network Simulator(NS-3), Página da internet, ns-3.
URL: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.24/doxygen/namespacens3.html>
- ns-3 (2022c), Overview of the LTE-EPC simulation model, Página da internet, ns-3.
URL: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.37/models/html/lte-design.html#fig-epc-topology>
- ns-3 (2022d), Pilha de protocolo do model LTE-EPC, Página da internet, ns-3.
URL: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.37/models/html/lte-design.html#fig-epc-topology>
- REGO, Iago Diógenes do, José M. de CASTRO NETO, Sildolfo F. G. NETO, Pedro M. de SANTANA, Vicente A. de SOUSA JR., Dario VIEIRA and Augusto VENÂNCIO NETO (2023), ‘A multiarmed bandit approach for lte-u/wi-fi coexistence in a multicell scenario’, *Sensors* **23**(15), 6718.
URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/15/6718>
- REGO, Iago Diógenes do and Vicente A. de SOUSA JR. (2021), ‘Solution for Interference in Hotspot Scenarios Applying Q-Learning on FFR-Based ICIC Techniques’, *Sensors* .
- SALEM, Mohammed Ahmed, Heng Siong LIM, Kah Seng DIONG, Khaled A. ALAGHBARI, Charilaos C. ZARAKOVITIS and Su Fong CHIEN (2025), ‘Electromagnetic field-aware radio resource management for 5g and beyond: A survey’, *Computers* **14**(2).
URL: <https://www.mdpi.com/2073-431X/14/2/51>
- SANTANA, Pedro M. de, Vicente A. de SOUSA JR, Fuad M. ABINADER JR. and José M. de C. NETO (2019a), ‘DM-CSAT: a LTE-U/Wi-Fi coexistence solution based on reinforcement learning’, *Telecommunication Systems* **1**, 1–12.

- SANTANA, Pedro M. de, Vicente A. de SOUSA JR, Fuad M. ABINADER JR. and José M. de C. NETO (2019b), ‘GTDM-CSAT: an LTE-U self Coexistence Solution based on Game Theory and Reinforcement Learning’, *Journal of Communication and Information Systems (JCIS)* **34**, 169–177.
- SOYSAL, Akin, Bengi MIZRAHI, Irfan ALI, K. Berker LOĞOĞLU and Arda AKMA (2016), ‘A Self-Organizing Downlink ICIC Scheme for LTE’, *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*.
- SUTTON, Richard S. and Andrew G. BARTO (2018), *Reinforcement Learning: An Introduction. Second Edition*, 2ª edição, The MIT Press.
- TANENBAUM, Andrew S. and David WETHERALL (2011), *Redes de computadores*, 5ª edição, Pearson Prentice Hall.
- WU, Hanguang, Huaien GAO and Xiaoming XIONG (2017), ‘ICIC Based on Adjacent Cells Interference Elimination for Cell Edge’, *IEEE, 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)*.
- XIAO, Dengkun, Xiaoyu YU and Dongkai YANG (2012), A Novel Downlink ICIC Method Based on User Position in LTE-Advanced Systems, *em ‘In 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), IEEE’, Quebec City, Canada*, pp. 1–5.
- YASSIN, Mohamad, ABOULHASSAN Mohamed A., Samer LAHOUD, Marc IBRAHIM, Dany MEZHER, Bernard COUSIN and Essam A. SOUROUR (2017), ‘Survey of ICIC Techniques in LTE Networks under Various Mobile Environment Parameters’, *Wireless Networks, Springer Verlag* **23**(2), 403–418.