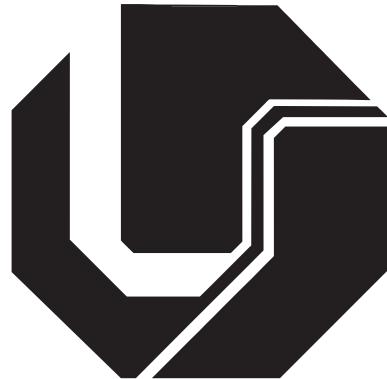


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA



**Escalonamento de Pacotes e  
Gerenciamento de Interferência em  
Redes Heterogêneas Baseados na  
Teoria dos Jogos**

**JÚNIO MOREIRA**

# **JÚNIO MOREIRA**

## **Escalonamento de Pacotes e Gerenciamento de Interferência em Redes Heterogêneas Baseados na Teoria dos Jogos**

TESE APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS EXIGIDOS PARA CONCLUSÃO DO CURSO DE DOUTORADO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS. AVALIADA EM 15/03/2021.

### **BANCA EXAMINADORA:**

PROF. DR. PAULO ROBERTO GUARDIEIRO (ORIENTADOR) - UFU  
PROF. DR. ÉDERSON ROSA DA SILVA (COORIENTADOR) - UFU  
PROF. DR. EUSTÁQUIO SÃO JOSÉ DE FARIA - UFU  
PROF. DR. MÁRCIO ANDREY TEIXEIRA - IFSP  
PROF. DR. SAULO HENRIQUE DA MATA - IFTM

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M838 Moreira, Júnio, 1983-  
2021 Escalonamento de Pacotes e Gerenciamento de  
Interferência em Redes Heterogêneas Baseados na Teoria  
dos Jogos [recurso eletrônico] / Júnio Moreira. - 2021.

Orientador: Paulo Roberto Guardieiro.  
Coorientador: Éderson Rosa da Silva.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.176>  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Guardieiro, Paulo Roberto,  
1952-, (Orient.). II. Silva, Éderson Rosa da, 1984-,  
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.  
Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4707 - [www.posgrad.feelt.ufu.br](http://www.posgrad.feelt.ufu.br) - [copel@ufu.br](mailto:copel@ufu.br)



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 284, PPGEELT				
Data:	Quinze de março de dois mil e vinte e um	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	11613EEL017				
Nome do Discente:	Júnio Moreira				
Título do Trabalho:	Escalonamento de pacotes e gerenciamento de interferência em redes heterogêneas baseados na teoria dos jogos				
Área de concentração:	Processamento da informação				
Linha de pesquisa:	Redes de computadores				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Proposta de um Novo Algoritmo para Alocação de Recursos em Redes 5G. Agência Financiadora: FAPEMIG. Início: 01/03/2018. Término ___/___/___ No. do Projeto na agência: TEC - APQ-03279-17. Professor Coordenador: Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Éderson Rosa da Silva - FEELT/UFU; Eustáquio São José de Faria - FAGEN/UFU; Márcio Andrey Teixeira - IFSP; Saulo Henrique da Mata - IFTM; Paulo Roberto Guardieiro - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Paulo Roberto Guardieiro, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **MARCIO ANDREY TEIXEIRA, Usuário Externo**, em 15/03/2021, às 16:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ederson Rosa da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/03/2021, às 16:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Saulo Henrique da Mata, Usuário Externo**, em 15/03/2021, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto Guardieiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/03/2021, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eustáquio São José de Faria, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/03/2021, às 18:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2594105** e o código CRC **488276B5**.

# Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por revitalizar minhas forças nos momentos de desânimo, porto seguro nas inseguranças e por ter e ser presença incontestável. Deus que nos fortalece, faz com que encontremos forças para vencermos os desafios que aparecem em nossas vidas e que esteve presente durante toda essa jornada.

À Nossa Senhora das Graças, a virgem da Medalha Milagrosa. Que no céu junto a Deus concede todas as bênçãos, aos humildes filhos seus.

À minha família, alicerce da minha vida, fonte de segurança e amor, com os quais dividi meus sonhos e apostaram na concretização dos mesmos. Agradeço em especial, a você, Aquilino (*in memorian*) e Iraci.

À minha irmã, Nara, que tanto amo. Pela pronta disposição em ajudar, pelos sinceros desejos de êxito em minha vida e por sempre acreditar em mim.

À minha filha, Maria Gabrielle. Filhos são anjos que Deus coloca em nossas vidas, nos enchem de alegrias e nos dão forças para superar os obstáculos.

À minha amada Noiva, Daiana, por estar sempre comigo em todos momentos de minha vida e que se tornou fundamental para meu amadurecimento como pessoa. Obrigado pelo carinho, pela força transmitida, pelas orações, pela paciência e pela confiança depositada em mim. Te amo!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro, pelas sugestões, pela confiança, pela responsabilidade com que me orienta e pelo exemplo de profissionalismo e ética no seu exercício da docência.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Éderson Rosa da Silva, pelas suas generosas e valiosas contribuições dadas ao desenvolvimento desta pesquisa. Sempre responsável com suas atribuições, agradeço pela compreensão, amizade e parceria. Saiba que aprendi muito com você ao longo deste caminho.

À UFU e ao Doutorado Interinstitucional (Dinter) pelo Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM), pela oportunidade de realizar o Doutorado e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo auxílio financeiro concedido.

Ao meu Padrinho, José Luís Primo. Agradeço por cada gesto de carinho e por suas orações, o apoio do Senhor foi fundamental. Que Deus recompense suas energias transmitidas a mim e que nossa amizade se estreite ainda mais.

Ao meu amigo e irmão, Márcio José Chaves. Obrigado pelo apoio e ajuda desde o início de minha caminhada para a Pós-graduação e incentivo para a docência. Que Deus possa te cobrir de bençãos e iluminar sempre o seu caminho.

Aos meus amigos pela amizade e companheirismo sempre presentes: Celso, Edson, Evandro, Rodrigo e Tiago.

Aos amigos e colegas que fiz no decorrer do Doutorado, que compartilharam comigo direta e indiretamente este período de muito trabalho, com destaque ao André, Flávio, Itagildo e Saulo.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta etapa difícil, mas importante de minha vida. O meu sincero agradecimento!

*”Só há mérito e glória em conquistas que nos desafiam e nos levam ao nosso limite a ponto de duvidarmos de nossa própria capacidade.”*

*Eric Loque Magalhães Xavier*

*”Sem o esforço de nossa parte, jamais atingiremos o alto da montanha. Tenha bom ânimo e coragem, você vencerá todas as dificuldades. Plante em torno de vocês sementes de otimismo e bondade para que possam colher amanhã os frutos do amor e da felicidade.”*

*Autor Desconhecido*

# Resumo

Moreira, J., *Escalonamento de Pacotes e Gerenciamento de Interferência em Redes Heterogêneas Baseados na Teoria dos Jogos*, UFU, Uberlândia, Brazil, 2021, 95p.

Redes celulares são esperadas para fornecer acesso de banda larga para um número continuamente crescente de usuários móveis. A densificação das redes celulares é essencial para aumentar a sua capacidade e melhorar a eficiência espectral, no entanto, a interferência inter-celular ainda representa um desafio que limita o desempenho do sistema, especialmente para usuários localizados na borda da célula. Portanto, é necessário coordenar a alocação de recursos entre as estações base e minimizar a interferência de forma eficiente. Este trabalho apresenta um *framework* para o escalonamento de pacotes e gerenciamento de interferência para as redes heterogêneas baseados na Teoria dos Jogos. Como solução proposta, implementa-se um escalonador de pacotes no *downlink* LTE-A baseado em Teoria dos Jogos, através do Jogo *Colonel Blotto*. Avalia-se o algoritmo proposto por meio de simulação computacional, comparando-o com algoritmos relevantes na literatura. Os resultados das simulações demonstraram que o escalonador proposto pode alcançar um melhor desempenho em termos de eficiência energética, eficiência espectral e justiça, enquanto apresenta um tempo de execução bem inferior em comparação com outros escalonadores baseados na Teoria dos Jogos. Adicionalmente, utiliza-se a Teoria dos Jogos através do Jogo Potencial Exato para o gerenciamento de interferência, das técnicas *enhanced Inter-Cell Interference Coordination* (eICIC) e *Further eICIC* (FeICIC). Além disso, implementa-se uma extensão da otimização eICIC por meio de uma função de utilidade modificada, chamada de otimização eICIC+. Os resultados das simulações ilustram o importante ganho de desempenho obtido pela otimização eICIC+ e, especialmente para usuários da borda da célula, cujos resultados apresentaram melhor justiça e vazão, em comparação à otimização eICIC.

Palavras-chave: Interferência Inter-Celular, Teoria dos Jogos, Redes Heterogêneas, LTE-A, *Colonel Blotto*, Jogo Potencial Exato, eICIC+.

# Abstract

Moreira, J., *Packet Scheduling and Interference Management in Heterogeneous Networks Based on Game Theory*, UFU, Uberlândia, Brazil, 2021, 95p.

Cellular networks are expected to provide broadband access to a continuously growing number of mobile users. The densification of cellular networks is essential to increase its capacity and improve spectral efficiency, however, inter-cell interference still represents a challenge that limits system performance, especially for users located at the edge of the cell. Therefore, it is necessary to coordinate the allocation of resources between base stations and to minimize interference efficiently. This work presents a framework for packet scheduling and interference management for heterogeneous networks based on Game Theory. As a proposed solution, it is implemented a packet scheduler for heterogeneous networks in downlink LTE-A based on game theory, through the Colonel Blotto algorithm. The proposed algorithm is evaluated by means of computer simulation, comparing it with relevant algorithms in the literature. The results of the simulations demonstrated that the scheduler is able to achieve a better performance in terms of energy efficiency, spectral efficiency and fairness, while presenting a much lower execution time compared to another scheduler based on Game Theory. Moreover, the Exact Potential Game Theory is used for interference management of the enhanced Inter-Cell Interference Coordination (eICIC) and Further eICIC (FeICIC) techniques. In addition, an extension of eICIC optimization is implemented through a modified utility function, called eICIC+ optimization. The results of the simulations illustrate the important performance gain obtained by eICIC+ optimization and especially for users at the edge of the cell, where the results showed better fairness and throughput, compared to eICIC optimization.

Index-terms: Inter-Cell Interference, Game Theory, HetNets, LTE-A, Colonel Blotto, Exact Potential Game, eICIC+.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Estado da Arte . . . . .	2
1.2 Definição do Problema . . . . .	4
1.3 Solução Proposta . . . . .	5
1.4 Objetivos e Metodologia . . . . .	6
1.5 Contribuições . . . . .	7
1.6 Resumo da Produção Técnica e Científica . . . . .	8
1.7 Sinopse dos Capítulos . . . . .	10
<b>2 Redes <i>Long Term Evolution - Advanced</i> (LTE-A)</b>	<b>11</b>
2.1 Histórico da Evolução dos Sistemas Móveis de Telecomunicações . . . . .	11
2.1.1 1G e 2G - Tecnologias Centradas em Voz . . . . .	12
2.1.2 3G - Terceira Geração de Redes Móveis . . . . .	13
2.1.3 4G - Quarta Geração de Redes Móveis . . . . .	14
2.1.4 5G/NR - Quinta Geração de Redes Móveis ( <i>New Radio</i> ) . . . . .	16
2.2 Arquitetura Básica da Rede LTE/LTE-A . . . . .	19
2.2.1 Rede de Núcleo . . . . .	20
2.2.2 Rede de Acesso via Rádio . . . . .	20
2.3 Arquitetura de Protocolos de Rádio . . . . .	21
2.4 Protocolos do Plano de Usuário . . . . .	22
2.4.1 PDCP - <i>Packet-Data Convergence Protocol</i> . . . . .	22
2.4.2 RLC - <i>Radio-Link Control</i> . . . . .	23
2.4.3 MAC - <i>Medium-Access Control</i> . . . . .	23
2.4.4 Camada Física . . . . .	25

2.5	Protocolos do Plano de Controle . . . . .	28
2.6	Considerações sobre o Capítulo 2 . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Alocação de Recursos, Escalonamento de Pacotes e Gerenciamento de Interferência em Redes Heterogêneas no <i>Downlink LTE-A</i></b>	<b>30</b>
3.1	Alocação de Recursos em Redes Heterogêneas no <i>Downlink LTE-A</i> . . . . .	30
3.1.1	Largura de Banda . . . . .	31
3.1.2	A Estrutura da Grade de Recursos . . . . .	32
3.1.3	Mecanismo de Qualidade de Serviço (QoS) . . . . .	34
3.2	Escalonamento de Pacotes em Redes Heterogêneas no <i>Downlink LTE-A</i> . . . . .	36
3.2.1	Escalonador de Pacotes . . . . .	37
3.2.2	Algoritmos e Estratégias de Escalonamento . . . . .	38
3.3	Gerenciamento de Interferência em Redes Heterogêneas no <i>Downlink LTE-A</i>	42
3.3.1	eICIC . . . . .	42
3.3.2	FeICIC . . . . .	45
3.4	Considerações sobre o Capítulo 3 . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Proposta de Escalonamento de Pacotes e Gerenciamento de Interferência em Redes Heterogêneas Baseados na Teoria dos Jogos</b>	<b>47</b>
4.1	Teoria dos Jogos . . . . .	47
4.1.1	Definição Básica de um Jogo . . . . .	49
4.1.2	Equilíbrio de <i>Nash</i> . . . . .	50
4.2	Modelagem do Sistema . . . . .	50
4.3	Estratégia de Escalonamento de Pacotes Baseado no Jogo <i>Colonel Blotto</i> .	55
4.3.1	Formulação do Jogo <i>Colonel Blotto</i> . . . . .	55
4.3.2	Solução Proposta para o Algoritmo de Escalonamento de Pacotes Baseado no Jogo <i>Colonel Blotto</i> . . . . .	57
4.4	Estratégia de Gerenciamento de Interferência através do Jogo Potencial Exato . . . . .	61
4.4.1	Formulação do Jogo Potencial Exato . . . . .	61
4.4.2	Solução Proposta para o Algoritmo de Gerenciamento de Interferência Baseado no Jogo Potencial Exato, denominada de Otimização eICIC+ . . . . .	62
4.5	Considerações sobre o Capítulo 4 . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Avaliação de Desempenho dos Algoritmos Propostos</b>	<b>65</b>
5.1	Cenário e Parâmetros de Simulação . . . . .	65
5.1.1	Cenário de Simulação . . . . .	65
5.1.2	Parâmetros de Simulação . . . . .	67
5.2	Apresentação e Análise de Resultados . . . . .	68

5.2.1	Resultados de Simulação do Algoritmo Proposto para o Escalonamento de Pacotes Baseado no Jogo <i>Colonel Blotto</i> . . . . .	69
5.2.2	Resultados de Simulação do Algoritmo Proposto para o Gerenciamento de Interferência Baseado no Jogo Potencial Exato - Otimização eICIC+ . . . . .	78
5.3	Considerações sobre o Capítulo 5 . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Conclusões Gerais</b>	<b>85</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>87</b>

# Lista de Figuras

2.1	Convergência das tecnologias móveis. . . . .	12
2.2	Evolução do LTE. . . . .	15
2.3	Classificação dos casos de uso em redes 5G. . . . .	17
2.4	Os principais recursos do IMT-2020 em relação ao seu antecessor, o IMT-Advanced. . . . .	18
2.5	Os elementos da rede EPS. . . . .	19
2.6	Arquitetura de protocolos LTE RAN. . . . .	21
2.7	Arquitetura da pilha de protocolos da interface aérea. . . . .	22
2.8	Segmentação e remontagem da camada RLC. . . . .	23
2.9	Mapeamento de canais no <i>downlink</i> . . . . .	24
2.10	Diagrama de bloco de um transmissor OFDMA. . . . .	26
3.1	Estrutura do domínio do tempo LTE. . . . .	32
3.2	Grade de recurso do LTE. . . . .	33
3.3	A arquitetura geral do serviço da <i>bearer</i> EPS. . . . .	34
3.4	Modelo simplificado para o escalonamento <i>downlink</i> . . . . .	40
3.5	<i>Almost blank subframes</i> . . . . .	43
3.6	<i>Cell range expansion</i> . . . . .	44
5.1	Exemplo de um <i>layout</i> de uma rede <i>HetNet</i> hexagonal. Os quadrados representam as <i>macrocells</i> e os triângulos representam as <i>picocells</i> . Os usuários não são exibidos por uma questão de clareza. . . . .	66
5.2	Cálculo da eficiência energética em função do número de <i>picocells</i> através dos escalonadores $\Phi$ e utilizando um cenário sem coordenação de interferência, NULL. . . . .	70
5.3	Cálculo da eficiência energética em função do número de <i>picocells</i> através dos escalonadores $\Phi$ e utilizando a otimização eICIC. . . . .	71
5.4	Cálculo da eficiência energética em função do número de <i>picocells</i> através dos escalonadores $\Phi$ e utilizando a otimização FeICIC. . . . .	71

5.5	Cálculo da eficiência energética em função do número de <i>picocells</i> através dos escalonadores $\Phi$ e utilizando as otimizações eICIC e FeICIC em relação a um cenário sem coordenação de interferência, NULL. . . . .	72
5.6	Cálculo da eficiência espectral em função do número de <i>picocells</i> através dos escalonadores $\Phi$ e utilizando um cenário sem coordenação de interferência, NULL. . . . .	73
5.7	Cálculo da eficiência espectral em função do número de <i>picocells</i> através dos escalonadores $\Phi$ e utilizando a otimização eICIC. . . . .	74
5.8	Cálculo da eficiência espectral em função do número de <i>picocells</i> através dos escalonadores $\Phi$ e utilizando a otimização FeICIC. . . . .	74
5.9	Cálculo da eficiência energética em função do número de <i>picocells</i> através dos escalonadores $\Phi$ e utilizando as otimizações eICIC e FeICIC em relação a um cenário sem coordenação de interferência, NULL. . . . .	75
5.10	Ilustrativo da função valor para a utilidade global agregada $U_1(u, w)$ do Jogo <i>Colonel Blotto</i> . . . . .	77
5.11	Cálculo da eficiência energética em função do número de <i>picocells</i> através do escalonador PF. . . . .	79
5.12	Cálculo da eficiência energética em função do número de <i>picocells</i> através do escalonador RR. . . . .	79
5.13	Cálculo da eficiência espectral em função do número de <i>picocells</i> através do escalonador PF. . . . .	80
5.14	Cálculo da eficiência espectral em função do número de <i>picocells</i> através do escalonador RR. . . . .	81
5.15	A <i>cumulative distribution function</i> (CDF) das taxas de vazão dos 5% piores usuários no <i>cluster</i> central, onde o escalonador PF é usado e cada hexágono possui uma <i>picocell</i> . . . . .	82
5.16	A <i>cumulative distribution function</i> (CDF) das taxas de vazão dos 5% piores usuários no <i>cluster</i> central, onde o escalonador RR é usado e cada hexágono possui uma <i>picocell</i> . . . . .	83

# Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre LTE e LTE- <i>Advanced</i> . . . . .	15
2.2	Canais lógicos do LTE. . . . .	24
2.3	Canais de transporte do LTE. . . . .	25
2.4	Canais físicos do LTE. . . . .	27
2.5	Informações de controle usados na rede LTE. . . . .	27
3.1	Largura de banda suportadas pelo LTE. . . . .	31
3.2	Padronização de <i>QoS Class Identifiers</i> (QCIIs) para o LTE. . . . .	36
4.1	Nomenclatura para a modelagem do sistema. . . . .	51
5.1	Parâmetros de simulação. . . . .	67
5.2	Padrões de ABSs que podem ser escolhidos por uma <i>macrocell</i> . . . . .	69
5.3	Índice de justiça em função do número de <i>picocells</i> para usuários do <i>cluster</i> central configurado para vários tipos de topologias . . . . .	76
5.4	Comparação do Tempo Médio de Execução para vários Escalonadores <i>Downlink</i> . . . . .	78
5.5	Índice de justiça e taxa média do UE para a otimização eICIC+. . . . .	81
5.6	Porcentagem de melhoria de vazão dos 5% piores usuários no <i>cluster</i> central em função do número de <i>picocells</i> . . . . .	83

# Lista de Abreviaturas

16-QAM	16-Quadrature Amplitude Modulation
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
3GPP2	Third Generation Partnership Project 2
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
ABS	Almost Blank Subframe
AMBR	Aggregate Maximum Bit Rate
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ARP	Allocation and Retention Priority
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BSR	Buffer Status Report
CA	Carrier Aggregation
CBG	Colonel Blotto Game
CCCH	Common Control Channel

CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CFI	Control Format Indicator
CoMP	Coordinated Multi-Point
CQI	Channel Quality Indicator
CRE	Cell Range Expansion
CSB	Cell Selection Bias
DCCH	Dedicated Control Channel
DCI	Downlink Control Information
DL-SCH	Downlink - Shared Channel
DP	Dynamic Programming
DTCH	Dedicated Traffic Channel
EB	Exabytes
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
eICIC	enhanced Inter-cell Interference Coordination
eICIC+	enhanced Inter-Cell Interference Coordination Plus
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eNB	evolved NodeB
EPS	Evolved Packet System
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EV-DO	Evolution - Data Optimized
FDD	Frequency Division Duplex
FDPS	Frequency Domain Packet Scheduling
FeICIC	Further enhanced Inter-cell Interference Coordination
FFT	Fast Fourier Transform
GBR	Guaranteed Bit Rate

GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HARQ	Hybrid ARQ
HetNets	Heterogeneous Networks
HoL	Head of Line
HRPD	High Rate Packet Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICI	Inter-Cell Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IMT-2000	International Mobile Telecommunications - 2000
IP	Internet Protocol
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	International Telecommunications Union
KKT	Karush Kuhn Tucker
LTE	Long-Term Evolution
LTE-A	Long-Term Evolution - Advanced
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
MBR	Maximum Bit Rate
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
MCS	Modulation and Codification Scheme

MIMO	Multiple Input and Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
mMTC	massive Machine-Type Communication
MPDCCH	MTC Physical Downlink Control Channel
MTCH	Multicast Traffic Channel
NAS	Non Access Stratum
NMT	Nordic Mobile Telephone
non-GBR	non-Guaranteed Bit Rate
OAM	Operation Administration and Maintenance
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
P-GW	PDN Gateway
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCCH	Paging Control Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCH	Paging Channel
PDC	Personal Digital Communications
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Unit
PF	Proportional Fair
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PRB	Physical Resource Block
QoE	Quality of Experience

QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
R-PDCCH	relay - Physical Downlink Control Channel
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Blocks
RBG	Resource Block Group
RLC	Radio Link Control
ROHC	Robust Header Compression
RP-ABS	Reduced Power - Almost Blank Subframes
RR	Round Robin
RRM	Radio Resource Management
RSRP	Reference Signal Received Power
S-GW	Serving Gateway
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
SC-MCCH	Single Cell - Multicast Control Channel
SC-MTCH	Single Cell - Multicast Traffic Channel
SDU	Service Data Unit
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SLA	Service Level of Agreement
SRBs	Signaling Radio Bearers
TACS	Total Access Communication System
TB	Transport Block
TBS	Transport Block Size
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing

TDMA	Time Division Multiple Access
TDPS	Time Domain Packet Scheduling
TEID	Tunnel Endpoint Identifier
TTI	Transmission Time Interval
UDN	Ultra Dense Network
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
URLLC	Ultra Reliable and Low Latency Communication
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
ZSDG	Zero Sum Dynamic Game

*“Peçam, e será dado; busquem, e encontrarão; batam, e a porta será aberta. Pois todo o que pede recebe; o que busca encontra; e àquele que bate, a porta será aberta.”*

- Mateus 7:7-8

# 1

## Introdução

A CRESCENTE DEMANDA POR SERVIÇOS DE REDES MÓVEIS, VoIP e *streaming* de vídeo, com requisitos de atrasos e de vazão, coloca novos desafios no projeto para as redes de Quinta Geração de Sistemas de Telefonia Móvel (5G). Um estudo recente, apresentado em [1], enfatiza que o tráfego de dados móveis aumentará 66% em 2023, e espera-se um crescimento de algo em torno de 48,3 *exabytes* (EB) no volume total mensal de tráfego em sistemas de comunicação em todo o mundo. Além disso, um aumento de 1000 vezes no volume de tráfego de dados móveis é esperado para as redes 5G [2].

Nota-se, portanto, a proliferação de dispositivos móveis e o aumento praticamente exponencial da demanda em redes móveis sem fio. Ao mesmo tempo, a necessidade e possibilidade de prover serviços com *Quality of Service* (QoS) atraiu a atenção das operadoras de telefonia móvel e da área de pesquisa nos últimos anos. Nesse contexto, o *Third Generation Partnership Project* (3GPP) introduziu o padrão *Long Term Evolution-Advanced* (LTE-A) [3]. Na rede LTE-A, o principal objetivo é alcançar maior capacidade de rede em comparação com a rede *Long Term Evolution* (LTE).

As redes 5G prometem um significativo aumento na vazão da célula e uma eficiência espectral melhorada em comparação com os sistemas anteriores. Para alcançar esses objetivos, a densificação da rede apresenta-se como um elemento chave para aumentar a cobertura do sistema e atender à crescente demanda por dados móveis de maneira econômica devido a sua capacidade de reutilização do espectro de frequência e a propriedade

de preservação da *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR) [4].

Entre as soluções desenvolvidas para atender a crescente demanda por serviços de acesso a redes móveis no LTE-A/5G, a densificação do sistema é caracterizada pela implantação de maior quantidade de estações de rádio base em uma determinada localidade visando ampliar a disponibilidade de banda e a capacidade da rede. A densificação da rede de acesso via rádio, resulta em reduzir as distâncias médias entre o *User Equipment* (UE) e a estação base mais próxima e, assim, diminui a perda de percurso do sinal transmitido e melhora a capacidade do canal [5].

Uma alternativa para a densificação celular é implantar nós adicionais de baixa potência, ou *picocell*, na área de cobertura da *macrocell* convencional, dando origem às *Heterogeneous Networks (HetNets)*. No entanto, as *HetNets* levam à *Inter-Cell Interference* (ICI), afetando fortemente a SINR dos UEs ativos, especialmente os UEs localizados na borda da célula [6], o que gera uma degradação significativa na vazão total desses usuários. Portanto, é necessário coordenar a alocação de recursos entre as estações base e minimizar a interferência de forma eficiente.

Nesse sentido, o mecanismo de escalonamento de pacotes e o gerenciamento de *Inter-Cell Interference Coordination* (ICIC) são características fundamentais das redes LTE-A. No entanto, a diversidade de aplicações e diferentes requisitos de QoS trazem desafios complexos ao desenvolvimento de algoritmos de escalonamento de pacotes e ao gerenciamento da ICIC. Para isso, considera-se a complexidade desses problemas de otimização e escolhe-se a Teoria dos Jogos como estratégia.

Nas próximas seções, identifica-se os principais desafios e as soluções desenvolvidas pela comunidade de pesquisadores. Por conseguinte, desenvolve-se uma base de estudos para orientar os esforços desta pesquisa na proposta de um novo algoritmo de escalonamento de pacotes baseado no Jogo *Colonel Blotto*. Ademais, utiliza-se o Jogo Potencial Exato para o desenvolvimento de uma proposta de extensão da otimização eICIC por meio do uso de uma função de utilidade modificada para o gerenciamento de interferência, ambos utilizados para as redes heterogêneas no *downlink* LTE-A.

## 1.1 Estado da Arte

O escalonamento de pacotes na rede LTE-A tem sido objeto de intensa pesquisa e padronização, com a maioria dos estudos concentrando-se no canal *downlink*. O trabalho desenvolvido por Capozzi *et al.* [7] apresenta uma pesquisa com os principais artigos sobre escalonadores de pacotes no *downlink*. Assim, esse trabalho é útil para leitores interessados em aprender os conceitos básicos, além de ser uma boa referência para se aprofundar um pouco mais sobre este tópico.

Alguns trabalhos aplicam a Teoria dos Jogos para implementar escalonadores em redes móveis de banda larga sem fio. Como pode ser observado em [8], o autor desenvolve o algoritmo *Cake-Cutting* com o objetivo de alocar subcanais de uma maneira justa. O algoritmo *Stackelberg Game* é desenvolvido nos trabalhos em [9–11], para a alocação de recursos em redes heterogêneas. Nos estudos, comprova-se a baixa complexidade do algoritmo.

O Jogo *Colonel Blotto* pode ser modelado como um problema clássico de alocação de recursos em redes móveis de banda larga sem fio. O algoritmo *Colonel Blotto* foi implementado para modelar uma vasta gama de situações práticas [12–15], por exemplo, alocar espectro dinâmico em inter-redes [12], alocar espectro compartilhado em redes sem fio [13], utilizar uma abordagem estocástica do Jogo *Colonel Blotto* assimétrico para estratégias de alocação de recursos em redes sem fio [14], e defesa contra ameaças persistentes no armazenamento em nuvem dinâmico [15]. No entanto, não foram identificados trabalhos que utilizam a Teoria dos Jogos através do Jogo *Colonel Blotto*, aplicado ao escalonamento de pacotes em redes heterogêneas LTE-A.

Diversos trabalhos na literatura discutem a interferência inter-celular em redes móveis de banda larga sem fio. A pesquisa de ICIC desenvolvida em [16], é uma evolução das soluções de atenuação de interferência da *Release 8* até a *Release 11*. Comparam-se os diferentes métodos, a saber, ICIC, eICIC e *Coordinated Multi-Point* (CoMP). Várias semelhanças foram observadas e os resultados obtidos mostraram o aprimoramento de desempenho em termos de vazão na borda da célula. No trabalho desenvolvido em [17], os autores revisam diferentes técnicas de ICIC propostas sob as duas principais classes de prevenção de interferência, especificamente, a *frequency reuse-based* (estática) e a *cell coordination-based* (dinâmica). Para este fim, novos modelos de classificação são apresentados e usados para descrever as técnicas da ICIC.

O gerenciamento de interferência baseado em Teoria dos Jogos para as redes heterogêneas LTE-A foi estudada nos trabalhos em [9, 18, 19]. Para [9], a alocação de potência através de Jogos não-cooperativos com adaptação da SINR é usada para aliviar a interferência de *femtocells* em *macrocells*, enquanto em [18] o controle de potência é baseado no Jogo *Stackelberg* para maximizar a capacidade das *femtocells* sob uma restrição de interferência em várias camadas. Um algoritmo de controle de potência baseado em Jogos não-cooperativos é proposto em [19] juntamente com um esquema de associação de *evolved NodeBs* (*eNodeBs* ou eNBs) para as *HetNets*.

Vários algoritmos de otimização eICIC foram propostos na literatura utilizando duas técnicas representativas de eICIC, como o *Almost Blank Subframe* (ABS) e o *Cell Selection Bias* (CSB). O algoritmo de Tall *et al.* [20] desacopla a otimização do ABS e a otimização do CSB, em que os padrões do ABS são simplificados como números fracionários. Prova-

se a convergência dos algoritmos usando teoremas de aproximação estocásticos. Um algoritmo centralizado é proposto em [21], no qual os padrões ABS e CSB são otimizados em conjunto e as *macrocells* ao redor das *picocells* devem oferecer ABSs nos mesmos *subframes*. Já em [22], os autores simplificam o problema de otimização conjunta de ABS e CSB, de modo que a otimização de ABS e da associação de usuário são resolvidas separadamente. No trabalho em [23], um algoritmo distribuído é proposto quando o número de ABSs é determinado sem considerar os valores de CSBs. Determina-se uma troca limitada de informações via *backhaul* e uma quantidade ótima de ABS derivada individualmente em cada eNB.

Soluções em Jogo Potencial Exato para otimização eICIC distribuída são consideradas nos estudos em [24–28]. Uma abordagem similar também foi empregada no trabalho apresentado em [29], os autores utilizaram o Jogo Potencial Exato para o gerenciamento de interferência das técnicas eICIC e FeICIC. Os resultados das simulações apresentaram ganhos de desempenho com essas otimizações.

## 1.2 Definição do Problema

As redes móveis sem fio são esperadas para fornecer acesso de banda larga para um número continuamente crescente de usuários móveis. Como previamente observado, através da estimativa de crescimento de volume de dados móveis, mais capacidade deve ser adicionada às atuais redes celulares, portanto, as operadoras de telefonia móvel precisam utilizar eficientemente os recursos para aproveitar ao máximo o escasso espectro de frequências disponível.

A densificação celular tem se mostrado uma técnica promissora para atender a demanda de usuários móveis, cujo objetivo é implantar nós adicionais de baixa potência, ou *picocells*, sob a área de cobertura da *macrocell* convencional, dando origem às *HetNets*. Entretanto, a ICI potencialmente introduzida por diferentes usuários transmitindo sobre as mesmas bandas de frequência torna-se um fator limitante para o desempenho das *HetNets* [30].

Além disso, em uma arquitetura *HetNet*, a área de cobertura de uma *macrocell* é sobreposta a de vários nós de acesso de baixa potência, como *picocells*, *femtocells* e *relays* [31]. A potência de transmissão das *macrocells* é muito maior do que os nós de acesso de baixa potência (*picocells*), dessa forma, os usuários móveis que estão fisicamente localizados perto das *picocells* são atraídos para as *macrocells*, portanto, podem criar *picocells* subutilizadas e *macrocells* superlotadas. Por outro lado, a *macrocell* próxima às *picocells* gera grande interferência para um usuário associado à *picocell*, assim, nessas redes, são necessários esquemas inteligentes de escalonamento de pacotes e gerenciamento de

interferência para obter ganhos de desempenho.

Deste modo, espera-se que por intermédio de uma alocação de recursos adequada juntamente com técnicas de gerenciamento de interferência inter-celular através da *enhanced Inter-cell Interference Coordination* (eICIC) e *Further enhanced Inter-cell Interference Coordination* (FeICIC), a rede heterogênea no *downlink* LTE-A maximize a eficiência energética, a eficiência espectral, a vazão da borda da célula e a justiça visando atender às necessidades das aplicações. Por fim, diante dos cenários desafiadores descritos e das técnicas atualmente empregadas, conclui-se que novas propostas inovadoras são necessárias.

Na próxima seção, apresentam-se as soluções relevantes para as questões acima.

### 1.3 Solução Proposta

Com base no que foi apresentado na seção anterior, nota-se que a alocação de recursos é uma tarefa complexa. Uma ferramenta que tem sido aplicada para resolver esse problema e apresentado resultados promissores é a Teoria dos Jogos. Entretanto, com base na pesquisa realizada, não é do conhecimento do autor deste trabalho, qualquer algoritmo de escalonamento de pacotes para redes heterogêneas no *downlink* LTE-A baseado em Teoria dos Jogos utilizando o Jogo *Colonel Blotto*.

O Jogo *Colonel Blotto*, proposto por Borel em 1921 [32], é um modelo fundamental de alocação estratégica de recursos. Dois jogadores alocam uma determinada quantia de recursos para um número fixo de campos de batalha com determinados valores. Cada campo de batalha é então ganho pelo jogador que alocou mais recursos para ele, e cada jogador maximiza o valor agregado dos campos de batalha que ele ganha. Este jogo permite modelar muitos problemas práticos de alocação de recursos em várias configurações estratégicas [33].

Neste trabalho, propõe-se a utilização do Jogo *Colonel Blotto* heterogêneo, em um cenário envolvendo jogadores assimétricos [34], os quais modelam múltiplas *macrocells* e *picocells* competindo para fornecer a alocação de recursos a um conjunto de UEs distribuídos por várias células (campos de batalha). As estações base competem umas com as outras para fornecer a alocação de *Physical Resource Blocks* (PRBs) aos UEs, alocando estrategicamente a largura de banda disponível. A alocação de recursos aos UEs será baseada no conjunto de estratégias que otimizem a função de utilidade dos jogadores.

O algoritmo leva a um problema de equilíbrio de preços para a disputa entre os jogadores. O mecanismo empregado pelo Jogo *Colonel Blotto* funciona ajustando iterativamente os “preços” das “mercadorias” e pressupõe que um jogador só adquira as “mercadorias”

que possuem maiores utilidades para ele. Cada iteração do algoritmo envolve a resolução de um problema de *max flow*, assim, o algoritmo termina dentro de iterações finitas [35].

No modelo apresentado, os jogadores são agrupados em pares. Uma abordagem direta é formar os pares aleatoriamente e permitir que os jogadores negoçiem de maneira arbitrária repetidamente até a convergência [36]. Finalmente, compara-se técnicas tradicionais de alocação de recursos por serem algoritmos relevantes na literatura, como por exemplo, o *Proportional Fair* (PF) e o *Round Robin* (RR), com a solução proposta através de modelagem e simulação.

Para o gerenciamento de interferência inter-celular, emprega-se o Jogo Potencial Exato nas técnicas eICIC e FeICIC utilizando os algoritmos apresentados no trabalho descrito em [29]. Além disso, implementa-se uma extensão da otimização eICIC, por meio de uma função de utilidade modificada em [24], através do Jogo Potencial Exato, chamada de otimização eICIC+. Uma análise do algoritmo da otimização eICIC+ e um estudo abrangente sobre o desempenho das técnicas de ICIC, são apresentados posteriormente. Nota-se porém, um ganho de desempenho da otimização eICIC+ em comparação com a otimização eICIC.

Como resultado, espera-se que as técnicas de gerenciamento de interferência inter-celular em conjunto com a solução proposta, possam melhorar significativamente a eficiência energética, a eficiência espectral, a vazão de usuários da borda da célula e o índice de justiça na rede LTE-A.

## 1.4 Objetivos e Metodologia

O principal objetivo deste trabalho é propor uma solução para o problema de alocação de recursos em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A. Para tal fim, considera-se a complexidade desses problemas de otimização e escolhe-se a Teoria de Jogos como estratégia, através do Jogo *Colonel Blotto* no escalonamento de pacotes. Além disso, utiliza-se a Teoria dos Jogos através do Jogo Potencial Exato para o gerenciamento de interferência por meio das técnicas eICIC, eICIC+ e FeICIC. Em particular, considera-se os seguintes objetivos específicos:

- implementar e comparar o algoritmo de escalonamento proposto, baseado no Jogo *Colonel Blotto*, com os algoritmos de escalonamento relevantes na literatura, tais como o PF e o RR;
- avaliar o desempenho do algoritmo de escalonamento de pacotes baseado no Jogo *Colonel Blotto* através das análises de eficiência espectral, eficiência energética e índice de justiça para as redes heterogêneas LTE-A;

- desenvolver uma extensão da otimização eICIC para o gerenciamento de interferência, por meio de uma função de utilidade modificada através do Jogo Potencial Exato, chamada de otimização eICIC+;
- avaliar as técnicas eICIC, eICIC+ e FeICIC ao compará-las em cenários sem gerenciamento de interferência e com diferentes níveis de densificação para as redes LTE-A.

A Teoria dos Jogos é uma ferramenta poderosa para resolver problemas complexos de otimização, contudo, poucos estudos utilizam a Teoria dos Jogos para a aplicação no escalonamento de pacotes em redes heterogêneas LTE-A. Nesse sentido, aplica-se o Jogo *Colonel Blotto* no escalonamento de pacotes para as redes heterogêneas no *downlink* LTE-A e verifica-se sua viabilidade em comparação com as soluções da literatura. Assim, o algoritmo proposto deve ser capaz de se adequar à densificação da rede, enquanto apresenta um tempo de execução satisfatório.

Para avaliar os objetivos propostos, é necessário definir um ambiente de simulação, uma vez que há um número substancial de parâmetros envolvidos. Sendo assim, define-se a ferramenta MATLAB como ambiente de simulação, visto que a ferramenta possui características para modelagem da rede heterogênea e da Teoria dos Jogos. Nesse contexto, as avaliações são conduzidas por meio de simulação computacional, em que os cenários descritos são reproduzidos de forma a atender as expectativas dos usuários e operadores de rede em condições mais próximas da realidade. Ademais, utiliza-se a densificação de redes, porque a adição de pequenas células (*picocells*) na área de cobertura das células tradicionais (*macrocells*) é uma das principais estratégias para aumentar a capacidade das redes LTE-A/5G.

Por fim, o gerenciamento de interferência é modelado com referência no trabalho em [29] utilizando a Teoria dos Jogos através do Jogo Potencial Exato. Adicionalmente, verifica-se o comportamento das técnicas eICIC, eICIC+ e FeICIC de forma a alcançar os objetivos dessas otimizações.

## 1.5 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é um novo algoritmo de escalonamento de pacotes baseado em Teoria dos Jogos através do Jogo *Colonel Blotto* para redes heterogêneas no *downlink* LTE-A, considerando vários indicadores de desempenho da rede, como por exemplo, a eficiência energética, a eficiência espectral e o índice de justiça.

Conforme dito anteriormente, com base na pesquisa realizada, não é do conhecimento do autor deste trabalho, escalonadores de pacotes utilizando o Jogo *Colonel Blotto* para

redes heterogêneas no *downlink* LTE-A. Dessa forma, as principais contribuições deste trabalho são:

- (i) Um *framework* de otimização utilizando Teoria dos Jogos: baseado no Jogo *Colonel Blotto* e no Jogo Potencial Exato, propõe-se primeiramente um algoritmo que obtém ganhos de desempenho através do uso do Jogo *Colonel Blotto* para o escalonamento de pacotes. Além disso, apresenta-se um algoritmo distribuído por meio do Jogo Potencial Exato que pode otimizar conjuntamente os padrões ABS e CSB ou otimizar conjuntamente os padrões RP-ABS e CSB, para o gerenciamento de interferência.
- (ii) Um escalonador *downlink* mais eficiente baseado no Jogo *Colonel Blotto*: propõe-se um escalonador de pacotes para as redes heterogêneas no *downlink* LTE-A baseado no algoritmo *Colonel Blotto*. Os resultados da simulação mostram que o escalonador proposto pode melhorar a eficiência energética e a eficiência espectral em até 10% em comparação com os escalonadores convencionais, principalmente em cenários de maior densificação da rede. Além disso, o algoritmo alcança um melhor desempenho em termos de justiça para todos os cenários avaliados e é cerca de 20 vezes mais rápido que os algoritmos convexos convencionais em termos de tempo de execução da simulação.
- (iii) Técnica de otimização eICIC+: formula-se o problema de otimização como Teoria dos Jogos, através do Jogo Potencial Exato, a fim de maximizar uma função de utilidade modificada, que visa fazer melhorias no eICIC, denominada de otimização eICIC+. Os resultados de simulação ilustram importantes ganhos de desempenho da otimização eICIC+ no serviço de justiça dos usuários e, especialmente para usuários da borda da célula, onde a vazão média aumenta em até 51% quando comparada à otimização eICIC.

## 1.6 Resumo da Produção Técnica e Científica

Elenca-se a seguir as contribuições bibliográficas produzidas durante a realização deste trabalho por meio das seguintes publicações:

- Periódicos:
  - 1) Moreira J., Silva R. E., P. R. Guardieiro. **eICIC Optimization Improvements in Downlink Resource Allocation in LTE-A HetNets**. Artigo publicado na revista *Journal of Communication and Information Systems*, Vol. 35, Issue 1, 15-24, Jan. 2020.  
<https://doi.org/10.14209/jcis.2020.2>

- 2) Moreira J., Silva R. E., P. R. Guardieiro. **A New Strategy for Downlink Resource Allocation Based on Colonel Blotto Game in LTE-A Het-Nets.** Em processo de escrita.
  
- Congressos:
  - 1) Moreira J., Silva R. E., P. R. Guardieiro. **Análise de Algoritmos de Escalonamento e Gerenciamento de Interferência para Redes Heterogêneas no Downlink LTE-A e 5G.** Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT 2020, (2020).  
<https://doi.org/10.14209/SBRT.2020.1570644406>
  - 2) Moreira J., Silva R. E., P. R. Guardieiro. **Análise de Interferência Inter-Celular eICIC para Redes Heterogêneas no Downlink LTE-A e 5G.** Anais da X Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação - ENCOM 2020, (2020).
  - 3) Moreira J., Silva R. E., P. R. Guardieiro. **Técnicas de Coordenação de Interferência Inter-Celular para Redes Heterogêneas no Downlink LTE-A.** Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBrC 2019, (2019). p. 910-923.  
<https://doi.org/10.5753/sbrc.2019.7410>
  - 4) Moreira J., Silva R. E., P. R. Guardieiro. **Algoritmos *QoS-aware* para o Escalonamento Downlink LTE-A em Cenários de Tráfego Misto: Uma Comparação de Desempenho.** Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT 2018, (2018). p. 636-640.  
<https://doi.org/10.14209/sbtrt.2018.73>
  
- Capítulo de livro:
  - 1) Moreira J., Silva R. E., P. R. Guardieiro. **Proposta de um novo Algoritmo *QoS-aware* para o Escalonamento Downlink LTE-A em Cenários de Tráfego Misto: Uma Comparação de Desempenho.** e-book Técnicas de Processamento de Sinais e Telecomunicações, 1 ed.: Atena Editora, v.1 , p. 73-84, (2019).  
<https://doi.org/10.22533/at.ed.4981908078>

## 1.7 Sinopse dos Capítulos

Este trabalho está organizado conforme a seguir.

O Capítulo 2 introduz os principais conceitos da rede LTE-A, que são elementos importantes para compreender a pesquisa descrita neste trabalho.

O Capítulo 3 dedica-se a continuidade do embasamento teórico com mais detalhes sobre o processo de alocação de recursos para os sistemas LTE-A. Ademais, descreve como o escalonamento de pacotes é organizado e compartilhado entre os usuários. E, por fim, apresenta conceitos da interferência inter-cellular em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A.

O Capítulo 4 apresenta o algoritmo proposto para o problema de escalonamento de pacotes definido na Seção 1.2. Esta apresentação propõe a aplicação da técnica de Teoria dos Jogos para redes heterogêneas no *downlink* LTE-A através do Jogo *Colonel Blotto*. Além disso, propõe-se neste Capítulo para o gerenciamento de interferência, a extensão da otimização eICIC por meio do Jogo Potencial Exato, chamada de otimização eICIC+.

No Capítulo 5 avalia-se os algoritmos propostos do Capítulo 4, juntamente com algumas discussões acerca de seus desempenhos. Além disso, também se descreve o ambiente de simulação usado para realizar a avaliação da proposta desenvolvida e apresenta-se os resultados obtidos da avaliação.

Finalmente, no Capítulo 6 apresenta-se as conclusões e desenvolvimentos futuros da pesquisa.

*"Eu disse essas coisas para que em mim vocês tenham paz. Neste mundo vocês terão aflições; contudo, tenham ânimo! Eu venci o mundo."*

- João 16:33

# 2

## Redes *Long Term Evolution - Advanced* (LTE-A)

AS REDES MÓVEIS DE BANDA LARGA SEM FIO são muito importantes atualmente na sociedade. A rede *Long-Term Evolution Advanced* e a rede 5G são muito complexas porque fazem uso de vários conceitos e tecnologias para acompanhar o crescente número de usuários e as necessidades das novas aplicações. Este Capítulo apresenta alguns elementos e conceitos que são importantes para compreender a pesquisa descrita neste trabalho.

### 2.1 Histórico da Evolução dos Sistemas Móveis de Telecomunicações

O mundo testemunhou quatro gerações de sistemas de comunicação móvel, cada uma associada a um conjunto específico de tecnologias e um conjunto específico de casos de uso suportados. O LTE é comumente conhecido como uma rede móvel de quarta geração (4G) [37]. Um importante aspecto da rede LTE é a aceitação mundial de uma única tecnologia, ao contrário das gerações anteriores, para as quais existem várias tecnologias concorrentes, conforme Figura 2.1.

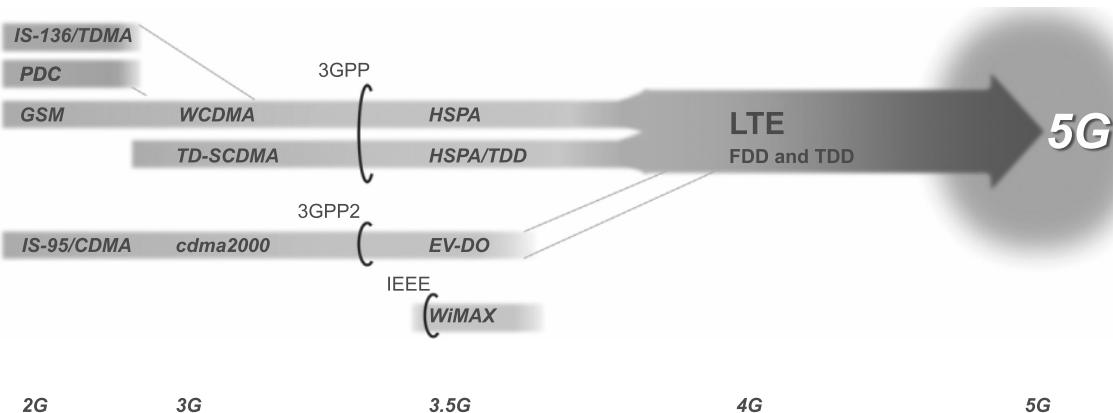


Figura 2.1: Convergência das tecnologias móveis (Adaptado de [38]).

O fato de haver um padrão único para a rede 4G e dela ser universalmente aceita acelera o desenvolvimento de novos serviços, além de redução de custo para usuários e operadoras de rede. A seguir, desenvolve-se uma breve revisão das tecnologias antecessoras ao LTE, bem como a evolução das redes móveis de telecomunicações.

### 2.1.1 1G e 2G - Tecnologias Centradas em Voz

Os sistemas móveis de telecomunicações de *First Generation* (1G) eram analógicos de telefonia móvel e limitados apenas a serviços de voz. Esses sistemas foram empregados comercialmente no início da década de 80 e apresentaram uma eficiência espectral limitada, além de dispositivos grandes e uma tecnologia cara. Os sistemas 1G incluem *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), *Nordic Mobile Telephone* (NMT) e *Total Access Communication System* (TACS). A comunicação móvel estava disponível antes dos sistemas 1G, mas normalmente em pequena escala e visando um grupo selecionado de pessoas [39].

A *Second Generation* (2G) surgiu no início dos anos 90 baseada em uma tecnologia digital, que permitiria uma melhor eficiência espectral associada a dispositivos menores e mais baratos. Os sistemas 2G ainda eram centrados na voz, mas, graças a serem totalmente digitais, forneciam uma capacidade significativamente maior do que os sistemas 1G anteriores [40].

O sistema 2G mais popular é o *Global System for Mobile Communication* (GSM), desenvolvido pela *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI). O GSM usa o *Time Division Multiple Access* (TDMA) como o método de transmissão. Outro padrão notável é o IS-95, também conhecido como *cdmaOne*, projetado pela *Qualcomm*. Este sistema é baseado no *Code Division Multiple Access* (CDMA), possibilitando melhor aproveitamento da frequência alocando usuários em códigos de espalhamento espectral diferentes. Exemplos de tecnologias 2G incluem a tecnologia GSM originada na Europa,

as tecnologias americanas IS-95/CDMA e IS-136/TDMA e a tecnologia japonesa *Personal Digital Communications* (PDC) [38].

Ao longo dos anos, algumas dessas tecnologias iniciais foram estendidas para também suportar serviços de pacotes de dados. Essas extensões são algumas vezes chamadas de 2.5G para indicar que elas têm suas raízes nas tecnologias 2G, mas possuem uma variedade significativamente maior de recursos do que as tecnologias originais. O sistema GSM incorporou essas melhorias ao desenvolvimento do *General Packet Radio Service* (GPRS) oferecendo suporte transparente ao protocolo TCP/IP na rede de núcleo e melhorando as taxas de dados para até 114 Kbps. Outras melhorias foram integradas à rede GSM com a introdução da técnica de *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE). A EDGE aumentou as taxas de dados para até 384 Kbps [41].

### 2.1.2 3G - Terceira Geração de Redes Móveis

A *Third Generation* (3G) de sistemas de telefonia móvel teve seu início definido pela *International Telecommunications Union* (ITU) no fim da década de 1990, ao criar o programa *International Mobile Telecommunications-2000* (IMT-2000) [42], de forma a promover redes multimídia móveis de alta qualidade, que podem oferecer banda larga de alta velocidade, sistema baseado em *Internet Protocol* (IP), *roaming* global, entre outros recursos [39].

Nesse período, surgem dois grupos de trabalhos, a saber o 3GPP e o *Third Generation Partnership Project 2* (3GPP2). Cada uma dessas organizações desenvolveu suas próprias tecnologias para as especificações do IMT-2000, pela qual a 3GPP direcionou seus esforços na tecnologia GSM e a 3GPP2 com foco em tecnologias IS-95. Dessa forma, duas novas especificações passaram a competir pelo mercado das operadoras de rede celular: o *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA) e o *cdma2000* [37].

O sistema 3G mais popular é o *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS). O UMTS é um sistema desenvolvido a partir do GSM pelo 3GPP, tendo como característica a alteração da interface aérea, enquanto mantém as particularidades da rede de núcleo. O acesso via rádio, conhecido como *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) é baseado no WCDMA. Paralelamente, o 3GPP2 desenvolveu o *cdma2000* a partir do *cdmaOne*. Existem três diferenças principais entre os sistemas UTRAN e *cdma2000* [37]:

- O UTRAN utiliza uma largura de banda de 5 MHz, enquanto o *cdma2000* faz uso da largura de banda de 1,25 MHz.
- O *cdma2000* é compatível com versões anteriores do *cdmaOne*, ou seja, os dispositivos *cdmaOne* podem se comunicar com eNBs *cdma2000* e vice-versa. Isto não é

verdade para as tecnologias UMTS e GSM.

- O UTRAN permite em uma mesma subportadora compartilhar o tráfego de voz e dados. Por outro lado, o *cdma2000* agrupa voz e dados em diferentes subportadoras.

Os primeiros grandes aprimoramentos para o WCDMA vieram com a introdução do *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) na *Release 5* seguido pelas melhorias no *uplink* na *Release 6* conhecido como *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA), com o objetivo de melhorar a eficiência espectral. Juntos, o HSDPA e o HSUPA formam o *High Speed Packet Access* (HSPA). O HSPA, às vezes chamado de 3.5G, permitiu uma experiência de banda larga móvel “verdadeira” com taxas de dados de vários Mbps, mantendo a compatibilidade com as especificações 3G originais [38].

A 3GPP na *Release 7*, conhecida como *Evolved High Speed Packet Access* (HSPA+) trouxe melhorias, aumentando a quantidade de antenas utilizadas pelos dispositivos com o *Multiple Input and Multiple Output* (MIMO), modulações *16-Quadrature Amplitude Modulation* (16-QAM) (*uplink*)/64-QAM (*downlink*), bem como a introdução do *beamforming*, melhorando a taxa de dados experimentada pelos usuários para até 28 Mbps no *downlink* e 11 Mbps no *uplink* [41].

O 3GPP2 seguiu uma direção similar e introduziu o *High Rate Packet Data* (HRPD), também conhecido como *Evolution Data Optimized* (EV-DO). Posteriormente, o 3GPP2 aprimorou seu sistema e lançou o CDMA EV-DO Revisão A e CDMA EV-DO Revisão B [41].

### 2.1.3 4G - Quarta Geração de Redes Móveis

A transição dos sistemas 3G para a *Fourth Generation* (4G) foi impulsionada pela criação e desenvolvimento de novos serviços para dispositivos móveis, e possibilitada pelo avanço da tecnologia. Houve também uma evolução do ambiente em que os sistemas móveis são implantados e operados, em termos de concorrência entre operadoras móveis, desafios de outras tecnologias, nova regulamentação do uso do espectro e dos aspectos de mercado dos sistemas móveis [40].

Em direção à banda larga móvel sem fio 4G, o órgão 3GPP iniciou sua investigação do padrão LTE como uma tecnologia viável para oferecer várias vantagens distintas sobre outras tecnologias sem fio. Essas vantagens incluem aumento de desempenho, como altas taxas de dados, baixa latência e maior eficiência na utilização do espectro sem fio [43]. O LTE é uma solução de banda larga móvel que oferece um rico conjunto de recursos com muita flexibilidade em termos de opções de implantação e possíveis ofertas de serviços. Algumas das características mais importantes que merecem destaque são representadas na Figura 2.2.

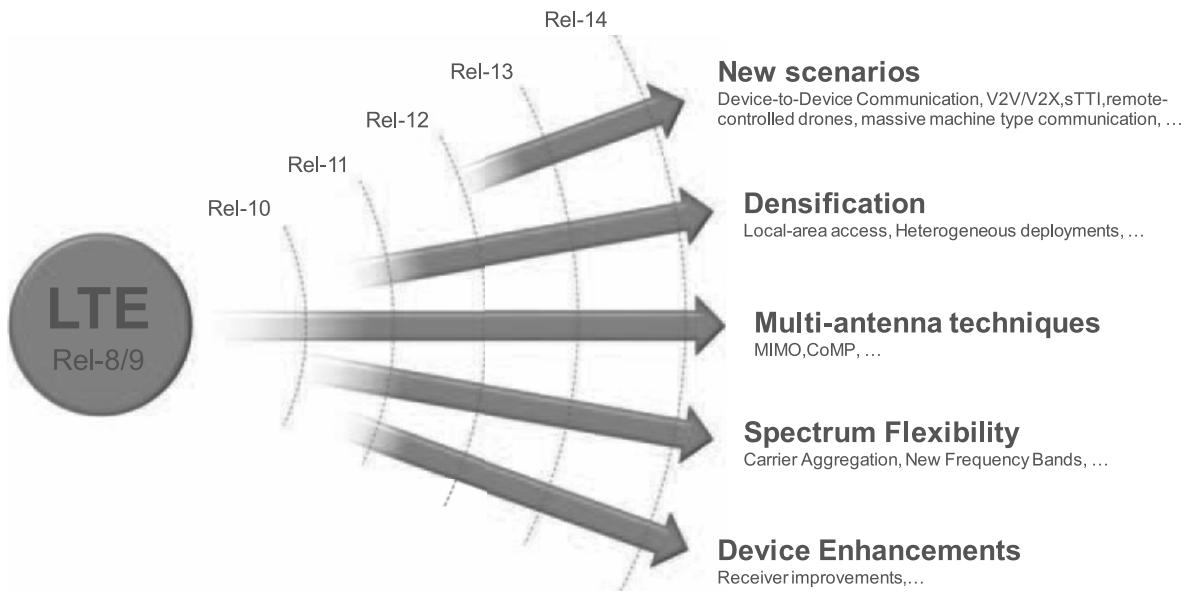


Figura 2.2: Evolução do LTE (Adaptado de [38]).

O LTE-Advanced é uma rede sem fio de banda larga que fornece altas taxas de dados, tendo como principal objetivo alcançar maior capacidade de rede em comparação com a rede LTE. Os principais requisitos do LTE são o custo reduzido da rede (custo por *bit*), melhor provisionamento de serviços e compatibilidade com sistemas 3GPP e com versões anteriores [44]. Além dos recursos avançados usados pelo LTE *Release 8*, o LTE-Advanced possui alguns aprimoramentos que podem ser encontrados a seguir [41] e também destacados na Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Comparaçāo entre LTE e LTE-Advanced.

Parāmetros	LTE	LTE-A
Taxa de dados	Downlink: 300 Mbps Uplink: 75 Mbps	Downlink: 1 Gbps Uplink: 500 Mbps
Eficiêncā espectral	Downlink: 15 bps/Hz Uplink: 3.75 bps/Hz	Downlink: 30 bps/Hz Uplink: 15 bps/Hz
Transmissāo da largura de banda	Downlink: 20 MHz Uplink: 20 MHz	Downlink: 100 MHz Uplink: 40 MHz
Largura de banda	1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz	Entre 20–100 MHz
Duplexaçāo	TDD e FDD	TDD e FDD
Cobertura	Desempenho total até 5 km	Igual ao LTE

- **Mobilidade:** O sistema deve suportar mobilidade em toda a rede celular para várias velocidades móveis de até 350 km/h. O desempenho do sistema deve ser melhorado para 0-10 km/h, superando os sistemas E-UTRA e E-UTRAN para velocidades mais altas.

- **OFDMA:** Para obter alta eficiência espectral o LTE faz uso do *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA). No *downlink*, o OFDMA oferece robustez contra a interferência de múltiplos caminhos e dá suporte a técnicas avançadas, como escalonamento *channel-dependent* no domínio da frequência e técnicas MIMO.
- **Suporte para TDD e FDD:** O LTE suporta *Time Division Duplex* (TDD) e *Frequency Division Duplex* (FDD). Ao usar o FDD, a estação base e o dispositivo móvel transmitem e recebem simultaneamente, mas usando frequências de portadoras diferentes. Usando o TDD, eles transmitem e recebem na mesma frequência da portadora, mas em diferentes intervalos de tempo.
- **Taxa de dados:** LTE-Advanced deve suportar taxas de dados significativamente maiores para permitir serviços e aplicativos avançados. Nas *Releases 8/9*, a taxa de dados pode alcançar até 100 Mbps no *downlink* e 50 Mpbs no *uplink*. Com o advento da estratégia da *Carrier Aggregation* (CA), a *Release 10* oferece 3 Gbps para o *downlink* e 1,5 Gbps para o *uplink* em 100 MHz de espectro. Finalmente, a *Release 13* aumentou as taxas de dados para 25 Gbps no *downlink* e 12,5 Gbps no *uplink*, considerando uma largura de banda de 640 MHz.
- **Técnicas aprimoradas de transmissão de múltiplas antenas:** No LTE-A, o esquema MIMO melhora a eficiência espectral, a vazão média da célula e desempenho na borda da célula. Com a introdução da *Coordinated Multi-Point*, as antenas de múltiplas células são utilizadas de tal forma que as antenas de transmissão/recepção da célula servidora e das células vizinhas podem melhorar a qualidade do sinal recebido no equipamento do usuário e reduzir as interferências co-canais das células vizinhas. A eficiência espectral é diretamente proporcional ao número de antenas usadas.

#### 2.1.4 5G/NR - Quinta Geração de Redes Móveis (*New Radio*)

As discussões sobre a comunicação móvel de *Fifth Generation* (5G) começaram por volta de 2012. Na visão 5G, o acesso à informação e o compartilhamento de dados são possíveis em qualquer lugar e a qualquer momento para qualquer pessoa e qualquer coisa. O 5G expande o uso de comunicações não apenas centradas no ser humano mas também centradas em máquinas.

A comunicação móvel e sem fio se tornará cada vez mais a principal maneira de humanos e máquinas acessarem informações e serviços. Isso levará a mudanças socioeconômicas ainda não imagináveis, incluindo melhorias na produtividade, sustentabilidade, entretenimento e bem-estar. Para tornar essa visão uma realidade, são propostas três áreas emergentes [2, 45, 46] no cenário de redes 5G sem fio:

- Aumento da eficiência espectral: CoMP, *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), técnicas de codificação aprimoradas.
- Densificação da rede: desenvolvimento massivo de *smallcells*.
- Eficiência energética: a rede IMT-2020 não deve exigir mais energia do que o IMT-*Advanced*, no entanto, deve oferecer um desempenho aprimorado.
- Espectro adicional.

Os maiores ganhos de capacidade são esperados com a densificação da rede: será necessária uma implantação maciça de células pequenas [47], em busca de capacidade adicional [48]. A implantação densa de células pequenas em redes celulares heterogêneas (*HetNet*) levará a uma rede limitada por interferência, dependendo do espectro de frequência disponível. Técnicas mais avançadas de mitigação de interferência entre células precisarão ser implantadas para combater a interferência e melhorar a eficiência espectral.

Portanto, este trabalho de Tese poderá ser extendido para as redes 5G porque a adição de pequenas células (*picocells*) na área de cobertura das células tradicionais (*macrocells*) é uma das principais estratégias para aumentar a capacidade dos sistemas 5G, além de possuir várias características e particularidades do gerenciamento de interferência do modelo 5G.

A banda larga móvel é, e continuará a ser, uma parte importante da futura comunicação celular, mas as futuras redes sem fio são, em grande parte, também relacionadas a uma gama significativamente maior de casos de uso. Dessa forma, surgem três classes distintas de casos de uso para a rede 5G [38], como pode ser observado na Figura 2.3:

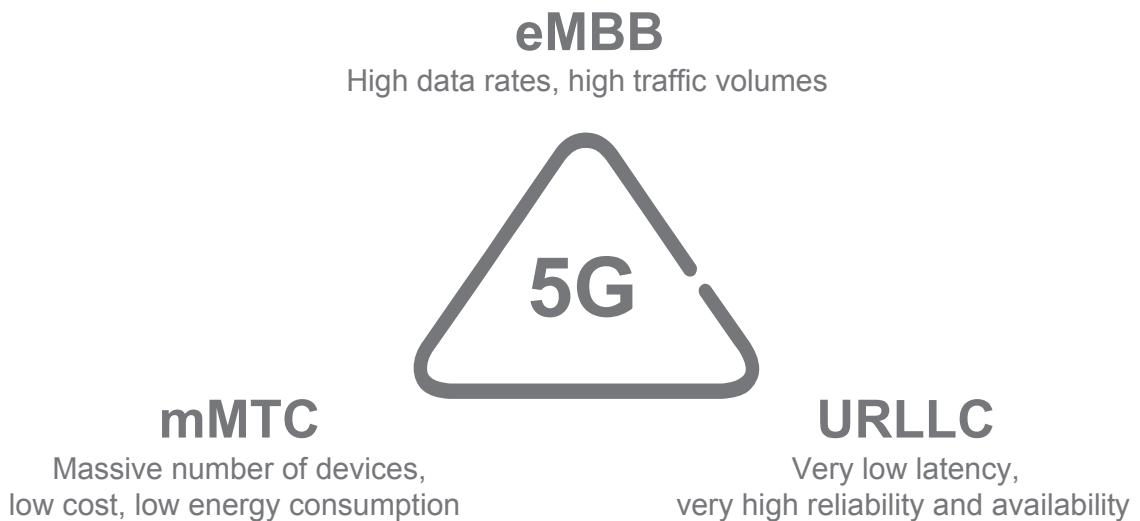


Figura 2.3: Classificação dos casos de uso em redes 5G (Adaptado de [38]).

- ***enhanced Mobile Broadband*** (eMBB): corresponde a uma evolução direta dos serviços de banda larga móvel de hoje, permitindo volumes de dados ainda maiores e uma experiência aprimorada do usuário.
  - ***massive Machine-Type Communication*** (mMTC): representa os serviços que são caracterizados por um grande número de dispositivos. Os principais requisitos para tais serviços incluem custo de dispositivo e consumo de energia muito baixo, permitindo uma vida útil de bateria de dispositivo longa, de pelo menos vários anos.
  - ***Ultra-Reliable and Low-Latency Communication*** (URLLC): relaciona aos tipos de serviços que são planejados para exigir latência muito baixa e confiabilidade extremamente alta.

A partir de 2012, o ITU-R iniciou os trabalhos para a próxima geração de sistemas IMT, denominada IMT-2020. Como parte do desenvolvimento, o ITU-R definiu um conjunto de capacidades necessárias para uma tecnologia IMT-2020 a fim de suportar os casos de uso 5G e cenários de uso identificados através de órgãos regionais, projetos de pesquisa, operadores, administrações e outras organizações [49]. A Figura 2.4 ilustra os principais recursos, juntamente com os números indicativos, destinados a fornecer uma primeira orientação de alto nível para os requisitos mais detalhados do IMT-2020 que estão em desenvolvimento.

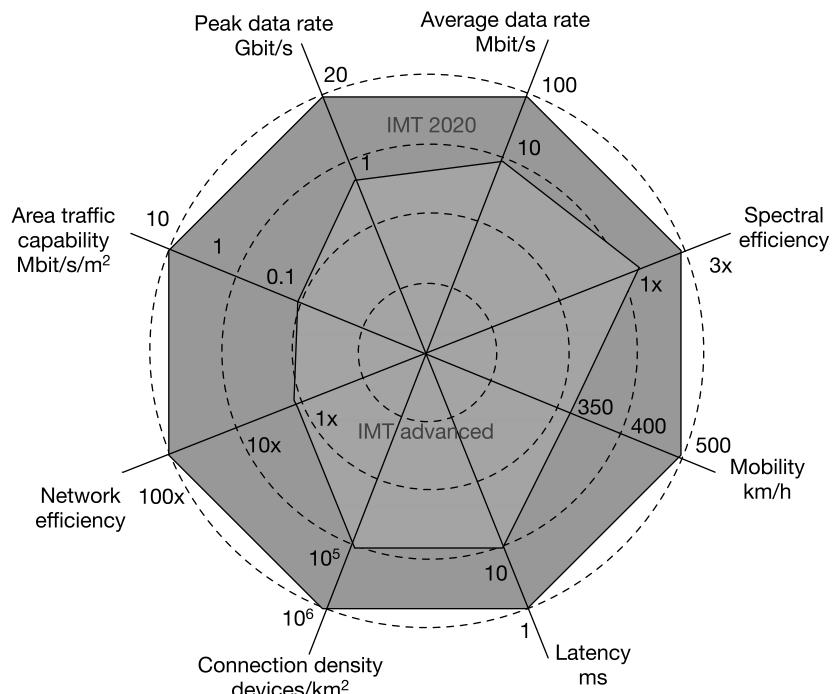


Figura 2.4: Os principais recursos do IMT-2020 em relação ao seu antecessor, o IMT-Advanced (Adaptado de [50]).

Como pode ser visto, os valores são parcialmente absolutos e parcialmente relativos aos recursos correspondentes do IMT-Advanced. Os valores para os diferentes recursos-chave não precisam ser alcançados simultaneamente e alguns destinos são, até certo ponto, mutuamente exclusivos [50].

## 2.2 Arquitetura Básica da Rede LTE/LTE-A

A arquitetura geral do sistema da rede de acesso via rádio e da rede básica foi revisada, incluindo a divisão da funcionalidade entre as duas redes. Esse trabalho ficou conhecido como *System Architecture Evolution* (SAE), e resultou em uma arquitetura de *Radio Access Network* (RAN), além de uma nova arquitetura da rede de núcleo, conhecida como EPC. Juntos, a LTE RAN e o EPC são referidos como o *Evolved Packet System* (EPS) [38]. A Figura 2.5 descreve os principais elementos da rede EPS.

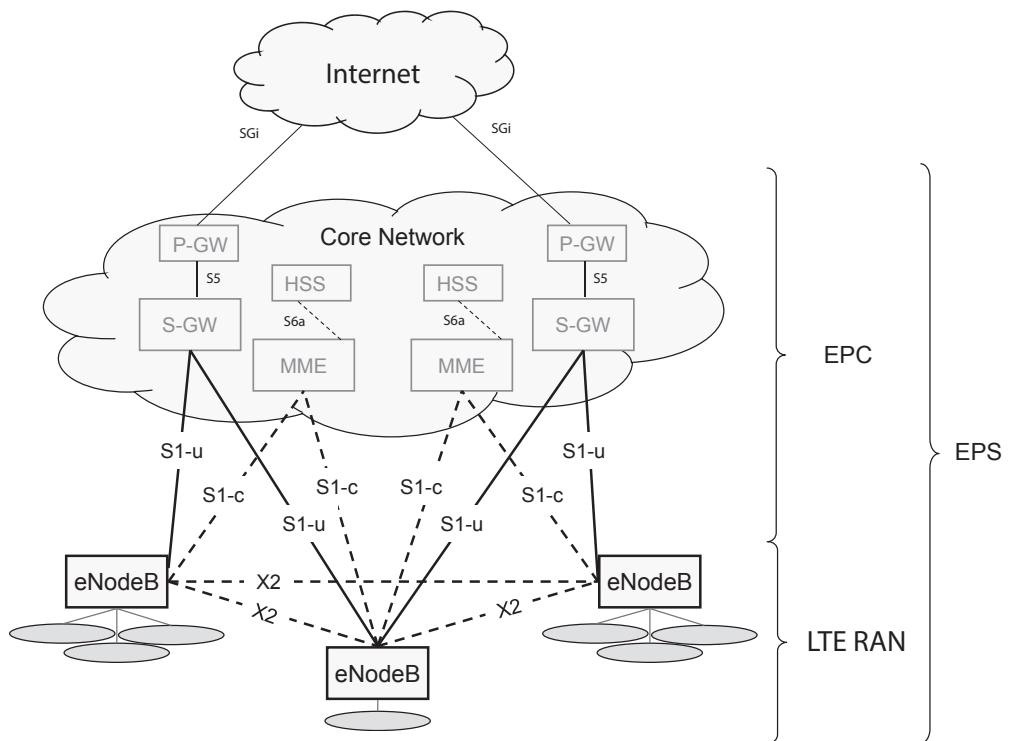


Figura 2.5: Os elementos da rede EPS (Adaptado de [38]).

O EPC é responsável por funções não relacionadas ao acesso via rádio, mas necessárias para fornecer uma rede completa de banda larga móvel. Isso inclui, por exemplo, autenticação, funcionalidade de cobrança e configuração de conexões de ponta a ponta.

Já a rede RAN é responsável por todas as funcionalidades relacionadas a rede geral, incluindo, por exemplo, escalonamento, gerenciamento de recursos de rádio, protocolos de retransmissão, codificação e esquemas de várias antenas [51]. A seguir, descreve-se cada um desses elementos em mais detalhes.

### 2.2.1 Rede de Núcleo

O EPC representa o núcleo de uma rede LTE. É formado por múltiplos nós, sendo os principais o MME, S-GW, P-GW e HSS. Esses nós oferecem múltiplas funcionalidades, como gerenciamento de mobilidade, autenticação, gerenciamento de sessões, configuração de *bearers* e aplicação de diferentes Qualidades de Serviços [38]:

- ***Mobility Management Entity (MME)***: é o principal elemento de controle para a rede de acesso LTE. Ele é responsável por autenticar o usuário, pelo rastreamento dos UEs e o procedimento de paginação. Também é responsável por escolher o *Serving Gateway (S-GW)* para os UEs e fornecer a função de plano de controle para mobilidade entre as redes de acesso LTE e 2G/3G.
- ***Serving Gateway (S-GW)***: todos os pacotes IPs de usuários são transferidos através do S-GW, que serve como âncora de mobilidade quando os dispositivos se movem entre as eNodeBs. A coleta de informações e estatísticas necessárias para a cobrança também é feita pelo S-GW.
- ***Packet Data Network (PDN) Gateway (P-GW)***: o P-GW é o ponto de contato do EPC com a internet. Através da interface SGi, cada *gateway* PDN troca dados com quaisquer dispositivos externos ou redes de dados por pacotes. A alocação do endereço IP para um dispositivo específico é tratada pelo P-GW, bem como a aplicação da QoS.
- ***Home Subscriber Server (HSS)***: o HSS contém dados de assinatura SAE dos usuários, como o perfil de QoS atribuído pelo EPS e quaisquer restrições de acesso para *roaming*. Adicionalmente, contém informações sobre os PDNs aos quais o usuário pode se conectar, além de informações dinâmicas, como a identidade do MME ao qual o usuário está atualmente conectado ou registrado.

No próximo tópico, discute-se o acesso via rádio destacando as principais interfaces de comunicação.

### 2.2.2 Rede de Acesso via Rádio

A rede de acesso via rádio, denominada de LTE RAN, usa uma arquitetura simples com um único tipo de nó, a eNodeB. A eNodeB é responsável por todas as funções relacionadas ao rádio em uma ou mais células, como também pelo *Radio Resource Management (RRM)*. Isso significa que a eNodeB manipula, por exemplo, a alocação de recursos de rádio, fornecendo a QoS requerida [37].

A eNodeB é conectada ao EPC por meio da *interface S1*, mais especificamente ao S-GW por meio da parte do plano de usuário S1, S1-u, e ao MME por meio da parte do

plano de controle S1, S1-c. Uma eNodeB pode ser conectada a vários MMEs/S-GWs para fins de compartilhamento de carga e redundância [39].

A interface X2 faz a conexão das eNodeBs, sendo usada principalmente para suportar a mobilidade no modo ativo. Essa interface também pode ser utilizada para funções de gerenciamento de RRM, como o gerenciamento de interferência inter-celular (ICIC). A interface X2 também é usada para suportar a mobilidade sem perdas entre as células vizinhas por meio do encaminhamento de pacotes [39].

A interface entre a eNodeB e o dispositivo é conhecida como interface Uu. A menos que seja utilizada *dual connectivity*, um dispositivo é conectado a uma única eNodeB. Há também uma interface PC5 definida para comunicação direta *device-to-device*.

## 2.3 Arquitetura de Protocolos de Rádio

Com a arquitetura geral da rede em mente, a arquitetura de protocolos LTE RAN para os planos de usuário e controle pode ser discutida (o MME, como discutido anteriormente, não faz parte da rede LTE RAN, mas está incluído na imagem a fim de visualizar o sistema como um todo). A Figura 2.6 ilustra a arquitetura de protocolos LTE RAN [38].

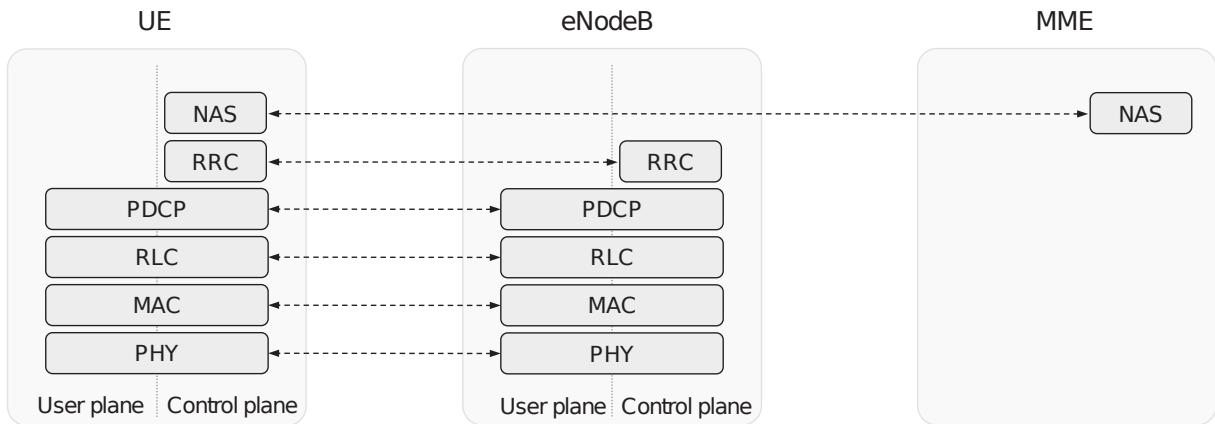


Figura 2.6: Arquitetura de protocolos LTE RAN (Adaptado de [39]).

Como pode ser observado na Figura 2.6, o *Non Access Stratum* (NAS) gerencia operações de suporte à mobilidade, procedimentos para o gerenciamento de sessão e manutenção de conectividade do protocolo IP entre os UEs com o MME [52]. Resumidamente, o NAS atua como elo funcional entre a rede de núcleo (EPC) e a rede wireless (LTE RAN). Os protocolos NAS e RRC completam a camada de protocolos no plano de controle.

Na próxima seção, os protocolos do plano de usuário são descritos. Em seguida, pelos protocolos do plano de controle na Seção 2.5. Como pode ser visto na Figura 2.6, muitas das entidades de protocolos são comuns aos planos de usuário e controle e, portanto, PDCP, RLC, MAC e PHY serão descritos apenas na seção do plano de usuário.

## 2.4 Protocolos do Plano de Usuário

A rede LTE RAN fornece um ou mais *radio bearers* para os quais os pacotes IP são mapeados de acordo com seus requisitos de QoS [53]. Uma visão geral da arquitetura de protocolos LTE RAN para o plano de usuário é ilustrada na Figura 2.7.

A estrutura de protocolos LTE RAN relacionada às transmissões *uplink* é semelhante à estrutura de *downlink* da Figura 2.7, embora existam algumas diferenças, como por exemplo, a seleção de formato de transporte [38]. A seguir, descreve-se cada uma das camadas da pilha de protocolos do plano de usuário.

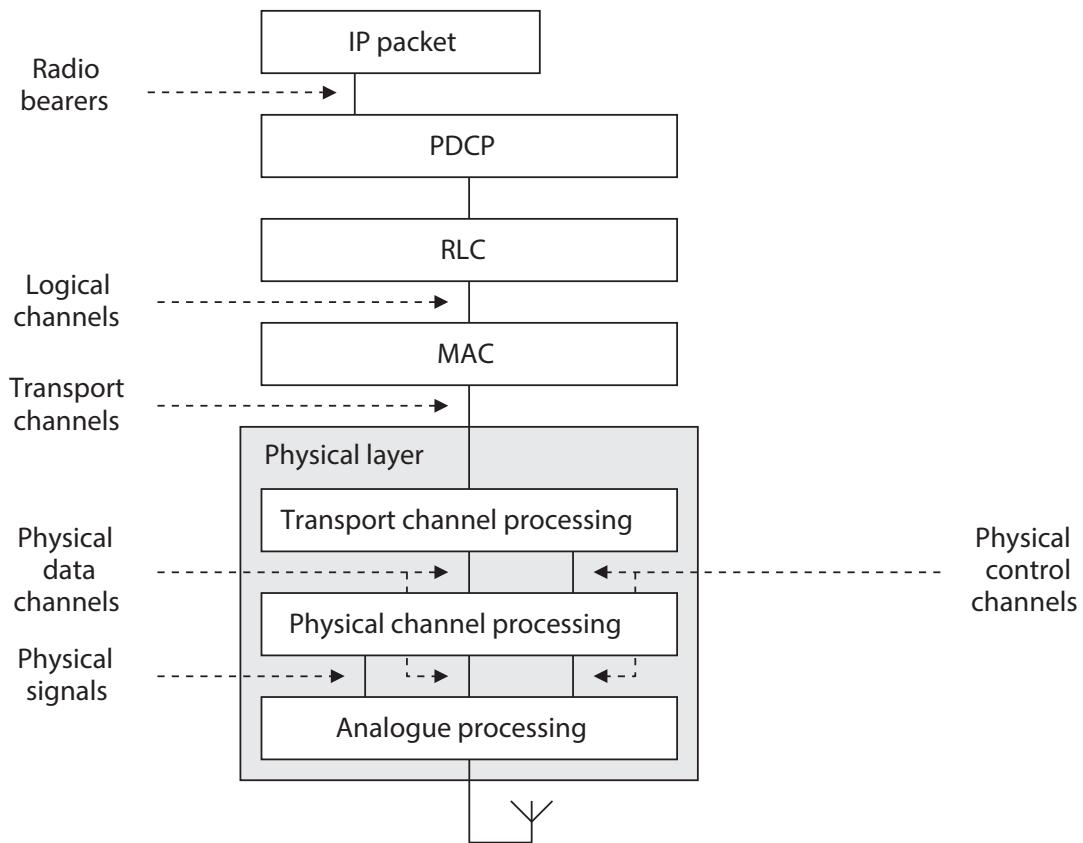


Figura 2.7: Arquitetura da pilha de protocolos da interface aérea (Adaptado de [37]).

### 2.4.1 PDCP - *Packet-Data Convergence Protocol*

A camada *Packet-Data Convergence Protocol* (PDCP) é responsável pela entrega em sequência dos dados do plano do usuário, criptografia, descarte de pacotes duplicados, verificação da integridade de dados do plano de controle e compressão de cabeçalhos IPs - *Robust Header Compression* (ROHC). [54].

O PDCP também conta com um temporizador para prevenção de atrasos excessivos, podendo assim tomar decisões de descarte de pacotes ou retransmissão, de forma a atender os requisitos de QoS das aplicações.

Além disso, na camada PDCP são realizadas as funções de transporte de nível superior relacionadas às camadas subsequentes.

### 2.4.2 RLC - *Radio-Link Control*

As principais funções da camada *Radio-Link Control* (RLC) são a segmentação e a remontagem dos pacotes da camada superior, descritas na Figura 2.8. Dependendo da decisão do escalonador, uma determinada quantidade de dados é selecionada para transmissão de *buffer* do *Service Data Unit* (SDU) da camada RLC, e as SDUs são segmentadas/remontadas para criar a *Protocol Data Unit* (PDU) [55].

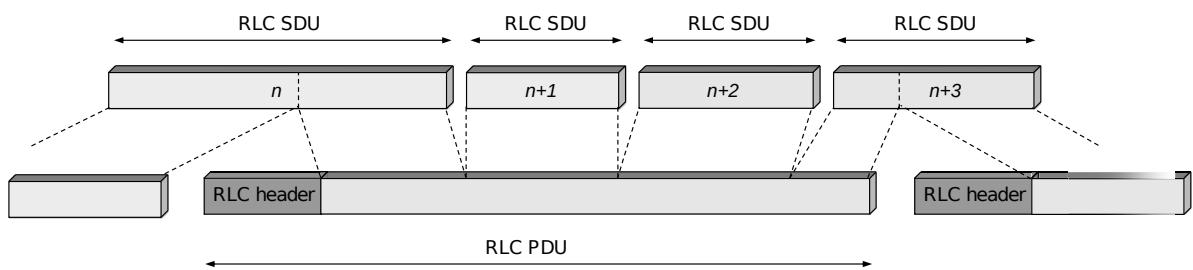


Figura 2.8: Segmentação e remontagem da camada RLC (Adaptado de [39]).

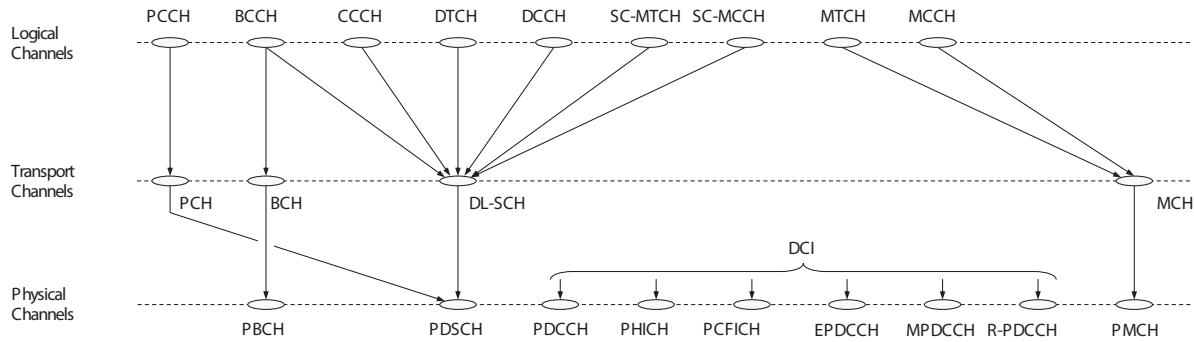
Assim, para o LTE, o tamanho da PDU da camada RLC varia dinamicamente. Para altas taxas de dados, um grande tamanho de PDU resulta em uma sobrecarga relativa menor, enquanto que para taxas de dados baixas, um tamanho pequeno de PDU é necessário, pois a carga útil seria, de outra forma, muito grande [39].

Em algumas configurações, essa camada também é responsável por garantir a entrega confiável dos fluxos de dados que precisam chegar corretamente. Dependendo do tipo de serviço, a camada RLC pode ser configurada em modos diferentes para executar algumas ou todas essas funções [39].

### 2.4.3 MAC - *Medium-Access Control*

A camada *Medium Access Control* (MAC) é responsável pelo gerenciamento de prioridades dos canais lógicos, pela retransmissão *Hybrid ARQ* (HARQ), pelo procedimento de “*random-access*” e pelo escalonamento de pacotes no enlace *downlink* e no enlace *uplink* [56].

O MAC fornece serviços para a camada RLC na forma de canais lógicos. Por outro lado, a partir da camada física, a camada MAC usa serviços na forma de canais de transporte. A Figura 2.9 ilustra tal procedimento aplicado ao *downlink*. Em seguida, descrevem-se os canais lógicos e de transporte.

Figura 2.9: Mapeamento de canais no *downlink* (Adaptado de [39]).

## Canais Lógicos

Um canal lógico é definido pelo tipo de informação que transporta e pelo modo ao qual a informação é processada. Geralmente é classificado como um canal de controle, usado para transmissão de informações de controle e configuração necessárias para operar um sistema LTE, ou como um canal de tráfego, usado para os dados do usuário. Especifica-se na Tabela 2.2 o conjunto de tipos de canais lógicos para a rede LTE [41].

Tabela 2.2: Canais lógicos do LTE.

Canal	Nome	Informação transportada
PCCH	Paging Control Channel	Mensagens de <i>paging</i>
BCCH	Broadcast Control Channel	Informação do sistema
CCCH	Common Control Channel	Sinalização
DTCH	Dedicated Traffic Channel	Plano de usuário
DCCH	Dedicated Control Channel	Informação do sistema
SC-MTCH	Single-Cell Multicast Traffic Channel	Plano de usuário
SC-MCCH	Single-Cell Multicast Control Channel	Sinalização
MTCH	Multicast Traffic Channel	Plano de usuário
MCCH	Multicast Control Channel	Sinalização

## Canais de Transporte

Um canal de transporte é definido por como e com quais características as informações são transmitidas pela interface de rádio. Os dados em um canal de transporte são organizados em blocos de transporte. Em cada TTI, no máximo um bloco de transporte de tamanho dinâmico é transmitido através da interface de rádio para um dispositivo na ausência de multiplexação espacial (MIMO) [39].

Os canais de transporte são listados na Tabela 2.3. Define-se o principal canal para transporte de dados na camada MAC para a transmissão *downlink*, o *Downlink Shared Channel* (DL-SCH). Dessa forma, esse canal é transportado em unidades de informação definidas entre a camada MAC e PHY conhecidas como *Transport Block* (TB). O tamanho do TB, ou *Transport Block Size* (TBS), é definido a partir da quantidade de RBs utilizados bem como o *Modulation and Codification Scheme* (MCS) adotado para transmissão (*downlink*) ou recepção (*uplink*). O DL-SCH comunica-se com o canal da camada física, o PDSCH [40].

Tabela 2.3: Canais de transporte do LTE.

Canal	Nome	Informação transportada
PCH	Paging Channel	Mensagens de <i>paging</i>
BCH	Broadcast Channel	Bloco de informação mestre
DL-SCH	Downlink Shared Channel	Dados e sinalização de <i>downlink</i>
MCH	Multicast Channel	Dados MBMS

#### 2.4.4 Camada Física

A camada física é responsável pela codificação, processamento *hybrid-ARQ*, modulação, processamento de múltiplas antenas e mapeamento do sinal para os recursos físicos de tempo/frequência apropriados. Também lida com mapeamento de canais de transporte para canais físicos, como mostrado na Figura 2.7.

A rede LTE foi projetada como uma tecnologia de acesso de rádio altamente flexível para suportar várias configurações de largura de banda do sistema (de 1,4 MHz a 20 MHz). O LTE usa o OFDMA e o *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) como técnicas para acesso múltiplo para o *downlink* e *uplink*, respectivamente.

Para permitir que a eNodeB atenda múltiplos UEs, o OFDMA realiza as transmissões no domínio do tempo e da frequência. Esse conjunto de frequências é conhecido como subportadoras. Cada subportadora é modulada com um esquema de modulação convencional, como *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) ou (16-QAM). O uso de subportadoras ortogonais também é importante para mitigar a *Inter Symbol Interference* (ISI), sendo que as subportadoras são espaçadas de maneira que a interferência entre elas diminua. No instante em que a amplitude de uma subportadora específica é amostrada, a amplitude das outras subportadoras é igual a zero [37].

O OFDMA é capaz de fornecer alta escalabilidade, equalização simples e alta robustez

no domínio do tempo e da frequência, além do *channel fading*. Por outro lado, o SC-FDMA é usado no *uplink* LTE/LTE-A para aumentar a eficiência de potência dos UEs, uma vez que esses dispositivos são suportados por bateria [7].

O OFDMA é implementado eficientemente via *Fast Fourier Transform* (FFT) e também apresenta outras vantagens, como alta eficiência espectral e escalabilidade de largura de banda. A Figura 2.10 ilustra um diagrama de blocos do transmissor OFDMA usado pela eNodeB. Na transmissão OFDMA, cada símbolo é mapeado para uma subportadora específica. Portanto, cada subportadora carrega apenas informações de um símbolo específico.

**eNodeB Transmitter**

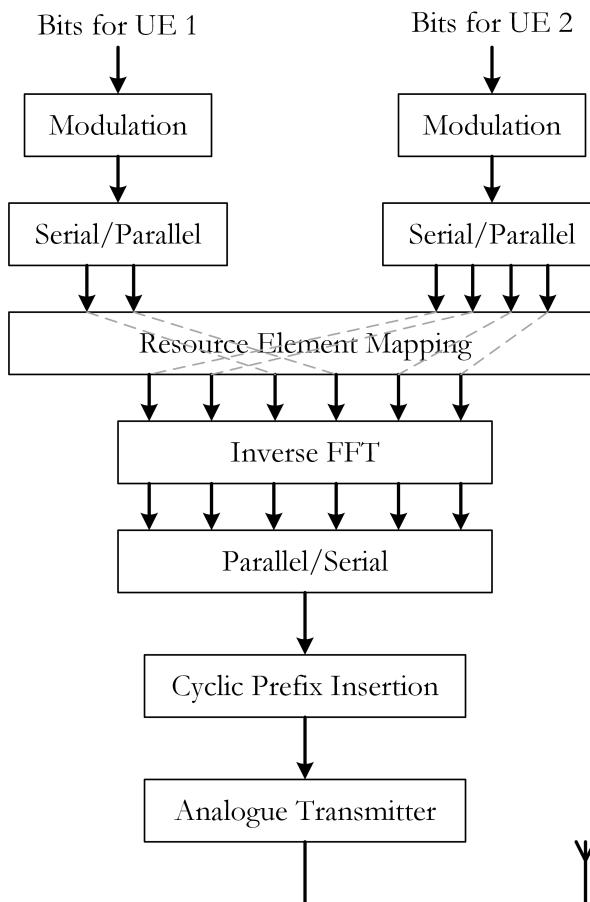


Figura 2.10: Diagrama de bloco de um transmissor OFDMA (Extraído de [57]).

Um canal físico corresponde ao conjunto de recursos de tempo/frequência usados para transmissão de um canal de transporte específico. O canal físico que destaca-se na transmissão *downlink* é o *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH), responsável por alterar os esquemas de modulação em resposta às variações de qualidade do canal. A Tabela 2.4 lista os canais físicos da transmissão *downlink* LTE.

Tabela 2.4: Canais físicos do LTE.

Canal	Nome	Informação transportada
PBCH	Physical Broadcast Channel	BCH
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	DL-SCH e PCH
PDCCH	Physical Downlink Control Channel	DCI
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel	HI
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel	CFI
EPDCCH	enhanced Physical Downlink Control Channel	DCI
MPDCCH	Physical Downlink Control Channel	DCI
R-PDCCH	relay Physical Downlink Control Channel	L1/L2
PMCH	Physical Multicast Channel	MCH

A Tabela 2.4 também lista os canais de controle físico da transmissão *downlink* LTE. Esses canais estão relacionados a informações de controle específicas. A seguir, a Tabela 2.5 enumera os tipos de informações de controle usados na rede LTE.

Tabela 2.5: Informações de controle usados na rede LTE.

Canal	Nome	Informação transportada
DCI	Downlink Control Information	Comandos de escalonamento <i>downlink</i> Concessões de escalonamento <i>uplink</i> Comandos de potência <i>uplink</i>
CFI	Control Format Indicator	Tamanho da região de controle <i>downlink</i>

A DCI é usada pela eNodeB para alertar os UEs de dados de *downlink* ou para notificar o UE quando ele puder transmitir no canal compartilhado de *uplink*. A DCI também é usada para ajustar a potência de transmissão dos UEs, enquanto que o CFI descreve a organização de dados no *downlink*.

Por fim, são gerados também sinais específicos que auxiliam certas operações da camada física, como sinais de referência e sinais de sincronização primária e secundária.

## 2.5 Protocolos do Plano de Controle

Os protocolos do plano de controle são, entre outras coisas, responsáveis pela configuração da conexão, mobilidade e segurança. As mensagens de controle transmitidas da rede para os dispositivos podem originar da MME, localizada na rede principal, ou através do *Radio Resource Control* (RRC) localizado na eNodeB, como pode ser visto na Figura 2.6.

A funcionalidade do plano de controle denominada NAS, controlada pelo MME, inclui gerenciamento de cabeçalho EPS, autenticação, segurança e diferentes procedimentos no modo ocioso, como paginação. Também é responsável por atribuir um endereço IP a um dispositivo [39].

O RRC está localizado na eNodeB e é responsável pelo tratamento dos procedimentos relacionados à RAN, incluindo:

- *Broadcast* de informações do sistema necessárias para que o dispositivo possa se comunicar com uma célula.
- Transmissão de mensagens de paginação originadas do MME para notificar o dispositivo sobre solicitações de conexão de entrada.
- Gerenciamento de conexão, incluindo a configuração de *bearers* e mobilidade dentro do LTE.
- Funções de mobilidade, como a (re)seleção de células.
- Configuração de medição e relatórios.
- Gerenciamento de recursos do dispositivo. Quando a conexão é estabelecida, o UE anunciará suas capacidades, pois nem todos os dispositivos são capazes de suportar todas as funcionalidades descritas na especificação LTE.

As mensagens RRCs são transmitidas para o dispositivo através de *Signaling Radio Bearers* (SRBs), usando o mesmo conjunto de camadas de protocolos (PDCP, RLC, MAC e PHY), conforme descrito na Seção 2.4. O SRB é mapeado para o CCCH durante o estabelecimento da conexão e, uma vez estabelecida uma conexão, com o DCCH.

Os dados do plano de controle e do plano do usuário podem ser multiplexados na camada MAC e transmitidos para o dispositivo no mesmo TTI. Os elementos de controle MAC mencionados acima também podem ser usados para o controle de recursos de rádio em alguns casos específicos em que a baixa latência é mais importante do que a codificação, a proteção de integridade e a transferência confiável [39].

## 2.6 Considerações sobre o Capítulo 2

Neste capítulo, apresentou-se uma visão geral dos principais termos e conceitos que descrevem a rede LTE/LTE-A. Pode-se notar que a rede LTE/LTE-A é muito complexa, com vários elementos e protocolos. Compreender os aspectos básicos desses sistemas, bem como um pouco de sua evolução, é fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos.

Além disso, os conceitos apresentados neste Capítulo fornecem um embasamento teórico necessário para prosseguimento na compreensão da proposta deste trabalho. No próximo Capítulo, estuda-se como a eNB aloca seus recursos entre os usuários conectados a ela, mostra-se também como é feita a alocação de recursos e destaca-se uma breve revisão do gerenciamento de interferência inter-celular em redes *HetNets*.

*“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso!  
Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu  
Deus, estará com você por onde você andar.”*

- Josué 1:9

# 3

## Alocação de Recursos, Escalonamento de Pacotes e Gerenciamento de Interferência em Redes Heterogêneas no *Downlink* LTE-A

OS RECURSOS DE RÁDIO disponíveis para a rede são limitados e, portanto, é necessário um gerenciamento para dividir os recursos de rede entre os usuários. Esse processo é chamado de alocação de recursos. Além disso, é necessário o uso de algoritmos de escalonamento de pacotes para realizar a distribuição dos recursos de rede entre os UEs. Dessa forma, neste Capítulo, apresenta-se uma breve descrição de como as redes LTE-A compartilham seus recursos entre os UEs, bem como as principais características dos algoritmos de escalonamento de pacotes em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A. Por fim, desenvolve-se uma breve revisão do gerenciamento de interferência.

### **3.1 Alocação de Recursos em Redes Heterogêneas no *Downlink* LTE-A**

A rede móvel LTE-A melhora substancialmente a vazão do usuário final e reduz a latência, além do provisionamento de recursos e *Quality of Experience* (QoE) aprimorados para várias aplicações de multimídia em tempo real em relação as gerações anteriores. Com

base no OFDMA, espera-se que a rede LTE-A ofereça suporte a uma ampla gama de serviços de multimídia e Internet, mesmo em cenários de alta mobilidade, o que é esperado para futuras redes.

Para atingir esses objetivos, o *Radio Resource Management* (RRM) explora várias funções das camadas física e MAC, como compartilhamento de recursos, relatórios de *Channel Quality Indicator* (CQI), *link adaptation* por meio de *Adaptive Modulation and Coding* (AMC), HARQ, gerenciamento da *radio bearer* e mecanismos de QoS para efetuar um tratamento diferenciado dos pacotes que trafegam pela rede.

Nesse contexto, uma estratégia eficaz para a alocação de recursos torna-se crucial. De fato, o uso eficiente de recursos de rádio é essencial para atender às metas de desempenho do sistema e satisfazer as necessidades do usuário de acordo com os requisitos específicos de QoS [58].

### 3.1.1 Largura de Banda

Uma célula LTE pode ser configurada com diferentes valores de largura de banda, de acordo com a Tabela 3.1. Esse conjunto de largura de banda oferece aos operadores de rede um ambiente muito flexível para a implantação do LTE. Por exemplo, 1,4 MHz é próximo à largura de banda usada anteriormente pelo cdma2000, 5MHz é a mesma largura de banda usada pelo WCDMA, enquanto 20 MHz permite que uma estação base LTE opere com uma maior taxa de dados possível [37].

Tabela 3.1: Largura de banda suportadas pelo LTE.

Largura de banda	Número de RBs	Número de subportadoras
1.4 MHz	6	72
3 MHz	15	180
5 MHz	25	300
10 MHz	50	600
15 MHz	75	900
20 MHz	100	1200

A partir da *Release 10* implementou-se o suporte a agregação de portadoras, característica importante e necessária para ampliação da largura de banda no LTE-A, tanto no *downlink* como no *uplink*. Com esse recurso é possível obter largura de banda de até 100 MHz.

### 3.1.2 A Estrutura da Grade de Recursos

Além do espaçamento da subportadora, o LTE também utiliza a inserção de prefixo cíclico para minimizar os efeitos da interferência na recepção do símbolo. A inserção do prefixo cíclico consiste em uma técnica na qual uma parte final do símbolo é copiada para sua frente. Os símbolos são agrupados em *slots*, cuja duração é de 0,5 ms. Esse agrupamento pode ser realizado de duas maneiras [37]:

- **normal cyclic prefix**: cada símbolo é precedido por um prefixo cíclico que geralmente tem  $4,7 \mu\text{s}$  de comprimento. O primeiro prefixo cíclico é definido como  $5,2 \mu\text{s}$ , pois não é possível encaixar sete símbolos do mesmo tamanho em um *slot*.
- **extended cyclic prefix**: cada símbolo é precedido por um prefixo cíclico de  $16,7 \mu\text{s}$ . Nesta configuração, o número de símbolos no *slot* é reduzido para seis.

Em um nível superior, os slots são agrupados em *sub-frames*. No modo FDD, dois *slots* formam um *sub-frame* de 1 ms. Os *sub-frames* são definidos para fins de escalonamento. Quando a eNodeB transmite para um UE, ela escalona suas transmissões em um *sub-frame* por vez. O *sub-frame* também é conhecido como *Transmission Time Interval* (TTI). Uma sequência de 10 *sub-frames* formam um *frame* de 10 ms [39]. A Figura 3.1 mostra a organização dos símbolos em *slots* usando essas duas abordagens.

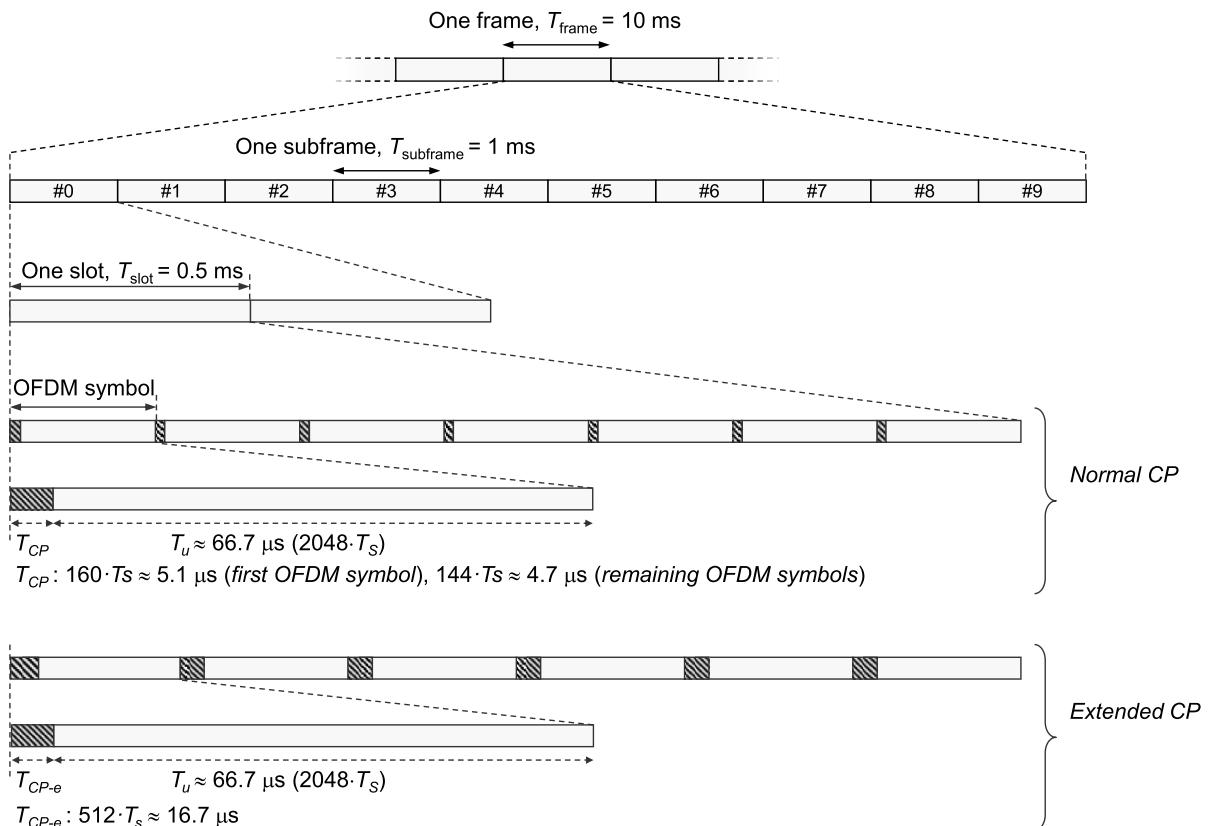


Figura 3.1: Estrutura do domínio do tempo LTE (Adaptado de [39]).

A unidade básica é o *resource element*, formado por um símbolo no domínio do tempo e uma subportadora no domínio da frequência. Os *resources elements* são agrupados em *Resource Blocks* (RB). Cada RB abrange um *slot* (0.5 ms) por 180 kHz (12 subportadoras). Nesse sentido, o RB é a unidade utilizada pela estação base para alocar seus recursos entre os UEs.

Usando o prefixo cíclico normal, o receptor pode lidar com a ISI apresentando um atraso de propagação de  $4,7 \mu\text{s}$ , correspondendo a uma diferença de caminho de 1,4 km entre os comprimentos dos raios mais longos e mais curtos. Isso normalmente é suficiente. No entanto, para células maiores, o prefixo cíclico estendido pode ser mais apropriado, pois suporta uma diferença máxima de caminho de 5 km e atraso de propagação de  $16,7 \mu\text{s}$  [37].

Até agora, foi visto como o LTE usa várias *subportadoras* no domínio da frequência e o conceito de *slots* no domínio do tempo. Em seguida, explora-se como esses dois domínios funcionam juntos para formar a grade de recursos. A Figura 3.2 ilustra a grade de recursos LTE, considerando o prefixo cíclico normal.

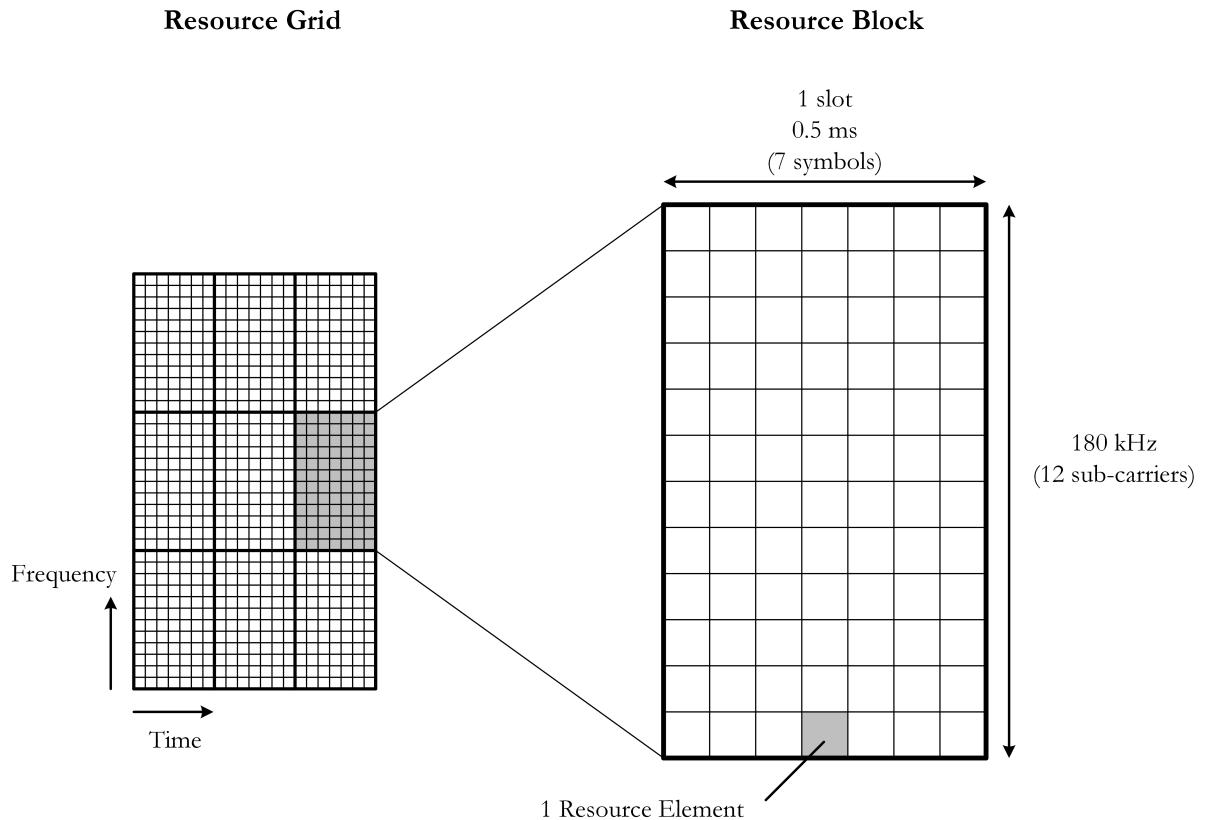


Figura 3.2: Grade de recurso do LTE (Extraído de [57]).

### 3.1.3 Mecanismo de Qualidade de Serviço (QoS)

Um mecanismo de QoS pode ser definido como a capacidade da rede em transmitir dados assegurando elementos básicos e quantitativamente mensuráveis em relação à demanda de uma determinada aplicação na rede [59]. As métricas de desempenho utilizadas, são: vazão, taxa de erros, atraso de transmissão, variação do atraso (*jitter*), disponibilidade e taxa de perdas.

Diversos mecanismos podem ser aplicados para assegurar QoS. O mais comum é a priorização de tráfego, onde um tipo de serviço tem preferência sobre outro no acesso aos recursos da rede. Nesse sentido, para oferecer suporte a diferentes requisitos de QoS, o LTE definiu diferentes *bearers*, cada uma associada a um requisito de QoS [58].

A definição mais simples para uma *bearer* é estabelecer um *pipeline* ou “duto lógico” como um canal de dados, que transfere informações entre o UE e o *gateway* PDN com uma QoS específica (atrasos, taxas de erro, entre outros). A *bearer* mais importante é a *bearer* EPS [37]. A Figura 3.3 mostra a arquitetura do serviço de suporte ao EPS, conforme pode ser observado abaixo:

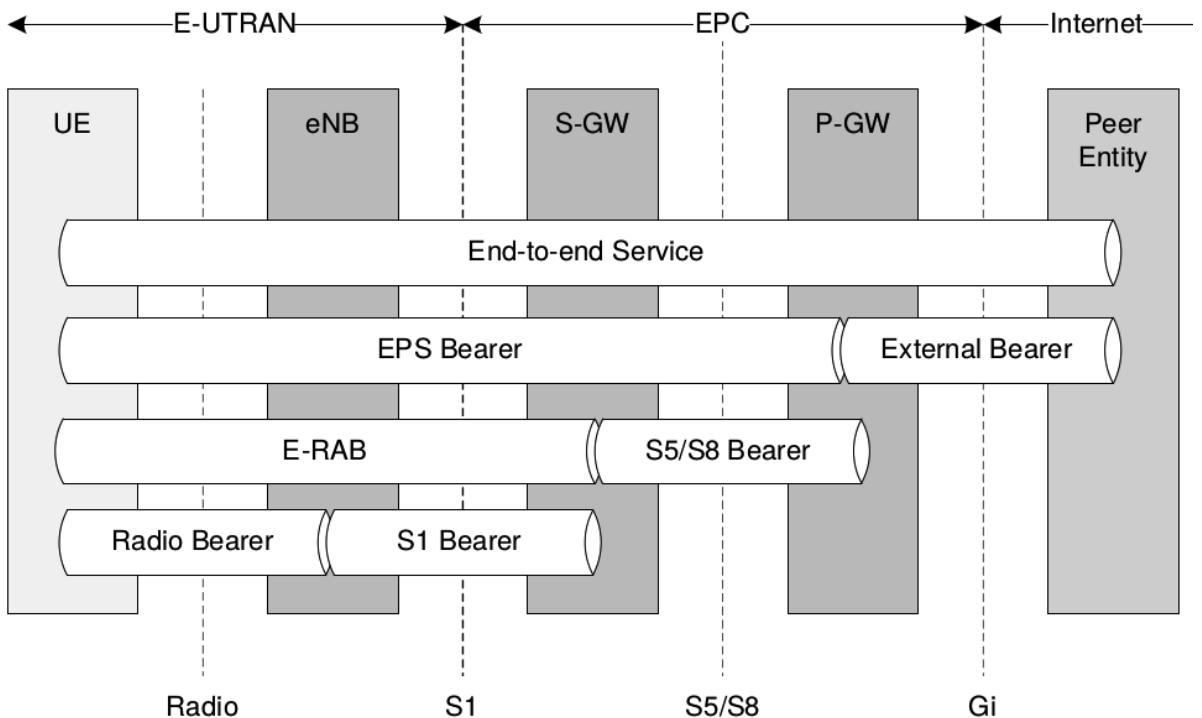


Figura 3.3: A arquitetura geral do serviço da *bearer* EPS [60].

Na Figura 3.3, verifica-se que a *bearer* EPS precisa cruzar várias interfaces. Portanto, a *bearer* EPS é dividida em três *bearers* de nível inferior, a saber, a *bearer* de rádio, a *bearer* S1 e a *bearer* S5/S8. As informações transportadas pela *bearer* EPS são agrupadas em um ou mais fluxos de dados de serviço. Esses fluxos transportam pacotes para um serviço específico, como uma aplicação de *streaming* de vídeo. Por sua vez, cada fluxo de

dados de serviço compreende um ou mais fluxos de pacotes, como os fluxos de áudio e vídeo, que formam esse serviço. O LTE oferece a mesma qualidade de serviço a todos os fluxos de pacotes em uma *bearer* EPS específica [37].

Conforme mencionado anteriormente, a *bearer* EPS é dividida em três *bearers* de nível inferior. Nesse contexto, o protocolo GTP-U cria túneis bidirecionais entre as *bearers* S1 e S5/S8 e entre a S5/S8 e as *bearers* externas. Por sua vez, cada túnel está associado a dois *Tunnel Endpoint Identifiers* (TEIDs), um para o escalonamento *uplink* e outro para o *downlink*.

Para fornecer QoS, o 3GPP definiu um conjunto de parâmetros de QoS. Sendo eles [3, 37]:

- **Aggregate Maximum Bit Rate (AMBR):** *Non-GBR bearers* são coletivamente associadas à taxa de bits máxima agregada por UE.
- **Allocation and Retention Priority (ARP):** indica a prioridade da *bearer* em comparação com outras *bearers*. Isso fornece a base para o controle de admissão na configuração da *bearer* e, ainda mais, em uma situação de congestionamento, se as *bearers* precisarem ser descartadas.
- **Guaranteed Bit Rate (GBR):** identifica a taxa de bits que será garantida a *bearer*.
- **Maximum Bit Rate (MBR):** identifica a taxa de bits máxima para a *bearer* na rede LTE/LTE-A. Quaisquer pacotes que cheguem a *bearer* após a MBR especificada, com a MBR excedida serão descartados. Ademais, o valor da MBR é sempre definido como o valor do GBR.
- **Packet delay budget:** é um limite superior, com 98% de confiança, para o atraso que um pacote recebe entre o UE e o P-GW.
- **Packet error/loss rate:** é um limite superior para a proporção de pacotes perdidos devido a erros na transmissão e recepção.
- **QCI priority level:** ajuda no processo de escalonamento. Números baixos estão associados a uma prioridade mais alta. Em seguida, uma rede congestionada atende ao atraso de pacote da *bearer* com prioridade  $N$ , antes de passar para *bearer* com prioridade  $N + 1$ .
- **QoS Class Identifier (QCI):** é um índice que identifica um conjunto de valores configurados localmente para três atributos de QoS: prioridade, atraso e taxa de perda. O QCI é sinalizado em vez dos valores desses parâmetros. Dez classes pré-configuradas foram especificadas em duas categorias de *bearers*, GBR e non-GBR.

Quando um UE conecta-se à rede, uma *bearer* padrão é criada para conectividade básica e troca de mensagens de controle. Ela permanece estabelecida durante toda a vida útil da conexão. As *Dedicated bearers*, em vez disso, são configuradas toda vez que um novo serviço específico é emitido. Dependendo dos requisitos de QoS, elas podem ser classificadas como *bearers* de *Guaranteed Bit-Rate* (GBR) ou *bearers non-Guaranteed Bit Rate* (non-GBR) [61].

Como representado de forma abrangente na Tabela 3.2, cada classe de QoS é caracterizada por seu tipo de recurso (GBR ou non-GBR), um nível de prioridade, o atraso máximo de entrega admitido e a taxa aceitável de perda de pacotes. O módulo RRM converte parâmetros de QoS em parâmetros de escalonamento, políticas de admissão, limites de gerenciamento de filas, configurações de protocolo da camada de enlace e assim por diante.

Tabela 3.2: Padronização de *QoS Class Identifiers* (QCIIs) para o LTE [62].

QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	Atraso Máximo de Pacotes (ms)	Taxa de Perda de Pacotes	Exemplos de Serviços
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	VoIP
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Vídeo chamada
3	GBR	3	50	$10^{-3}$	Games em tempo real
4	GBR	5	300	$10^{-6}$	Streaming
5	Non-GBR	1	100	$10^{-6}$	Sinalização IMS
6	Non-GBR	6	300	$10^{-6}$	Aplicações com TCP: <i>browsing</i> , email, FTP, etc.
7	Non-GBR	7	100	$10^{-3}$	Gaming interativo
8	Non-GBR	8		$10^{-6}$	Aplicações com TCP: <i>browsing</i> , email, FTP, etc.
9	Non-GBR	9			

## 3.2 Escalonamento de Pacotes em Redes Heterogêneas no *Downlink LTE-A*

Algoritmos de escalonamento são as entidades responsáveis pela distribuição dos recursos de rede entre os usuários. Como o escalonador de pacotes é uma parte complexa e importante da rede, geralmente é dividido em duas partes: a função de utilidade e o algoritmo de busca. A função de utilidade é a maneira usada para fazer com que o escalonador atenda aos objetivos do sistema desejados, como taxa de transferência, justiça, satisfação

de QoS, etc. Nesta seção, apresenta-se os desafios que devem ser levados em consideração ao alocar recursos para os UEs.

### 3.2.1 Escalonador de Pacotes

O Escalonador de Pacotes é uma entidade da camada MAC situada na eNodeB. Essa entidade é responsável por atribuir os RBs aos UEs, de acordo com um algoritmo específico. Para atender aos requisitos de aplicações e suportar as limitações dos enlaces de radiofrequência, escalonadores adequadamente desenvolvidos são requeridos. Em vista disso, os escalonadores procuram otimizar o uso de recursos de rádio, bem como maximizar a vazão do sistema. No padrão LTE não é definido nenhum tipo específico de escalonador, deixando assim espaço para inovação e diferenciação.

Uma boa estratégia de escalonamento busca encontrar um equilíbrio ao considerar todas as informações disponíveis para atendimento aos dispositivos, de forma a maximizar os objetivos. Algumas informações importantes a serem consideradas são apresentadas a seguir [7]:

- **Condição do canal:** é a principal informação em uma regra de escalonamento. Tratando-se de escalonamento em redes *wireless* a condição do canal deve ser permanentemente verificada para evitar desperdício de recursos.
- **Fairness:** o escalonador de pacotes tenta compartilhar igualmente os recursos entre os usuários.
- **Histórico de alocação de recursos:** dispositivos com recursos alocados em períodos anteriores podem aguardar um pouco mais para serem atendidos. Além disso, o escalonamento também deve considerar e evitar a inanição de recursos, ainda que um dispositivo esteja localizado em uma região com má condição de canal.
- **Interferência de sinal entre células:** além da condição do canal, o escalonador pode verificar a coexistência de *macrocells* e *picocells* na vizinhança. O mecanismo ICIC, por exemplo, oferece recursos para coordenação de interferência e pode ser aproveitado para otimização do procedimento.
- **Potência:** o escalonamento eficiente também deve considerar o estado dos dispositivos em termos de potência, visto que a maioria opera com baterias, e a alocação consciente de potência para transmissão de sinal, evitando consumo desnecessário de energia ou até mesmo otimizando sua utilização.
- **SLAs e parâmetros de QoS:** *Service Level of Agreement* (SLA) são aplicados a usuários ou a tráfegos e especificados na forma de parâmetros definidos nas *bearers*. Esses parâmetros, juntamente com as informações da tabela QCI, devem ser anali-

sados em uma regra de escalonamento para alocação mais alinhada com a demanda de QoS produzida na rede.

- **Tamanho do enfileiramento de *frames* nos *buffers*:** o enfileiramento excessivo e regular pode causar congestionamento, desencadeando atraso de transmissão e degradação de QoS. Por esse motivo o escalonador deve trabalhar ativamente com o intuito de melhorar o desempenho em termos de atraso, eliminando ou reduzindo o congestionamento causado por enfileiramento nos *buffers*. O LTE-A possui um elemento de controle na camada MAC que transporta informação sobre os *buffers* dos UEs para transmissão no canal *uplink* conhecido como *Buffer Status Report* (BSR). No *downlink*, pela própria natureza do canal, a informação sobre enfileiramento é direta e facilmente acessível pela eNB.

Nesse sentido, o escalonamento de pacotes pode ser considerado como um problema de otimização, no qual o escalonador deve encontrar o melhor mapeamento entre os RBs e UEs. Considerando a complexidade do problema, o *design* de um escalonador de pacotes pode ser dividido em duas etapas [63]:

- **Função de Utilidade:** é um modelo matemático usado para orientar o processo de escalonamento no sentido de atender aos requisitos. Em outras palavras, é uma métrica utilizada para medir o quanto perto ou longe o processo de escalonamento está dos objetivos desejados. O valor da métrica pode ser distinto para cada par UE/RB, a cada instante. Isso permite que o escalonador avalie as várias soluções de mapeamento possíveis.
- **Algoritmo de busca:** é uma ferramenta usada para procurar a solução que melhor otimiza a função de utilidade do escalonador.

Depois que a função de utilidade e o esquema do algoritmo de busca foram escolhidos, o próximo passo é a implementação. Às vezes, o processo é associado em dois estágios: um *Time Domain Packet Scheduling* (TDPS) e o *Frequency Domain Packet Scheduling* (FDPS). Essa estratégia pode ser interessante para minimizar a complexidade do algoritmo de busca. Nesse cenário, o TDPS realiza uma priorização dos UEs, isto é, uma lista mais curta de UEs com valores decrescentes. Portanto, essa lista reduzida é passada para o FDPS, responsável por executar o mapeamento dos UEs nos RBs.

### 3.2.2 Algoritmos e Estratégias de Escalonamento

Algoritmos de escalonamento são abundantemente disponíveis na literatura e cada um considera métricas e estratégias específicas. Por esse motivo eles são organizados por categorias, normalmente relacionadas à estratégia ou à classificação de cada um.

As principais categorias de algoritmos de escalonamento para redes existentes na literatura são [7]:

- **Dependentes de canal:** requer informação sobre a qualidade do meio físico para alocação de recursos na transmissão ou recepção.
- **Dependentes de parâmetros de QoS:** associam informações relevantes de cada tráfego (ou classe de tráfego) para realização do cálculo das métricas pelo escalonador assegurando os requisitos mínimos solicitados.
- **Independentes de canal:** refere-se a algoritmos que não levam em consideração a informação do canal para cálculo das métricas. Esses assumem tacitamente que não há erros de transmissão no meio físico ou que há outros mecanismos que tratem o controle de erros de forma mais apropriada. Algoritmos desta categoria são normalmente implementados em redes *wireline* (cabeadas).
- **Independentes de parâmetros de QoS:** não consideram informações necessárias no cálculo das métricas para assegurar QoS.

É importante destacar que algumas categorias podem se sobrepor, ou seja, uma mesma estratégia de escalonamento pode pertencer a uma ou mais categorias desde que elas não sejam claramente distinguíveis. Por exemplo, podem existir algoritmos independentes de canal e de parâmetros de QoS, e outros algoritmos que também sejam independentes de canal porém com dependência de parâmetros de QoS.

Apresenta-se nesta seção alguns algoritmos e estratégias de escalonamento disponíveis na literatura, considerando sua relevância, aplicabilidade em redes LTE-A e ligação com o tema da proposta deste trabalho.

## Métricas de Escalonamento

Conforme mencionado anteriormente, a função de utilidade deriva de modelos matemáticos relacionados aos requisitos de escalonamento. Esses requisitos podem ser expressos em um conjunto de parâmetros, como taxa de dados instantânea, taxa de transferência média do passado, atraso de *Head of Line* (HoL), taxa de perda de pacotes, entre outros.

O procedimento de alocação de recursos para cada UE baseia-se na seleção de RBs que maximizem uma função de utilidade conhecida como métrica de escalonamento. Cada RB ( $k$ ) possui um valor de métrica ( $m$ ) correspondente a cada UE ( $i$ ). O objetivo geral de um algoritmo de escalonamento é calcular as funções de utilidade e, a partir do valor

obtido, encontrar o UE ( $j$ ) a ser alocado atendendo a seguinte regra [7]:

$$m_{j,k} = \max_i \{m_{i,k}\} \quad (3.1)$$

Tecnicamente, o cálculo de métricas é o ponto central do processo de escalonamento. É por meio das métricas que o mecanismo possui condições de avaliar a prioridade dos UEs no acesso aos recursos disponíveis no sistema.

A definição de prioridades deve levar em consideração uma variada gama de informações. Por esse motivo os cálculos adotados e empregados para obtenção dos valores das métricas devem abordar o máximo de informação possível e que atenda a estratégia e os objetivos do escalonador.

A Figura 3.4 ilustra o modelo de escalonamento *downlink* considerando as informações mais importantes do RRM e o esquema empregado para comunicação. Mais detalhes podem ser encontrados em [64].

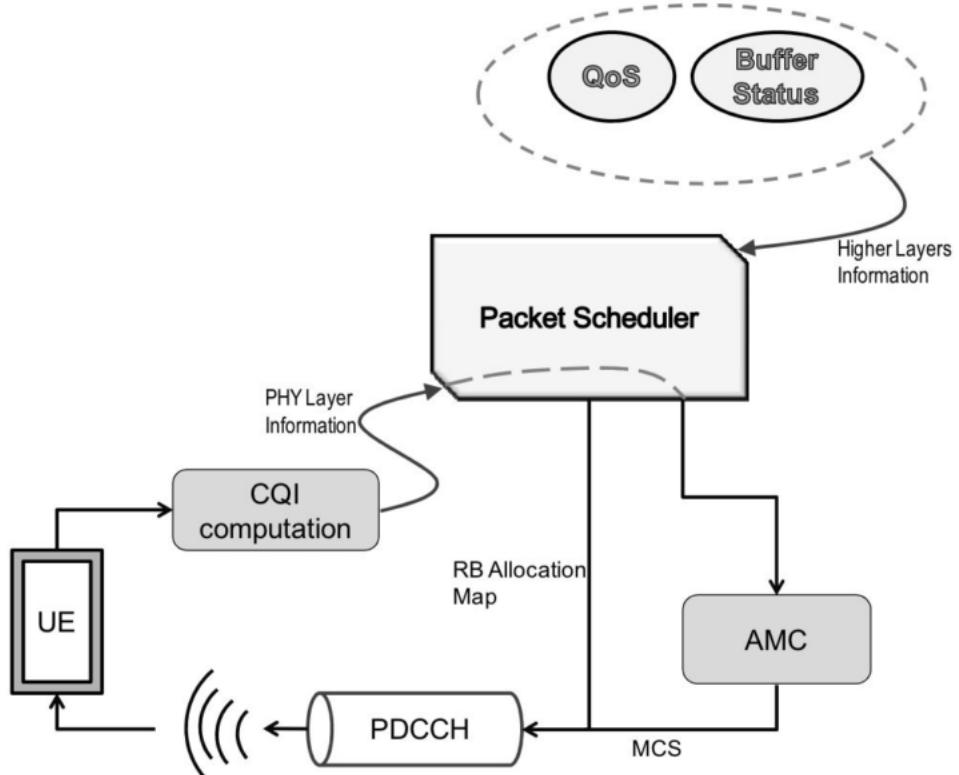


Figura 3.4: Modelo simplificado para o escalonamento *downlink* [7].

### Proportional Fairness (PF)

O escalonador *Proportional Fair* (PF) provê uma entrega justa de recursos para os usuários do sistema, uma vez que, tenta encontrar um equilíbrio entre eficiência espectral e justiça,

ajustando o índice de escalonamento de acordo com a qualidade instantânea do canal em relação ao seu desempenho ao longo do tempo [65]. Para a estação  $s$ , o  $b$ -th PRB no *subframe*  $\tau(b)$ , dado que o *subframe* não é um ABS, será alocado para o seguinte usuário:

$$\hat{u}_b \triangleq \underset{u \in \mathcal{U}_i}{\operatorname{argmax}} \frac{r_{u,b}}{\bar{r}_u(\tau(b))}, \quad (3.2)$$

onde  $\tau(b)$  é o index do *subframe* do  $b$ -th PRB,  $b \in [1, B]$ , e  $\bar{r}_u(\tau(b))$  é a vazão média ao longo do tempo do usuário  $u$  no *subframe*  $\tau(b)$ , que é calculado como:

$$\bar{r}_u(t) = \left(1 - \frac{1}{s_w}\right) \bar{r}_u(t-1) + \frac{1}{s_w} \sum_{b|\tau(b)=t} r_{u,b} \cdot \mathcal{I}\hat{u}_b = u. \quad (3.3)$$

Na equação 3.3 acima,  $s_w$  é o tamanho da janela e  $\mathcal{I}\{\cdot\}$  é uma função de indicador. O objetivo é usar a vazão média do passado  $\bar{r}_u(t)$  para atuar como um fator de ponderação da taxa de dados  $r_{u,b}$ , para que os usuários em condição de qualidade baixa de canal sejam atendidos dentro de um determinado período de tempo.

### Round Robin (RR)

O escalonador *Round-Robin* (RR) é provavelmente o mais simples encontrado na literatura [66]. Atribui *Resource Block Group* (RBGs) sequencialmente aos UEs sem nenhuma preocupação com as condições do canal, dividindo assim os recursos disponíveis entre os fluxos ativos.

Se o número de RBGs for maior que o número de fluxos ativos, todos os fluxos poderão ser alocados no mesmo *subframe*. Caso contrário, no próximo *subframe*, a alocação começará a partir do último fluxo que não foi alocado. Isso pode ser considerado um escalonamento justo, no sentido de que a mesma quantidade de recursos de rádio é dada a cada link de comunicação. No entanto, não é justo no sentido de fornecer a mesma qualidade de serviço para todos os usuários.

No escalonamento, os recursos de tempo são divididos igualmente entre os usuários, um após o outro e sem nenhuma prioridade, baseado na disponibilidade de RBs durante o processo de escalonamento. A métrica é semelhante ao escalonador FIFO, a diferença está em  $T_u$ , que é o último acesso ao canal de transmissão do usuário  $u$ :

$$\hat{u}_b \triangleq \underset{u \in \mathcal{U}_i}{\operatorname{argmax}} t - T_u \quad (3.4)$$

### 3.3 Gerenciamento de Interferência em Redes Heterogêneas no *Downlink LTE-A*

A ICIC foi introduzida pela primeira vez nas especificações do 3GPP *Release 8 LTE* para lidar com problemas de interferência na borda da célula. As técnicas de ICIC no *Downlink LTE-A* podem ser agrupadas como *enhanced ICIC* (eICIC) e *Further enhanced Inter-cell Interference Coordination* (FeICIC). A seguir, descreve-se os métodos de ICIC.

#### 3.3.1 eICIC

Para lidar com o problema de interferência em redes heterogêneas, como a sobreposição de células entre as *macrocells* e as *picocells*, a *enhanced ICIC* (eICIC) foi padronizada pela 3GPP *Release 10* [60]. Duas técnicas representativas são descritas brevemente a seguir.

- *Almost Blank Subframe* (ABS) é configurado nas *macrocells*, de modo que a *macrocell* cesse as transmissões de dados em determinados intervalos de tempo, o que reduz a interferência nas *picocells*.
- *Cell Range Expansion* (CRE) é usada para equilibrar a *Reference Signal Received Power* (RSRP) das *macrocells*, através da aplicação de *biases*<sup>1</sup> não negativos para um usuário que não esteja necessariamente associado à estação base que fornece a potência recebida mais forte.

No entanto, sua implementação real não é especificada pelo padrão e não há indicação de como definir os parâmetros ABS e CRE para diferentes configurações de rede. Nas próximas seções, detalham-se os padrões ABS e CRE utilizados na otimização eICIC.

#### ***Almost Blank Subframe* (ABS)**

A principal mudança em relação ao ICIC estático é a adição de esquemas no domínio do tempo baseados no particionamento de recursos de tempo para limitar a interferência aos usuários na borda das *picocells*.

De acordo com o trabalho em [16], a especificação de ABS define um padrão, onde a *macrocell* cria *sub-frames* “protegidos” para uma *picocell* reduzindo sua potência de transmissão ou “silenciando” durante certos *sub-frames*, chamados *Almost Blank Sub-frames* (ABS). Durante o ABS, a *macrocell* não transmite o PDSCH, mas, para compatibilidade com versões anteriores, certos sinais devem ser transmitidos em todos os *sub-frames* DL, mesmo que silenciados. O mecanismo de ABS é ilustrado na Figura 3.5.

<sup>1</sup>O valor de *bias* para a estratégia de CRE afeta principalmente o desempenho das redes heterogêneas, alterando a área de cobertura das *picocells*.

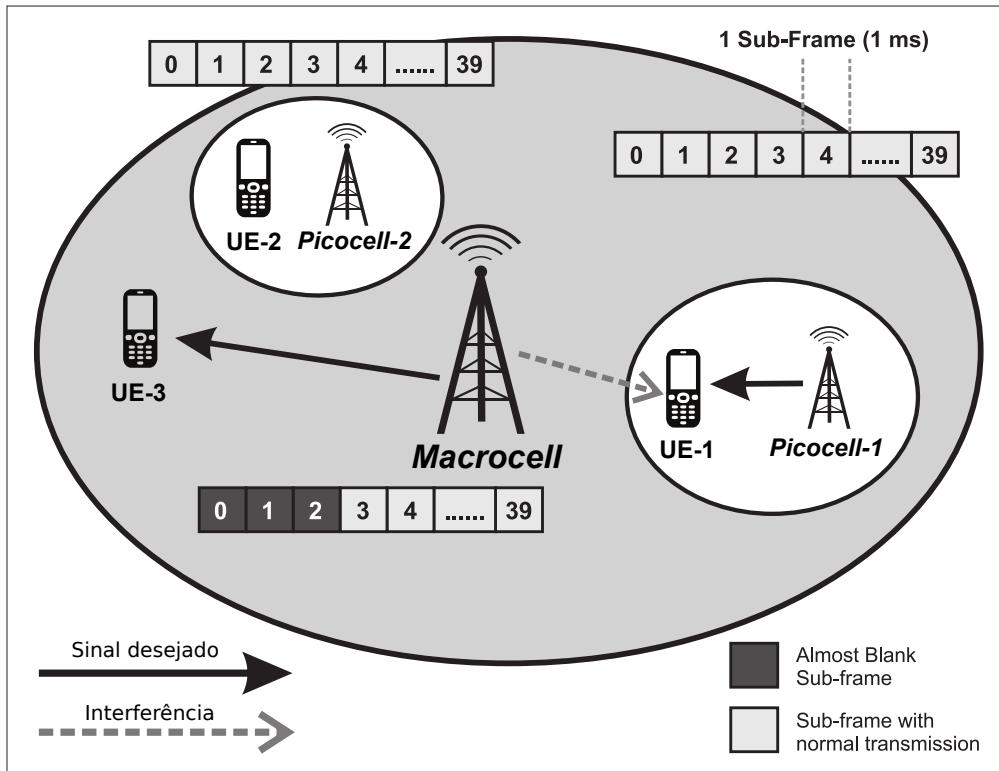


Figura 3.5: Técnica ABS para a interferência (Adaptado de [5]).

As especificações 3GPP definem o ABS no formato de um padrão de *bitmap* de 40 *sub-frames* com duração de 40 ms. As eNBs trocam esses padrões de ABS por meio de *Operation Administration and Maintenance* (OAM) ou via interface X2. Para permitir isso, a ICIC no domínio do tempo requer transmissões de eNodeBs sincronizadas no tempo.

O UE-1, associado à *picocell-1*, sofre interferência da *macrocell*, por estar localizado na borda da *picocell-1*. Durante cada um dos três *subframes* do padrão de 40 ms, a *macrocell* é silenciada e não envia nenhum tráfego de dados. A interferência é reduzida durante esses ABSs e, portanto, a *picocell-1* aproveitará para escalonar o UE-1.

A proposta do eICIC nos padrões LTE-A permite o compartilhamento no tempo de *subframes* para link de transmissões entre as *macrocells* e as *picocells*, de modo a mitigar a alta interferência experimentada especialmente por usuários da *picocell* no *downlink*. A noção de eICIC via ABS é geralmente acoplada na literatura com outra técnica importante para as redes heterogêneas, ou seja, a alocação de recursos apropriada para garantir que as *picocells* não fiquem subutilizadas e nem sejam sobre carregadas.

### Cell Range Expansion (CRE)

A *Cell Range Expansion* (CRE) é usada na eICIC para descarregar o tráfego das *macrocells* e aumentar a capacidade do sistema. Uma maneira de fazer isso é aumentar a área servida pela *picocell*, mesmo se o UE estiver recebendo um nível de potência de sinal maior da *macrocell*.

A potência de sinal maior recebida por um usuário de uma *picocell* seria adicionada artificialmente por um deslocamento (*offset*), a fim de descarregar as *macrocells* e garantir que mais usuários se conectassem a *picocells*. Este *offset* é denominado de Cell Selection Bias (CSB). O Mecanismo de CRE é ilustrado na Figura 3.6.

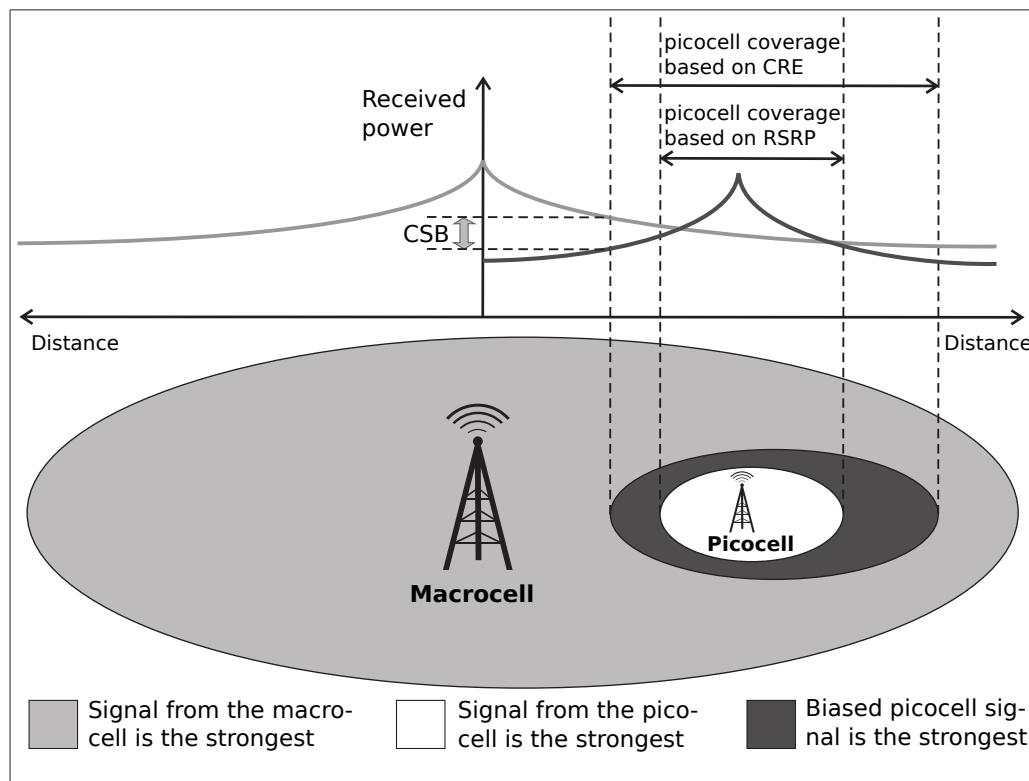


Figura 3.6: Técnica CRE para a interferência (Adaptado de [5]).

Em cada duas células vizinhas, há uma variação de  $(-24dBm)$  a  $(24dBm)$ , mas os valores razoáveis estão na faixa de  $10dBm$ . Em geral, é necessária alguma reciprocidade no CSB, em que o CSB da *macrocell-1* para a *macrocell-2* é igual ao menor valor de CSB da *macrocell-2* à *macrocell-1*. Por exemplo, quando o CSB de uma *macrocell* para uma *picocell* aumenta, implica que mais usuários seriam transferidos da *macrocell* para a *picocell* e isso aumenta a cobertura da *macrocell* [5].

O objetivo do CRE é descarregar mais tráfego das *macrocells* para as *picocells* e, portanto, obter maiores ganhos de divisão de células. Ao adicionar um CSB, a área de serviço das *picocells* aumenta e mais usuários são transferidos para as *picocells*. A necessidade de esquemas de gerenciamento de interferência em HetNets decorre do fato

de que os usuários na área de expansão das *picocells* são mais vulneráveis a fortes sinais de interferência do que os sinais da *picocell* associada [67].

### 3.3.2 FeICIC

*Further enhanced Inter-cell Interference Coordination* (FeICIC) foi proposta na 3GPP *Release 11* [68]. Nessa técnica, em vez de oferecer ABSs, as *macrocells* alocam *Reduced Power Almost Blank Subframes* (RP-ABSs) para atender seus usuários em níveis reduzidos de potência.

O ABS requer que a *macrocell* anule a potência de transmissão nos elementos de recurso do *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) nos *subframes*. Isso se traduz em perda de recursos que é resultado da utilização de *Time Division Multiplexing* (TDM) em *subframes* eICIC e *subframes* não-eICIC. Enquanto a *picocell* poderia usar *subframes* eICIC e não-eICIC, as *macrocells* só poderiam usar *subframes* não-eICIC para escalar os usuários.

O objetivo da FeICIC é o tratamento de interferência pelo UE através do cancelamento de interferência entre células. A abordagem FeICIC baseada no receptor depende da mitigação da interferência no UE para eliminar a interferência dominante do CRE, o que requer a estimativa do mesmo no receptor. Por outro lado, a abordagem FeICIC baseada no transmissor depende do silenciamento dos elementos de recurso do PDSCH dentro de um ABS da *picocell* que experimenta forte interferência do CRE da *macrocell*. Dessa forma, RP-ABS proporciona ganhos substanciais no desempenho do sistema em relação ao ABS [68].

## 3.4 Considerações sobre o Capítulo 3

Este Capítulo oferece uma visão geral sobre a alocação de recursos, escalonamento e o gerenciamento de interferência em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A.

Apresenta-se os aspectos da camada física, posteriormente, a grade de recursos é ressaltada como uma junção de dois domínios: frequência e de tempo. Além disso, estuda-se os mecanismos de QoS, apresentando a EPS *bearer* e diferentes *QoS Class Identifiers*.

Ainda neste Capítulo, demonstra-se como o escalonador de pacotes é uma parte complexa e importante da rede, geralmente ele é dividido em duas partes: a função de utilidade e o algoritmo de busca. A função de utilidade é a maneira usada para fazer com que o escalonador atenda aos objetivos do sistema desejados, como taxa de transferência, justiça, satisfação de QoS, etc. Em seguida, são apontadas as estratégias de escalonamento e destaca-se como as métricas podem ser expressas.

Por fim, apresenta-se duas técnicas de ICIC, a saber a eICIC e a FeICIC. Essas técnicas são empregadas em redes LTE-A e utilizadas para as análises de resultados do trabalho.

*“Na verdade, na verdade vos digo que vós chorareis e vós lamentareis, e o mundo se alegrará, e vós estareis tristes, mas a vossa tristeza se converterá em alegria.”*

- João 16:20

# 4

## Proposta de Escalonamento de Pacotes e Gerenciamento de Interferência em Redes Heterogêneas Baseados na Teoria dos Jogos

A ALOCAÇÃO DE RECURSOS em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A é uma tarefa complexa. Para o escalonamento de pacotes no enlace *downlink*, acredita-se que há uma grande oportunidade de pesquisa no desenvolvimento de um algoritmo baseado em Teoria dos Jogos utilizando o Jogo *Colonel Blotto*. Além disso, para o gerenciamento de interferência, define-se a extensão da otimização eICIC, por meio de uma função de utilidade modificada através do Jogo Potencial Exato, chamada de otimização eICIC+.

Nesse sentido, identifica-se os principais conceitos relacionados à Teoria dos Jogos. Na sequência, descreve-se a modelagem do sistema. Em seguida, demonstra-se os detalhes do algoritmo de escalonamento proposto por meio do Jogo *Colonel Blotto*. Finalmente, apresenta-se a técnica eICIC+ baseada no Jogo Potencial Exato.

### 4.1 Teoria dos Jogos

A Teoria dos Jogos fornece uma estrutura formal com um conjunto de ferramentas matemáticas para estudar as interações complexas entre jogadores racionais interdependentes.

Por mais de meio século, levou a desenvolvimentos revolucionários da economia e encontrou aplicações importantes em uma variedade de disciplinas, como política, sociologia, psicologia e transporte. Mais recentemente, houve um aumento nas atividades de pesquisa que empregam a Teoria dos Jogos para modelar e analisar sistemas de comunicação sem fio. Combinar a Teoria dos Jogos com o *design* de algoritmos distribuídos eficientes para redes sem fio emergentes é desejável e desafiador [69].

A Teoria dos Jogos proporciona uma base matemática para a descrição e análise de processos de tomada decisão de agentes que interagem entre si em situações de conflito e cooperação [70–72]. Em suma, um jogo é uma ferramenta matemática para modelar situações em que indivíduos tomam decisões buscando maximizar o seu ganho (ou minimizar o seu custo), sendo que o resultado obtido depende não apenas das suas decisões, mas também das decisões dos outros indivíduos. Todo jogo consiste em algum elemento básico:

- Jogadores: tomadores de decisão no jogo;
- *Payoffs*: recompensas/punições esperadas no final do jogo;
- Ações: possíveis escolhas feitas pelo jogador;
- Estratégias: plano de ação especificado para cada jogador contra outros jogadores.

Os autores em [71] definem a Teoria dos Jogos como o estudo de situações de conflito e cooperação que envolvem dois ou mais tomadores de decisão cujos objetivos são ao menos parcialmente conflitantes. Cada tomador de decisão tem a sua disposição um número de ações diferentes. O resultado obtido por um tomador de decisão depende não apenas da sua decisão, mas também das decisões tomadas pelos demais participantes do jogo. Os tomadores de decisão são forçados a pensarem estrategicamente, isto é, agem como agentes racionais, apoiados em raciocínios lógicos, empregando os meios mais adequados aos objetivos que almejam [73, 74].

No contexto das redes sem fio, uma vez que a Teoria dos Jogos é um estudo da interação de agentes autônomos, sua aplicação ajuda na análise dos sistemas distribuídos. Nas redes sem fio emergentes, como redes de sensores, redes mesh, redes ad-hoc, redes heterogêneas e sistemas de computação pervasiva, as características frequentemente desejadas são operação descentralizada e autoconfiguração [75]. Nessas redes, cada nó executando um protocolo distribuído deve tomar suas próprias decisões, por exemplo, sobre gerenciamento de interferência e encaminhamento de pacotes, entre outros.

São cenários apropriados para a modelagem de um jogo em que as decisões de cada agente terão consequências sobre os resultados relevantes para os outros agentes. Dessa forma, a aplicação da Teoria dos Jogos pode oferecer sugestões para a otimização do de-

sempenho das redes ou permitir novas abordagens de mecanismos que levem participantes independentes a atingirem resultados que sejam desejáveis sob o ponto de vista da rede com um todo.

Nos últimos anos, a Teoria dos Jogos foi usada para modelar várias áreas nos sistemas de comunicação [71, 72, 76]. Muitos outros problemas nas redes de computadores, especialmente redes sem fio, foram modelados e analisados usando a Teoria dos Jogos, como gerenciamento de recursos [36, 76, 77]; alocação de largura de banda [78–80] e controle de potência [81–83], etc.

A Teoria dos Jogos como uma teoria de decisão multi-agente modela o comportamento dos jogadores racionais que estão tentando maximizar suas *payoffs* na presença de influências de outros agentes. Os comportamentos cooperativos e não-cooperativos das entidades das futuras redes podem ser investigados usando conceitos de solução apropriadas na Teoria dos Jogos, como discutidos em [36, 69].

### 4.1.1 Definição Básica de um Jogo

A Teoria dos Jogos pode ser definida como a teoria dos modelos matemáticos que estuda a escolha de decisões ótimas sob condições de conflito. O elemento básico em um jogo é o conjunto de jogadores que dele participa. Cada jogador tem um conjunto de estratégias. Quando cada jogador escolhe sua estratégia, temos então uma situação ou perfil no espaço de todas as situações (perfis) possíveis. Cada jogador tem interesse ou preferências para cada situação no jogo. Em termos matemáticos, cada jogador tem uma função de utilidade que atribui um número real (o ganho ou *payoff* do jogador) a cada situação do jogo.

Mais especificamente, um jogo tem os seguintes elementos básicos: existe um conjunto finito de jogadores, representado por  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ . Cada jogador  $g_i \in G$  possui um conjunto finito  $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im_i}\}$  de opções, denominadas estratégias puras do jogador  $g_i$  ( $m_i \geq 2$ ). Um vetor  $\mathbf{s} = (s_{1j_1}, s_{2j_2}, \dots, s_{nj_n})$ , onde  $s_{ij_i}$  é uma estratégia pura para o jogador  $g_i \in G$ , é denominado um perfil de estratégia pura. O conjunto de todos os perfis de estratégia pura formam, portanto, o produto cartesiano:

$$S = \prod_{i=1}^N S_i = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n,$$

denominado espaço de estratégia para o jogador  $g_i \in G$ , e existe uma função de utilidade:

$$u_i : S \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\mathbf{s} \mapsto u_i(\mathbf{s})$$

que associa o ganho (*payoff*)  $u_i(\mathbf{s})$  do jogador  $g_i$  a cada perfil de estratégia pura  $\mathbf{s} \in S$ .

#### 4.1.2 Equilíbrio de *Nash*

Uma solução estratégica ou equilíbrio de *Nash* de um jogo é um ponto no qual cada jogador não tem incentivo de mudar sua estratégia se os demais jogadores não o fizerem.

**Definição 1.** (*Equilíbrio de Nash*) Apresenta-se o perfil de estratégia, como sendo:

$$\mathbf{s}^* = (s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*) \in S$$

é um equilíbrio de *Nash*, se

$$u_i(s_i^*, \mathbf{s}_{-i}^*) \geq u_i(s_{ij_i}, \mathbf{s}_{-i}^*)$$

para todo  $i = 1, \dots, n$  e para todo  $j_i = 1, \dots, m_i$ , com  $m_i \geq 2$ .

Uma interpretação alternativa para a definição de equilíbrio de *Nash* é que trata-se de uma combinação de estratégias em que cada estratégia escolhida por um jogador é a melhor resposta às estratégias dos demais jogadores, e isto é verdade para todos os jogadores. Então, formalmente, a estratégia  $\mathbf{s}^*$  é um equilíbrio de *Nash* se, e somente se, cada jogador  $i$  escolhe sua estratégia de equilíbrio baseada na relação:

$$s_i^* \in \mathbf{M}_i(j) = \arg \max_{s_i} u_i(s_i, \mathbf{s}_{-i}),$$

onde  $\mathbf{M}_i$  é a função da melhor resposta para o jogador  $i$  e  $s \geq S$ .

## 4.2 Modelagem do Sistema

Nesta seção<sup>1</sup> é apresentada a configuração da modelagem do sistema baseada no trabalho em [29], que é usada nos cenários de avaliação da proposta. A notação e as nomenclaturas usadas na modelagem do sistema são detalhadas na Tabela 4.1.

---

<sup>1</sup>A modelagem do sistema foi adaptada de [29], sendo que o autor autorizou a cópia para reprodução e adaptação no cenário da Tese.

Tabela 4.1: Nomenclatura para a modelagem do sistema.

$\mathcal{A}$	Conjunto de vetores com padrões ABSs disponíveis a uma <i>macrocell</i>
$\hat{\mathcal{A}}$	Conjunto de índices dos <i>subframes</i> que podem ser configurados como ABSs
$\mathcal{B}$	Largura de banda por RB
$\mathcal{C}$	Conjunto de valores CSB que uma <i>picocell</i> pode escolher
$\epsilon(u, \lambda_{\mathcal{O}_u})$	A <i>macrocell</i> a qual o usuário $u$ está associado
$h_{u,b}^i$	<i>Fast fading</i> da estação $i$ para o usuário $u$ no PRB $b$
$\mathcal{M}$	Conjunto de todas as <i>macrocells</i>
$\mathcal{M}_c$	Conjunto das <i>macrocells</i> no <i>cluster</i> central
$\mathcal{N}_{(i,n)}$	As estações vizinhas que estão localizados na $n$ -ésima camada de hexágonos, em relação ao hexágono em que a estação $i$ está localizada
$N_0$	<i>Noise power spectral density</i>
$N_B$	Número de PRB
$N_R$	Número de RB (no domínio da frequência)
$N_S$	Número de <i>subframes</i> (no domínio do tempo)
$\mathcal{O}_u$	<i>Macrocell</i> candidata que pode servir o usuário $u$
$\mathcal{P}$	Conjunto de todas as <i>picocells</i>
$\mathcal{P}_c$	Conjunto de <i>picocells</i> no <i>cluster</i> central
$P_{\iota_m, u, b}^{IF}$	A soma da interferência no usuário $u$ recebida das estações $\iota_m$ no PRB $b$
$P_{i,u}^{Rx}$	O RSRP do usuário $u$ na estação $i$
$r_{u,b}$	Taxa alcançada do usuário $u$ no PRB $b$
$s_w$	Tamanho da janela no escalonador PF
$\tau(b)$	O índice do subframe no PRB ( $b$ )
$\mathcal{U}$	Conjunto de todos os usuários no sistema
$\mathcal{U}_i$	Conjunto de usuários associados as estações no conjunto $i$ ou as estações $i$ no sistema
$\alpha_m$	Padrão de ABS da <i>macrocell</i> $m$
$\hat{\alpha}_m$	Padrão de RP-ABS da <i>macrocell</i> $m$
$\beta$ e $\gamma$	Peso da métrica $\jmath$
$\lambda$	Vetor que especifica os valores de CSB de todas as <i>macrocells</i>
$\lambda_{\mathcal{O}_u}$	Vetor especificando os valores de CSB da estação $i$ no $\mathcal{O}_u$
$\iota_m$	O conjunto de estações cuja transmissão interferirá com os usuários localizados no mesmo hexágono que a <i>macrocell</i> $m$

Seja  $\mathcal{U}$  o conjunto de todos os usuários no sistema. Seja  $m_u$  a *macrocell* localizada no mesmo hexágono que o usuário  $u$ . Assume-se que apenas a *macrocell* no mesmo hexágono ou nos hexágonos adjacentes podem servir um usuário. Em outras palavras, o conjunto de todas as *macrocells* candidatas que podem servir ao usuário  $u$  é fornecido como:

$$\mathcal{O}_u \triangleq m_u \cup \mathcal{N}(m_u, 0) \cup \mathcal{N}(m_u, 1). \quad (4.2)$$

Seja  $\lambda_{\mathcal{O}_u}$  o vetor que especifica todos os valores CSB de todas as estações em  $\mathcal{O}_u$ . Considere  $\lambda_{\mathcal{O}_u}(i)$  como sendo os valores de CSB da estação  $i$ , onde  $i \in \mathcal{O}_u$ . Além disso, o conjunto  $\mathcal{C}$  contém todos os valores possíveis de  $\lambda_{\mathcal{O}_u}(i)$  e o parâmetro  $P_{i,u}^{Rx}$  corresponde ao *Reference Signal Received Power* (RSRP) do usuário  $u$  na estação  $i$ , quando a estação está transmitindo com a potência máxima. O valor de  $P_{i,u}^{Rx}$  depende da distância da estação  $i$  e o usuário  $u$  e a perda devido ao *shadow fading*. A Equação 4.3 fornece a estação que serve o usuário  $u$ :

$$\epsilon(u, \lambda_{\mathcal{O}_u}(i)) \triangleq \underset{i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}}{\operatorname{argmax}} (P_{i,u}^{Rx} + \lambda_{\mathcal{O}_u}(i)). \quad (4.3)$$

Assume-se que há  $N_S$  *subframes* no domínio do tempo e  $N_R$  *Resource Blocks* (RBs) no domínio da frequência. Todos os *subframes* possuem a mesma duração, e todos os RBs são idênticos em termos de largura de banda. Um PRB é formado por um par de *subframes* e um RB, denota-se  $N_B$  definido por  $N_S \cdot N_R$  como o número total de PRBs disponíveis em cada estação  $i$ . Todas as *macrocells* transmitem em níveis de potência fixos nos PRBs que correspondem a non-ABSSs, e todas as *picocells* transmitem em níveis de potência fixos em todos os PRBs.

Considere  $\mathcal{A}$  um vetor que contém todos os possíveis padrões de ABS que uma *macrocell*  $m$  pode adotar, onde cada elemento em  $\mathcal{A}$  consiste de um vetor binário  $\alpha_m$  de comprimento  $N_S$ . Também, seja  $\hat{\mathcal{A}}$  um subconjunto de  $\{1, 2, \dots, N_S\}$  que contém os índices dos *subframes* que podem ser configurados como ABSs. Por exemplo, suponha que  $\mathcal{A} = \{(0, 1, 1, 1), (0, 1, 0, 1), (0, 0, 0, 1)\}$ , então  $\hat{\mathcal{A}} = \{1, 2, 3\}$ , isso explica que os *subframes* 1, 2 e 3 são possíveis ABSs.

Seja  $\tau(b)$  o índice do *subframe* do PRB  $b$ . Além disso, seja  $\hat{\alpha}_m$  um vetor de comprimento  $N_S \cdot N_R$  cujos elementos especificam a alocação de potência da *macrocell*  $m$  em cada PRB, onde  $\hat{\alpha}_m(b)$  é um número real entre 0 e 1 para  $\tau(b) \in \hat{\mathcal{A}}$  e  $\hat{\alpha}_m$  é corrigido para ser 1 para  $\tau(b) \in \{1, 2, \dots, N_S\} \setminus \hat{\mathcal{A}}$ . O vetor  $\hat{\alpha}_m$  define o padrão RP-ABS da *macrocell*  $m$ . Observe que, embora não seja necessário supor que uma *macrocell* ofereça RP-ABS apenas nos *subframes* especificados por  $\hat{\mathcal{A}}$ , a definição de  $\hat{\alpha}_m$  visa oferecer uma comparação justa entre a otimização FeICIC e a otimização eICIC.

Dadas as definições a SINR do usuário  $u$  no PRB  $b$  quando associada à *macrocell*  $m$  pode ser calculada como:

$$SINR_{u,b}^m = \begin{cases} \frac{h_{u,b}^m P_{m,u}^{Rx} \cdot \alpha_m(\tau(b))}{P_{\iota_m, u, b}^{IF} + N_0 \mathcal{B}}, & \text{macrocell } m \text{ oferece ABS,} \\ \frac{h_{u,b}^m P_{m,u}^{Rx} \cdot \hat{\alpha}_m(b)}{P_{\iota_m, u, b}^{IF} + N_0 \mathcal{B}}, & \text{macrocell } m \text{ oferece RP-ABS,} \end{cases} \quad (4.4a)$$

$$SINR_{u,b}^m = \begin{cases} \frac{h_{u,b}^m P_{m,u}^{Rx} \cdot \alpha_m(\tau(b))}{P_{\iota_m, u, b}^{IF} + N_0 \mathcal{B}}, & \text{macrocell } m \text{ oferece ABS,} \\ \frac{h_{u,b}^m P_{m,u}^{Rx} \cdot \hat{\alpha}_m(b)}{P_{\iota_m, u, b}^{IF} + N_0 \mathcal{B}}, & \text{macrocell } m \text{ oferece RP-ABS,} \end{cases} \quad (4.4b)$$

onde  $h_{u,b}^m$  fornece o ganho de *fast fading* no PRB  $b$  a partir da *macrocell*  $m$  para o usuário  $u$ ,  $\tau(b)$  retorna o índice do *subframe* do PRB  $b$ ,  $\iota_m$  denota o conjunto de estações cuja transmissão irá interferir com os usuários localizados no mesmo hexágono da *macrocell*  $m$ ,  $P_{\iota_m, u, b}^{IF}$  é a soma de interferência para o usuário  $u$  recebida a partir da estação em  $\iota_m$  no PRB  $b$ ,  $N_0$  denota a densidade espectral de potência constante do ruído branco gaussiano e aditivo da *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), e  $\mathcal{B}$  é a largura de banda de um PRB. Similarmente, a SINR do usuário  $u$  no PRB  $b$  quando associado com a *picocell*  $p$  é dada por:

$$SINR_{u,b}^p = \frac{h_{u,b}^p P_{p,u}^{Rx}}{P_{\iota_p, u, b}^{IF} + N_0 \mathcal{B}}.$$

Declara-se que todos os *subframes* e os RBs de todas as estações são sincronizados, e uma *picocell* não oferece ABS/RP-ABS, a taxa alcançada pelo usuário  $u$  no PRB  $b$  é denotada como  $r_{u,b}$ , onde  $b \in [1, N_B]$ . Devido ao *fast fading* e aos padrões de ABS potencialmente diferentes das *macrocells* interferentes, um usuário pode obter diferentes vazões em diferentes PRBs e a taxa alcançada é calculada por meio do Teorema de *Shannon-Hartley* para a capacidade de canal:

$$r_{u,b} = \begin{cases} \mathcal{B} \cdot \log_2(1 + SINR_{u,b}^m), & m \in \mathcal{M}, \\ \mathcal{B} \cdot \log_2(1 + SINR_{u,b}^p), & p \in \mathcal{P}. \end{cases}$$

Seja  $x_{u,b}$  uma variável binária indicando se o PRB  $b$  está alocado ao usuário  $u$  por sua estação base, onde  $x_{u,b} = 1$  significa que o PRB  $b$  está alocado ao usuário  $u$  e  $x_{u,b} = 0$  significa o contrário. Além disso, considere  $w_u$  como o *weighting factor* do usuário  $u$ , de modo que cada usuário do sistema tenha uma função de utilidade da vazão, mas nenhuma taxa mínima é garantida, ou seja, o serviço oferecido ao usuário é do tipo melhor esforço.

Formula-se o problema de otimização eICIC da seguinte maneira:

$$\text{maximizar} \sum_{i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}} \sum_{u \in \mathcal{U}_i} w_u \cdot \ln \sum_{b=1}^{N_B} x_{u,b} \cdot r_{u,b}, \quad (4.6a)$$

$$\text{sujeito a} \sum_{u \in \mathcal{U}_m} x_{u,b} = \alpha_m(\tau(b)),$$

$$\forall m \in \mathcal{M}_c, \quad b \in [1, N_B], \quad \alpha_m \in A, \quad (4.6b)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}_p} x_{u,b} = 1, \quad \forall p \in \mathcal{P}_c, \quad b \in [1, N_B], \quad (4.6c)$$

$$x_{u,b} \in \{0, 1\}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, \quad b \in [1, N_B], \quad (4.6d)$$

$$\lambda(s) \in \mathcal{C}, \quad \forall s \in \mathcal{P}_c, \quad (4.6e)$$

onde 4.6b especifica que uma *macrocell* pode adotar um dos padrões ABS em  $A$  e apenas *non-ABS* PRBs podem ser atribuídos aos usuários, de modo que no máximo um usuário possa ocupar um PRB, 4.6c declara que todos os PRBs das *picocells* podem ser alocados aos usuários e no máximo um usuário pode ocupar um PRB, e 4.6e significa que uma *picocell* pode adotar um dos valores de CSB especificados em  $\mathcal{C}$ .

Para a otimização FeICIC na qual as *macrocells* podem oferecer RP-ABSSs, pretende-se resolver o seguinte problema:

$$\text{maximizar} \sum_{i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}} \sum_{u \in \mathcal{U}_i} w_u \cdot \ln \sum_{b=1}^{N_B} x_{u,b} \cdot r_{u,b}, \quad (4.7a)$$

$$\text{sujeito a} \hat{\alpha}_m(b) \in [0, 1], \quad \tau(b) \in \hat{\mathcal{A}}, \quad \forall m \in \mathcal{M}_c, \quad (4.7b)$$

$$\hat{\alpha}_m(b) = 1, \quad \tau(b) \in \{1, 2, \dots, N_T\} \setminus \hat{\mathcal{A}},$$

$$\forall m \in \mathcal{M}_c, \quad (4.7c)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}_i} x_{u,b} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{M}_c \cup \mathcal{P}_c, \quad b \in [1, N_B],$$

$$(4.6d) \quad e \quad (4.6e), \quad (4.7d)$$

onde 4.7b significa que a alocação de potência é otimizada em PRBs cujos índices de *subframes* estão em  $\hat{\mathcal{A}}$  e 4.6c significa que nenhuma otimização de potência é executada em PRBs cujos os índices de *subframes* não estão em  $\hat{\mathcal{A}}$ . Na otimização FeICIC não há restrição em uma *macrocell* para silenciar completamente sua transmissão em um *subframe*, todo PRB de uma *macrocell* pode ser alocado para no máximo um usuário, conforme especificado em 4.7d.

## 4.3 Estratégia de Escalonamento de Pacotes Baseado no Jogo *Colonel Blotto*

### 4.3.1 Formulação do Jogo *Colonel Blotto*

O *Colonel Blotto Game* (CBG) captura situações estratégicas em que os jogadores tentam não corresponder às ações de seus oponentes. É um jogo de soma zero, ou seja, quando um jogador ganha, o outro jogador perde. O Jogo *Colonel Blotto* também não tem uma solução direta, sendo assim, possui múltiplos equilíbrios de estratégia mista [84].

A alocação competitiva de recursos pelas estações base, seja *picocells* ou *macrocells*, em cada *time slot* está intimamente relacionada ao Jogo *Colonel Blotto* [12, 13, 85, 86], um problema multidimensional na alocação estratégica de recursos. No cenário proposto, é possível modelar usuários como os campos de batalha onde as estações base, competem por eles e a alocação dos recursos como as tropas. Esse processo é repetido constantemente à medida que os usuários entram e saem do sistema e quando mais recursos se tornam disponíveis.

Adota-se um jogo repetido dinâmico e não cooperativo com abordagem descentralizada para os jogadores (estações base) para determinar as estratégias ideais em um horizonte de tempo finito. Como em cada estágio deste jogo dinâmico, as estações base jogam um jogo CBG (que é estrategicamente equivalente a um jogo de soma zero), o problema do jogo de alocação de recursos pode ser denominado como um jogo dinâmico de soma zero, ou *Zero-Sum Dynamic Game* (ZSDG) [87]. Para modelar esse problema, o CBG fornece um *framework* para a alocação de recursos em um ambiente competitivo quando os jogadores têm recursos limitados.

Com base no trabalho em [12], a obtenção das estratégias de equilíbrio do jogo para as estações base reduzem a descoberta das estratégias de ponto de sela de um ZSDG [88]. No entanto, diferentemente dos ZSDGs padrão com dinâmica linear e funções de *payoffs* quadráticas em que as estratégias de pontos de sela podem ser obtidas resolvendo as chamadas equações de *Ricatti* [89], as funções de *payoffs* no jogo CBG da proposta têm uma função de utilidade modificada baseada no trabalho em [8]. Aproxima-se as funções instantâneas de *payoff* usando funções simples suaves e usa-se uma abordagem de *Dynamic Programming* (DP) para obter as soluções da função valor e as estratégias de ponto de sela [88].

#### Jogo Dinâmico *Colonel Blotto*

Esta seção foi baseada na formulação do *Dynamic Colonel Blotto Game* encontrado no trabalho em [12]. Sendo assim, considere dois jogadores (*macrocell* ou *picocell*) que são

selecionados para alocar os recursos a  $n$  usuários por um período de tempo discreto  $k = 1, 2, \dots, K$ . A cada instante  $k$ , cada usuário  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  recebe duas ofertas de recursos  $u_i(k), w_i(k) \in \mathbb{R}^{\geq 0}$  dos jogadores e deve aceitar uma delas. Como cada usuário egoisticamente tende a aceitar a melhor oferta de recursos, dependendo de  $u_i(k)$  ser maior que  $w_i(k)$ , o usuário aceita  $u_i(k)$  do primeiro jogador em vez de  $w_i(k)$  do segundo jogador.

Denota-se a alocação de recursos total atribuída pelos dois jogadores no instante  $k$  por  $u_k = \sum_{i=1}^n u_i(k)$  e  $w_k = \sum_{i=1}^n w_i(k)$ , respectivamente. Pode-se ver facilmente que a *payoff* máxima recebida para o jogador 1, assumindo que o jogador 2 distribua seus recursos  $w_k$  de maneira ideal, igual a  $U_1(u_k, w_k)$ . Em particular, a *payoff* para o jogador 2 é igual a  $U_2(u_k, w_k) = 1 - U_1(u_k, w_k)$ .

Em um jogo de um único estágio, visivelmente as estratégias de equilíbrio de *Nash* para o CBG de estágio único serão as estratégias ideais para ambos os jogadores. Mas quando o CBG é jogado para estágios em que  $K > 1$ , torna-se muito crítico para cada jogador como alocar seus *budgets* em estágios diferentes. Assim, em cada estágio  $k$ , os jogadores decidem a quantidade de *budgets*  $u_k, w_k$ , a conceder e anunciam ao sistema; nesse caso, eles jogam um CBG com *budgets*  $u_k, w_k$ . Aqui, observa-se que as ações dos jogadores na alocação de recursos são a sequência dos *budgets*.

Depois que essas decisões são tomadas, as *payoffs* dos jogadores no estágio  $k$  são iguais às *payoffs* ótimas de um CBG de estágio único com *budgets* iniciais  $u_k$  e  $w_k$ . Para capturar a dinâmica do jogo em diferentes estágios, denota-se os *budgets* iniciais dos jogadores por  $x_1(0)$  e  $x_2(0)$ . Denota-se ainda, o *budget* disponível no estágio  $k$  para os jogadores 1 e 2 por  $x_1(k)$  e  $x_2(k)$ , respectivamente, assim os seus *budgets* na próxima etapa  $k + 1$  serão iguais a:

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= x_1(k) - \alpha u_k + c_1, \\ x_2(k+1) &= x_2(k) - \alpha w_k + c_2, \end{aligned} \tag{4.8}$$

onde  $(1 - \alpha) \in (0, 1)$  é a taxa de liberação dos recursos para os usuários anteriores, e  $c_1, c_2 > 0$  são constantes adicionais para os jogadores 1 e 2, respectivamente. O objetivo da Equação 4.8 é fazer com que os jogadores que possuem algum *budget*  $x_1(k)$  no início do estágio  $k$  gastem  $u_k$  unidades nesse estágio. No entanto, os recursos liberados para o próximo estágio é igual a  $(1 - \alpha)u_k$ , que juntamente com a constante  $c_1$  fornece seu *budget* disponível na próxima etapa:

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= x_1(k) - u_k + (1 - \alpha)u_k + c_1, \\ &= x_1(k) - \alpha u_k + c_1. \end{aligned}$$

Finalmente, denota-se as decisões dos jogadores em todo o tempo por  $u := (u_i, \dots, u_K)$  e  $w := (w_i, \dots, w_K)$ , o total de *payoffs* recebidas pelos jogadores 1 e 2:

$$\begin{aligned} \hat{U}_1(u, w) &= \sum_{k=1}^K U_1(u_k, w_k), \\ \hat{U}_2(u, w) &= \sum_{k=1}^K U_2(u_k, w_k) = K - \hat{U}_1(u, w). \end{aligned} \tag{4.10}$$

Portanto, cada jogador procura maximizar seu retorno total acumulado descrito na Equação 4.10, sujeito ao seu próprio *budget* dinâmico dada pela Equação 4.8. Isso naturalmente define um jogo dinâmico entre os dois jogadores, que será descrito a seguir.

### 4.3.2 Solução Proposta para o Algoritmo de Escalonamento de Pacotes Baseado no Jogo *Colonel Blotto*

Primeiramente, observa-se que o Jogo *Colonel Blotto* é um caso especial de um jogo dinâmico de soma zero para dois jogadores que modelam dois coronéis, os quais têm a tarefa de alocar tropas limitadas em vários campos de batalha. O coronel que reunir a maior tropa em uma frente de batalha será declarado vencedor e a *payoff* geral será proporcional ao número das batalhas vencidas. Isso ocorre devido à estrutura da função de utilidade do Jogo *Colonel Blotto*, que define que qualquer ganho de um dos jogadores pode ser visto como uma perda para o outro jogador.

**Definição 1.** Um par de estratégias  $u^* = (u_1^*, \dots, u_K^*)$  e  $w^* = (w_1^*, \dots, w_K^*)$  são chamados de estratégias de ponto de sela para os jogadores (macrocell ou picocell) no Jogo *Colonel Blotto*, se

$$\hat{U}_1(u, w^*) \leq \hat{U}_1(u^*, w^*) \leq \hat{U}_1(u^*, w),$$

onde o jogador 1 visa maximizar  $\hat{U}_1$  enquanto o jogador 2 deseja minimizá-lo.

Portanto, o objetivo é encontrar as estratégias (aproximadas) de pontos de equilíbrio para os jogadores (ou seja, encontrar os pontos de equilíbrio de *Nash* do Jogo *Colonel Blotto* Dinâmico de soma zero). Um par de estratégias forma um ponto de equilíbrio para o Jogo *Colonel Blotto* Dinâmico se, e somente se, houver uma sequência de funções  $V_k(\cdot)$

tal que  $V_{K+1}(x) = 0$ ,  $\forall x$ , sendo que:

$$\begin{aligned}
 & V_k(x_1(k), x_2(k)) \\
 &= \min_w \max_u \left\{ U_1(u, w) + V_{k+1}(x_1(k+1), x_2(k+1)) \right\} \\
 &= \max_u \min_w \left\{ U_1(u, w) + V_{k+1}(x_1(k+1), x_2(k+1)) \right\},
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

nesse caso, os vetores de solução correspondentes  $u^*$  e  $w^*$  formarão estratégias de pontos de equilíbrio para os jogadores, e  $V_0(x_1(0), x_2(0))$  será o valor do jogo. Portanto, para encontrar a função valor  $V_k(\cdot)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , utiliza-se a programação dinâmica (DP).

Em segundo lugar, com o objetivo de aumentar o índice de justiça na alocação de recursos do algoritmo *Colonel Blotto*, acrescenta-se na função de utilidade do jogo a equação de equivalência para o problema de equilíbrio de preço descrito em [8], por ser uma característica importante para a interação estratégica. A seguir, descreve-se a formulação modificada em [8] para o algoritmo do Jogo *Colonel Blotto*.

Considere  $u_{ij} \triangleq r_{ij}$  como sendo a utilidade do usuário  $i$  para o PRB  $j$ . Assume-se que há pelo menos uma entrada positiva em cada linha e coluna de  $K \times N$  na matriz de utilidade  $\mathbf{U} = [u_{ij}]$ . Essa suposição não é restritiva, pois se  $\mathbf{U}$  consiste em uma linha zero, o usuário correspondente não pode transmitir nada através de nenhum PRB e deve ser ignorado no modelo. Da mesma forma, se  $\mathbf{U}$  consiste em uma coluna zero, por exemplo,  $p_j = 0$ , então o PRB  $j$  deve ser removido da configuração.

Introduzindo os multiplicadores de Lagrange  $\lambda_{ij}$  pelas restrições de desigualdade e multiplicadores  $\nu_{ij}$  pelas restrições de igualdade em:

$$\text{Maximizar } g(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^K \alpha_i \ln \left( \sum_{j=1}^K x_{ij} r_{ij} \right) \tag{4.13a}$$

$$\text{sujeito a } \sum_{i=1}^K x_{ij} = 1 \text{ for all } j, \tag{4.13b}$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1 \text{ for all } i, j. \tag{4.13c}$$

obtém-se as condições de *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT) [90], que são expressas na Equação a seguir:

$$-\frac{\alpha_{ij}}{\sum_k x_{ik} u_{ik}} - \lambda_{ij} + \nu_j = 0, \text{ for all } i, j, \quad (4.14a)$$

$$x_{ij}, \lambda_{ij} \geq 0, \quad \lambda_{ij} x_{ij} = 0, \text{ for all } i, j, \quad (4.14b)$$

e a Equação 4.13b.

Eliminando os multiplicadores de Lagrange  $\lambda_{ij}$ , a Equação 4.14a e a Equação 4.14b torna-se:

$$\nu_j - \frac{\alpha_{ij} u_{ij}}{\sum_k x_{ik} u_{ik}} \geq 0, \quad \forall i, j, \quad (4.15a)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ and } x_{ij} \left( \nu_j - \frac{\alpha_{ij} u_{ij}}{\sum_k x_{ik} u_{ik}} \right) = 0, \quad \forall i, j. \quad (4.15b)$$

Apresenta-se a solução ideal que satisfaça a Equação 4.13b, a Equação 4.15a e a Equação 4.15b, por  $X^*$  e  $\nu^*$ . Prova-se em [91], resolvendo por  $X^*$  e  $\nu^*$  que é equivalente a resolver o chamado problema de equilíbrio de preço definido a seguir:

**Definição 2.** Uma matriz de alocação de recursos  $\mathbf{X}$  e um vetor de preço  $\nu = \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_N$  formam um vetor de preço se, (1)  $\sum_{j=1}^N \nu_j = 1$ , e (2) para todo  $i$ , o máximo valor de  $\sum_{j=1}^N u_{ij} x'_{ij}$  sujeito a  $\sum_{j=1}^N \nu_j = \alpha_i$  e  $x'_{ij} \geq 0$  para todo  $j = 1, \dots, N$  é alcançado quando  $x'_{ij} = x_{ij}$  para todo  $j$ .

Nesta formulação, os PRBs  $N$  são interpretados como  $N$  recursos, que serão distribuídos entre os usuários. A fração da  $j$ -th parte a ser dada ao  $i$ -th usuário é  $x_{ij}$ . O preço para a  $j$ -th parte é  $\nu_j$ , para  $j = 1, 2, \dots, N$ . Dados os preços, o usuário  $i$  maximiza  $\sum_{j=1}^N u_{ij} x_{ij}$ , sujeito a restrição de budget  $\sum_{j=1}^N x_{ij} \nu_j = \alpha_i$ . A constante  $\alpha_i$  é chamada de direito do usuário  $i$ . Seja  $X^*$  uma solução para esta formulação e  $\nu^*$  o vetor correspondente dos multiplicadores Lagrange para as restrições de igualdade. Em seguida, apresenta-se o Lema 1 para demonstrar a preposição em situações em que a variável  $x_{ij}^*$  é maior que zero.

**Lema 1.** Se  $x_{ij}^* > 0$ , então:

$$\frac{u_{ij}}{\nu_j^*} = \max_l \frac{u_{il}}{\nu_l^*} = \frac{\sum_k x_{ik}^* u_{ik}}{\alpha_i} \quad (4.16)$$

*Demonstração:* Verificar o trabalho em [35].

**Definição 3.** Dado um vetor positivo  $K$ -vetor  $\alpha$  com  $\sum \alpha_i = 1$ , uma alocação  $\mathbf{X}$  é dada como “não-egoísta” se:

$$\alpha_i^{-1} \sum_{j=1}^N u_{ij} x_{ij} \geq \alpha_{i'}^{-1} \sum_{j=1}^N u_{ij} x_{i'j} \quad (4.17)$$

para todo  $i, i \in \{1, 2, \dots, K\}$ . Se  $\alpha_i = 1/K$  para todo  $i$ , então  $\mathbf{X}$  é chamado “não-egoísta”.

O algoritmo de *Ford-Fulkerson* [92], foi utilizado para encontrar o equilíbrio  $X^*$ ,  $\nu^*$  em relação a  $\mathbf{U}$  e  $\alpha$  no trabalho em [8], e também foi utilizado para resolver o *maximum flow problem*. Dessa forma, utiliza-se o algoritmo de *Ford-Fulkerson* para solucionar o *maximum flow problem* descrito no algoritmo do Jogo *Colonel Blotto*.

Apresenta-se a seguir, o Algoritmo 1 da proposta de escalonamento de pacotes em redes heterogêneas para o *downlink* LTE-A através do Jogo *Dinamic Colonel Blotto* e baseado no trabalho em [12].

---

**Algorithm 1** Escalonador de pacotes baseado no Jogo *Colonel Blotto*

---

- 1: **Inic平ize:**  $V_{K+1}(\cdot) = 0$
- 2: **for all each step**  $k = K$  **downto** 1 **do**
- 3:     Calcule  $x_1(k)$  e  $x_2(k)$ . Encontre as ações ótimas  $u_k^*$ ,  $w_k^*$ , tal que:

$$\begin{aligned} & U_1(u^*, w^*) + V_{k+1}\left(x_1(k) - \alpha u_k^* + c_1, x_2(k) - \alpha w_k^* + c_2\right) \\ &= \min_w \max_u \left\{ U_1(u, w) + V_{k+1}\left(x_1(k) - \alpha u + c_1, x_2(k) - \alpha w + c_2\right) \right\} \quad (4.18) \\ &= \max_u \min_w \left\{ U_1(u, w) + V_{k+1}\left(x_1(k) - \alpha u + c_1, x_2(k) - \alpha w + c_2\right) \right\} \end{aligned}$$

- 4:     com equivalência para o problema de equilíbrio de preços, baseado em [8]

$$\begin{aligned} \nu_j - \frac{\alpha_{ij} u_{ij}}{\sum_k x_{ik} u_{ik}} &\geq 0, \quad \forall i, j, \\ x_{ij} &\geq 0 \text{ and } x_{ij} \left( \nu_j - \frac{\alpha_{ij} u_{ij}}{\sum_k x_{ik} u_{ik}} \right) = 0, \quad \forall i, j. \end{aligned} \quad (4.19)$$

- 5:     e a correspondente função valor:

$$\begin{aligned} V_k(x_1(k), x_2(k)) &= U_1(u^*, w^*) \\ &+ V_{k+1}\left(x_1(k) - \alpha u_k^* + c_1, x_2(k) - \alpha w_k^* + c_2\right). \end{aligned}$$

- 6:     **Output:** sequência  $u_K^*, w_K^*, V_K(\cdot), \dots, u_0^*, w_0^*, V_0(\cdot)$
  - 7: **end for**
-

## 4.4 Estratégia de Gerenciamento de Interferência através do Jogo Potencial Exato

### 4.4.1 Formulação do Jogo Potencial Exato

Jogos Potenciais Exatos foram definidos e suas propriedades discutidas em [93]. Um jogo é chamado de Jogo Potencial Exato, se existir uma função potencial exata, de modo que a alteração no valor da função potencial exata devido à alteração da estratégia de um jogador seja a mesma alteração na função de *payoff* do jogador. A chave para a formulação do Jogo Potencial Exato é encontrada na definição apropriada da função de *payoff*.

Um jogo finito consiste em um conjunto finito de jogadores, um conjunto finito de estratégias de cada jogador e nas funções de *payoffs* dos jogadores, em que a *payoff* de um jogador é uma função das estratégias desempenhadas por todos os jogadores. Um perfil de estratégia fornece as estratégias adotadas por todos os jogadores, e um equilíbrio de *Nash* pode ser alcançado se os jogadores se revezam aleatoriamente e jogam seus *best responses* ou *better responses* [94], onde os jogadores fixam suas estratégias.

A *best response* dinâmica resolve um Jogo Potencial Exato encontrando iterativamente as estratégias que maximizam as funções de *payoffs* dos jogadores selecionados em cada iteração [29]. Neste trabalho, apresenta-se um algoritmo distribuído que otimiza em conjunto os padrões de ABS e os valores de CSB em *HetNets*. Formula-se o problema como um Jogo Potencial Exato que encontra a resposta através de algoritmos simples baseados na *best/better response* dinâmica.

Usando a abordagem em [29], modela-se as estações base como sendo os jogadores, assim  $\mathcal{M} \cup \mathcal{P}$  define o conjunto dos jogadores. Cada jogador  $i$  escolhe uma estratégia  $s_i$  de um conjunto de estratégias  $\mathcal{M}_i$ . A restrição devido à modelagem do sistema é determinada de modo que o ABS seja permitido nas *macrocells*, sendo o mesmo utilizado para reduzir a interferência dessas nas *picocells*, e todas as estações podem definir seus valores de CSB de acordo com  $\mathcal{C}$ . Considere o vetor  $s$  que especifica a estratégia de todos os jogadores, onde  $s(i)$  fornece a estratégia da estação  $i$ . Assim, define-se as estratégias selecionadas por todos os jogadores, com exceção do jogador  $i$ :

$$\mathbf{s}_{-i} \triangleq (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_{|\mathcal{M}|+|\mathcal{P}|}), \quad (4.21)$$

sendo as estratégias de todos os jogadores que não sejam jogadores  $i$ . Apresenta-se:

$$(s'_i, \mathbf{s}_{-i}) \triangleq (s_1, \dots, s_{i-1}, s'_i, s_{i+1}, \dots, s_{|\mathcal{M}|+|\mathcal{P}|}), \quad (4.22)$$

para que o jogador  $i$  adote a estratégia  $s'_i$  e as estratégias dos demais jogadores sejam especificadas por  $s_{-i}$ .

Considere  $\mathcal{N}_i \triangleq \{i\} \cup \mathcal{N}_i^{IF} \cup \mathcal{N}_i^{Att}$ , onde  $i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}$ ,  $\mathcal{N}_i^{IF}$  é o conjunto de estações na qual as transmissões no enlace *downlink* podem sofrer interferência da estação  $i$ ,  $\mathcal{N}_i^{Att}$  é o conjunto de estações cujos padrões de conexão do usuário podem ser alterados modificando o valor CSB da estação  $i$ . Considere a utilidade da estação  $i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}$  sendo:

$$U_i(\mathbf{s}) \triangleq \sum_{u \in \mathcal{U}_i} w_u \cdot \ln \sum_{b=1}^{N_B} x_{u,b} \cdot r_{u,b}, \quad (4.23)$$

onde  $x_{u,b}$  é obtido por algum esquema de escalonamento, dado  $s$  para que as restrições das Equações em 4.6b, 4.6c e 4.6d são satisfeitas. A utilidade agregada de todos os jogadores é dada como:

$$U(\mathbf{s}) = \sum_{i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}} U_i(\mathbf{s}), \quad (4.24)$$

e a função de *payoff* do jogador  $i$  é definida como:

$$V_i(\mathbf{s}) \triangleq \sum_{j \in \mathcal{N}_i} U_j(\mathbf{s}). \quad (4.25)$$

No teorema a seguir, mostra-se que quando  $N_i^{IF} = i \cup N(i, 1)$ ,  $U(s)$  é uma função potencial exata.

*Teorema 1.* Se  $N_i^{IF} = i \cup N(i, 1)$ , então  $U(\cdot)$  é uma função potencial exata do jogo  $\Gamma$ , de modo que  $\Gamma$  é um Jogo Potencial Exato.

*Demonstração.* Verificar o trabalho em [29]. ■

#### 4.4.2 Solução Proposta para o Algoritmo de Gerenciamento de Interferência Baseado no Jogo Potencial Exato, denominada de Otimização eICIC+

Neste trabalho, o objetivo é priorizar o tráfego de usuários localizados na borda da célula, que enfrentam os níveis mais altos de interferência. Formula-se o problema de otimização como Teoria dos Jogos, a fim de maximizar uma função de utilidade modificada visando melhorias na otimização eICIC.

Adapta-se o *framework* de Teoria dos Jogos descrito em [25], derivada da Equação 4.26, além de algumas melhorias nesses algoritmos para obter melhor desempenho, chamada de eICIC+.

$$\text{maximizar} \sum_{i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}} \sum_{u \in \mathcal{U}_i} w_u \cdot \ln \sum_{b=1}^{N_B} x_{u,b} \cdot r_{u,b}, \quad (4.26)$$

O algoritmo proposto eICIC+ visa o equilíbrio entre o desempenho da taxa de transferência e a justiça na distribuição dos recursos ajustando determinadas variáveis na métrica [7]. A função de utilidade considera a taxa de transferência alcançada e as taxas instantâneas de dados do usuário para aumentar a probabilidade de alocação e atender os usuários de acordo com os requisitos de prioridade e, assim, obter melhor desempenho de rede. Nesse sentido, a opção escolhida para melhorar o desempenho da otimização do eICIC foi alterar sua métrica para manter suas características básicas. A equação que define a métrica da otimização eICIC+ é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} & \text{maximizar} \sum_{i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}} \sum_{u \in \mathcal{U}_i} w_u \cdot \ln \sum_{b=1}^{N_B} x_{u,b} \cdot \mathcal{J}, \\ & \text{sujeito a } \mathcal{J} = \frac{[r_{u,b}]^\beta}{[\bar{r}_u(t)]^\gamma}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Diferentes realizações de  $\beta$  e  $\gamma$  afetarão os elementos na taxa de dados média e na taxa de dados instantânea. Assim, percebe-se que a otimização eICIC+ busca oferecer justiça aos usuários e altas taxas de transferência (por exemplo, verificar o trabalho em [7]).

Quanto mais altos os valores de  $\beta$ , maior será a influência para a taxa de dados instantânea alcançável, aumentando assim a probabilidade de atender um usuário com boas condições de canal. Isso se traduz em uma taxa de transferência mais alta na rede, mas com um índice de justiça mais baixo. À medida que se aumenta a métrica  $\gamma$ , procura-se ampliar a influência do fluxo da taxa alcançada em tempos anteriores, isso aumenta a chance de um usuário que atingiu valores mais baixos de taxa de transferência ser escalonado, resultando em uma taxa de transferência da rede menor, mas um nível maior de justiça pode ser previsto.

Assim, o objetivo de  $\beta$  e  $\gamma$  é modificar o impacto na política de alocação da taxa de transmissão instantânea e da taxa média de dados obtido no passado, respectivamente. O algoritmo 2 fornece mais detalhes da otimização eICIC+. Portanto, o algoritmo de otimização proposto eICIC+ baseado na formulação do Jogo Potencial Exato [25], é apresentado da seguinte forma:

**Algorithm 2** Otimização eICIC+

---

```

1: Inicialize os padrões de ABSs e CSBs de todas as macrocells.
2: Inicialize os valores de CSBs de todas as picocells.
3:  $\beta \leftarrow 0.7$ 
4:  $\gamma \leftarrow 0.6$ 
5: Calcule  $V_i$  a partir da Equação 4.26 baseada na Equação 4.27
6: repeat
7:   Seleccione aleatoriamente um jogador  $i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}$ 
8:   if (estratégias em  $s_i$ ) maximize ( $V_i$ ) then
9:     Execute o escalonamento para todas as estações  $i$  in  $\mathcal{N}_i^{Att}$  usando os escalonadores  $\Phi$ 
10:    Calcule  $V_i$ 
11:   else
12:     Seleccione o elemento no conjunto  $A \times C$  que maximize a função  $V_i$ .
13:   end if
14: until algum critério de parada ser atendido.

```

---

## 4.5 Considerações sobre o Capítulo 4

Neste Capítulo, propôs-se um novo algoritmo de escalonamento de pacotes baseado no Jogo *Colonel Blotto* em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A. Nesse sentido, ao projetar o escalonador, insere-se algumas características na função de utilidade para que o algoritmo tenha um melhor desempenho.

Em seguida, apresenta-se uma extensão da otimização eICIC, por meio de uma função de utilidade modificada, através do Jogo Potencial Exato. Essa otimização foi denominada de eICIC+, sendo utilizada para o gerenciamento de interferência inter-celular em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A.

No próximo Capítulo, avaliam-se os algoritmos propostos e comparam-se os desempenhos com os algoritmos relevantes na literatura, como o PF e o RR, para verificar a relevância da solução proposta.

*”Se vós estiverdes em mim, e as minhas palavras estiverem em vós, pedireis tudo o que quiserdes, e vos será feito.”*

- João 15:7

# 5

## Avaliação de Desempenho dos Algoritmos Propostos

A AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO é um procedimento para verificar o cumprimento das metas de um algoritmo proposto. Neste Capítulo são definidos os parâmetros e cenários utilizados para a avaliação da proposta descrita no Capítulo 4. As métricas para avaliação são estabelecidas e os resultados obtidos são posteriormente apresentados com a discussão apropriada. Finalmente, algumas considerações importantes são feitas para o fechamento da análise de desempenho dos algoritmos propostos.

### 5.1 Cenário e Parâmetros de Simulação

#### 5.1.1 Cenário de Simulação

O cenário apresentado é simulado de acordo com os parâmetros fornecidos para avaliação da proposta. Nesse contexto, uma rede *HetNet* é gerada aleatoriamente, conforme mostrado na Figura 5.1, que consiste em *macrocells* e *picocells*, onde os quadrados representam as *macrocells* e os triângulos representam as *picocells*. Seja  $\mathcal{M}$  e  $\mathcal{P}$  o conjunto de todas as *macrocells* e o conjunto de todas as *picocells*, respectivamente. Também, seja  $\mathcal{M}_c$  e  $\mathcal{P}_c$  a *macrocell* no *cluster* central de uma rede *HetNet* e a *picocell* no *cluster* central de uma rede *HetNet* respectivamente, limitadas pelas linhas destacadas na Figura 5.1.

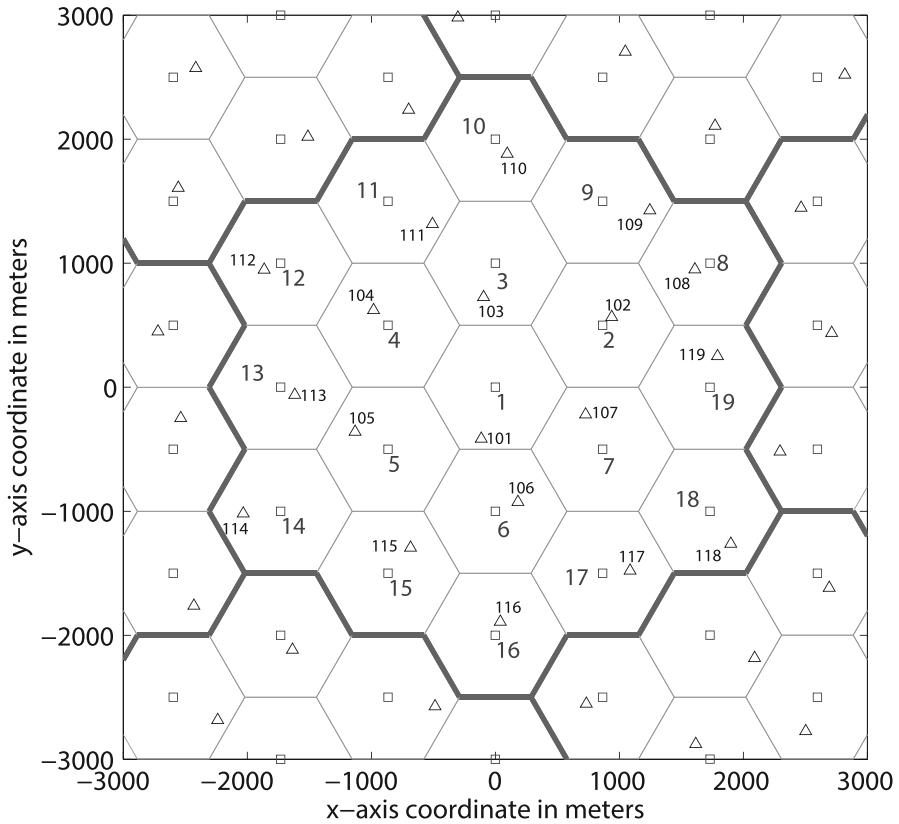


Figura 5.1: Exemplo de um *layout* de uma rede *HetNet* hexagonal. Os quadrados representam as *macrocells* e os triângulos representam as *picocells*. Os usuários não são exibidos por uma questão de clareza (Adaptado e extraído de [29]).

O cenário é composto por sete *clusters*, sendo seis adjacentes ao *cluster* central. Os seis *clusters* vizinhos do *cluster* central são cópias exatas do *cluster* central. Realiza-se essa distinção entre o *cluster* central e outros *clusters* devido a otimização das *macrocells* no *cluster* central, e os *clusters* vizinhos são gerados apenas para realizar a interferência encontrada na prática. Assume-se que existe apenas uma *macrocell* localizada no centro de cada hexágono, e cada hexágono tem o mesmo número de *picocells*.

Seja  $\mathcal{N}(i, n)$  as estações vizinhas que estão localizadas na  $n$ -ésima camada de hexágonos, em relação ao hexágono em que a estação  $i$  está localizada, onde  $i \in \mathcal{M} \cup \mathcal{P}$ . A  $0$ -ésima camada de hexágonos, é o próprio hexágono  $\zeta$ , e a  $n$ -ésima camada de hexágonos  $\zeta$  são os hexágonos:

- que são adjacentes a  $(n - 1)$ -ésima camada de hexágonos de  $\zeta$ , e
- que estão mais distantes de  $\zeta$  do que os hexágonos da  $(n - 1)$ -ésima camada.

Por exemplo, na Figura 5.1,  $\mathcal{N}(1, 0)$  resulta em  $\{101\}$ , pois a *picocell*  $\{101\}$  é a única vizinha da *macrocell* 1 na camada 0, da mesma forma que,  $\mathcal{N}(101, 0)$  fornece  $\{1\}$ , ambos  $\mathcal{N}(1, 1)$  e  $\mathcal{N}(101, 1)$  fornecem  $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 102, 103, 104, 105, 106, 107\}$ ;  $\mathcal{N}(1, 2)$  e

$\mathcal{N}(101, 2)$  fornecem o conjunto das estações no *cluster* central, exceto as *macrocells* em  $\{1, 101\} \cup \mathcal{N}(1, 1)$ . A definição de  $\mathcal{N}(i, n)$  também pode ser facilmente estendida ao caso em que  $i$  representa um conjunto de estações localizados no mesmo hexágono.

### 5.1.2 Parâmetros de Simulação

Uma avaliação de desempenho pode ser realizada usando várias técnicas e abordagens, dependendo do objetivo do estudo. Nesse sentido, a avaliação de desempenho pode ser realizada por meio de modelos [95]. Para tal, selecionou-se um simulador de redes LTE-A heterogêneas em nível de sistema (*system-level*) para implementação da solução proposta. O cenário simulado utiliza apenas o enlace *downlink* para as avaliações, sob as especificações das redes LTE-A. Sendo assim, um ambiente de simulação no *software* MATLAB foi modelado com referência no trabalho em [29]. A Tabela 5.1 apresenta os principais parâmetros de simulação, os quais são baseados nos trabalhos descritos em [5, 96, 97].

Tabela 5.1: Parâmetros de simulação.

Antena por <i>site</i>	Omnidirecional $\times 1$
Densidade espectral de potência de ruído térmico	$-174$ dBm/Hz
Distância entre <i>macrocells</i>	1000 m
Dist. min. da <i>macrocell</i> p/ <i>picocell</i>	75 m
Dist. min. da <i>macrocell</i> p/ usuário	35 m
Dist. min. da <i>picocell</i> p/ usuário	10 m
$\epsilon$ ICIC $+( \beta )$	0.7
$\epsilon$ ICIC $+( \gamma )$	0.6
Ganho de antena	14 dBi
Geometria da célula	Hexagonal
Largura de banda	5 MHz
Modelo de tráfego	<i>Full buffer</i>
Número de <i>clusters</i>	7
<i>Penetration loss</i> (PenL)	10 dB
Perda de percurso da <i>macrocell</i> p/ usuário	$128.1 + 37.6 \log_{10} d$ , $d$ in km
Perda de percurso da <i>picocell</i> p/ usuário	$140.7 + 36.7 \log_{10} d$ , $d$ in km
Potência <i>macrocell</i> ( $P_t$ )	40 W
Potência <i>picocell</i> ( $P_t$ )	1 W
Valores CSB	$C := \{0, 3, 6, 9, 12, 15\}$ dB
Usuários	10 usuários por hexágono

A geometria da célula para o sistema LTE-A simulado é hexagonal, conforme visto na Seção 5.1.1. A distância *inter-macrocells* é igual a 1000 m, o que corresponde a uma rede LTE implantada em uma área urbana. Em cada célula, 25 RBs estão disponíveis, já que a largura de banda operacional é igual a 5 MHz. No entanto, o modelo de tráfego é o *full buffer*, ou seja, todos os RBs disponíveis são alocados permanentemente para os UEs ativos na rede.

Assume-se que há apenas uma *macrocell* localizada no centro de cada hexágono, e cada hexágono tem o mesmo número de *picocells*. Além disso, as distâncias entre usuários, *picocells* e *macrocells* são especificadas na Tabela 5.1, com os usuários posicionados a até 100 metros das *picocells* no mesmo hexágono<sup>1</sup>.

Admite-se que os usuários são estáticos. Além disso, cada PRB experimenta o desvanecimento de *Rayleigh* com a variância 1. O *shadow fading* de uma *macrocell* para um usuário é calculado adicionando primeiro um valor de sombreamento comum e um valor de sombreamento aleatório e dividindo a soma por  $\sqrt{2}$ , onde ambos os valores de sombreamento são gerados de acordo com a distribuição log-normal.

## 5.2 Apresentação e Análise de Resultados

A partir da topologia e dos parâmetros detalhados na seção anterior, realiza-se estudos de simulação em otimizações eICIC, eICIC+ e FeICIC, gerando-se aleatoriamente 10 topologias de *HetNets* e, em seguida, calcula-se a média dos indicadores de desempenho de todas as 10 topologias. No *cluster* central de cada topologia, um número de *picocells* (variando de 1 a 5) e de usuários (10) são colocados aleatoriamente dentro de cada hexágono.

Nesse contexto, implementa-se um escalonador de pacotes em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A baseado em Teoria dos Jogos, através do Jogo *Colonel Blotto*. Avalia-se o algoritmo proposto por meio de simulação computacional, comparando-o com algoritmos relevantes na literatura. Ademais, integra-se os algoritmos PF e RR descritos no Capítulo 4, que são escalonadores *downlink* que podem ser potenciais candidatos para a métrica  $\phi$ .

Além disso, avalia-se a extensão da otimização eICIC, através de um algoritmo distribuído que aprimore conjuntamente os padrões de ABS e os valores de CSB em redes LTE-A heterogêneas. Formula-se o problema como um Jogo Potencial Exato, adaptado de [25], por meio do uso de uma função de utilidade modificada, que inclui estatísticas baseadas no histórico de vazão do passado e de entrada de pesos ( $\beta$  e  $\gamma$ ), conforme descrito na Seção 4.4, chamada otimização eICIC+.

---

<sup>1</sup>Se existe  $p$  *picocells* onde  $p > 1$ , então os 10 usuários são divididos em  $p$  grupos, e um grupo de usuários é colocado aleatoriamente perto de uma *picocell*

Neste trabalho, assume-se que apenas as *macrocells* oferecem ABSs/RP-ABSs, enquanto as *picocells* sempre transmitem em todos os *subframes*. Tal suposição é razoável, pois:

- As *macrocells* têm muito mais potência de transmissão do que as *picocells*. Consequentemente, as *macrocells* são as principais fontes de interferência na rede.
- A complexidade da otimização eICIC, eICIC+ e FeICIC é reduzida em comparação à situação em que todas as estações oferecem ABSs/RP-ABSs.

A Tabela 5.2 mostra os possíveis padrões de ABSs disponíveis para uma *macrocell*. Por outro lado, assume-se que apenas as *picocells* podem definir seus valores de CSBs para alguns números positivos, enquanto as *macrocells* fixam seus valores de CSBs em zeros. Os valores de CSBs que uma *picocell* pode adotar, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.2: Padrões de ABSs que podem ser escolhidos por uma *macrocell*.

Taxa de ABS	Padrão de ABS									
0%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10%	■	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20%	■	1	2	3	4	■	6	7	8	9
30%	■	1	■	3	4	■	6	7	8	9
40%	■	1	■	3	4	■	6	■	8	9
50%	■	1	■	3	■	■	6	■	8	9
60%	■	1	■	3	■	■	6	■	8	■

non-ABS  
 ABS

### 5.2.1 Resultados de Simulação do Algoritmo Proposto para o Escalonamento de Pacotes Baseado no Jogo *Colonel Blotto*

Para avaliar o algoritmo proposto baseado no Jogo *Colonel Blotto*, utiliza-se uma análise de desempenho das técnicas de coordenação de interferência eICIC e FeICIC com um cenário sem coordenação de interferência, NULL.

Além disso, o algoritmo é comparado com os escalonadores PF e RR utilizando as métricas de eficiência energética, eficiência espectral e índice de justiça. Por fim, demonstra-se a utilidade global agregada do Jogo *Colonel Blotto* utilizando 200 iterações e prova-se que o algoritmo pode otimizar o problema de escalonamento de pacotes em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A.

## Eficiência Energética

A eficiência energética é calculada como o número de *bits* transmitidos dividido pela potência de transmissão. A Figura 5.2, a Figura 5.3 e a Figura 5.4 apresentam a eficiência energética de um cenário sem coordenação de interferência, do esquema eICIC e a otimização FeICIC, respectivamente, em função do número de *picocells*. O algoritmo proposto, baseado no Jogo *Colonel Blotto*, foi comparado com o desempenho dos algoritmos de escalonamento PF e RR.

A Figura 5.2 apresenta a eficiência energética para um cenário sem controle de coordenação de interferência. Nota-se um desempenho similar do algoritmo PF e o algoritmo proposto, o Jogo *Colonel Blotto*, com uma ligeira vantagem do algoritmo proposto, dependendo do número de *picocells* considerada.

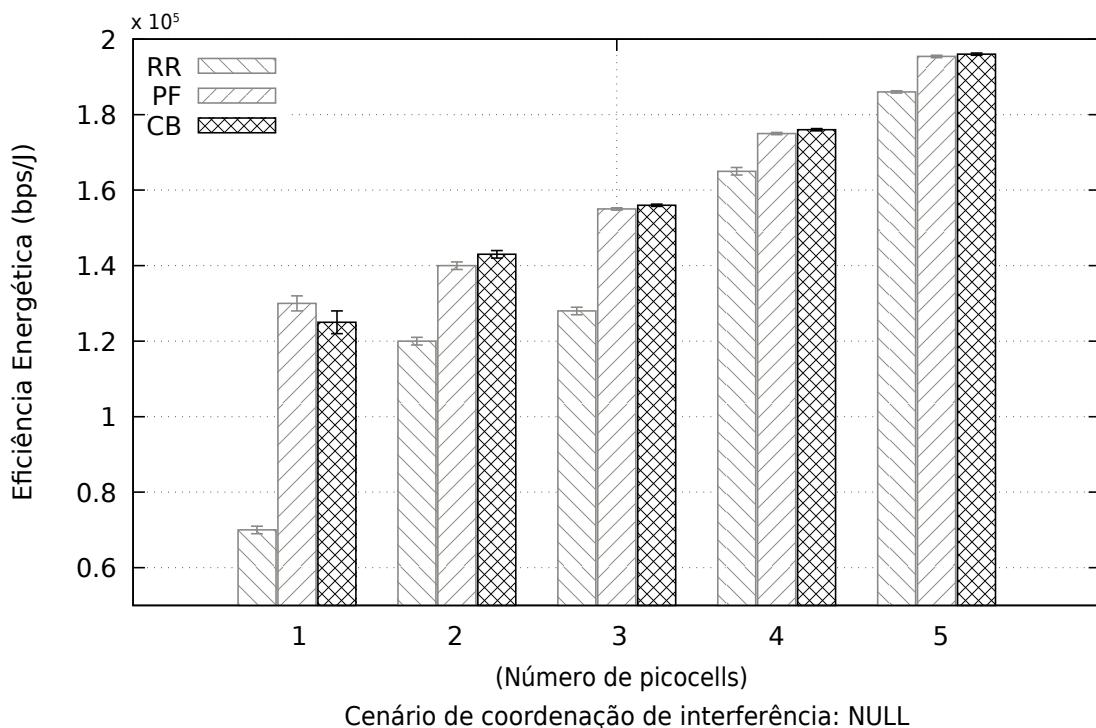


Figura 5.2: Cálculo da eficiência energética em função do número de *picocells* através dos escalonadores  $\Phi$  e utilizando um cenário sem coordenação de interferência, NULL.

A Figura 5.3 e a Figura 5.4 ilustram um cenário com coordenação de interferência, já a Figura 5.5 mostra o comportamento de todos os algoritmos e esquemas de coordenação de interferência para a métrica de eficiência energética. Nesses cenários, o Jogo *Colonel Blotto* consegue superar o desempenho do algoritmo PF a partir de duas *picocells* e, no cenário com 3 *picocells* utilizando a otimização eICIC, a proposta obtém 9% de melhoria. Finalmente, o Jogo *Colonel Blotto* supera os demais algoritmos em todos os cenários avaliados, sendo portanto, um escalonador apropriado para cenários que possuem um maior nível de densificação.

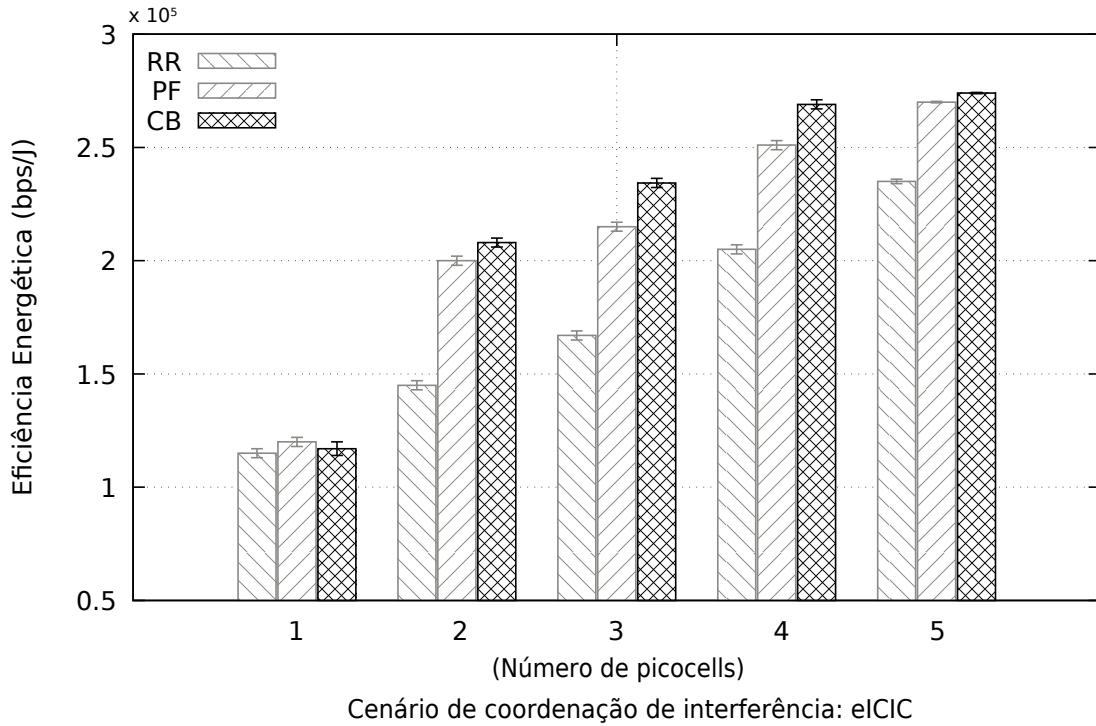


Figura 5.3: Cálculo da eficiência energética em função do número de *picocells* através dos escalonadores  $\Phi$  e utilizando a optimização eICIC.

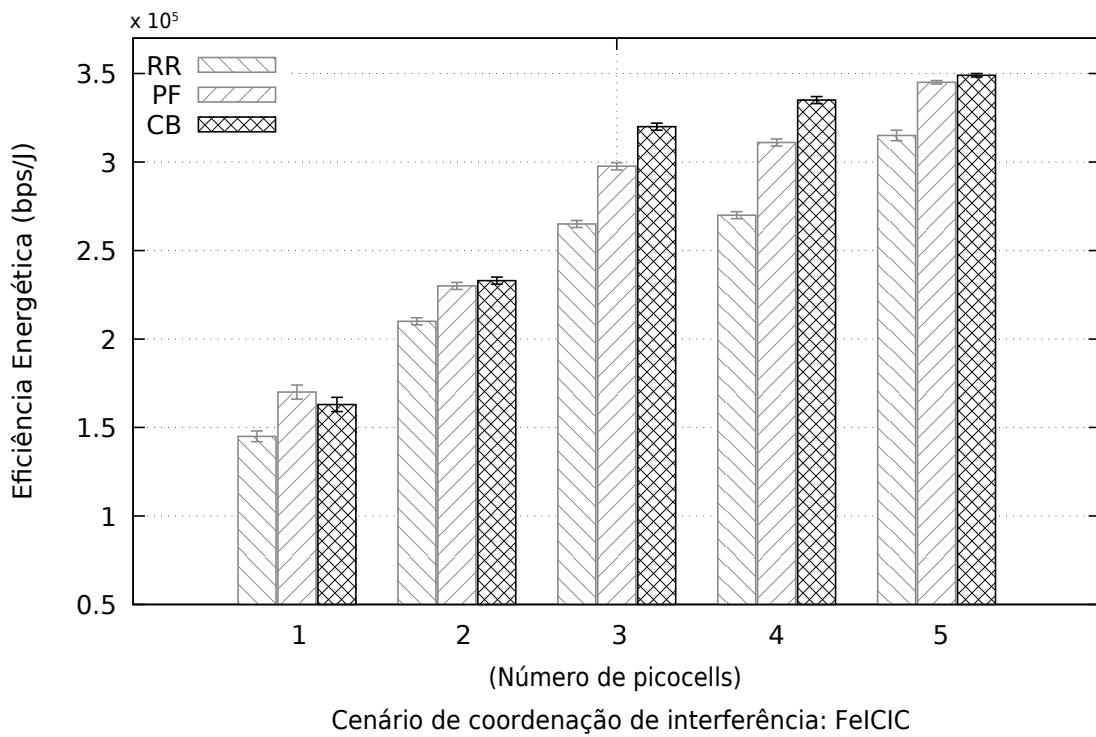


Figura 5.4: Cálculo da eficiência energética em função do número de *picocells* através dos escalonadores  $\Phi$  e utilizando a optimização FeICIC.

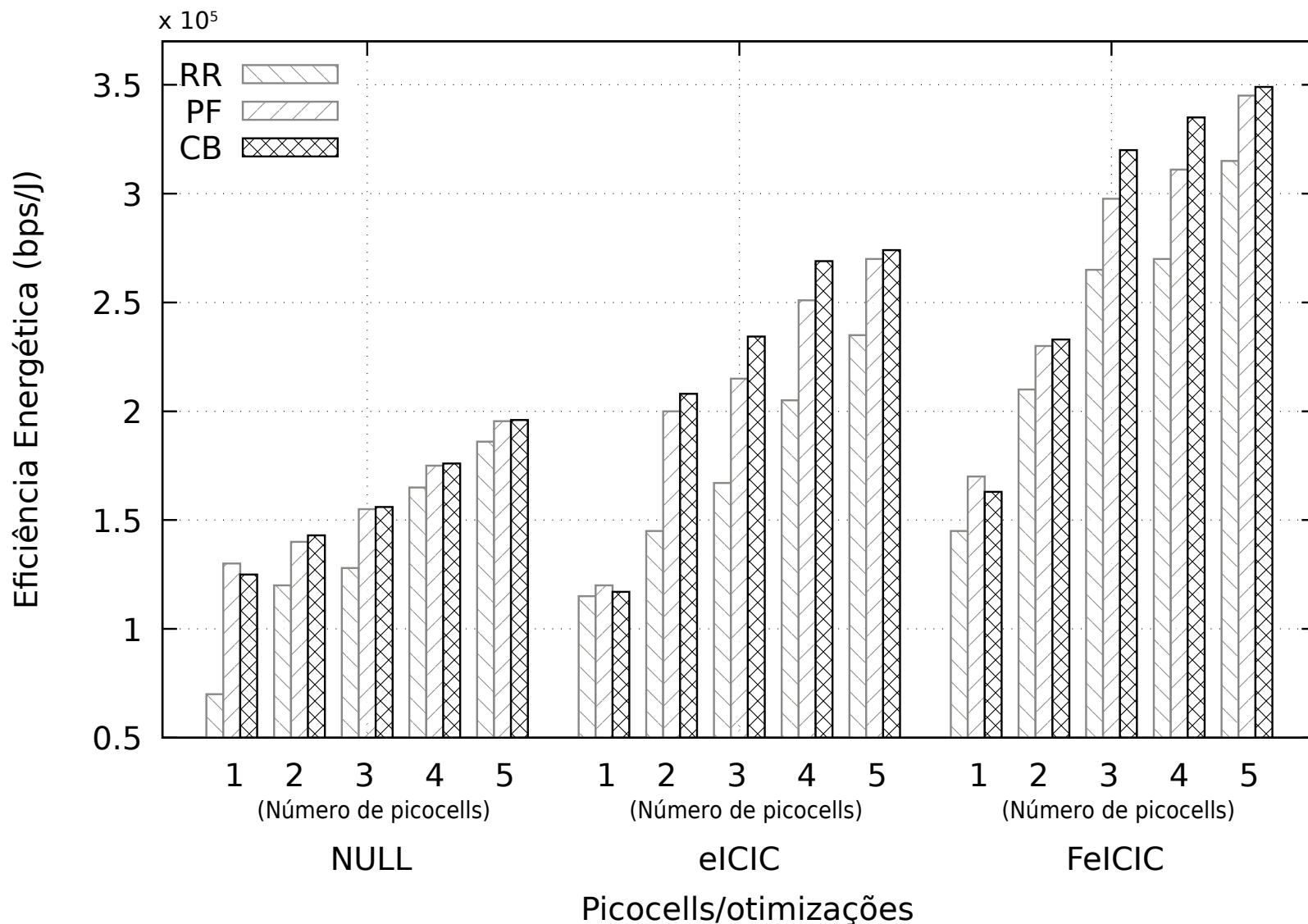


Figura 5.5: Cálculo da eficiência energética em função do número de *picocells* através dos escalonadores  $\Phi$  e utilizando as otimizações eICIC e FeICIC em relação a um cenário sem coordenação de interferência, NULL.

## Eficiência Espectral

A eficiência espectral é definida como a quantidade média de *bits* transmitidos por segundo por Hz (bps/Hz) de todos os PRBs alocados. A eficiência espectral, é avaliada nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, seguindo a mesma metodologia apresentada na Seção 5.2.1.

Novamente, observa-se um ganho de desempenho superior do Jogo *Colonel Blotto*, sendo destacado nos cenários que possuem coordenação de interferência, isto é, com as técnicas eICIC e FeICIC. Sendo assim, o algoritmo consegue obter ganhos de 10% da eficiência espectral quando utiliza-se a otimização eICIC em um cenário com 3 *picocells* em comparação com o algoritmo PF.

Um comportamento observado do algoritmo RR no gráfico em um cenário sem coordenação de interferência, é que ele mantém praticamente os mesmos resultados em todos os cenários, obviamente, ele possui os piores resultados. Por fim, o algoritmo proposto baseado no Jogo *Colonel Blotto* supera seus concorrentes em cenários de maior densificação para a métrica de eficiência espectral.

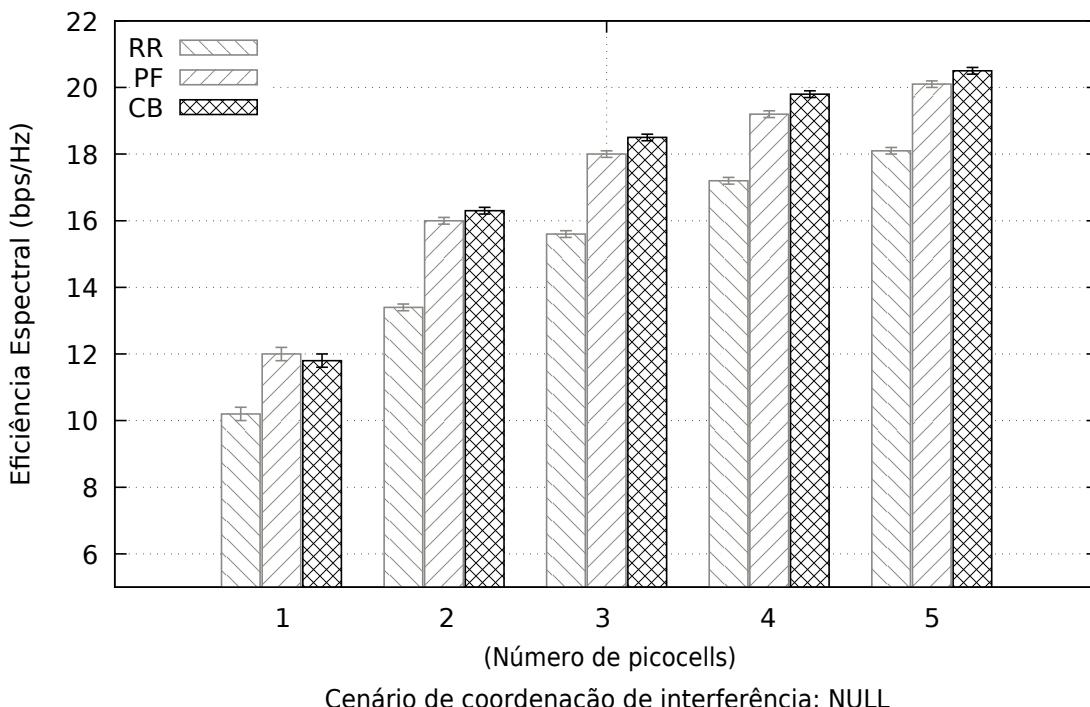


Figura 5.6: Cálculo da eficiência espectral em função do número de *picocells* através dos escalonadores  $\Phi$  e utilizando um cenário sem coordenação de interferência, NULL.

O cenário de coordenação de interferência é ilustrado nas Figuras 5.7 (eICIC) e 5.8 (FeICIC) para a métrica de eficiência espectral. Destaca-se o desempenho do Jogo *Colonel Blotto* em comparação com os demais algoritmos de escalonamentos em todos os cenários que possuem a coordenação de interferência. Consequentemente, o Jogo *Colonel Blotto* obterá melhores resultados na vazão.

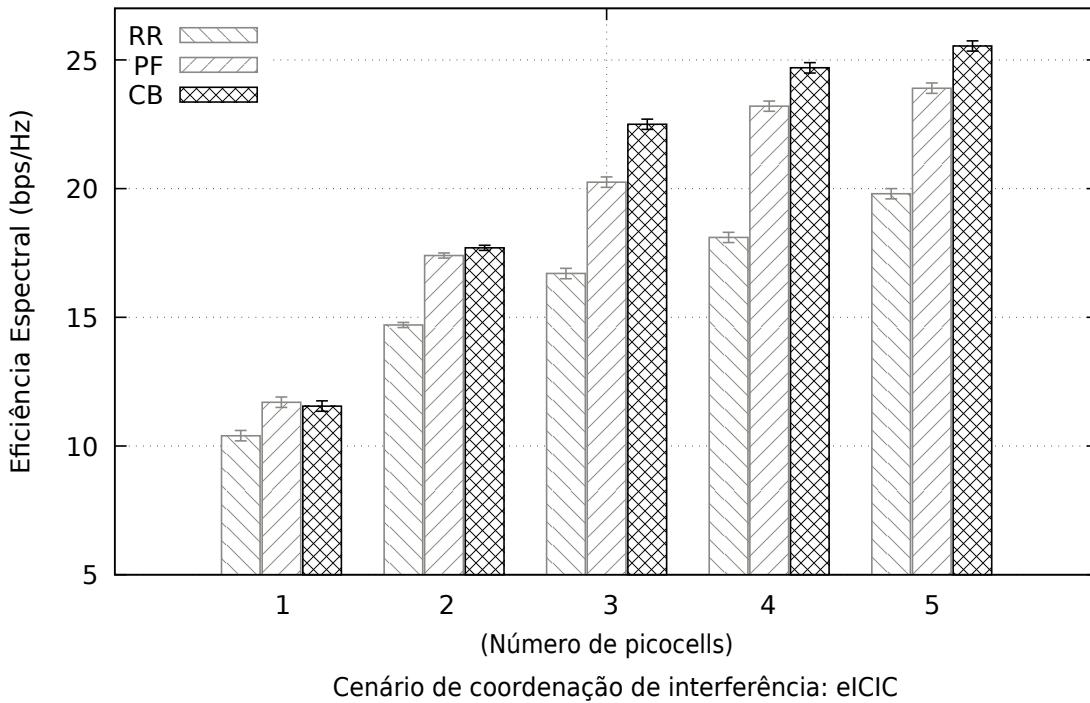


Figura 5.7: Cálculo da eficiência espectral em função do número de *picocells* através dos escalonadores  $\Phi$  e utilizando a otimização eICIC.

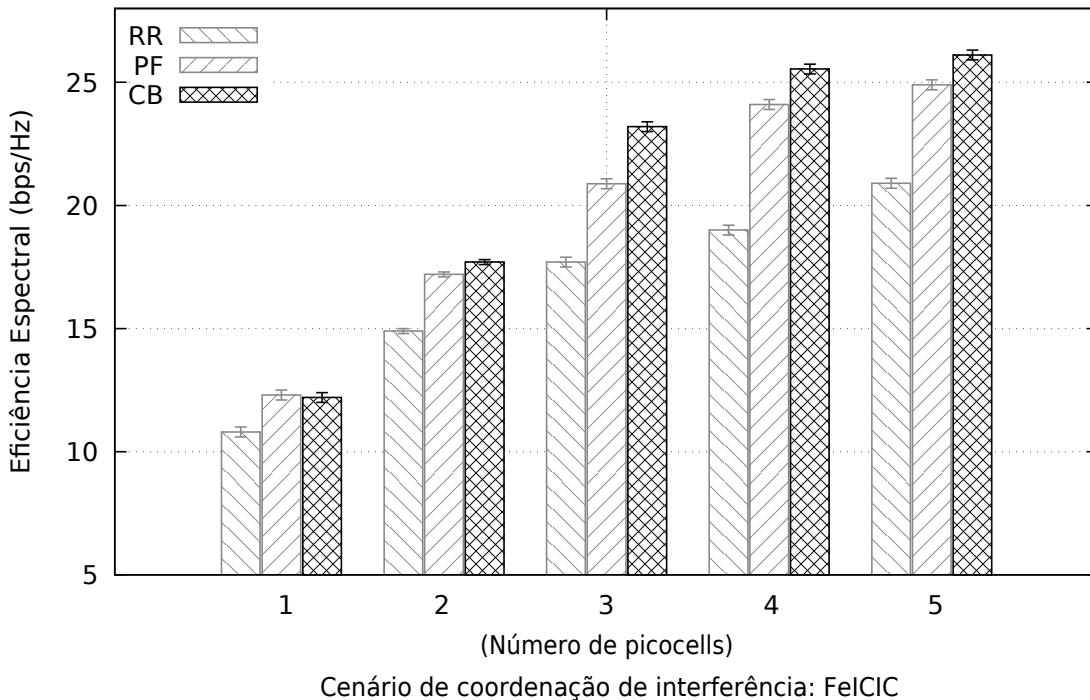


Figura 5.8: Cálculo da eficiência espectral em função do número de *picocells* através dos escalonadores  $\Phi$  e utilizando a otimização FeICIC.

A Figura 5.9 mostra o comportamento de todos os algoritmos e esquemas de coordenação de interferência para a métrica de eficiência espectral.

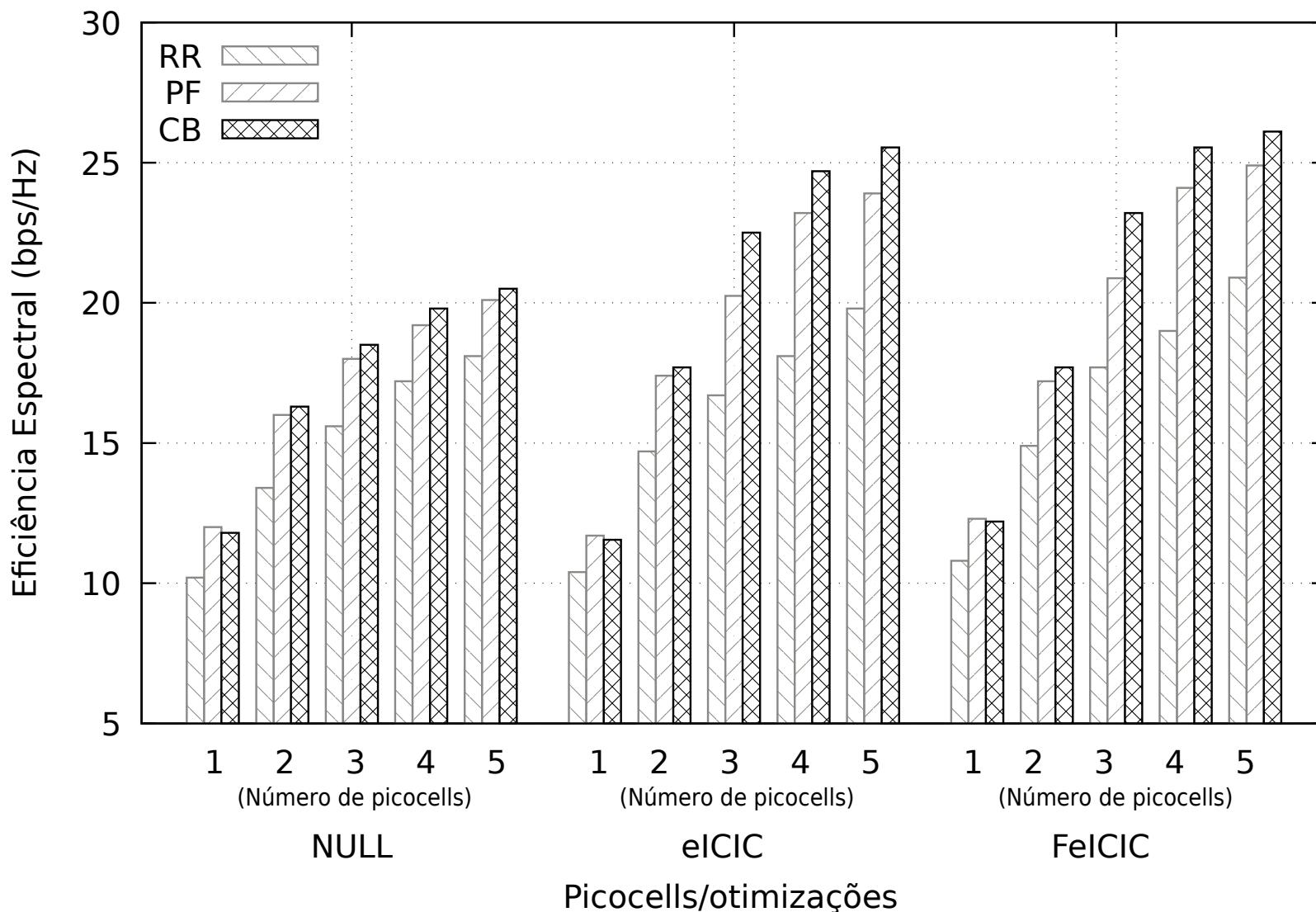


Figura 5.9: Cálculo da eficiência energética em função do número de *picocells* através dos escalonadores  $\Phi$  e utilizando as otimizações eICIC e FeICIC em relação a um cenário sem coordenação de interferência, NULL.

## Índice de Justiça

Embora os resultados do índice de justiça para os escalonadores PF e RR sejam bem próximos, como pode ser visto na Tabela 5.3, o algoritmo *Colonel Blotto* apresenta os maiores níveis de justiça em função do número de *picocells*. Nota-se ainda, que o índice de justiça é ampliado quando utiliza-se uma coordenação de interferência.

Tabela 5.3: Índice de justiça em função do número de *picocells* para usuários do *cluster* central configurado para vários tipos de topologias

<b><i>Picocells</i></b>	<b>Escalonadores</b>	<b>NULL</b>	<b>Otimização eICIC</b>	<b>Otimização FeICIC</b>
1	RR	43.44%	60.54%	60.88%
	PF	49.89%	61.04%	62.29%
	CB	51.15%	62.36%	63.14%
2	RR	32.21%	50.09%	48.56%
	PF	33.43%	50.04%	53.77%
	CB	33.85%	50.91%	54.94%
3	RR	29.32%	43.43%	42.78%
	PF	32.88%	43.99%	48.67%
	CB	33.08%	44.66%	50.83%
4	RR	27.09%	38.99%	39.02%
	PF	29.08%	41.66%	43.09%
	CB	31.75%	42.99%	43.75%
5	RR	25.76%	33.87%	32.32%
	PF	27.77%	37.55%	41.04%
	CB	28.95%	39.22%	42.09%

Além disso, observa-se que com o aumento do número de *picocells*, há uma diminuição do índice de justiça para todas as técnicas analizadas. Entretanto, em todos os cenários a utilização da FeICIC e do algoritmo *Colonel Blotto* resultaram em índices de justiça superiores aos da técnica eICIC e do cenário sem coordenação de interferência (*NULL*) com a utilização de outros algoritmos, que apresentaram os piores índices.

Por fim, o escalonador *Colonel Blotto* pode ser usado como um escalonador *downlink* para oferecer melhor eficiência energética, eficiência espectral e justiça entre os usuários em comparação aos escalonadores PF e RR. Destaca-se um ganho de desempenho de aproximadamente 10% na eficiência espectral e um ganho de 9% na eficiência energética.

## Utilidade Global Média do Algoritmo de Escalonamento Baseado no Jogo *Colonel Blotto*

A Figura 5.10 ilustra que a função valor segue uma estrutura exponencial, pois a função de utilidade também assume uma forma exponencial em termos da ação relativa dos jogadores em suas ações  $u$  e  $w$ . Se um dos jogadores dominar o outro com mais recursos iniciais, poderá ter o privilégio de jogar de forma agressiva e conquistar mais "recursos" ao longo do tempo. Por outro lado, um jogo inicial equilibrado faz com que os dois jogadores

gerenciem suas estratégias com mais cuidado para competir com os próximos jogadores nas próximas rodadas.

Em suma, a Figura 5.10 demonstra ainda a utilidade global agregada do Jogo *Colonel Blotto* utilizando 200 iterações e prova-se que o algoritmo pode otimizar o problema de escalonamento de pacotes em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A. Mostra-se ainda que utilidade global aumenta de acordo com as iterações e de acordo que o jogo está sendo conduzido em conformidade da função valor  $U_1(u, w)$ .

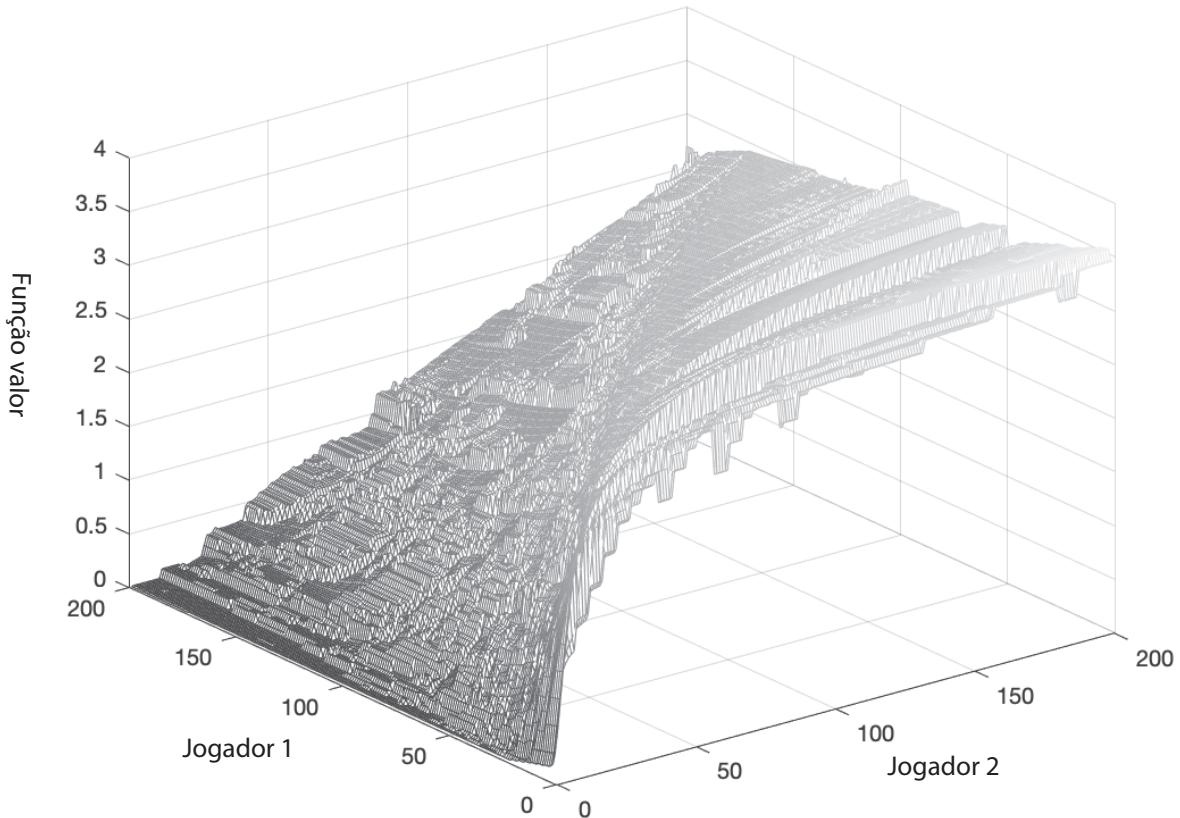


Figura 5.10: Ilustrativo da função valor para a utilidade global agregada  $U_1(u, w)$  do Jogo *Colonel Blotto*.

### Tempo Médio de Execução da Simulação para vários Algoritmos de Escalonamento *Downlink*

A Tabela 5.4 mostra o tempo médio de execução da simulação do MATLAB para cada *macrocell* utilizada para realizar o escalonamento *downlink* com diferentes tipos de escalonadores, onde presume-se que nenhuma *picocell* está presente, ou seja, não é utilizada nenhuma *picocell* no cenário de configuração e cada *macrocell* atende exatamente 10 usuários.

A versão do MATLAB é R2018a, e a simulação é realizada em um notebook equipado com CPU Quad Core Intel i7 2,2 GHz, com o sistema operacional macOS Catalina na versão 10.15.6 e memória de 16 GB 1600 MHz DDR3. Para o escalonador convexo, executa-se a função do MATLAB *"fmincon"* para os testes de execução de tempo. Observa-se que as decisões de escalonamento resultantes do escalonador convexo são semelhantes aos algoritmos baseados na Teoria dos Jogos, mas o tempo médio de execução do escalonador convexo é cerca de 20 vezes maior. Embora o escalonador PF e o escalonador RR funcionem mais menor do que o algoritmo de escalonamento proposto baseado no Jogo *Colonel Blotto*, o algoritmo *Colonel Blotto*, oferece melhor desempenho em termos de eficiência energética, eficiência espectral e justiça nas taxas alcançadas pelos usuários.

Por fim, destaca-se que o algoritmo proposto possui um tempo de execução de aproximadamente 27% mais rápido do que o algoritmo *Cake Cutting*, devido ao fato do algoritmo proposto ser baseado em um jogo mais simples. Conclui-se que o algoritmo proposto baseado no Jogo *Colonel Blotto* apresenta um tempo de execução bem inferior em comparação com os algoritmos de mesma complexidade.

Tabela 5.4: Comparação do Tempo Médio de Execução para vários Escalonadores *Down-link*

Escalonadores	Tempo Médio de Execução por <i>Macrocell</i>
Escalonador <i>Convex</i>	5.7326 segundos
<i>Cake Cutting</i> (CC)	0.3413 segundos
<i>Colonel Blotto</i> (CB)	0.2687 segundos
<i>Proportional Fair</i> (PF)	0.0041 segundos
<i>Round Robin</i> (RR)	0.0016 segundos

### 5.2.2 Resultados de Simulação do Algoritmo Proposto para o Gerenciamento de Interferência Baseado no Jogo Potencial Exato - Otimização eICIC+

Para as análises de resultados de simulação da otimização eICIC+, comparou-se as técnicas de eICIC, eICIC+ e um cenário sem coordenação de interferência, NULL, com o objetivo de analisar a otimização eICIC+. Além disso, foram avaliadas as métricas de eficiência energética, eficiência espectral, índice de justiça e vazão dos 5% piores usuários do *cluster* central.

#### Eficiência Energética

A eficiência energética é apresentada na Figura 5.11 e Figura 5.12, considerando os algoritmos de escalonamento PF e RR, respectivamente.

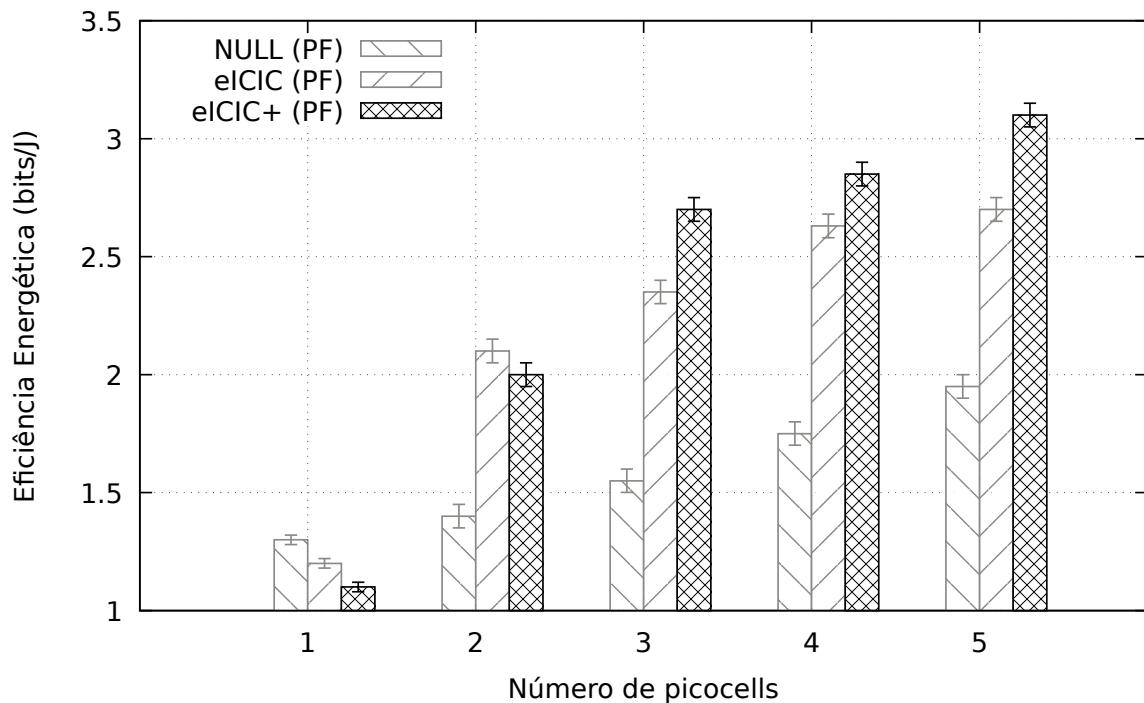


Figura 5.11: Cálculo da eficiência energética em função do número de *picocells* através do escalonador PF.

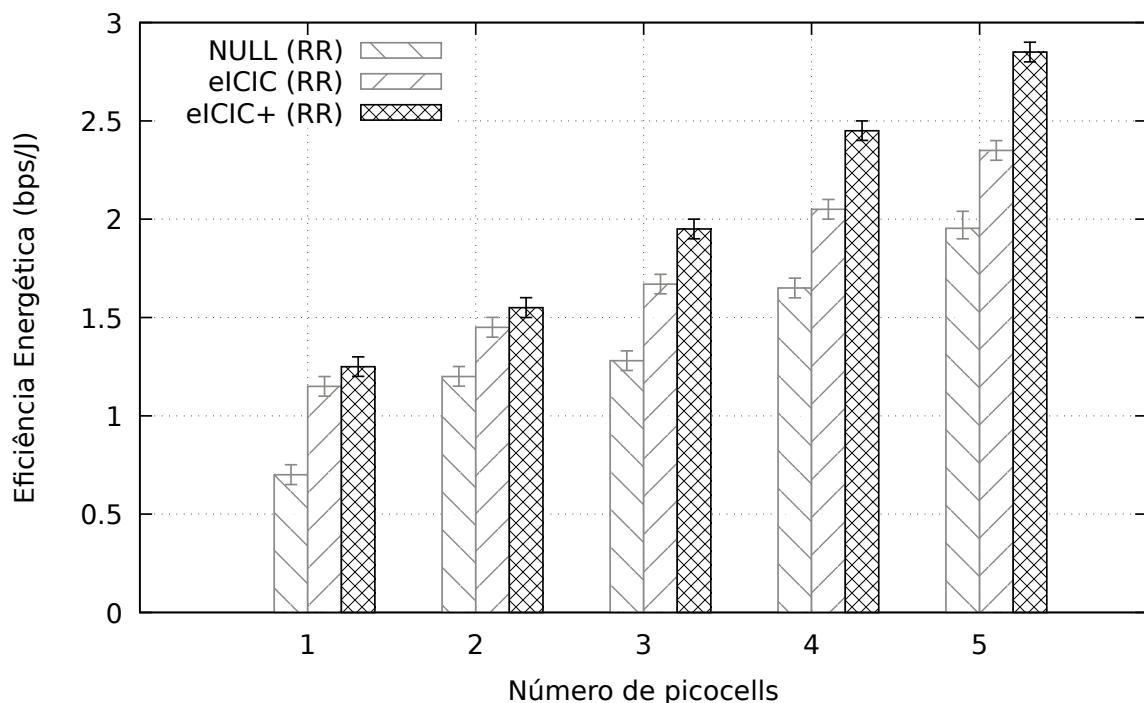


Figura 5.12: Cálculo da eficiência energética em função do número de *picocells* através do escalonador RR.

A utilização das técnicas de eICIC e eICIC+ resultaram em um aumento da eficiência energética em todos os cenários com a excessão do cenário com 1 *picocell* em conjunto com a utilização do algoritmo PF. De forma geral, nota-se que a estratégia eICIC+ obteve

resultados superiores ao da técnica eICIC, mostrando-se uma técnica mais adequada para a coordenação de interferência, principalmente com o aumento do número de *picocells*.

Uma vez que a densificação da rede é um elemento chave para aumentar a cobertura do sistema e atender a crescente demanda, a utilização de técnicas de coordenação de interferências, principalmente a eICIC+, permitiu melhorias na eficiência energética sendo, portanto, importante para reduzir a energia necessária para transmitir uma determinada quantidade de *bits*.

### Eficiência Espectral

Os resultados da eficiência espectral obtidos são mostrados nas Figura 5.13 e 5.14, considerando os algoritmos de escalonamento PF e RR, respectivamente. Observa-se que com o aumento de *picocells*, há uma melhora da eficiência espectral ao se utilizar as técnicas eICIC e eICIC+ em relação ao cenário sem coordenação de interferência. Assim, a técnica eICIC+ foi a que mais se destacou em termos de eficiência espectral para o cenário simulado, principalmente, em *HetNets* com maior nível de densificação. Além disso, destaca-se que a melhora da eficiência espectral foi mais significativa no cenário com a utilização do algoritmo de escalonamento PF.

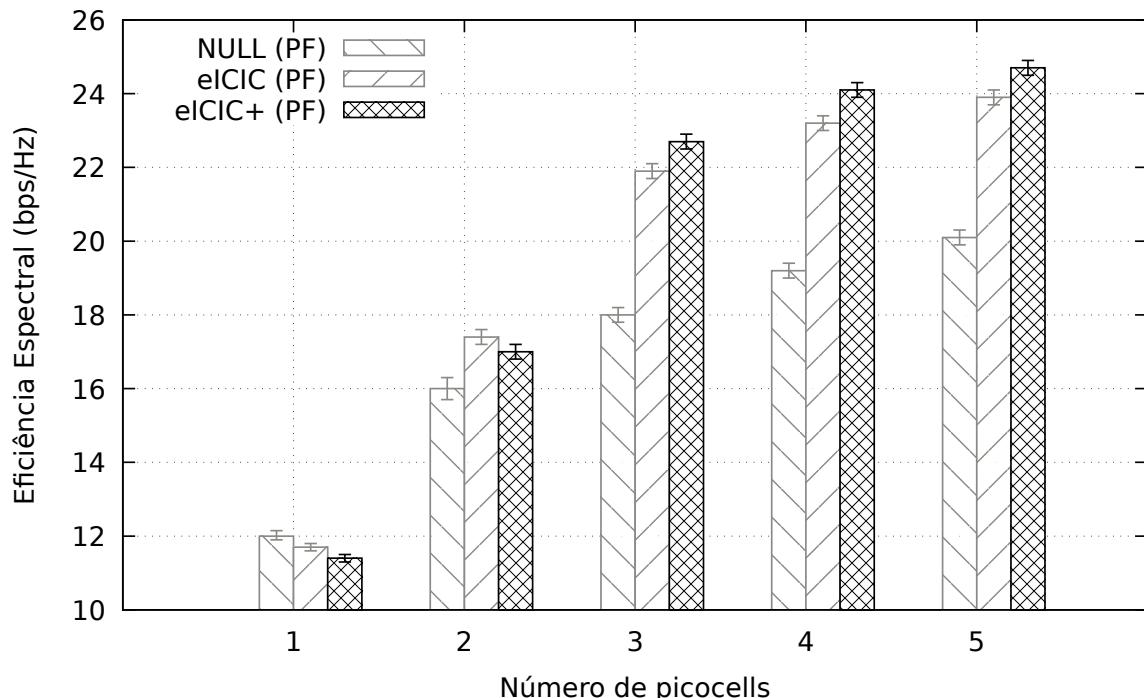


Figura 5.13: Cálculo da eficiência espectral em função do número de *picocells* através do escalonador PF.

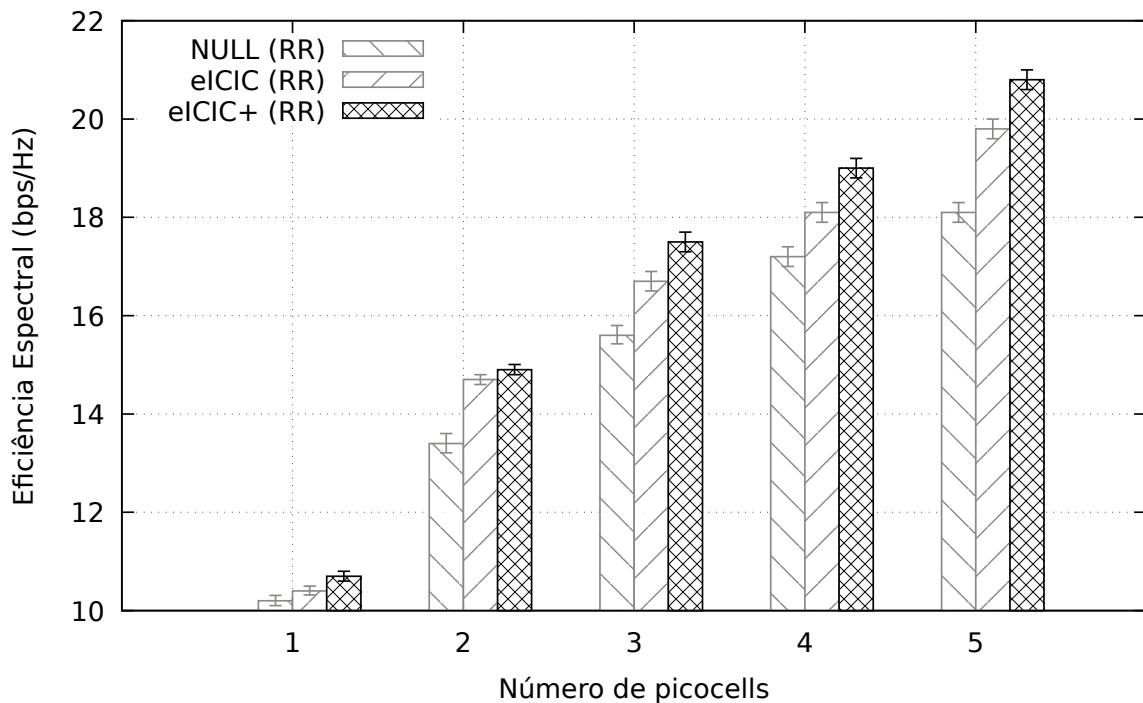


Figura 5.14: Cálculo da eficiência espectral em função do número de *picocells* através do escalonador RR.

### Índice de Justiça

Analisa-se as variações dos parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  utilizados na otimização eICIC+, conforme pode ser visto na Tabela 5.5. Essas variações foram realizadas, a fim de comprovar a eficácia da métrica  $\gamma$  na função de utilidade modificada da otimização eICIC, sendo portanto, utilizadas na função de utilidade da otimização eICIC+.

Tabela 5.5: Índice de justiça e taxa média do UE para a otimização eICIC+.

Parâmetros	Escalonadores	Otimização			
		eICIC	eICIC+	eICIC+ $\beta = 0.75$	eICIC+ $\gamma = 0.7$
Índice de Justiça	PF	0.6174	0.6543	0.6233	0.6577
	RR	0.6263	0.6891	0.6369	0.6899
Taxa Média do UE	PF	189.86	196.02	196.74	195.04
	RR	151.54	159.77	160.02	158.22

Como resultado, verificou-se que com o aumento de  $\beta$  (0.7 para 0.75) há uma tendência da diminuição do índice de justiça e um crescimento da taxa média do UE. Por outro lado, com o aumento do  $\gamma$  (0.6 para 0.7), observou-se um comportamento contrário ao cenário anterior. Assim, esses parâmetros podem ser ajustados quando se desejar otimizar alguma das medidas de desempenho.

## Vazão

Analisa-se a vazão dos 5% de usuários que tendem a apresentar os maiores níveis de interferência, isto é, estão na borda da célula no cluster central. A Figura 5.15 e Figura 5.16 mostram a *Cumulative Distribution Function* (CDF) da referida taxa, considerando os algoritmos de escalonamento PF e RR, respectivamente.

Através da configuração, onde os escalonadores são usados e cada hexágono possui uma *picocell*, a otimização eICIC obtém uma melhora da vazão dos 5% piores usuários no *cluster* central em torno de 10.89% (7.65%) e a otimização eICIC+ em torno de 16.54% (12%) considerando o algoritmo PF (RR).

O aumento da vazão é uma consequência da melhoria da eficiência espectral obtida pela técnica de eICIC+. Consequentemente, quando as operadoras de redes móveis buscam melhorar a vazão dos usuários na borda da célula, a otimização eICIC+ em conjunto com o algoritmo PF mostrou-se a técnica mais adequada para esses cenários.

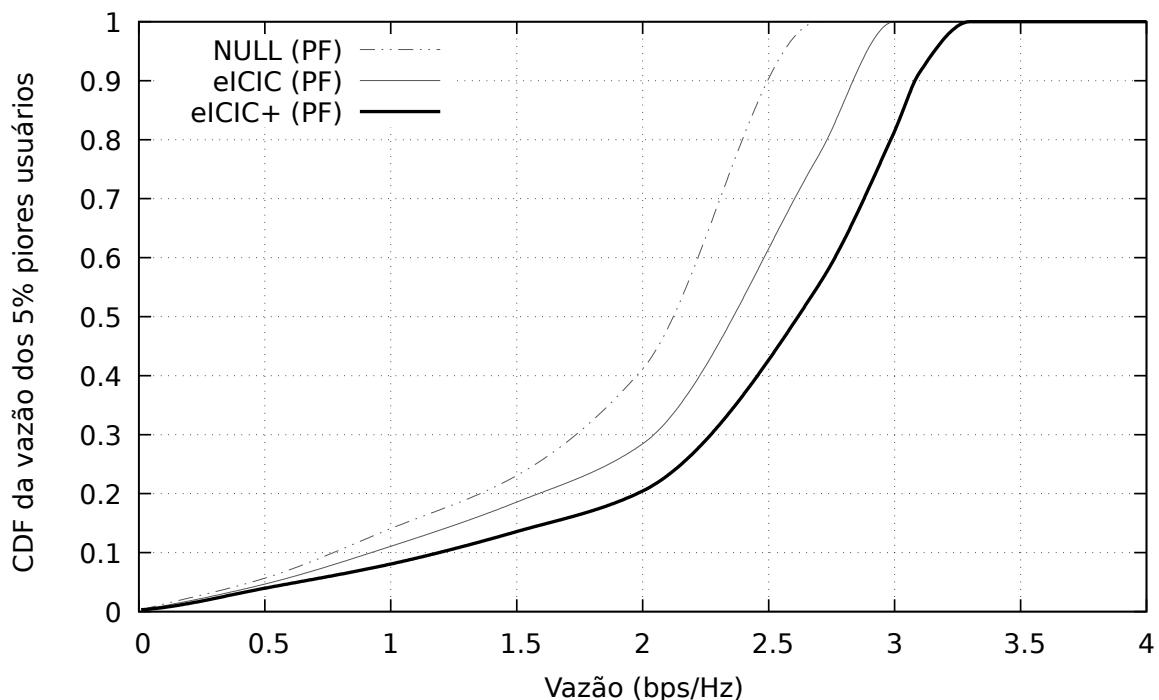


Figura 5.15: A *cumulative distribution function* (CDF) das taxas de vazão dos 5% piores usuários no *cluster* central, onde o escalonador PF é usado e cada hexágono possui uma *picocell*.

Para outras quantidades de *picocells*, as porcentagens de melhorias de vazão dos 5% piores usuários no *cluster* central são comparadas entre as otimizações eICIC e eICIC+ em relação a um cenário sem coordenação de interferência, NULL. A Tabela 5.6 contém os resultados obtidos.

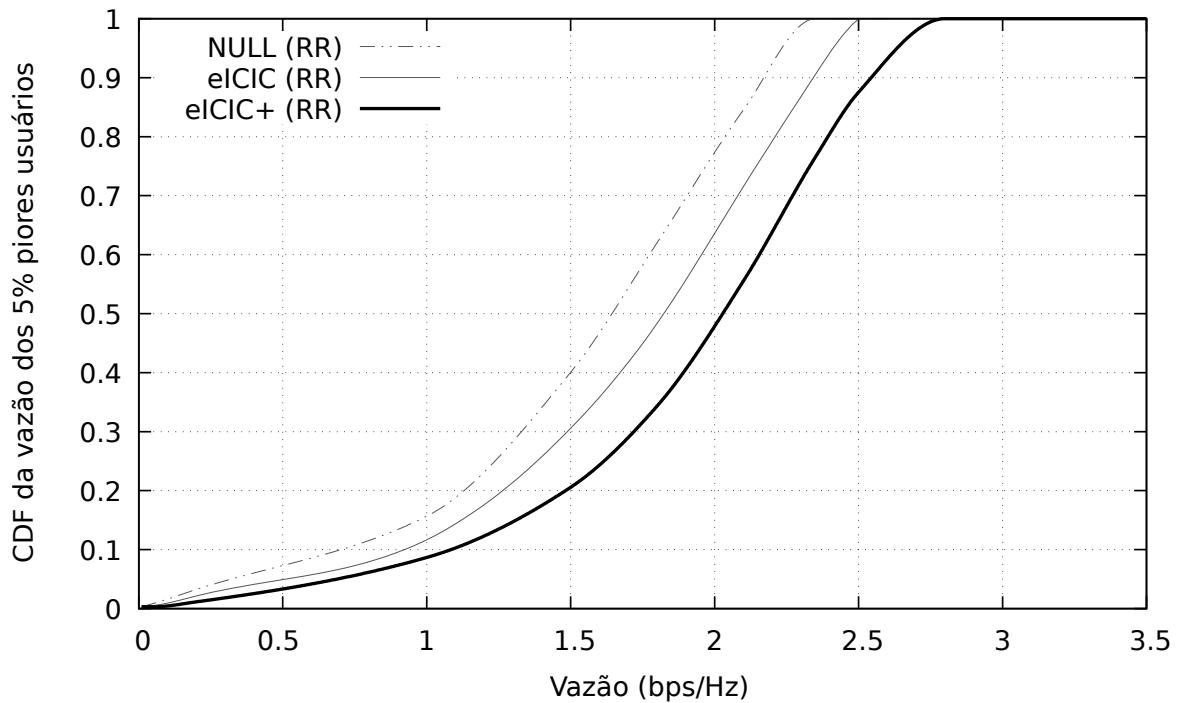


Figura 5.16: A *cumulative distribution function* (CDF) das taxas de vazão dos 5% piores usuários no *cluster* central, onde o escalonador RR é usado e cada hexágono possui uma *picocell*.

Tabela 5.6: Porcentagem de melhoria de vazão dos 5% piores usuários no *cluster* central em função do número de *picocells*.

<i>Picocells</i>	Escalonadores	Melhoria (%) da otimização eICIC	Melhoria (%) da otimização eICIC+
1	PF	27.25%	31.62%
	RR	13.05%	19.04%
2	PF	22.22%	25.92%
	RR	11.90%	17.87%
3	PF	17.63%	21.31%
	RR	11.88%	16%
4	PF	13.44%	19.03%
	RR	8.65%	14.77%
5	PF	10.89%	16.54%
	RR	7.65%	12%

É importante destacar que no cenário com uma *picocell*, embora o esquema eICIC+ nem sempre obteve resultados de eficiência espectral e eficiência energética melhores em relação ao eICIC, a taxa de throughput dos 5% piores usuários aumentou consideravelmente para ambos os algoritmos de escalonamento. Além disso, para as demais quantidades de *picocells* também observou-se para o esquema eICIC+ um acréscimo da taxa de vazão dos 5% piores usuários, mantendo a eficiência espectral e eficiência energética superior ao esquema eICIC, principalmente, quando se utilizou o algoritmo de escalonamento PF.

Outra observação que vale mencionar, é que a utilização do algoritmo de escalonamento PF sempre apresentou resultados superiores das estatísticas apresentadas, em relação ao algoritmo RR nos cenários analisados. Diante desse fato, destaca-se que a partir de duas *picocells* o percentual de melhoramento da taxa de vazão dos 5% piores usuários, promovida pelo esquema eICIC+ quando comparado ao eICIC, cresceu a medida que se aumentou o número de *picocells* devido a eficácia da métrica  $\gamma$  na otimização eICIC+. Assim, como a vazão dos usuários com os maiores níveis de interferência na célula é uma grande preocupação dos esquemas de coordenação de interferência, a utilização do esquema eICIC+ em conjunto com o algoritmo PF, baseado nos resultados obtidos, mostra-se uma configuração promissora.

### 5.3 Considerações sobre o Capítulo 5

Este Capítulo foi dedicado à avaliação de desempenho dos algoritmos propostos. Nesse sentido, a ferramenta MATLAB foi escolhida como o ambiente de simulação para conduzir a avaliação.

Os resultados de simulação demonstraram que o escalonador proposto baseado em Teoria dos Jogos, através do Jogo *Colonel Blotto*, pode alcançar um melhor desempenho em termos de eficiência energética, eficiência espectral e justiça, comparando-o com outros algoritmos relevantes na literatura.

Além disso, a otimização eICIC+ pode melhorar a eficiência espectral e eficiência energética, principalmente em cenários de maior densificação da rede. Adicionalmente, a eICIC+ pode gerar ganhos significativos na vazão de usuários localizados na borda da célula, que são os que enfrentam os maiores níveis de interferência. A integração da técnica eICIC+ com o algoritmo de escalonamento PF, mostrou-se uma boa opção nos cenários analisados.

*“Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé. Desde agora, a coroa da justiça me está guardada, a qual o Senhor, justo juiz, me dará.”*

- II Timóteo 4, 7-8

# 6

## Conclusões Gerais

A CRESCENTE DEMANDA por acesso a serviços de redes banda larga sem fio, assim como o crescimento exponencial de aplicativos móveis tem motivado as operadoras de redes móveis a escolher modelos de reutilização de frequência para melhorar a eficiência espectral.

Além disso, uma das estratégias para aumentar a capacidade do sistema é a densificação da rede através de estações de baixa potência dando origem às *HetNets*. Como consequência, surgem problemas de interferência inter-cellular que têm um impacto negativo na vazão do UE e no desempenho do sistema. As técnicas de ICIC são propostas para mitigar a ICI e para melhorar a vazão dos UEs sem reduzir a eficiência espectral.

No trabalho descrito nesta Tese foi apresentado um novo algoritmo de escalonamento de pacotes baseado no Jogo *Colonel Blotto*. Apesar da disponibilidade de algoritmos baseados na Teoria de Jogos para o escalonamento de pacotes, foi necessário criar novas estratégias para algumas das operações do algoritmo. Além do *problem max flow*, o algoritmo proposto considerou também o *price equilibrium problem* na alocação.

Ademais, utilizou-se o Jogo Potencial Exato para o desenvolvimento de uma proposta de extensão da otimização eICIC por meio do uso de uma função de utilidade modificada, chamada eICIC+, para o gerenciamento de interferência, ambos utilizados para as redes heterogêneas no *downlink* LTE-A.

Para avaliar o algoritmo proposto baseado no Jogo *Colonel Blotto*, utilizou-se uma análise de desempenho das seguintes técnicas de gerenciamento de interferência: eICIC e FeICIC com um cenário sem controle de interferência, NULL. Além disso, o algoritmo é comparado com os escalonadores PF e RR utilizando as métricas de eficiência energética, eficiência espectral e índice de justiça.

Para as análises de resultados de simulação da otimização eICIC+, comparou-se as técnicas de eICIC, eICIC+ e um cenário sem controle de interferência, NULL, com o objetivo de analisar a otimização eICIC+. Além disso, foram avaliadas as métricas de eficiência energética, eficiência espectral, índice de justiça e vazão.

Após avaliação por meio de simulação computacional, os resultados demonstraram que o algoritmo proposto baseado no Jogo *Colonel Blotto* pode alcançar um melhor desempenho em termos de eficiência energética, eficiência espectral e justiça. Conclui-se que de maneira geral, a proposta desenvolvida contribui para obter ganhos significativos de desempenho do sistema e que a integração da otimização FeICIC com o algoritmo de escalonamento *Colonel Blotto* mostrou-se uma boa opção nos cenários analisados.

Paralelamente, apresenta-se uma comparação de desempenho entre o método de gerenciamento de interferência eICIC e um cenário com a proposta de coordenação de interferência otimizada, eICIC+. Os resultados de simulação demonstraram que a otimização eICIC+ pode melhorar a eficiência espectral e eficiência energética, principalmente em cenários de maior densificação da rede. Adicionalmente, a eICIC+ pode gerar ganhos significativos na vazão de usuários localizados na borda da célula, que são os que enfrentam os maiores níveis de interferência. Por outro lado, a técnica eICIC+ manteve os melhores índices de justiça dos usuários.

Para a continuidade deste trabalho, poderá ser realizada uma análise de desempenho do algoritmo proposto baseado no Jogo *Colonel Blotto* em cenários de maior densificação, bem como em ambientes *ultra-dense network* (UDN), uma vez que a densificação da rede é um elemento chave para aumentar a cobertura do sistema e atender a crescente demanda. Acrescenta-se ainda, para o gerenciamento de interferência, a necessidade de um estudo utilizando a variação dos parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  visando otimizar o desempenho em uma *HetNet*.

*"Reanimai-vos e levantai as vossas cabeças;  
porque se aproxima a vossa libertação."*

- Lucas 21:28

## Referências Bibliográficas

- [1] Cisco, Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2018-2023, White Paper (2020).  
URL <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [2] Q. C. Li, H. Niu, A. T. Papathanassiou, G. Wu, 5g network capacity: Key elements and technologies, IEEE Vehicular Technology Magazine 9 (1) (2014) 71–78. doi: 10.1109/MVT.2013.2295070.
- [3] H. Holma, A. Toskala, LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced, New York, NY, USA: Wiley, 2012.
- [4] H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli, J. G. Andrews, Modeling and analysis of k-tier downlink heterogeneous cellular networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 30 (3) (2012) 550–560. doi:10.1109/JSAC.2012.120405.
- [5] N. Trabelsi, C. S. Chen, R. E. Azouzi, L. Roullet, E. Altman, User association and resource allocation optimization in lte cellular networks, IEEE Transactions on Network and Service Management 14 (2) (2017) 429–440. doi:10.1109/TNSM.2017.2677778.
- [6] D. Xiao, X. Yu, D. Yang, A novel downlink icic method based on user position in lte-advanced systems, in: 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012, pp. 1–5. doi:10.1109/VTCFall.2012.6399351.
- [7] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, P. Camarda, Downlink packet scheduling in lte cellular networks: Key design issues and a survey, IEEE Communications Surveys Tutorials 15 (2) (2013) 678–700. doi:10.1109/SURV.2012.060912.00100.
- [8] C. W. Sung, K. W. Shum, C. Y. Ng, Fair resource allocation for the gaussian broadcast channel with isi, IEEE Transactions on Communications 57 (5) (2009) 1381–1389. doi:10.1109/TCOMM.2009.070311.

- [9] X. Kang, R. Zhang, M. Motani, Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell networks: A stackelberg game approach, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 30 (3) (2012) 538–549. [doi:10.1109/JSAC.2012.120404](https://doi.org/10.1109/JSAC.2012.120404).
- [10] S. Bu, F. R. Yu, G. Senarath, Interference-aware energy-efficient resource allocation for heterogeneous networks with incomplete channel state information, in: 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013, pp. 6081–6085. [doi:10.1109/ICC.2013.6655575](https://doi.org/10.1109/ICC.2013.6655575).
- [11] Y. Wang, X. Wang, L. Wang, Low-complexity stackelberg game approach for energy-efficient resource allocation in heterogeneous networks, *IEEE Communications Letters* 18 (11) (2014) 2011–2014. [doi:10.1109/LCOMM.2014.2360183](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2014.2360183).
- [12] M. Hajimirsadeghi, G. Sridharan, W. Saad, N. B. Mandayam, Inter-network dynamic spectrum allocation via a colonel blotto game, in: 2016 Annual Conference on Information Science and Systems (CISS), 2016, pp. 252–257. [doi:10.1109/CISS.2016.7460510](https://doi.org/10.1109/CISS.2016.7460510).
- [13] M. Hajimirsadeghi, N. B. Mandayam, A dynamic colonel blotto game model for spectrum sharing in wireless networks, in: 2017 55th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), 2017, pp. 287–294. [doi:10.1109/ALLERTON.2017.8262750](https://doi.org/10.1109/ALLERTON.2017.8262750).
- [14] S. F. Chien, C. C. Zarakovitis, Q. Ni, P. Xiao, Stochastic asymmetric blotto game approach for wireless resource allocation strategies, *IEEE Transactions on Wireless Communications* 18 (12) (2019) 5511–5528. [doi:10.1109/TWC.2019.2936853](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2936853).
- [15] M. Min, L. Xiao, C. Xie, M. Hajimirsadeghi, N. B. Mandayam, Defense against advanced persistent threats in dynamic cloud storage: A colonel blotto game approach, *IEEE Internet of Things Journal* 5 (6) (2018) 4250–4261. [doi:10.1109/JIOT.2018.2844878](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844878).
- [16] M. Boujelben, S. B. Rejeb, S. Tabbane, A comparative study of interference coordination schemes for wireless mobile advanced systems, in: The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications, 2014, pp. 1–5. [doi:10.1109/SNCC.2014.6866529](https://doi.org/10.1109/SNCC.2014.6866529).
- [17] A. S. Hamza, S. S. Khalifa, H. S. Hamza, K. Elsayed, A survey on inter-cell interference coordination techniques in ofdma-based cellular networks, *IEEE Communications Surveys Tutorials* 15 (4) (2013) 1642–1670. [doi:10.1109/SURV.2013.013013.00028](https://doi.org/10.1109/SURV.2013.013013.00028).

- [18] S. Guruacharya, D. Niyato, D. I. Kim, E. Hossain, Hierarchical competition for down-link power allocation in ofdma femtocell networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications* 12 (4) (2013) 1543–1553. doi:10.1109/TWC.2013.022213.120016.
- [19] V. N. Ha, L. B. Le, Distributed base station association and power control for heterogeneous cellular networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 63 (1) (2014) 282–296. doi:10.1109/TVT.2013.2273503.
- [20] A. Tall, Z. Altman, E. Altman, Self organizing strategies for enhanced ICIC (eicic), CoRR abs/1401.2369. arXiv:1401.2369.  
URL <http://arxiv.org/abs/1401.2369>
- [21] S. Deb, P. Monogioudis, J. Miernik, J. P. Seymour, Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eicic) in lte hetnets, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 22 (1) (2014) 137–150. doi:10.1109/TNET.2013.2246820.
- [22] A. Bedekar, R. Agrawal, Optimal muting and load balancing for eicic, in: 2013 11th International Symposium and Workshops on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), 2013, pp. 280–287.
- [23] J. Pang, J. Wang, D. Wang, G. Shen, Q. Jiang, J. Liu, Optimized time-domain resource partitioning for enhanced inter-cell interference coordination in heterogeneous networks, in: 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012, pp. 1613–1617. doi:10.1109/WCNC.2012.6214040.
- [24] Y. Liu, C. S. Chen, C. W. Sung, Distributed enhanced inter-cell interference coordination (eicic) in lte-advanced hetnets: A potential game approach, in: 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015, pp. 1–5. doi:10.1109/VTCSpring.2015.7145784.
- [25] Y. Liu, C. S. Chen, C. W. Sung, Joint optimization on inter-cell interference management and user attachment in lte-a hetnets, in: 2015 13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), 2015, pp. 62–69. doi:10.1109/WIOPT.2015.7151054.
- [26] J. Moreira, E. da Silva, P. Guardiero, eicic optimization improvements in down-link resource allocation in lte-a hetnets, *Journal of Communication and Information Systems* 35 (1) (2020) 15–24. doi:10.14209/jcis.2020.2.
- [27] N. Trabelsi, L. Roullet, A. Feki, A generic framework for dynamic eicic optimization in lte heterogeneous networks, in: 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), 2014, pp. 1–6. doi:10.1109/VTCFall.2014.6965814.

- [28] K. Yao, Q. Wu, Y. Xu, J. Jing, Distributed abs-slot access in dense heterogeneous networks: A potential game approach with generalized interference model, *IEEE Access* 5 (2017) 94–104. doi:10.1109/ACCESS.2016.2614701.
- [29] Y. Liu, C. S. Chen, C. W. Sung, C. Singh, A game theoretic distributed algorithm for feicic optimization in lte-a hetnets, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 25 (6) (2017) 3500–3513. doi:10.1109/TNET.2017.2748567.
- [30] W. Shin, W. Noh, K. Jang, H. Choi, Hierarchical interference alignment for downlink heterogeneous networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications* 11 (12) (2012) 4549–4559. doi:10.1109/TWC.2012.101912.120421.
- [31] 3GPP, 3GPP TR 36814 V9.0.0 Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9) (2010).
- [32] E. Borel, The theory of play and integral equations with skew symmetric kernels, *Econometrica* 21 (1) (1953) 97–100. doi:10.2307/1906946.
- [33] G. Schwartz, P. Loiseau, S. S. Sastry, The heterogeneous colonel blotto game, in: 2014 7th International Conference on NETwork Games, COntrol and OPtimization (NetGCoop), 2014, pp. 232–238.
- [34] J. Duffy, A. Matros, Stochastic asymmetric blotto games: An experimental study, *Journal of Economic Behavior Organization* 139 (2017) 88 – 105. doi:10.1016/j.jebo.2017.05.005.
- [35] J. H. Reijnierse, J. A. M. Potters, On finding an envy-free pareto-optimal division, *Mathematical Programming* 83 (1) (1998) 291–311. doi:10.1007/BF02680564.
- [36] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Baar, A. Hjrungnes, *Game Theory in Wireless and Communication Networks: Theory, Models, and Applications*, 1st Edition, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2012.
- [37] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*, Wiley, 2012. doi:10.1002/9781119942825.
- [38] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, 1st Edition, Academic Press, 2018. doi:10.1016/B978-0-12-814323-0.00001-6.
- [39] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*, 3rd Edition, Academic Press, 2016.
- [40] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 2nd Edition, Academic Press, 2014.

- [41] T. Ali-Yahiya, Understanding LTE and Its Performance, Springer, 2011. doi:10.1007/978-1-4419-6457-1.
- [42] ITU-R, Recommendation M.687-2 International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) (1997).
- [43] D. Astely, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindström, S. Parkvall, Lte: the evolution of mobile broadband, *IEEE Communications Magazine* 47 (4) (2009) 44–51. doi:10.1109/MCOM.2009.4907406.
- [44] 3GPP, Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (2012).
- [45] A. Imran, A. Zoha, A. Abu-Dayya, Challenges in 5g: how to empower son with big data for enabling 5g, *IEEE Network* 28 (6) (2014) 27–33. doi:10.1109/MNET.2014.6963801.
- [46] Nokia, Looking ahead to 5G, White Paper (2014).  
URL [http://www.5gamericas.org/files/3614/3898/6583/Nokia\\_White\\_Paper\\_-\\_Looking\\_ahead\\_to\\_5G.pdf](http://www.5gamericas.org/files/3614/3898/6583/Nokia_White_Paper_-_Looking_ahead_to_5G.pdf)
- [47] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. Zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow, M. Sternad, R. Apelfröjd, T. Svensson, The role of small cells, coordinated multipoint, and massive mimo in 5g, *IEEE Communications Magazine* 52 (5) (2014) 44–51. doi:10.1109/MCOM.2014.6815892.
- [48] D. López-Pérez, M. Ding, H. Claussen, A. H. Jafari, Towards 1 gbps/ue in cellular systems: Understanding ultra-dense small cell deployments, *IEEE Communications Surveys Tutorials* 17 (4) (2015) 2078–2101. doi:10.1109/COMST.2015.2439636.
- [49] S. Ahmadi, 5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards, Elsevier Science, 2019.  
URL <https://books.google.com.br/books?id=N0hgtAEACAAJ>
- [50] A. Zaidi, F. Athley, J. Medbo, U. Gustavsson, G. Durisi, X. Chen, 5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components, 1st Edition, Academic Press, Inc., USA, 2018. doi:10.1016/B978-0-12-814578-4.00006-0.
- [51] S. A. (Auth.), LTE-Advanced. A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies, 1st Edition, Academic Press, 2014.  
URL <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=3517ad09bb486a4029b8d4d9b15959f7>

- [52] 3GPP, 3GPP TS 24.301, Technical Specification Group Core Network and Terminals; Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3 (Release 9), 3GPP (2011).
- [53] 3GPP, 3GPP TS 36.331 V15.3.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC) (2018).
- [54] 3GPP, 3GPP TS 36.323 V15.0.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification (2018).
- [55] 3GPP, 3GPP TS 36.322 V15.3.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification (2010).
- [56] 3GPP, 3GPP TS 36.321 V15.3.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (2009).
- [57] S. H. da Mata, A new genetic algorithm based scheduling algorithm for the lte uplink, Ph.D. thesis, Federal University of Uberlândia (2017).
- [58] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, LTE - the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, 2nd Edition, Wiley, 2011. [doi:10.1002/9780470978504](https://doi.org/10.1002/9780470978504).
- [59] S. Shenker, RFC 2212 – Specification of Guaranteed Quality of Service, Internet Engineering Task Force - IETF.
- [60] 3GPP, 3GPP TS 36.300 V14.3.0 LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (2017).
- [61] H. Ekstrom, Qos control in the 3gpp evolved packet system, IEEE Communications Magazine 47 (2) (2009) 76–83. [doi:10.1109/MCOM.2009.4785383](https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4785383).
- [62] 3GPP, 3GPP TS 23.203 V12.0.0 Policy and charging control architecture (2013).
- [63] M. Salah, Comparative Performance Study of LTE Uplink Schedulers, Master Thesis, Queen's University (2011).
- [64] M. Rumney, et al., LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges, John Wiley & Sons, 2013. [doi:10.1002/9781118799475](https://doi.org/10.1002/9781118799475).
- [65] H. Kim, K. Kim, Y. Han, S. Yun, A Proportional Fair Scheduling for Multicarrier Transmission Systems, in: Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th, Vol. 1, IEEE, 2004, pp. 409–413. [doi:10.1109/LCOMM.2005.03014](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2005.03014).
- [66] M. T. Kawser, H. M. A. B. Farid, A. R. Hasin, A. M. J. Sadik, I. K. Razu, Performance comparison between round robin and proportional fair scheduling methods

- for lte, in: International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 2, 2012, pp. 678–671. doi:10.7763/IJIEE.2012.V2.186.
- [67] M. S. Ali, An overview on interference management in 3gpp lte-advanced heterogeneous networks, in: International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2015, pp. 55–68. doi:10.14257/ijfgcn.2015.8.1.07.
- [68] 3GPP, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Mobility Enhancements in Heterogeneous Networks (Release 11) (2012).
- [69] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Başar, Game Theory for Next Generation Wireless and Communication Networks: Modeling, Analysis, and Design, Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108277402.
- [70] M. Felegyhazi, J. pierre Hubaux, Game theory in wireless networks: A tutorial (2006).  
URL <http://infoscience.epfl.ch/record/79715>
- [71] D. Fudenberg, J. Tirole, Game Theory, Mit Press, 1991.
- [72] R. Gibbons, A primer in game theory., Harvester Wheatsheaf, 1992.
- [73] O. Teyeb, V. Van Phan, B. Raaf, S. Redana, Dynamic relaying in 3gpp lte-advanced networks, EURASIP J. Wirel. Commun. Netw. 2009 (2009) 6:1–6:1. doi:10.1155/2009/731317.
- [74] O. Teyeb, V. V. Phan, B. Raaf, S. Redana, Handover framework for relay enhanced lte networks, in: 2009 IEEE International Conference on Communications Workshops, 2009, pp. 1–5. doi:10.1109/ICCW.2009.5208002.
- [75] S. L. de Freitas Maia, Estratégia de otimização de roteamento baseada em jogo bayesiano para redes tolerantes a atrasos e desconexões com restrição de energia, Ph.D. thesis, Federal University of Uberlândia (2015).
- [76] L. A. Dasilva, H. Bogucka, A. B. Mackenzie, Game theory in wireless networks, IEEE Communications Magazine 49 (8) (2011) 110–111. doi:10.2200/S00014ED1V01Y200508C0M001.
- [77] E. Altman, T. Boulogne, R. El-Azouzi, T. Jiménez, L. Wynter, A survey on networking games in telecommunications, Computers & Operations Research 33 (2) (2006) 286 – 311, game Theory: Numerical Methods and Applications. doi:10.1016/j.cor.2004.06.005.  
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054804001248>

- [78] A. A. Lazar, A. Orda, D. E. Pendarakis, Virtual path bandwidth allocation in multiuser networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 5 (6) (1997) 861–871. [doi:10.1109/90.650145](https://doi.org/10.1109/90.650145).
- [79] D. Niyato, E. Hossain, Radio resource management games in wireless networks: an approach to bandwidth allocation and admission control for polling service in ieee 802.16 [radio resource management and protocol engineering for ieee 802.16], *IEEE Wireless Communications* 14 (1) (2007) 27–35. [doi:10.1109/MWC.2007.314548](https://doi.org/10.1109/MWC.2007.314548).
- [80] H. Yaiche, R. R. Mazumdar, C. Rosenberg, A game theoretic framework for bandwidth allocation and pricing in broadband networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 8 (5) (2000) 667–678. [doi:10.1109/90.879352](https://doi.org/10.1109/90.879352).
- [81] M. Chiang, P. Hande, T. Lan, C. W. Tan, Power control in wireless cellular networks, *Found. Trends Netw.* 2 (4) (2008) 381–533. [doi:10.1561/1300000009](https://doi.org/10.1561/1300000009).
- [82] T. Alpcan, T. Basar, R. Srikant, E. Altman, Cdma uplink power control as a non-cooperative game, in: *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228)*, Vol. 1, 2001, pp. 197–202 vol.1. [doi:10.1109/CDC.2001.980097](https://doi.org/10.1109/CDC.2001.980097).
- [83] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, D. J. Goodman, Pricing and power control in a multicell wireless data network, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 19 (10) (2001) 1883–1892. [doi:10.1109/49.957304](https://doi.org/10.1109/49.957304).
- [84] R. Golman, S. E. Page, General blotto: Games of allocative strategic mismatch, *Public Choice* 138 (3/4) (2009) 279–299. [doi:10.1007/s11127-008-9359-x](https://doi.org/10.1007/s11127-008-9359-x).
- [85] B. Roberson, The colonel blotto game, *Economic Theory* 29 (1) (2006) 1–24. [doi:10.1007/s00199-005-0071-5](https://doi.org/10.1007/s00199-005-0071-5).
- [86] O. Gross, R. Wagner, A continuous Colonel Blotto game, *Rand Project Air Force Santa Monica, CA, Tech. Rep.*, 1950.
- [87] T. Basar, Control and game-theoretic tools for communication networks, *Applied and Computational Mathematics* 6 (2007) 22.
- [88] Q. Wei, D. Liu, Q. Lin, R. Song, Adaptive dynamic programming for discrete-time zero-sum games, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 29 (4) (2018) 957–969. [doi:10.1109/TNNLS.2016.2638863](https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2638863).
- [89] M. Pachter, K. Pham, Discrete-time linear-quadratic dynamic games, *Journal of Optimization Theory and Applications* 146 (2010) 151–179. [doi:10.1007/s10957-010-9661-x](https://doi.org/10.1007/s10957-010-9661-x).

- [90] S. Boyd, L. Vandenberghe, Convex Optimization, Cambridge University Press, 2004.  
[doi:10.1017/CBO9780511804441](https://doi.org/10.1017/CBO9780511804441).
- [91] D. Gale, The Theory of Linear Economic Models, University of Chicago Press, 1989.
- [92] L. R. Ford, D. R. Fulkerson, Maximal Flow Through a Network, Can. J. Math, 1956.  
[doi:10.1007/978-0-8176-4842-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4842-8_15).
- [93] D. Monderer, L. S. Shapley, Potential games, Games and Economic Behavior 14 (1) (1996) 124 – 143. [doi:10.1006/game.1996.0044](https://doi.org/10.1006/game.1996.0044).
- [94] A. B. MacKenzie, L. A. DaSilva, Game Theory for Wireless Engineers (Synthesis Lectures on Communications), Morgan & Claypool Publishers, 2006.
- [95] T. Issariyakul, E. Hossain, Introduction to Network Simulator NS2, 1st Edition, Springer, 2009. [doi:10.1007/978-0-387-71760-9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-71760-9).
- [96] J. Moreira, E. Silva, P. Guardieiro, Técnicas de coordenação de interferência intercelular para redes heterogêneas no downlink lte-a, in: Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, SBC, Porto Alegre, RS, Brasil, 2019, pp. 890–903. [doi:10.5753/sbrc.2019.7410](https://doi.org/10.5753/sbrc.2019.7410).
- [97] M. Yassin, M. A. AboulHassan, S. Lahoud, M. Ibrahim, D. Mezher, B. Cousin, E. A. Sourour, Survey of icic techniques in lte networks under various mobile environment parameters, Wireless Networks 23 (2) (2017) 403–418. [doi:10.1007/s11276-015-1165-z](https://doi.org/10.1007/s11276-015-1165-z).