

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAONI EXALTAÇÃO MASSON

ANÁLISE DE ESCALONADORES BASEADOS NO PROPORTIONAL FAIR E
TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA INTERCELULAR NO
DOWNLINK LTE-A PARA REDES HETEROGÊNEAS

UBERLÂNDIA
2023

RAONI EXALTAÇÃO MASSON

ANÁLISE DE ESCALONADORES BASEADOS NO PROPORTIONAL FAIR E
TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA INTERCELULAR NO
DOWNLINK LTE-A PARA REDES HETEROGÊNEAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Éderson Rosa da Silva

UBERLÂNDIA
2023

RESUMO

As redes LTE (*Long-Term Evolution*) têm desempenhado um papel fundamental na evolução das comunicações móveis, pois foi uma tecnologia projetada para fornecer eficiência espectral aprimorada, maior *throughput* e menor latência em comparação com as gerações anteriores de redes móveis. À medida que o tráfego de dados aumenta e as áreas de cobertura precisam ser estendidas, surgem desafios para manter a qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) e o desempenho das redes LTE. Uma solução para esses desafios é a implantação de redes heterogêneas. Redes heterogêneas utilizam-se da combinação de diferentes tipos de células, como *macrocells*, *picocells* e *femtocells*, para melhorar a capacidade e o desempenho da rede. Isso permite que os usuários se beneficiem de uma experiência de rede mais consistente e de maior qualidade. No entanto, devido ao aumento do reuso de frequência através da densificação da rede, a implantação de redes heterogêneas introduz novos desafios, como a interferência entre as células. Para amenizar este problema, utiliza-se as técnicas de coordenação de interferência como eICIC (*enhanced Inter-Cell Interference Coordination*) e FeICIC (*Fractional Frequency Reuse Enhanced Inter-Cell Interference Coordination*). Tais técnicas permitem uma coordenação mais eficaz, reduzindo a interferência entre células adjacentes. Em conjunto com tais técnicas ICIC (*Inter-Cell Interference Coordination*) utiliza-se os escalonadores como o PF (*Proportional Fair*) e o GPF (*Generic Proportional Fair*) em busca de otimizar a alocação de recursos das redes LTE, resultando em uma maior eficiência espectral e energética, e gerando assim, uma melhoria significativa na qualidade do sinal e maior justiça no *throughput* entregue pela rede. Deste modo, este trabalho propõe um estudo comparativo através de simulações de redes heterogêneas, sem e com a utilização de técnicas ICIC e utilizando-se de variações do algoritmo de escalonamento PF em cenários de densificação da rede celular.

ABSTRACT

LTE (Long-Term Evolution) networks have played a key role in the evolution of mobile communications as it was a technology designed to provide improved spectral efficiency, higher throughput and lower latency compared to previous generations of mobile networks. As data traffic increases and coverage areas need to be extended, challenges arise in maintaining the Quality of Service (QoS) and performance of LTE networks. One solution to these challenges is the deployment of heterogeneous networks. Heterogeneous networks use the combination of different cell types, such as macrocells, picocells and femtocells, to improve network capacity and performance. This allows users to benefit from a more consistent and higher quality network experience. However, due to increased frequency reuse through network densification, the deployment of heterogeneous networks introduces new challenges, such as interference between cells. To alleviate this problem, interference coordination techniques such as eICIC (enhanced Inter-Cell Interference Coordination) and FeICIC (Fractional Frequency Reuse Enhanced Inter-Cell Interference Coordination) are used. Such techniques allow for more effective coordination, reducing interference between adjacent cells. In conjunction with ICIC (Inter-Cell Interference Coordination) techniques, schedulers such as PF (Proportional Fair) and GPF (Generic Proportional Fair) are used in order to optimize the allocation of resources in LTE networks, resulting in greater spectral and energy efficiency, thus generating a significant improvement in signal quality and greater fairness in the throughput delivered by the network. Thus, this work proposes a comparative study through simulations of heterogeneous networks, without and with the use of ICIC techniques and using variations of the PF scheduling algorithm in cellular network densification scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de cluster celular com reuse factor 7.....	20
Figura 2 - Arquitetura de acesso e CORE de uma rede GPRS.....	22
Figura 3 - Arquitetura de acesso e CORE de uma rede UMTS.....	26
Figura 4 - Roadmap - evolução redes LTE.....	29
Figura 5 - Arquitetura e interfaces de uma rede LTE.....	30
Figura 6 - Ilustração das técnicas de OFDMA e SC-OFDMA.....	33
Figura 7 - Estrutura de frames de um sistema LTE FDD.....	34
Figura 8 - Cenários diferentes de agregação de portadoras LTE.....	35
Figura 9 - Cobertura e agregação de portadora em diferentes bandas de frequência LTE.....	36
Figura 10 - Ilustração dos métodos de MIMO.....	37
Figura 11 - Representação de beamforming, diversidade de transmissão e espacial para técnicas de MIMO.....	38
Figura 12 - Representações e comparação de modelos de estudo (a), redes reais (b) e modelos randômicos (c) de redes LTE HetNets.....	41
Figura 13 - Ilustração de modelos de reuso de frequência.....	44
Figura 14 - Ilustração da aplicação do <i>Cell Range Extension</i>	45
Figura 15 - Ilustração do funcionamento da técnica de Almost Blank Subframe.....	46
Figura 16 - Comparação do funcionamento das técnicas de ABS e RP-ABS.....	47

Figura 17 - Representação de construção do ambiente de simulação para alocação de usuários e <i>picocells</i> .	59
Figura 18 - Representação da topologia de rede gerada pelo código do MATLAB.....	59
Figura 19 - Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 1 o número de picocells.....	62
Figura 20- Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 2 o número de picocells.....	63
Figura 21 - Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 3 o número de picocells.....	64
Figura 22 - Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 4 o número de picocells.....	65
Figura 23 - Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de picocells e fixando em 10 o número de usuários.....	66
Figura 24 - Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de picocells e fixando em 15 o número de usuários.....	67
Figura 25 - Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de picocells e fixando em 20 o número de usuários.....	68
Figura 26 - Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 1 o número de picocells.....	70
Figura 27 - Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 2 o número de picocells.....	71
Figura 28 - Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 3 o número de picocells.....	72
Figura 29 - Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de	73

usuários e fixando em 4 o número de picocells.....	
Figura 30 - Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de picocells e fixando em 10 o número de usuários.....	74
Figura 31 - Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de picocells e fixando em 15 o número de usuários.....	75
Figura 32 - Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de picocells e fixando em 20 o número de usuários.....	76
Figura 33 - Índice de justiça variando a quantidade de picocells e fixando em 20 o número de usuários.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais propostas da tecnologia do 3G aceitas pelo ITU....	24
Tabela 2 -	Requisitos mínimos da tecnologia para o LTE-Advanced.....	28
Tabela 3 -	Parâmetros utilizados para construção das topologias e simulação no MATLAB.....	58
Tabela 4 -	Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 1 o número de <i>picocells</i>	62
Tabela 5 -	Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 2 o número de <i>picocells</i>	63
Tabela 6 -	Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 3 o número de <i>picocells</i>	64
Tabela 7 -	Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 4 o número de <i>picocells</i>	65
Tabela 8 -	Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de <i>picocells</i> e fixando em 10 o número de usuários.....	66
Tabela 9 -	Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de <i>picocells</i> e fixando em 15 o número de usuários.....	67
Tabela 10 -	Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de <i>picocells</i> e fixando em 20 o número de usuários.....	68
Tabela 11 -	Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 1 o número de <i>picocells</i>	70
Tabela 12 -	Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 2 o número de <i>picocells</i>	71
Tabela 13 -	Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz)	72

	variando-se a quantidade de usuários e fixando em 3 o número de <i>picocells</i>	
Tabela 14 -	Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 4 o número de <i>picocells</i>	73
Tabela 15 -	Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de <i>picocells</i> e fixando em 10 o número de usuários.....	74
Tabela 16 -	Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de <i>picocells</i> e fixando em 15 o número de usuários.....	75
Tabela 17 -	Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de <i>picocells</i> e fixando em 20 o número de usuários.....	76
Tabela 18 -	Valores obtidos para índice de justiça variando-se a quantidade de <i>picocells</i> e fixando em 20 o número de usuários.....	77

ABREVIATURAS

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
ABS	<i>Almost Blank Subframe</i>
AMC	<i>Adaptative Modulation and Coding</i>
AMPF	<i>Arithmetic Mean Proportional Fair</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
APN	<i>Access Point Name</i>
AuC	<i>Authentication Center</i>
BET	<i>Blind Equal Throughput</i>
BS	<i>Base Station</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CC	<i>Cake-Cutting</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CoMP	<i>Coordinated Multi-Point</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CRE	<i>Cell Range Expansion</i>
CRS	<i>Cell Specific Reference Signals</i>
CS	<i>Circuit Switched</i>
CSB	<i>Cell Selection Bias</i>
D2D	<i>Device to Device</i>
DL	<i>Downlink</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</i>
eICIC	<i>enhanced Inter-cell Interference Coordination</i>

eNB	<i>evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FeICIC	<i>Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination</i>
FFR	<i>Fractional Frequency Reuse</i>
FM	<i>Frequency Multiplexing</i>
GERAN	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Nodes</i>
GPF	<i>Generic Proportional Fair</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GUTI	<i>Globally Unique Temporary Identifier</i>
HetNet	<i>Heterogeneous Network</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HSUPA	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
ICI	<i>Inter-Cell Interference</i>
ICIC	<i>Inter-Cell Interference Coordination</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IMT-2000	<i>International Mobile Telecommunications-2000</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv4	<i>Internet Protocol version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
IS-95	<i>Interim Standard 95</i>
IS-136	<i>Interim Standard 136</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution-Advanced</i>

M2M	<i>Machine to Machine</i>
MFMPF	<i>Midrange Fair Mean Method Proportional Fair</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MGW	<i>Media Gateway</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MNO	<i>Mobile Network Operators</i>
MS	<i>Mobile System</i>
MSC	<i>Mobile Switching Center</i>
MT	<i>Maximum Throughput</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PCU	<i>Packet Control Unit</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PDC	<i>Personal Digital Cellular</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PF	<i>Proportional Fair</i>
PFR	<i>Partial Frequency Reuse</i>
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i>
PRB	<i>Physical Resource Block</i>
PS	<i>Packet Switched</i>
PSK	<i>Phase Shift Key</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RNTI	<i>Radio Network Temporary Identifier</i>

RP-ABS	<i>Reduced Power Almost Blank Subframe</i>
RR	<i>Round Robin</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier FDMA</i>
SFR	<i>Soft Frequency Reuse</i>
SIR	<i>Signal Interference Ratio</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Nodes</i>
SINR	<i>Signal to Interference and Noise Ratio</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VLR	<i>Visitor Location Register</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WCDMA	<i>Wide-Band Code Division Multiple Access</i>

SUMÁRIO

<u>1. Introdução</u>	<u>15</u>
<u>1.1. Motivação</u>	<u>16</u>
<u>1.2. Objetivos</u>	<u>17</u>
<u>1.3. Organização do trabalho</u>	<u>17</u>
<u>2. Revisão bibliográfica</u>	<u>19</u>
<u>2.1. Redes móveis e sua evolução</u>	<u>19</u>
<u>2.2. Redes Long Term Evolution (LTE)</u>	<u>27</u>
<u>2.3. Redes heterogêneas</u>	<u>39</u>
<u>2.4. Técnicas de coordenação de interferência intercelular</u>	<u>42</u>
<u>2.5. Algoritmos de escalonamento</u>	<u>47</u>
<u>2.5.1. Escalonador Proportional Fair</u>	<u>51</u>
<u>2.5.2. Generalized Proportional Fair</u>	<u>52</u>
<u>2.5.3. Arithmetic Mean Method</u>	<u>53</u>
<u>2.5.4. Midrange Fair Mean Method</u>	<u>53</u>
<u>2.6. Considerações finais</u>	<u>54</u>
<u>3. Metodologia</u>	<u>55</u>
<u>3.1. Método de pesquisa</u>	<u>55</u>
<u>3.1.1. Arithmetic Mean Proportional Fair</u>	<u>55</u>
<u>3.1.2. Midrange Fair Mean Proportional Fair</u>	<u>56</u>
<u>3.2. Ambiente de simulação</u>	<u>57</u>
<u>3.3. Métricas analisadas</u>	<u>60</u>
<u>3.4. Considerações finais</u>	<u>60</u>
<u>4. Resultados e discussões</u>	<u>61</u>
<u>4.1. Eficiência Energética</u>	<u>61</u>
<u>4.1.1. Cenário 1: variação da quantidade de usuários</u>	<u>61</u>
<u>4.1.2. Cenário 2: variação da quantidade de picocells</u>	<u>66</u>
<u>4.2. Eficiência Espectral</u>	<u>69</u>
<u>4.2.1. Cenário 1: variação da quantidade de usuários</u>	<u>69</u>
<u>4.2.2. Cenário 2: variação da quantidade de picocells</u>	<u>74</u>
<u>4.3. Índice de justiça</u>	<u>77</u>
<u>4.4. Considerações Finais</u>	<u>78</u>
<u>5. Conclusão</u>	<u>79</u>
<u>6. Referências</u>	<u>80</u>
<u>APÊNDICE I – FUNÇÃO “GPF_scheduler_LTE_TCC”</u>	<u>86</u>
<u>APÊNDICE II – FUNÇÃO “AMPF_scheduler_LTE_TCC”</u>	<u>88</u>
<u>APÊNDICE III – FUNÇÃO “MFMPF_scheduler_LTE_TCC”</u>	<u>90</u>

1. Introdução

No início da década de 1970, os serviços de redes móveis eram uma forma de comunicação escassa e cara. No geral, as primeiras estações celulares consistiam em uma estação base com 100 watts de potência localizada centralmente em uma área de serviço. Para completar uma chamada, era necessária a assistência do operador ou a seleção manual de uma frequência disponível. Como o espectro era um recurso limitado, as primeiras assinaturas de comunicações móveis exigiam que um cliente fosse colocado em uma lista de espera para atendimento. A solicitação de serviço era geralmente concedida a quem mais necessitava de sua utilização (S. Dekleva et al., 2007).

Desde então, o mundo das redes de comunicação móvel sem fio está crescendo rapidamente. As redes móveis tornaram-se mais eficazes e possibilitaram a implantação de várias gerações progressivas da tecnologia de telefonia celular, que hoje é utilizada por bilhões de pessoas no mundo. A comunicação móvel passou por uma rápida evolução a partir do 1G, a primeira geração era utilizada apenas para chamadas de voz, porém, foi o alicerce para o desenvolvimento de novas tecnologias celular. O 2G - segunda geração - trouxe a comunicação por telefone digital e forneceu novos recursos, como, por exemplo, serviços de mensagens de texto. Posteriormente, surgiu o 3G - terceira geração - propiciando melhor *performance* e QoS, aprimorando também a taxa de transmissão de dados (Salih, A. A. et al., 2020). No final dos anos 2000, foi introduzida as redes 4G - quarta geração - que é uma rede totalmente baseada em IP e capaz de fornecer taxas de dados de alta velocidade de até 1 Gbit/s no *downlink* e 500 Mbits/s no *uplink*. O LTE trouxe uma melhora na eficiência espectral e redução de latência, acomodando os requisitos estabelecidos por aplicativos avançados como *Digital Video Broadcasting* (DVB), conteúdo de TV de alta definição e bate-papo por vídeo. Além disso, o 4G permite a mobilidade do terminal para fornecer serviços sem fio a qualquer hora e em qualquer lugar, por meio de *roaming* automático entre os limites geográficos das redes *wireless* (Huang, T. et al., 2019).

Entretanto, com o surgimento de milhares de novas aplicações e soluções baseadas em redes móveis, a popularização de aparelhos celulares e a crescente demanda imposta pelos usuários sobre a rede, as redes de quarta geração passam a não ser o suficiente para suprir tal utilização. As redes heterogêneas, ou HetNets, passam a ser utilizadas como uma solução para atender tal demanda. As HetNets surgem quando sobrepõem-se pequenas células de baixa potência, por exemplo *picocell*, *femtocell*, RRH etc., utilizando a mesma frequência e dentro da área de cobertura de uma *macrocell* (estação de alta potência), aumentando assim a reutilização do espectro e conseqüentemente ampliando a capacidade da rede (Ali, Md Shipon, 2015). Apesar de trazer um ganho expressivo em

capacidade para as redes, as *HetNets* introduzem uma grande interferência devido à densificação celular e ao agressivo reuso de frequência, prejudicando assim a experiência do usuário. Para enfrentar este desafio foram incorporados em novas *Releases* do *3G Partnership Project (3GPP)* técnicas de controle de interferência que permitem uma coordenação entre *macrocells* e *picocells* de forma a minimizar o efeito da interferência para o usuário. A *Release 10* introduziu técnicas aprimoradas de coordenação de interferência entre células (*enhanced Inter-cell Interference Coordination* ou *eICIC*) baseadas no particionamento de recursos TDM onde as *macrocells* utilizam *subframes* com potência de transmissão zerada ou próximo de zero (*Almost Blank Subframe*), transmitindo nesses *subframes* apenas sinalização de controle para não interferir nos UEs associados às *picocells*. Depois disso, a *Release 11* inseriu uma técnica *ICIC* ainda mais avançada conhecida como *Further enhanced Inter-cell Interference Coordination (FeICIC)* trazendo uma maior eficiência espectral ao introduzir o *RP-ABS (Reduced Power Almost Blank Subframe)*, que permite a *macrocell* utilizar uma potência reduzida para atender a usuários próximos de sua área de cobertura em *subframes* *RP-ABS*.

1.1. Motivação

A demanda dos usuários de redes móveis vem crescendo com a introdução de novas tecnologias e, conseqüentemente, vê-se o aumento de novas aplicações baseadas nessas redes. O espectro é um recurso escasso e finito, dividido entre diversas tecnologias e aplicações como as próprias redes móveis, redes de satélites, rádios, aplicações militares, etc. A utilização otimizada do espectro abre espaço para esta crescente demanda sem a necessidade de alocação de bandas adicionais.

Neste cenário, a aplicação de técnicas de coordenação de interferência auxiliam no aumento da eficiência espectral. No mesmo sentido, a associação dessas técnicas a algoritmos de escalonamento mais eficientes, pode resultar em um aperfeiçoamento adicional do desempenho do sistema em redes heterogêneas. Isso é de grande relevância para o desenvolvimento das redes móveis. Além disso, é importante o estudo de como a interação entre *macrocells* e *picocells* afeta as técnicas de coordenação de interferência e algoritmos de escalonamento, bem como entender o impacto da diversidade de usuários na capacidade do sistema. Portanto, o presente estudo busca realizar a análise do comportamento da rede móvel em cenários de *HetNet* (ambiente contendo

macrocells e *picocells*), assim como a aplicação de algoritmos de escalonamento em conjunto com técnicas de coordenação de interferência em busca de eficiência espectral e energética.

1.2. Objetivos

O propósito deste estudo consiste em analisar as técnicas de Coordenação de Interferência entre Células (ICIC) no canal de downlink do LTE-A, levando-se em consideração cenários de redes heterogêneas. Esta análise abrange a avaliação das eficiências espectrais e energéticas, bem como a medição dos índices de equidade deste sistema. Adicionalmente, foram introduzidas duas adaptações no algoritmo de escalonamento *Generalized Proportional Fair* (GPF) denominadas neste estudo de *Midrange Fair Mean Method Proportional Fair* (MFMPF) e *Arithmetic Mean Proportional Fair* (AMPF) a fim de analisar a utilização de diferentes escalonadores em conjunto técnicas ICIC.

Os resultados obtidos por meio de simulações têm a finalidade de comparar diferentes cenários, incluindo aqueles sem coordenação de interferência e os que fazem uso das técnicas eICIC e FeICIC, considerando níveis variados de densificação da rede. Além disso, esses resultados contemplam a análise do desempenho dos algoritmos GPF, AMPF e MFMPF e um estudo comparativo entre eles para as variáveis anteriormente citadas.

1.3. Organização do trabalho

O trabalho encontra-se organizado conforme descrito a seguir. Tem-se no Capítulo 2 um estudo sobre redes móveis com uma breve descrição da evolução das redes até a tecnologia do LTE-A. Observa-se também os principais conceitos sobre redes heterogêneas, algoritmos de escalonamento e as técnicas de coordenação de interferência, conceitos que são a base deste trabalho. Por fim, encontram-se as variações aplicadas do algoritmo de escalonamento GPF. O Capítulo 3 descreve o ambiente de simulação utilizado, as variáveis empregadas para gerar esse ambiente, assim como as equações implementadas em códigos para gerar os escalonadores de AMPF e MFMPF. O Capítulo 4 contém os resultados obtidos das simulações e as análises realizadas das métricas de eficiência energética, eficiência espectral e índice de justiça, com a alteração de quantidade de usuários e de *picocells* em cada cenário e com a aplicação dos algoritmos de GPF, AMPF e MFMPF. O Capítulo 5, por fim, tem a conclusão dos resultados

obtidos, citando as principais contribuições do trabalho com a implementação das variações do algoritmo GPF.

2. Revisão bibliográfica

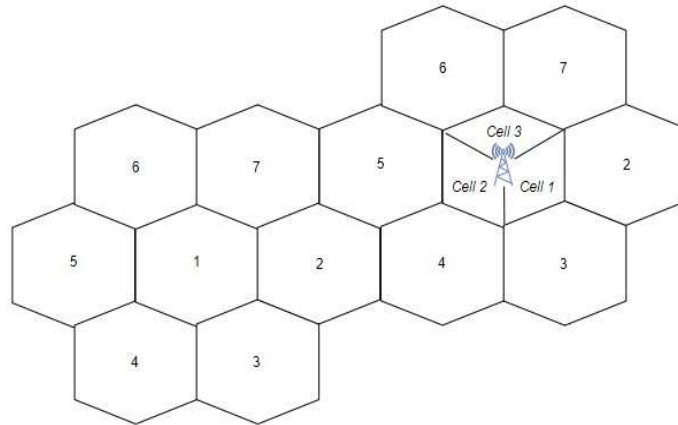
2.1. Redes móveis e sua evolução

Primeira Geração (1G)

No ano de 1979, o primeiro sistema celular autônomo (sem a necessidade de intervenção manual para realizar as conexões) foi posto em operação no mundo pela operadora *Nippon Telephone and Telegraph* (NTT) em Tóquio, Japão. Três anos depois, em 1983, foi lançado o serviço de telefonia móvel de voz pela *Ameritech* em Chicago, nos Estados Unidos. Este sistema, conhecido como *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), foi o que fez o maior sucesso dentre os sistemas de Primeira Geração (1G - *First Generation*) e deu início ao progresso das redes móveis de telecomunicações. O AMPS era um sistema analógico utilizado puramente para entregar o serviço de voz sobre a rede móvel. O sistema utilizava a técnica de acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA - *frequency division multiple access*), com canais de 30 KHz de capacidade, na faixa de frequência de 824-894 MHz, entregando, assim, uma velocidade de até 2.4kbps (A. U. Gawas, 2015).

Por ser o primeiro sistema de telefonia móvel, além de oferecer um único tipo de serviço, o serviço de voz, o 1G requeria diversos aprimoramentos. O AMPS possuía uma baixa capacidade de tráfego, péssima eficiência espectral, *links* de conexão ruins, *handoff* não confiável e não possuía qualquer tipo de segurança, ou seja, as chamadas de voz eram susceptíveis à escuta indesejada de terceiros (L.J. Vora, 2015). Apesar disso, foi adotado a reutilização de frequência, sendo que o menor fator de reutilização que cumpriria a relação sinal-interferência (SIR - *signal interference ratio*) requisitada de 18 dB pelos equipamentos da época, utilizando-se antenas direcionais de 120°, ou seja, 3 setores, foi o *reuse factor* 7 (P. Sharma, 2013), conforme Figura 1.

Figura 1: Exemplo de *cluster* celular com *reuse factor* 7.



FONTE: Autoria própria.

Segunda Geração (2G)

A segunda geração (2G - *Second Generation*) de redes móveis foi implementada no final da década de 1980. Assim como na primeira geração, o 2G também foi, primeiramente, focado na oferta de serviço de voz, com a grande diferença de que nesta tecnologia o sinal não era mais analógico, mas sim digital. A alteração de um sistema analógico para digital permitiu diversos aprimoramentos na performance do 2G. A utilização de modulação digital, técnicas de multiplexação, codificação e equalização, assim como o uso de *codecs* de voz, possibilitaram uma grande melhora na capacidade do sistema - através de uma melhor eficiência espectral e reutilização de frequência mais “estreita” -, redução do SIR requisitado para os equipamentos móveis, melhoria na qualidade da chamada de voz, assim como a adição de segurança (A. Ghosh et al., 2010).

Os sistemas do 2G podem ser divididos em sistemas baseados nas técnicas de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*) ou acesso múltiplo por divisão de código (CDMA - *Code Division Multiple Access*). Os principais padrões do 2G, foram (C. Patil et al., 2012):

- *Global System for Mobile (GSM)*: baseado na técnica TDMA, é um dos padrões mais difundido e utilizado em todo o mundo para sistemas de segunda geração;

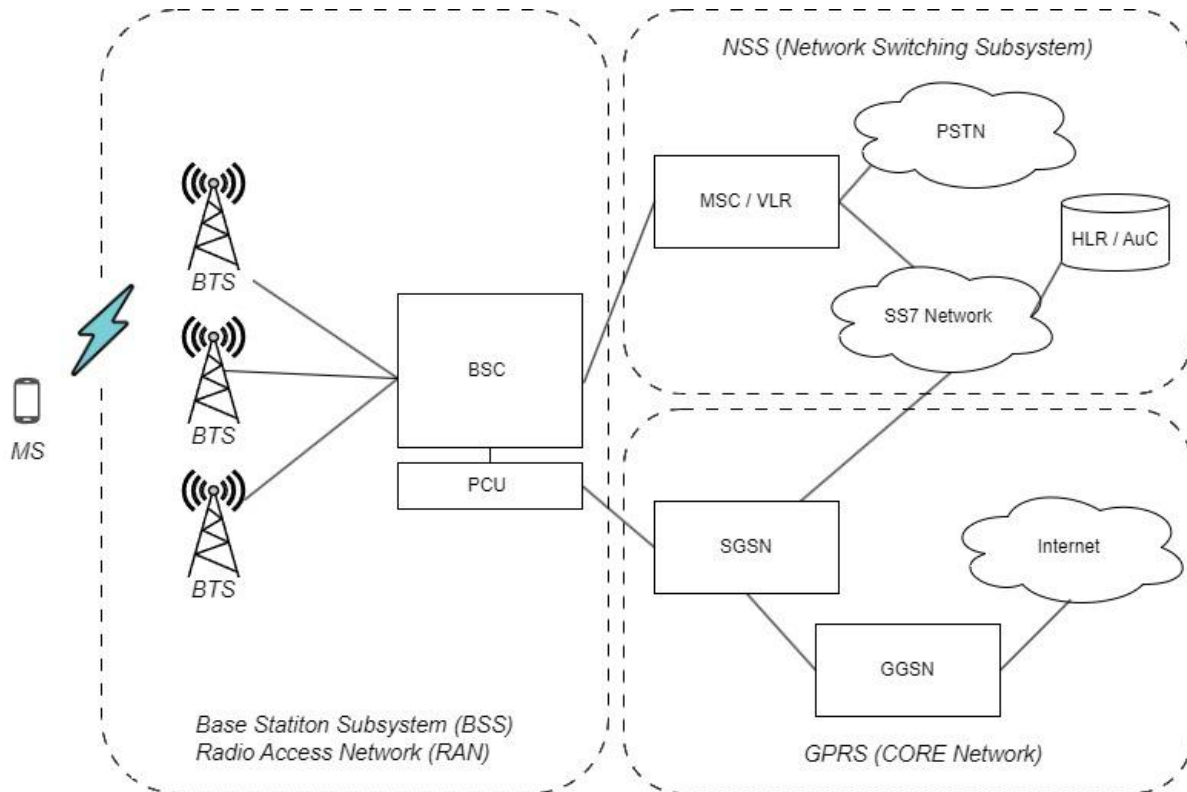
- *Interim Standard 95 (IS-95)*: baseado na técnica CDMA, foi utilizado nas Américas e em partes da Ásia. Grande parte das operadoras que utilizaram esta padronização migrou posteriormente para o GSM;
- *Interim Standard 136 (IS-136)*: também conhecido como *Digital AMPS (D-AMPS)*, é uma padronização baseada em TDMA e foi utilizado principalmente na América do Norte. Assim como IS-95, a grande maioria das operadoras posteriormente migrou do IS-136 para o GSM;
- *Personal Digital Cellular (PDC)*: baseado na técnica de TDMA e utilizado exclusivamente no Japão.

GSM

Visando desenvolver e padronizar um sistema digital de redes móveis pan-europeu, em 1982, na *Conference of European Posts and Telegraphs (CEPT)*, vários países europeus formaram o Grupo Especial Móvel (GSM - *Groupe Special Mobile*). Em 1989, o Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações (ETSI - *European Telecommunications Standards Institute*) assumiu o desenvolvimento e padronização do GSM que posteriormente foi transferido para o 3GPP (J. De Vriendt et al., 2002). Em 1990 foi liberada a primeira versão do GSM, chamada de *GSM Phase I*, e logo após, várias operadoras europeias implantaram o GSM, que ganhou rápida aceitação a nível mundial, e assim o padrão foi renomeado para *Global System for Mobile Communication*.

A interface aérea do GSM é baseada na TDMA, multiplexando 8 usuários em cada canal de 200 KHz de largura de banda, sendo que cada usuário utilizará um *time slot*. Além do serviço de voz, o GSM padrão introduziu a oferta de serviço mensagem curta (SMS - *Short Message Service*) e também suportava um tráfego de dados de 9,6 kbps em circuito comutado (CS - *circuit-switched*). Na metade da década de 1990, o ETSI apresentou o *GSM Packet Radio System (GPRS* - também conhecido como 2.5G), uma evolução do GSM que oferecia, em teoria, até um máximo de 160 kbps de *throughput*, sendo 20kbps por *time slot*. Em 1997 foi introduzido o *Enhanced Data Rate for GSM Evolution (EDGE)* que utilizou-se da modulação 8PSK (*Phase Shift Key*) para aumentar a taxa de tráfego de dados para até um máximo de 59,2 kbps por *time slot*, o triplo do fornecido pelo GPRS (A. Ghosh et al., 2010).

Figura 2: Arquitetura de acesso e CORE de uma rede GPRS.



FONTE: Adaptada de A. Ghosh, J. Zhang, J. G. Andrews and R. Muhamed.

A Figura 2 mostra a arquitetura existente em uma rede GSM/GPRS. Os elementos do subsistema de estação (BSS - *Base Station Subsystem*) e do subsistema de comutação de rede (NSS - *Network Switching Subsystem*) fazem parte do padrão 2G e entregam os serviços de voz e dados por comutação de circuitos. A BSS consiste de dois elementos: estações receptoras base (BTS - *Base Transceiver Stations*), que é responsável pela camada física do rádio conectando o usuário com a BSC através da interface aérea; e a controladora de estação base (BSC - *Base Station Controller*), que lida com a alocação de recursos das BTS, agregação de tráfego das BTS, assim como o gerenciamento de mobilidade do usuário (*handover*). A NSS consiste de três elementos: o centro de comutação móvel (MSC - *Mobile Switching Center*), que provê a comutação de circuitos, conectando os usuários da rede entre si e também com a rede de telefonia pública comutada (PSTN - *Public Switched Telephone Network*), que é a rede de telefonia pública; o *Home Location Register* (HLR), que é o banco de dados onde são armazenadas as informações dos usuários da rede; e o *Authentication Center* (AuC), que é responsável pela autenticação e criptografia das conexões, garantindo segurança para os usuários.

O 2.5G introduziu o GPRS *Core Network*, permitindo também o serviço de dados por comutação de pacote (PS - *packet-switched*) com maiores *throughput*. Para tal fim, o GPRS *Core Network* consiste de dois elementos: o *Serving GPRS Support Node* (SGSN), que tem como principais funções a detecção e registro e usuários, assim como funções de controle de acesso e segurança; o *Gateway GPRS support node* (GGSN), basicamente provê a conexão entre a rede GPRS com a Internet e outras redes de pacotes externas (redes IP). Além disso, foi necessário a introdução do *Packet Control Unit* (PCU) na *BSS*. O *PCU* é responsável pela segmentação de pacotes, retransmissão automática, acesso ao canal de rádio e controle de potência (J. De Vriendt et al., 2002 e A. Ghosh et al, 2010).

Terceira Geração (3G)

No início da década de 1990 a União Internacional de Telecomunicações (ITU - *International Telecommunications Union*), deu início ao convite a propostas para as redes de terceira geração, denominadas oficialmente de *International Mobile Telecommunications-2000* (IMT-2000). Na tecnologia EDGE (segunda geração), um “alto” volume de dados era possível, mas ainda assim a transferência de pacotes através da interface aérea se comporta como uma chamada de comutação de circuito, portanto, parte da eficiência desta conexão de pacote é perdida. Além disso, os padrões para o desenvolvimento das redes divergiam para diferentes partes do mundo. Deste modo, procurava-se ter uma rede que fornecesse serviços independentes da plataforma de tecnologia e cujo padrões de design fossem os mesmos globalmente. Assim nasceu o 3G (Mishra, A., 2004).

Em dezembro de 1998, foi estabelecido o grupo do 3GPP através da junção dos seguintes grupos regionais de padronização: ARIB e TTC (Japão), ETSI (Europa), T1 (Estados Unidos), TTA (Coréia), e posteriormente integrado também pelo CWTS (China). O objetivo desta junção era de cooperação para produção de uma tecnologia de terceira geração aplicada globalmente e baseada no core de rede do GSM, garantindo assim harmonia entre as tecnologias. Subsequente à formação do 3GPP, um segundo grupo, denominado 3GPP2 foi estabelecido para padronização da terceira geração em torno do CDMA2000, que seria baseado na evolução da IS-95 de segunda geração (Richardson, K. W., 2000). A Tabela 1 apresenta de forma resumida as principais propostas do 3G aceitas pela ITU.

Tabela 1 - Principais propostas da tecnologia do 3G aceitas pela ITU. Adaptado de A. Ghosh, J. Zhang, J. G. Andrews and R. Muhamed.

	WCDMA	CDMA2000	EV-DO	HSPA
Padrão	3GPP <i>Release 99</i>	3GPP2	3GPP2	3GPP <i>Release 5/6</i>
Banda de frequência	850/900 MHz 1.8/1.9/2.1 GHz	450/850 MHz 1.7/1.9/2.1 GHz	450/850 MHz 1.7/1.9/2.1 GHz	850/900 MHz 1.8/1.9/2.1 GHz
Largura de banda do canal	5 MHz	1.25 MHz	1.25 MHz	5 MHz
Pico de taxa de dados	384-2048 Kbps	307 Kbps	DL: 2.4-4.9 Mbps UL: 800 - 1800 Kbps	DL: 3.6-4.14.4 Mbps UL: 2.3-5 Mbps
Taxa de dados padrão do usuário	150-300 Kbps	120-200 Kbps	400-600 Kbps	500-700 Kbps
Latência de <i>user-plane</i>	100-200 ms	500-600 ms	50-200 ms	70-90 ms
Acesso múltiplo	CDMA	CDMA	CDMA/TDMA	CDMA/TDMA
Duplexação	FDD	FDD	FDD	FDD
Modulação	DS-SS: QPSK	DS-SS: BPSK, QPSK	DS-SS: QPSK, 8PSK e 16QAM	DS-SS: QPSK, 16QAM e 64QAM

UMTS

O *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) foi o nome recebido pelo sistema de tecnologia de terceira geração na Europa e predecessor do GSM. O UMTS foi definido pelo 3GPP e cumpre as especificações do ITU-T para a tecnologia. Esta primeira *release* do 3G foi lançada pelo 3GPP em 1999 e é comumente chamada de UMTS *release 99*. Diferente dos sistemas 1G e 2G que foram focados no serviço de voz, o 3G além de aprimorar a eficiência e capacidade do serviço de voz, foi desenvolvido para aumentar a taxa de conexão de dados. Conforme especificado pelo ITU, a tecnologia provê até 2 Mbps para usuários fixos (parados), 384 kbps para pedestres (usuários em movimento de baixa velocidade), e até 144 kbps para usuários em veículos. Com tais taxas de dados, o 3G foi capaz de oferecer novos serviços como acesso a vídeos, TV, web browsing, e-mail, videoconferências e mapas de navegação, por exemplo (A. U. Gawas, 2015).

Apesar de manter a mesma arquitetura base das redes GSM/GPRS, a interface aérea do 3G, chamada de *Wideband-CDMA* (WCDMA), foi inspirada e construída a partir do IS-95. O sistema

opera com canais de largura de banda de 5 MHz, seja ao utilizar duplexação por divisão de frequência (FDD - *Frequency Division Duplex*) ou duplexação por divisão de tempo (TDD - *Time Division Duplex*), e consegue suportar até 100 chamadas de voz consecutivas e prover picos de *throughput* entre 384 kbps a 2 Mbps. O 3G utiliza uma combinação da técnica de *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) multiplicada por códigos pseudo-randômicos que provê canalização, sincronização e embaralhamento (A. Ghosh et al., 2010). Em troca da grande largura de banda requerida pelo DSSS, a técnica de espalhamento espectral oferece um meio mais confiável de comunicação na presença de diversos tipos de interferência, como interferência de multipercurso, e interferência de transmissores que fazem parte do sistema celular (M. P. Pursley).

A Figura 3 representa a arquitetura básica do 3G. Conforme citado anteriormente, ele possui uma arquitetura equivalente a das redes GSM/GPRS. No 3G os subsistemas podem ser divididos em UMTS *Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) e *Core Network*. Os elementos que compõem a UTRAN são: NodeB, nome dado para a estação base do 3G, é responsável pela conexão do usuário com a RNC através da interface aérea WCDMA realizando a recepção e transmissão de sinais de rádio; controladora de rede de rádio (RNC - *Radio Network Controller*), entre suas principais funções estão o controle dos recursos de rádio, alguns tipos de gerenciamento de mobilidade do usuário e interface entre usuário e elementos de *core* de rede (*circuit-switching* e *packet-switching*). Os elementos de *core* da rede 3G, assim como na rede GPRS, podem ser divididos em dois domínios: domínio de comutação de circuitos (CS - *circuit-switched*) e domínio de comutação de pacotes (PS - *packet-switched*). Ambos domínios estão conectados com redes externas, por exemplo, CS está conectado com a PSTN e o PS com a Internet (Mishra, A., 2004).

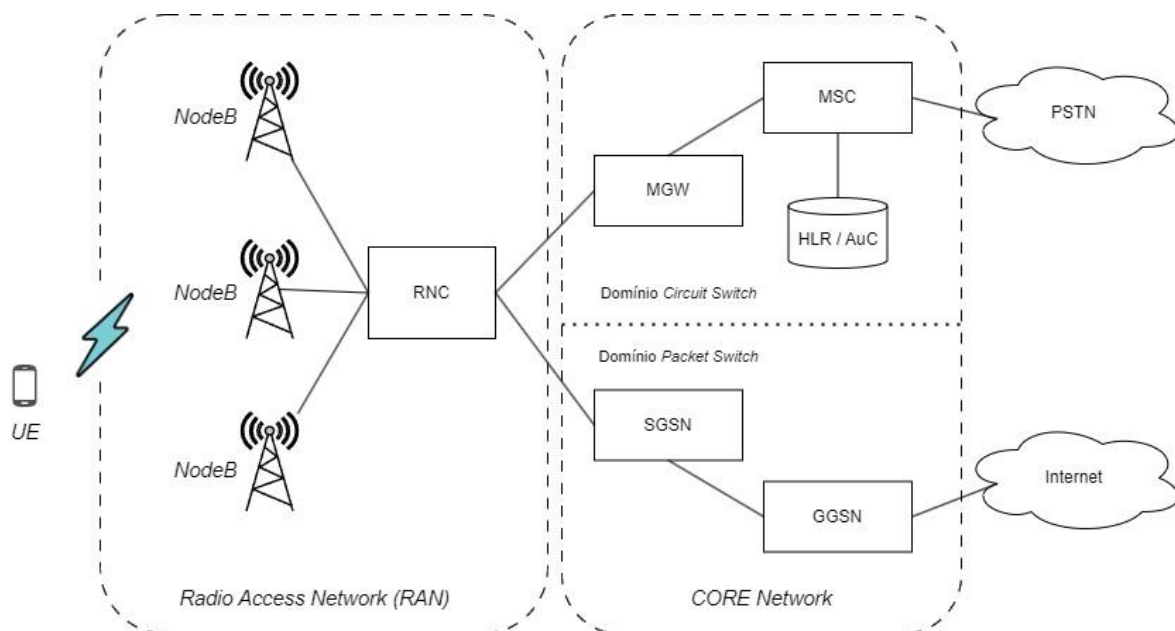
Assim como ocorreu com a tecnologia de segunda geração, que obteve evoluções intermediárias com o GPRS e EDGE, o 3G também contém tais evoluções. Em 2002 e 2004 foram trazidos dois aprimoramentos para os sistemas de terceira geração identificados, consecutivamente, como *High-Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) na *release 5* e *High-Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) na *release 6*. O foco dessas duas *releases* foi um aumento da capacidade do sistema e das taxas de *throughput* dos enlaces de *downlink* e *uplink*. Para alcançar tais objetivos, chegando em *throughput* teórico de até 14,4 Mbps no *downlink*, foram introduzidas as seguintes técnicas (A. Ghosh et al., 2010):

- ***Adaptive Modulation and Coding* (AMC):** esta técnica permite a variação da técnica de modulação e codificação utilizada para atender ao usuário dependendo da qualidade do

canal por ele utilizado. HSDPA passa a suportar modulações *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) até 16-*Quadrature Amplitude Modulation* (16QAM), assim como taxa de codificação de 1/4 até 1;

- **Fast Dynamic Scheduling:** HSDPA passa a utilizar escalonamento dinâmico ao invés do escalonamento em períodos fixos. Deste modo, o escalonador dinâmico eficiente pode otimizar a utilização dos recursos da rede e melhorar a capacidade do sistema. No HSDPA, para habilitar o *Fast Scheduling*, o escalonador é alocado na NodeB ao invés da RNC (como no WCDMA);
- **Hybrid Automatic Repeat Request (H-ARQ):** aprimora a técnica de retransmissão de pacotes onde múltiplas retransmissões errôneas podem ser combinadas para recuperar do erro mais rapidamente. Adicionalmente, H-ARQ também suporta redundância incremental, onde cada retransmissão subsequente provê código de correção de erro adicional visando aumentar a chance de recepção do sinal sem erros.

Figura 3: Arquitetura de acesso e CORE de uma rede UMTS.



FONTE: Autoria própria.

Neste mesmo sentido, em 2007 o 3GPP lançou a *release 7* também conhecida como HSDPA+, contendo ferramentas para aprimorar ainda mais a capacidade do sistema e as taxas de dados da tecnologia de terceira geração. As ferramentas introduzidas para este fim são (A. Ghosh et al., 2010):

- **Higher-order modulation e MIMO:** a utilização da tecnologia de *Multiple Input Multiple Output*, com esquemas de 2x2 antenas de recepção e transmissão para aumentar a diversidade espacial, assim como a utilização de modulação de até 64QAM, elevaram os picos de *throughput* no *downlink* para até 21,1 Mbps;
- **Flexible RLC e MAC segmentation:** HSDPA+ suporta o uso flexível da camada de *Radio Link Control* (RLC) permitindo que a estrutura de pacotes que era fixa de 40 bytes (ou 80 bytes para HSDPA) atingisse até os 1500 bytes sem necessitar de segmentação na camada RLC. Deste modo, há uma redução do *overhead* e uma redução na quantidade de pacotes a serem processados na camada RLC, e há uma otimização evitando-se preenchimento desnecessário de pacotes, melhorando assim o *throughput* e pico de taxa de dados.

Em 2008 foi lançada a *release 8* do 3GPP e trouxe novas ferramentas para o HSDPA+, além de introduzir as primeiras especificações das redes *Long Term Evolution* (LTE). A rede de quarta geração (*Fourth Generation*), mais popularmente conhecida como 4G ou comumente chamada de LTE, será detalhada no tópico a seguir.

2.2. Redes Long Term Evolution (LTE)

Com o crescimento do consumo de tráfego de dados e o aumento expressivo de clientes das operadoras de redes móveis (MNOs - *Mobile Network Operators*), a evolução das redes de terceira geração tornou-se necessária para a melhoria de sua performance, capacidade e atendimento à demanda dos usuários. Neste sentido, em 2008 o 3GPP lançou a *release 8*, que trazia novas ferramentas para aprimorar as redes HSDPA+ e também as primeiras especificações das redes LTE. A tentativa feita pela ITU e 3GPP de ter-se uma tecnologia padronizada a nível mundial foi finalmente alcançada na quarta geração. Apesar das redes LTE normalmente serem referenciadas como redes 4G (*fourth generation*), as especificações encontradas nas *releases 8 e 9* do 3GPP não garantiam os requisitos mínimos dados pela ITU para o *International Mobile Telecommunications-Advanced* (IMT-Advanced) - nome oficial para as redes de quarta geração (S. Jimaa et al., 2011). Deste modo, o padrão LTE visto nas duas primeiras *releases* pode ser chamado de 3.9G, pois não faz parte das redes de quarta geração. Foi apenas em 2010, com o lançamento da

release 10 e a tecnologia *LTE-Advanced* (LTE-A) que surgiram as redes capazes de entregar os requisitos (Tabela 2) do *IMT-Advanced* e, portanto, as chamadas redes 4G. As principais funcionalidades aprimoradas para o LTE-A, buscando alcançar os requerimentos da ITU, foram: o aumento expressivo no pico da taxa de dados; a melhoria da eficiência espectral; o aumento na capacidade de atendimento ao usuário; e a otimização da performance para usuário em bordas de célula (A. Haidine et al., 2016). As redes LTE-A foram definidas pelo 3GPP através das *releases* 10, 11 e 12, e cada *release* trouxe novas *features* ou aprimoramento de características já existentes na rede. No intuito de melhorar ainda mais as redes de quarta geração, e já se preparando para o início das redes de quinta geração (5G - *fifth generation*), o 3GPP lançou as *releases* 13 e 14 definindo novas funcionalidades para o normalmente conhecido 4.5G ou chamado oficialmente de *LTE-Advanced Pro*. O *roadmap* com as evoluções das redes 4G, assim como as principais funcionalidades referentes à cada *release* está disposto na Figura 4. Em todas as evoluções de redes supracitadas a compatibilidade com a tecnologia existente anteriormente foi sempre levada em conta.

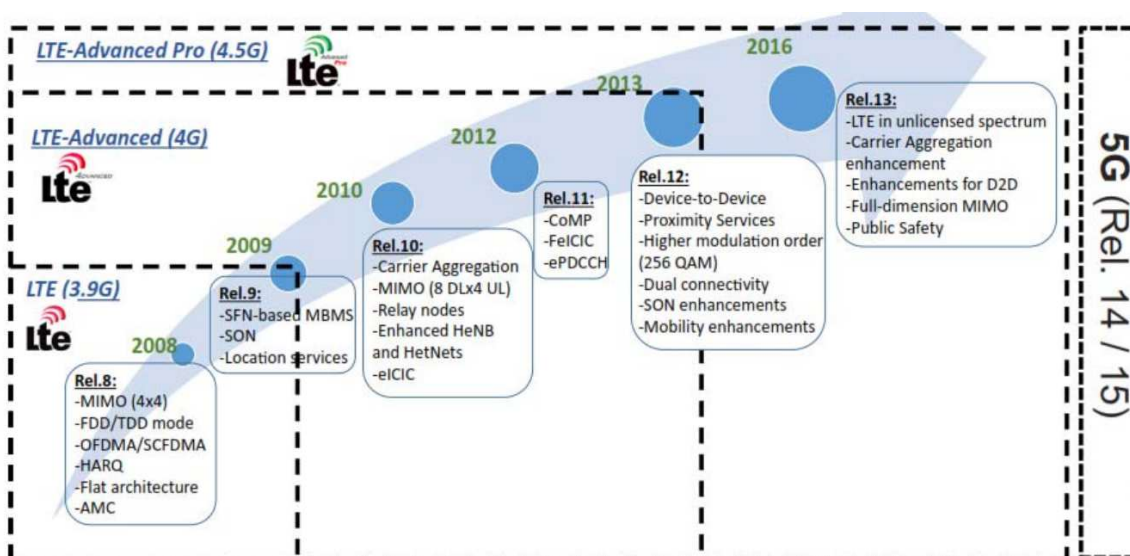
Tabela 2 - Requisitos mínimos da tecnologia para o LTE-A.

		Requerimento ITU para IMT-Advanced (4G)	LTE	LTE-A	LTE-A Pro
3GPP <i>release</i>	-	-	8, 9	10, 11, 12	13, 14
Rede	Baseada totalmente em rede IP	Sim	Sim	Sim	Sim
Pico de taxa de dados (Gbps)	Downlink	1	0,3	1	3
	Uplink	-	0,075	0,5	1,5
Pico eficiência espectral (bps/Hz)	Downlink	15 (MIMO 4x4)	16,3 (MIMO 4x4)	30 (MIMO 8x8)	30 (MIMO 8x8)
	Uplink	6.75 (MIMO 2x4)	4,32 (64 QAM SISO)	15 (MIMO 4x8)	15 (MIMO 4x8)
Largura de banda máxima suportada (MHz)	-	Escalável, mínimo de 40 MHz	20	100	640
Latência máxima (ms)	User Plane	10	5	<5	2

Buscando alcançar tais requerimentos, as redes 4G trouxeram consigo uma nova arquitetura simplificada baseada em IP. O novo sistema foi denominado de *Evolved Packet System* (EPS). O EPS consiste de dois subsistemas, que identificam as duas partes da rede móvel: o *Evolved Packet Core* (EPC), que é o *core network* das redes 4G; e o *Evolved Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) *Terrestrial RAN* (E-UTRAN), que conforme o nome diz faz o papel de rede de acesso via uso de radiofrequência (RAN - *radio access network*). Fazem parte do E-UTRAN a *enhanced NodeB* (eNodeB) e o *user equipment* (UE) [identificado em tecnologias anteriores como sistema móvel (MS - *Mobile System*)]. A eNodeB absorveu algumas funções que nas redes 3G eram realizadas pela RNC, e assim, além de realizar a conexão entre usuário e a rede do core, é responsável pelo gerenciamento dos recursos de rádio, medição de informações para escalonamento e mobilidade do usuário, transmissão de mensagens de *broadcast* e *paging*, e roteamento dos dados de *user plane* para o *Serving Gateway* (S-GW) (Chadchan, S. et al., 2010).

O CORE da rede 4G trouxe grandes alterações se comparado com as tecnologias anteriores. Conforme dito anteriormente, as redes 4G são redes baseadas no IP, ou seja, como os pacotes são puramente de dados, no CORE da quarta geração não há o domínio de *circuit-switched*, mas apenas o domínio do *packet-switched*. Deste modo, a rede se tornou mais simples pois possui elementos de apenas um domínio. Outra novidade encontrada no core desta nova geração é a separação da camada de dados com a camada de controle (*user plane* e *data plane*). Assim, definindo o EPC, tem-se quatro principais elementos de rede conforme Figura 5 (C. Cox, 2012):

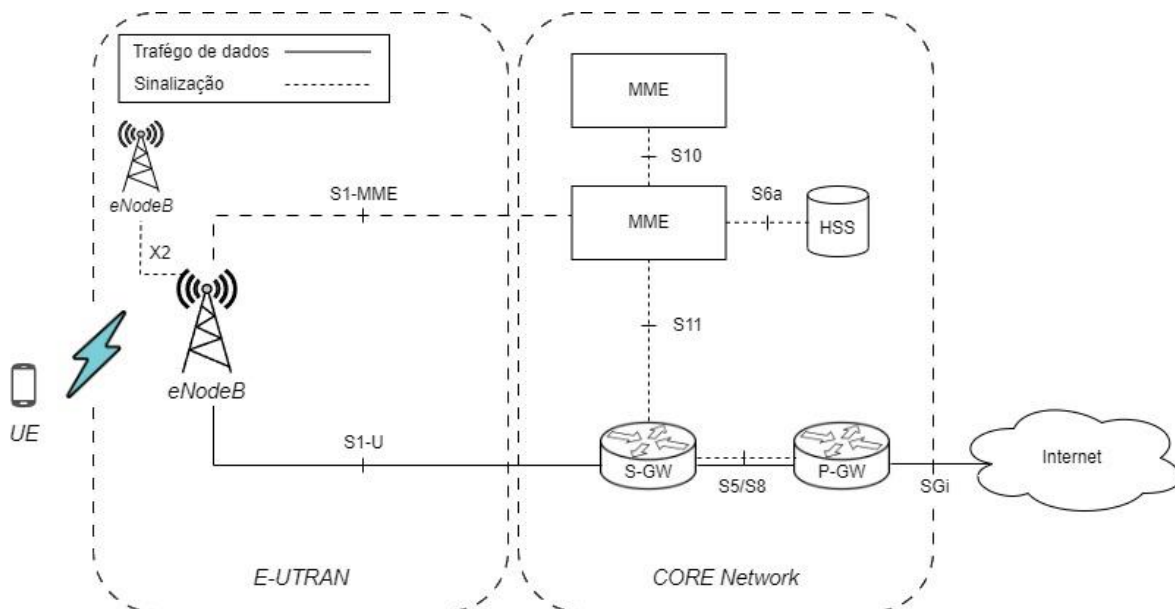
Figura 4: *Roadmap* - evolução redes LTE.



FONTE: Retirado de A. Haidine and S. E. Hassani.

- I. *Mobility Management Entity (MME)*: é o elemento do CORE responsável pelas funções do plano de controle relacionado ao usuário como gerenciamento de conexões, sinalização de segurança e autenticação, seleção do S-GW, e sinalização *Non-Access Stratum (NAS)*;
- II. *Serving Gateway (S-GW)*: este elemento funciona como se fosse um roteador, faz a conexão entre eNodeBs e o P-GW, enviando dados em ambos sentidos. O S-GW serve como um ponto de âncora e mobilidade para o usuário, visto que o UE poderá ser alocado a apenas um S-GW por vez;
- III. *Packet Data Network Gateway (P-GW)*: age como um roteador, fazendo a interface com a Internet ou redes externas à rede 4G. Também é responsável por realizar alocação de endereço IP para o usuário e aplicação de funções de política e cobrança de dados ;
- IV. *Home Subscriber Server (HSS)*: este elemento basicamente herdou as mesmas funções do HLR para as tecnologias 2G/3G. O HSS é um banco de dados que contém todas as informações relacionadas aos usuários da rede.

Figura 5: Arquitetura e interfaces de uma rede LTE.



FONTE: Autoria própria.

As principais interfaces presentes na arquitetura do LTE também estão representadas na Figura 5. A interface X2 é uma interface “não obrigatória”, que habilita a comunicação das camadas de controle e de usuário entre eNodeBs vizinhas. Ela é utilizada principalmente para troca de informação de gerenciamento de mobilidade dos usuários para realização de *handover*, ou seja, quando o UE passa da cobertura de uma eNodeB para outra sem que haja troca de MME. A interface X2 também pode ser utilizada para troca de informações entre eNodeBs para gerenciamento dos recursos de rádio, balanceamento de tráfego, e coordenação de controle de interferência entre células vizinhas (I. Widjaja et al., 2009). A interface S1 é responsável por conectar a eNodeB ao MME (S1-MME) e S-GW (S1-U). A interface S1-MME é utilizada pelo plano de controle entre E-UTRAN e o EPC, e a interface S1-U pelo plano de usuário. A interface S11 é responsável pela conexão do plano de controle entre o MME e o S-GW. As três interfaces S1-MME, S1-U e S11 utilizam o GPRS Tunneling Protocol (GTP-C ou GTP-U).

Como é possível notar, na nova arquitetura de rede de quarta geração não há a presença do *circuit-switched*, isto é, comutação de circuitos responsável nas redes de gerações anteriores pelo serviço de voz. É possível oferecer o serviço de voz em cima da rede 4G utilizando o voz sobre LTE (VoLTE - *Voice over LTE*), realizando assim a transmissão de chamadas de voz através de pacotes de dados (*Voice over IP* ou mais comumente chamada de VoIP). Para a implementação do VoLTE é necessário a implementação do subsistema multimídia IP (IMS - IP Multimedia Subsystem). O IMS não faz parte da arquitetura do LTE e tem uma relação de uma rede externa com a rede 4G (C. Cox, 2012). Outra opção para realizar a chamada de voz quando o UE está em uma rede 4G é a realização do procedimento denominado *Fallback* ou *Circuit-Switched Fallback* (CS-*Fallback*). Este procedimento permite que seja entregue o serviço de voz pelas redes 4G utilizando o domínio de *circuit-switched* já existente das redes legadas (2G/3G) para realizar a conexão. Deste modo, quando o UE está conectado na rede 4G e realiza uma ligação de voz convencional (sem utilização de aplicativos como *whatsapp*, *skype*, *teams*, *google meet*, etc), ocorre a realização do CS-*Fallback*, jogando temporariamente o UE em uma das redes legadas para a realização da conexão de voz utilizando a comutação de circuitos. Para MNOs que já possuíam redes 2G/3G antes da chegada das redes de quarta geração, esta é uma forma mais barata de entregar o serviço de voz utilizando a infraestrutura e arquitetura das redes legadas.

Além das alterações já citadas anteriormente para as redes 4G, a introdução de novas técnicas e tecnologias de acesso foram essenciais por permitirem às redes de quarta geração alcançarem os requisitos almejados pela ITU. Dentre todas funcionalidades, três foram primordiais

para a evolução das redes e serão explanadas a seguir. São elas a técnica de acesso múltiplo por divisão de frequência ortogonal (OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), a tecnologia de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*) e a funcionalidade de agregação de portadoras (CA - *carrier aggregation*) (T. Tran et al., 2012).

Camada Física LTE (*Physical Layer*)

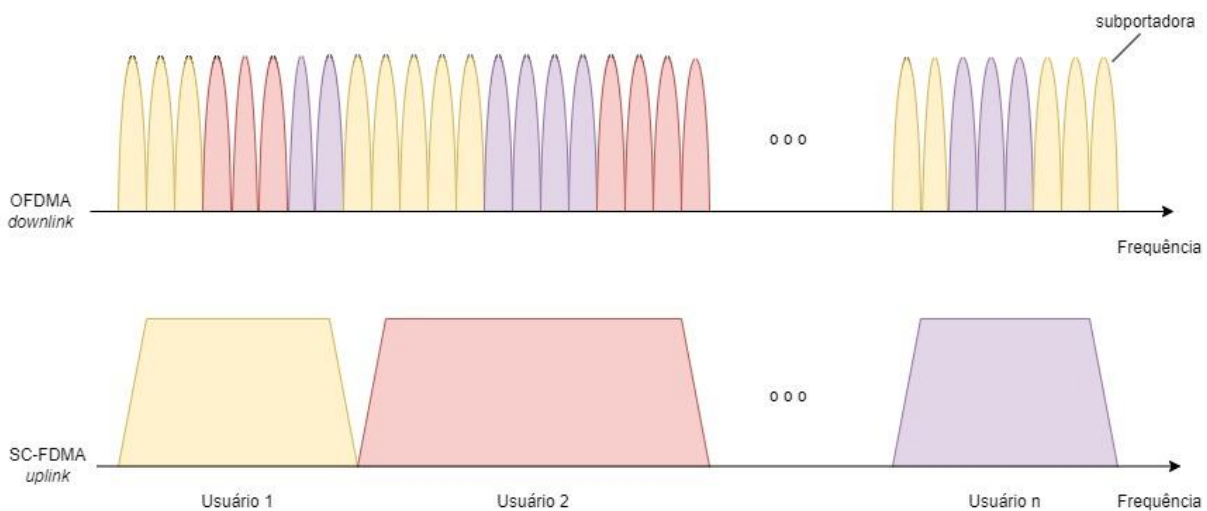
Desde a *release* 8, diferente do UMTS que se baseia no WCDMA, às redes LTE se baseiam na técnica OFDMA, ou técnica de acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais. Apesar do OFDM (técnica da qual o OFDMA é uma variante) ter sido cogitado para as redes 2G, na década de 1980, pelo ETSI, e para as redes 3G na década de 1990 pelo 3GPP, a técnica não pôde ser implementada por limitação tecnológica da época (S. Jimaa et al., 2011). O custo de processamento requerido para execução de diversas *fast Fourier Transform* (FFT), técnica que é a base de implementação do OFDM, só passou a ser comercialmente viável após diversos avanços e, portanto, foi finalmente utilizada para as redes LTE (S. Jimaa et al., 2011).

Deste modo, o 3GPP padronizou duas técnicas para o acesso das redes LTE. O 4G utiliza o OFDMA para o *downlink*, e o *Single Carrier OFDMA* (SC-OFDMA) para o *uplink*. A razão de não se utilizar o OFDMA para *uplink* é que normalmente, além de não ser usual a necessidade um *throughput* tão alto no *uplink*, o SC-OFDMA tem um menor *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR), permitindo que o UE tenha um amplificador mais simples, menos potente e auxiliando na eficiência do consumo de bateria (H. G. Myung et al., 2011). O OFDM nada mais é do que a divisão do espectro de rádio utilizando-se múltiplas *subcarrier* (sub portadoras) ortogonais entre si. A ortogonalidade entre as sub portadoras permite uma maior eficiência espectral, uma das principais vantagens desta técnica. O SC-OFDMA, conforme o nome diz, ao invés de utilizar várias *subcarriers* para realizar a transmissão, esta é feita em cima de apenas um portadora (conforme ilustrado na Figura 6).

As redes LTE padronizaram dois tipos de estruturas de *frames* para a sua camada física: multiplexação por divisão de frequência (FDD - *Frequency Division Multiplex*) é o chamado tipo 1, e multiplexação por divisão de tempo (TDD - *Time Division Multiplex*) corresponde ao tipo 2. O FDD, *frame* tipo 1, funciona nos modos *full* e *half duplex*, sendo que, neste caso, por utilizar-se frequências diferentes para *uplink* e *downlink* (multiplexação no domínio da frequência), metade do *frame* é utilizado em cada frequência para cada intervalo de 10 ms. O TDD, *frame* do tipo 2, utiliza

apenas uma frequência para realizar as funções de *downlink* e *uplink* (multiplexação no domínio do tempo), deste modo, o *frame* é dividido em dois *frames* idênticos de 5 ms cada. Um *frame* do LTE possui a seguinte configuração: é composto por 20 *slots* de 0,5 ms cada, totalizando assim em 10 ms cada *frame*; um conjunto de 2 *slots* compõem um *subframe*, deste modo, um *frame* possui 10 *subframes* conforme ilustrado na Figura 7 (M. A. N. Sukar et al., 2014).

Figura 6: Ilustração das técnicas de OFDMA e SC-OFDMA.



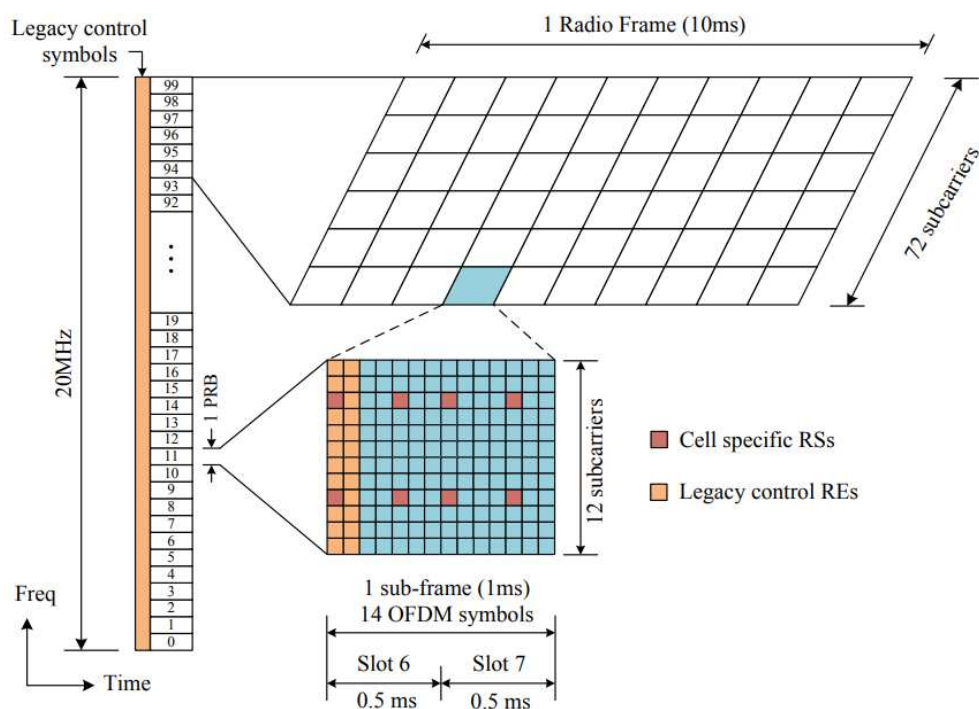
FONTE: Adaptado de M. A. N. Sukar and M. Pal.

Para garantir uma alta eficiência e flexibilidade dos recursos de rádio, o LTE faz o uso dos *resource elements* (RE). O RE nada mais é do que a menor estrutura física de modulação presente no LTE e consiste de uma *subcarrier* de 15 KHz e 1 símbolo OFDM. Um conjunto de 12 *subcarriers* (ou 12 REs) e 6 ou 7 símbolos OFDM (dependendo do CP - *Cyclic Prefix*) compõem o *Physical Resource Block* (PRB). Deste modo, um PRB possui a largura de 180 KHz e ocupa dois *slots* do *frame* (ou um *subframe*) com duração de 1 ms, conforme mostrado na Figura 7. Isto permite o alcance das configurações de larguras de banda do 4G: 1,4 MHz consiste de 6 PRB até os 20 MHz que é composto por 110 PRBs. Tal granularidade dos recursos, garante que a rede consiga distribuir os PRBs para diferentes usuários simultaneamente, dependendo de suas condições de canal dentre outros fatores (M. A. N. Sukar et al., 2014).

Assim, o tráfego de dados do LTE no *downlink* ocorre utilizando as padronizações supracitadas. Através da utilização do *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH) a rede 4G aloca seus recursos (PRBs) para o UE. O PDCCH contém, basicamente, as informações de

escalonamento necessárias para que o UE possa receber seus pacotes de dados. Para cada *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) é alocado um PDCCH. Enfim, o PDSCH é responsável pelo transporte dos dados de *downlink* do usuário.

Figura 7 - Estrutura de *frames* de um sistema LTE FDD.



FONTE: Retirada de M. Elsaadany, A. Ali and W. Hamouda.

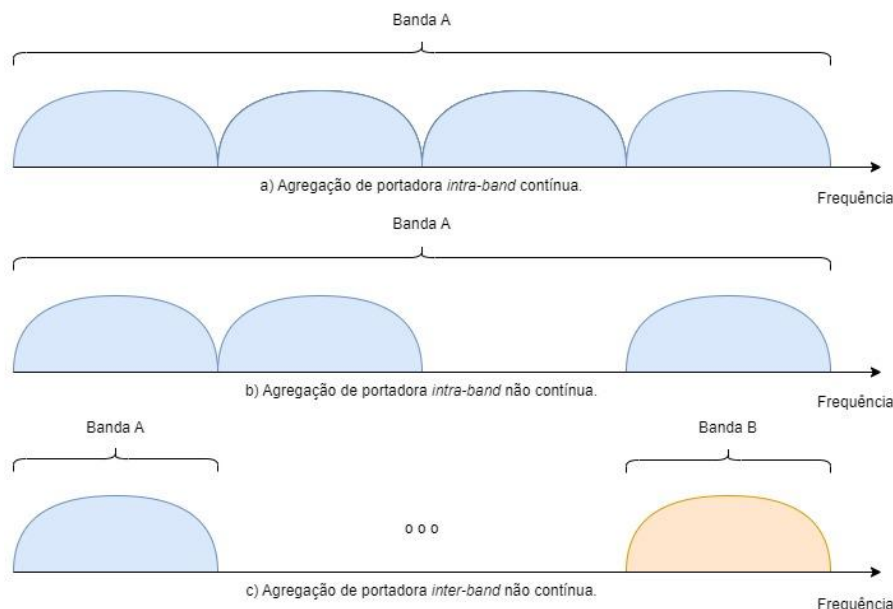
Carrier Aggregation

Apenas a melhora na eficiência espectral apresentada pela evolução das redes 4G, alcançando-se assim um pico de até 30 bps/Hz no *downlink*, ou seja, o dobro do requerido pelo ITU como padronização do IMT-Advanced, não foi o suficiente para alcançar outros requerimentos impostos para as redes de quarta geração. Assim, além do aumento de eficiência espectral, o LTE-A trouxe também em sua padronização a técnica de *carrier aggregation* (CA) ou agregação de portadora, ampliando a limitada banda de até 20 MHz do LTE para um máximo de 100 MHz (levando-se em consideração a agregação de 5 portadoras).

Conforme Figura 8, existem três diferentes cenários de agregação: agregação de portadoras adjacentes, utilizando-se uma única banda; agregação de portadoras não contínua, utilizando-se uma única banda; e, por fim, agregação de portadora não contínua, utilizando-se bandas diferentes. Deste

modo, com a agregação de 5 portadoras de 20 MHz em um cenário de utilização de MIMO 4x4, seria possível alcançar um pico de taxa de dados de até 1,5 Gbps, ultrapassando a requisição do IMT-Advanced (A. Ghosh et al., 2010).

Figura 8: Cenários diferentes de agregação de portadoras LTE.



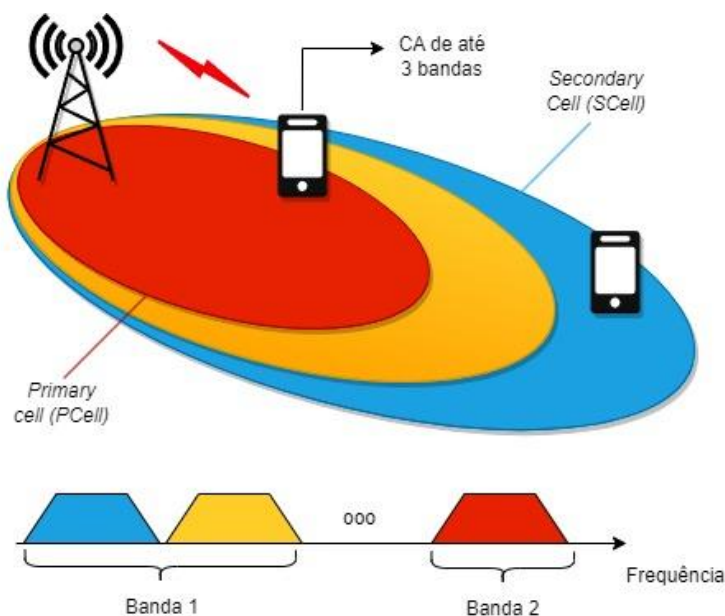
FONTE: Autoria própria.

É válido notar que, ao utilizar-se o cenário de CA não adjacentes em diferentes bandas do espectro, a cobertura e, portanto, a performance a rede 4G sofrerão alterações de acordo com a área e com as portadoras ali agregadas. Assim, utilizando um exemplo das bandas de 3 e 28 do LTE, que correspondem respectivamente às frequências de 1800 MHz e 700 MHz. Como, devido às propriedades das ondas eletromagnéticas, há uma maior propagação para sinais em uma menor frequência, a célula 4G que utilizar a banda 28 terá uma maior cobertura do que a célula da banda 3, conforme Figura 9. Deste modo, usuários alocados na área de cobertura de ambas as células poderão utilizar a CA e terão uma maior flexibilidade de conexão, assim como uma maior taxa de conexão de dados. Enquanto que usuários que se encontrem mais distantes da eNodeB e, portanto, na cobertura de apenas uma das bandas utilizadas, terão uma pior percepção da rede.

Outra vantagem introduzida pela CA é a possibilidade de configurações assimétricas da rede. Por exemplo, um usuário pode ter várias portadoras associadas à ele para o *downlink* e apenas uma portadora para o *uplink*. Esta funcionalidade agrega flexibilidade para a rede. Para cada usuário, uma portadora será definida como *Primary Cell* (PCell), e se o UE utilizar a CA, as outras

portadoras à ele alocadas são denominadas Secondary Cells (SCell). A PCell pode ser considerada como uma âncora para a conexão do UE e, portanto, é usada para as funcionalidades de monitoramento da conexão do usuário (K. I. Pedersen et al., 2011).

Figura 9: Cobertura e agregação de portadora em diferentes bandas de frequência LTE.



FONTE: Autoria própria.

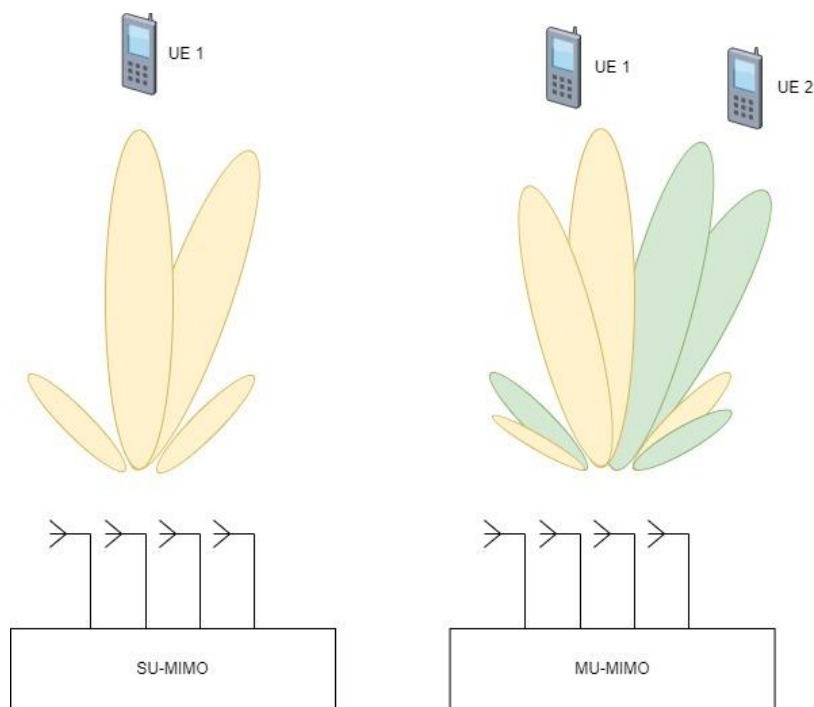
Posteriormente, o LTE-A Pro trouxe em sua padronização a possibilidade de um aumento muito maior na utilização de espectro. O LTE-A Pro permitiu a utilização de até 32 portadoras de 20 MHz cada, alcançando assim uma banda total de até 640 MHz para as redes 4G. Importante citar que, apesar das disponibilidades oferecidas pelas evoluções das redes de quarta geração em relação à utilização do espectro, sabe-se que tal recurso é finito, amplamente disputado por diferentes serviços e, portanto, tem um custo altíssimo de aquisição para as MNOs. Normalmente a padronização e liberação de utilização de uma faixa de espectro para determinada tecnologia é um estudo que demanda tempo, investimento e participação de órgãos reguladores que definirão as competências técnicas de utilização daquele espectro. No Brasil, o órgão responsável por essas definições é a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Uma nova tecnologia que teve um papel fundamental para atingir os requisitos impostos pelo ITU para as redes de quarta geração foi a de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*). Por causa do recurso de espectro limitado, conforme explicado anteriormente, a técnica do MIMO é essencial para alcançar o pico de eficiência espectral, a mínima eficiência espectral para as células, e a mínima eficiência espectral para usuários nas bordas das células definidos pelo ITU-R (ITU-R Rep. M.2134).

Conforme ilustrado na Figura 10, existem dois métodos de aplicação do MIMO: *Single-User* MIMO (SU-MIMO) e *Multi-User* MIMO (MU-MIMO). Ambos os métodos possuem variação de desempenho dependendo da configuração e quantidade de antenas utilizadas para transmissão e/ou recepção do sinal. O LTE-A suporta uma configuração de até 8 antenas para *downlink* e 4 antenas para *uplink* (S. Kanchi et al., 2013).

Figura 10: Ilustração dos métodos de MIMO.

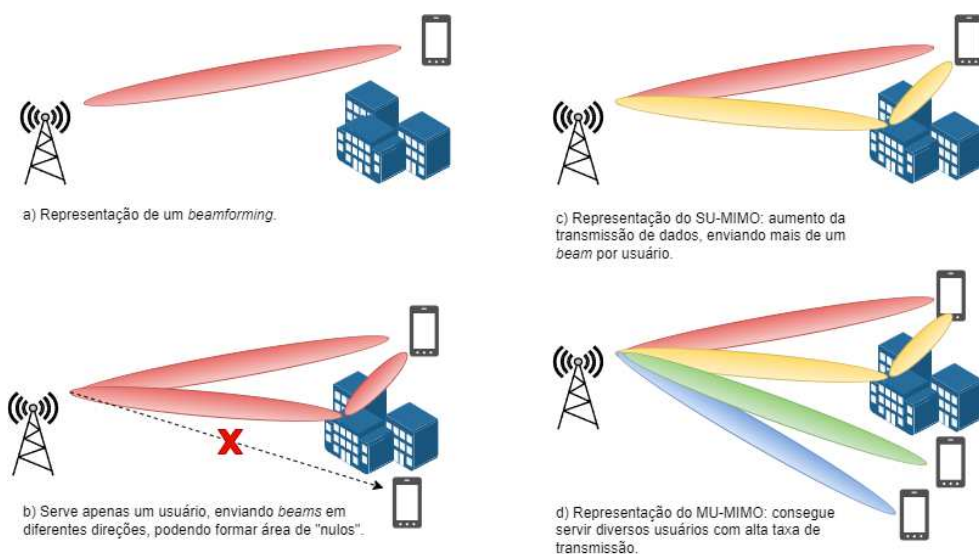


FONTE: Adaptado de Q. Li et al.

- SU-MIMO: os recursos de transmissão são alocados para apenas um usuário. Eles abrangem técnicas que vão desde a diversidade de transmissão até a multiplexação espacial e formação de feixes.
- MU-MIMO: o mesmo recurso de transmissão é utilizado para atender diversos usuários, aproveitando a sua diversidade espacial, resultando assim em ganhos substanciais se comparado com o SU-MIMO.

Para alcançar ganhos tão significativos, o MIMO utiliza-se, principalmente, de três técnicas: *spatial multiplexing* (SM) ou multiplexação espacial, diversidade espacial e *beamforming* ou formação de feixes. SM é uma técnica utilizada que aumenta o pico de *throughput* do usuário ao enviar múltiplos *spatial streams* de dados utilizando-se do sistema de múltiplas antenas (Q. Li et al., 2010). Diversidade de transmissão nada mais é do que o ganho ao utilizar-se diversas antenas para transmitir o mesmo sinal, visto que, neste cenário, há um aumento da probabilidade de recepção dos sinais afetados por efeitos do meio de propagação (por exemplo o efeito de múltiplos caminhos). Por último, a técnica de *beamforming* utiliza um conjunto de antenas para transmitir um feixe de sinal focalizado para o usuário. Para construção do feixe, são utilizadas técnicas de adaptação de fase e amplitude da corrente que alimenta cada antena do conjunto utilizado. A Figura 11 representa de modo simples as três técnicas utilizadas no MIMO.

Figura 11: Representação de *beamforming*, diversidade de transmissão e espacial para técnicas de MIMO.



FONTE: Autoria própria.

O massive MIMO se diferencia do MU-MIMO pela quantidade de antenas servindo cada usuário. Por exemplo, uma eNodeB com 4 antenas provendo cobertura para uma célula é considerada MU-MIMO, pois são várias antenas servindo aquele setor e a quantidade de usuário não é muito menor do que a quantidade de antenas. Já para o massive MIMO, é necessário uma quantidade massiva de antenas servindo uma pequena quantidade de UE. O massive MIMO é utilizado em estudos de coordenação de interferência em redes heterogêneas (A. Adhikary et al., 2015).

2.3. Redes heterogêneas

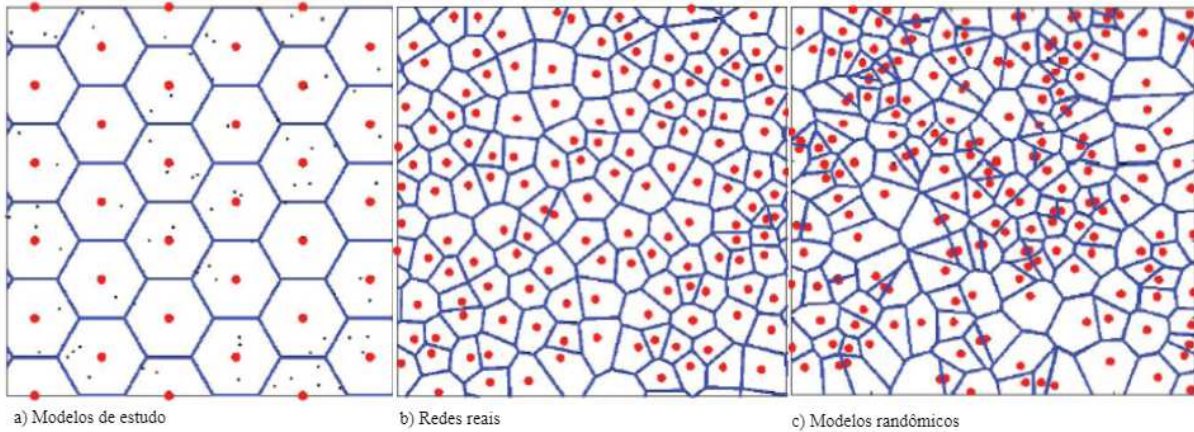
O exponencial aumento de tráfego de dados na rede móvel celular, em contraste com a dificuldade de alocar e padronizar novas faixas de espectro, propiciou o surgimento das redes heterogêneas. Apesar de existirem aplicações mais simples em redes de gerações anteriores, as redes heterogêneas, também chamadas de HetNets, ganharam força com as redes de quarta geração. Ao trazer a possibilidade de *handover* e compartilhamento de espectro com outras tecnologias (como Wi-Fi ou Bluetooth, por exemplo), as redes 4G, através das evoluções do LTE-A, potencializaram o crescimento das HetNets (M. Jo et al., 2014).

A necessidade de densificação celular, que consiste na combinação de densificação espacial com agregação de espectro, vai ao encontro do surgimento das HetNets. A densificação espacial consiste no aumento do número de estações cobrindo a mesma quantidade de usuários em uma determinada área geográfica (N. Bhushan et al., 2014). Desta forma, a topologia das HetNets sofrem uma alteração se comparado com a tradicional topologia hexagonal das antigas redes móveis. Dois exemplos para tal fato é a própria utilização do modelo hexagonal, que já não representa mais fielmente uma HetNet, assim como a suposição de que o usuário será atendido pela estação base que propiciar o sinal mais forte para sua conexão, conforme ilustrado na Figura 12 (A. Ghosh et al., 2012). Assim, as HetNets podem ser definidas como uma rede que consiste na mistura de estações com alta potência de transmissão, assim como nós de baixa potência, onde alguns nós podem ser configurados para acesso restrito de usuários e outros podem carecer de *backhaul* físico (como fibra óptica, por exemplo). As HetNets possuem modelos e topologias mais complexas que

as redes convencionais, e normalmente é uma mistura dos elementos a seguir (D. Lopez-Perez et al., 2011; A. Damnjanovic et al., 2011; J. G. Andrews et al., 2012):

- *Macrocell*: são as estações bases convencionais, no LTE denominada de eNodeB, usualmente instaladas pelas operadoras. Essas estações possuem uma grande área de cobertura, podendo chegar a alguns quilômetros, provêem acesso público à rede e possuem *backhaul* dedicado (usualmente fibra óptica). Dentre as estações que compõem uma HetNet é a que possui maior potência, emitindo até 46 dBm;
- *Picocell*: as diferenças entre a *picocell* e a *macrocell* é que na *picocell* normalmente utiliza-se de antenas *omnidirecionais* e possuem menor potência de transmissão, usualmente entre 23 a 30 dBm. Por este motivo a *picocell* abrange uma área bem menor, cobrindo até aproximadamente 300 metros e atendendo uma quantidade bem menor de usuários;
- *Femtocells*: as *femtocells* também possuem uma baixa potência de transmissão, geralmente abaixo de 20 dBm, tendo uma área de cobertura de aproximadamente 50 metros e atendimento a pouquíssimos usuários. A grande diferença das *femtocells* é que são implantadas pelos próprios usuários, utilizando normalmente as redes internet fixa das operadoras, por isso são também chamadas de *home* eNodeBs ou *home Base Station (BS)*. A *femtocell* é uma solução de baixíssimo custo e lembra muito as soluções de Wi-Fi, mas neste caso elas utilizam o espectro licenciado das redes móveis. Apesar de não poder contar com a interface de comunicação do X2 do LTE, a *femtocell* pode se comunicar com as redes celulares em diversos níveis, suportando funcionalidade como *handover*, autenticação na rede, serviço de bilhetagem (cobrança) e gerenciamento de interface;
- *Relays*: usualmente implementados pelas operadoras para cobertura em áreas de sombra, atendimento *indoor* ou bordas de células. Os *relays* basicamente roteiam o sinal de uma *macrocell*, ou seja, possui um *backhaul* sem fio (*wireless*), e tem potência de transmissão na mesma faixa das *picocells*;
- *Remote Radio Head (RRH)*: RRHs são basicamente uma extensão de uma eNodeB. Nesta solução, o que se faz é basicamente utilizar um outro *transceiver* e antena direcional, conectando-os através de fibra óptica à *macrocell*, criando assim um novo setor associado àquela eNodeB, mas separado fisicamente da estação base e a ela conectado por fibra. Deste modo, o RRH possui a mesma potência que a *macrocell* e conseqüentemente a mesma área de cobertura e *backhaul*.

Figura 12: Representações e comparação de modelos de estudo, redes reais e modelos randômicos de redes LTE HetNets.



FONTE: Adaptado de J. G. Andrews et al.

Deste modo, utilizando os elementos supracitados, uma HetNet é capaz de aumentar significativamente a capacidade do sistema celular. Em contrapartida há um aumento de complexidade na rede devido às divergentes características dos elementos associados a ela. Segundo D. Lopez-Perez (2011), os desafios e tecnologias chaves para as HetNets são: auto-organização (*self-organization*), *backhauling*, *handover*, e interferência. Alguns dos elementos de rede, como as *femtocells*, por exemplo, são implementados pelos usuários sem supervisão das operadoras. Assim, é importante que tais elementos possuam as funcionalidades de *self-configuration*, *self-healing* e *self-optimization* (três características do *self-organization*) devido à grande quantidade de variáveis, parâmetros e alterações que a rede sofre no dia-a-dia. Devido à grande variação de integração dos elementos ao *backhaul* é importante um bom planejamento para garantir a entrega de qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) aos usuários. Já o *handover* poderá se tornar potencialmente custoso para a rede. A dificuldade de balanceamento entre estações sobre e sub utilizadas, assim como a grande variação de usuários entre as diversas estações bases tornará o *handover* mais complexo e a possibilidade de falha é potencialmente aumentada. Por último tem-se o problema de interferência. Por causa da superposição de cobertura entre estações com diferentes potências de transmissão, ao utilizar-se a mesma frequência, o problema de interferência em ambos sentidos de *downlink* e *uplink* é um dos maiores desafios das HetNets. Assim, este assunto será foco de análise no próximo tópico.

2.4. Técnicas de coordenação de interferência intercelular

As redes LTE trouxeram em sua especificação novas tecnologias e padrões como a utilização do OFDMA como técnica de acesso, e o modelo de *frequency reuse 1* (FR1) como padrão de implementação de rede. O OFDMA, conforme já discutido, utiliza sub-portadoras ortogonais entre si, e, deste modo, elimina o problema de interferência intracelular (ICI - *Intra-Cell Interference*). Apesar disso, a ICI é um grande problema em redes LTE devido a utilização do OFDMA, assim como a padronização do modelo FR1 (que nada mais é do que a utilização de toda a frequência disponível pelas MNOs em cada célula da estação base). Neste mesmo sentido, a densificação da rede apresentada pelas HetNets buscando o melhor aproveitamento do espectro e aumento da capacidade das redes 4G adicionou uma nova variável no problema de interferência nas redes LTE. Desta forma, as técnicas de coordenação de interferência intercelular (ICIC - *Inter-Cell Interference Coordination*) são necessárias para minimizar o impacto das ICI não prejudicando assim a experiência do usuário (M. A. Aboulhassan et al., 2015).

Existem basicamente três principais tipos de estratégia para lidar com as ICI. A primeira, chamada de *randomization* ou randomização, busca distribuir a interferência entre os UEs utilizando métodos randômicos (como códigos de embaralhamento pseudo-randômicos). A segunda, denominada *cancellation* ou estratégia de cancelamento, estima o nível de interferência baseado no sinal do UE e subtrai a interferência do sinal (esta técnica tende a possuir um processamento mais complexo e pesado, além de interferir na latência do sinal). A última estratégia, *avoidance* ou evasão, procura mitigar a interferência restringindo alguns recursos em diferentes células (por exemplo, frequência ou potência de transmissão). Esta última estratégia provê melhores resultados para usuários nas bordas das células sem degradar o *throughput* no centro da célula (Daeinabi, A. et al., 2012).

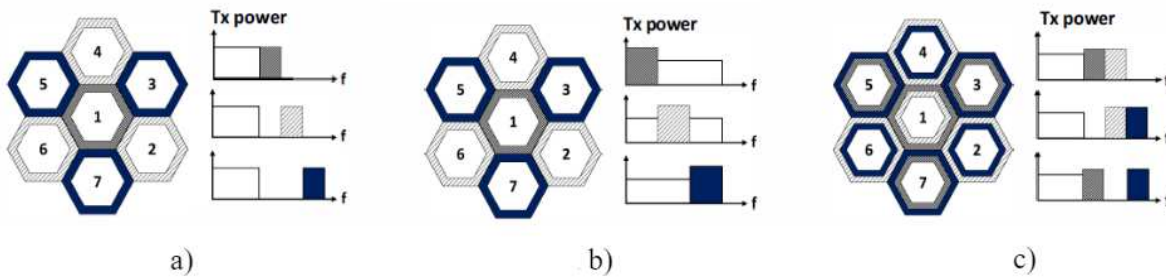
Além disso, há dois métodos de implementação das ICIC: estático ou dinâmico. O método estático foi focado em redes homogêneas e padronizados nas *releases* 8 e 9 do 3GPP. Métodos estáticos, conforme o nome diz, é estático pois é definido durante o planejamento da rede e não consegue se adaptar dinamicamente às suas diversas alterações. Assim, são esquemas mais simples de ICIC. Ele consiste, basicamente, de três diferentes esquemas: reuso fracionário de frequência (FFR - *Fractional Frequency Reuse*), reuso suave de frequência (SFR - *Soft Frequency Reuse*) e reuso parcial de frequência (PFR - *Partial Frequency Reuse*). Já os métodos dinâmicos surgiram a partir da *release* 10 do 3GPP com o *enhanced* ICIC (eICIC), com novas técnicas e funcionalidade

para implementações em HetNets. Na *release* 11 foi apresentado o *Further* eICIC (FeICIC), aprimorando ainda mais o eICIC. Os esquemas dinâmicos fazem uso da interface X2 das redes LTE para coordenação de frequência, potência e algoritmos envolvendo a coordenação de interferência entre eNodeBs no domínio do tempo (Boujelben et al., 2014). Deste modo, os esquemas dinâmicos apresentam melhores resultados em HetNets pois possuem ferramentas que auxiliam a coordenação de interferência em redes mais complexas, sendo também mais propícios pois conseguem acompanhar as ágeis e diversas modificações das redes de quarta geração.

A. Esquemas estáticos ICIC (V. Pauli, J. D. Naranjo e E. Seidel; Boujelben et al., 2014)

- a. *Fractional Frequency Reuse*: divide o espectro em duas partes. Uma parte será utilizada por todas as eNodeBs e cobrirá o centro das células. A segunda parte do espectro será dividida em três grupos, sendo utilizado para a cobertura nas bordas das células;
- b. *Soft Frequency Reuse*: todo o espectro é aproveitado por todas as eNodeBs, mas utilizando diferentes potências em uma faixa deste espectro para cobertura das bordas das células. Deste modo, o centro da célula usa o FR1, onde todo o espectro é utilizado transmitindo o sinal em uma potência menor;
- c. *Partial Frequency Reuse*: a ideia do PFR é restringir uma parte do espectro para que algumas frequências não sejam utilizadas em alguns setores, diminuindo a interferência na rede. Assim, o espectro é dividido em dois, sendo que uma parte será utilizada para cobrir o centro das células, e a segunda parte será dividida em subgrupos e combinada de modo que uma eNodeB não utilize a mesma frequência que as eNodeBs vizinhas.

Figura 13: Ilustração de modelos de reuso de frequência.



FONTE: Adaptado de Boujelben, M., Ben Rejeb, S., & Tabbane, S. (2014).

Como é possível ver pela Figura 13, no SFR b), uma faixa de frequência é transmitida com uma menor potência, ou seja, os usuários de bordas terão menor capacidade para utilização da rede. Já em outros esquemas, como o FFR a) e o PFR c), algumas faixas de frequências não são nem utilizadas por algumas eNodeBs. Deste modo, além de não conseguirem seguir a dinamicidade de uma rede viva, os esquemas estáticos fazem um uso não otimizado dos recursos do espectro.

B. Esquemas dinâmicos ICIC

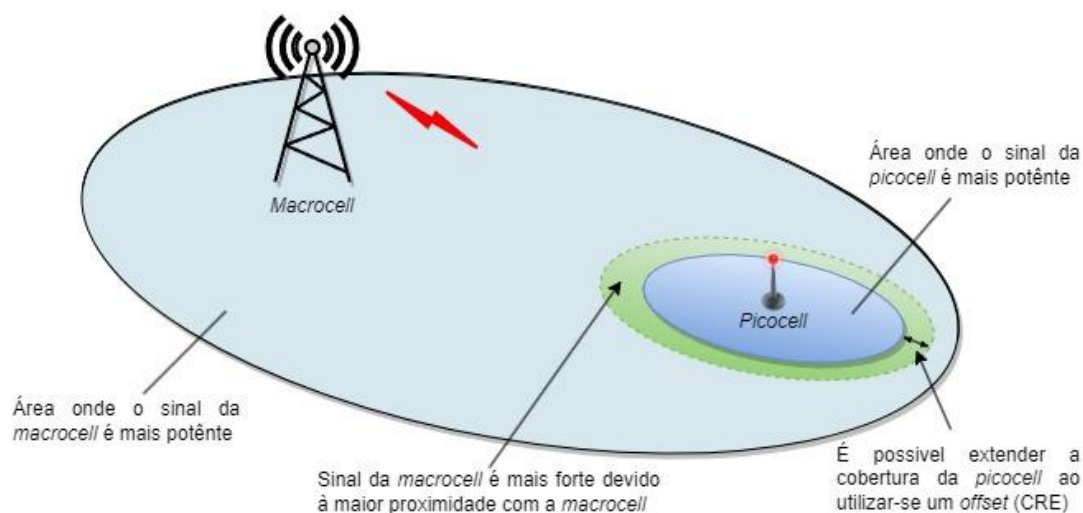
a. eICIC (Release 10)

A padronização do LTE-A foi feita para dois principais propósitos: transmissão de dados *downlink* entre *macrocell* e *picocell* visando mitigar a interferência no *downlink*, e a flexibilização de associação do UE à eNodeB mais adequada para atendê-lo, de modo a não sobrecarregar a *macro* ou a *picocell* (S. Deb et al., 2014). É possível implementar o eICIC no domínio da frequência, no domínio da potência e no domínio do tempo. No domínio da frequência há a alocação dinâmica dos recursos do espectro quando é detectado um usuário sofrendo interferência. No domínio da potência, os nós de baixa potência (LNP - *Low Power Nodes*) realizam o controle da potência de transmissão, ou seja, quando é detectado um UE sofrendo interferência, há uma redução de potência de transmissão por parte da *picocell*. Entretanto, esta diminuição de potência pode prejudicar a performance do UE associado à LNP. Por último, no domínio do tempo são utilizadas duas técnicas para a realização desta coordenação: o *Cell Range Extension* (CRE) e o *Almost Blank Subframe* (ABS) (S. Deb et al., 2014 e A. Merwaday et al., 2014).

- *Cell Range Extension*: em redes homogêneas, o UE faz a seleção de qual célula se conectar na rede de acordo com a potência do sinal recebido por ele no canal de *downlink*. Nas

HetNets, como diferentes elementos possuem potência de transmissão distintas, esta forma de associação não seria própria, visto que normalmente o UE iria se associar à *macrocell*, devido a sua maior potência de transmissão. Desta forma, haveria um desbalanceamento da utilização das eNodeBs, sobrecarregando as *macrocells* e subutilizando as *picocells*. Já no *uplink* esta diferença não ocorre, pois a potência de transmissão do UE é uniforme, então a cobertura de *uplink* para *macrocell* ou *picocell* será a mesma. Assim, há uma incompatibilidade entre cobertura de *downlink* e *uplink* em HetNets. Portanto, para realizar este balanceamento e estender a cobertura de uma *picocell* o CRE é utilizado, conforme Figura 14. O CRE consiste na utilização de um *offset* dado pela *picocell* baseado em uma estimativa do *pathloss* (potência atenuada do sinal). O *offset* visa compensar a diferença entre as potência de transmissão entre as *pico* e *macrocells*, estendendo assim a cobertura da *picocell*. Entretanto, o UE que se encontra nesta área de extensão sofre ainda mais com a ICI (A. Khandekar, 2010);

Figura 14: Ilustração da aplicação do *Cell Range Extension*.

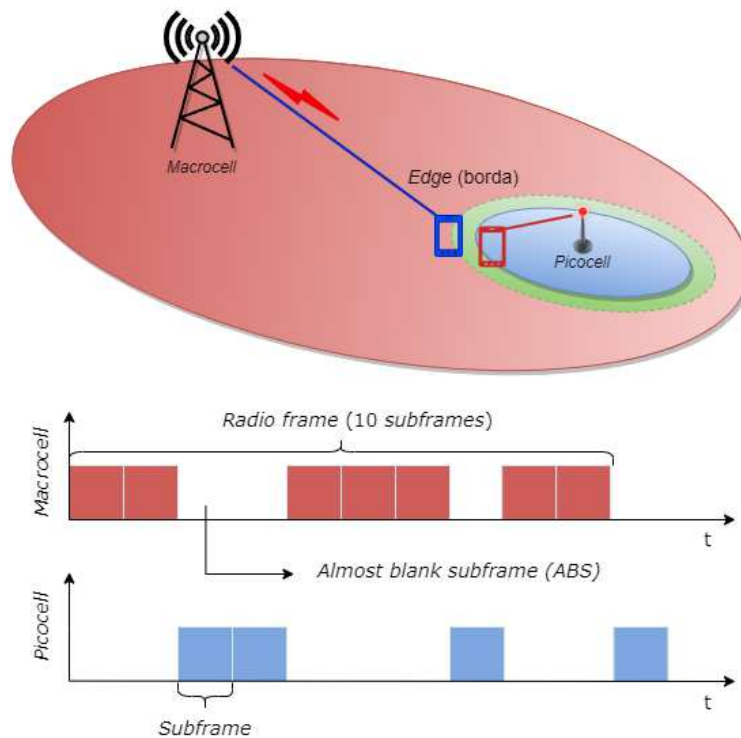


FONTE: Autoria própria.

- *Almost Blank Subframe*: o ABS consiste em um *subframe* no qual a *macrocell* irá realizar a transmissão de informações substanciais para o funcionamento da rede, não transmitindo assim nenhum dado para UE, mas apenas informações de controle obrigatórios. Assim, há uma na coordenação entre *pico* e *macrocell*, sendo que nos *subframes* onde a *macrocell* transmite apenas informações básicas de controle a *picocell* utilizará para transmitir

informações de dados para os UEs por ela servidos. A interface de coordenação entre as estações utilizada é a interface X2. A *macrocell* define quais *subframes* serão utilizados como ABS dependendo das informações do *cluster*. Deste modo, é possível que as LNPs atendam seus usuários em áreas de CRE com menor interferência e melhor utilização dos recursos (Figura 15).

Figura 15: Ilustração do funcionamento da técnica de *Almost Blank Subframe*.



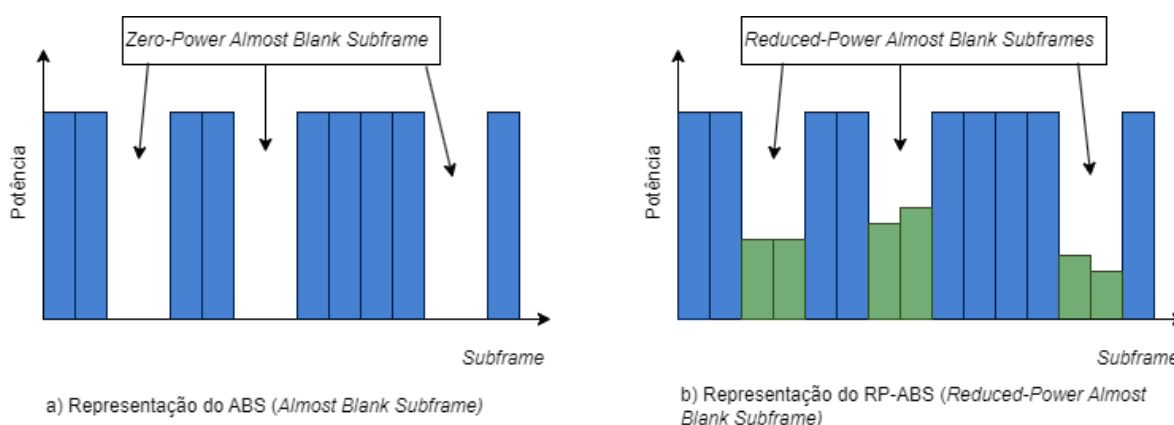
FONTE: Autoria própria.

b. FeICIC (*Release 11*)

Na *release 11*, o 3GPP introduziu o *Further eICIC* (FeICIC) com uma aprimoração da técnica acima descrita. O FeICIC utiliza *Reduced Power ABS* (RP-ABS) ao invés do ABS utilizado pela eICIC. O ABS cessa completamente a transmissão de dados (potência utilizada para envio do PDSCH) e mantém apenas a transmissão de informações básicas para a rede. Desta forma, há uma redução de eficiência no uso do espectro, visto que alguns *subframes* não são utilizados para transmissão de dados. O RP-ABS permite que a *macrocell* utilize esses *subframes* com potência reduzida, para servir usuários mais próximos à estação base. Assim, é possível que a *macrocell* utilize os *subframes* em sua totalidade, aumentando o ganho de capacidade das HetNets. A Figura

16 b) ilustra o RP-ABS. É possível aplicar o RP-ABS de forma estática ou dinâmica. No RP-ABS estático a quantidade de *subframes* que utilizam o RP-ABS é fixo e a potência a ser utilizada pela *macrocell* também é pré-definida e fixa. O RP-ABS dinâmico exige uma comunicação entre os escalonadores da *macro* e da *picocell* para coordenar a quantidade de *subframes* RP-ABS, assim como a potência utilizada pela *macrocell* para sua transmissão. Esta comunicação entre *macro* e *picocell* ocorre através da interface X2. Desta forma, quanto mais otimizado for o escalonador, melhores serão os ganhos de capacidade ao utilizar-se o FeICIC (M. S. Ali, 2015).

Figura 16: Comparação do funcionamento das técnicas de ABS e RP-ABS.



FONTE: Adaptado de M. S. Ali (2015).

2.5. Algoritmos de escalonamento

Conforme visto nas seções anteriores, intrínseco à evolução das redes móveis temos o acréscimo de complexidade em sua estrutura e funcionamento. Para alcançar as altas taxas de dados encontradas em tecnologias como o LTE e LTE-A é necessário a utilização de diversas técnicas e ferramentas como a otimização do reuso de frequência e as técnicas de coordenação de interferências (ICIC). Os algoritmos de escalonamentos são outra ferramenta complementar às técnicas anteriores e extremamente importantes para o funcionamento das redes de quarta geração. Assim, o principal objetivo das redes LTE é fornecer ao usuário o maior throughput possível e a menor latência fim-a-fim em relação aos serviços solicitados (Yildiz, Ö. et al., 2017). Além disso, cada usuário deveria ter a possibilidade de se beneficiar dos recursos disponíveis em um determinado nível, independentemente de sua localização na célula.

A alocação de recursos no LTE é definida nos domínios da frequência e do tempo. As transmissões LTE são segmentadas em *frames*. No domínio do tempo, cada *frame* consiste em 10 “*subframes*” consecutivos de 1 ms de duração cada. Cada intervalo de *subframes* é chamado de “Intervalo de Tempo de Transmissão” (TTI - *Transmission Time Interval*). Cada subframe consiste em 2 “*slots*”, sendo que cada slot tem um “comprimento” de 0,5 ms. O intervalo de tempo de 0,5 ms está associado a 7 símbolos OFDM. No domínio da frequência, cada subportadora é definida por uma banda de frequência de 15 kHz. Assim, em termos de alocação de recursos, o *building block* é o *Resource Block* (RB) que é expresso pela largura de banda de 180 kHz (12 subportadoras) e o intervalo de tempo de 0,5 ms (um slot). Como a alocação de largura de banda no LTE-A tem uma estrutura flexível e pode ser alocada em “pedaços” com um mínimo de 1,4 MHz e um total máximo de 20 MHz, o número de RBs a serem usados varia de acordo com o espectro alocado. A largura de banda LTE-A pode ser configurada para 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz e o número de RBs correspondentes a essas larguras de banda é 6, 15, 25, 50, 75 e 100, respectivamente (Yildiz, Ö. et al., 2017).

Os algoritmos de escalonamentos são os responsáveis pela alocação dos RBs, que tem como objetivo atender cada usuário de uma rede LTE. Este mecanismo fornece o compartilhamento de recursos de rádio comuns entre o equipamento do usuário (UE) para transmissão de downlink e uplink e é executado pelo Módulo de gerenciamento de recursos de rádio (RRM - *Radio Resource Management*). Para agendamento com reconhecimento de canal, o RRM executa tarefas básicas, como alocação de recursos por conversão de parâmetros de qualidade de serviço (QoS - *Quality-of-Service*) em parâmetros de alocação de recursos, relatórios de parâmetros de indicador de qualidade de canal (CQI - *Channel Quality Indicator*) e seleção do esquema de modulação e codificação (MCS - *Modulation and Coding Scheme*) baseado em técnicas de *Adaptive Modulation and Coding* (AMC). A operação do mecanismo começa quando a estação base envia sinais de referência para o UE e solicita informações sobre as condições do canal do UE. Com base na transmissão CQI de cada UE, a estação base realiza a alocação de recursos de acordo com as condições do canal do usuário. Finalmente, a operação do mecanismo de alocação de recursos é concluída com a transmissão do recurso alocado junto com os dados para o UE fornecido (Yildiz, Ö. et al., 2017).

As diferenças entre as estratégias de alocação de recursos são baseadas principalmente no *trade-off* entre decisão otimizada e complexidade computacional. Serão apresentados quatro pontos

a seguir que devem ser levados em consideração ao definir uma política de alocação de recursos em redes LTE (Capozzi, Francesco, et al., 2012):

1. Complexidade e Escalabilidade: Um algoritmo de escalonamento de pacotes LTE trabalha com uma granularidade de tempo de 1 ms: ele tem que tomar decisões de alocação a cada TTI. Baixa complexidade e escalabilidade são, portanto, requisitos fundamentais para limitar o tempo de processamento e uso de memória das eNodeBs. Encontrar a melhor decisão de alocação por meio de problemas de otimização complexos e não lineares ou por meio de uma pesquisa exaustiva sobre todas as combinações possíveis seria muito caro em termos de custo e tempo computacional.
2. Eficiência Espectral: A utilização efetiva dos recursos de rádio é um dos principais objetivos a serem alcançados. Para isso, vários tipos de indicadores de desempenho podem ser considerados: por exemplo, uma política específica pode visar a maximização do número de usuários atendidos em um determinado intervalo de tempo ou, mais comumente, a eficiência espectral (expressa em bit/s/Hz) atendendo sempre os usuários que estão experimentando as melhores condições do canal.
3. *Fairness* (Justiça): Uma maximização de *throughput* total da célula permite a utilização efetiva do canal em termos de eficiência espectral, mas também traz um compartilhamento de recursos muito injusto entre os usuários. A imparcialidade é, portanto, um requisito importante que deve ser levado em consideração para garantir o desempenho mínimo também para os usuários de borda de célula (ou em geral para usuários com más condições de canal).
4. Provisionamento de QoS: O provisionamento de QoS é um recurso importante em todas as arquiteturas IP. O LTE mapeia fluxos com restrição de QoS para portadoras de rádio dedicadas que, dependendo de seus QCI, permitem procedimentos especiais de RRM. As restrições de QoS podem variar dependendo da aplicação e geralmente são mapeadas em alguns parâmetros: taxa de bits mínima garantida, atraso máximo na entrega e taxa de perda de pacotes. Portanto, é importante definir escalonadores com reconhecimento de QoS.

Em Capozzi et al. (2012) são utilizadas quatro classificações diferentes de estratégias de algoritmos de escalonamento. São elas:

1. *Channel-unaware*: estratégia que não utiliza nenhum tipo de *feedback* ou informações do UE e de sua condição de navegação. É uma estratégia baseada na suposição de um meio de transmissão invariante no tempo e sem ocasião de erros. Embora sua aplicação em redes LTE não seja realizada, são utilizadas em conjunto com estratégias de *channel-aware* para aprimorar o funcionamento do sistema. Alguns exemplos são: *First In First Out*, *Round Robin*, *Blind Equal Throughput* e *Resource Preemption* (ver Capozzi, Francesco, et al., 2012).
2. *Channel-aware/QoS-unaware*: devido aos *feedbacks* de CQI enviados periodicamente de UEs para a eNodeB, o escalonador pode estimar a qualidade do canal percebida para cada UE; conseqüentemente, ele pode prever a taxa de transferência máxima alcançável. Alguns exemplos: *Maximum Throughput*, *Proportional Fair (PF)*, *Throughput to Average*, *Joint Time and Frequency domain schedulers*, *Delay sensitivity*, *Buffer-aware schedulers*. Neste trabalho será focado uma análise em variantes do PF.
3. *Channel-aware/QoS-aware*: A diferenciação de QoS é tratada associando um conjunto de parâmetros de QoS a cada fluxo de dados. A eNodeB tem conhecimento dos valores de tais parâmetros, e o escalonador pode tratar os dados para garantir alguns desempenhos mínimos exigidos, por exemplo como a garantia de um *throughput* mínimo exigido ou a garantia de uma latência máxima no tráfego do pacote de dados. Alguns exemplos: *Schedulers for Guaranteed Data-Rate*, *Schedulers for Guaranteed Delay Requirements*, *Performance evaluation of most relevant channel-aware/QoS-aware strategies*. Esses algoritmos são comumente mais complexos e não serão abordados neste trabalho.
4. *Semi-persistent Scheduling for VoIP support*: Diversas soluções têm sido propostas na literatura para suportar grande número de fluxos *VoIP*, minimizando o impacto de sobrecarga de *overhead* na sinalização. É importante ressaltar que as soluções de alocação semi persistentes visam aumentar a capacidade da rede em termos de número máximo de chamadas *VoIP* consecutivas. Eles não são especificamente concebidos para melhorar a eficiência espectral ou para reduzir atraso de pacotes. Eles podem ser considerados na prática como estratégia de *channel-unaware*.

2.5.1. Escalonador Proportional Fair

Proportional fair (PF) é o algoritmo de escalonamento mais usado em LTE-A. O seu princípio de funcionamento é baseado na manutenção de um equilíbrio entre a maximização do *throughput* e a justiça entre os usuários em cada TTI. A função de prioridade do PF é mostrada na Eq. (1). O cálculo da variável K^* é realizada para cada usuário e a atribuição dos RBs da eNodeB para os UEs é baseado no mesmo (Ibraheem, M. A. et al., 2018).

A variável de prioridade K^* é determinada da seguinte forma:

$$K^* = \arg \max_k \left(\frac{d_{k,n}}{(t_c - 1)T_k + \sum_{n=1}^N P_{k,n} d_{k,n}} \right), \quad (1)$$

onde $d_{k,n}$ é a taxa de serviço instantânea do k -ésimo usuário no n -ésimo RB, e é a variável indicadora de atribuição ($P_{k,n} = 1$, se o n -ésimo RB for atribuído ao k -ésimo usuário e $P_{k,n} = 0$ se não for), t_c é o tamanho médio da janela, T_k é a informação de *throughput* médio do k -ésimo usuário e é usado no cálculo do algoritmo para aumentar o índice de justiça. T_k depende do *throughput* médio e é dado por:

$$T_k(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_{k,n}(t) + \frac{1}{t_c}D_k(t), \quad K = K^* \quad (2)$$

$$T_k(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_{k,n}(t), \quad K \neq K^* \quad (3)$$

onde T_k é a matriz que armazena informações sobre o k -ésimo *throughput* médio atribuído ao UE, D_k é o *throughput* que o UE obtém nesse TTI. $K = K^*$ significa que o k -ésimo UE obteve recursos do TTI anterior. T_k é atualizado a cada TTI.

2.5.2. Generalized Proportional Fair

O algoritmo de escalonamento do PF no domínio de tempo (TDS - *Time Domain Scheduling*) foi projetado para sistemas 3G CDMA, onde um usuário é selecionado por vez para a transmissão dos recursos disponíveis na NodeB. Já no algoritmo de escalonamento *Round-Robin* (RR), os usuários são escalonados ciclicamente, independentemente de sua condição do canal, aumentando assim o *throughput* do sistema, mantendo o índice de justiça na alocação de recursos a longo prazo entre os UEs. O escalonador PF aloca o usuário k^* que maximiza a relação de *throughput* instantâneo alcançável sobre o *throughput* médio recebido. Esta abordagem pode ser ampliada para o *Generalized Proportional Fair* (GPF) introduzindo fatores de ponderação $\alpha \in [0;\infty)$ e $\beta \in [0;\infty)$ como segue a equação (4) (Wengerter, C. et al., 2005):

$$P_k(n) = \frac{[d_k(n)]^\alpha}{[R_k(n)]^\beta}, \quad (4)$$

temos também que:

$$K^* = \arg \max_k (P_k(n)), \quad (5)$$

sendo que $[d_k(n)]$ denota o *throughput* instantâneo para o usuário k no tempo n . $R_k(n)$ denota o filtro passa-baixa que representa o *throughput* médio que o usuário k recebeu até o tempo n de acordo com a já conhecida equação (5) ou com a seguinte equação:

$$T_k(t) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_{k,n}(t-1) + \frac{1}{t_c} D_k(t-1), \quad K = K^* \quad (6)$$

com $D_k(t-1)$ representando o *throughput* recebido pelo usuário k no tempo $(t-1)$ e t_c denotando o tempo de resposta do filtro passa-baixa.

Para a equação (4) com uma parametrização de $\alpha = \beta = 1$, obtém-se o algoritmo do PF convencional, que é conhecido por fornecer um bom trade-off entre a justiça na alocação de

recursos e o *throughput* do sistema para diversos usuários. Alterando os parâmetros de α e β na equação (4), o trade-off entre o índice de justiça e o *throughput* do sistema pode ser ajustado. Aumentar α aumentará o *throughput* instantâneo alcançável por $d_k(n)$, o que aumenta a probabilidade de um usuário em boas condições receber alocação de recursos do escalonador. Isso resulta em um maior *throughput* do sistema, mas um menor índice de justiça na alocação dos recursos da eNodeB. Aumentar β aumentará a influência de *throughput* médio para $R_k(n)$, o que implica no aumento da probabilidade de um usuário com menor valor de *throughput* de receber alocação do escalonador. Isso resulta em um maior índice de justiça, mas diminui o *throughput* total do sistema (Wengerter, C. et al., 2005). A função utilizada para o GPF está presente no Apêndice I.

2.5.3. Arithmetic Mean Method

Um dos métodos mais simples é o método da média aritmética (*Arithmetic Mean Method*). O método implementa a média aritmética dos valores anteriores de *throughput* para cálculo do novo estado que será usado para ponderar os novos valores a serem alocados para o usuário. Esse método é calculado conforme equação (7) a seguir:

$$T_k(M + 1) = \frac{\sum_{m=1}^M R_k(m)}{M}, \quad (7)$$

sendo que R_k são os valores de *throughput* dos M estados anteriores.

2.5.4. Midrange Fair Mean Method

Outro método utilizado é o método de intervalo médio (*Midrange Fair Mean Method*). Neste método, considera-se ponderadores para os valores mínimos e máximos de *throughput* calculados, buscando desta forma acrescentar uma maior justiça para usuários que possuem menores valores de *throughput*. A equação (8) que representa este método é dada a seguir:

$$T_k(t + 1) = \frac{a \cdot \min(R_k) + b \cdot \max(R_k)}{(a+b)}, \quad (8)$$

sendo que R_k são os valores de *throughput* dos M estados anteriores, e os valores de a e b são definidos de acordo com o cenário para melhor desempenho do método.

2.6. Considerações finais

Neste capítulo, realizou-se uma breve introdução ao desenvolvimento das redes móveis até a padronização do LTE-A, apresentando conceitos fundamentais relacionados à arquitetura de rede, bem como a técnicas como MIMO, *Carrier Aggregation* e a camada física do LTE. Efetuou-se também uma análise do surgimento das HetNets, suas características e as complexidades que acompanham a utilização dessas redes. Em sequência, foram abordados os modelos de técnicas de Coordenação de Interferência entre Células (ICIC), com foco para as duas técnicas utilizadas nesta pesquisa: eICIC e FeICIC. Por fim, explicou-se a alocação de recursos por meio das métricas utilizadas nos algoritmos de escalonamento que deram origem ao *Proportional Fair* (PF) e, conseqüentemente, ao *Generalized Proportional Fair* (GPF) e desenvolveu-se as equações utilizadas para a geração dos algoritmos *Arithmetic Mean Proportional Fair* (AMPF) e *Midrange Fair Mean Proportional Fair* (MFMPF).

Expõem-se assim a importância da análise de interação de HetNets com os modelos de ICIC e os algoritmos de escalonamento e suas otimizações. Doravante embasamento teórico apresentado neste capítulo e no anterior, nos próximos capítulos explora-se as aplicações deste estudo através de ambientes de simulação para análise de métricas como eficiência espectral e energética, assim como índice de justiça em HetNets com a variação de quantidade de usuários e *picocells*.

3. Metodologia

O objetivo deste capítulo é descrever os métodos e ferramentas utilizados neste trabalho. Será explanado quais foram os ambientes e parâmetros de simulação utilizados, assim como os resultados e métricas analisadas.

3.1. Método de pesquisa

De início, realizou-se a pesquisa bibliográfica e o embasamento teórico a respeito do tema aqui tratado. Foi feita uma coleta de diversos artigos e livros sobre os temas de redes LTE, técnicas de controle de interferência, HetNets e algoritmos de escalonamento. Utilizou-se como base para este trabalho os estudos mencionados na seção de referências, e em especial os artigos de F. Capozzi e Aramide, Samuel O., et al. acerca das técnicas de escalonamento, e o trabalho de Y. Liu sobre a aplicação de Teoria dos Jogos em redes HetNets e a disponibilização do código base que permitiu o início deste projeto.

Assim, tem-se como objetivo a análise do algoritmo de escalonamento GPF em redes HetNets LTE em ambientes sem e com técnicas de coordenação de interferência (técnicas eICIC e FeICIC). É também escopo deste trabalho a implementação de duas variações do PF utilizando-se da média aritmética e geométrica do UE nos cálculos do GPF, assim como uma análise comparativa de acordo com a densificação da rede, variando-se quantidade de usuários e quantidade de *picocells* utilizadas na simulação de uma rede LTE HetNet. Para tal foi usado como base, conforme discorrido acima, os códigos do MATLAB disponibilizados pelo trabalho de Y. Liu. Para as variações do GPF foram utilizados os métodos de *Arithmetic Mean Method* e *Midrange Fair Mean Method* descritos no capítulo anterior na equação do PF para adicionar parâmetros visando uma convergência mais rápida e justa dos algoritmos de escalonamento.

3.1.1. Arithmetic Mean Proportional Fair

A junção do método *Arithmetic Mean Method* na equação do PF foi denominado para o escopo deste trabalho de *Arithmetic Mean Proportional Fair* (AMPF). Para o escopo deste trabalho,

o AMPF foi utilizado em cenário sem e com técnicas de coordenação de interferência (eICIC e FeICIC). Assim, utilizando a equação (9) do GPF:

$$T_k(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_k(t) + \frac{1}{tc}D_k(t), \quad K = K^*, \quad (9)$$

sendo $T_k(t)$ a média aritmética conforme a seguir,

$$T_k(t) = \frac{\sum_{m=1}^M R_k(m)}{M}, \quad (10)$$

assim, a equação (11) resultante do AMPF ficou conforme a seguir,

$$T_k(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)\frac{\sum_{m=1}^M R_k(m)}{M} + \frac{1}{tc}D_k(t), \quad K = K^*, \quad (11)$$

A função utilizada para o GPF está presente no Apêndice II.

3.1.2. Midrange Fair Mean Proportional Fair

A junção do método *Midrange Fair Mean Method* na equação do PF foi denominado para o escopo deste trabalho de *Midrange Fair Mean Proportional Fair* (MFMPF). No estudo deste projeto, o MFMPF foi utilizado em cenário sem e com técnicas de coordenação de interferência (eICIC e FeICIC). Deste modo, utilizando a equação (9) do GPF:

$$T_k(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)T_k(t) + \frac{1}{tc}D_k(t), \quad K = K^*$$

sendo $T_k(t)$ o intervalo médio ponderado conforme a seguir,

$$T_k(t + 1) = \frac{a \cdot \min(R_k) + b \cdot \max(R_k)}{(a+b)}, \quad (12)$$

assim, a equação (13) resultante do MFMPF é,

$$T_k(t + 1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) \frac{a \cdot \min(R_k) + b \cdot \max(R_k)}{(a+b)} + \frac{1}{t_c} D_k(t), \quad K = K * \quad (13)$$

Neste caso, os valores de a e b que trouxeram melhores performances para as simulações foi de 9 e 1, consecutivamente. A função utilizada para o GPF está presente no Apêndice III.

3.2. Ambiente de simulação

Os ambientes criados para a simulação desta rede HetNet LTE são constituídos de 7 *clusters* com células LTE. Cada *cluster* é composto de 19 hexágonos, sendo que cada hexágono representa a área de cobertura de uma *macrocell*, tendo em seu centro uma eNodeB. Desta forma, tem-se o *cluster* principal, onde são alocados as *picocells* e os UEs e para complemento da simulação, tentando chegar o mais próximo possível de uma rede real, são inseridos 6 *clusters* vizinhos ao principal, para geração de cenários com cálculos de interferência, por exemplo. Todos os 7 *clusters* são iguais, sendo que os 6 *clusters* vizinhos são uma cópia exata do *cluster* principal.

Assim, dentro de cada hexágono são alocados as *picocells* e os UEs de acordo com a configuração proposta para a simulação. Para este trabalho variou-se de 1 a 4 a quantidade de *picocells* e entre 10 e 20 a quantidade de usuários. As *picocells* e os usuários são alocados aleatoriamente dentro dos hexágonos, sendo que obedecem uma regra de distância mínima conforme Tabela 3. Para a distribuição dos usuários, primeiramente é realizada uma divisão com razão 2. Desta forma, metade dos usuários serão postos a até 100 metros da *picocell* e a outra metade será distribuída a distâncias maiores dentro do hexágono. Para o caso de uma quantidade de *picocell* $p > 1$, o grupo que foi alocado próximo às *picocells* será novamente dividido pelo valor de p , de forma que toda *picocell* terá um grupo de usuários a menos de 100 metros de si. No exemplo da Figura 17, utilizou-se uma quantidade de 20 usuários e 2 *picocell* para a simulação, desta forma, a menos de 100 metros das *picocells* tem-se 10 usuários alocados, sendo que os outros 10 foram alocados de forma aleatória dentro da cobertura da *macrocell*.

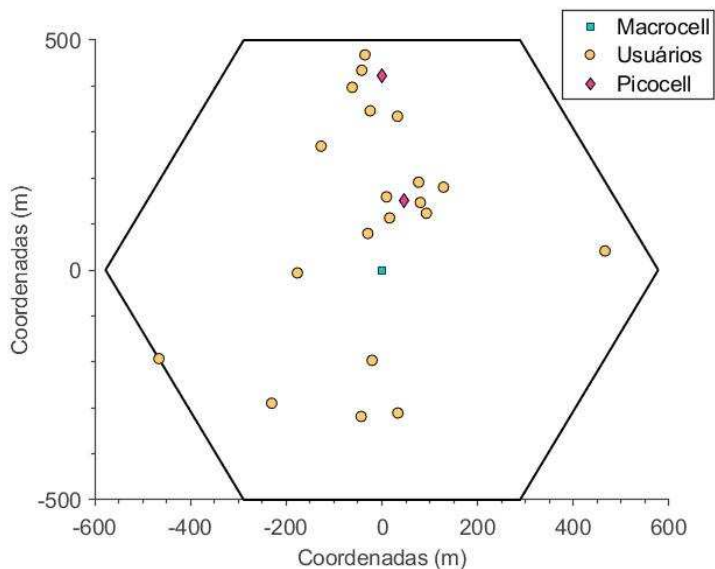
Tabela 3 - Parâmetros utilizados para construção das topologias e simulação no MATLAB.

Parâmetro	Valor
Geometria da célula	Hexagonal
Número de clusters	7
Número de células por cluster	19
Número de topologias criada	10
Iterações para cada topologia	500
Distância entre macrocells	1000 m
Distância mínima entre picocells	40 m
Distância mínima da macrocell para um usuário	35 m
Distância mínima da picocell para um usuário	10 m
Distância mínima entre macrocell e picocell	75 m
Potência da macrocell	40 W
Potência da picocell	1 W
Densidade de ruído térmico	-174 dBm/Hz
Figura de ruído	9 dB
Duração por subframe	1 ms
Largura de banda do RB	180 kHz
Valores de CSB	$C = \{0, 3, 6, 9, 12, 15\}$ dB
Perda de propagação	10 dB
Perda de percurso da macrocell para um usuário	$128.1 \pm 37.6 \log_{10} d$, d em km
Perda de percurso da picocell para um usuário	$140.7 \pm 36.7 \log_{10} d$, d em km
Escalonador	GPF, AMPF, MFMPF
Técnicas de ICIC	eICIC e FeICIC

Desta forma, um exemplo do cenário de simulação é dado pela Figura 18. Esta imagem foi gerada no próprio MATLAB em um dos cenários de simulação para mostrar de forma mais clara uma das configurações de rede utilizadas no estudo. No exemplo desta topologia, temos a simulação realizada com 2 *picocells* para cada macro. Cada cluster está representado por uma cor diferente e

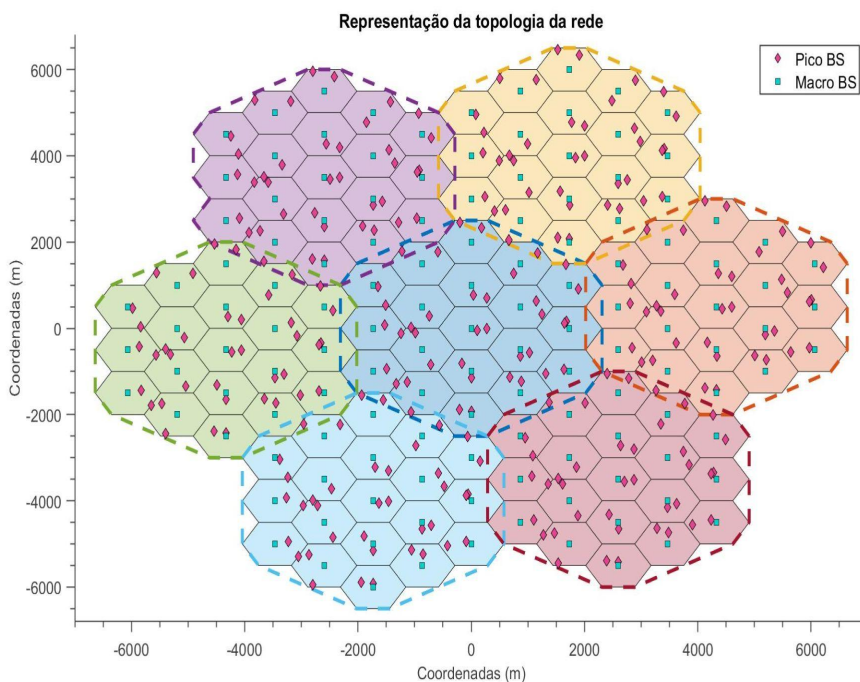
contém os 19 hexágonos que representam as 19 *macrocells* pertencentes à topologia. Os usuários foram retirados da Figura 18 para maior clareza de imagem.

Figura 17: Representação de construção do ambiente de simulação para alocação de usuários e *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

Figura 18: Representação da topologia de rede gerada pelo código do MATLAB.



FONTE: Autoria própria.

Portanto, para a análise de cada cenário são geradas 10 topologias e 500 iterações são realizadas para cada topologia. Assim, usando como base cada um desses cenários, topologias e iterações gerados são feitos os cálculos para cada escalonador, levando em consideração o ambiente sem técnica de controle de interferência, com o eICIC e com o FeICIC. Por fim, os resultados são obtidos realizando-se os cálculos em cima da média desses valores.

3.3. Métricas analisadas

Para os cenários simulados, analisou-se as seguintes métricas: eficiência espectral, que é a medida de eficiência do sistema relacionado à quantidade de *bits* trafegados por largura de banda utilizada; eficiência energética, que é a medida de eficiência do sistema relacionado à quantidade de *bits* trafegados em relação à quantidade de *joules* consumidos; e o índice de justiça, que é a métrica que mede a distribuição de recursos alocados por aquela estação para os UEs que a estão utilizando. A otimização de tais métricas é de extrema relevância para a evolução das redes celulares. A eficiência espectral trás a maximização dos recursos das operadoras, devido à escassez do espectro de radiofrequência, que é um recurso finito, proporcionando uma redução do congestionamento das redes e por consequência uma melhor experiência para o usuário. A eficiência energética busca a otimização dos custos operacionais, auxilia na sustentabilidade ambiental e melhora a experiência do usuário com a diminuição do consumo da bateria dos aparelhos móveis. Por fim, o índice de justiça mede a equidade de distribuição dos recursos da rede, novamente em busca de uma melhor experiência do usuário, diminuindo a disparidade entre os aparelhos que utilizam aquela rede.

3.4. Considerações finais

Desta forma, baseado na literatura e na metodologia previamente descritas, e em conjunto com as métricas e técnicas mencionadas, realizou-se uma análise dos resultados obtidos através de simulações feitas no MATLAB conforme descrito no capítulo a seguir.

4. Resultados e discussões

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos através das simulações pelo *software* do MATLAB. A análise terá como foco os parâmetros citados em capítulos anteriores, baseando-se em variações de cenários por quantidade de *picocell* e usuários, o uso ou não de técnicas de coordenação de interferência, assim como o estudo de três diferentes algoritmos de escalonamento. As análises para a eficiência energética e eficiência espectral são realizadas baseadas em dois cenários: mantendo-se fixo o número de usuários e variando-se as *picocells*; e mantendo-se fixo o número de *picocells* e variando a quantidade de usuários.

4.1. Eficiência Energética

Neste tópico realiza-se uma análise dos valores e gráficos obtidos das simulações para a métrica de eficiência energética. Tem-se por objetivo o estudo de qual escalonador, combinado ou não com uma técnica de coordenação de interferência possui maior eficiência na economia de energia de transmissão.

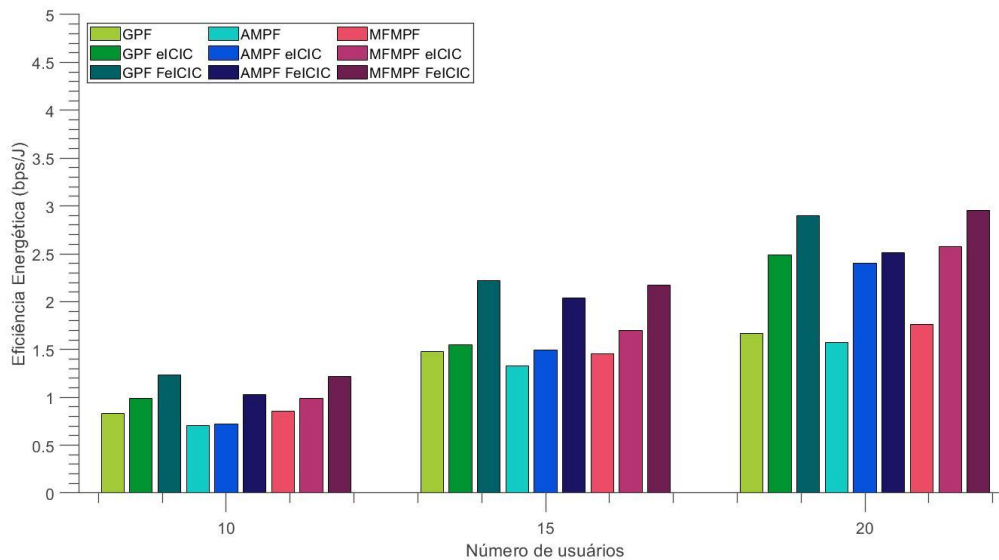
4.1.1. Cenário 1: variação da quantidade de usuários

Para este primeiro cenário, analisou-se a eficiência energética mantendo-se fixo a quantidade de *picocells* e variando a quantidade de usuários para cada simulação. Os estudos foram feitos em cima da implementação das variações do escalonador GFP: AMPF e MFMPF em situações sem e com técnicas de coordenação de interferência. É possível identificar nas tabelas e figuras a seguir, quando há o uso de ICIC, as técnicas utilizadas “eICIC” e “FeICIC” em conjunto com os escalonadores citados. É possível averiguar na Tabela 4 e Figura 19 os valores obtidos de eficiência energética para a simulação realizada variando-se os usuários e mantendo fixo a quantidade de *picocell* para cada *macrocell* em 1. Neste caso, tem-se o reuso espectral para a *picocell*, mas a densificação da rede ainda não é muito acentuada devido a presença de apenas 1 *picocell* por *macro*.

Tabela 4. Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 1 o número de *picocells*.

Quantidade de usuários	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
10	0,828	0,988	1,232	0,704	0,721	1,030	0,854	0,990	1,217
15	1,475	1,548	2,219	1,326	1,497	2,038	1,458	1,699	2,170
20	1,666	2,485	2,898	1,577	2,399	2,508	1,761	2,574	2,950

Figura 19: Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 1 o número de *picocells*.



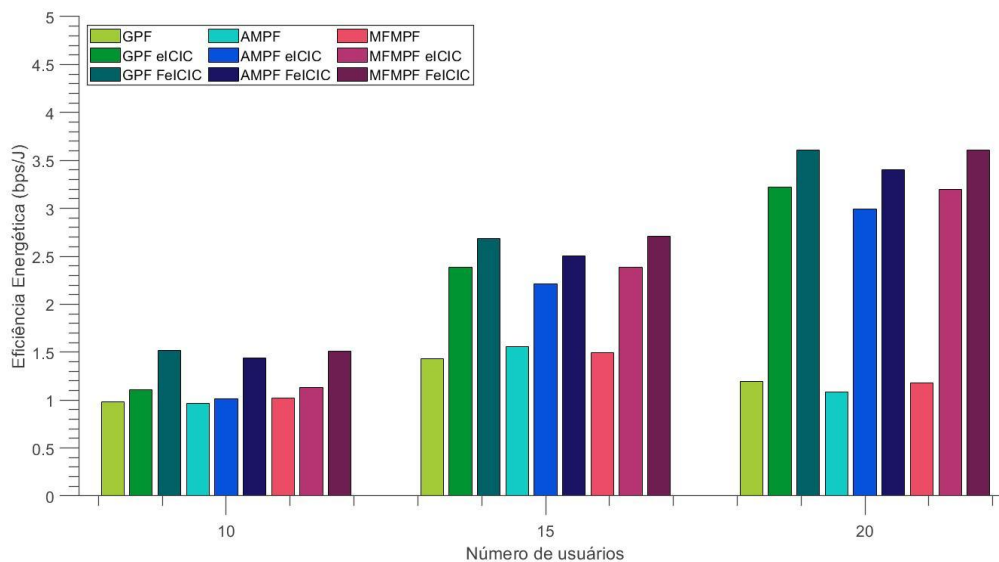
FONTE: Autoria própria.

Na Tabela 5 e na Figura 20, tem-se os valores obtidos de eficiência energética para a simulação realizada variando-se os usuários e mantendo fixo a quantidade de *picocells* para cada *macrocell* em 2.

Tabela 5 - Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 2 o número de *picocells*.

Quantidade de usuários	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
10	0,982	1,109	1,517	0,966	1,013	1,441	1,018	1,132	1,512
15	1,435	2,383	2,682	1,554	2,209	2,504	1,493	2,385	2,707
20	1,194	3,225	3,605	1,085	2,991	3,403	1,179	3,194	3,606

Figura 20: Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 2 o número de *picocells*.



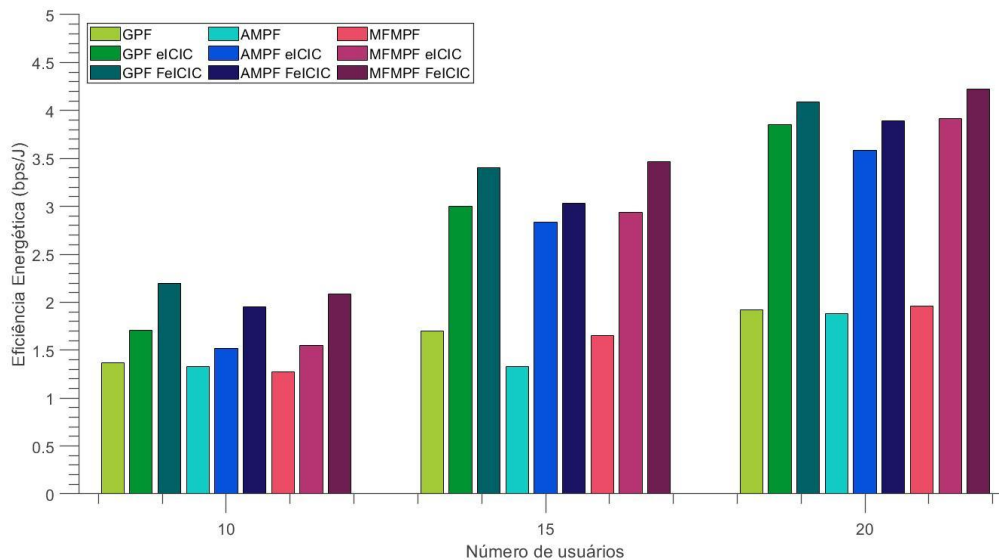
FONTE: Autoria própria.

Na Tabela 6 e na Figura 21, tem-se os valores obtidos de eficiência energética para a simulação realizada variando-se os usuários e mantendo fixo a quantidade de *picocells* para cada *macrocell* em 3.

Tabela 6 - Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 3 o número de *picocells*.

Quantidade de usuários	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
10	1,365	1,704	2,200	1,328	1,521	1,954	1,273	1,549	2,085
15	1,696	3,000	3,400	1,326	2,832	3,031	1,649	2,936	3,470
20	1,921	3,852	4,089	1,883	3,587	3,891	1,962	3,914	4,220

Figura 21: Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 3 o número de *picocells*.



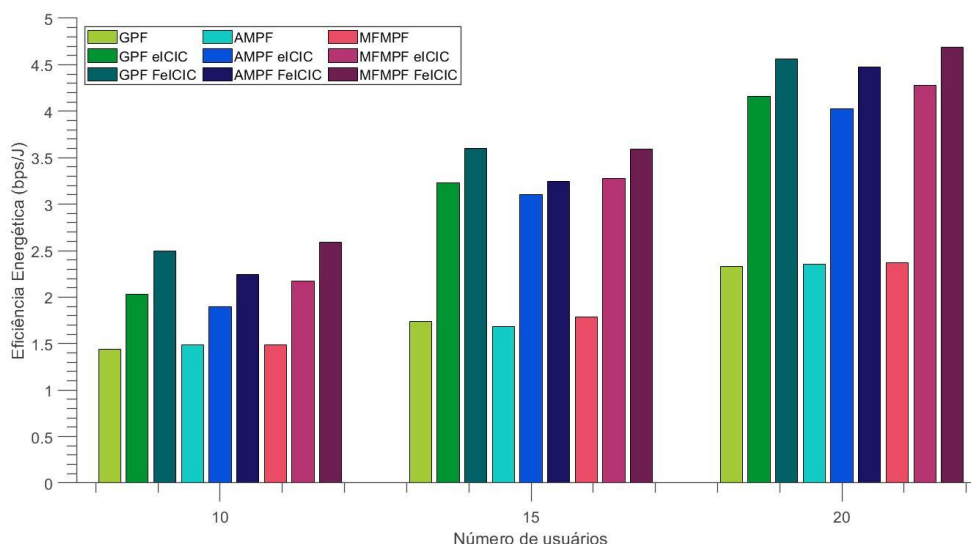
FONTE: Autoria própria.

E, por fim, na Tabela 7 e na Figura 22, tem-se os valores obtidos de eficiência energética para a simulação realizada variando-se os usuários e mantendo fixo a quantidade de *picocells* para cada *macrocell* em 4.

Tabela 7 - Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 4 o número de *picocells*.

Quantidade de usuários	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
10	1,441	2,028	2,499	1,484	1,900	2,242	1,483	2,174	2,588
15	1,741	3,228	3,599	1,684	3,100	3,242	1,783	3,274	3,588
20	2,333	4,159	4,561	2,352	4,025	4,473	2,370	4,281	4,689

Figura 22: Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 4 o número de *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

É evidente, analisando as informações obtidas, que há um ganho significativo em eficiência energética, independente do escalonador utilizado, ao valer-se das técnicas de ICIC para os cenários simulados. É apropriado citar também que quanto maior a densificação da rede, ou seja, quanto maior a quantidade de *picocells* e de usuários presentes, mais expressivo é o ganho de cenários com utilização das técnicas de coordenação de interferência. Ainda neste sentido, é válido observar que apesar de ter apresentado uma diferença por uma pequena margem, o MFMPF obteve maior eficiência energética em cenários de maior densidade de rede se comparado aos outros dois escalonadores, enquanto o AMPF manteve-se sempre abaixo em eficiência se comparado ao GPF e MFMPF.

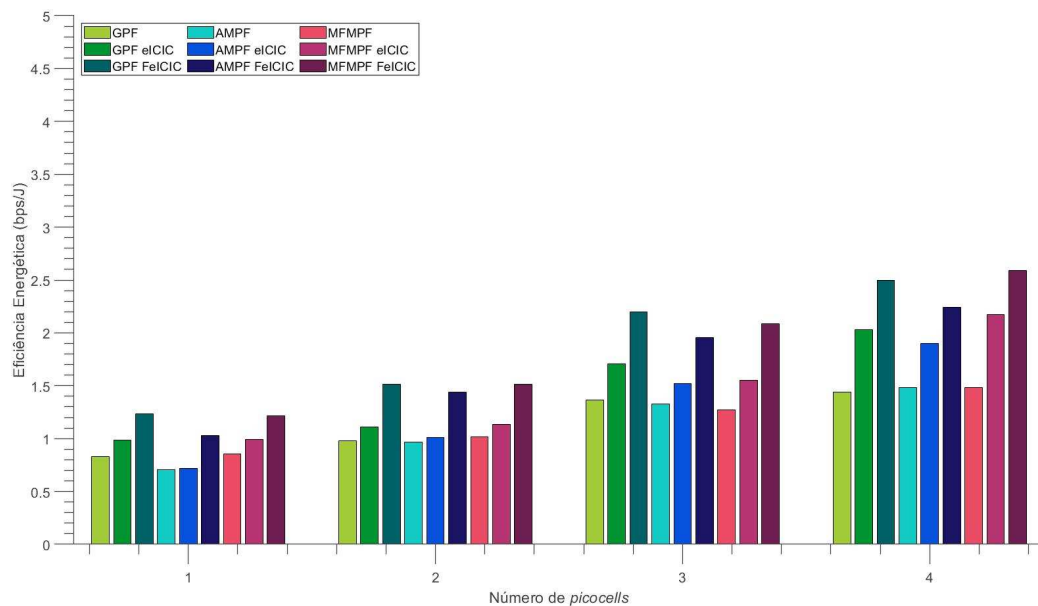
4.1.2. Cenário 2: variação da quantidade de *picocells*

Para este cenário 2, estuda-se para a mesma métrica de eficiência energética, mas alterando a óptica de análise ao manter-se fixo a quantidade de usuários e variar de 1 à 4 *picocells* para as simulações. Os resultados obtidos de eficiência energética são mostrados na Tabela 8 e Figura 23 para um número fixo de 10 usuários e variando-se a quantidade de *picocells*.

Tabela 8 - Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 10 o número de usuários.

Quantidade de picocells	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
1	0,828	0,988	1,232	0,704	0,721	1,030	0,854	0,990	1,217
2	0,982	1,109	1,517	0,966	1,013	1,441	1,018	1,132	1,512
3	1,365	1,704	2,200	1,328	1,521	1,954	1,273	1,549	2,085
4	1,441	2,028	2,499	1,484	1,900	2,242	1,483	2,174	2,588

Figura 23: Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 10 o número de usuários.



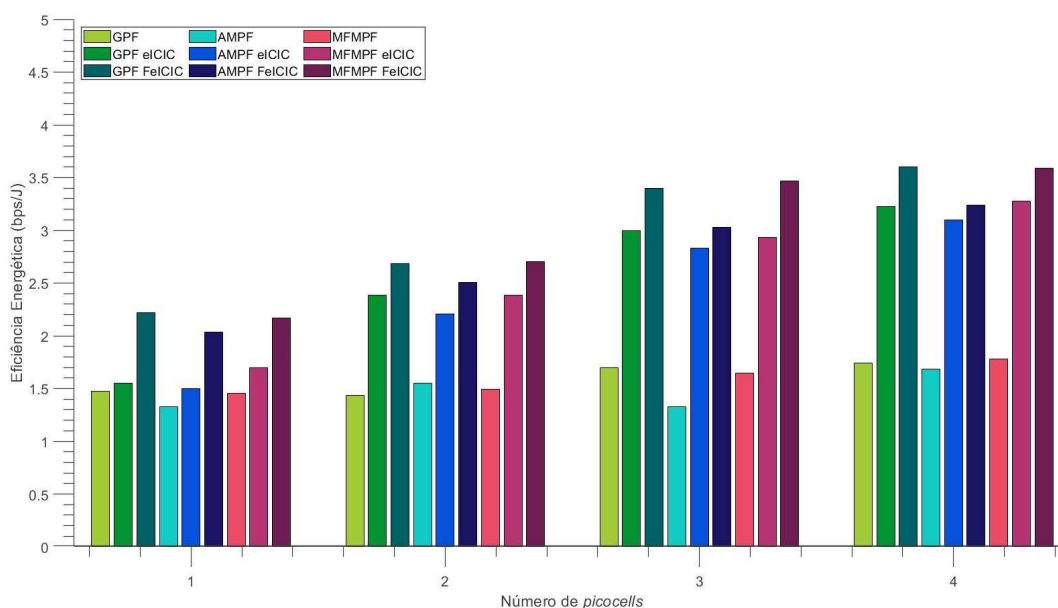
FONTE: Autoria própria.

Na Tabela 9 e na Figura 24, tem-se os resultados obtidos de eficiência energética para um número fixo de 15 usuários e variando-se a quantidade de *picocells*.

Tabela 9 - Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 15 o número de usuários.

Quantidade de picocells	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
1	1,475	1,548	2,219	1,326	1,497	2,038	1,458	1,699	2,170
2	1,435	2,383	2,682	1,554	2,209	2,504	1,493	2,385	2,707
3	1,696	3,000	3,400	1,326	2,832	3,031	1,649	2,936	3,470
4	1,741	3,228	3,599	1,684	3,100	3,242	1,783	3,274	3,588

Figura 24: Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 15 o número de usuários.



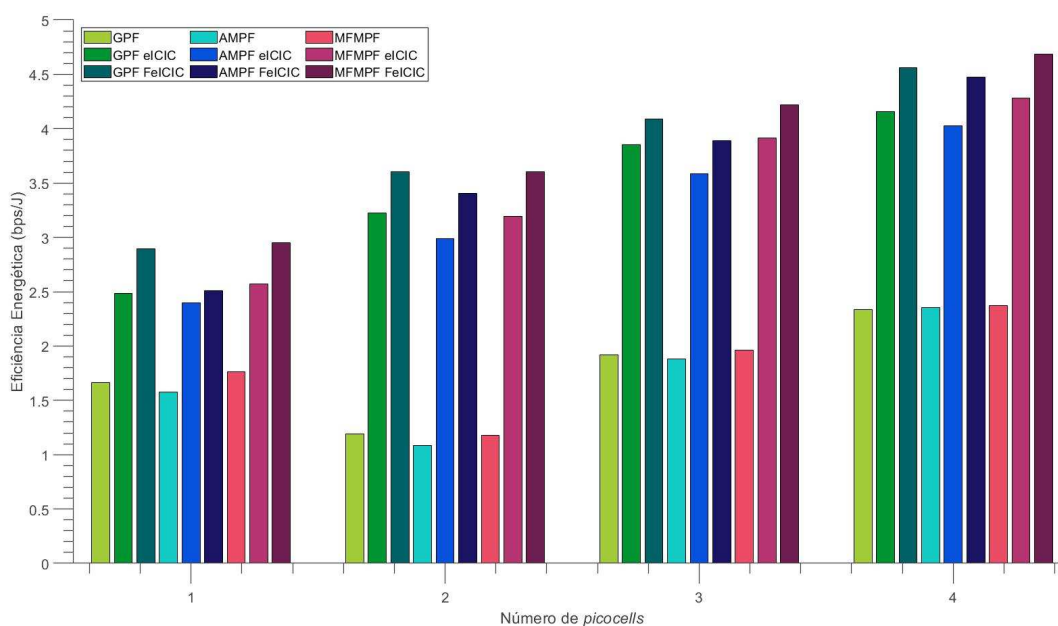
FONTE: Autoria própria.

E, por fim, na Tabela 10 e na Figura 25, tem-se os resultados obtidos de eficiência energética para um número fixo de 20 usuários e variando-se a quantidade de *picocells*.

Tabela 10 - Valores obtidos de eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 20 o número de usuários.

Quantidade de picocells	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
1	1,666	2,485	2,898	1,577	2,399	2,508	1,761	2,574	2,950
2	1,194	3,225	3,605	1,085	2,991	3,403	1,179	3,194	3,606
3	1,921	3,852	4,089	1,883	3,587	3,891	1,962	3,914	4,220
4	2,333	4,159	4,561	2,352	4,025	4,473	2,370	4,281	4,689

Figura 25: Eficiência energética em (bps/J) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 20 o número de usuários.



FONTE: Autoria própria.

No estudo deste segundo cenário é possível comprovar novamente a superioridade do uso de técnicas de ICIC na densificação da rede celular. Em todas as simulações obtiveram-se resultados superiores para o eICIC e FeICIC se comparado com o ambiente sem qualquer tipo de ICIC, independente do escalonador utilizado. É possível ver também que quanto maior a densificação, maior a vantagem do uso de técnicas ICIC, por exemplo, analisando o GPF para o cenário de 1 *picocell* e 10 usuários tem-se um ganho de 48,79% do FeICIC se comparado com o cenário de

simulação sem técnicas ICIC; já para 4 *picocells* e 20 usuários (o cenário de maior densificação analisado) este ganho chega a 95,49%. O mesmo ocorre para o MFMPF, para o cenário de 1 *picocell* e 10 usuários, tem-se um ganho de 42,50% de ganho de utilização do FeICIC para o cenário sem técnicas ICIC, e para o cenário de maior densificação este ganho chega a 97,84%, corroborando a superioridade do uso de técnicas de ICIC em HetNets para a métrica de eficiência energética. Correlacionando os dois escalonadores com maior eficiência energética, o GPF FeICIC apresenta melhores resultados em redes com menor densificação (cenário de 1 *picocell* e 10 usuários) com ganho de 0,12% se comparado com o MFMPF FeICIC. Em redes com maior densificação (cenário com 4 *picocell* e 20 usuários), o MFMPF FeICIC apresentou ganho de 0,28% se comparado com o GPF FeICIC.

4.2. Eficiência Espectral

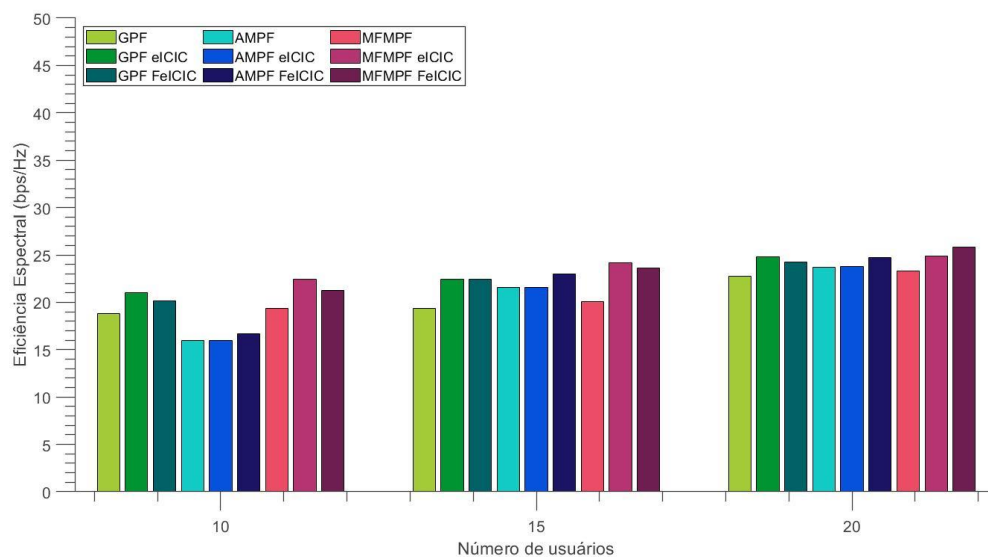
4.2.1. Cenário 1: variação da quantidade de usuários

Semelhante ao que foi feito para a métrica de eficiência energética, nesta seção analisa-se os resultados obtidos de eficiência espectral das simulações no cenário em que manteve-se fixo a quantidade de *picocells* e variou-se o número de usuários. Novamente, os estudos foram feitos em cima da implementação do escalonador GPF e de suas variações AMPF e MFMPF em situações sem e com técnicas de coordenação de interferência. Assim, é possível averiguar na Tabela 11 e Figura 26 os valores obtidos de eficiência espectral para a simulação realizada variando-se os usuários e mantendo fixo a quantidade de *picocells* para cada *macrocell* em 1.

Tabela 11 - Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 1 o número de *picocells*.

Quantidade de usuários	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
10	18,794	21,053	20,119	15,975	15,985	16,649	19,362	22,402	21,285
15	19,351	22,423	22,407	21,593	21,594	23,024	20,093	24,141	23,654
20	22,784	24,814	24,260	23,666	23,766	24,700	23,266	24,900	25,808

Figura 26: Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 1 o número de *picocells*.



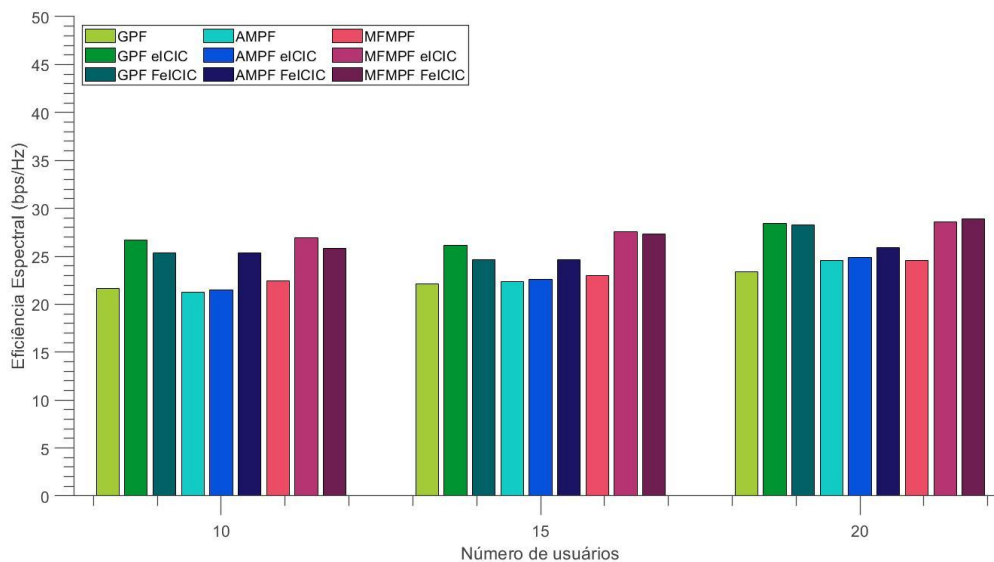
FONTE: Autoria própria.

Na Tabela 12 e na Figura 27, tem-se os valores obtidos de eficiência espectral para a simulação realizada variando-se os usuários e mantendo fixo a quantidade de *picocells* para cada *macrocell* em 2.

Tabela 12 - Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 2 o número de *picocells*.

Quantidade de usuários	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
10	21,609	26,658	25,329	21,261	21,475	25,384	22,427	26,949	25,807
15	22,156	26,168	24,672	22,379	22,586	24,630	22,962	27,553	27,305
20	23,384	28,406	28,282	24,584	24,902	25,900	24,580	28,589	28,937

Figura 27: Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 2 o número de *picocells*.



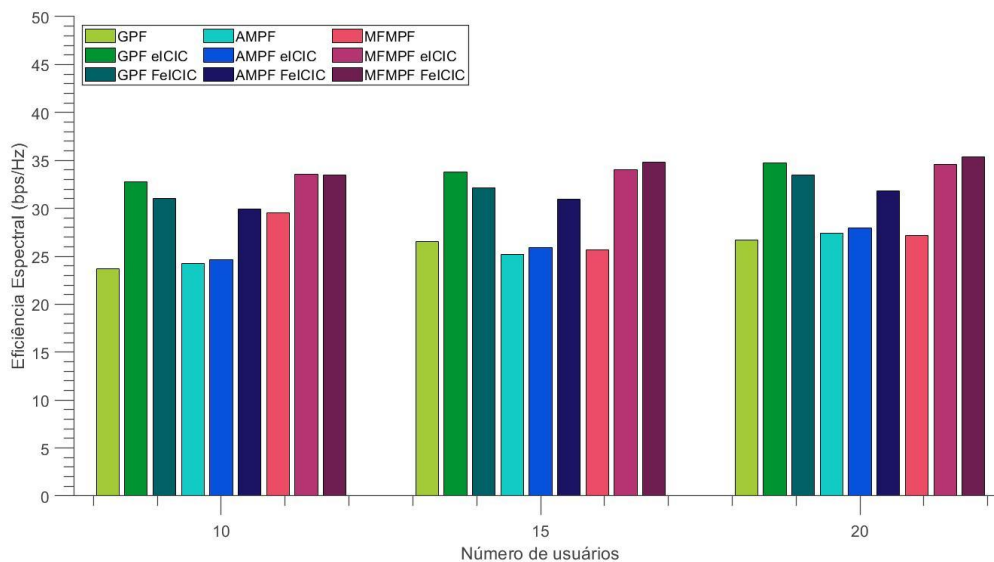
FONTE: Autoria própria.

Na Tabela 13 e na Figura 28, tem-se os valores obtidos de eficiência espectral para a simulação realizada variando-se os usuários e mantendo fixo a quantidade de *picocells* para cada *macrocell* em 3.

Tabela 13 - Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 3 o número de *picocells*.

Quantidade de usuários	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
10	23,661	32,734	31,042	24,230	24,677	29,906	29,542	33,560	33,459
15	26,513	33,766	32,158	25,205	25,936	30,926	25,644	34,029	34,783
20	26,701	34,710	33,502	27,412	27,987	31,817	27,175	34,577	35,407

Figura 28: Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 3 o número de *picocells*.



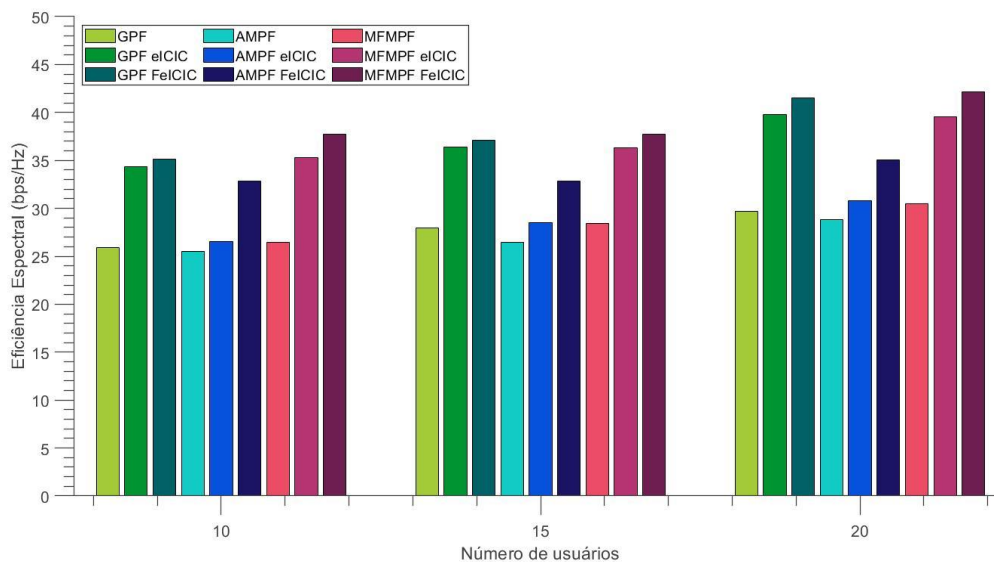
FONTE: Autoria própria.

Na Tabela 14 e na Figura 29, tem-se os valores obtidos de eficiência espectral para a simulação realizada variando-se os usuários e mantendo fixo a quantidade de *picocells* para cada *macrocell* em 4.

Tabela 14 - Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 4 o número de *picocells*.

Quantidade de usuários	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
10	25,891	34,677	35,001	25,023	26,129	32,907	26,275	35,071	37,108
15	27,943	36,364	37,111	26,480	28,539	32,827	28,455	36,321	37,725
20	29,728	39,770	41,489	28,797	30,797	35,044	30,488	39,558	42,188

Figura 29: Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de usuários e fixando em 4 o número de *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

Novamente, é possível analisar o ganho em eficiência com a utilização de técnicas de ICIC se comparado com cenário no qual não há a utilização de qualquer técnica de controle de interferência. É válido notar, porém, que diferentemente da eficiência energética na qual a técnica de FeICIC se distinguiu em todos os cenários, neste caso de eficiência espectral o eICIC se sobressaiu ao FeICIC para situações de baixa densidade de rede para os escalonadores GPF e MFMPF. Apesar disso, ao continuar o estudo para a esfera de densificação celular o FeICIC volta a se evidenciar, independente do escalonador utilizado. Mais uma vez, tem-se o escalonador AMPF aquém em termos de eficiência espectral e o MFMPF teve ligeiros ganhos em relação ao GPF em situações de maior densidade de rede.

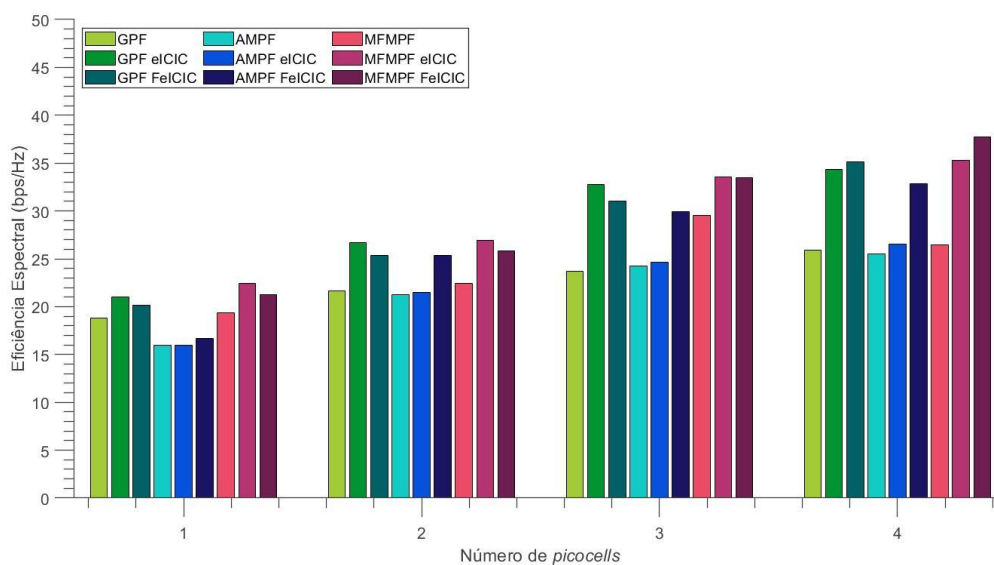
4.2.2. Cenário 2: variação da quantidade de *picocells*

Para este cenário 2, estuda-se a métrica de eficiência espectral, mais uma vez alterando a óptica de análise ao manter-se fixo a quantidade de usuários e variar de 1 à 4 *picocells* para as simulações. Os resultados obtidos de eficiência espectral são mostrados na Tabela 15 e Figura 30 para um número fixo de 10 usuários e variando-se a quantidade de *picocells*.

Tabela 15 - Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 10 o número de usuários.

Quantidade de <i>picocells</i>	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
1	18,794	21,053	20,119	15,975	15,985	16,649	19,362	22,402	21,285
2	21,609	26,658	25,329	21,261	21,475	25,384	22,427	26,949	25,807
3	23,661	32,734	31,042	24,230	24,677	29,906	29,542	33,560	33,459
4	25,891	34,677	35,001	25,023	26,129	32,907	26,275	35,071	37,108

Figura 30: Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 10 o número de usuários.



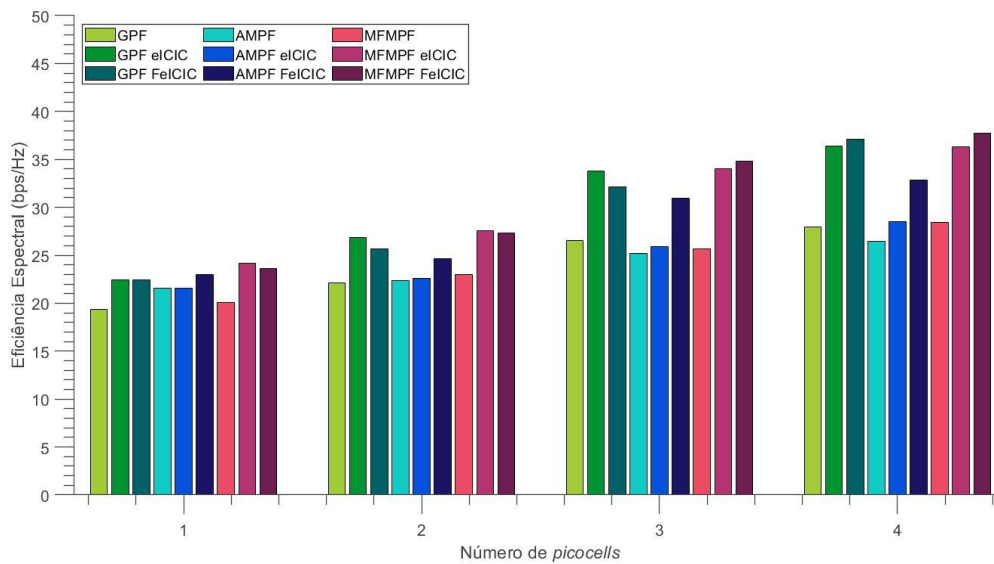
FONTE: Autoria própria.

Na Tabela 16 e na Figura 31, tem-se os resultados obtidos de eficiência espectral para um número fixo de 15 usuários e variando-se a quantidade de *picocells*.

Tabela 16 - Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 15 o número de usuários.

Quantidade de picocells	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
1	19,351	22,423	22,407	21,593	21,594	23,024	20,093	24,141	23,654
2	22,156	26,868	25,672	22,379	22,586	24,630	22,962	27,553	27,305
3	26,513	33,766	32,158	25,205	25,936	30,926	25,644	34,029	34,783
4	27,943	36,364	37,111	26,480	28,539	32,827	28,455	36,321	37,725

Figura 31: Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 15 o número de usuários.



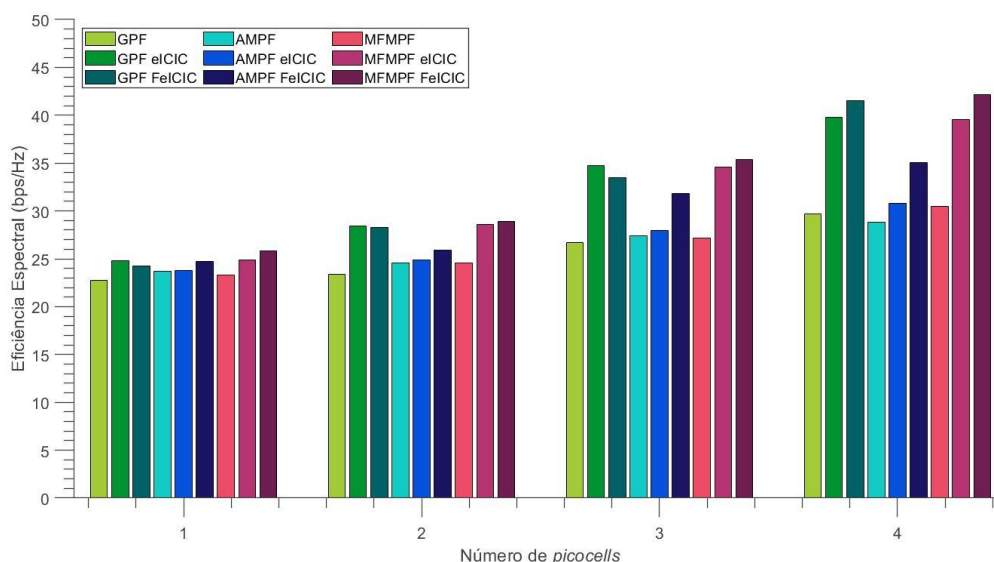
FONTE: Autoria própria.

E, por fim, na Tabela 17 e na Figura 32, tem-se os resultados obtidos de eficiência espectral para um número fixo de 20 usuários e variando-se a quantidade de *picocells*.

Tabela 17 - Valores obtidos de eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 20 o número de usuários.

Quantidade de picocells	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
1	22,784	24,814	24,260	23,666	23,766	24,700	23,266	24,900	25,808
2	23,384	28,406	28,282	24,584	24,902	25,900	24,580	28,589	28,937
3	26,701	34,710	33,502	27,412	27,987	31,817	27,175	34,577	35,407
4	29,728	39,770	41,489	28,797	30,797	35,044	30,488	39,558	42,188

Figura 32: Eficiência espectral em (bps/Hz) variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 20 o número de usuários.



FONTE: Autoria própria.

É possível reafirmar através da análise dos resultados obtidos o ganho proporcionado pelas técnicas de ICIC se comparado ao cenário sem utilização de técnicas de coordenação de interferência. Assim, visualiza-se com maior clareza que em cenários de baixa densidade há uma superioridade de eficiência para os escalonadores ao utilizar-se do eICIC, e em cenários com maior densidade celular essa superioridade passa a ser do FeICIC sendo que este *threshold* de transição varia de acordo com o escalonador. Pode-se sustentar que os escalonadores GPF e MFMPF têm desempenhos quase idênticos, enquanto que o AMPF mantém-se inferior também para a métrica de eficiência espectral.

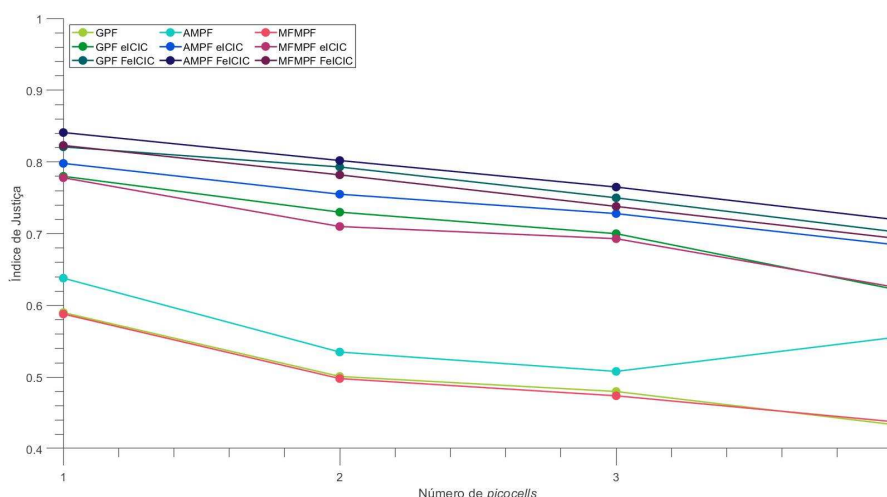
4.3. Índice de justiça

Para a análise do índice de justiça, foi escolhido o cenário de 20 usuários fixos com a variação da quantidade de *picocells*. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 18 e Figura 33 a seguir.

Tabela 18 - Valores obtidos para índice de justiça variando-se a quantidade de *picocells* e fixando em 20 o número de usuários.

Quantidade de picocells	GPF	GPF eICIC	GPF FeICIC	AMPF	AMPF eICIC	AMPF FeICIC	MFMPF	MFMPF eICIC	MFMPF FeICIC
1	0,590	0,780	0,821	0,638	0,798	0,841	0,588	0,778	0,823
2	0,501	0,730	0,793	0,535	0,755	0,802	0,498	0,710	0,782
3	0,480	0,700	0,750	0,508	0,728	0,765	0,474	0,693	0,738
4	0,434	0,623	0,703	0,555	0,685	0,720	0,438	0,626	0,694

Figura 33: Índice de justiça variando a quantidade de *picocells* e fixando em 20 o número de usuários.



FONTE: Autoria própria.

Para o índice de justiça, em quase todos os cenários há uma predominância de valores mais justos ao utilizar-se o escalonador AMPF. Já os valores para o GPF e MFMPF são muito próximos e

variam em pequena escala de acordo com os valores simulados de usuários e *picocells*. É possível constatar também que conforme mais acentuado o nível de densidade da rede, menor é o índice de justiça entregue pelos escalonadores, independente de utilizar-se ou não as técnicas ICIC. Foi observado um aumento do índice de justiça para o cenário de 4 *picocells* utilizando-se o AMPF com FeICIC. Tal resultado não comporta-se como esperado e acredita-se que isso pode ser devido ao limitante de recurso computacional (não permitindo que fosse utilizados quantidades maiores de topologias e iterações para os ambientes de simulação).

4.4. Considerações Finais

Desta forma, foi possível constatar que nos cenários representados por este estudo, principalmente levando em consideração ambientes com maior densificação da rede celular, a combinação dos escalonadores com técnicas ICIC apresentaram melhores resultados em relação à eficiência espectral e energética da rede. É válido evidenciar também a performance superior do FeICIC em relação ao eICIC. Conforme literatura, a utilização do RP-ABS para cenários de maior densificação de fato traz melhores resultados.

Analisando os escalonadores, foi possível averiguar que o AMPF apresentou bons resultados apenas para a métrica de índice de justiça, ficando aquém dos outros dois escalonadores na análise das variáveis de eficiência espectral e energética em praticamente todos os cenários. Já entre os escalonadores GPF e MFMPF, tem-se uma semelhança de performance em cenários de baixa densidade, com o MFMPF sobressaindo-se por uma margem bem pequena conforme maior densificação da rede celular para as métricas de eficiência espectral e energética. Porém, o MFMPF fica ligeiramente aquém do GPF nos resultados obtidos para o índice de justiça. No geral ambos escalonadores apresentam resultados bem semelhantes, sendo que cada um seria mais favorável a ser utilizado de acordo com a densificação celular.

5. Conclusão

Este estudo propõe a investigação de estratégias de *Inter-Cell Interference Coordination* (ICIC) atuando em conjunto com algoritmos de escalonamento no downlink do LTE-A em uma topologia de rede heterogênea. É delineada uma meticulosa análise comparativa entre as abordagens eICIC e FeICIC, bem como uma exploração detalhada da aprimoração dos algoritmos *Proportional Fair* (PF) e *Generic Proportional Fair* (GPF), além da implementação de duas variações do GPF.

Os resultados derivados de simulações revelam que ambas as vertentes de ICIC alcançam um desempenho mais notável quando associadas aos algoritmos *Generic Proportional Fair* (GPF) e *Midrange Fair Mean Method Proportional Fair* (MFMPF). Notavelmente, a FeICIC revela-se exponencialmente mais eficaz em cenários de redes mais densificadas, contrastando com a eICIC, que se sobressai em ambientes com menor número de *picocells*. Estes aprimoramentos se manifestam não apenas nas eficiências espectrais e energéticas, mas também no índice de justiça na alocação de recursos para os usuários.

Assim, a adaptação das técnicas de ICIC aos algoritmos GPF e MFMPF apresentam-se como uma escolha sensata diante do cenário de redes heterogêneas. Além disso, é importante considerar a exploração de outros algoritmos de escalonamento em conjunto com as abordagens eICIC e FeICIC. Desta forma, para trabalhos futuros visa-se estudar e analisar outros algoritmos em ambientes mais próximos de uma rede urbana real, aumentando a quantidade de estações servidoras e também a quantidade de usuários, para explorar os ganhos de tais algoritmos e técnicas em redes ainda mais densificadas.

6. Referências

- ABOULHASSAN, M. A. et al. Classification and comparative analysis of inter-cell interference coordination techniques in LTE networks. In: Proceedings of the 7th International Conference on New Technologies, Mobility and Security, (NTMS '15), France, July 2015, pp. 1–6.
- ADHIKARY, A.; DHILLON, H. S.; CAIRE, G. Massive-MIMO meets HetNet: Interference coordination through spatial blanking. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 33, n. 6, p. 1171-1186, Jun. 2015.
- ALI, M. S. An overview on interference management in 3GPP LTE-advanced heterogeneous networks. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, v. 8, n. 1, p. 55-68, 2015.
- ANDREWS, J. G. et al. Femtocells: Past present future. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 30, n. 3, p. 497-508, Apr. 2012.
- ARAMIDE, S. O. et al. Generalized proportional fair (GPF) scheduler for LTE-A. In: 2017 9th Computer Science and Electronic Engineering (CEECE). IEEE, 2017.
- BHUSHAN, N. et al. Network densification: The dominant theme for wireless evolution into 5G. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, p. 82-89, Feb. 2014.
- BOUJELBEN, M.; BEN REJEB, S.; TABBANE, S. A comparative study of interference coordination schemes for wireless mobile advanced systems. In: The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications, pp. 1–5.
- CAPOZZI, F. et al. Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 15, n. 2, p. 678-700, 2012.
- CHADCHAN, S. M.; AKKI, C. B. A fair downlink scheduling algorithm for 3GPP LTE networks. *International Journal of Computer Network and Information Security*, v. 5, n. 6, p. 34.

CHADCHAN, S.; AKKI, C. 3gpp lte/sae: An overview. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, v. 2, n. 5, p. 806-814, 2010.

COX, C. *An Introduction to LTE: LTE LTE-Advanced SAE and 4G Mobile Communications*. Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2012.

DAEINABI, A.; SANDRASEGARAN, K.; ZHU, X. Survey of intercell interference mitigation techniques in LTE downlink networks. In: *2012 Australasian*.

DAMNJANOVIC, A. et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, v. 18, n. 3, p. 10-21, 2011.

DE VRIENDT, J. et al. Mobile network evolution: A revolution on the move. *IEEE Communications Magazine*, v. 40, n. 4, p. 104-111, Apr. 2002.

DEB, S. et al. Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 22, n. 1, p. 137-150, Feb. 2014.

DEKLEVA, S. et al. Evolution and emerging issues in mobile wireless networks. *Communications of the ACM*, v. 50, n. 6, p. 38-43, 2007.

ELSAADANY, M.; ALI, A.; HAMOUDA, W. Cellular LTE-A technologies for the future Internet-of-Things: Physical layer features and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 19, n. 4, p. 2544-2572, 4th Quart. 2017.

ELSHENNAWY, N. M. Modified Proportional Fair Scheduling Algorithm for Heterogeneous LTE-A Networks. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, v. 14, n. 10, 2020.

GAWAS, A. U. An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G. *International Journal of Recent Innovations in Trends in Computer and Communication*, v. 3, n. 5, p. 3130-3133, 2015.

GHOSH, A. et al. *Fundamentals of LTE*. Prentice-Hall, 2010.

GHOSH, A. et al. Heterogeneous cellular networks: From theory to practice. IEEE Communications Magazine, Jun. 2012.

GHOSH, A. et al. LTE-Advanced: Next-generation wireless broadband technology [Invited Paper]. IEEE Wireless Communications, v. 17, n. 3, p. 10-22, Jun. 2010.

HAIDINE, A.; HASSANI, S. E. LTE-a pro (4.5G) as pre-phase for 5G deployment: Closing the gap between technical requirements and network performance. In: International Conference on Advanced Communication Systems and Information Security (ACOSIS). IEEE, 2016. p. 1-7.

HUANG, T. et al. A survey on green 6G network: Architecture and technologies. IEEE Access, v. 7, p. 175758-175768, 2019.

IBRAHEEM, M. A.; ELSHENNAWY, N.; SARHAN, A. M. A proposed modified proportional fairness scheduling (MPF-BCQI) algorithm with best CQI consideration for LTE-A networks. In: 2018 13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES). IEEE, 2018, p. 360-368.

JIMAA, S. et al. Lte-a an overview and future research areas. In: Wireless and Mobile Computing Networking and Communications. IEEE, 2011. p. 395-399, 2011.

JO, M. et al. A survey of converging solutions for heterogeneous mobile networks. In: IEEE International Conference on Wireless Communications, vol. 21, n. 6, pp. 54-62, Dec. 2014.

KANCHI, S. et al. Overview of LTE-A technology. In: IEEE Global High Tech Congress on Electronics (GHTCE), pp. 195-200, Nov. 2013.

KHANDEKAR, A. LTE-Advanced: Heterogeneous Networks. European Wireless Conference, 2010.

KUMARI, K. S.; SINGH, D. K. Evolution of Mobile Communications Systems from Zero Generation to Fifth Generation: A Review. International Journal of Recent Innovations in Trends in Computer and Communication, v. 3, n. 5, p. 3130-3133, 2021.

LI, Q. et al. MIMO techniques in WiMAX and LTE: A feature overview. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 5, p. 86-92, May 2010.

LIU, Ye et al. A game theoretic distributed algorithm for FeICIC optimization in LTE-A HetNets. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 25, n. 6, p. 3500-3513, 2017.

LOPEZ-PEREZ, D. et al. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, v. 18, n. 3, p. 22-30, 2011.

MARTIN, D. et al. On the way towards Fourth-Generation Mobile: LTE and LTE-Advanced. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2009, Article 354089.

MERWADAY, A. et al. Capacity analysis of LTE-advanced HetNets with reduced power subframes and range expansion. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2014, n. 1, p. 189, Nov. 2014.

MISHRA, A. *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation*. John Wiley & Sons, 2004.

MYUNG, H. G.; LIM, J.; GOODMAN, D. J. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 1, n. 3, p. 30-38, Sep. 2006.

OTAO, N.; KISHIYAMA, Y.; HIGUCHI, K. Performance of non-orthogonal multiple access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation. *IEICE Transactions on Communications*, v. 98, n. 2, p. 344-351, 2015.

PATIL, C.; KARHE, R.; AHER, M. *Development of Mobile Technology: A Survey*. *Development*, v. 1, n. 5, 2012.

PAULI, V.; NARANJO, J. D.; SEIDEL, E. *Heterogeneous LTE Networks and Inter-Cell Interference Coordination*. White Paper - Nomor Research GmbH Munich Germany, Dec. 2010.

PEDERSEN, K. I. et al. Carrier aggregation for LTE-advanced: functionality and performance aspects. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 6, p. 89-95, Jun. 2011.

PIRO, G. et al. Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in LTE networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, v. 13, n. 5, p. 1052-1065, 2011.

PURSLEY, M. P. Direct sequence spread spectrum communications for multipath channels. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 50, n. 3, p. 653-661, 2002.

RICHARDSON, K. W. UMTS Overview. *Electronics & Communication Engineering Journal*, Jun. 2000, p. 93-101.

SALIH, A. A. et al. Evolution of mobile wireless communication to 5G revolution. *Technology Reports of Kansai University*, v. 62, n. 5, p. 2139-2151, 2020.

SHARMA, P. Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, v. 2, n. 8, p. 47-53, 2013.

SUKAR, M. A. N.; PAL, M. SC-FDMA & OFDMA in LTE physical layer. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, v. 12, n. 2, p. 74-85, 2014.

TRAN, T.; SHIN, Y.; SHIN, O. Overview of enabling technologies for 3GPP LTE-Advanced. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2012, n. 2, 2012.

VORA, L. J. Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G. *International Journal of Modern Trends in Engineering Research*, v. 2, n. 10, p. 281-290, 2015.

WENGERTER, C.; OHLHORST, J.; GOLITSCHKE EDLER VON ELBWART, A. Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA. In: 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference, vol. 3, IEEE, 2005.

WIDJAJA, I.; LA ROCHE, H. Sizing X2 Bandwidth for Inter-Connected eNBs. In: IEEE VTC-Fall, pp. 1-5, Sept. 2009.

YILDIZ, Ö.; SOKULLU, R. A novel mobility aware downlink scheduling algorithm for LTE-A networks. In: 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). IEEE, 2017.

APÊNDICE I – FUNÇÃO “GPF_scheduler_LTE_TCC”

```

function [station,UE,AttachList] =
GPF_scheduler_LTE_TCC(station,UE,NumPRB,NoiseDen,NoiseFigure,BWperRB,NumTimeSlots,
NumFreqSlots>window)

AttachList = find([UE.attach]==station.NameTag);
AvaTimeSlots = sum(station.ABS(1:NumTimeSlots)); % Available subframes (time slots), less than
or equal to NumTimeSlots due to ABS
NumUE = length(AttachList);

if AvaTimeSlots > 0 && NumUE > 0
    [UE(AttachList)] =
Throughput(station.NameTag,UE(AttachList),NoiseDen,NoiseFigure,BWperRB,NumTimeSlots,Num
mFreqSlots);
    UEID = [UE(AttachList).ID];
    allocation = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots);
    ABSix = find(station.ABS(1:NumTimeSlots) == 0); % The indices of subframes that are ABSs
    T = zeros(NumUE,NumTimeSlots+1); % Long-term average throughput of each user in each
subframe.
    % The first column represents the past history, the second column represents the first subframe
    ThroughputProfile = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots,NumUE); % Record the throughput of
each UE at each PRB
    for ue = 1:NumUE
        ThroughputProfile(:,:,ue) =
[reshape(UE(AttachList(ue)).ThroughputPerPRB,[NumTimeSlots,NumFreqSlots])];
    end

    % Allocate PRB according to (12.2)
    memory = 0; % This is to avoid unnecessary calculations of T
    for prb = 1:NumTimeSlots*NumFreqSlots
        % Find out which subframe it is
        sf = ceil(prb/NumFreqSlots);
        if sf ~= memory
            % Update the long-term average throughput for each UE
            for ue = 1:NumUE
                T(ue,sf+1) = ((1-1/window)*T(ue,sf) + 1/window *
sum([allocation(:,sf)==UEID(ue)].*ThroughputProfile(:,sf,ue)))^0.7;
            end
            memory = sf;
        end
    end
end

```

```

if isempty(find(ABSix==sf))
    % Get UE throughputs on that PRB
    PRB_ix = [prb prb+cumsum(NumFreqSlots*NumTimeSlots*ones(1,NumUE-1))];
    throughput = (ThroughputProfile(PRB_ix)).^0.6;
    % Find out to which UE should this PRB be allocated
    if ~isempty(find(T(:,sf+1)==0))
        nonzero_ix = find(T(:,sf+1));
        throughput(nonzero_ix) = 0;
        [nouse,ueix] = max(throughput);
    else
        [nouse,ueix] = max(throughput./T(:,sf+1));
    end
    allocation(prb) = UEID(ueix);
    % Update the long-term average throughput
    T(ueix,sf+1) = ((1-1/window)*T(ueix,sf) + 1/window *
sum([allocation(:,sf)==UEID(ueix)].*ThroughputProfile(:,sf,ueix)))^0.7;
    end
end

% Update the allocation patterns in station and UE
station.UEinPRB = reshape(allocation',1,[]);
for ue = 1:length(AttachList)
    UE(AttachList(ue)).Allocation = zeros(1,NumPRB);
    UE(AttachList(ue)).Allocation(find(station.UEinPRB==UEID(ue))) = 1;
end
end

```

APÊNDICE II – FUNÇÃO “AMPF_scheduler_LTE_TCC”

```

function [station,UE,AttachList] =
AMPF_scheduler_LTE_TCC(station,UE,NumPRB,NoiseDen,NoiseFigure,BWperRB,NumTimeSlots,NumFreqSlots>window)

AttachList = find([UE.attach]==station.NameTag);
AvaTimeSlots = sum(station.ABS(1:NumTimeSlots)); % Available subframes (time slots), less than
or equal to NumTimeSlots due to ABS
NumUE = length(AttachList);

if AvaTimeSlots > 0 && NumUE > 0
    [UE(AttachList)] =
Throughput(station.NameTag,UE(AttachList),NoiseDen,NoiseFigure,BWperRB,NumTimeSlots,NumFreqSlots);
    UEID = [UE(AttachList).ID];
    allocation = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots);
    ABSix = find(station.ABS(1:NumTimeSlots) == 0); % The indices of subframes that are ABSs
    T = zeros(NumUE,NumTimeSlots+1); % Long-term average throughput of each user in each
subframe.
    % The first column represents the past history, the second column represents the first subframe
    ThroughputProfile = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots,NumUE); % Record the throughput of
each UE at each PRB
    for ue = 1:NumUE
        ThroughputProfile(:,:,ue) =
[reshape(UE(AttachList(ue)).ThroughputPerPRB,[NumTimeSlots,NumFreqSlots])];
    end

    % Allocate PRB according to (12.2)
    memory = 0; % This is to avoid unnecessary calculations of T
    for prb = 1:NumTimeSlots*NumFreqSlots
        % Find out which subframe it is
        sf = ceil(prb/NumFreqSlots);
        if sf ~= memory
            % Update the long-term average throughput for each UE
            for ue = 1:NumUE
                T(ue,sf+1) = ((1-1/window)*(mean(T(ue,1:sf))) + 1/window *
sum([allocation(:,sf)==UEID(ue)].*ThroughputProfile(:,sf,ue)))^0.7;
            end
            memory = sf;
        end
        if isempty(find(ABSix==sf))
            % Get UE throughputs on that PRB

```



```

PRB_ix = [prb prb+cumsum(NumFreqSlots*NumTimeSlots*ones(1,NumUE-1))];
throughput = (ThroughputProfile(PRB_ix)).^0.6;
% Find out to which UE should this PRB be allocated
if ~isempty(find(T(:,sf+1)==0))
    nonzero_ix = find(T(:,sf+1));
    throughput(nonzero_ix) = 0;
    [nouse,ueix] = max(throughput);
else
    [nouse,ueix] = max(throughput./T(:,sf+1));
end
allocation(prb) = UEID(ueix);
% Update the long-term average throughput
T(ueix,sf+1) = ((1-1/window)*(mean(T(ueix,1:sf))) + 1/window *
sum([allocation(:,sf)==UEID(ueix)].*ThroughputProfile(:,sf,ueix)))^0.7;
end
end

% Update the allocation patterns in station and UE
station.UEinPRB = reshape(allocation',1,[]);
for ue = 1:length(AttachList)
    UE(AttachList(ue)).Allocation = zeros(1,NumPRB);
    UE(AttachList(ue)).Allocation(find(station.UEinPRB==UEID(ue))) = 1;
end
end

```

APÊNDICE III – FUNÇÃO “MFMPF_scheduler_LTE_TCC”

```

function [station,UE,AttachList] =
MFMPF_scheduler_LTE_TCC(station,UE,NumPRB,NoiseDen,NoiseFigure,BWperRB,NumTimeSlots,NumFreqSlots>window)

AttachList = find([UE.attach]==station.NameTag);
AvaTimeSlots = sum(station.ABS(1:NumTimeSlots)); % Available subframes (time slots), less than
or equal to NumTimeSlots due to ABS
NumUE = length(AttachList);

if AvaTimeSlots > 0 && NumUE > 0
    [UE(AttachList)] =
Throughput(station.NameTag,UE(AttachList),NoiseDen,NoiseFigure,BWperRB,NumTimeSlots,NumFreqSlots);
    UEID = [UE(AttachList).ID];
    allocation = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots);
    ABSix = find(station.ABS(1:NumTimeSlots) == 0); % The indices of subframes that are ABSs
    T = zeros(NumUE,NumTimeSlots+1); % Long-term average throughput of each user in each
subframe.
    % The first column represents the past history, the second column represents the first subframe
    ThroughputProfile = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots,NumUE); % Record the throughput of
each UE at each PRB
    for ue = 1:NumUE
        ThroughputProfile(:, :, ue) =
[reshape(UE(AttachList(ue)).ThroughputPerPRB,[NumTimeSlots,NumFreqSlots])];
    end

    % Allocate PRB according to (12.2)
    memory = 0; % This is to avoid unnecessary calculations of T
    for prb = 1:NumTimeSlots*NumFreqSlots
        % Find out which subframe it is
        sf = ceil(prb/NumFreqSlots);
        if sf ~= memory
            % Update the long-term average throughput for each UE
            for ue = 1:NumUE
                T(ue,sf+1) = ((1-1/window)*((9*min(T(ue,:))+1*max(T(ue,:)))/(9+1)) + 1/window *
sum([allocation(:,sf)==UEID(ue)].*ThroughputProfile(:,sf,ue)))^0.7;
            end
            memory = sf;
        end
    end
end

```

```

if isempty(find(ABSix==sf))
    % Get UE throughputs on that PRB
    PRB_ix = [prb prb+cumsum(NumFreqSlots*NumTimeSlots*ones(1,NumUE-1))];
    throughput = (ThroughputProfile(PRB_ix)).^0.6;
    % Find out to which UE should this PRB be allocated
    if ~isempty(find(T(:,sf+1)==0))
        nonzero_ix = find(T(:,sf+1));
        throughput(nonzero_ix) = 0;
        [nouse,ueix] = max(throughput);
    else
        [nouse,ueix] = max(throughput./T(:,sf+1));
    end
    allocation(prb) = UEID(ueix);
    % Update the long-term average throughput
    T(ueix,sf+1) = ((1-1/window)*((9*min(T(ueix,:))+1*max(T(ueix,:)))/(9+1)) + 1/window *
sum([allocation(:,sf)==UEID(ueix)].*ThroughputProfile(:,sf,ueix)))^0.7;
end
end

% Update the allocation patterns in station and UE
station.UEinPRB = reshape(allocation',1,[]);
for ue = 1:length(AttachList)
    UE(AttachList(ue)).Allocation = zeros(1,NumPRB);
    UE(AttachList(ue)).Allocation(find(station.UEinPRB==UEID(ue))) = 1;
end
end

```