

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL ANDRADE QUEIROZ

ESTUDO DE TÉCNICAS DE ESCALONAMENTO E COORDENAÇÃO DE
INTERFERÊNCIA INTERCELULAR NO DOWNLINK LTE-A PARA REDES
HETEROGÊNEAS

UBERLÂNDIA

2022

GABRIEL ANDRADE QUEIROZ

ESTUDO DE TÉCNICAS DE ESCALONAMENTO E 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

2022

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo carinho e estímulo, a meus amigos, pelo apoio e ao meu orientador Éderson, por ter me acompanhado em todos os meus projetos do início ao fim da graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor e orientador Éderson, por todos os ensinamentos, conselhos e orientações em todos os meus projetos desde o início do curso.

Aos demais professores, por todos os conhecimentos e dedicação à profissão.

Aos meus pais Marta e Celso (*in memoriam*), por me ensinarem o valor do estudo e pelo incentivo na magnífica aventura por conhecimento. Ao meu pai, por ter me ensinado a perceber a lógica e a engenhosidade mesmo em situações lúdicas, como na incrível Torre de Hanói. A minha mãe, pela dedicação incondicional a minha pessoa e por ser meu pilar mais precioso.

Aos colegas de curso da Faculdade de Engenharia Elétrica, por terem me acompanhado nos desafios e nos momentos de descontração durante a graduação. Nossos momentos juntos proporcionaram diversas histórias para a vida.

Aos amigos externos ao curso, pelo companheirismo e por me ouvirem até mesmo em situações onde adentrei nas tecnicidades do curso. A vida é mais prazerosa e menos complicada quando há boas companhias.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa de Bolsas de Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica, pelas bolsas concedidas durante os períodos de pesquisa acadêmica.

Agradeço também, a todos os técnicos e funcionários da Faculdade de Engenharia Elétrica e aos demais funcionários da universidade, por contribuírem dos mais diversos modos em meu trajeto acadêmico.

RESUMO

A popularização dos sistemas de comunicações móveis tornou ainda mais importante a avaliação de aspectos técnicos das redes móveis, como as eficiências energética e espectral, os parâmetros de justiça e a vazão, devido a crescente demanda por capacidade e atenção aos indicadores de Qualidade de Serviço. Tem-se a densificação das redes celulares como uma das principais estratégias para aumento de capacidade da rede, proporcionando, preferencialmente, uma utilização mais eficiente do espectro e da energia consumida. Apesar de tais vantagens, as redes com maior densificação, ou redes heterogêneas, sofrem por problemas relacionados à interferência intercelular, o que limita o desempenho do sistema. Este trabalho avalia as técnicas de Coordenação de Interferência Intercelular, eICIC e FeICIC, aplicadas ao *downlink* de redes LTE-A com o intuito de mitigar os efeitos da interferência intercelular. Como a interferência intercelular afeta severamente os usuários localizados na borda da célula, estuda-se uma função de utilidade modificada para o algoritmo de escalonamento *Proportional Fair*, tendo por objetivo alcançar uma distribuição de recursos da rede de forma justa, mas proporcionando altos valores de vazão total para o sistema. Sendo assim, os resultados obtidos via simulação servem para comparação das técnicas eICIC e FeICIC com relação a um cenário sem o emprego de técnica de coordenação de interferência intercelular, além de confrontar o algoritmo *Proportional Fair* a sua versão modificada, dita *Generalized Proportional Fair*.

Palavras-chave: Algoritmos de escalonamento. eICIC. FeICIC. GPF. LTE-A. PF. Redes heterogêneas. Técnicas de coordenação de interferência intercelular.

ABSTRACT

The popularization of mobile communications systems has made it even more important to evaluate technical aspects of mobile networks, such as energy and spectral efficiency, fairness parameters and throughput, due to the growing demand for capacity and attention to Quality of Service indicators. Densification of cellular networks is one of the main strategies to increase network capacity, preferably providing a more efficient use of spectrum and consumed energy. Despite such advantages, networks with higher densification, or heterogeneous networks, suffer from problems related to inter-cell interference, which limits system performance. This paper evaluates the Inter-Cell Interference Coordination techniques, eICIC and FeICIC, applied to the downlink of LTE-A networks in order to mitigate the effects of inter-cell interference. As inter-cell interference severely affects users located at the edge of the cell, we study a modified utility function for the Proportional Fair scheduling algorithm, aiming to achieve a fair distribution of network resources while providing high total throughput values for the system. Thus, the results obtained via simulation are used to compare the eICIC and FeICIC techniques with respect to a scenario without the use of inter-cell interference coordination techniques, and to compare the Proportional Fair algorithm with its modified version, called Generalized Proportional Fair.

Keywords: eICIC. FeICIC. GPF. Heterogeneous networks. Inter-Cell Interference Coordination techniques. LTE-A. PF. Scheduling algorithms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Células com as respectivas estações rádio base.....	13
Figura 2 -	Escalonamento das frequências nas estações rádio base.....	13
Figura 3 -	Aumento da capacidade em redes móveis futuras	15
Figura 4 -	Arquitetura geral do UMTS e GSM.....	19
Figura 5 -	Arquitetura da rede de acesso via rádio do UMTS.....	20
Figura 6 -	Arquitetura do núcleo das redes UMTS e GSM.....	22
Figura 7 -	Tendência do tráfego de voz e dados em redes de telefonia celular para o período de 2013 a 2018.....	23
Figura 8 -	Evolução da arquitetura do sistema GSM e UMTS para LTE....	25
Figura 9 -	Arquitetura da E-UTRAN.....	28
Figura 10 -	Arquitetura com os principais componentes do EPC.....	29
Figura 11 -	Relação entre resource elements e resource block.....	32
Figura 12 -	A estrutura do subframe.....	33
Figura 13 -	Cadeia de transmissão simplificada.....	34
Figura 14 -	Exemplo da alocação de recursos no downlink do LTE-A.....	35
Figura 15 -	Técnica CSB para interferência em HetNets no LTE-A.....	38
Figura 16 -	Técnica ABS para interferência.....	39
Figura 17 -	Modelo simplificado de um escalonador de pacotes.....	42
Figura 18 -	Fluxograma do algoritmo PF.....	46
Figura 19 -	Exemplo de configuração de uma HetNet hexagonal.....	50
Figura 20 -	Eficiência Espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 1 picocell.....	57
Figura 21 -	Eficiência Espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 2 picocells.....	58
Figura 22 -	Eficiência Espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 3 picocells.....	59
Figura 23 -	Eficiência Espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 4 picocells.....	60
Figura 24 -	Eficiência Espectral em função do número de picocells para o valor fixo de 20 usuários.....	61

Figura 25 -	Eficiência Energética em função do número de usuários para o valor fixo de 1 picocell.....	63
Figura 26 -	Eficiência Energética em função do número de usuários para o valor fixo de 2 picocells.....	64
Figura 27 -	Eficiência Energética em função do número de usuários para o valor fixo de 3 picocells.....	65
Figura 28 -	Eficiência Energética em função do número de usuários para o valor fixo de 4 picocells.....	66
Figura 29 -	Eficiência Energética em função do número de picocells para o valor fixo de 20 usuários.....	67
Figura 30 -	CDF do throughput para os 5% piores usuários localizados na borda da célula do cluster central considerando o algoritmo PF.	69
Figura 31 -	CDF do throughput para os 5% piores usuários localizados na borda da célula do cluster central considerando o algoritmo GPF.....	70
Figura 32 -	Índice de justiça em função da quantidade de picocells para 20 usuários.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais propriedades da interface aérea para WCDMA e LTE..	27
Tabela 2 -	Principais propriedades da rede de acesso para WCDMA e LTE..	27
Tabela 3 -	Principais propriedades do núcleo da rede para WCDMA e LTE..	28
Tabela 4 -	Relação da quantidade de RBs disponíveis conforme a BW.....	32
Tabela 5 -	Notações utilizadas para as métricas de escalonamento.....	43
Tabela 6 -	Parâmetros utilizados para simulação.....	51
Tabela 7 -	Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 1 picocell e variando o número de usuários.....	56
Tabela 8 -	Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 2 picocells e variando o número de usuários.....	57
Tabela 9 -	Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 3 picocells e variando o número de usuários.....	58
Tabela 10 -	Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 4 picocells e variando o número de usuários.....	59
Tabela 11 -	Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 20 usuários e variando a quantidade de picocells.....	61
Tabela 12 -	Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 1 picocell e variando o número de usuários.....	62
Tabela 13 -	Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 2 picocells e variando o número de usuários.....	63
Tabela 14 -	Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 3 picocells e variando o número de usuários.....	64
Tabela 15 -	Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 4 picocells e variando o número de usuários.....	65
Tabela 16 -	Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 20 usuários e variando a quantidade de picocells.....	67
Tabela 17 -	Valores das taxas alcançadas pelos usuários (bps/Hz) conforme as CDFs dos algoritmos PF e GPF.....	68
Tabela 18 -	Ganho na taxa alcançada pelo usuário para CDF igual a 0,7 considerando o algoritmo PF.....	71

Tabela 19 -	Ganho na taxa alcançada pelo usuário para CDF igual a 0,7 considerando o algoritmo GPF.....	71
Tabela 20 -	Índice de justiça para 20 usuários e variando a quantidade de picocells.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
ABS	<i>Almost Blank Sub-frame</i>
AMC	<i>Adaptative Modulation and Coding</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
APN	<i>Access Point Name</i>
AuC	<i>Authentication Centre</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>
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>Heterogenous Network</i>
HLR	<i>Home Location Register</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>
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>
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>
MSC	<i>Mobile Switching Centre</i>
MT	<i>Maximum Throughput</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</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>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RNTI	<i>Radio Network Temporary Identifier</i>
RP-ABS	<i>Reduced Power Almost Blank Sub-frame</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>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Nodes</i>
SINR	<i>Signal to Interference and Noise Ratio</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 *Voice over Internet Protocol*

WCDMA *Wide-Band Code Division Multiple Access*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 MOTIVAÇÃO	16
1.2 OBJETIVO DO ESTUDO	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2 DESENVOLVIMENTO.....	18
2.1 PADRÃO LTE-A.....	18
2.1.1 Arquitetura do UMTS e GSM	18
2.1.2 A necessidade pelo desenvolvimento do LTE.....	23
2.1.3 O desenvolvimento do UMTS para LTE.....	24
2.1.4 Do LTE para o <i>LTE-Advanced</i>	30
2.1.5 Compartilhamento e alocação de recursos no <i>downlink</i>	31
2.2 TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA.....	36
2.2.1 Modelos Estáticos.....	36
2.2.2 Modelos Dinâmicos.....	37
2.3 ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO	40
2.3.1 Maximum Throughput.....	44
2.3.2 Blind Equal Throughput	44
2.3.3 Proportional Fair Scheduler.....	45
2.3.4 Generalized Proportional Fair	47
2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	48
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
3 METODOLOGIA.....	50
3.1 MÉTODOS DE PESQUISA	50
3.2 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	50
3.3 MÉTRICAS ANALISADAS.....	53
3.3.1 Eficiência Espectral	54
3.3.2 Eficiência Energética.....	54
3.3.3 Throughput	54
3.3.4 Índice de Justiça.....	54
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56

4.1 EFICIÊNCIA ESPECTRAL	56
4.1.1 Cenário 1: número fixo de <i>picocells</i> e variação de usuários	56
4.1.2 Cenário 2: número fixo de usuários e variação de <i>picocells</i>	61
4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	62
4.2.1 Cenário 1: número fixo de <i>picocells</i> e variação de usuários	62
4.2.2 Cenário 2: número fixo de usuários e variação de <i>picocells</i>	66
4.3 THROUGHPUT	68
4.4 ÍNDICE DE JUSTIÇA	71
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE I – TRECHO DE CÓDIGO DA FUNÇÃO “main_ideal”	77
APÊNDICE II – FUNÇÃO “Pilot_CSB_Aso”	78
APÊNDICE III – FUNÇÃO “FetchCSB”	79
APÊNDICE IV – FUNÇÃO “GPF_scheduler_LTE”	80

1 INTRODUÇÃO

O termo “telefonia celular” faz referência à maneira com que o sinal alcança o terminal, independente de onde ele esteja e sem a necessidade de utilizar potências elevadas na estação ou no terminal. Por terminal, entende-se o equipamento com conexão à rede celular, por exemplo, o aparelho telefone celular, um notebook e, mais recentemente, dispositivos IoT (*Internet of Things*) como máquinas de monitoramento e até mesmo geladeiras e televisores. A comunicação é realizada em diversas áreas chamadas de células, que são distribuídas ao longo de uma região e possuem pelo menos uma estação próxima ao centro.

O sistema de comunicação celular visa viabilizar a cobertura de grandes áreas sem exigir altas potências, de forma que são instaladas várias estações fixas espaçadas para cobrir toda a área exigida. Cada estação deve prover cobertura a uma fração da área total: a célula. Sendo assim, as células devem se completar para proporcionar cobertura contínua ao longo da área total. Como há necessidade de determinada quantidade de estações para cobrir a área exigida e cada célula é responsável por uma estação, surge o termo “telefonia celular”.

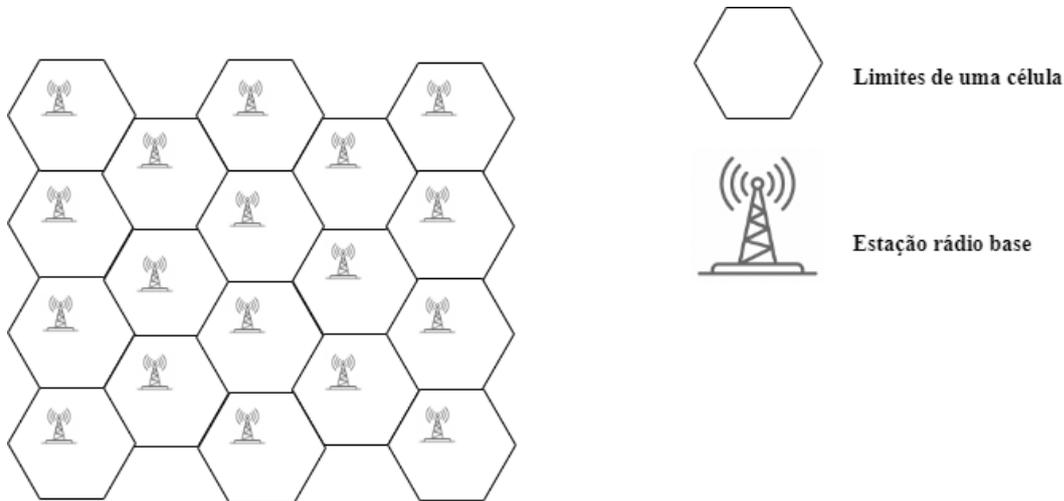
Embora possa parecer uma solução evidente, o sistema de comunicação celular deve seguir alguns requisitos para operação adequada:

- a potência aceitável da estação deve assegurar a comunicação com terminais dispostos em qualquer ponto da célula;
- caso a potência da estação seja desmedida, ela pode causar interferência na comunicação entre terminal e outras células adjacentes;
- o terminal deve conseguir se comunicar com qualquer estação disposta na área determinada;
- caso as estações transmitam simultaneamente na mesma frequência, ocorrerá interferência entre elas;
- as frequências de operação das estações não podem ser muito distintas entre si, pois dificulta a operação simples em que deve haver comunicação do terminal com qualquer estação considerando um preço acessível do dispositivo;
- a distribuição e, por consequência, o formato das células deve ser tal que haja boa cobertura, preocupando-se com a interferência em relação a outras células.

Assim, para evitar os problemas decorrentes de não seguir tais recomendações, a solução aderida foi distribuir as estações de maneira que as células sejam aproximadamente poligonais e adjacentes. O mais comum é utilizar células hexagonais, de forma que cada estação tenha seis estações imediatamente vizinhas, resultando na distribuição ilustrada na Figura 1. Além disso, as frequências são reutilizadas dada uma certa distância entre as células. Na Figura

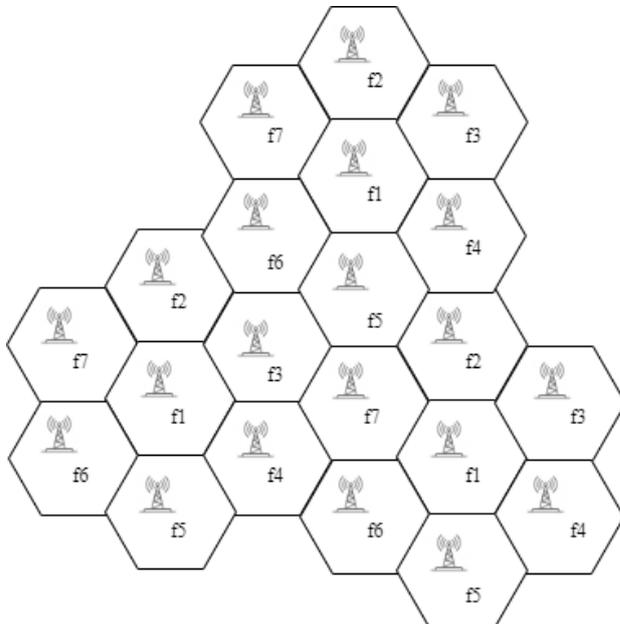
2, observa-se o escalonamento das frequências a partir da repetição de índices de frequências distintas.

Figura 1: Células com as respectivas estações rádio base.



FONTE: Adaptado de [1].

Figura 2: Escalonamento das frequências nas estações rádio base.



FONTE: Adaptado de [1].

O primeiro sistema comercial de telefonia celular foi denominado *AMPS* (*Advanced Mobile Phone System*), em que os terminais acessavam o meio através de frequências distintas, sendo essa solução chamada de *FDMA* (*Frequency Division Multiple Access*). Ainda, cada terminal transmitia e recebia em frequências diferentes e a modulação escolhida foi a FM

(*Frequency Modulation*). Desta forma, considera-se o sistema AMPS como a primeira geração de telefonia móvel. Por sua vez, os sistemas digitais que utilizam TDMA (*Time Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*) em faixas de FDMA, são considerados a segunda geração (2G). O exemplo predominante é o GSM (*Global System for Mobile Communications*), que utiliza o TDMA e foi adotado em diversos países, inclusive no Brasil. A terceira geração (3G) é composta por sistemas como o IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications 2000*) e o UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), utilizando o método de acesso WCDMA (*Wideband CDMA*), o que permite maiores velocidades em relação às gerações anteriores devido a utilização de banda larga. Já a quarta geração (4G), tendo por base a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) e posteriormente a LTE-A (*LTE-Advanced*), utiliza comutação por pacotes via IP, banda escalável (5 a 20 MHz, e opcionalmente até 40 MHz), eficiência de 15 b/Hz no *downlink* (da estação para o terminal) e 6,75 b/Hz no *uplink* (do terminal para a estação). Além disso, observa-se a utilização de técnicas como o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*). A maior preocupação com velocidade e nível de QoS (*Quality of Service*) proporcionou a utilização do 4G para transmissão de dados, *streaming*, videoconferência e *download* de arquivos.

Com o desenvolvimento das gerações de telefonia celular, observa-se a demanda crescente advinda dos usuários, de forma que as redes celulares como as baseadas em LTE-A e a quinta geração (5G) têm demandas como a garantia de acesso de banda larga para o número crescente de usuários, conforme o aumento de serviços baseados em dados, a exemplo do VoIP (*Voice over Internet Protocol*) e *streaming* de áudio e vídeo. O Cisco Annual Internet Report (2018 – 2023), apresentado em [2], indica que o padrão 5G proverá 10% do valor global de conexões em 2023. Além disso, as melhorias na próxima geração visam ofertar melhor conectividade a aplicações já em ascensão, como IoT, M2M (*Machine-to-Machine*) e D2D (*Device-to-Device*).

Observa-se que o desenvolvimento rápido dos meios de comunicação acarretou na elaboração de níveis mais satisfatórios de QoS para as aplicações de telefonia móvel. Desta forma, a 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), organização responsável por padronizar elementos de telefonia móvel e dispositivos wireless GSM, introduziu o padrão LTE-A, buscando alcançar maior capacidade de rede e eficiência espectral em relação ao padrão antecessor, o LTE. Sendo assim, possibilitou-se maior capacidade de rede e QoE (*Quality of Experience*) para os usuários por meio da implementação do modelo de fator de reutilização de frequência *reuse-1*. Todavia, esse modelo limita a SINR (*Signal to Interference and Noise*

Ratio), pois induz a ICI (*Inter-Cell Interference*), de forma que prejudica o *throughput*, em especial para os UEs (*User Equipments*) ativos na borda das células [3].

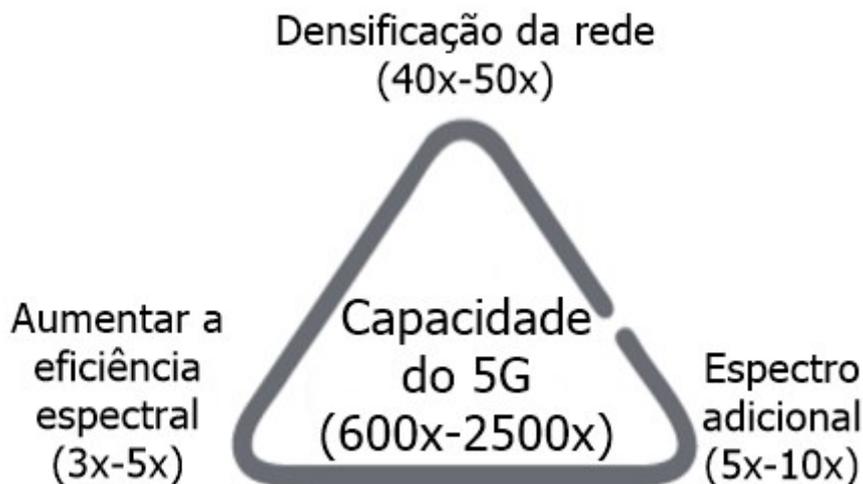
De modo geral, existem duas interferências predominantes em um sistema de comunicações móveis: interferência intra-celular e interferência inter-celular. A primeira dá-se entre os canais de uma mesma célula devido à proximidade das frequências e o desvio de potência entre canais. Em relação à interferência inter-celular, é observada entre células adjacentes que compartilham um mesmo canal em razão do reuso de frequência [4].

Para minimizar a interferência e assegurar os requisitos de melhor desempenho para o LTE-A, faz-se uso do OFDMA [5]. Como são utilizadas *sub-carriers* ortogonais e independentes para transmitir os dados, é possível eliminar a interferência intra-celular devido ao OFDMA. Contudo, existe colisão entre os blocos de recursos diante de canais utilizados por células vizinhas, de forma que a interferência inter-celular ainda é um problema [6].

Assim, para ajustar os sistemas de comunicações móveis em relação aos problemas oriundos da interferência inter-celular, três possibilidades principais são listadas a seguir:

- 1) espectro adicional;
- 2) aumento da eficiência espectral: MIMO, CoMP (*Coordinated Multi-Point operation*) e técnicas de codificação adaptativa;
- 3) densificação da rede através do desenvolvimento de *smallcells*.

A Figura 3 ilustra o potencial da aplicação de cada estratégia para o aumento da capacidade em redes móveis.



FONTE: Adaptado de [7].

É possível observar que o espectro é limitado, de tal modo que o aumento da capacidade de um sistema também é limitado quando ocorre a adição de espectro. A respeito do aumento da eficiência espectral, devido às limitações das técnicas utilizadas, também é notório o baixo impacto no aumento da capacidade. Por fim, a melhor escolha é a densificação da rede por meio das *smallcells*, visto que há um aumento da cobertura do sistema de modo econômico devido à reutilização de frequências e a preservação da SINR, bem como do fato de diminuir a distância entre UEs e BS (*Base Station*) [8].

O desenvolvimento da densificação celular decorre do uso de uma arquitetura formada por *macrocells* e *smallcells*, isto é, células com diferentes potências e capacidades. Como exemplos de *smallcells*, têm-se: *picocells* (*pico base stations*) e *femtocells* (*femto base stations*). Assim, a configuração utilizando esses dois tipos de células gera as HetNets (*Heterogeneous Networks*), que ocasionam interferência intercelular sobre a rede devido ao desenvolvimento das células menores e altamente densificadas [9].

Nas arquiteturas HetNet, as *macrocells* possuem a maior potência, de modo que os UEs localizados próximos às *smallcells* sejam atraídos para uma *macrocell*, ocasionando subutilização das *smallcells* e superlotação das *macrocells*. Ainda, quando as *macrocells* estão localizadas muito próximas das *smallcells*, observa-se maior interferência para usuários associados às últimas, sendo necessária a implementação de esquemas de coordenação de recursos. Sendo assim, foram propostas na 3GPP Release 10 [10] e na 3GPP Release 11 [11], respectivamente, as técnicas eICIC (*enhanced Inter-cell Interference Coordination*) e FeICIC (*Further enhanced Inter-cell Interference Coordination*) para tratar os problemas iminentes das HetNets.

1.1 MOTIVAÇÃO

Em um estudo prévio [12], observou-se a densificação da rede como um elemento fundamental no aumento de cobertura do sistema, acompanhando a demanda progressiva. Assim, a utilização das técnicas de coordenação de interferência possibilita melhorar os parâmetros analisados e, portanto, estudar a associação das técnicas de ICIC a algoritmos de escalonamento que considerem uma função de utilidade melhorada tendem a aperfeiçoar ainda mais a performance do sistema em redes heterogêneas, sendo de grande valia para o desenvolvimento das redes móveis atuais e futuras. Além disso, observa-se a importância de analisar o impacto da quantidade de *picocells* diante das diferentes técnicas de coordenação de

interferência e algoritmos de escalonamento, bem como compreender o efeito da diversidade de usuários sobre a capacidade do sistema.

1.2 OBJETIVO DO ESTUDO

O objetivo deste trabalho é estudar as técnicas de ICIC (*Inter-cell Interference Coordination*) no *downlink* do LTE-A em redes heterogêneas através da análise das eficiências espectral e energética, bem como do índice de justiça e *throughput* dos usuários localizados na borda das células. Além disso, foi implementada uma modificação no algoritmo de escalonamento PF (*Proportional Fair*) visando analisar as vantagens do algoritmo resultante GPF (*Generalized Proportional Fair*) proposto em [13]. Assim, os resultados obtidos por simulação têm em vista comparar os cenários sem coordenação de interferência e utilizando as técnicas eICIC e FeICIC com níveis diversos de densificação da rede, além de considerar o algoritmo PF e a aplicação da modificação em ambos os cenários.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O restante do trabalho está organizado conforme descrito a seguir. No Capítulo 2, tem-se a introdução teórica a respeito do padrão LTE-A, bem como os principais conceitos a respeito das técnicas de coordenação de interferência e algoritmos de escalonamento tratados na pesquisa. Ainda, realiza-se uma breve explicação das principais referências utilizadas tanto na parte teórica da pesquisa quanto no desenvolvimento das simulações. O Capítulo 3 faz referência ao ambiente estudado para a simulação, bem como métodos utilizados e métricas analisadas para geração dos resultados. O Capítulo 4 expõe os resultados obtidos via simulação por meio de tabelas e figuras, além de prover a discussão sobre os dados. Por fim, no Capítulo 5, tem-se as conclusões sobre os resultados obtidos, trazendo os destaques e contribuições, além de destacar possíveis novos estudos acerca do tema estudado.

2 DESENVOLVIMENTO

No decorrer deste capítulo, são especificados os conceitos primordiais para que o leitor se contextualize a respeito do assunto tratado. Sendo assim, a seção inicial trata sobre o padrão LTE-A, desde a evolução histórica dos padrões de sistemas de comunicação móvel até os aspectos gerais da arquitetura da rede e, por fim, aborda a alocação de recursos no *downlink* da rede. Em seguida, a seção de técnicas de coordenação de interferência intercelular trata os modelos de coordenação, tendo como foco os modelos dinâmicos, nos quais se encontram as técnicas eICIC e FeICIC. Por fim, a última seção diz respeito aos algoritmos de escalonamento utilizados no enlace de *downlink*.

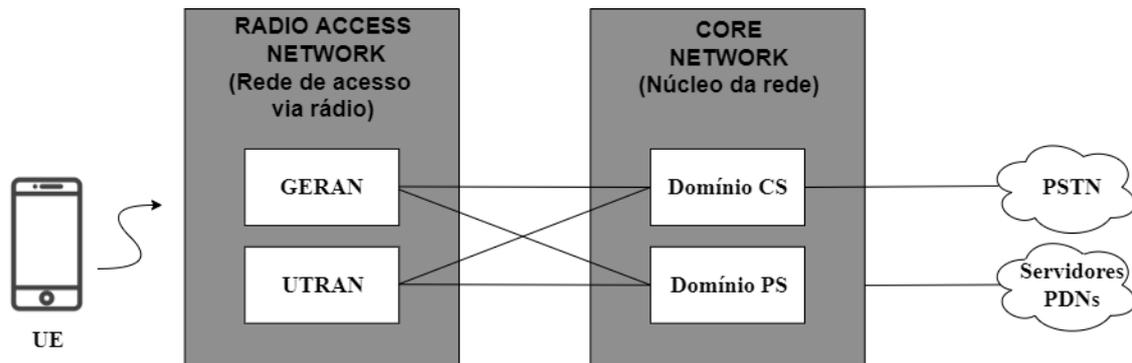
2.1 PADRÃO LTE-A

Esta primeira seção tem como intuito inserir o LTE-A em seu contexto histórico, além de explicar seus requisitos e principais características. Para tanto, é necessário compreender as arquiteturas do UMTS e GSM, as questões que levaram ao desenvolvimento do LTE a partir do UMTS e, posteriormente, a versão LTE-A.

2.1.1 Arquitetura do UMTS e GSM

O LTE, conhecido como 3GPP *Long-Term Evolution*, evoluiu do padrão UMTS, que por sua vez foi uma evolução do GSM. Para compreender o LTE, é necessário revisar as arquiteturas do UMTS e GSM, introduzindo a terminologia necessária ao estudo. Uma rede de telefonia móvel é conhecida como PLMN (*Public Land Mobile Network*), e é administrada por uma operadora ou provedora de rede. O UMTS e o GSM compartilham de um mesmo modelo de arquitetura, composto por núcleo da rede (*core network*), rede de acesso via rádio (*radio access network*) e pelo dispositivo celular. A visão geral dessa arquitetura é mostrada na Figura 4.

Figura 4: Arquitetura geral do UMTS e GSM.



FONTE: Adaptado de [14].

O núcleo da rede apresenta dois domínios: *CS domain* e *PS domain*. O CS (*circuit switched*) *domain*, ou domínio da comutação de circuitos, é responsável por transportar as chamadas telefônicas através da área de cobertura da operadora, atuando da mesma forma que o sistema de telefonia fixa [14]. Sendo assim, esse domínio se comunica com a rede pública de telefonia comutada ou PSTN (*Public Switched Telephone Network*), de forma que os usuários possam entrar em contato com usuários da telefonia fixa e usuários de outras operadoras. Por sua vez, o PS (*Packet Switched*) *domain* ou domínio da comutação por pacotes, transporta dados, por exemplo de páginas web, entre usuário e PDNs (*Packet Data Networks*) como a Internet [14].

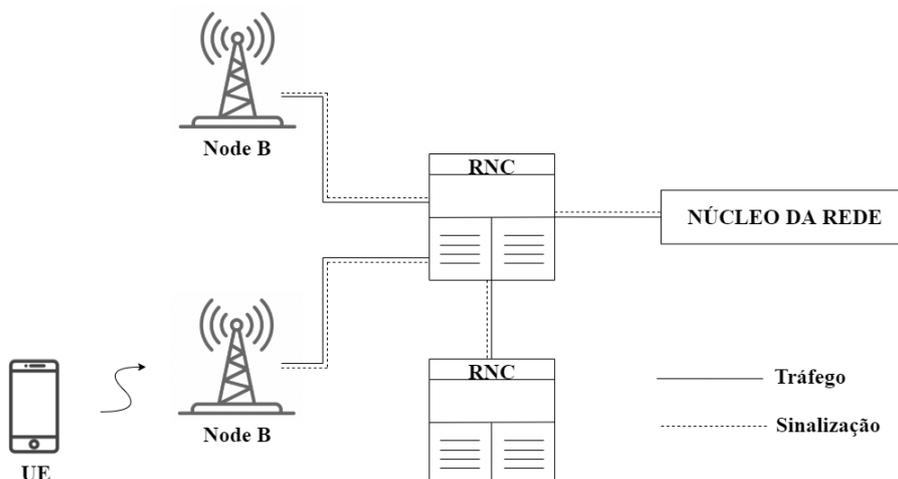
Já a rede de acesso via rádio lida com a comunicação entre usuários e núcleo da rede. Embora compartilhem de uma mesma estrutura de núcleo da rede, o UMTS e GSM possuem redes de acesso distintas: a GERAN (*GSM EDGE radio access network*) e a UTRAN (*UMTS terrestrial radio access network*). Por fim, o dispositivo do usuário é denominado UE, que se comunica com a rede de acesso via interface aérea ou interface de rádio. Assim, existem dois sentidos de comunicação: DL (*downlink*) quando a comunicação parte da rede para o UE e UL (*uplink*) quando a comunicação parte do UE para a rede. Esses dois sentidos de comunicação também são chamados, respectivamente, de *forward link* e *reverse link*.

2.1.1.1 Arquitetura da rede de acesso via rádio

A Figura 5 ilustra a rede de acesso via rádio do UMTS. O principal componente é a estação base ou BS (*Base Station*), que nesse caso é chamada *Node B*. Cada estação base apresenta um ou mais conjuntos de antenas responsáveis pela comunicação com os usuários em

um ou mais setores. Geralmente, uma estação base usa três conjuntos de antenas para cobrir três setores definidos por ângulos de 120° [14].

Figura 5: Arquitetura da rede de acesso via rádio do UMTS.



FONTE: Adaptada de [14].

Em comunicações móveis, a palavra célula pode significar o mesmo que um setor, ou pode significar o grupo de setores sob controle de uma estação base. Observa-se que cada célula apresenta um tamanho limitado, sendo determinado pelo alcance máximo em que o receptor consegue “ouvir” o transmissor. Além disso, as células apresentam capacidade limitada, sendo determinada pela máxima taxa de dados combinada de todos os dispositivos na célula. Sendo assim, surgem células de diferentes tipos devido aos limites de tamanho e capacidade. As *macrocells* fornecem cobertura a grandes áreas, por exemplo, regiões rurais e suburbanas, apresentando tamanho de alguns quilômetros. Por sua vez, as *microcells* englobam algumas centenas de metros, provendo capacidade adequada para regiões urbanas de alta densidade populacional. Ainda, as *picocells* são utilizadas em ambientes como escritórios e shoppings, sendo dispostas com regularidade de alguns metros. Por fim, a densificação das redes móveis trouxe estações base adequadas até mesmo para ambientes domésticos, as chamadas *femtocells*.

Na interface de rádio, cada UE e estação base transmitem em uma frequência específica, sendo denominada frequência de portadora. Sendo assim, cada transmissão ocupa uma determinada parcela do espectro de radiofrequências, ou seja, dispõe de uma certa largura de banda ou BW (*bandwidth*). No Brasil, por exemplo, um dispositivo operando no padrão LTE pode ocupar uma frequência nas faixas B3 (1800 MHz) ou B7 (2600 MHz). Supondo que esse dispositivo transmita na frequência de 1860 MHz e largura de banda de 10 MHz, a transmissão ocupará, no espectro de radiofrequências, a variação de 1855 a 1865 MHz.

A interface de rádio ainda deve segregar as transmissões das estações base em relação aos dispositivos móveis, garantindo que não haja interferência [14]. Para tanto, o UMTS utiliza duas técnicas: FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*). Na primeira, as estações base transmitem em uma frequência de portadora enquanto os UEs utilizam outra frequência. Já no TDD, as estações base e os UEs transmitem na mesma frequência, mas em intervalos distintos. Além disso, há necessidade de distinção entre as transmissões de cada estação base e UE, por exemplo, através da técnica OFDMA.

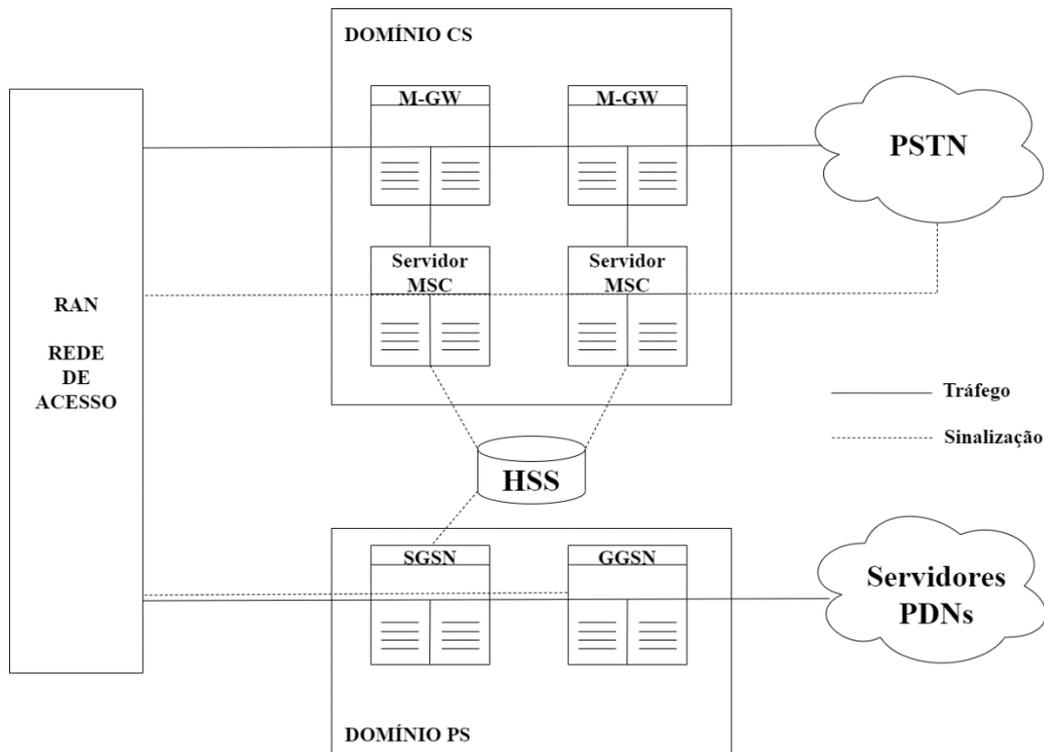
Outro processo importante para entender a rede de acesso é a mobilidade inerente do UE, de forma que ao se movimentar de uma parte da rede para outra, a comunicação com a célula é interrompida para que possa se comunicar com uma nova célula. Esse processo pode ocorrer de duas formas: *handover*, quando o dispositivo apresenta comunicação ativa na rede e *cell reselection*, para dispositivos em *standby*. Ainda, no UMTS, é possível que um UE ativo consiga se comunicar com mais de uma célula ao mesmo tempo, no estado de *soft handover* [14].

Como observado na Figura 5, existem dispositivos chamados RNCs (*Radio Network Controllers*). Esses dispositivos são responsáveis por encaminhar as informações de voz e dados entre estação base e núcleo da rede. Além disso, desempenham o importante papel de controlar as comunicações por meio de mensagens de sinalização, do inglês *signalling*, permitindo, por exemplo, alertar o dispositivo para realizar o *handover* entre células. Em geral existem poucos RNCs em uma rede, na faixa de poucas dezenas, cada um sendo responsável por algumas centenas de estações base. No caso da rede de acesso do GSM, a estação base é conhecida como BTS (*Base Transceiver Station*) e o dispositivo de controle é chamado de BSC (*Base Station Controller*). Caso o dispositivo suporte tanto GSM quanto UMTS, a rede pode realizar um processo de troca de sistema de operação chamado *inter-system handover*.

2.1.1.2 Arquitetura do núcleo da rede

A arquitetura do núcleo da rede comum ao UMTS e GSM é ilustrada na Figura 6.

Figura 6: Arquitetura do núcleo das redes UMTS e GSM.



FONTE: Adaptado de [14].

No domínio CS, os MGWs (*Media Gateways*) são responsáveis por encaminhar as chamadas telefônicas ao longo da rede, enquanto os servidores MSC (*Mobile Switching Centre*) lidam com as mensagens de sinalização que iniciam, administram e encerram as chamadas telefônicas. Em geral, a rede apresenta poucos dispositivos de cada tipo. Esses dois dispositivos são responsáveis pelas funções de tráfego e sinalização de dois dispositivos legados, sendo eles os *mobile switching centre* e os VLR (*Visitor Location Register*).

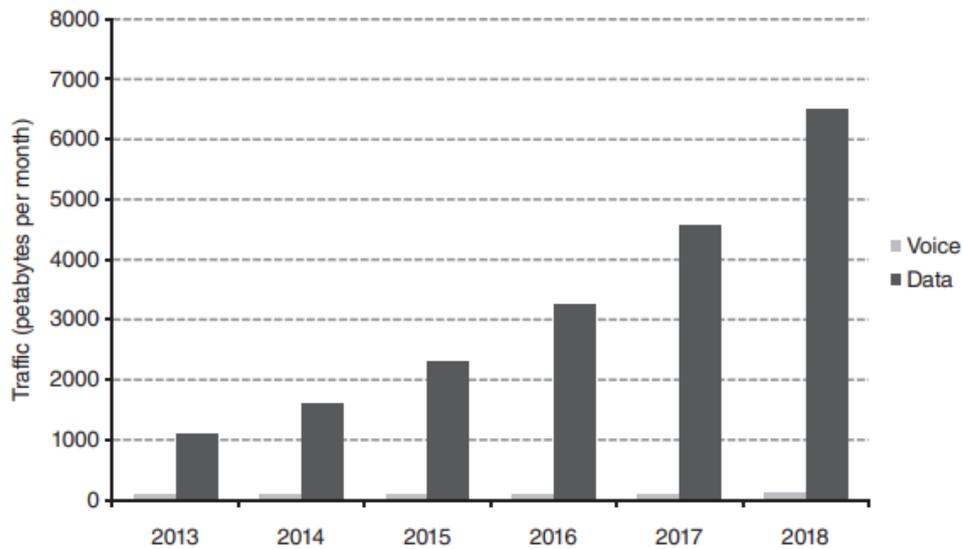
Em relação ao domínio PS, os GGSNs (*Gateway GPRS Support Nodes*) atuam como interface entre servidores e PDNs externos. Os SGSNs (*Serving GPRS Support Nodes*) encaminham os dados entre as estações base e os GGSNs, além de lidar com as mensagens de sinalização das transmissões de dados [14]. Assim como os MGWs e os servidores MSC, existem poucos GGSNs e SGSNs na rede.

Por fim, o HSS (*Home Subscriber Server*) é um banco de dados responsável por centralizar as informações de todos os assinantes de uma operadora, sendo compartilhado entre os dois domínios da rede. Esse dispositivo reúne as funções de dois dispositivos legados: o HLR (*Home Location Register*) e o AuC (*Authentication Centre*).

2.1.2 A necessidade pelo desenvolvimento do LTE

A Figura 7 ilustra o estudo das tendências entre 2013 e 2018 para o tráfego de voz e dados em redes de telefonia celular [14].

Figura 7: Tendência do tráfego de voz e dados em redes de telefonia celular para o período de 2013 a 2018.



FONTE: Obtido de [14].

Por anos a transmissão de voz preveleceu sobre a transmissão de dados, mas ao longo dos anos observou-se o aumento exponencial do uso de dados, enquanto a variação do tráfego por voz mostrou-se mínima conforme a Figura 7. Em parte, essa inversão foi causada pelo desenvolvimento de novas tecnologias 3G e mais ainda, devido a introdução de smartphones como os dispositivos iPhone da Apple e os baseados no sistema operacional Android da Google [14].

Além disso, as redes 2G e 3G passaram a um estado de congestionamento por volta dos anos 2010, levando à necessidade de incrementar a capacidade da rede celular. Como já citado, aumentar a capacidade do sistema de telefonia móvel passa por três técnicas principais. A primeira delas é a utilização de células menores. Como a capacidade do canal é definida pela máxima taxa de dados que uma célula é capaz de operar, instalar novas estações base e reduzir o tamanho das células aumenta a capacidade da rede seguindo a Equação 1:

$$C = B \log_2(1 + SINR) \quad (1)$$

Onde a SINR representa a potência no receptor devido ao sinal requisitado dividida pela potência devido ao ruído e interferência. B é a largura de banda do sistema em Hz e C é a capacidade do canal em bits/s. Sendo assim, por meio da densificação da rede ocorre o surgimento das HetNets e capacidade da rede é aumentada, pois cada nova estação base representa uma cópia da Equação 1 e a capacidade total do sistema depende da soma da capacidade das estações base.

Em segundo lugar, há o aumento da largura de banda. O espectro é controlado pela ITU (*International Telecommunication Union*) e por órgãos reguladores de nível nacional e regional. Embora essa seja uma possível técnica, o espectro disponível é finito, o que limita essa saída para o problema da capacidade.

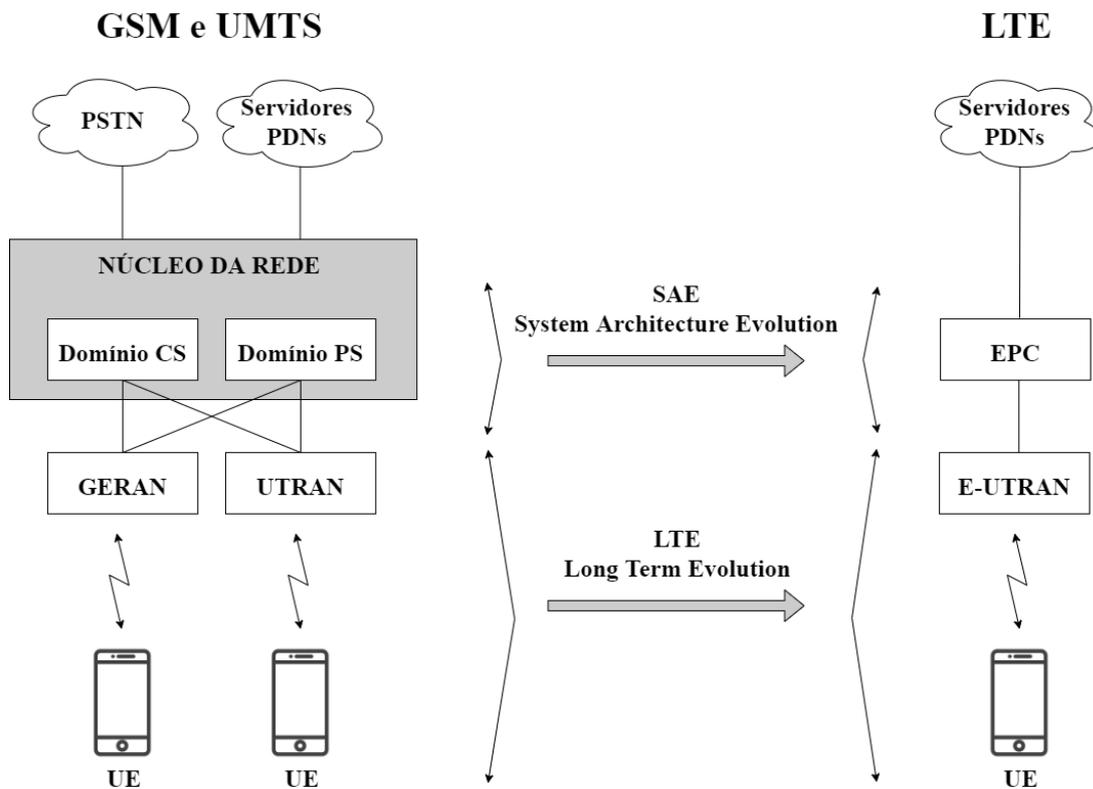
Por fim, a última técnica passa pela utilização de tecnologias como o uso de múltiplas antenas e codificação adaptativa, o que leva a uma aproximação maior da capacidade teórica de um canal e possibilita explorar maior SINR junto de maior largura de banda.

Outras três razões levaram ao desenvolvimento do LTE [14]. Primeiramente, para trabalhar com 2G e 3G as operadoras devem manter dois núcleos da rede, sendo os domínios CS e PS, para prover, respectivamente, serviços de voz e dados. Por meio de técnicas como VoIP, as operadoras podem prover serviços de voz através da comutação por pacotes, reduzindo o custo de operação. Em segundo lugar, as redes 3G introduzem atrasos da ordem de 100 ms em aplicações de dados tanto na transferência entre elementos quanto via interface de rádio. Esse valor não se encaixa no padrão aceitável para voz e cria dificuldades em aplicações em tempo real como jogos e *streaming*. Assim, o LTE e os padrões posteriores visam a redução da latência da rede ao mínimo possível. Por fim, as especificações para o UMTS e o GSM tornaram-se complexas com o passar do tempo devido à necessidade de manter a compatibilidade com dispositivos legados.

2.1.3 O desenvolvimento do UMTS para LTE

A Figura 8 ilustra a arquitetura do LTE desenvolvida a partir dos padrões UMTS e GSM.

Figura 8: Evolução da arquitetura do sistema GSM e UMTS para LTE.



FONTE: Adaptado de [14].

Na nova arquitetura, o EPC (*Evolved Packet Core*) é a alternativa direta ao PS *domain* do UMTS e GSM. Ainda, não há nenhum equivalente ao CS *domain*, tendo em vista que o LTE é otimizado para tráfego de dados. Assim, a E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) lida com as comunicações entre o núcleo (EPC) e os dispositivos, de forma que é uma substituição direta da UTRAN. Embora existam diferenças no UE, ele permanece com o mesmo nome.

Essa nova arquitetura tem como base a SAE (*System Architecture Evolution*), responsável pelo núcleo da rede, e o LTE (*Long-Term Evolution*), que cuida da rede de acesso, interface aérea e dispositivo móvel. De modo oficial, o sistema por completo é conhecido como EPS (*Evolved Packet System*), enquanto o acrônimo LTE se refere apenas à evolução da interface aérea. Apesar disso, LTE se tornou o nome coloquial para todo o sistema e é usado inclusive pela 3GPP [14].

2.1.3.1 Long-Term Evolution

O LTE foi desenvolvido com a ideia de taxa de dados com pico em 100 Mbps no *downlink* e 50 Mbps no *uplink*, entretanto, alcança, respectivamente, até 300 Mbps e 75 Mbps. Contudo, tais valores são dados diante de condições ideais e em cenários reais são inviáveis. Assim, uma medida mais adequada é a eficiência espectral, que expressa a capacidade de uma célula por unidade de largura de banda. O requisito de eficiência espectral imposto ao LTE foi de três a quatro vezes superior a *Release 6* do WCDMA no *downlink* e de duas a três vezes maior no *downlink* [14].

Outro fator importante é a latência, principalmente para aplicações como voz, jogos e *streaming* de áudio e vídeo em tempo real. Um dos requisitos importantes em relação à latência é, que em situação sem congestionamento na interface aérea, o tempo para um dado ser transmitido entre UE e a rede deve ser inferior a 5 ms [14]. Os dispositivos podem se encontrar em dois estados: ativo, quando se comunicam com a rede e *standby*, no qual há menor gasto energético. Sendo assim, um segundo requisito quanto à latência é que após intervenção do usuário, o dispositivo deve mudar de estado de *standby* para ativo em menos de 100 ms.

Em relação aos requisitos de cobertura, o LTE foi desenvolvido para operar de maneira ótima com células de tamanhos até de 5 km, com performances reduzidas para células de até 30 km e também prover suporte para células de até 100 km. Quanto à mobilidade, o LTE é otimizado para dispositivos com velocidades de até 15 km/h, alta performance até 120 km/h e suporta até 350 km/h [14]. Por fim, o LTE foi criado para sustentar larguras de banda entre 1,4 e 20 MHz.

2.1.3.2 System Architecture Evolution

As tabelas 1, 2 e 3 indicam um resumo comparativo das propriedades entre o WCDMA e o LTE.

Tabela 1 – Principais propriedades da interface aérea para WCDMA e LTE.

Propriedade	WCDMA	LTE
Esquema de múltiplo acesso	WCDMA	OFDMA e SC-FDMA
Reutilização de frequência	100%	Flexível
Utilização de MIMO	A partir da <i>Release 7</i>	Sim
Largura de banda	5 MHz	1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz
Duração de um quadro	10 ms	10 ms
Duração do intervalo de transmissão	2 ou 10 ms	1 ms
Modos de operação	FDD e TDD	FDD e TDD
<i>Uplink timing advance</i>	Não é necessário	Necessário
Canais de transporte	Dedicados e compartilhados	Compartilhados
Controle de potência no UL	Rápido	Lento

Fonte: Adaptado de [14].

Tabela 2 – Principais propriedades da rede de acesso para WCDMA e LTE.

Propriedade	WCDMA	LTE
Componentes da rede de acesso	Node B, RNC	eNB
<i>RRC protocol states</i>	CELL_DCH, CELL_FACH, CELL_PCH, URA_PCH, RRC_IDLE	RRC_CONNECTED, RRC_IDLE
<i>Handovers</i>	<i>Soft e hard</i>	<i>Hard</i>
Lista de vizinhos	Sempre necessária	Não é necessária

Fonte: Adaptado de [14].

Tabela 3 – Principais propriedades do núcleo da rede para WCDMA e LTE.

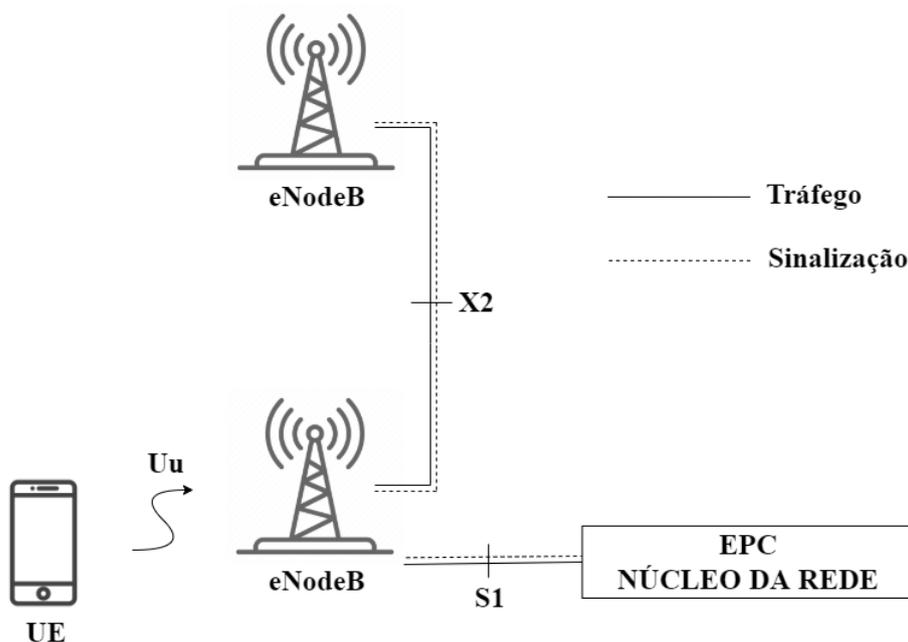
Propriedade	WCDMA	LTE
Versão de IP suportada	IPv4 e IPv6	IPv4 e IPv6
Versão suportada de USIM	<i>Release 99</i> USIM e posteriores	<i>Release 99</i> USIM e posteriores
Mecanismos de transporte	CS e PS	PS
Componentes do domínio CS	Servidor MSC e MGW	Não há
Componentes do domínio PS	SGSN e GGSN	MME, S-GW e P-GW
Conectividade IP	Após registro	Durante registro
Aplicações de voz e SMS	Inclusas	Externas

Fonte: Adaptado de [14].

2.1.3.3 Arquitetura da Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network

A Figura 9 ilustra a arquitetura da rede de acesso desenvolvida para o LTE, a E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*).

Figura 9: Arquitetura da E-UTRAN.



FONTE: Adaptado de [14].

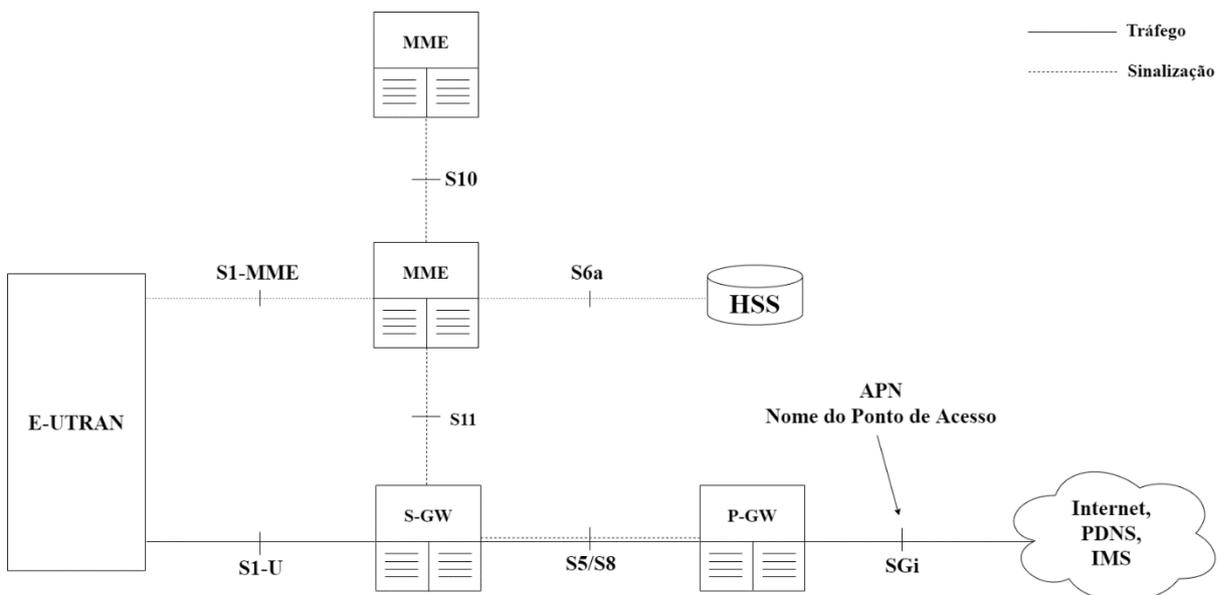
O papel da E-UTRAN é lidar com a comunicação entre UE e o núcleo da rede, apresentando a eNB (*evolved Node B*) como seu único componente. Assim, cada eNB administra os UEs em uma ou mais células, sendo que a eNB ativa em uma comunicação é dita servidora. Uma eNB tem duas funções principais, sendo relacionadas a tráfego e sinalização: a primeira, é enviar transmissões aos UEs no *downlink* e receber via *uplink*; a segunda, é enviar mensagens de controle de funções fundamentais para os UEs, por exemplo, comandos relacionados ao processo de *handover*. Desta forma, a eNB reúne as funções de dois predecessores: a Node B e o RNC, reduzindo a latência na rede.

A comunicação com o núcleo da rede se dá por meio da interface S1, enquanto a comunicação entre eNBs é dada via interface X2, responsável por sinalização e roteamento de pacotes durante um *handover*. Em geral, as interfaces X2 são configuradas por meio de auto-otimização [14], sendo interessantes entre eNBs próximas devido a *handovers*, pois são mais rápidas que a comunicação indireta das eNBs através do núcleo da rede e da interface S1.

2.1.3.4 Arquitetura do *Evolved Packet Core*

A Figura 10 ilustra os principais componentes do EPC (*Evolved Packet Core*).

Figura 10: Arquitetura com os principais componentes do EPC.



FONTE: Adaptado de [14].

O P-GW (*Packet Data Network Gateway*) é a porta de entrada no núcleo da rede para as redes externas, de forma que, por meio das interfaces SGi, cada P-GW possa trocar dados com um ou mais dispositivos, além de servidores de operadoras e com a própria Internet. Cada *packet data network* é identificado por um APN (*Access Point Name*) [14]. Os UEs são atribuídos a um P-GW no momento em que seu status é ativo na rede, garantindo a conectividade ao usuário. Um UE pode ser atribuído a outros P-GWs conforme se conecta, por exemplo, a Internet e a uma rede privada, mas os P-GWs selecionados permanecem durante toda a vida da conexão.

Por sua vez, o S-GW (*Serving Gateway*) atua como um roteador, encaminhando dados entre a estação base e o P-GW [14]. Geralmente, os S-GWs são atribuídos conforme regiões geográficas, de modo que os UEs se associem a apenas um S-GW por vez.

Em relação às funções de controle, o MME (*Mobility Management Entity*) destaca-se pelo envio de mensagens de sinalização relacionadas a segurança e administração de transmissões de dados sem relação à comunicação. Da mesma forma que os S-GWs, os MMEs são poucos e distribuídos de maneira que um usuário de determinada região conecte-se a apenas um deles. Ainda, são responsáveis por mensagens de controle entre os demais elementos da rede, enviando sinalização referente ao EPC.

O HSS é um elemento herdado da arquitetura dos padrões UMTS e GSM, sendo um banco de dados que centraliza informações de todos os assinantes de uma operadora.

Observando a nova arquitetura, é possível observar a equivalência entre P-GW e seu sucessor GGSN, enquanto os S-GWs e MMEs assumem em conjunto as funções dos SGSNs, de forma que a rede seja facilmente escalável diante do aumento da carga: aumenta-se o número de MMEs para lidar com o maior número de UEs.

2.1.4 Do LTE para o *LTE-Advanced*

Na década de 1990, a ITU auxiliou na definição de parâmetros para a tecnologia 3G por meio de uma série de requisitos sob o nome *International Mobile Telecommunications (IMT) 2000*. Sendo assim, os sistemas que atendessem aos requisitos do IMT-2000 eram considerados como 3G. Da mesma forma, a ITU lançou requisitos para sistemas de comunicação 4G sob o nome *IMT-Advanced* em 2008. Entretanto, esses requisitos eram superiores aos oferecidos pelo LTE, sendo eles: pelo menos 600 Mbps no DL e 270 Mbps no UL, além de BW de 40 MHz [14].

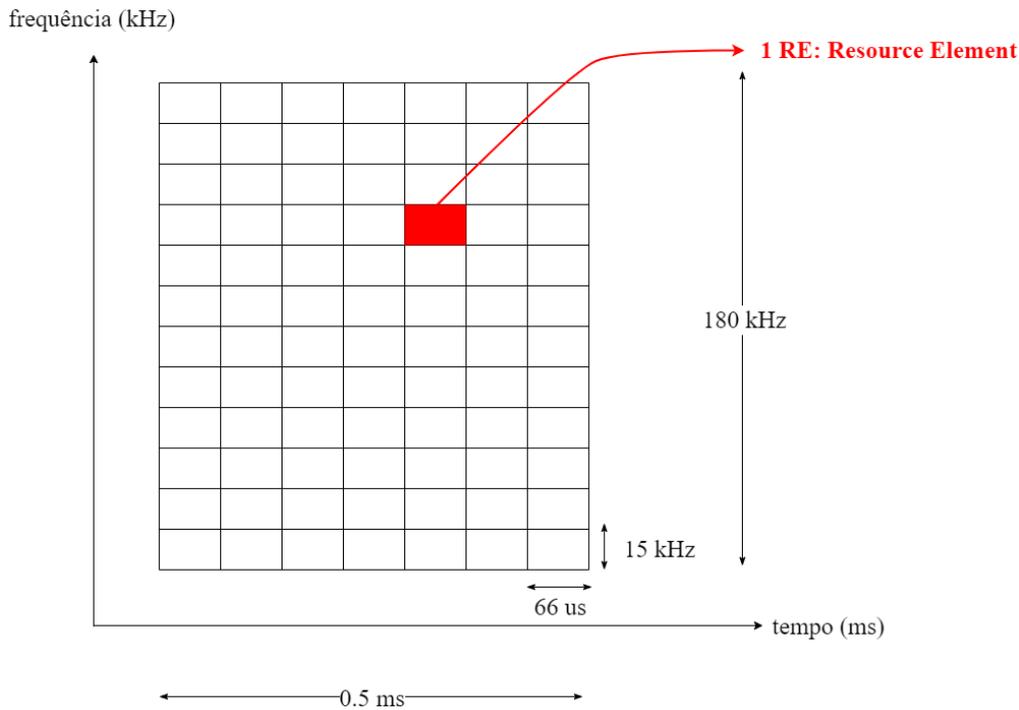
Assim, tomando como base os requisitos do *IMT-Advanced*, a organização 3GPP passou a estudar como aumentar as capacidades do LTE, tendo como principal resultado o sistema *LTE-Advanced*. Os requisitos para o LTE-A são: 1000 Mbps no DL e 500 Mbps no UL, embora tenha sido projetado para alcançar 3000 e 1500 Mbps, respectivamente, no DL e UL por meio da utilização de uma largura de banda de 100 MHz através de cinco componentes de 20 MHz. Além disso, as especificações de eficiência espectral são de 4,5 a 7 vezes maior que as observadas no *downlink* do WCDMA conforme a *Release 6* e de 3,5 a 6 vezes maior no *uplink*. Por fim, o LTE-A deveria ser compatível com o LTE, de forma que os dispositivos possam se comunicar com ambos.

2.1.5 Compartilhamento e alocação de recursos no *downlink*

O espectro é escasso e sua utilização e regularização são caros, mas há uma grande quantidade de usuários de sistemas de comunicação móvel. Assim, surge a questão de como compartilhar os recursos no espectro tendo tantos usuários. Esses usuários não necessitam de comunicação contínua, de forma que é preferível alocar recursos apenas quando há necessidade, ou seja, de maneira dinâmica. Desta forma, o LTE compartilha recursos tanto na frequência quanto no tempo. A largura de banda, variando no intervalo entre 1,4 a 20 MHz, é subdividida em subportadoras, cada uma podendo ser alocada para um usuário distinto. Assim, as frequências são periodicamente realocadas com base na evolução da necessidade dos usuários.

A menor porção de informação gerada na modulação é o símbolo, de forma que cada um constitui um RE (*Resource Element*). Cada RE equivale a uma subportadora de 15 kHz e a um intervalo de tempo de 66 μ s. Como os REs são unidades pequenas, é conveniente aloca-los em grupos maiores chamados de RBs (*Resource Blocks*). Cada RB é composto por doze subportadoras, totalizando 180 kHz, além de ocupar um intervalo de tempo de 0.5 ms. A Figura 11 ilustra a relação entre *resource elements* e *resource block*.

Figura 11: Relação entre *resource elements* e *resource block*.



FONTE: Autoria própria.

O número de RBs disponíveis varia conforme a largura de banda, como ilustra a Tabela 4.

Tabela 4 – Relação da quantidade de RBs disponíveis conforme a BW.

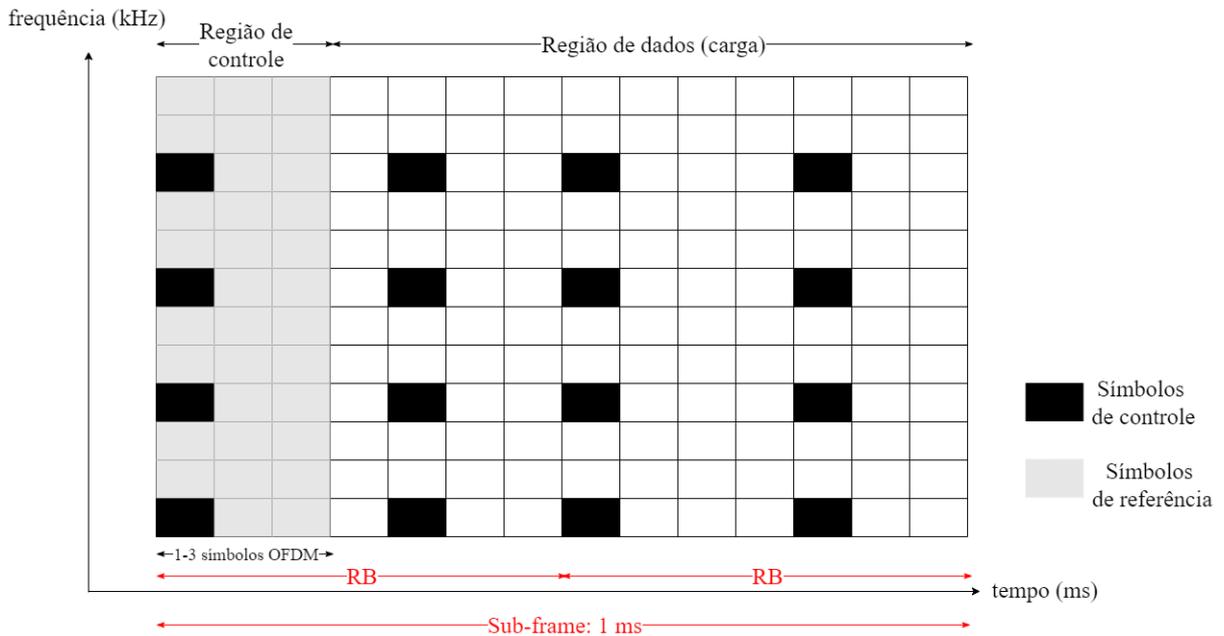
BW (MHz)	Quantidade de RBs
1,4	6
5	25
10	50
20	100

Fonte: Autoria própria.

A cada 1 ms, o LTE realoca os RBs aos usuários que desejam se comunicar. Assim, os RBs são alocados aos pares, criando o chamado *subframe*. Os *subframes* são o ponto-chave da alocação de recursos, pois os mecanismos relacionados ao tratamento de recursos tem como base o intervalo de 1 ms ou múltiplos desse intervalo. Para prover controle interno do LTE, existem alguns REs reservados nos RBs, como indica a Figura 12. Portanto, o *subframe* é composto por uma região de controle e de dados, intercaladas por símbolos de referência

chamados CRSs (*Cell Specific Reference Signals*), que são utilizados para estimar o canal. A Figura 12 ilustra a distribuição de CRSs considerando a transmissão realizada por uma única antena, tendo em vista que a quantidade de antenas influencia diretamente na densidade de símbolos de referência.

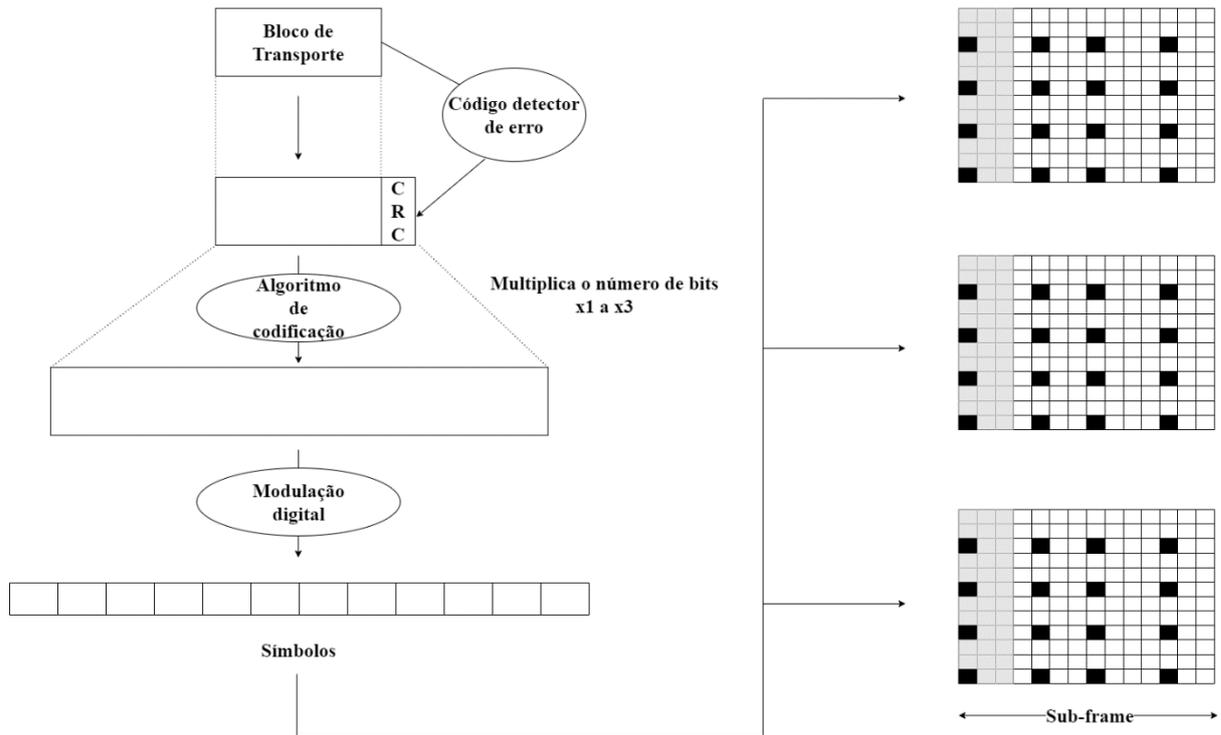
Figura 12: A estrutura do *subframe*.



FONTE: Autoria própria.

Os blocos de transporte representam o tamanho, em bits, dos dados transmitidos pelos RBs alocados. Esse tamanho depende tanto do número de RBs alocado quanto do MCS (*Modulation and Coding Scheme*) em uso. A cada *subframe*, os dispositivos são alocados com um ou mais RBs pela eNodeB, de forma que o tamanho dos blocos de transporte varia conforme a tabela “*Transport block size table (dimension 27x110)*” disponível na 3GPP TS 36.213 *version 8.3.0 Release 8* [15]. Há várias possibilidades para um mesmo tamanho, o que representa a adaptação em tempo real do MCS pelo LTE, podendo aumentar ou diminuir o MCS, alocando mais ou menos RBs. Assim, os blocos de transporte passam pela adição de códigos detectores de erro e algoritmos de codificação para ocorrer a modulação dos símbolos e, finalmente, a transmissão dos *subframes* com um ou mais pares de RBs. A Figura 13 ilustra de maneira simplificada essa cadeia da transmissão.

Figura 13: Cadeia de transmissão simplificada.



FONTE: Autoria própria.

Outra questão importante é como os UEs são informados sobre os recursos que podem utilizar. Assim, surgem os princípios da alocação por meio de agendamento, do inglês *scheduling*. Existem três princípios básicos:

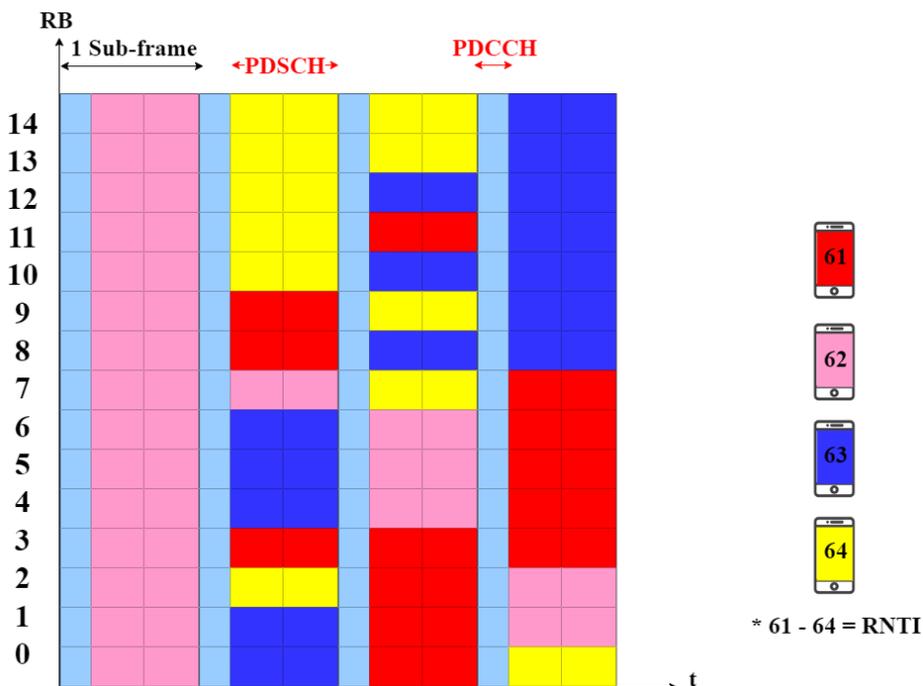
1. A alocação é centralizada nas eNodeBs tanto para o *uplink* quanto para o *downlink*. Desta forma, um UE transmite apenas diante da permissão da estação.
2. A alocação é feita apenas quando há necessidade de comunicação, pois, como já citado, o espectro é caro e limitado.
3. A cada 1 ms, ou seja, durante cada *subframe*, as eNodeBs geram tabelas de alocação de recursos, sendo uma para o DL e outra para o UL.

Para realizar tal tarefa, nota-se a necessidade de endereçamento para identificar os terminais. Os identificadores como IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) e GUTI (*Globally Unique Temporary Identifier*) identificam um terminal diante da rede como um todo. Entretanto, nesse caso, os limites geográficos são definidos a uma única célula, pois o *scheduling* é tratado de maneira independente pela eNodeB responsável, ou seja, o objetivo é identificar os terminais com relação à célula. Além disso, os identificadores são utilizados frequentemente devido à apresentação das tabelas de alocação a cada *subframe*, de forma que devem ser curtos.

Assim, o LTE introduziu o RNTI (*Radio Network Temporary Identifier*), responsável por ser alocado pela eNodeB no momento em que um novo terminal entra na rede. Esse identificador possui 16 bits de tamanho, sendo codificado entre 0x3D e 0xFFF3 (61 a 65523) e, portanto, possibilitando cerca de 65000 UEs por célula.

A alocação de recursos no *downlink*, ou seja, dos dados transferidos da estação base para o terminal, considera os princípios citados previamente, de forma que a alocação é realizada pela eNodeB e utiliza-se o RNTI, bem como as tabelas de alocação. As tabelas de alocação indicam o conteúdo ou parcela de cada RB, sendo estabelecida no início de cada *subframe*. Assim, servem como um mapeamento de RBs para que cada UE reconheça suas devidas mensagens. O UE decodifica apenas suas próprias mensagens, poupando energia. Caso o UE perceba que não há nenhum RB alocado para si, pode entrar em modo de *standby* até o próximo *subframe*. A Figura 14 ilustra um exemplo da alocação de recursos no *downlink* do LTE-A para uma célula servindo quatro usuários. Observa-se que os recursos são separados em dados de controle e dados de usuários. Os canais de controle são chamados PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*), sendo responsáveis por transportar as tabelas de alocação utilizando o primeiro *resource element* de cada *subframe*. Por fim, os demais canais são chamados PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*), servindo para transferir dados de usuários.

Figura 14: Exemplo da alocação de recursos no *downlink* do LTE-A.



FONTE: Autoria própria.

2.2 TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA

O padrão LTE-A busca utilizar o espectro disponível da melhor forma possível e, para tanto, utiliza o fator de reutilização de frequência reuse-1 para ofertar o serviço de telefonia móvel para uma quantidade maior de usuários. Contudo, a reutilização de frequências tem como consequência a ICI, apresentando como alicerce o escalonamento de recursos entre os canais das células vizinhas. Desta forma, para tratar a interferência predominante na borda das células, a ICIC foi introduzida, inicialmente, na 3GPP *Release* 8.

As técnicas de coordenação de interferência fundamentam-se em algoritmos de reuso de frequência executados na rede com o fim de ajustar a alocação de recursos. Essas técnicas podem ser estáticas ou dinâmicas e a alocação dos recursos pode ser realizada nos domínios do tempo (ICIC e eICIC), frequência (FeICIC) e espacial (CoMP). Ainda, todas as técnicas de coordenação de interferência contam com sincronização entre eNodeBs, salvo a ICIC. Ressalta-se que os algoritmos buscam adaptar a rede para o máximo de UEs possível, tendo como base o aumento da SINR [4].

2.2.1 Modelos Estáticos

Os modelos estáticos são baseados em três técnicas de reuso de frequência: FFR (*Fractional Frequency Reuse*), SFR (*Soft Frequency Reuse*) e PFR (*Partial Frequency Reuse*). Tais técnicas são utilizadas em arquiteturas sem gerenciamento centralizado de eNodeBs. Observa-se que o particionamento do espectro em razão do reuso de frequências é ineficaz para o padrão LTE [16]. Os recursos alocados entre usuários e células são computados somente na fase de planejamento da rede quando se aplica um modelo estático e durante a operação da rede móvel permite-se poucos ajustes [4].

Como os modelos estáticos são fundamentados em redes homogêneas, há um tratamento superficial dos problemas ocasionados pela ICI. Deste modo, tais modelos não suportam as exigências das redes dinâmicas utilizadas ao se trabalhar com o LTE-A devido à falta de adaptabilidade. Por outro lado, os modelos dinâmicos são capazes de alocar os *resource blocks* nas células vizinhas através da interface X2 (atua na sinalização entre eNodeBs), reduzindo a ICI. Como a ICI tem grande influência negativa na QoS devido à redução da eficiência espectral e do *throughput* para os UEs, existe enorme interesse na aplicação de métodos dinâmicos que proporcionem a otimização do uso de espectro disponível e melhorem a QoE [16].

2.2.2 Modelos Dinâmicos

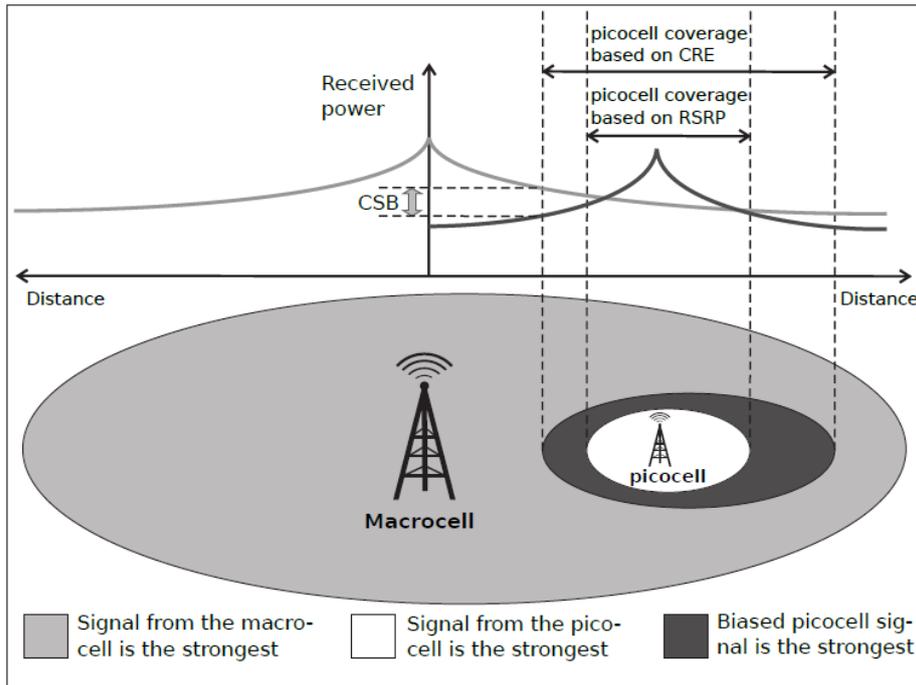
Os modelos dinâmicos fazem uso da coordenação de estações vizinhas, levando em conta o emprego de *sub-carriers* e níveis de potência diversos. Sendo assim, há necessidade de utilizar esquemas de sinalização para coordenar as células, assegurando maior adaptabilidade diante das possíveis variações e conferindo gerenciamento em tempo real da alocação de recursos [4]. Como citado previamente, os modelos dinâmicos englobam eICIC, FeICIC e CoMP, sendo a última excluída deste estudo.

2.2.2.1 eICIC

A interferência intercelular inerente às HetNets passou a ser tratada pela eICIC a partir da 3GPP *Release* 10 [10], trazendo a implementação de correções para o impasse de sobreposição das células. Entre os parâmetros utilizados, tem-se a CRE (*Cell Range Expansion*), responsável por uma maior distribuição de serviços para as *smallcells*, inclusive quando a potência do sinal das *macrocells* é superior, de forma que acarreta no aumento da capacidade da rede móvel. Essa distribuição leva em consideração o aumento da área de cobertura das *smallcells*, usando *offset* nos sinais recebidos das últimas e tendo como efeito o abrandamento do tráfego de dados exigido às *macrocells*.

O mecanismo de CRE também é chamado CSB (*Cell selection bias*) [17], tendo em vista que o aumento da potência recebida pelo usuário da *picocell* busca assegurar que mais usuários se vinculem às *picocells* ao invés de dar preferência à *macrocell*. Esse mecanismo é descrito pela Figura 15.

Figura 15: Técnica CSB para interferência em HetNets no LTE-A.



FONTE: Obtido de [17].

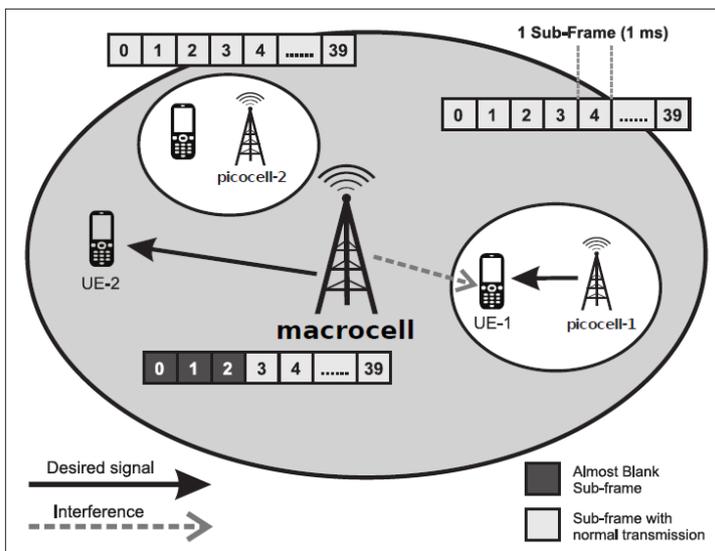
Na prática, alterar o *offset* significa alterar artificialmente a tendência de uma célula vizinha, a *smallcell* no caso, atrair os usuários. Assim, o CSB induz o usuário a efetuar o *handover* a partir dessa célula ou para essa célula de maneira indireta. Por exemplo, no caso em que a CSB aumenta de uma *macrocell* para uma *pico cell*, mais usuários serão transbordados da *macrocell* para a *pico cell*, aumentando a área de cobertura da *pico cell* de acordo com N. Trabelsi [18], citado em [17].

Ainda, outra técnica de grande impacto é, para modelos operantes no domínio do tempo, aplicar o particionamento dos recursos no tempo, o que acarreta na redução da interferência que impacta as bordas das *smallcells*. Desta forma, a estratégia é proteger os *sub-frames* chamados ABS (*Almost Blank Sub-frames*) perante a *macrocell*, resultando na imposição de um limite de potência à última, podendo até mesmo ter a potência zerada. Durante um ABS, a *macrocell* não transmite o PDSCH, criando *subframes* protegidos ou silenciados para a *pico cell* por meio da redução de sua potência, mas para compatibilidade com versões prévias, alguns sinais devem ser transmitidos em todos os *subframes* do *downlink* mesmo quando mutados [19]. A operação do ABS depende da sincronização temporal das transmissões das eNodeBs, levando em conta o efeito sobre a ICIC que ocorre no domínio do tempo.

Assim, a eICIC busca amenizar a interferência sobre UEs encontrados em especial na borda das *smallcells* quando a transmissão engloba estas últimas e *macrocells* e, para tanto,

trabalha o compartilhamento dos *subframes* no tempo. A Figura 16 ilustra o mecanismo de ABS. Observa-se um padrão de 40 *subframes* com duração total de 40 ms. A *picocell* que apresenta UEs sofrendo interferência da *macrocell*, irá, preferencialmente, agendar a transmissão dos UEs para os *subframes* protegidos. Os UEs localizados no centro da célula podem ser agendados sobre todos os *subframes*, tendo em vista que a interferência sofrida diante da presença da *macrocell* é irrelevante quando comparada ao sinal da *picocell* [17]. No exemplo da Figura 16, o UE-1 está associado a *picocell-1*, sofrendo interferência da *macrocell* pelo fato de estar localizado na borda da *picocell*. Durante cada um dos três padrões de *subframes* de 40 ms, a *macrocell* é mutada e não envia tráfego de dados. Assim, a interferência é reduzida durante os ABS e a *picocell-1* terá vantagem no agendamento do UE-1 [17].

Figura 16: Técnica ABS para interferência.



FONTE: Obtido de [17].

2.2.2.2 FeICIC

A FeICIC foi proposta na 3GPP Release 11 [11], veiculando a alocação de recursos nas *macrocells* através dos RP-ABSs (*Reduced Power Almost Blank Sub-frames*), de forma que a ideia é atender os usuários por meio de níveis reduzidos de potência [20]. Quando faz-se a escolha do ABS, exige-se que a *macrocell* anule a potência de transmissão nos elementos de recurso do PDSCH durante os *subframes*. Desta forma, há uma perda de recursos, ao optar pelo TDM, tanto em *subframes* eICIC quanto em *subframes* não-eICIC. Ou seja, as *smallcells*

poderiam utilizar *subframes* eICIC e não-eICIC, mas as *macrocells* ficariam restritas aos *subframes* não-eICIC durante a alocação de usuários.

Por meio da utilização de *subframes* eICIC é possível realizar medições e prover relatórios dos UEs a partir da transmissão do CRS. Entretanto, o CRS pode gerar interferência danosa aos canais de dados e controle. Esses CRS podem ser classificados como *colliding* e *non-colliding*, de acordo com o uso ou não dos saltos em frequência nos sinais de referência. Caso ocorra salto em frequência nos sinais de referência, os símbolos CRS das células adjacentes são do tipo *non-colliding*, enquanto que, sem saltos em frequência, os símbolos CRS são classificados como *colliding* [20]. No caso da classificação como *colliding*, os símbolos CRS interferem nos símbolos CRS das células adjacentes, de forma que há uma imprecisão na estimativa do canal.

A interferência devido ao CRS pode ser evitada no transmissor ou removida no receptor quando a técnica utilizada é a FeICIC. Do ponto de vista do receptor, o UE deve estimar a maior interferência do CRS para que ocorra a mitigação da mesma. Em relação ao transmissor, o método adotado é silenciar os elementos de recurso do PDSCH dentro do ABS da *smallcell* que sofre grande interferência do CRS da *macrocell*. Portanto, há ganhos consideráveis na utilização do RB-ABS em relação ao ABS [20].

2.3 ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO

Um dos principais atributos dos sistemas LTE e LTE-A é o escalonamento de múltiplos usuários, pois é a forma de distribuir os recursos disponíveis entre os usuários ativos, de forma que sejam satisfeitas as necessidades de QoS. Os canais de dados, como o PDSCH, são divididos entre os usuários, o que induz ao fato de que o espectro é repartido entre eles a cada duração do *subframe*, ou seja, a cada TTI (*Transmission Time Interval*). Desta forma, são desenvolvidos algoritmos de escalonamento para as eNodeBs e, devido ao OFDMA, idealmente não há interferência entre canais de uma mesma célula [13]. Como visto anteriormente, os recursos são distribuídos tanto no tempo quanto na frequência e, sendo assim, os algoritmos de escalonamento operam com granularidade de um TTI no domínio do tempo e um RB na frequência.

De modo geral, a alocação de recursos para um UE segue o seguinte princípio: o k -ésimo RB é alocado para o j -ésimo usuário caso sua métrica $m_{j,k}$ seja a maior, ou seja, caso satisfaça a Equação 2 [13]:

$$m_{j,k} = \text{máx.}_i \{m_{i,k}\} \quad (2)$$

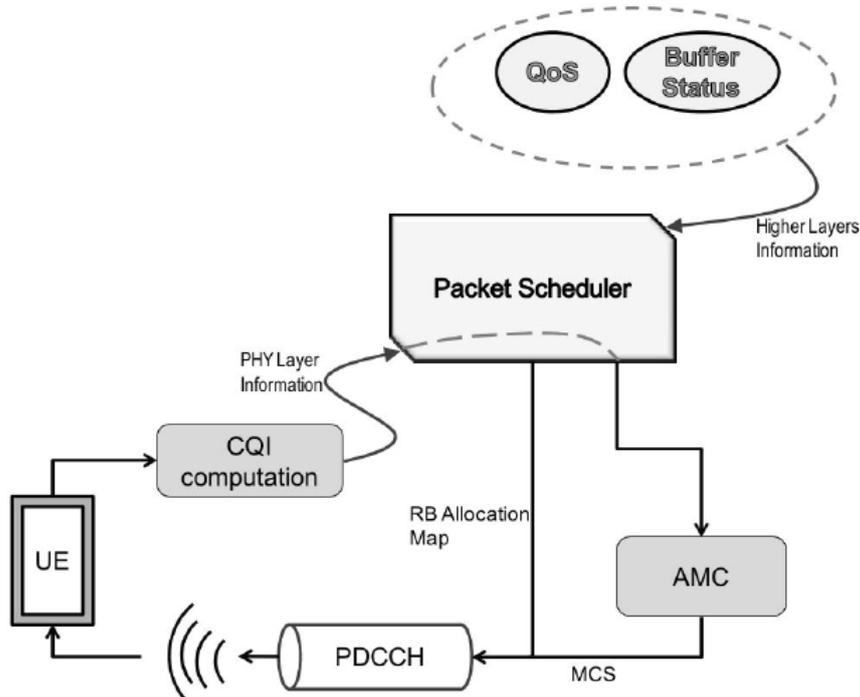
Essa métrica pode ser interpretada como a prioridade de transmissão de cada usuário durante um RB. O cálculo da métrica varia conforme algum parâmetro relacionado ao fluxo de dados, tendo em vista a performance desejada do sistema, por exemplo:

- Status das filas de transmissão: o status da filas de transmissão dos UEs pode ser utilizada para minimizar os atrasos na entrega de pacotes. Por exemplo: quanto maior a fila, maior o valor da métrica.
- Qualidade do canal: os valores de CQI (*Channel Quality Indicator*) podem ser utilizados para alocar recursos aos usuários com melhores condições de canal. Por exemplo: quanto maior a vazão, maior o valor da métrica.
- Histórico da alocação de recursos: informações de desempenhos anteriores podem ser utilizadas para aumentar a igualdade na alocação de recursos. Por exemplo: quanto menor a última vazão alcançada, maior a métrica.
- Estado de *buffer*: as condições do *buffer* de recepção podem ser utilizadas para evitar sobrecargas. Por exemplo: quanto maior o espaço disponível no *buffer* de recepção, maior a métrica.
- Requisitos de QoS: o valor de QCI de cada fluxo de dados pode ser utilizado para utilizar-se de políticas específicas com o objetivo de atingir os requisitos de QoS.

A cada TTI, o escalonador faz a decisão de alocação para o próximo TTI e informa os UEs utilizando o PDCCH. Assim, as informações de controle na carga do PDCCH informam os UEs a respeito dos RBs alocados para a transmissão de dados no PDSCH na direção do *downlink*. Um conceito importante no escalonamento de recursos é o de sensibilidade do canal: o algoritmo realiza o escalonamento para transmissões de UEs que apresentam as melhores condições de canal conforme a métrica selecionada no intervalo de tempo atual e em sua devida frequência. Em relação ao número de usuários, como o desvanecimento é independente entre usuários, observa-se um ganho pela diversidade por múltiplos usuários nos procedimentos de alocação de recursos. Desta forma, a capacidade geral do sistema aumenta conforme o número de usuários [13].

A Figura 17 ilustra um modelo de escalonamento de recursos no *downlink*.

Figura 17: Modelo simplificado de um escalonador de pacotes.



FONTE: Obtido de [13].

O procedimento pode ser dividido em uma sequência de operações que são repetidas a cada TTI:

1. Cada UE decodifica os sinais de referência recebidos da eNodeB, calcula o CQI e envia de volta para a eNodeB.
2. A eNodeB toma o CQI de base para as decisões de alocação de recursos e gera uma máscara de alocação para os RBs.
3. O módulo de AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) seleciona o melhor MCS para as transmissões dos usuários escalonados.
4. As informações sobre os usuários, RBs alocados e o MCS selecionado são enviadas para os UEs por meio do PDCCH.
5. Cada UE lê as informações do PDCCH e, caso tenha sido escalonado, acessa as informações do devido PDSCH.

As diferentes estratégias de alocação de recursos têm como base a troca entre otimização e complexidade computacional. Sendo assim, conforme Capozzi [13], os principais fatores na tomada de decisão para a constituição de uma política de alocação de recursos no LTE-A são:

1. Complexidade e Escalabilidade: um algoritmo de escalonamento do LTE-A trabalha com granularidade temporal de 1 ms, pois as decisões de alocação devem ocorrer a cada TTI. Sendo assim, baixa complexidade e a possibilidade de escalabilidade são requisitos fundamentais para limitar processos no tempo e uso de memória. Em geral, os algoritmos são baseados em cálculos de métricas relacionadas aos RBs por usuário. De

tal forma, reduz-se a complexidade em razão de cada RB ser alocado ao usuário com a melhor métrica independente dos demais RBs. Sendo N e R a quantidade de usuários ativos no TTI atual e o número de RBs disponíveis, o cálculo deve ser $M = N \cdot R$ a cada TTI. Como há uma dependência linear entre a quantidade de RBs e usuários, é possível assegurar a escalabilidade.

2. Eficiência Espectral: a utilização de forma eficiente do espectro é um dos principais objetivos a serem alcançados. Para tanto, um dos indicadores a ser considerado é uma política de maximização do número de usuários servidos durante um intervalo de tempo, ou ainda, a eficiência espectral, expressa em bits/s/Hz, sempre servindo usuários que apresentam as melhores condições de canal.
3. Índice de justiça: a maximização da *throughput* total da célula possibilita a utilização efetiva do canal em termos de eficiência espectral, mas também gera o compartilhamento injusto de recursos entre os usuários. Assim, o índice de justiça é um requisito para que os usuários que sofrem com más condições de canal também tenham uma performance mínima garantida, em especial os usuários das bordas das células.
4. Provisionamento de QoS: as arquiteturas *all-IP* têm como característica a possibilidade de provisionamento de QoS, ou seja, as redes móveis devem mapear os fluxos de QoS para portadoras dedicadas que, dependendo dos QCIs, habilitam processos específicos de controle de recursos (RRM – *Radio Resource Management*).

Uma das formas de alcançar o equilíbrio entre os requisitos de índice de justiça e eficiência espectral é o uso do algoritmo PF (*Proportional Fair*). A métrica do PF é obtida por meio das métricas dos algoritmos MT (*Maximum Throughput*) e BET (*Blind Equal Throughput*).

A Tabela 5 indica o significado dos termos utilizados no equacionamento dos algoritmos de escalonamento.

Tabela 5 – Notações utilizadas para as métricas de escalonamento.

Expressão	Significado
$m_{i,k}$	Métrica genérica do i -ésimo usuário no k -ésimo RB
$r^i(t)$	Taxa de dados alcançada pelo i -ésimo usuário no intervalo de tempo t
$\bar{R}^i(t)$	<i>Throughput</i> média alcançada pelo i -ésimo usuário até o intervalo de tempo t
$d_k^i(t)$	Taxa de dados esperada para o i -ésimo usuário no intervalo de tempo t para o k -ésimo RB
T_f	Intervalo de tempo para a janela do índice de justiça

Fonte: Adaptado de [13].

2.3.1 Maximum Throughput

A estratégia conhecida como algoritmo MT busca maximizar a *throughput* total por meio da associação de cada RB ao usuário que pode alcançar a máxima *throughput* possível no TTI atual. A métrica é expressada pela Equação 3:

$$m_{i,k}^{MT} = d_k^i(t) \quad (3)$$

Assim, o algoritmo MT é capaz de maximizar a *throughput* da célula, mas o compartilhamento de recursos entre usuários é realizado de maneira injusta, visto que aos usuários com más condições de canal a porcentagem de recursos disponível é muito menor.

2.3.2 Blind Equal Throughput

A justiça na *throughput* pode ser alcançada com o algoritmo BET, pois a *throughput* média alcançada por cada usuário é utilizada como métrica. Assim, a métrica para o i -ésimo usuário é calculada pela Equação 4:

$$m_{i,k}^{BET} = \frac{1}{\bar{R}^i(t-1)} \quad (4)$$

Onde:

$$\bar{R}^i(t) = \beta \bar{R}^i(t-1) + (1-\beta)r^i(t) \quad (5)$$

E $0 \leq \beta \leq 1$.

Essa métrica é bastante utilizada em diversos algoritmos de escalonamento. É possível notar que a cada TTI, o BET aloca os recursos aos fluxos que foram servidos com a menor *throughput* média no passado. Assim, o usuário que experimenta a menor *throughput*, acaba tendo preferência na alocação de recursos: ele será servido enquanto não alcançar a mesma *throughput* dos demais usuários da célula. Devido a essa política de alocação, os usuários com piores condições de canal são servidos de forma mais frequente, melhorando o índice de justiça.

Por fim, o fator $\bar{R}^i(t)$ representa a *throughput* média do i -ésimo usuário até o intervalo t , sendo calculada como uma média móvel atualizada a cada TTI para cada usuário.

2.3.3 Proportional Fair Scheduler

Como resultado da utilização das métricas dos algoritmos MT e BET, o algoritmo PF segue o seguinte equacionamento:

$$m_{i,k}^{PF} = m_{i,k}^{MT} \cdot m_{i,k}^{BET} = \frac{d_k^i(t)}{\bar{R}^i(t-1)} \quad (6)$$

Assim, a ideia é que a *throughput* média passada seja utilizada como um peso para a taxa de dados esperada, de forma que os usuários em más condições sejam servidos em determinado período de tempo [13]. O parâmetro β , presente na Equação de $\bar{R}^i(t)$, é importante por estar relacionado ao intervalo T_f , sobre o qual deseja-se estabelecer a justiça:

$$T_f = \frac{1}{1 - \beta} \quad (7)$$

Caso $\beta = 0$, tem-se pela Equação 5:

$$\begin{aligned} \bar{R}^i(t) &= 0 \cdot \bar{R}^i(t-1) + (1-0)r^i(t) \\ \bar{R}^i(t) &= r^i(t) \end{aligned}$$

E pela Equação 7:

$$\begin{aligned} T_f &= \frac{1}{1-0} \\ T_f &= 1 \end{aligned}$$

Sendo assim, a *throughput* média é igual a última taxa instantânea e o intervalo de justiça T_f é igual a 1 TTI.

Por outro lado, se $\beta = 1$, observa-se o seguinte pela Equação 5:

$$\bar{R}^i(t) = 1 \cdot \bar{R}^i(t-1) + (1-1)r^i(t)$$

$$\bar{R}^i(t) = \bar{R}^i(t - 1)$$

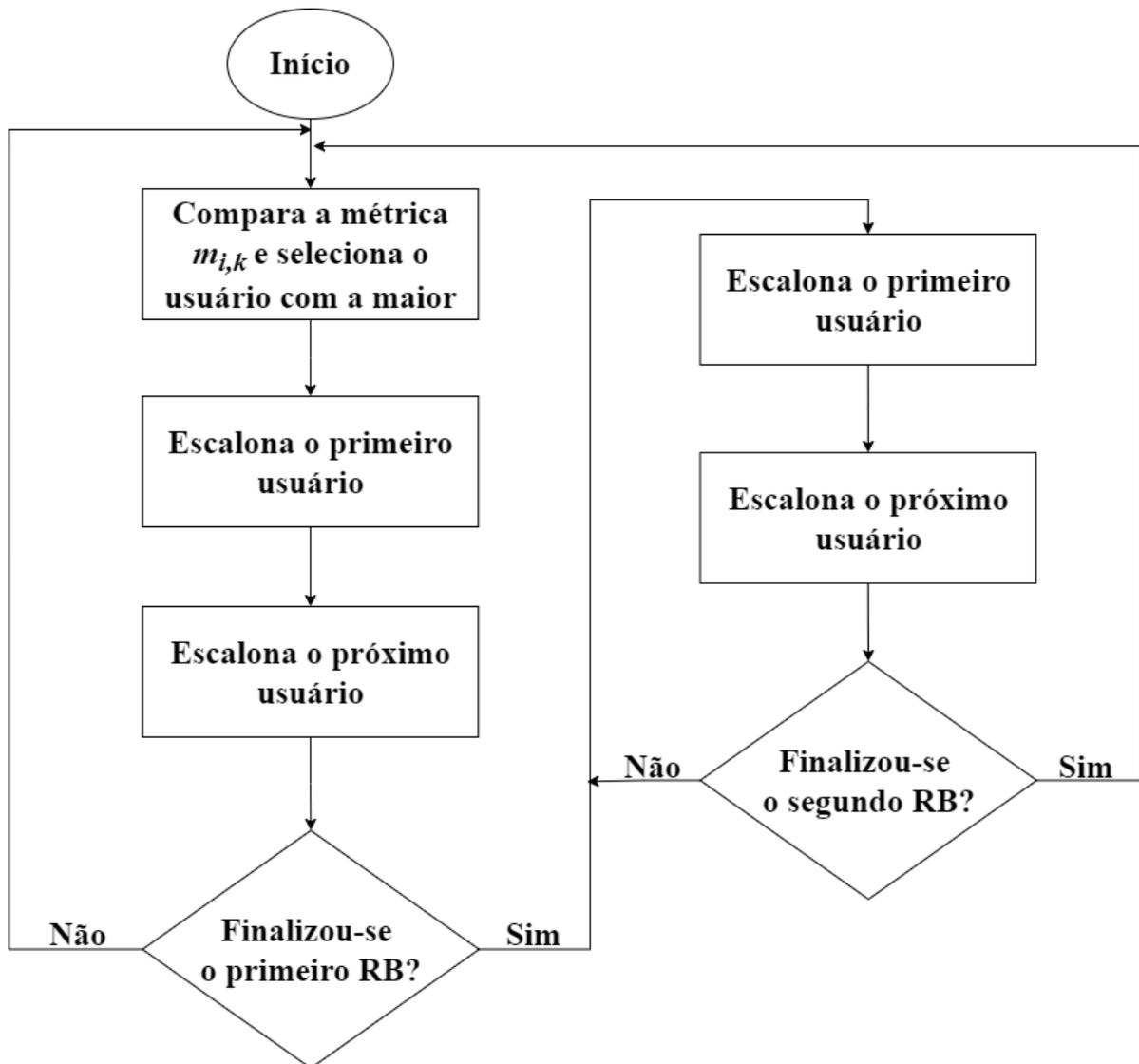
E pela Equação 7:

$$\lim_{\beta \rightarrow 1} T_f = \frac{1}{1 - \beta} = \infty$$

Portanto, quando β se aproxima de 1, a última taxa alcançada não é incluída no cálculo da *throughput* média e o intervalo de justiça T_f tende ao infinito.

A Figura 18 ilustra o fluxograma para o algoritmo *Proportional Fair*.

Figura 18: Fluxograma do algoritmo PF.



FONTE: Adaptado de [21].

2.3.4 Generalized Proportional Fair

No estudo de Capozzi [13], propõe-se uma otimização do algoritmo PF com o intuito de analisar o impacto na métrica do escalonador ao variar o impacto das métricas dos algoritmos BET e MT presentes no algoritmo PF. O GPF (*Generalized Proportional Fair*) apresenta a seguinte Equação:

$$m_{i,k}^{GPF} = \frac{[d_k^i(t)]^\xi}{[\bar{R}^i(t-1)]^\varphi} \quad (8)$$

O objetivo dos parâmetros ξ e φ é modificar o impacto na política de alocação de recursos por meio da taxa instantânea de dados e a *throughput* média, respectivamente. Sendo assim, quando $\xi = 0$, tem-se pela Equação 8:

$$m_{i,k}^{GPF} = \frac{[d_k^i(t)]^0}{[\bar{R}^i(t-1)]^\varphi} = \frac{1}{[\bar{R}^i(t-1)]^\varphi}$$

Observa-se que a métrica do GPF torna-se igual à métrica do BET, de forma que a justiça pode ser alcançada pelo sistema independente das condições de canal.

Por outro lado, ao fazer $\varphi = 0$, tem-se pela Equação 8:

$$m_{i,k}^{GPF} = \frac{[d_k^i(t)]^\xi}{[\bar{R}^i(t-1)]^0} = [d_k^i(t)]^\xi$$

Portanto, a métrica do GPF equivale à métrica do algoritmo MT, no qual a política não estabelece justiça, mas busca otimizar a *throughput* total da célula.

Ainda, é possível observar que a condição $\xi = \varphi = 1$ resulta na métrica original do algoritmo PF. Neste estudo, seguiu-se os valores adotados por J. Moreira [17], de forma que busca-se analisar os resultados da simulação por meio do equilíbrio entre índice de justiça e *throughput* total. Os valores são: $\xi = 0.7$ e $\varphi = 0.6$.

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As técnicas de Coodenação de Interferência Intercelular e os algoritmos de escalonamento em sistemas de comunicação móvel têm sido foco de estudo e busca por padronização. Sendo assim, esta seção expõe trabalhos relacionados ao tema de maneira breve.

Em [22], aplicou-se a *Game Theory* para melhorar o desempenho das técnicas de ICIC e analisar os ganhos em eficiência espectral e energética, bem como para a *throughput* e índice de justiça. Para efeito de comparação, propôs-se a utilização das técnicas eICIC e FeICIC em cenários distintos, além de um cenário sem o emprego de técnica de ICIC. Além disso, os algoritmos de escalonamento utilizados para o *downlink* foram: RR (*Round Robin*) e PF. Em uma análise adicional, estudou-se o algoritmo CC (*Cake-Cutting*) para comparação com os anteriores.

De modo semelhante ao artigo anterior, os autores publicaram outros trabalhos relacionados à redução da interferência intercelular baseados em *Game Theory* para redes LTE, LTE-A e 5G. Por meio de jogos potenciais, os estudos [23] e [24] analisam a otimização da eICIC.

Quanto ao artigo [25], observa-se a comparação de cenários utilizando as técnicas eICIC, FeICIC e nenhuma técnica ICIC. Da mesma forma que em [21], os parâmetros analisados foram os ganhos em índice de justiça e das eficiências energética e espectral, bem como a *throughput* para os usuários localizados nas bordas das células. Assim, a configuração das células foi tal que há uma *macrocell* central e o número de *picocells* foi variado visando estudar o comportamento das diferentes técnicas.

Os autores de [25] buscaram em [17] analisar a formulação de *Game Theory* para otimizar a utilização dos ABSs e do mecanismo de CSB tanto para as *macrocells* quanto para as *picocells*. Os resultados da simulação ilustram melhorias na performance do sistema principalmente em relação ao parâmetro de justiça aos usuários localizados nas extremidades das células quando compara-se a otimização da técnica eICIC com a função de utilidade inalterada.

Ainda a respeito das técnicas de ICIC, o estudo em [19] examina as soluções de atenuação da interferência intercelular propostas entre as *Releases* 8 e 11 da 3GPP. A comparação das técnicas ICIC, eICIC e CoMP mostram novamente melhor desempenho de *throughput* para os usuários da periferia das células.

A pesquisa proposta em [13] traz os princípios dos mecanismos de escalonamento de recursos, pois são importantes ferramentas na administração de recursos em redes móveis, possibilitando envolver as condições de canal e requisitos de QoS. Desta forma, há comparação de performance dos principais algoritmos de escalonamento, tendo como foco as capacidades de provisionamento de QoS.

Por fim, o estudo apresentado em [26] propõe a análise do código e resultados propostos em [21], com o intuito de analisar os algoritmos RR, PF e a modificação da função de utilidade do PF que resulta no GPF, além de estudar as técnicas de coordenação de interferência diante de uma rede heterogênea LTE-A, variando a quantidade de *picocells*.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, fez-se uma breve explicação sobre o desenvolvimento das redes móveis até o padrão LTE-A, explicando também os conceitos básicos a respeito da arquitetura de rede e sobre o compartilhamento e alocação de recursos. A seguir, apresentou-se a diferença entre os modelos de técnicas de ICIC, destacando as duas técnicas analisadas na pesquisa: eICIC e FeICIC. Ainda, foi explicada a alocação de recursos por meio das métricas adotadas pelos algoritmos que originaram o PF e, por consequência, o GPF. Finalmente, a seção anterior descreve de maneira sucinta as principais pesquisas utilizadas como referências teóricas e para a análise dos resultados obtidos via simulação. Sendo assim, percebe-se a importância do estudo das técnicas de ICIC diante de HetNets, devido à tendência das redes a uma maior densificação. Nota-se o estudo da variação da quantidade de *picocells* em algumas das referências, de forma que analisar o efeito da variação de usuários na capacidade do sistema de comunicação móvel é uma contribuição aos estudos já existentes. A partir do embasamento teórico proposto neste capítulo e no anterior, os próximos capítulos descrevem as métricas analisadas, ambiente de simulação e por fim, os resultados e sua discussão.

3 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é descrever os métodos de pesquisa utilizados no trabalho, além de indicar os parâmetros e o ambiente de simulação e, por fim, explicar as métricas analisadas.

3.1 MÉTODOS DE PESQUISA

A princípio, buscou-se o embasamento teórico a respeito das técnicas e do cenário estudado, tendo por objetivo a análise dos efeitos da otimização da função de utilidade do algoritmo de escalonamento PF, com destaque para as seguintes métricas: eficiência espectral e energética, índice de justiça e *throughput*. Partiu-se da revisão bibliográfica das obras mencionadas na seção de referências, em especial o estudo prévio das técnicas de ICIC [12], o estudo de teoria dos jogos de Y. Liu [21] que propôs os códigos utilizados para simulação e, por fim, as pesquisas de F. Capozzi [13] e J. Moreira [17] acerca das técnicas de escalonamento.

Desta forma, após o estudo de resultados referentes a simulações das técnicas eICIC e FeICIC, bem como do algoritmo GPF, buscou-se implementar o algoritmo GPF via MATLAB em conjunto com os códigos utilizados por Y. Liu [21]. As simulações foram realizadas com base no número de *small cells* e usuários dispostos na rede, de forma que os resultados possibilitaram analisar o efeito da densificação da rede e o ganho pela diversidade devido a presença de múltiplos usuários durante a alocação de recursos.

3.2 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

A Tabela 6 dispõe os principais parâmetros utilizados na simulação, os quais são baseados no trabalho descrito em [21].

Tabela 6 – Parâmetros utilizados para simulação.

Parâmetro	Valor
Geometria da célula	Hexagonal
Número de <i>clusters</i>	7
Número de células por <i>cluster</i>	19
Número de topologias criadas	10
Distância entre <i>macrocells</i>	1000 m
Distância mínima da <i>macrocell</i> para um usuário	35 m
Distância mínima da <i>picocell</i> para um usuário	10 m
Distância mínima entre <i>macrocell</i> e <i>picocell</i>	75 m
Potência da <i>macrocell</i>	40 W
Potência da <i>picocell</i>	1 W
Densidade de ruído térmico	-174 dBm/Hz
Figura de ruído	9 dB
Duração por <i>subframe</i>	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 <i>macrocell</i> para um usuário	$128.1 \pm 37.6 \log_{10} d, d \text{ em km}$
Perda de percurso da <i>picocell</i> para um usuário	$140.7 \pm 36.7 \log_{10} d, d \text{ em km}$
Escalonador	PF e GPF
Técnicas de ICIC	eICIC e FeICIC

Fonte: Autoria própria.

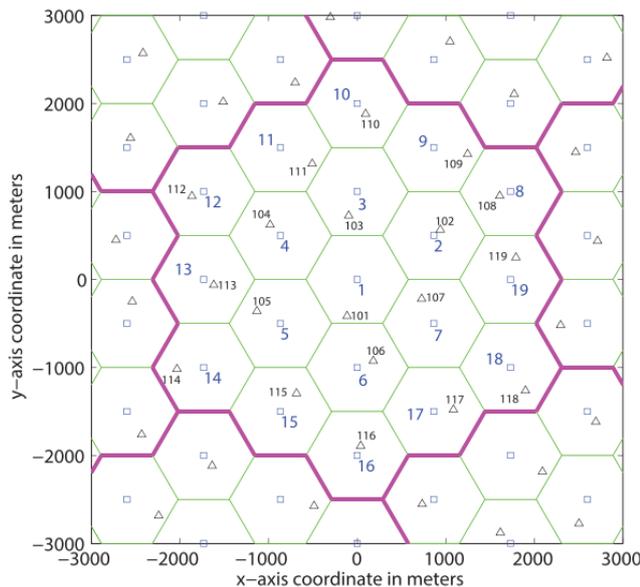
A geometria da célula do sistema tem formato hexagonal. Existem 7 *clusters* no cenário, sendo constituído de *macrocells* e *picocells*, de forma que há exatos 6 *clusters* vizinhos aos *cluster* central. Todos os *clusters* são idênticos. A distinção entre *clusters* é feita porque desejava-se otimizar apenas o *cluster* central, de forma que os *clusters* adjacentes são gerados apenas para configurar a interferência como na prática. As redes LTE implantadas em áreas urbanas apresentam distância entre *macrocells* de 1000 m, sendo a distância adotada na simulação. Em relação à distância mínima das *picocells* para a *macrocell* correspondente, tem-se 75 m. Ainda, as distâncias mínimas entre *macrocell* até um usuário e *picocell* até um usuário são, respectivamente, 35 e 10 m.

Para a análise dos cenários sem técnica ICIC, bem como utilizando eICIC e FeICIC diante das técnicas de escalonamento PF e GPF, foram geradas 10 topologias de HetNets, sendo o resultado de desempenho obtido a partir da média dentre todas as topologias. Existe somente uma *macrocell* central em cada hexágono e os hexágonos apresentam igual número de *picocells*. Variou-se o número de *picocells* no *cluster* central de cada topologia entre 1 e 4, sendo que a disposição das *picocells* é aleatória. Além disso, os usuários também são colocados de maneira aleatória a uma distância de até 100 metros das *picocells* de um mesmo hexágono. A quantidade de usuários para cada hexágono central do *cluster* foi variada entre 10 e 20, dois a dois.

Por fim, a fração de usuários de uma célula que são posicionados próximos a uma *picocell* dentro daquela célula é de 0,5. Ou seja, metade dos usuários da célula são colocados de maneira aleatória a uma distância de até 100 metros da *picocell*. Se existem p *picocells*, para $p > 1$, nota-se que a quantidade selecionada de usuários é dividida em p grupos, e um grupo selecionado de forma aleatória é colocado na vizinhança de uma *picocell*.

A Figura 19 ilustra um exemplo de *layout* para uma HetNet hexagonal. Nela, os quadrados representam as *macrocells* e os triângulos representam as *picocells*. Os usuários não foram ilustrados para manter a clareza da imagem.

Figura 19: Exemplo de configuração de uma HetNet hexagonal.



FONTE: Obtido de [21].

Esse ambiente de simulação é disposto via código empregando o *software* MATLAB e tem como funções:

- *augmentation_path*: responsável por encontrar o *augmentating path*, ou seja, o caminho entre origem e destino na rede.
- *BetterResp_eICIC*: implementação da técnica eICIC por meio da otimização de ABS e CSB.
- *BetterResp_FeICIC*: implementação da técnica FeICIC através da otimização de RP-ABS e CSB.
- *CreateCell*: cria o *cluster* de hexágonos, configurando as distâncias, coordenadas e índices de estações.
- *FetchCSB*: busca os valores de CSB das possíveis estações para cada UE.
- *FindEnergy*: calcula a energia consumida para servir os UEs.
- *FindNumHexagon*: calcula o número de células no *layout* hexagonal, dada a quantidade de camadas.
- *GenPicoPositionRandom*: gera as coordenadas da *picocell*.
- *GPF_scheduler_LTE*: algoritmo de escalonamento GPF.
- *jain*: cálculo da métrica de justiça.
- *main_ideal*: função principal que chama as demais funções, além de possibilitar configurar parâmetros como número de usuários por célula, número de *picocells*, quantidade de topologias e número de iterações.
- *max_flow_FF*: algoritmo de cálculo de tráfego máximo conforme Ford-Fulkerson.
- *PF_scheduler_LTE*: algoritmo de escalonamento PF.
- *Pilot_CSB_Asso*: associação de usuários determinada pela força do sinal de referência e CSB.
- *ReturnMacroIx*: retorna o índice de uma *macrocell* na estrutura apresentada.
- *ReturnPicoIx*: retorna o índice de uma *picocell* na estrutura apresentada.
- *Schedule_all*: realiza o escalonamento conforme todos os algoritmos de escalonamento utilizados.
- *Throughput*: cálculo da *throughput*.
- *update_status*: atualiza os valores pertinentes a uma estação, por exemplo, ABS e CSB.
- *wrap_aroung_model_random*: gera a topologia aleatória da rede.

3.3 MÉTRICAS ANALISADAS

Há diversas métricas para avaliação da performance de um sistema de comunicações móveis. Tratando-se da análise das técnicas de ICIC e dos algoritmos de escalonamento, as métricas selecionadas foram eficiência espectral, eficiência energética, *throughput* e, por fim, o índice de justiça.

3.3.1 Eficiência Espectral

A eficiência espectral diz respeito à média de bits transmitidos por segundo por Hz (bits/s/Hz), considerando todos os PRBs (*Physical Resource Blocks*) alocados durante a conexão estabelecida [23]. A eficiência espectral mostra-se um dos principais critérios de performance de sistemas de comunicação sem fio em razão ao espectro limitado disponível. Sendo assim, é interessante que os sistemas possam transmitir o máximo número de bits por unidade de frequência, possibilitando a utilização da menor largura de banda possível, ou explorando ao máximo uma largura de banda fixa. Ainda, essa métrica está ligada à taxa de dados do sistema, sendo um importante critério de QoS da rede móvel.

3.3.2 Eficiência Energética

A eficiência energética pode ser definida como o número de bits transmitidos com relação à potência de transmissão, sendo expressa em bits/J [23]. Desta forma, a eficiência energética é um parâmetro essencial para determinar o aproveitamento da potência utilizada nos sistemas de comunicações móveis.

3.3.3 Throughput

A *throughput* expressa a taxa de dados recebida na camada de aplicação do UE. Em geral, a taxa de transferência de dados é expressa em bits por segundo: bps, kbps, Mbps, Gbps e Tbps. Neste trabalho, a análise é feita sobre a *throughput* dos 5% piores usuários, que são, em geral, os usuários localizados na borda da célula.

3.3.4 Índice de Justiça

O índice de justiça é uma medida de imparcialidade ou justiça, sendo utilizada para determinar se os usuários estão recebendo de forma justa os recursos. O valor da métrica índice de justiça é calculado a partir do vetor que contém os valores de taxa de dados para determinada técnica de ICIC e algoritmo de escalonamento. O cálculo segue a Equação 9:

$$\text{Índice de justiça} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (9)$$

Onde n representa o número de usuários e x_i indica a *throughput* para a i -ésima conexão estabelecida.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por objetivo apresentar os métodos de pesquisa utilizados, bem como detalhar o ambiente de simulação utilizado no *software* MATLAB e, por fim, descrever as métricas analisadas por meio dos dados resultantes da simulação. Assim, a partir de tais métricas, o Capítulo 4 exibe os resultados obtidos e apresenta as discussões pertinentes a cada cenário.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por meio das simulações são apresentados e discutidos neste capítulo. A discussão tem como base a análise das métricas descritas no capítulo anterior.

4.1 EFICIÊNCIA ESPECTRAL

4.1.1 Cenário 1: número fixo de *picocells* e variação de usuários

Neste primeiro cenário, considerou-se a eficiência espectral em função do número de usuários, analisando o impacto da diferente quantidade de *picocells* separadamente. Ainda, as técnicas indicadas nas tabelas e figuras envolvem a não utilização de técnicas de ICIC, quando descreve-se o resultado como “PF” ou “GPF”, enquanto que os resultados referentes a “eICIC” e “FeICIC” indicam a utilização de tais técnicas em conjunto com o algoritmo de escalonamento padrão PF. Por fim, “eICIC GPF” e “FeICIC GPF” indicam a utilização tanto das técnicas de ICIC quanto do algoritmo GPF.

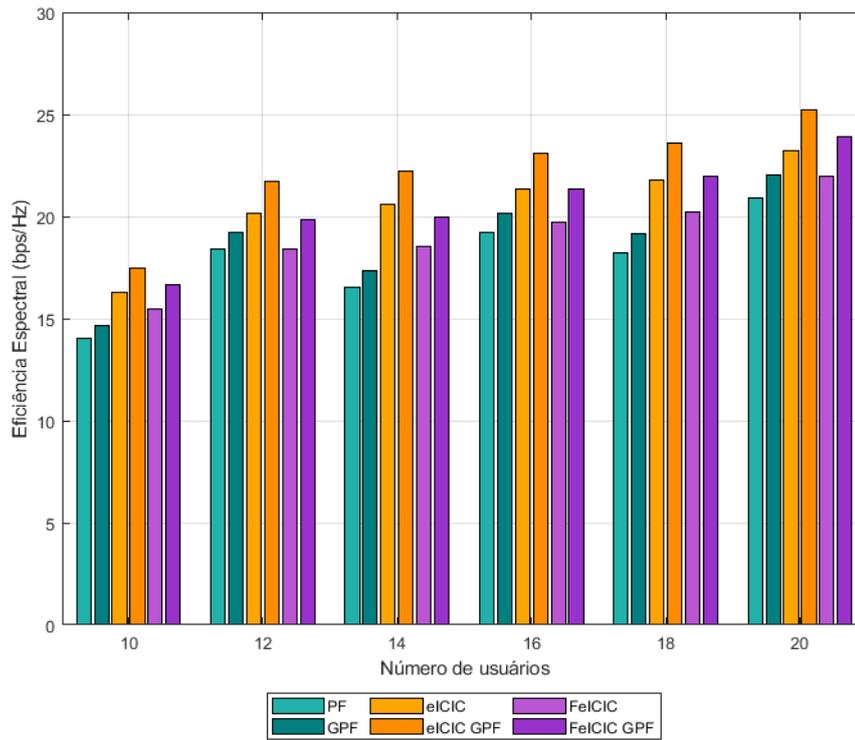
Utilizando apenas uma *picocell*, foram obtidos os resultados de eficiência espectral descritos pela Tabela 7 e pela Figura 20.

Tabela 7 – Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 1 *picocell* e variando o número de usuários.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
10	14,051	14,641	16,311	17,469	15,438	16,642
12	18,410	19,220	20,144	21,717	18,399	19,816
14	16,539	17,316	20,607	22,243	18,522	19,991
16	19,229	20,127	21,315	23,084	19,735	21,373
18	18,246	19,166	21,781	23,619	20,225	21,954
20	20,880	22,008	23,242	25,227	21,976	23,932

Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Eficiência Espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 1 *picocell*.



FONTE: Autoria própria.

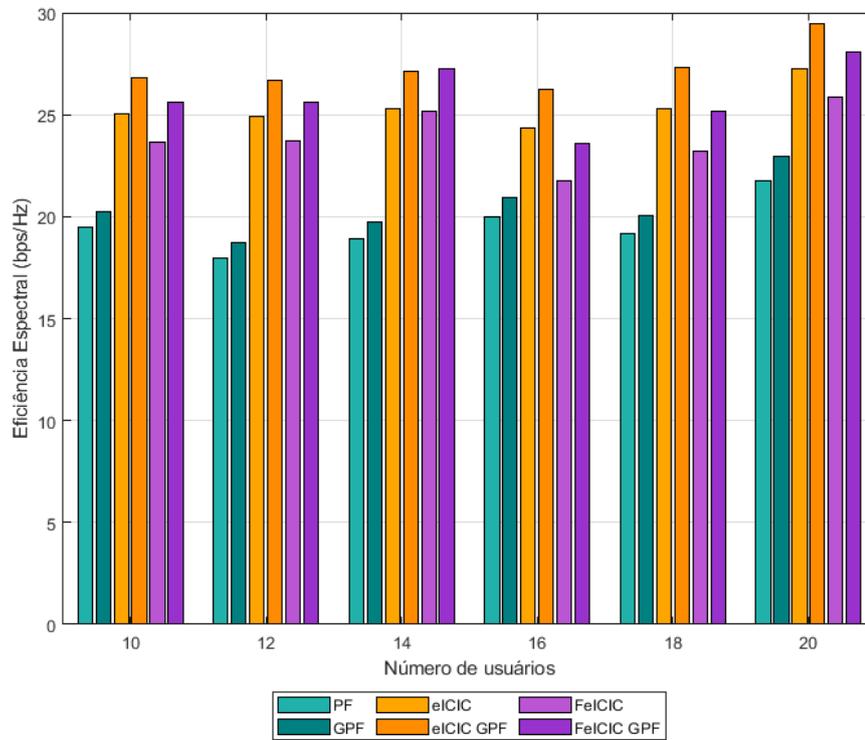
Utilizando duas *picocells*, foram obtidos os resultados de eficiência espectral descritos pela Tabela 8 e pela Figura 21.

Tabela 8 – Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 2 *picocells* e variando o número de usuários.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
10	19,515	20,257	25,043	26,821	23,629	25,590
12	17,969	18,706	24,888	26,680	23,700	25,610
14	18,939	19,753	25,265	27,127	25,138	27,224
16	19,982	20,913	24,338	26,263	21,789	23,580
18	19,141	20,073	25,269	27,321	23,182	25,176
20	21,738	22,955	27,241	29,475	25,890	28,101

Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Eficiência Espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 2 *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

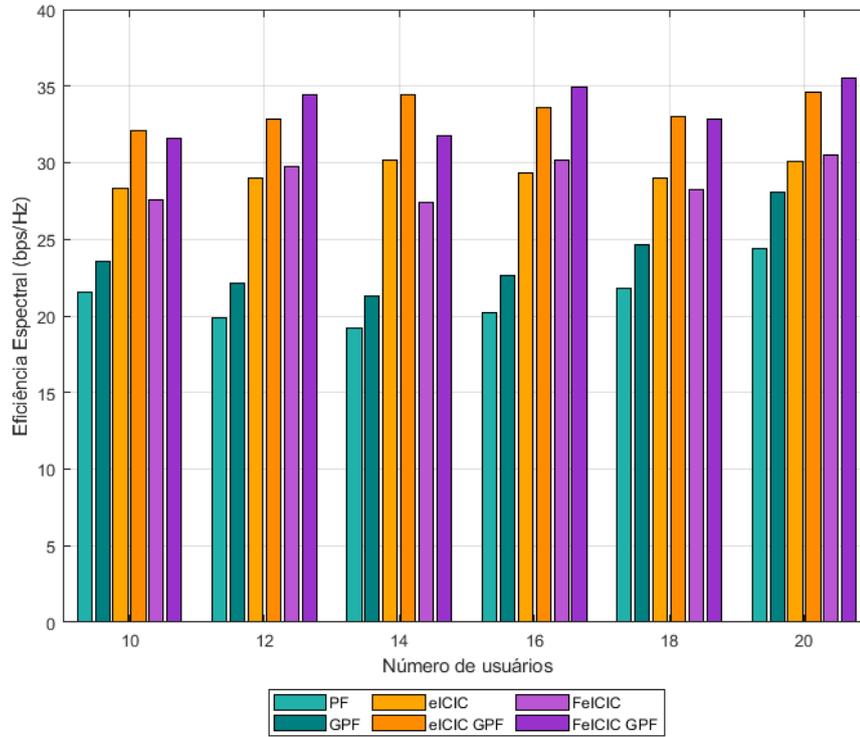
Utilizando três *picocells*, foram obtidos os resultados de eficiência espectral descritos pela Tabela 9 e pela Figura 22.

Tabela 9 – Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 3 *picocells* e variando o número de usuários.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
10	21,520	23,521	28,311	32,093	27,570	31,568
12	19,987	22,145	28,958	32,809	29,712	34,406
14	19,231	21,308	30,136	34,415	27,390	31,764
16	20,201	22,649	29,332	33,614	30,201	34,924
18	21,835	24,630	28,991	32,992	28,233	32,863
20	24,356	28,058	30,120	34,578	30,533	35,498

Fonte: Autoria própria.

Figura 22: Eficiência Espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 3 *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

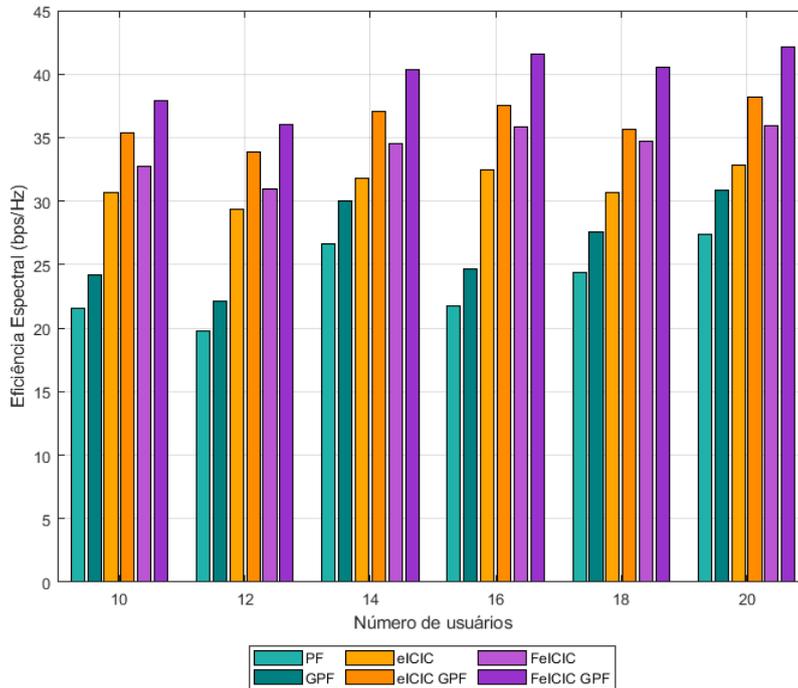
Utilizando quatro *picocells*, foram obtidos os resultados de eficiência espectral descritos pela Tabela 10 e pela Figura 23.

Tabela 10 – Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 4 *picocells* e variando o número de usuários.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
10	21,602	24,194	30,644	35,363	32,701	37,868
12	19,736	22,144	29,329	33,893	30,961	36,070
14	26,643	29,973	31,759	37,047	34,556	40,361
16	21,754	24,626	32,433	37,493	35,886	41,556
18	24,345	27,583	30,645	35,609	34,684	40,494
20	27,397	30,904	32,838	38,158	35,596	42,176

Fonte: Autoria própria.

Figura 23: Eficiência Espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 4 *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

Diante deste primeiro cenário, é possível notar a tendência do aumento da eficiência espectral com o aumento da quantidade de usuários tanto para a não utilização de técnicas de ICIC quanto na utilização de tais técnicas. A utilização das técnicas de ICIC acarreta em um aumento considerável da eficiência espectral, principalmente, quando analisado o impacto da quantidade de *picocells* utilizada. Além disso, observa-se que para os casos de 1 e 2 *picocells*, a eICIC tende a ser superior a FeICIC para os dois algoritmos de escalonamento. Contudo, ao utilizar 3 e 4 *picocells*, a FeICIC demonstra alcançar melhores resultados de eficiência espectral também para os dois algoritmos. Comparando os algoritmos, o GPF se sobressai em relação ao PF, possibilitando até mesmo que a técnica eICIC supere a técnica FeICIC diante do algoritmo PF.

4.1.2 Cenário 2: número fixo de usuários e variação de *picocells*

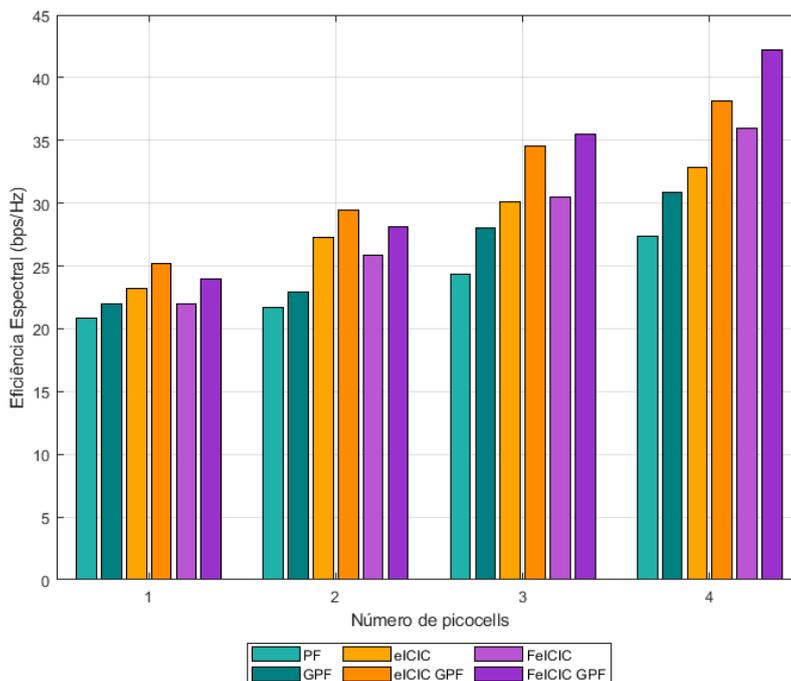
Para o segundo cenário, levou-se em conta a eficiência espectral em função da quantidade de *picocells*, mantendo fixo o valor de 20 usuários. Os resultados são mostrados na Tabela 11 e na Figura 24.

Tabela 11 – Valores de Eficiência Espectral (bps/Hz) para 20 usuários e variando a quantidade de *picocells*.

Quantidade de <i>picocells</i>	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
	1	20,880	22,008	23,242	25,227	21,976
2	21,738	22,955	27,241	29,475	25,890	28,101
3	24,356	28,058	30,120	34,578	30,533	35,498
4	27,397	30,904	32,838	38,158	35,956	42,176

Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Eficiência Espectral em função do número de *picocells* para o valor fixo de 20 usuários.



FONTE: Autoria própria.

A partir do segundo cenário, é possível notar de forma mais clara a vantagem do uso de HetNets de maior densificação. Para todos os valores de *picocells*, observa-se que a utilização do GPF supera o PF, tanto sem técnica de ICIC quanto para a utilização das técnicas eICIC e FeICIC. Por exemplo, para 4 *picocells*, a diferença entre GPF e PF é de 12,80%, 16,20% e 17,30%, considerando, respectivamente, a não utilização de técnica de ICIC, a eICIC e, por fim, a FeICIC. A densificação da rede permitiu, por exemplo, uma melhora de cerca de 31,21% quando comparado o pior cenário entre 1 e 4 *picocells*, ou seja, entre o PF de menor densificação e o de maior densificação. Em relação à técnica FeICIC, observou-se um ganho de 76,23% para as mesmas condições citadas anteriormente.

4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

4.2.1 Cenário 1: número fixo de *picocells* e variação de usuários

Analogamente ao primeiro cenário da análise de Eficiência Espectral, avaliou-se a eficiência energética em função do número de usuários, analisando o impacto da diferente quantidade de *picocells* separadamente.

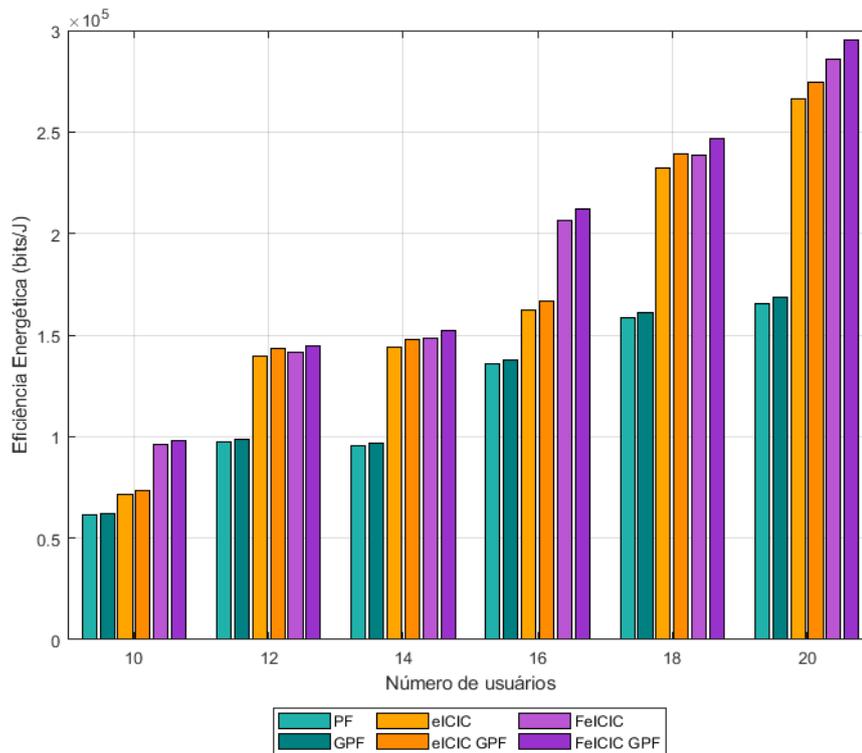
Utilizando uma *picocell*, foram obtidos os resultados de eficiência energética descritos pela Tabela 12 e pela Figura 25.

Tabela 12 – Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 1 *picocell* e variando o número de usuários.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC	FeICIC	FeICIC
				GPF		GPF
10	0,6162	0,6217	0,7181	0,7353	0,9588	0,9739
12	0,9739	0,9836	1,3967	1,4308	1,4143	1,4482
14	0,9537	0,9659	1,4373	1,4754	1,4811	1,5203
16	1,3556	1,3777	1,6242	1,6685	2,0636	2,1189
18	1,5827	1,6096	2,3255	2,3932	2,3881	2,4645
20	1,6543	1,6841	2,6642	2,7425	2,8559	2,9530

Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Eficiência Energética em função do número de usuários para o valor fixo de 1 *picocell*.



FONTE: Autoria própria.

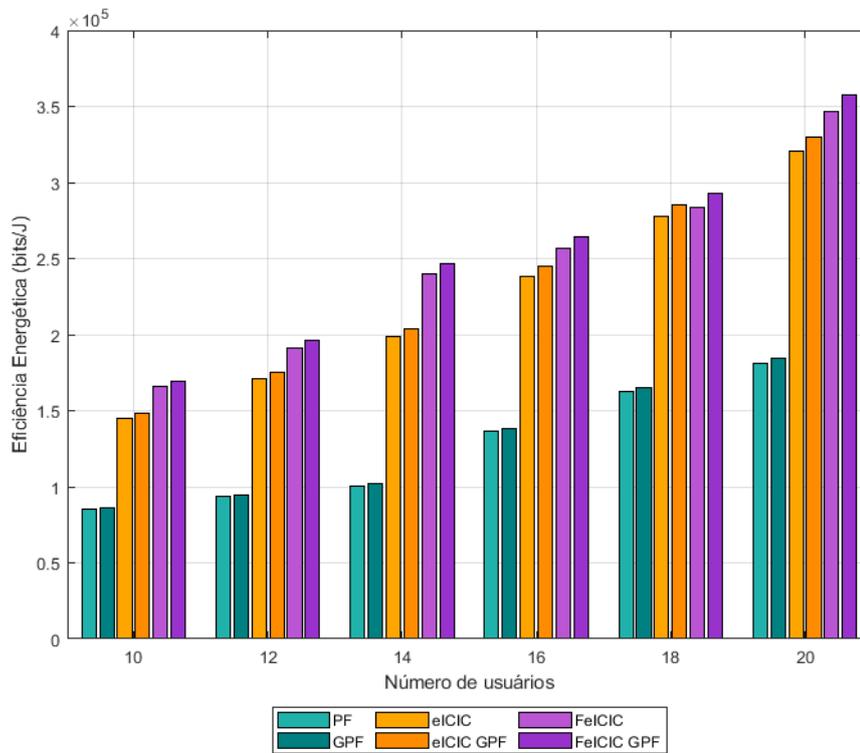
Utilizando duas *picocells*, foram obtidos os resultados de eficiência energética descritos pela Tabela 13 e pela Figura 26.

Tabela 13 – Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 2 *picocells* e variando o número de usuários.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
10	0,8499	0,8581	1,4477	1,4839	1,6588	1,6953
12	0,9358	0,9471	1,7118	1,7543	1,9141	1,9621
14	1,0060	1,0210	1,9899	2,0412	2,3953	2,4624
16	1,3622	1,3856	2,3843	2,4513	2,5698	2,6448
18	1,6274	1,6543	2,7743	2,8539	2,8382	2,9319
20	1,8144	1,8480	3,2048	3,3019	3,4624	3,5794

Fonte: Autoria própria.

Figura 26: Eficiência Energética em função do número de usuários para o valor fixo de 2 *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

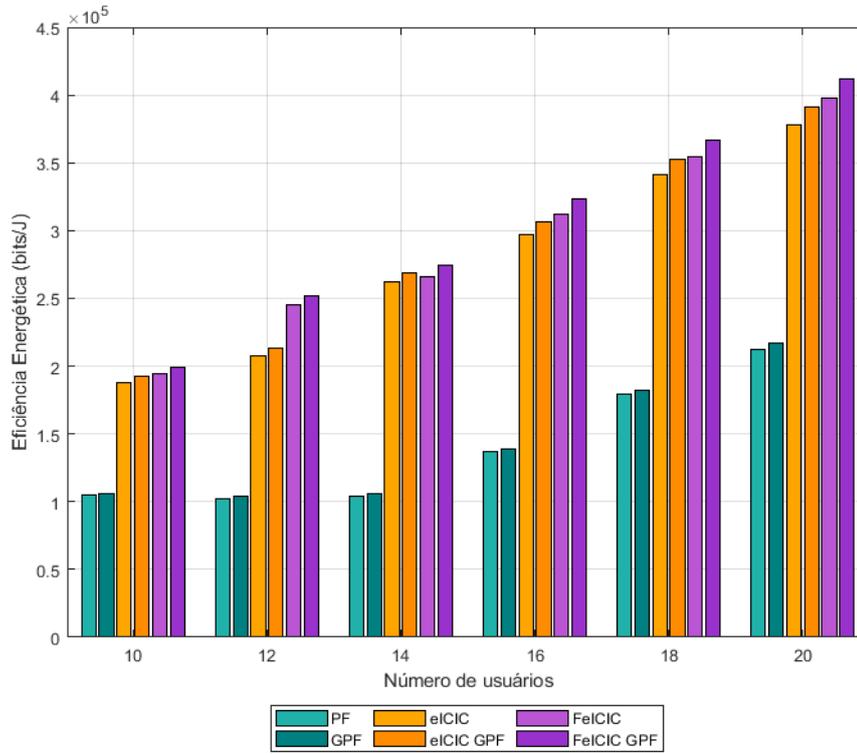
Utilizando três *picocells*, foram obtidos os resultados de eficiência energética descritos pela Tabela 14 e pela Figura 27.

Tabela 14 – Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 3 *picocells* e variando o número de usuários.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
10	1,0454	1,0590	1,8793	1,9291	1,9405	1,9878
12	1,0236	1,0390	2,0737	2,1293	2,4532	2,5165
14	1,0443	1,0623	2,6201	2,6916	2,6609	2,7434
16	1,3679	1,3927	2,9745	3,0620	3,1244	3,2306
18	1,7936	1,8252	3,4122	3,5248	3,5414	3,6653
20	2,1248	2,1667	3,7821	3,9145	3,9745	4,1204

Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Eficiência Energética em função do número de usuários para o valor fixo de 3 *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

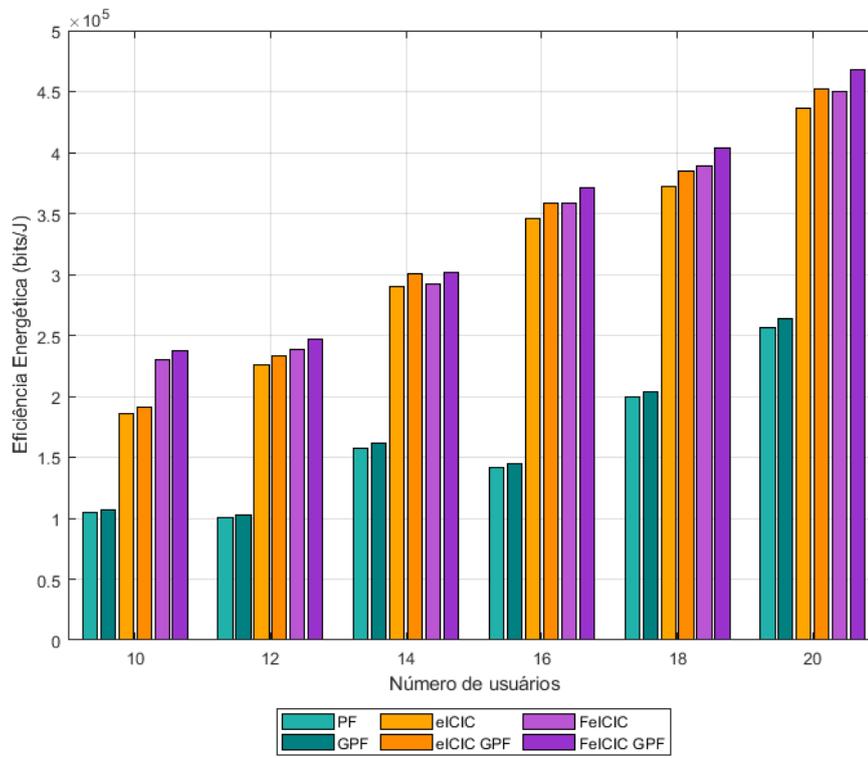
Utilizando quatro *picocells*, foram obtidos os resultados de eficiência energética descritos pela Tabela 15 e pela Figura 28.

Tabela 15 – Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 4 *picocells* e variando o número de usuários.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
10	1,0483	1,0651	1,8596	1,9139	2,2983	2,3730
12	1,0103	1,0275	2,2604	2,3289	2,3853	2,4674
14	1,5781	1,6112	2,9008	3,0052	2,9216	3,0122
16	1,4189	1,4501	3,4528	3,572	3,5818	3,7061
18	1,9899	2,0406	3,7215	3,8480	3,8925	4,0404
20	2,5661	2,6328	4,3589	4,5245	4,4955	4,6785

Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Eficiência Energética em função do número de usuários para o valor fixo de 4 *picocells*.



FONTE: Autoria própria.

Assim como para a eficiência espectral, observa-se que a eficiência energética aumenta conforme o aumento da quantidade de usuários. Por exemplo, comparando a técnica FeICIC com algoritmo GPF entre 20 e 10 usuários e entre 20 e 18 usuários, têm-se ganhos de aproximadamente 97,15% e 15,79%, respectivamente. As técnicas de ICIC apresentam melhor desempenho em relação aos cenários dos dois algoritmos, PF e GPF, sem técnica de ICIC e para maior densificação da rede, destaca-se a técnica FeICIC com o algoritmo GPF.

4.2.2 Cenário 2: número fixo de usuários e variação de *picocells*

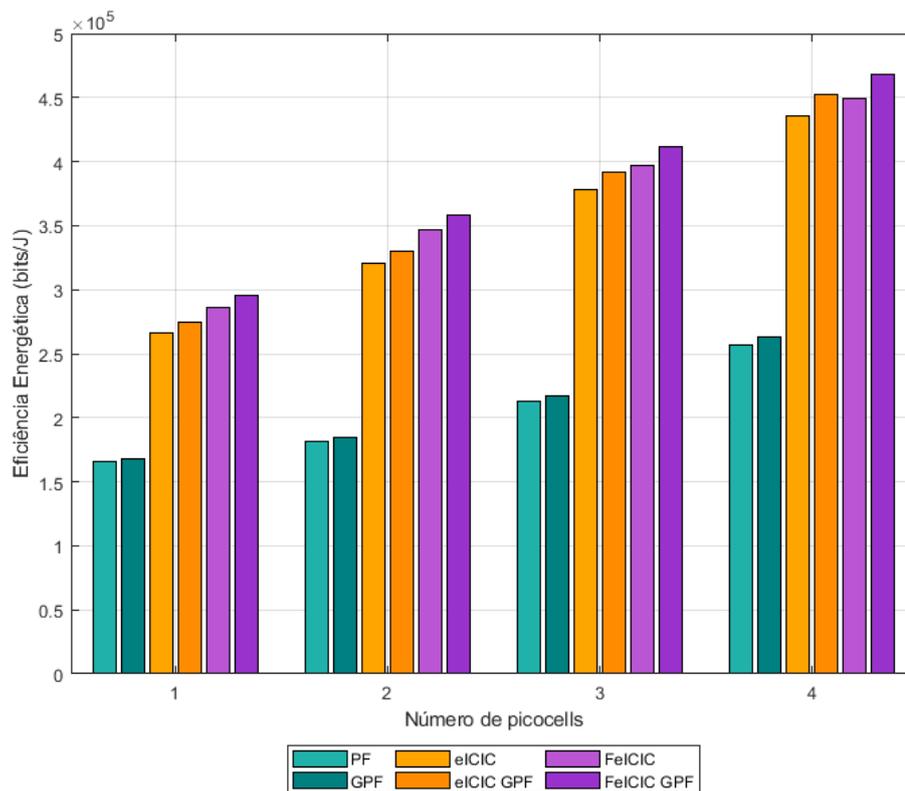
Assim como no primeiro cenário da análise de eficiência espectral, estudou-se a eficiência energética em função da quantidade de *picocells*, mantendo o número de usuários igual a 20. Desta forma, foram obtidos os resultados de eficiência energética descritos pela Tabela 16 e pela Figura 29.

Tabela 16 – Valores de Eficiência Energética (10^5 bits/J) para 20 usuários e variando a quantidade de *picocells*.

Quantidade de usuários	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
1	1,6543	1,6841	2,6642	2,7425	2,8559	2,9530
2	1,8144	1,8480	3,2048	3,3019	3,4624	3,5794
3	2,1248	2,1667	3,7821	3,9145	3,9745	4,1204
4	2,5661	2,6328	4,3589	4,5245	4,4955	4,6785

Fonte: Autoria própria.

Figura 29: Eficiência Energética em função do número de *picocells* para o valor fixo de 20 usuários.



FONTE: Autoria própria.

Neste segundo cenário, observa-se o efeito da densificação da rede e a vantagem das técnicas de ICIC, em especial da FeICIC. Ainda assim, a utilização da eICIC com o algoritmo GPF mostra-se uma escolha interessante, alcançando valores próximos aos da FeICIC.

Diferente da eficiência espectral, a eficiência energética não apresentou ganhos elevados quando comparados os valores utilizando os dois algoritmos distintos. Por exemplo, para 4 *picocells*, a diferença entre GPF e PF é de cerca de 2,60%, 3,80% e 4,07% , para cenário sem técnica de ICIC, eICIC e FeICIC, respectivamente.

4.3 THROUGHPUT

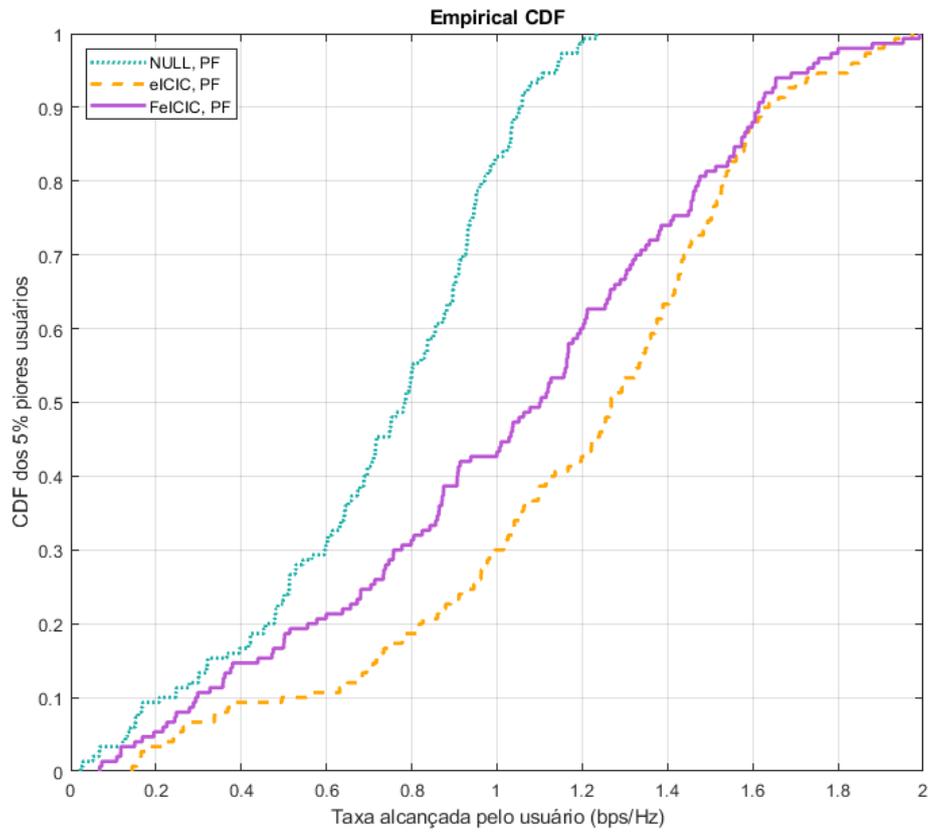
Quanto ao *throughput*, para o cenário de 20 usuários e 4 *picocells*, tem-se os dados da Tabela 17 e das Figuras 30 e 31. A Tabela 17 ilustra o valor da CDF para dois pontos distintos para comparação entre as técnicas e algoritmos.

Tabela 17 – Valores das taxas alcançadas pelos usuários (bps/Hz) conforme as CDFs dos algoritmos PF e GPF.

CDF	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
0,7	0,8689	0,9291	1,0835	1,3224	1,1521	1,3690
1,0	1,2743	1,2099	1,6359	1,9651	1,7075	1,9455

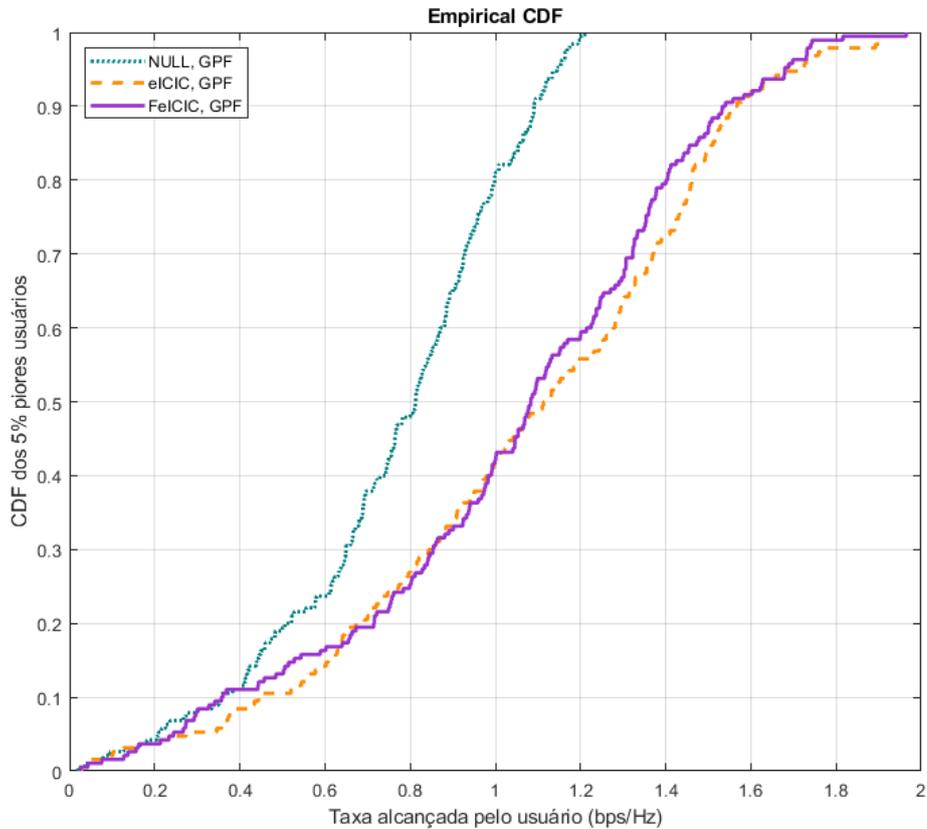
Fonte: Autoria própria.

Figura 30: CDF do *throughput* para os 5% piores usuários localizados na borda da célula do cluster central considerando o algoritmo PF.



FONTE: Autoria própria.

Figura 31: CDF do *throughput* para os 5% piores usuários localizados na borda da célula do cluster central considerando o algoritmo GPF.



FONTE: Autoria própria.

Comparando os dois algoritmos de escalonamento, é possível observar, para o cenário de CDF igual a 0,7, ganho de 6,93% entre GPF e PF sem utilização de técnica de ICIC. Em relação à diferença entre eICIC PF e eICIC GPF, tem-se ganho de 22,05% ao utilizar o algoritmo GPF. Por fim, para a técnica FeICIC, a diferença é de 18,83%. As Tabelas 18 e 19 indicam os ganhos das técnicas em relação aos seus antecessores diretos. Por exemplo, a eICIC apresenta um ganho de 24,69% em relação ao PF sem técnica de ICIC, enquanto que a FeICIC tem um ganho de 6,33% em relação à eICIC. Quando utilizado o algoritmo GPF, esse último ganho passa a ser de 3,52%. Sendo assim, nota-se a melhoria nas taxas alcançadas pelos usuários localizados na borda da célula quando utiliza-se de técnicas de ICIC e algoritmos mais avançados como o GPF.

Tabela 18 – Ganho na taxa alcançada pelo usuário para CDF igual a 0,7 considerando o algoritmo PF.

	PF	eICIC
eICIC	24,69%	-
FeICIC	32,59%	6,33%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 – Ganho na taxa alcançada pelo usuário para CDF igual a 0,7 considerando o algoritmo GPF.

	GPF	eICIC GPF
eICIC GPF	42,33%	-
FeICIC GPF	47,35%	3,52%

Fonte: Autoria própria.

4.4 ÍNDICE DE JUSTIÇA

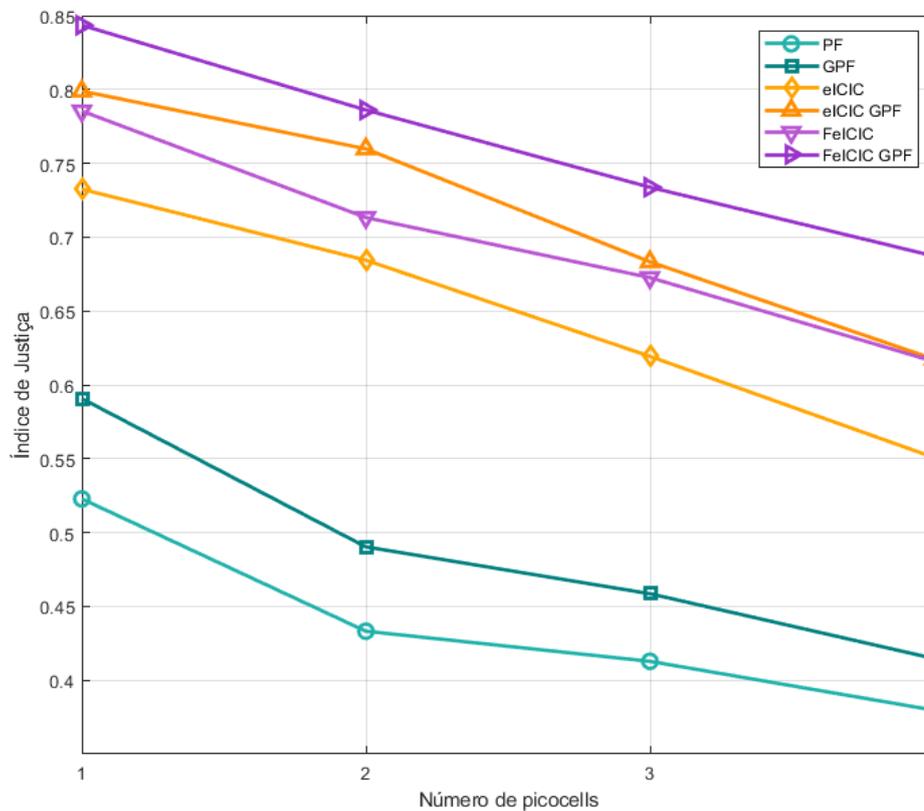
Em relação ao índice de justiça, analisou-se o cenário de 20 usuários, variando a quantidade de *picocells* conforme a Tabela 20 e a Figura 32.

Tabela 20 – Índice de justiça para 20 usuários e variando a quantidade de *picocells*.

Quantidade de <i>picocells</i>	PF	GPF	eICIC	eICIC GPF	FeICIC	FeICIC GPF
1	0,5228	0,5907	0,7325	0,7889	0,7854	0,8435
2	0,4332	0,4903	0,6844	0,7598	0,7133	0,7861
3	0,4128	0,4586	0,6193	0,6833	0,6726	0,7338
4	0,3797	0,4147	0,5508	0,6174	0,6158	0,6872

Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Índice de justiça em função da quantidade de *picocells* para 20 usuários.



FONTE: Autoria própria.

Observa-se a redução do valor de índice de justiça diante do aumento do número de *picocells* para todos os cenários. A utilização das técnicas eICIC e FeICIC com GPF mostra os melhores resultados e o algoritmo GPF provê melhorias em relação ao PF até mesmo para o cenário sem técnica de ICIC.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, observa-se que as técnicas de coordenação de interferência apresentam os melhores resultados, destacando a técnica FeICIC. Isso se deve ao fato de os mecanismos de CSB, ABS e RP-ABS serem implementados via código conforme o trecho da função “main_ideal” destacado no Apêndice I. Determina-se um padrão de aplicação dos *subframes* ABS conforme a matriz “ABSset”, onde 0 significa *subframe* ABS. Ainda, o mecanismo de CSB utiliza os valores determinados em “CSB_value” e realiza-se uma associação dos usuários

de acordo com a potência do sinal de referência, conforme os códigos no Apêndice II e Apêndice III.

Em relação aos melhores resultados encontrados para o algoritmo GPF, destaca-se a aplicação dos parâmetros ξ e φ conforme o código encontrado no Apêndice IV. Os valores aplicados proporcionam resultados melhores tanto para o índice de justiça quanto para a eficiência energética, buscando manter os melhores resultados de capacidade total do sistema, de acordo com os valores de taxa instantânea, mas mantendo um elevado índice de justiça por meio da *throughput* média.

Por fim, em relação à densificação da rede, observa-se que utilizar mais *picocells* acarretam no aumento da capacidade total do sistema, pois cada *picocell* agrega à capacidade conforme a Equação 1. Além disso, considerando fatores como distância entre usuário e *picocell* ou *macrocell*, além de potência de transmissão e da aplicação dos mecanismos de CSB e ABS, os usuários são distribuídos de forma que evita-se a sobrecarga das *macrocells*, permitindo os ganhos observados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho propõe o estudo das técnicas de ICIC e aplicação da otimização do algoritmo de escalonamento no *downlink* do LTE-A para uma rede heterogênea. Apresenta-se uma comparação entre as técnicas eICIC e FeICIC conforme apresentadas nas *Releases* 3GPP 10 e 11, além de analisar a otimização do algoritmo PF. Os resultados de simulação mostraram que ambas as técnicas de ICIC tiveram melhor desempenho quando associadas ao algoritmo GPF. Ainda, a FeICIC demonstrou ter resultados mais expressivos diante da maior densificação da rede, enquanto que para números menores de *picocells*, a eICIC mostrou-se uma melhor opção. Há ganhos para as eficiências espectral e energética, bem como no parâmetro de justiça, mas destaca-se o crescimento da *throughput* para os usuários localizados nas periferias da célula, que sofrem os maiores níveis de interferência. Sendo assim, a adaptação das técnicas de ICIC ao algoritmo GPF demonstrou ser uma boa escolha para o cenário de redes heterogêneas.

Como um trabalho futuro, destaca-se a importância do estudo de outros algoritmos de escalonamento em conjunto com as técnicas eICIC e FeICIC, além de analisar novos valores dos parâmetros ξ e φ , modificando o impacto na política de alocação de recursos por meio da taxa instantânea de dados e da *throughput* média.

REFERÊNCIAS

- [1] L. P. CARVALHO. Introdução a sistemas de telecomunicações: abordagem histórica. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [2] Cisco (2020). Cisco Annual Internet Report: Global Internet adoption and devices and connection, 2018-2023, White Paper.
- [3] D. Xiao, X. Yu and D. Yang. A novel downlink icic method based on user position in lte-advanced systems. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), pages 1-5, 2012.
- [4] A. S. Hamza, S. S. Khalifa, H. S. Hamza and K. Elsayed. A survey on inter-cell interference coordination techniques in ofdma-based cellular networks. IEEE Communications Surveys Tutorials, 15(4):1642-1670, 2013.
- [5] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker. LTE – the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. Wiley, 2ª Edição, 2011.
- [6] G. Fodor, C. Koutsimanis, A. Rácz, N. Reider, A. Simonsson and W. Müller. Intercell interference coordination in ofdma networks and in the 3gpp long term evolution system. JCM, (4):445-453.
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall and J. Skold. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 1ª Edição, 2018.
- [8] H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli and J. G. Andrews. Modeling and analysis of k-tier downlink heterogeneous cellular networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 30(3):550-560, 2012.
- [9] W. Shin, W. Noh, K. Jang and H. Choi. Hierarchical interference alignment for downlink heterogeneous networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 11(12):4549-4559, 2012.
- [10] 3GPP TS 36.101 V0.2.1, Enhanced ICIC for non-CA based deployments of heterogeneous networks for LTE, 2012.
- [11] 3GPP TS 36.508 V0.2.0, Further Enhanced Non CA-based ICIC for LTE, 2012.
- [12] G. A. Queiroz and E. R. Silva. Study of Inter-Cell Interference Coordination Techniques on LTE-A downlink for heterogeneous networks. Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL), 2020.
- [13] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, “Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey,” IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 15, no. 2, pp. 678–700, 2013.
- [14] C. COX. An Introduction to LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications. Wiley, 2nd ed. 2014.

- [15] ETSI TS 136 213 v8.3.0 (2008-11) *Technical Specification*. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 8.3.0 Release 8).
- [16] M. Yassin, M. A. AboulHassan, S. Lahoud, M. Ibrahim, D. Mezher, B. Cousin and E. A. Sourour. Survey of icic techniques in lte networks under various mobile environment parameters. *Wireless Networks*, 23(2):403-418, 2017.
- [17] J. Moreira, E. R. Silva and P. R. Guardieiro. eICIC Optimization Improvements in Downlink Resource Allocation in LTE-A HetNets. *Journal of Communication and Information Systems*, VOL. 35, NO.1, pages 15-24, 2020.
- [18] N. Trabelsi, C. S. Chen, R. E. Azouzi, L. Roullet, and E. Altman, User association and resource allocation optimization in lte cellular networks, *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 14, no. 2, pp. 429–440, June 2017.
- [19] M. Boujelben, S. B. Rejeb, and S. Tabbane, A comparative study of interference coordination schemes for wireless mobile advanced systems, *The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications*, pp. 1–5, June 2014.
- [20] M. S. Ali. An overview on interference management in 3gpp lte-advanced heterogeneous networks. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 8(11):55-68, 2015.
- [21] Habaebi, Mohamed & Chebil, Jalel & Al-Sakkaf, A & Dahawi. Comparison between Scheduling Techniques in Long Term Evolution. *International Islamic University Malaysia Engineering Journal*, 2013.
- [22] Y. Liu, C. S. Chen, C. W. Sung and C. Singh. A game theoretic distributed algorithm for feicic optimization in lte-a hetnets. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25(6):3500-3513, 2017.
- [23] Y. Liu, C. S. Chen and C. W. Sung. Distributed enhanced inter-cell interference coordination (eicic) in lte-advances hetnets: A potential game approach. *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1-5, 2015.
- [24] Y. Liu, C. S. Chen and C. W. Sung. Joint optimization on inter-cell interference management and user attachment in lte-a hetnets. *13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, pages 62-69, 2015.
- [25] J. Moreira, E. R. Silva and P. R. Guardieiro. Técnicas de Coordenação de Interferência Inter-Celular para Redes Heterogêneas no Downlink LTE-A, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 2019.
- [26] LIMA, Paulo Vitor Costa. Aplicação e estudo de técnicas de escalonamento e coordenação de interferência em redes LTE-A Heterogêneas. 2019. 64 f Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

APÊNDICE I – TRECHO DE CÓDIGO DA FUNÇÃO “main_ideal”

```

NumeNBPerCluster = 19;
NumPicoPerCell = 2;
NumUEPerCell = 8;
NumTimeSlots = 10;
NumFreqSlots = 2;
NumPRB = NumTimeSlots*NumFreqSlots;
UE_near_Pico_Fraction = 0.5; % Define the fraction of all users in a cell
who are located near the pico BSs in the same cell

% Define the set of ABS patterns, 0 means ABS
ABSset = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1; % Number of columns must be equal to
NumTimeSlots
0 1 1 1 1 1 1 1 1 1;
0 1 1 1 1 0 1 1 1 1;
0 1 0 1 1 0 1 1 1 1;
0 1 0 1 1 0 1 0 1 1;
0 1 0 1 0 0 1 0 1 1;
0 1 0 1 0 0 1 0 1 0;];
NumABS = size(ABSset,1);
CSB_value = [0 3 6 9 12 15]; % All possible CSB values in dB

```

APÊNDICE II – FUNÇÃO “Pilot_CSB_Aссо”

```
% User association, determined by the pilot signal strength and cell
% selection bias

function UE =
Pilot_CSB_Aссо(UE, NumUE, NoiseDen, NoiseFigure, BWperRB, NumTimeSlots, NumFreqSlots)

for ue = 1:NumUE
    BiasedPilotRSS = UE(ue).PilotRSS.*(10.^(UE(ue).CSB_HostCand/10));
    [no_use, attach_ix] = max(BiasedPilotRSS);
    UE(ue).attach = UE(ue).HostCand(attach_ix);
End
```

APÊNDICE III – FUNÇÃO “FetchCSB”

```

% Fetch the CSB values from candidate stations for each UE

function UE = FetchCSB(eNB,UE,NumeNBPerCluster,NumPicoPerCell,Pico)

for i = 1:length(UE.HostCand)
    if UE.HostCand(i) < 1000 % If the candidate is an eNB
        ix =
ReturnMacroIx(floor(UE.HostCand(i)),mod(UE.HostCand(i)*10,10),NumeNBPerCluster);
        UE.CSB_HostCand(i) = eNB(ix).CSB;
    else % If the candidate is a Pico
        ix =
ReturnPicoIx(floor(UE.HostCand(i)/1000),floor(mod(UE.HostCand(i),1000)),mod
(round(mod(UE.HostCand(i),1000)*10),10), NumPicoPerCell, NumeNBPerCluster);
        UE.CSB_HostCand(i) = Pico(ix).CSB;
    end
end
end

```

APÊNDICE IV – FUNÇÃO “GPF_scheduler_LTE”

```

function [station,UE,AttachList] =
GPF_scheduler_LTE(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)*T(ue,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;
                [noise, ueix] = max(throughput);
            else
                [noise, 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
```