

---

**Trabalho de Conclusão de Curso em Eng.  
Eletrônica e de Telecomunicações**  
**Uma análise de desempenho do Escalonador  
Adaptive Proportional Fair para redes  
heterogêneas LTE Advanced**

---

**João Gabriel Carlos França**



**Faculdade de  
Engenharia Elétrica**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

Uberlândia

2022

**João Gabriel Carlos França**

**Trabalho de Conclusão de Curso em Eng.  
Eletrônica e de Telecomunicações  
Uma análise de desempenho do Escalonador  
Adaptive Proportional Fair para redes  
heterogêneas LTE Advanced**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletrônico e de Telecomunicações grau bacharelado.

Área de concentração: Redes de Computadores e Telefonia Móvel

Orientador: Prof. Dr. Éderson Rosa da Silva

Uberlândia

2022

*Este trabalho é dedicado às pessoas que  
ralaram para se tornarem engenheiros*

---

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela força concedida para enfrentar e vencer esses longos anos de graduação, à minha família pelo suporte, palavras de fortalecimento para não desistir da jornada, aos meus colegas e amigos que me ajudaram direta e indiretamente a conquistar esse sonho e ao Google, pai dos burros, fonte de pesquisa de todos meus trabalhos, amigo mais precioso para os resumos em semanas de provas e fiel escudeiro para as pesquisas na faculdade!



*“Em um Universo que já tem 10 ou 15 bilhões de anos, estamos constantemente esbarrando em surpresas prontas para serem conhecidas.”*  
*(Prof. Dr. Carl Edward Sagan)*

---

# Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação de desempenho do escalonador *Adaptive Proportional Fair* (APF) baseado em simulações de redes heterogêneas LTE Advanced utilizando o *software* Matlab. O presente trabalho faz uma retomada histórica sobre o desenvolvimento na área de redes, apresentando a evolução entre as redes tradicionais até a junção com as redes móveis. A partir deste ponto, apresenta-se algumas técnicas de escalonamento e coordenação de interferência utilizadas para melhorar a transmissão de usuários com condições ruins nessas redes. Tais técnicas são comparadas por meio de simulações para analisar características de desempenho espectral, justiça e eficiência energética de transmissão no enlace Downlink de rede móvel, fazendo-se comparativos entre a teoria de redes e propagação de ondas às simulações presentes neste trabalho.

**Palavras-chave:** APF. Escalonadores. GPF. MatLab. LTE. LTE-A. PF. QoS. Redes móveis .

---

# Abstract

This work presents a performance evaluation of the scheduler *Adaptive Proportional Fair* (APF) based on simulations of heterogeneous LTE Advanced networks using the *software* Matlab. The present work makes a historical resumption of the development in the area of the networks, presenting the evolution between the traditional networks until the junction with the mobile networks. From this point on, some interference scheduling and coordination techniques are used to improve the transmission of users with bad conditions in these networks. Such techniques are compared through simulations to analyze characteristics of spectral performance, quality of service (QoS), fairness and transmission energy efficiency on the downlink side of a mobile network, making comparisons between network theory and wave propagation to the simulations. present in this work.

**Keywords:** APF. GPF. LTE. LTE-A. MatLab. Mobile Network. PF. QoS. Scheduling.

---

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Gráfico de usuários de Internet no Brasil 2008-2019 . . . . .	16
Figura 2 – Gráfico de usuários de Internet no Brasil comparativo 2018-2019-COVID19	17
Figura 3 – Arquitetura Plana de Redes LTE . . . . .	25
Figura 4 – OFDMA e SC-FDMA . . . . .	26
Figura 5 – Arquitetura de Multimedia Broadcast Multicast Service . . . . .	27
Figura 6 – Arquitetura de Home eNB . . . . .	27
Figura 7 – Exemplo de Handover Horizontal e Vertical . . . . .	29
Figura 8 – Gráfico do índice de justiça de uma <i>picocell</i> . . . . .	40
Figura 9 – Gráfico de Eficiência Espectral de uma <i>picocell</i> . . . . .	41
Figura 10 – Gráfico de Eficiência Energética de uma <i>picocell</i> . . . . .	42
Figura 11 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de uma <i>picocell</i> para o APF .	43
Figura 12 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de uma <i>picocell</i> . . . . .	44
Figura 13 – Gráfico do índice de justiça de duas <i>picocells</i> . . . . .	45
Figura 14 – Gráfico de Eficiência Espectral de duas <i>picocells</i> . . . . .	46
Figura 15 – Gráfico de Eficiência Energética de duas <i>picocells</i> . . . . .	47
Figura 16 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de duas <i>picocells</i> para o APF	48
Figura 17 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de duas <i>picocells</i> . . . . .	48
Figura 18 – Gráfico do índice de justiça de três <i>picocells</i> . . . . .	49
Figura 19 – Gráfico de Eficiência Espectral de três <i>picocells</i> . . . . .	50
Figura 20 – Gráfico de Eficiência Energética de três <i>picocells</i> . . . . .	51
Figura 21 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de três <i>picocell</i> para o APF .	52
Figura 22 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de três <i>picocells</i> . . . . .	53
Figura 23 – Gráfico do índice de justiça de quatro <i>picocells</i> . . . . .	54
Figura 24 – Gráfico de Eficiência Espectral de quatro <i>picocells</i> . . . . .	55
Figura 25 – Gráfico de Eficiência Energética de quatro <i>picocells</i> . . . . .	55
Figura 26 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de quatro <i>picocells</i> para o APF	56
Figura 27 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de quatro <i>picocells</i> . . . . .	57
Figura 28 – Gráfico do índice de justiça de 10 usuários . . . . .	58

Figura 29 – Gráfico de Eficiência Espectral de 10 usuários . . . . .	59
Figura 30 – Gráfico de Eficiência Energética de 10 usuários . . . . .	60
Figura 31 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de 10 usuários para o APF . .	60
Figura 32 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de 10 usuários . . . . .	61
Figura 33 – Gráfico do índice de justiça de 12 usuários . . . . .	62
Figura 34 – Gráfico de Eficiência Espectral de 12 usuários . . . . .	63
Figura 35 – Gráfico de Eficiência Energética de 12 usuários . . . . .	64
Figura 36 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de 12 usuários para o APF . .	64
Figura 37 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de 12 usuários . . . . .	65
Figura 38 – Gráfico do índice de justiça de 15 usuários . . . . .	66
Figura 39 – Gráfico de Eficiência Espectral de 15 usuários . . . . .	67
Figura 40 – Gráfico de Eficiência Energética de 15 usuários . . . . .	68
Figura 41 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de 15 usuários para o APF . .	69
Figura 42 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de 15 usuários . . . . .	69

---

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do ambiente de simulação . . . . .	39
Tabela 2 – Tabela de Dados Índice de Justiça uma <i>picocell</i> . . . . .	40
Tabela 3 – Tabela de Dados Eficiência Espectral uma <i>picocell</i> . . . . .	41
Tabela 4 – Tabela de Dados Eficiência Energética uma <i>picocell</i> . . . . .	42
Tabela 5 – Tabela de Dados Índice de Justiça duas <i>picocells</i> . . . . .	44
Tabela 6 – Tabela de Dados Eficiência Espectral duas <i>picocells</i> . . . . .	45
Tabela 7 – Tabela de Dados Eficiência Energética duas <i>picocell</i> . . . . .	46
Tabela 8 – Tabela de Dados Índice de Justiça três <i>picocells</i> . . . . .	49
Tabela 9 – Tabela de Dados Eficiência Espectral três <i>picocells</i> . . . . .	50
Tabela 10 – Tabela de Dados Eficiência Energética três <i>picocells</i> . . . . .	51
Tabela 11 – Tabela de Dados Índice de Justiça quatro <i>picocells</i> . . . . .	53
Tabela 12 – Tabela de Dados Eficiência Espectral quatro <i>picocells</i> . . . . .	54
Tabela 13 – Tabela de Dados Eficiência Energética quatro <i>picocells</i> . . . . .	55
Tabela 14 – Tabela de Dados Índice de Justiça 10 usuários . . . . .	57
Tabela 15 – Tabela de Dados Eficiência Espectral 10 usuários . . . . .	58
Tabela 16 – Tabela de Dados Eficiência Energética 10 usuários . . . . .	59
Tabela 17 – Tabela de Dados Índice de Justiça 12 usuários . . . . .	61
Tabela 18 – Tabela de Dados Eficiência Espectral 12 usuários . . . . .	62
Tabela 19 – Tabela de Dados Eficiência Energética 12 usuários . . . . .	63
Tabela 20 – Tabela de Dados Índice de Justiça 15 usuários . . . . .	65
Tabela 21 – Tabela de Dados Eficiência Espectral 15 usuários . . . . .	66
Tabela 22 – Tabela de Dados Eficiência Energética 15 usuários . . . . .	67

---

# Lista de siglas

**ABS** Almost Blank Subframe

**ABNT** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**AMPS** Advanced Mobile Phone System

**APF** Adaptive Proportional Fair

**ARPA** Advanced Research Projects Agency

**BSC** Base Station Controller

**BTS** Base Transceiver Station

**CDF** Cumulative Distribution Function

**CDMA** Code Division Multiple Access

**Cetic** Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação

**CRE** Cell Range Extension

**CS** Circuit Switched

**DoD** Department of Defense

**eICIC** Enhanced Inter-Cell Interference Coordination

**EPC** Evolved Packet Core

**EPS** Evolved Packet System

**E-UTRAN** Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network

**FDD** Frequency Division Duplex

**FeICIC** Further Enhanced Inter-Cell Interference Coordination

**GERAN** GSM EDGE Radio Access Network

**GPF** Generalized Proportional Fair

**GSM** Global System for Mobile Communications

**HeNB** Home eNB

**HSPA** High Speed Packet Access

**HHO** Horizontal Handover

**HetNet** Heterogeneous Network

**IMT-Advanced** International Mobile Telecommunications-Advanced

**IOT** Internet of things

**ITU** International Telecommunication Union

**LTE** Long-Term Evolution

**LTE-A** Long Term Evolution-Advanced

**MBMS** Multimedia Broadcast Multicast Service

**NCP** Network Control Protocol

**OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing

**OFDMA** Orthogonal Frequency Division Multiple Access

**PAPR** Peak-to-Average Power Ratio

**PDN** Packet Data Network

**PDC** Personal Digital Communication

**PDSCH** Physical Downlink Shared Channel

**PF** Proportional Fair

**PS** Packet Switched

**PSTN** Public Switched Telephone Network

**QoS** Quality of Service

**RAN** Radio Access Network

**RB** Resource Block



**RNC** Radio Network Controller

**RP- ABS** Reduced Power Almost Blank Subframe

**RR** Round-Robin

**SC-FDMA** Single Carrier - Frequency Division Multiple Access

**SINR** Signal to noise ratio

**TDD** Time Division Duplex

**TTI** Time Transmission Interval

**UE** User Equipment

**UMTS** Universal Mobile Telecommunication System

**UWC** Universal Wireless Communication

**WCDMA** Wideband Code Division Multiple Access

**WLAN** Wireless Local Area Network

**VHO** Vertical Handover

**VoIP** Voice over IP

**3G** Third-generation

**3GPP** Third-generation partnership project

**4G** Fourth-generation

---

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>15</b>
1.1	Crescimento das redes . . . . .	15
1.2	Motivações da Pesquisa . . . . .	16
1.3	Justificativa . . . . .	17
1.4	Objetivos . . . . .	18
1.5	Organização da Monografia . . . . .	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>19</b>
2.1	Um breve histórico da rede de redes . . . . .	19
2.2	Redes Móveis . . . . .	21
2.3	Long Term Evolution . . . . .	24
2.3.1	Evolved Packet Core . . . . .	24
2.3.2	OFDM e SC-FDMA . . . . .	26
2.3.3	Multimedia Broadcast Multicast Service e Home eNodeB . . . . .	27
2.4	Redes Heterogêneas . . . . .	28
2.4.1	Topologias de acoplamento . . . . .	28
2.4.2	Handovers . . . . .	29
2.5	Coordenação de Interferência . . . . .	29
2.5.1	Enhanced Inter-cell Interference Coordination . . . . .	30
2.5.2	Further Enhanced Inter-cell Interference Coordination . . . . .	31
2.6	Técnicas de Escalonamento . . . . .	31
2.6.1	Proportional Fair . . . . .	32
2.6.2	Generalized Proportional Fair . . . . .	33
2.6.3	Adaptive Proportional Fair . . . . .	33
2.7	Métricas de Desempenho . . . . .	35
2.7.1	Justiça em algoritmos de Escalonamento . . . . .	35
2.7.2	Eficiência Espectral . . . . .	35
2.7.3	Eficiência Energética . . . . .	35

<b>3</b>	<b>SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Método de Pesquisa . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>3.2</b>	<b>Material de Pesquisa . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Simulações . . . . .</b>	<b>38</b>
3.3.1	Ambiente de simulação . . . . .	38
3.3.2	Cenário de Simulação . . . . .	39
3.3.3	Cenário: uma <i>picocell</i> . . . . .	40
3.3.4	Cenário: duas <i>picocells</i> . . . . .	44
3.3.5	Cenário: três <i>picocells</i> . . . . .	49
3.3.6	Cenário: quatro <i>picocells</i> . . . . .	53
3.3.7	Cenário: 10 usuários na HetNet . . . . .	57
3.3.8	Cenário: 12 usuários na HetNet . . . . .	61
3.3.9	Cenário: 15 usuários na HetNet . . . . .	65
<b>3.4</b>	<b>Avaliação dos Resultados . . . . .</b>	<b>70</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise Geral . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>4.2</b>	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>73</b>
	 <b>APÊNDICES</b>	 <b>75</b>
	<b>APÊNDICE A – APF SCHEDULING ALGORITHM . . . . .</b>	<b>76</b>

---

# Introdução

## 1.1 Crescimento das redes

Desde a criação da Internet, em meados da década de 1960, o número de usuários cresceu de maneira tímida até que no final da década de 1990 e início dos anos 2000 começou a se expandir de forma acelerada. O ponto chave para essa mudança foi o desenvolvimento da *World Wide Web*, usualmente chamada de *web*, ou "www" utilizado antes de descrever um nome de endereço na rede.

Essa aplicação foi criada por Tim Bernes-Lee (BERNERS-LEE et al., 1992), e nasceu com a intenção de ajudar a Organização Europeia em suas investigações nucleares, pois uma rede compartilhada com vários usuários e núcleos na rede, possibilitavam várias pessoas trabalhando juntas no mesmo projeto. Nos anos 90 também foi criado o protocolo HTTPS, que dessa maneira garantia uma comunicação mais segura com o envio de dados criptografados, proporcionando assim, mais uma camada de segurança para os usuários. Estava nascendo a Internet atual.

Com a evolução principalmente em usabilidade e praticidade de acessos essa nova rede atraiu uma demanda diferente do ponto ao qual ela foi criada. Com o ingresso do usuário comum outras formas de emprego à rede foram se popularizando no início da primeira década do século XXI. Serviços de e-commerce, blogs, e redes sociais começaram a ganhar espaço e atrair ainda mais usuários.

Devido a essa crescente demanda de computadores as indústrias começaram a pesquisar novas tecnologias para facilitar o acesso destes equipamentos. Então, no início dos anos 2000 começaram demandas ditadas pelo público em geral, o usuário comum. Com isso, novos setores começaram a ingressar na Internet e foi o início da criação de vários serviços online como serviços de streaming, chamadas de áudio e vídeo e games online que demandam à rede um tráfego de dados multimídia e que diversificaram os tipos de usuários.

Essas novas demandas exigiram o desenvolvimento de sistemas de redes de comutação de pacotes, que mais tarde, devido a grande demanda de dados multimídia e o aumento

da necessidade de portabilidade, contribuíram para a expansão da rede como as redes sem fio, ou redes *wireless*. Nisso deu-se o início à 3ª geração ou as redes 3G, tais redes tiveram como seu grande expoente e impulsionador os *smart phones* que se popularizaram rapidamente devido a facilidade de acesso para essas novas tecnologias e a introdução de diversos recursos interativos para o usuário.

Dessa forma, o número de usuários na rede não parava de crescer e a cada ano, conforme visto pela pesquisa do Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação (Cetic) na Figura 1. Para atender essa demanda de usuários e serviços, são necessárias constantes pesquisas nas áreas de redes em geral, principalmente com a nova crise de sanitária que se iniciou no final de 2019. Isso contribuiu mais ainda para o aumento do acesso de usuários na rede. Como pode-se observar na pesquisa feita pelo (Cetic) no qual apontou uma aceleração do uso da rede, principalmente, entre parcelas mais vulneráveis da população.

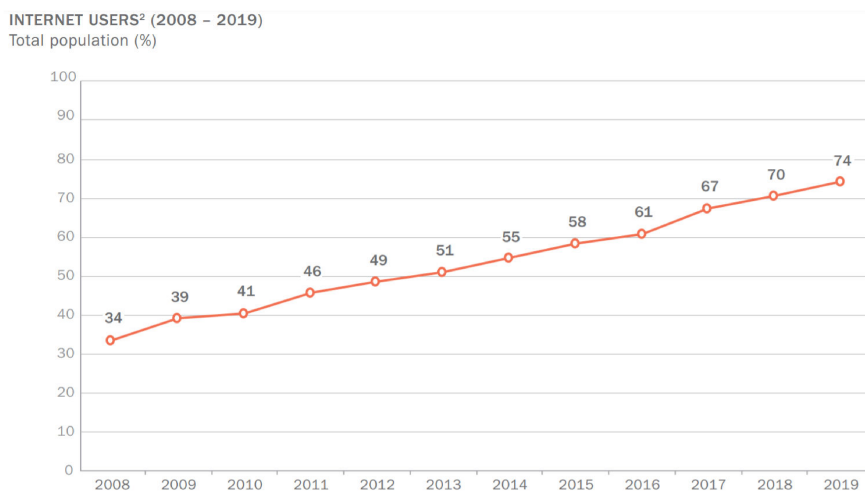


Figura 1 – Gráfico de usuários de Internet no Brasil 2008-2019

Fonte: (BR, 2021)

A pesquisa detectou um aumento da proporção de usuários de Internet na comparação com o ano de 2019, conforme a Figura 2, sobretudo entre os moradores das áreas rurais com um aumento de 53% em 2019 para 70% em 2020, e entre os habitantes com 60 anos ou mais foram um aumento de 34% para 50%. Na parcela jovem com Ensino Fundamental houve um aumento de 60% para 73%, e entre as mulheres de 73% para 85% e nas classes DE de 57% para 67%(BR, 2021).

## 1.2 Motivações da Pesquisa

Este trabalho tem como base a publicação de Xiaowei Li (LI et al., 2010), além de realizações de simulações de uma rede LTE-A heterogênea com coordenação de interferência,

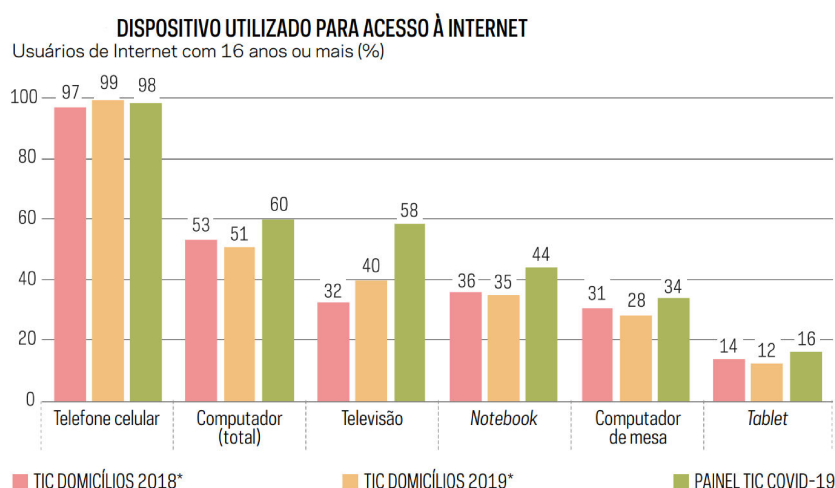


Figura 2 – Gráfico de usuários de Internet no Brasil comparativo 2018-2019-COVID19

Fonte: (BR, 2021)

utilizando o software MatLab. O seu desenvolvimento foi motivado pela possibilidade de análise de problemas importantes enfrentados nas redes atuais, principalmente em redes com grande densidade de usuários e com fragilidades na qualidade do sinal em transmissões *downlink*.

Além disso, considera-se importante avaliar possíveis implementações que possam melhorar a qualidade do sistema através de escalonadores baseados nas métricas de sinais e justiça de transmissão para determinados serviços. Uma vez que, usuários em regiões periféricas, por interferência, causada pela baixa potência da estação base nas *smallcells*, apresentam condições ruins na transmissão. Desse modo, especialmente nessas regiões da célula, a justiça dos escalonadores é essencial para a melhoria da comunicação.

### 1.3 Justificativa

O presente trabalho se justifica com base no atual cenário de redes em constante evolução, com diversos desafios quanto às diferentes redes interconectadas e suas complexidades e interferências, bem como ao número de usuários conectados nas redes com suas diversas tecnologias e diferentes equipamentos, tal cenário apresenta uma grande complexidade quanto a justiça de alocação de recurso.

Nesse sentido, a proposta é fazer um estudo de algoritmos que possam apresentar soluções para estes desafios, principalmente nos índices de justiça para redes muito densificadas. Desse modo o escalonador *Adaptive Proportional fair* (APF) proposto por Xiaowei Li apresenta uma proposta válida, uma vez que, é uma releitura do escalonador *Proportional Fair* (PF), com foco na justiça da transmissão.

## 1.4 Objetivos

O Objetivo do presente estudo é analisar o escalonador APF, proposto pela publicação do Professor Xiaowei Li (LI et al., 2010) e submeter esse escalonador em um ambiente de simulação com coordenação de interferência em redes heterogêneas LTE-A, comparando-o com os escalonadores PF, *Generalized Proportional Fair* (GPF) e o *Round Robin* (RR). Além disso, estudar as vantagens encontradas na proposta original desses outros escalonadores em redes LTE-A heterogêneas com atuação conjunta com técnicas de coordenação de interferência.

Para isso, realiza-se uma avaliação das técnicas considerando diferentes quantidades de *picocells* por célula e número de usuários no sistema de transmissão. Finalmente, analisa-se técnicas de coordenação de interferência atuando em conjunto com algoritmos de escalonamento utilizados, observando algumas medidas de desempenho tais como, eficiência espectral e energética, e justiça da rede escalonada para os usuários finais.

## 1.5 Organização da Monografia

O restante deste trabalho está organizado conforme descrito a seguir: O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos abordados nesta Monografia contando com a relevância da autoria e simulação de cenários de redes heterogêneas LTE-A. Além de, uma descrição das principais tecnologias consideradas para o mapeamento e experimentação de redes e trabalhos relacionados.

O Capítulo 3 contém informações sobre a ferramenta de simulação utilizada, bem como os métodos utilizados para a obtenção de resultados e avaliação dos mesmos tomando como princípio a base teórica exposta no capítulo anterior.

Por último, o Capítulo 4 descreve as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste projeto, uma retrospectiva global do trabalho realizado e perspectivas futuras quanto à evolução da contribuição realizada.

---

## Fundamentação Teórica

A internet é uma rede global de computadores interligados que utilizam um conjunto de protocolos padrões para servir vários bilhões de usuários no mundo inteiro. É uma rede de várias outras redes, que consistem milhões de empresas privadas, públicas, acadêmicas e governamentais (estratégicas, de economia, serviços secretos de inteligência e defesa), com alcance local e global e que estão ligadas por uma ampla variedade de tecnologias de redes eletrônicas, móveis e ópticas.

A internet é muito mais do que o que se vê nos navegadores (os chamados *Browsers*). Esta é a **World Wide Web**, ou simplesmente *web*, e é apenas uma de muitas faces da Internet. Dentro desse conglomerado de tecnologias tem-se redes de ponto a ponto, os *peer-to-peer*, infraestruturas de apoio à e-mails e os protocolos de redes *wireless* e muito mais do que apenas os sites que são utilizados para navegar no cotidiano dos usuários.(JUNIOR, 2020)

Programar para a internet é um desafio muito maior do que criar softwares que rodem apenas em uma máquina local ou até mesmo em redes privadas. Programar para a internet é ter que lidar com dispositivos heterogêneos, larguras de banda variáveis, distâncias inimagináveis e diversas outras limitações. Mas ao mesmo tempo programar para a Internet dá um alcance, um poder, muito maior do que se possa imaginar.

*"Com grandes poderes vem  
grandes responsabilidades"*

---

*Tio Ben*

### 2.1 Um breve histórico da rede de redes

No final dos anos 50, precisamente em 1957, a URSS estava temporariamente a frente na corrida do espaço quando lançou o Sputnik, o primeiro satélite artificial da Terra. Em resposta os EUA formaram uma instituição de investigação dentro do *Department of Defense* (DoD), a qual designaram por *Advanced Research Projects Agency* (ARPA).



O objetivo desta instituição era a implantação de uma rede de comunicações, entre os locais mais críticos do sistema de defesa Norte-Americano. Para isso, foram feitos estudos de como os EUA poderiam manter o comando e controle de seus mísseis e aviões de bombardeio depois de um ataque nuclear. Esse estudo queria viabilizar a criação de uma rede de pesquisa nuclear descentralizada que sobrevivesse à uma catástrofe nuclear de maneira que se qualquer cidade dos EUA, mesmo que fosse atacada, os militares teriam ainda o controle de suas armas nucleares para um possível contra ataque (GLOWNIAK, 1998).

A rede de comunicações deveria ser robusta, de forma a que em caso de ataque nuclear, com a consequente destruição maciça de parte da rede, a comunicação ainda deveria fluir sem problemas entre as regiões não afetadas. Para satisfazer estas necessidades, a rede deveria ser uma rede descentralizada, e todos os nós da rede deveriam ter uma granularidade de permissão idêntica, em termos de comunicações, ou seja, cada nó na rede deveria enviar, receber informação ou ser apenas ponto de passagem. Os dados, deveriam ser divididos em pacotes que seriam encaminhados, de forma instantânea, por uma das várias rotas que estivessem disponíveis. Esses diferentes pacotes deveriam seguir caminhos independentes, cujo ponto comum era o destino que levavam em seu cabeçalho.

Em 1967 foi criada uma rede experimental, a ARPANET, na qual os poucos computadores do DoD foram ligados transversalmente pelo país. Em 1970 foram criados os *hosts* e o protocolo NCP e, um ano depois foi criado o serviço de email para transmitir mensagens entre os computadores ligados a ARPANET. Já em 1973 foram definidos os protocolos TCP/IP para permitir a comunicação entre computadores de arquiteturas diferentes e neste ano começou a ser introduzido o nome de internet. Em 1974, realizaram-se estudos para extrapolar a rede para todo o mundo porém, a pouca infraestrutura de rede em outras localidades e o alto custo da manufatura de computadores foram um impeditivo para o início dessa expansão, e também nesse ano o vocábulo internet foi oficialmente registrado por Vint Cerf and Bob Kahn no artigo *A Protocol for Packet Network Inter-communication*(CERF; KAHN, 1974).

No início da década de 1980 outras frentes começaram, timidamente, a desenvolver e propor novas infraestruturas para viabilizar a rede, com a entrada de cientistas e universidades. Surge, em 1981, a BITNET universitária com serviços de e-mail e *List Server* para distribuir informação, além de arquivos de transferência e mensagens, e a CSNET científica. No ano seguinte, os protocolos usados nestas redes ficaram conhecidos como padrão, o TCP/IP. Então a internet foi definida como o conjunto dessas redes que utilizavam protocolos TCP/IP. Assim, em 1987 as redes BITNET e a CSNET foram unidas para formar a *Corporation for Research and Educational Networking* (CREN) e algum tempo depois os EUA liberaram a rede para uso comercial.

Em 1990, surge o primeiro *Internet Service Provider* e a ARPANET deu lugar a internet propriamente dita. Na sequência, em 1991 ocorreu um evento que mudou dras-

ticamente a utilização das redes com a contribuição de Tim Berners-Lee com a criação do "WWW" possibilitando a criação servidores de informação, onde se incluem textos, imagens, multimídia, permitindo todos os meios necessários para tornar a internet uma verdadeira teia de informações. Assim, já em 1999 foram catalogados mais de 4 milhões de nomes de domínios.

*"O conceito mais importante a reter é que a WWW não é uma rede por si só, mas uma série de programas de software que podem ser usados em diferentes redes de computadores, ou mesmo nos que não façam parte de uma rede."*

---

*Karen Goethals*

## 2.2 Redes Móveis

Paralelamente a esses eventos outra rede estava começando a engatinhar. Em 1876, Alexandre Graham Bell e Thomas Watson fizeram a primeira ligação telefônica. Doze anos mais tarde, o físico alemão Heinrich Hertz descobriu as ondas eletromagnéticas e alguns princípios de propagação de ondas, tornando possível ao laboratório Bell avançar em pesquisas de transmissão de informação via ondas. Contudo somente no início do século XX, um sistema telefônico foi ligado por antenas. Esse sistema desenvolvido por pesquisadores do laboratório da Bell Company permitiu a comunicação móvel utilizada em carros nos EUA, devido o tamanho do hardware, com uma caixa muito grande e com várias válvulas. Esse sistema de comunicação móveis utilizado nos anos 1950 e 1960, porém não foi muito popular.

Anos mais tarde, a primeira ligação entre aparelhos celulares foi possível graças aos estudos do executivo Martin Cooper da companhia Motorola, uma concorrente da Bell Company. Cooper, em abril de 1973, de maneira inédita, demonstrou como se daria o princípio de comunicação por tecnologia móvel. Embora, estes primeiros sistemas celulares eram muito limitados quanto à mobilidade e serviços, com baixa capacidade, má qualidade de voz, equipamentos pesados, caros e muito sensível à interferências do ambiente. Dessa forma, o sistema de comunicação móvel era pouco acessível e não muito popular.

Assim, no fim da década de 1980 houve a introdução de uma nova tecnologia que mudou radicalmente o panorama da ciência global, a tecnologia dos semicondutores e microprocessadores. Essa nova tecnologia permitiu a criação de aparelhos eletrônicos mais compactos e leves, o que por sua vez, permitiu o desenvolvimento de aparelhos celulares

menores e mais sofisticados, tornando-os uma realidade prática para mais usuários. Assim, ocorreu o advento da primeira geração de telefonia móvel (1G) que ainda transmitia apenas informação de voz analógica. Os sistemas de 1ª Geração foram o *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), *Nordic Mobile Telephone* (NMT), e *Total Access Communication System* (TACS). Dessa forma, iniciou-se a popularização da tecnologia móvel e o número de usuários cresceu para aproximadamente 20 milhões em 1990.

No final da década de 1990, no ano de 1997, deu-se início à segunda geração de telefonia móvel, dada a necessidade de melhoria de transmissão, capacidade do sistema e a cobertura. Com mais avanços na tecnologia de semicondutores os chips passaram a utilizar a faixa de micro-ondas que antes operavam com sistemas analógicos. Dessa maneira, os sistemas eletrônicos foram de pouco em pouco adotando sistemas digitais, e o mesmo foi acontecendo com as ondas de transmissão de voz, que eram os dados majoritários na transmissão.

Isso permitiu novas aplicações nos aparelhos como fax e pequenas mensagens de texto. Esses dados já estavam ganhando bastante espaço com o desenvolvimento de novos aparelhos digitais. Com a introdução dessas novas funcionalidades na transmissão de dados houve uma nova necessidade, criar tecnologias de encriptação e serviços de prevenção de fraudes. Esse foi o surgimento dos protocolos de Encriptação.

A arquitetura geral do 2G foi definida por fim, com uma taxa de transmissão de dados que não excedia 9,6 Kbps. Os sistemas 2G mais populares foram o *Global System for Mobile Communication* (GSM), o *Digital AMPS* (D-AMPS), o *Code Division Multiple Access* (CDMA), e *Personal Digital Communication* (PDC).

Dentre esses o GSM foi padrão celular mais usado (GSM900, GSMrailway [GSMR], GSM1800, GSM1900 e GSM400), suportando aproximadamente 250 dos 450 milhões de usuários no mundo, com roaming internacional em aproximadamente 140 países. Porém, a evolução dos dispositivos móveis não ficaram restritos entre uma geração e outra, entre essas gerações houveram muitas pesquisas e aperfeiçoamentos até, realmente, a padronização de uma geração.

A transição de 2G para 3G parecia ser extremamente desafiadora, e com altos custos. Dessa forma, foi criado um padrão intermediário, o "2.5G". As redes 2.5G com GPRS, CDMA2000 1x, EDGE eram as versões avançadas das redes 2G com taxas de dados de aproximadamente 144 Kbps. A tecnologia 2.5G foi radicalmente diferente da 2G pois introduziu um novo conceito, a comutação por pacotes. Esta nova tecnologia *General Packet Radio Service* (GPRS) é o padrão europeu 2.5G, uma melhoria do padrão GSM. O GPRS substitui a comutação de circuitos CS do GSM por comutação por pacotes, sendo um passo útil para a 3G. O *Enhanced Data for Global Evolution* (EDGE) é outra melhoria do GSM, o EDGE foi muito usado pelas operadoras americanas pois possibilitava uma melhor integração, tanto a partir do GSM quanto do TDMA (IS 136). A padronização do EDGE foi feita através do *Universal Wireless Communication* (UWC 136). Suas

taxas de transmissão chegam a ser 3 vezes mais rápidas do que no GPRS. Contudo, a migração para o sistema EDGE era um pouco complexo, pois implicava não somente em atualização de software, mas também mudanças aos subsistemas de hardware das estações base e antenas e a construção de novas estações base. Por estas razões, algumas operadoras GSM optaram por não adotar esse sistema e migraram diretamente do GSM ou GPRS para o padrão 3G (WCDMA).

Aproximadamente 5 anos depois da segunda geração, iniciou-se a terceira geração a 3G, que foi responsável por uma verdadeira revolução nos sistemas de comunicação móvel. O 3G foi responsável pela popularização da internet móvel no mundo todo. Com a melhoria nos protocolos de transmissão e principalmente pelo uso da comutação de pacotes, foi possível acessar recursos de multimídia, fazer videoconferência, acessar sites, e-mails, fazer downloads de vídeos, jogar online, acessar basicamente todos os recursos da internet via aparelho móvel. O padrão 3G, foi criado pela ITU e é normalmente conhecido como IMT 2000. Os principais objetivos da 3G são fornecer acesso global, *roaming* internacional, uso em todas as aplicações móveis, altas taxas de transmissão (2 Mbps), alta eficiência e suporte tanto a comutação por circuitos quanto por pacotes. O IMT 2000 engloba cinco padrões o W-CDMA, CDMA2000, TD-CDMA/TDSCDMA, DECT e UWC-136.

Depois de alguns anos com a implantação e popularização do 3G, foi criado um modelo o *High Speed Packet Access* (HSPA). Com latência ainda menor e velocidade de internet mais alta do que no modo de acesso WCDMA, e posteriormente, o modelo atualizado, HSPA+, incrementou as taxas de download e upload. Esses modelos ficaram responsáveis para fazer a transição para a quarta geração. Desse modo, foram elaboradas diversas técnicas tanto de conceitos de modulação quanto de codificação, com vista para otimizar a utilização do espectro, e melhorar a experiência do usuário.

Assim, foi criado um novo padrão o LTE, projetado pelo *The Third Generation Partnership Project* (3GPP). Diferente das gerações de redes móveis anteriores, o LTE prioriza tráfego de dados em vez de tráfego de voz, o que torna o 4G mais rápido e estável. A velocidade de navegação pode chegar a 300 Mbps de download e 75 Mbps de upload, dependendo do aparelho utilizado. Além disso, a latência também é muito mais baixa em comparação com as gerações anteriores, o que o torna bem mais estável e apresenta uma experiência de usabilidade mais elevada. Isso, possibilitou um grande aumento no número de usuários e novos avanços em tecnologias de dispositivos móveis que foi responsável pela difusão de diversos novos aparelhos, como celulares *smartphones*, *tablets*, e outros equipamentos eletrônicos, com a introdução do conceito de IOT.

## 2.3 Long Term Evolution

Como dito anteriormente o LTE é uma padronização apresentada pela release 8 pelo 3GPP, é uma evolução das redes GSM/EDGE e UMTS/HSPA, porém com uma alta eficiência espectral e altas taxas de transmissão. As taxas de transmissão de dados teóricas são de 300 Mb/s de *downlink* e 75 Mb/s de uplink. No LTE-A, essas taxas são de 3 Gb/s no *downlink* e de 1,5 Gb/s no uplink.

Para atingir taxas de dados mais elevadas no UMTS, foi desenvolvida uma nova tecnologia de acesso, denominada WCDMA. A rede de acesso em UMTS emula uma conexão comutada por circuito para serviços em tempo real e uma conexão comutada por pacote para serviços de comunicação de dados. No UMTS, o endereço IP é alocado ao UE quando um serviço de comunicação de dados é estabelecido, e liberado quando o serviço não apresenta mais requisição para aquele IP.

A arquitetura das redes dessa release 8 do 3GPP foi projetada para ter baixa complexidade, com foco de otimização do desempenho da rede, suporte a vários tipos de redes de acesso sem fio, como LTE, WLAN, UMTS e boa mobilidade entre redes de acesso heterogêneas. Essa arquitetura é formada por uma rede de núcleo, chamada de Evolved Packet Core, EPC.

### 2.3.1 Evolved Packet Core

O EPC é puramente baseado em IP. Tanto os serviços em tempo real como os serviços de comunicação de dados são transportados pelo protocolo IP. O endereço IP é alocado ao celular quando ele se conecta na rede e liberado quando o aparelho sai da rede. No LTE o EPC substitui o que corresponde ao comutador de pacotes nas redes de 2G e 3G. Para o comutador de circuitos, o 4G não possui nenhum equivalente, de forma que, para as aplicações de voz é necessário o uso de outras tecnologias introduzidas. Uma das tecnologias utilizadas para suprir é o E-UTRAN, que estabelece a comunicação do EPC com o móvel, sendo o correspondente direto do UTRAN da rede 3G e 2G. Oficialmente, todo o sistema é conhecido como EPS, de modo que essa release ficou conhecida como *Long Term Evolution* devido a evolução da utilização do enlace de rádio.

O LTE é baseado em OFDMA para *downlink* e em SC-FDMA para uplink, em combinação com modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM no *downlink*, e BPSK, QPSK, 8PSK e 16 QAM no uplink, grandes larguras de banda de até 20 MHz e multiplexação espacial no *downlink*. A rede de acesso LTE é uma rede de estações base, NodeB evoluído (eNB), gerando uma arquitetura plana, conforme a Figura 3. Não há controlador inteligente centralizado e as eNBs são normalmente interconectadas por uma interface em direção à rede central.

A razão para distribuir a inteligência entre as estações base em LTE é acelerar a configuração da conexão e reduzir o tempo necessário para uma entrada e saída do usuário,

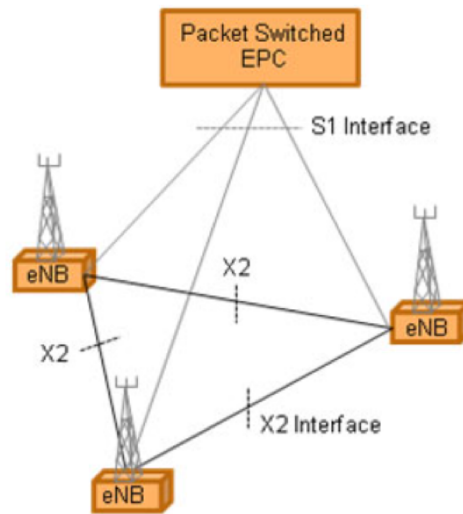


Figura 3 – Arquitetura Plana de Redes LTE

Fonte: (PROJECT, 1999)

dessa mesma interface, esse evento é chamado de **handover**. Para um usuário final, o tempo de configuração da conexão para uma sessão de dados em tempo real é crucial, especialmente em atividade de tempo real como jogos online, por exemplo. O tempo de transferência é essencial para serviços em tempo real, onde os usuários finais tendem a encerrar as chamadas se a transferência demorar muito.

Outra vantagem dessa solução é que a camada de protocolo MAC, responsável pelo escalonamento, está representada apenas no UE e na estação base, permitindo uma comunicação e decisões rápidas entre a eNB e o UE. No UMTS o protocolo MAC e o escalonamento estão localizados no controlador e quando o HSDPA foi introduzido uma subcamada MAC adicional, responsável pelo escalonamento HSPA foi adicionado no NB. Dessa forma o escalonador é o componente principal para a obtenção dos recursos de rádio de forma rápida e eficaz. O intervalo de tempo de transmissão é denominado como TTI e é definido em 1ms.

Assim, durante cada TTI o escalonador da eNB considera o ambiente, topologia físicas por cada UE, e os UE enviam relatórios de qualidade da transmissão recebida como entrada para o escalonador no qual, irá decidir qual o esquema de modulação e codificação será utilizado na transmissão. Isso depende da adaptação rápida às variações que o canal de comunicação está submetido. Para isso é utilizado o HARQ com combinação suave e adaptação de taxa. Desse modo o escalonador prioriza os requisitos de QoS entre os UE, de modo que o LTE suporte serviços em tempo real sensíveis a atrasos e serviços que requerem altas taxas de dados com picos de transmissão variados.

Finalmente, os escalonadores informam aos UEs os recursos de dados alocados e agenda

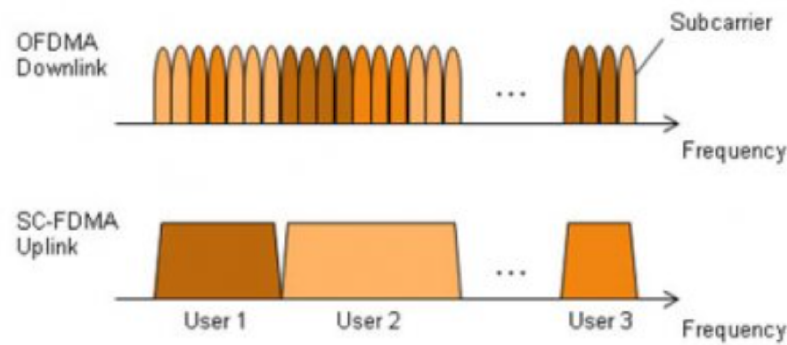


Figura 4 – OFDMA e SC-FDMA

Fonte: (PROJECT, 1999)

na eNB os UEs para fazer o *downlink* e uplink dos dados, programando um TTI para cada UE. Para alcançar alta eficiência espectral, bem como permitir um escalonamento eficiente no domínio do tempo e da frequência, uma abordagem de múltiplas portadoras para acesso múltiplo foi escolhida pelo 3GPP. Assim, para o *downlink*, foi selecionado OFDMA e para o uplink o SC-FDMA, conforme mostrado na Figura 4

### 2.3.2 OFDM e SC-FDMA

O OFDM é uma tecnologia de múltiplas portadoras que subdivide a largura de banda disponível em uma infinidade de subportadoras de banda estreita ortogonais mútuas. Dessa forma, essas subportadoras podem ser compartilhadas por vários usuários. Isso implica em uma alta relação de potência de pico para média (PAPR), exigindo amplificadores de potência caros com altos requisitos de linearidade, o que aumenta o consumo de energia para o remetente. Entretanto, isso não é problema na eNB, mas levaria a aparelhos muito caros para transmissão uplink. Desse modo, uma solução diferente foi selecionada para o UL. Como mostrado ilustrado na Figura 4 o SC-FDMA gera um sinal com características de portadora única, portanto, com um PAPR baixo.

Para permitir a possível implantação em todo o mundo, suportando o maior número possível de requisitos regulamentares, o LTE foi desenvolvido para várias faixas de frequência, as bandas de operação E-UTRA atualmente variando de 700 MHz a 2,7 GHz. As larguras de banda disponíveis também são flexíveis, começando com 1,4 MHz até 20 MHz. LTE foi desenvolvido para suportar a tecnologia TDD, bem como FDD. Na Release 8, existem 15 bandas especificadas para FDD e oito bandas para TTD. Já na Release 9, quatro bandas foram adicionadas para FDD.

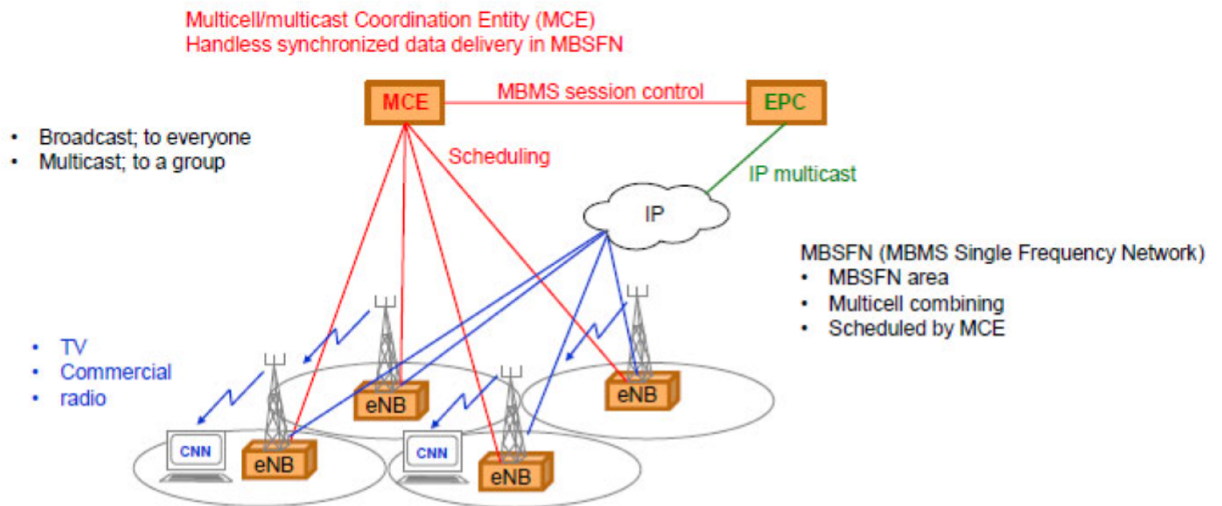


Figura 5 – Arquitetura de Multimedia Broadcast Multicast Service

Fonte: (PROJECT, 1999)

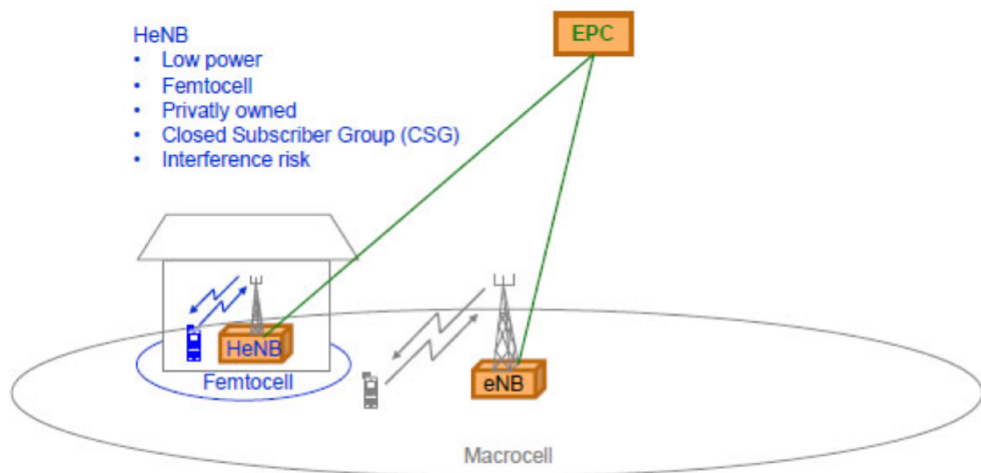


Figura 6 – Arquitetura de Home eNB

Fonte: (PROJECT, 1999)

### 2.3.3 Multimedia Broadcast Multicast Service e Home eNodeB

Também foram adicionados novos recursos nesta release 13, como por exemplo, o MBMS e HeNB. MBMS é usado para fornecer informações de broadcast a todos os usuários, por exemplo, anúncio e multicast para um grupo fechado assinante de um serviço específico, como por exemplo, streaming de TV, vide uma arquitetura com MBMS implantada na Figura 5. HeNBs foram introduzidos principalmente para fornecer cobertura



em ambientes internos, residências ou escritórios, como um extensor da rede para superar obstáculos da arquitetura local.

A HeNB é uma eNB de baixa potência que será usada em células pequenas, as chamadas células femto. Normalmente a implantação está a cargo do cliente, e pode ser implantado sem nenhum planejamento de rede, conectado às operadoras EPC, conforme a Figura 6.

## 2.4 Redes Heterogêneas

A evolução das redes sem fio tem levado ao aparecimento de diversos padrões e topologias de redes, com base em diferentes tecnologias de acesso e de demanda, levando ao conceito de redes de acesso heterogêneas, baseadas na integração de diferentes redes sem fio. A convergência destas redes vem para unificar e criar uma única infraestrutura inteligente e eficiente baseada na integração provida por essas redes de acesso heterogêneas.

Geralmente uma rede heterogênea é composta por algumas *macrocells* que são rodeadas pelas *picocells*, que buscam entregar uma cobertura mais efetiva ao usuário (ACHARYA; GAO; GAUR, 2014). As redes heterogêneas são responsáveis por entregar um serviço com maior taxa de dados, por justamente proporcionar uma integração mais próxima dos UEs e ajudar a transmitir, de forma mais eficiente, os dados provindos de uma *macrocell* com tráfego excessivo para aliviar o processamento dessa mesma *macrocell*. Com a proximidade entre os UEs e as eNB, é possível diminuir as perdas do sinal transmitido, melhorando o ganho e a capacidade do canal e, por consequência a QoS e as estatísticas do sinal, permitindo assim altas taxas de dados e um possível aumento na cobertura do sistema.

### 2.4.1 Topologias de acoplamento

Em termos de arquiteturas de redes heterogêneas, existem dois tipos, as fracamente e as fortemente acopladas. Em uma arquitetura fracamente acoplada existe uma independência entre as redes, a troca de sinalização é feita através do núcleo de uma das redes, um exemplo é rede doméstica de *wifi* com um roteador principal e extensores de sinal. O fluxo de dados é encaminhado diretamente para o roteador principal, os extensores tem o papel de apenas expandir a cobertura da rede. No caso de redes fortemente acopladas, uma das redes está intimamente ligada ao núcleo de uma outra rede, fazendo com que o tráfego de sinalização e de dados sejam sempre roteados para o núcleo de uma delas. Existem muitas vantagens em redes fracamente acopladas, como a independência na implantação e no tráfego das redes envolvidas, como também na implementação dessa interconexão, o que torna mais simples o gerenciamento das redes (HOSSAIN, 2008).

## 2.4.2 Handovers

Outro conceito importante em redes heterogêneas envolve os vários tipos de **handovers**. Quando ocorre um handover entre redes usando uma mesma tecnologia de acesso é definido como HHO, e quando ocorre um handover entre redes usando tecnologias de acessos diferentes diz-se que é um VHO. Pode-se também classificar como VHO para baixo em que se migra de uma rede de maior cobertura, por exemplo uma WWAN, para uma de menor cobertura, por exemplo uma WLAN. Por outro lado, há o VHO para cima quando a migração ocorre em direção inversa, conforme exemplificado pela Figura 7.

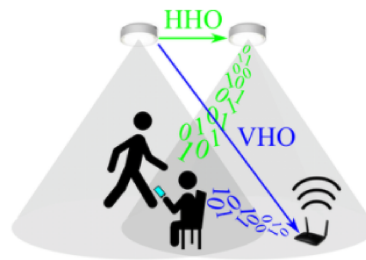


Figura 7 – Exemplo de Handover Horizontal e Vertical

Fonte: (WU et al., 2021)

Dessa maneira, com a mixagem de diversos equipamentos conectados e com variadas demandas de dados, foi introduzido o conceito de redes heterogêneas formadas pelo conjunto de nós adicionais no entorno da área de cobertura de uma *macrocell*, de forma que, os nós adicionais são constituídos pelas *picocells*. Tais redes foram formadas para facilitar a diversificação das células de comunicação e da eficiência do uso do espectro de frequência, além de permitir uma melhor cobertura para o UE. Contudo, neste cenário, é criado um novo problema nas bordas da célula, que são as interferências entre as células dessa rede, desse modo, para gerir essa nova topologia e gerenciar esses problemas foi criado uma solução chamada de coordenações de interferência, que possuem a tarefa de gerir os recursos de rádio de modo que a interferência entre as células seja a mínima possível.

## 2.5 Coordenação de Interferência

Os sistemas celulares de próxima geração prometem um significativo aumento na vazão da célula e uma eficiência espectral melhorada em comparação com os sistemas atuais. Para alcançar esses objetivos, há algumas propostas que visam uma melhoria à essa eficiência, sendo elas a Densificação da rede, o aumento de eficiência espectral e um espectro adicional. A densificação da rede é uma proposta interessante quando se trata em analisar o aumento de cobertura do sistema e, também em atender a crescente demanda

por dados móveis de maneira econômica devido a sua capacidade de reutilizar o espectro de frequência e preservar a SINR (DHILLON et al., 2012). Essa técnica, também prevê uma redução na distância média entre a estação base da célula e seus UEs, o que implica numa diminuição na perda de percurso e melhora o ganho e a capacidade do canal. Um procedimento para aumentar a densificação é a implementação de nós de baixa potência, os chamados *smallcells*, sobre uma área de cobertura de uma *macrocell*. Dessa forma, cria-se o conceito mais genérico possível de uma rede heterogênea, ou HetNet.

Assim, na implementação de redes HetNet a área de cobertura de uma *macrocell* é sobreposta a vários dos nós de acessos de baixa potência que são as *smallcells* sendo representadas em tamanhos pico ou femto, compondo em *picocells* e *femtocells*, respectivamente. (3GPP, 2009). Como já descrito anteriormente, a potência de transmissão da *macrocell* é muito superior que a das *smallcells*, isso implica, que os UEs que estão fisicamente alocados nas *smallcells* são atraídos para a *macrocell* e, desse modo, as *smallcells* podem ficar subutilizadas e a *macrocell* congestionada. Este contexto faz com que a *macrocell* próxima às *smallcells* gere grande interferência para um UE (SHIN et al., 2012). Para solucionar tal problema associado a essa interferência foram desenvolvidos esquemas de Coordenação de Interferências.

A pesquisa das Coordenação de Interferência entre Células (ICIC) foi desenvolvida em (BOUJELBEN; REJEB; TABBANE, 2014) sendo uma revisão das soluções de atenuação de interferência presentes na *Release* 8 até a *Release* 11, onde há uma comparação de vários métodos de coordenação tais como o ICIC, o eICIC e o CoMP. Em um trabalho desenvolvido em (HAMZA et al., 2013) os autores revisam várias propostas de coordenação e criam um conceito para classificar as técnicas em diferentes classes sendo elas as *frequency reuse-based*, estáticas e as *cell coordination-based* dinâmicas. Dentro da classificação de coordenação dinâmica estão as técnicas que foram abordadas no simulador do presente trabalho sendo elas as técnicas *Enhanced Inter-cell Interference Coordination* eICIC e a *Further enhanced Inter-cell Interference Coordination* FeICIC.

### 2.5.1 Enhanced Inter-cell Interference Coordination

Tendo como objetivo tratar dos problemas relacionados com interferências da sobreposição das *macrocell* sobre as *smallcells* em redes heterogêneas, foram conduzidos diversos estudos de técnicas de coordenação de interferência. Como tentativas de aprimorar as técnicas ICIC, foi padronizada pelo 3GPP na *Release* 10 (3GPP, 2009), o eICIC, com o intuito de superar as limitações dos esquemas anteriores.

Uma das principais mudanças, com relação ao ICIC, foi a adição de técnicas no domínio do tempo, baseado na partição de recursos, resultando em uma maior limitação na interferência aos usuários na borda nas *smallcells*. A *macrocell* cria sub-frames de certa forma “protegidos” para uma *smallcells*, reduzindo sua potência ou mesmo “silenciando” durante outras transmissões. Essa técnica foi nomeada de *Almost Blank Sub-frames* ou ABS. Du-

rante o ABS, a *macrocell* não transmite o *Physical Downlink Shared Channel* ou PDSCH. Entretanto, para melhor compatibilidade com versões anteriores, certos sinais devem ser transmitidos em todos os sub-frames DL, mesmo que silenciados (BOUJELBEN; REJEB; TABBANE, 2014).

Outra técnica também utilizada no esquema eICIC é o chamado *Cell Range Expansion* ou CRE, que têm o objetivo de descongestionar o tráfego das *macrocell* para aumentar a capacidade do sistema. Para isso pode-se aumentar um pouco a área servida das *smallcells*, ainda que o UE esteja recebendo um sinal de potência maior vindo da *macrocell*.

### 2.5.2 Further Enhanced Inter-cell Interference Coordination

A técnica *Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination* ou FeICIC foi proposta na *Release 11* (3GPP, 2009). Essa técnica propôs uma evolução do esquema de ABS utilizado na eICIC. Como visto anteriormente, o ABS requer que a *macrocell* anule a potência de transmissão em alguns subframes, isso se traduz, obviamente, em utilização ineficiente de recursos, quando se anula esses subframes. Isso ocorre da utilização do TDM em subframes que utilizam da técnica eICIC e das que não utilizam. Por outro lado as *smallcells* poderiam utilizar esses subframes eICIC e os não eICIC, enquanto as *macrocells* só poderiam utilizar os não eICIC para escalonar seus recursos para os usuários.

Nesses subframes eICIC o *Cell-specific Reference Signals* ou CRS deve ser transmitido para suportar medições e relatórios dos UEs. A interferência do CRS pode ser prejudicial para vários canais de dados e controle. Assim a abordagem do FeICIC, foi proposta para mitigar esse problema de interferência do CRS no receptor, o que requer a estimativa do mesmo no receptor (BOUJELBEN; REJEB; TABBANE, 2014). Por outro lado, a abordagem FeICIC baseada no transmissor depende do "silenciamento" dos elementos de recurso do PDSCH dentro de um ABS da *smallcells*. Isso implica em um melhor desempenho do RP-ABS.

## 2.6 Técnicas de Escalonamento

A alocação de recursos de rádio em redes é um dos grandes desafios enfrentados desde as primeiras gerações, e até hoje é, sendo assim, extensivamente estudada. Para cada uma das soluções, foram criados diversos algoritmos para resolver o problema de alocação de recursos para redes sem fio. Esses algoritmos utilizam informações da rede como, ganho médio do canal, taxa de dados mínima requerida pelos usuários, informação da fila e a eficiência espectral dos blocos de recurso, para assim, decidir como e quando alocar recursos da rede para determinados usuários. Tais algoritmos são chamados de algoritmos de escalonamento.

O presente estudo apresenta algumas das técnicas de escalonamento do sistema no enlace de *downlink*, buscando otimizar os recursos com algoritmos eficientes e que buscam garantir uma justiça aos usuários no cenário avaliado e suas respectivas aplicações.

Como foi destacado anteriormente, o provimento dos serviços de uma rede de comunicações móveis é realizado a partir da estação base, ou seja, a eNodeB no caso do LTE. A estação base seleciona os terminais em um determinado instante de tempo dentro da área de cobertura da prestadora do serviço e fornece o sinal necessário para a entrega e utilização da rede, de modo que, dada a qualidade do sinal emitido pela estação, o usuário final terá uma certa velocidade de transmissão, e uma qualidade de sinal.

O procedimento pelo qual a estação base seleciona qual usuário irá transmitir é definido pelos algoritmos de escalonamento, implementados na própria estação. De acordo com essa seleção de usuários serão alocados os recursos da rede, atribuindo um RB, contido em um *slot* do frame para transmissão em um determinado período de tempo. No processo de escalonamento de redes LTE, o sistema de transmissão é dividido em *times slots*. Outro processo bastante utilizado no escalonamento *downlink* do LTE, se trata da utilização das subportadoras, que por meio da técnica OFDMA o sistema as distribui para diferentes usuários ao mesmo tempo, de maneira que vários usuários podem receber dados simultaneamente.

Nesse cenário existem diferentes tipos de algoritmos de escalonamento, dentre os quais são escolhidos a critério da prestadora de serviços, de acordo com as aplicações e parâmetros que a mesma oferece ao usuário com base em suas necessidades. Dentre vários escalonadores existentes para a tecnologia LTE serão tratados neste trabalho cinco em destaque, no caso o *Maximum Carrier-to-Interference Ratio* (Max C/I), o *Round-Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF) e o *Generalized Proportional Fair* (GPF), e uma adaptação do PF proposta pelo autor (LI et al., 2010), o *Adaptive Proportional Fair* (APF), que é o principal objetivo de estudo deste presente trabalho.

Dentre esses escalonadores citados anteriormente os dois primeiros são os mais primitivos de forma que o Max C/I escolhe os usuários com melhor ganho de canal, o que resulta em um melhor desempenho e uma máxima vazão para o sistema de transmissão, porém isso prejudica muito a justiça do canal. O RR escolhe os usuários, por sua vez, e dá aos usuários a probabilidade de agendamento igual sem prioridade, isso implica em uma vazão menor, porém, acarreta em uma maior justiça no canal.

### 2.6.1 Proportional Fair

Para balancear os dois algoritmos anteriores surgiu o PF que foi proposto pelo trabalho (JALALI; PADOVANI; PANKAJ, 2000) para fornecer um bom compromisso entre capacidade e justiça.

O PF é um escalonador que provê uma entrega justa de recursos aos usuários ao longo do sistema. Esse algoritmo de escalonamento é baseado no cálculo da taxa de transmissão

instantânea do usuário em relação a sua taxa média de dados. Esse processamento é de uma complexidade maior para a eNodeB, justamente porque é necessário informar também as posições dos UEs nos slots do frame de transmissão. O estado do enlace é avaliado conforme a seguinte equação 1.

$$P_i(t) = \frac{r_i(t)}{\bar{R}_i(t)} \quad (1)$$

Onde  $r_i(t)$  é a taxa de dados instantânea do canal do usuário e  $\bar{R}_i(t)$  é a taxa média de dados do usuário  $i$ .

Essa taxa média de dados pode ser calculada das seguintes Equações, 2 quando o usuário é escalonado e 3 quando o usuário não está sendo escalonado. Sendo  $t_c$  o tamanho da janela, que é um parâmetro utilizado no escalonador.

$$\bar{R}_i(t) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)\bar{R}_i(t-1) + \frac{1}{t_c}r_i(t-1) \quad (2)$$

$$\bar{R}_i(t) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right)\bar{R}_i(t-1) \quad (3)$$

### 2.6.2 Generalized Proportional Fair

O algoritmo de escalonamento GPF fornece uma solução eficaz para melhorar o desempenho do tráfego em um cenário *downlink*. Essa estratégia explora a diversidade de usuários ao longo da rede no domínio da frequência e do tempo. O escalonador GPF encontra o equilíbrio melhor que seu antecessor nos quesitos entre justiça e vazão, ajustando certas variáveis na métrica do PF. Esse escalonador analisa a vazão alcançada e as taxas de dados instantâneas dos usuários, a fim de aumentar a probabilidade de alocação e atender aos usuários de acordo com os requisitos prioritários.

Dessa forma sua equação é apenas uma generalização da equação no PF aplicando constantes exponenciais no numerador e denominador para equilibrar a vazão e justiça, conforme a equação 4.

$$P_i(t) = \frac{r_i(t)^\beta}{\bar{R}_i(t)^\gamma} \quad (4)$$

### 2.6.3 Adaptive Proportional Fair

Neste contexto, é apresentado uma adaptação do GPF presente no artigo de estudo do trabalho (LI et al., 2010), uma vez que, o algoritmo do PF funciona bem quando os usuários experimentam condições de canal homogêneas, mas quando o canal varia ou usuários passam por diferentes condições de canal, o escalonamento do algoritmo PF pode fornecer aos usuários justiça limitada. Devido a essa limitação quanto a justiça no escalonador PF, foi proposta a seguinte adaptação para o denominador do GPF, pois alterações ao fator  $r_i(t)^\beta$  refletem diretamente na justiça do canal, como é visto na contribuição de Xiaowei que apresenta a seguinte lógica na função do GPF:

- Se  $\beta = \gamma = 1$  na equação 4 o escalonador irá se comportar como o PF.
- Se  $\beta = 1, \gamma = 0$  na equação 4 o escalonador irá se comportar como o Max C/I.
- Se  $\beta = 0, \gamma = 1$  na equação 4 o escalonador irá se comportar como o RR.

Dessa forma, foi proposta a seguinte Equação 5.

$$P_i(t) = \frac{r_i(t)}{\bar{R}_i(t)^{\beta_i(t)}} \quad (5)$$

Onde é definido esse índice do denominador como uma função  $\beta_i(t)$  na qual tem-se a seguinte relação à Equação 6.

$$\beta_i(t) = k^{\text{sign}[(k-1)(r_i(t)-r_i(t-1))]} \quad (6)$$

onde o  $k$  é dado pela Equação 7.

$$k = \frac{(r_i(t) - r_i(t - 1))}{(\bar{R}_i(t) - \bar{R}_i(t - 1))} \quad (7)$$

de modo geral  $k$  representa a variação do canal,  $r_i(t)$  é a taxa de dados instantânea do canal do usuário e  $\bar{R}_i(t)$  é a taxa média de dados do usuário  $i$ , assim como no PF convencional. Porém, essas funções permitem uma lógica na qual, quando as condições de um usuário  $i$  tendem a ficarem ruins e esse mesmo usuário fica em uma condição ruim por um período de tempo, primeiramente ambas as  $r_i(t)$  e  $\bar{R}_i(t)$  vão cair, porém  $r_i(t)$  cai mais rápido que a  $\bar{R}_i(t)$  por conta da latência no cálculo de  $\bar{R}_i(t)$ . Isso implica que  $K > 1$  e o valor da  $\text{sign}[(k - 1)(r_i(t) - r_i(t - 1))]$  seja igual a  $-1$ .

Então a função  $\beta_i(t)$  é limitada entre 0 e 1. Depois de um período de tempo  $r_i(t)$  tende a se manter enquanto a  $\bar{R}_i(t)$  decai rapidamente, isso faz com que  $K < 1$  e o valor de  $\text{sign}[(k - 1)(r_i(t) - r_i(t - 1))]$  seja  $+1$ . E mesmo assim o valor da função de  $\beta_i(t)$  é limitado entre 0 e 1. Então esse índice  $\beta_i(t)$  faz com que a probabilidade de escalonamento do usuário aumente.

Quando as condições do usuário  $i$  melhoram, esse mesmo usuário fica nessa condição por um período de tempo, então primeiramente ambas as taxas  $r_i(t)$  e  $\bar{R}_i(t)$  aumentam, e análogo ao primeiro cenário a  $r_i(t)$  aumenta mais rápido que a  $\bar{R}_i(t)$ . Assim, tem-se um  $K > 1$  o valor da  $\text{sign}[(k - 1)(r_i(t) - r_i(t - 1))]$  é  $+1$  então o valor de  $\beta_i(t)$  fica maior que 1, depois de um tempo a  $r_i(t)$  tende a se manter enquanto a  $\bar{R}_i(t)$  aumenta rapidamente e tem-se  $k < 1$  e um valor de  $\text{sign}[(k - 1)(r_i(t) - r_i(t - 1))]$   $-1$ .

Desse modo, o valor de  $\beta_i(t)$  fica maior que 1 e isso faz com que a probabilidade de escalonamento desse usuário diminua enquanto ele estiver em uma boa condição no canal. Assim, aplica-se um parâmetro bem seletivo quanto a justiça do canal.

## 2.7 Métricas de Desempenho

Para avaliação das técnicas de escalonamento são utilizadas métricas de desempenho, que apresentam algumas características distintas entre os algoritmos de escalonamento. Essas métricas conseguem evidenciar como o sistema escalonado está reagindo as alterações, seja de maneira negativa ou positiva. Existem diferentes tipos de métricas comumente utilizadas, podendo-se destacar o índice de justiça, a eficiência espectral, a eficiência energética e a vazão do sistema.

As principais métricas utilizadas na análise desse trabalho foram a justiça, a eficiência espectral e a eficiência energética que apresentam um papel diametralmente oposto na alocação de recurso de redes wireless, como explicado no trabalho (PAULA; SOUSA; MACIEL, 2017)

### 2.7.1 Justiça em algoritmos de Escalonamento

Este indicador é utilizado para verificar se os usuários estão obtendo um compartilhamento justo de recursos ao longo da transmissão do sistema. O índice de justiça de um escalonador pode ser calculado entre os usuários de uma mesma classe de dados ou entre usuários de diferentes classes segundo (JAIN et al., 1984). De maneira geral o calculo do índice de justiça pode ser feito pela fórmula 8.

$$f(x) = \frac{|\sum_{i=1}^n x_i|^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (8)$$

na qual  $x_i \geq 0$  e  $x_i$  representa a vazão média do usuário  $i$  e  $n$  representa o número de usuários ativos na célula.

### 2.7.2 Eficiência Espectral

A eficiência espectral é determinada como a média de bits transmitidos por segundo por Hz (bits/s/Hz) para todos os PRBs (Physical Resource Blocks) alocados durante a conexão do sistema de uma rede (LIU et al., 2017).

### 2.7.3 Eficiência Energética

A eficiência energética é definida pelo número de bits transmitidos em relação à potência de transmissão (bits/J) (LIU et al., 2017).



---

## Simulações e Análise dos Resultados

Este Capítulo tem como objetivo apresentar os métodos e ferramentas utilizadas para a simulação e compreensão da pesquisa feita anteriormente no trabalho (LI et al., 2010) a respeito do escalonador *Adaptive Proportional Fair* (APF) e as pesquisas de coordenação de interferência e o cenário de simulação proposto pelo trabalho de (MOREIRA; SILVA; GUARDIEIRO, 2019) e o simulador de redes LTE codificado no software MATLAB referenciado pelo trabalho (LIU et al., 2017).

### 3.1 Método de Pesquisa

Os métodos de pesquisa têm como objetivo direcionar a coleta de amostras e dados, para, enfim, encontrar uma solução para um problema específico ou pontual. Particularmente, os métodos de pesquisa científica exigem explicações baseadas em fatos coletados, medições e observações e não apenas no raciocínio. Devido a isso, é necessário a junção de um embasamento teórico e a aplicação empírica.

A metodologia de pesquisa tem como objetivo resolver um problema de forma sistemática. É uma ciência que estipula como a pesquisa deve ser realizada. Dessa maneira, o presente trabalho foi dividido na fundamentação teórica vista anteriormente no Capítulo 2 e neste Capítulo serão definidas as metodologias para as simulações, e o comportamento prático dos escalonadores apresentados na Seção 2.6 no Capítulo de referencial teórico.

Por fim, os componentes do sistema a serem analisados utilizaram o conceito de redes LTE-A heterogêneas, as HetNet, as técnicas de coordenação de interferência e de escalonamento, bem como as métricas de justiça, eficiência energética e espectral. Após a simulação são explicados os resultados obtidos, observando os pontos positivos e negativos da técnica de escalonamento APF, que foi adicionada ao código do simulador, em relação as outras técnicas citadas, e as alterações dos parâmetros de simulação na aplicação desse sistema.

## 3.2 Material de Pesquisa

Para a simulação do ambiente de redes LTE foi utilizado um simulador proposto pelos trabalhos de (LIU et al., 2017) nos quais foram aplicados como objeto de estudo os algoritmos de escalonamento RR, PF e o trabalho de (ARAMIDE et al., 2017) o qual estuda o algoritmo do GPF e, por fim o algoritmo proposto no referido artigo de (LI et al., 2010) o qual foi adaptado para a codificação MATLAB e o simulador base.

O código é executado de forma procedural, na qual em tempo de execução as funções periféricas de métricas, escalonamento e coordenação de interferência são invocadas conforme o procedimento é executado. Como toda codificação de paradigma procedural (PRADO, 2009) a execução tem como âncora o arquivo de código `main_ideal.m`, ou função principal. A função responsável pela implementação da técnica de coordenação de interferência eICIC é a função `BestResp_eICIC.m`, analogamente, a função responsável pela implementação da técnica de coordenação de interferência FeICIC é a função `BestResp_FeICIC.m`.

Para a execução e análise das métricas de escalonamentos tem-se implementado a função `Troughput.m` responsável por calcular os valores de taxa de transferência em determinados instantes da simulação. A função `jain.m` é responsável por calcular o índice de justiça dos sistemas escalonados. Para as métricas de Eficiência energética e espectral ao final do função principal são calculados a partir de métricas executadas ao longo do código com as "rates" dos escalonadores e a soma das "energy" para eficiência energética e a relação entre as "rates" e o *length* dessas taxas para a eficiência espectral.

Para os algoritmos de escalonamento são as seguintes funções, `round_robin_scheduler.m` é responsável pela execução do algoritmo RR. A `PF_scheduler_LTE.m` é responsável pela execução do algoritmo do PF. A `GPF_scheduler_LTE.m` responsável pela execução do algoritmo GPF. Por fim, a função `APF_scheduler_LTE` é responsável pela execução do algoritmo criado pelo trabalho (LI et al., 2010) e objeto de estudo do presente trabalho. Essa função pode ser encontrada no Apêndice A deste trabalho.

A função implementada com o algoritmo de escalonamento APF foi simulada juntamente com as outras funções de escalonamento já citadas, com o intuito de comparar seu desempenho com os outros escalonadores e verificar a sua viabilidade. Os procedimentos adotados na implementação do algoritmo foram baseados na literatura e nos trabalhos referenciados anteriormente no Capítulo 2.

Os resultados foram gerados de maneira que os valores de eficiência energética, de eficiência espectral e do índice de justiça foram setados para os quatro tipos de escalonadores. Com os resultados gerados, foi possível a simulação em vários cenários com a variação do número de *picocells* e o numero de usuários no ambiente de simulação, de forma que pudessem estabelecer conclusões acerca do desempenho do algoritmo de escalonamento APF incluído.

"Good software, like wine, takes time."

---

Joel Spolsky

## 3.3 Simulações

Nesta seção são tratados os cenários de simulação e uma análise dos resultados das simulações levando em consideração principalmente, às principais métricas de desempenho dos escalonadores, tratadas no Capítulo 2.

### 3.3.1 Ambiente de simulação

Para avaliar o desempenho das técnicas de ICIC, um ambiente de simulação no software MATLAB foi modelado com referência no trabalho em (LIU et al., 2017). A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros para a simulação conforme utilizado no trabalho de (MOREIRA; SILVA; GUARDIEIRO, 2019).

A geometria da célula para o sistema LTE considerou-se o formato hexagonal. O cenário de simulação é composto por sete *clusters* constituídos por *macrocells* e *picocells*, sendo variadas conforme o cenário de simulação escolhido, sendo admitido como *default* de simulação duas *picocells* por *clusters* central. Os seis *clusters* vizinhos do *clusters* central são exatamente iguais entre si. A distância entre as *macrocells* é de 1000 m, o que pode corresponder à uma rede LTE implantada urbana. Em cada célula, são disponibilizados 25 RBs para a transmissão e a largura de banda é igual a 5 MHz.

Realiza-se estudos de simulação em otimizações eICIC e FeICIC, gerando aleatoriamente 10 topologias de HetNets e, em seguida, calcula-se a média dos indicadores de desempenho de todas as topologias. Assume-se que há apenas uma *macrocell* localizada no centro de cada hexágono. Cada hexágono tem o mesmo número de *picocells*, sendo que para este presente trabalho foram feitas variações de 1, 2, 3 e 4 *picocells*. Pelo padrão admitido no trabalho original (LIU et al., 2017), são colocados 8 usuários aleatoriamente no sistema que varia o número de *picocells*.

Adicionalmente, para uma análise mais ampla dos algoritmos de escalonamento foi variado o número de usuários dentro das HetNet para observar o comportamento dos mesmos algoritmos implementados com as técnicas de coordenação de interferência, sem variar o número de *picocells*. Dessa forma, o número proposto por padrão do simulador é duas *picocells* e assume-se que os usuários são estáticos. Assim, foram simulados os cenários de 8 (padrão), 10, 12 e 15 usuários no mesmo sistema.

Após todas as simulações foram coletados os dados e gerados gráficos para fazer a comparação dos resultados, sendo extraído do simulador as métricas de Justiça, Eficiência Espectral e Eficiência Energética já descritas anteriormente. O Simulador também

apresenta a *Cumulative Distribution Function* (CDF) da vazão dos 5% dos piores usuários do sistema.

Tabela 1 – Parâmetros do ambiente de simulação

Parâmetros	Valores Utilizados
Geometria da célula	Hexagonal
Número de Clusters	7
Distância entre as <i>macrocells</i>	1000 m
Distância mínima da <i>macrocells</i> para o usuário	35 m
Distância mínima da <i>picocell</i> para o usuário	10 m
Distância mínima da <i>macrocell</i> para a <i>picocell</i>	75 m
Largura de banda	5 MHz
Número de RB's	25
Largura de banda do RB	180kHz
TTI	1 ms
Potência da <i>macrocell</i>	40 W
Potência da <i>picocell</i>	1 W
Potência máxima por RB	0.8 W
SINR do <i>threshold</i>	5dB
Ganho da antena	14dBi

Fonte: Própria autoria

### 3.3.2 Cenário de Simulação

Para analisar o escalonador APF foram criados cenários com variações de *picocells* por célula e variações de números de usuário, sendo apresentado primeiro apenas cenários com variação de *picocells* e um número fixo de oito usuários no sistema. Após esses cenários, foi fixado um número de duas *picocells* por célula e o número de usuários variado.

Todos os escalonadores foram integrados às técnicas de coordenação de interferência eICIC e FeICIC e também foram submetidos a uma rotina sem coordenação. Dessa forma, são simulados por cenário 3 etapas uma sem coordenação de interferência descrita como "Null" e outras com as respectivas eICIC e FeICIC.

Em todas as situações foram construídas tabelas que informam os resultados obtidos do sistema simulado e, com esses valores, foram desenhados gráficos que representam a relação entre tais valores com as respectivas técnicas utilizadas. Foram executadas várias simulações para cada cenário e ao final foram obtidos as médias dos resultados que são apresentados a seguir.

### 3.3.3 Cenário: uma *picocell*

#### 3.3.3.1 Justiça em cenário de uma *picocell*

A média dos índices de justiça do cenário de uma *picocell* é apresentada pela Tabela 2 e na Figura 8.

Tabela 2 – Tabela de Dados Índice de Justiça uma *picocell*

RR	PF	GPF	APF	RR eI- CIC	PF eI- CIC	GPF eI- CIC	APF eI- CIC	RR FeI- CIC	PF FeI- CIC	GPF FeI- CIC	APF FeI- CIC
0,736	0,729	0,649	0,737	0,826	0,839	0,699	0,817	0,738	0,831	0,698	0,789

Fonte: Própria autoria

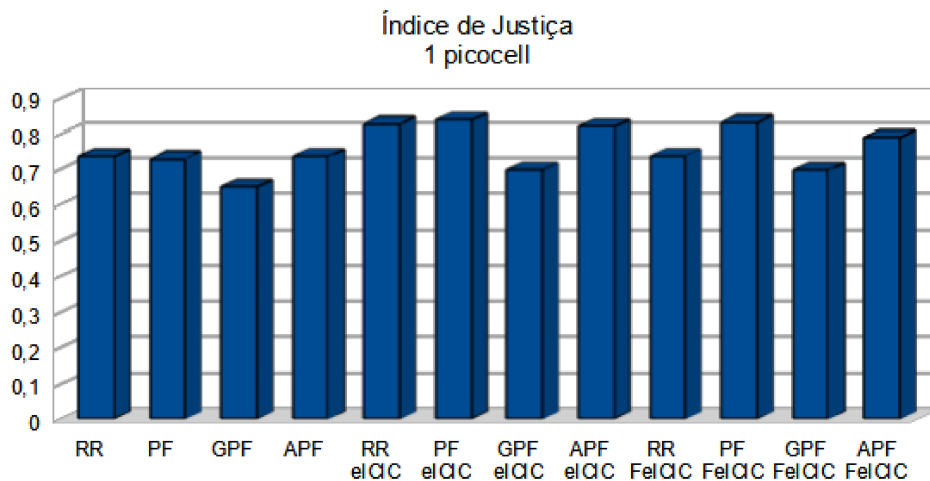


Figura 8 – Gráfico do índice de justiça de uma *picocell*

Fonte: Própria autoria

Pelo Gráfico e Tabela é perceptível que o índice de Justiça do Algoritmo APF é ligeiramente maior na maioria dos cenários, mesmo na aplicação das coordenações de interferências. Há uma ligeira diferença com a aplicação das técnica eICIC e FeICIC no qual o PF apresenta um desempenho superior.

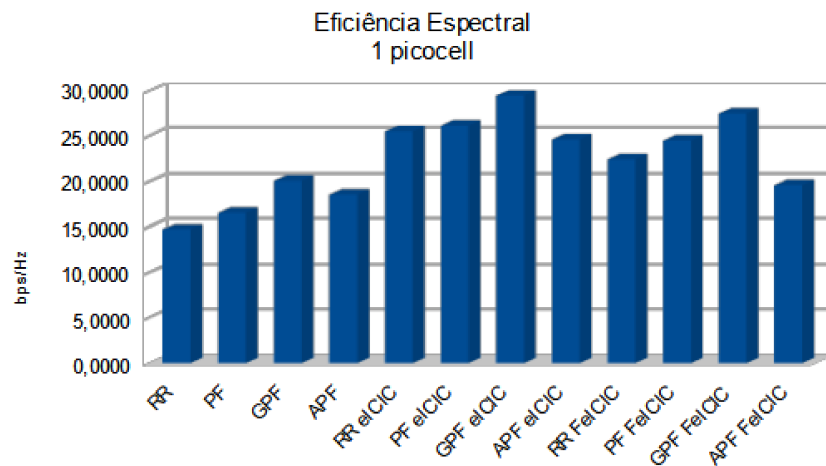
#### 3.3.3.2 Eficiência Espectral em cenário de uma *picocell*

A eficiência espectral é definida como a média de bits transmitidos por segundo por Hz (bps/Hz) de todos os PRBs alocados. A média da Eficiência Espectral do cenário de uma *picocell* é apresentada na Tabela 3 e na Figura 9.

Tabela 3 – Tabela de Dados Eficiência Espectral uma *picocell*

RR	PF	GPF	APF	RR eI- CIC	PF eI- CIC	GPF eI- CIC	APF eI- CIC	RR FeI- CIC	PF FeI- CIC	GPF FeI- CIC	APF FeI- CIC
14,730	16,610	20,090	18,590	25,590	26,200	29,480	24,657	22,470	24,550	27,500	19,610

Fonte: Própria autoria

Figura 9 – Gráfico de Eficiência Espectral de uma *picocell*

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Espectral o escalonador APF não teve um bom desempenho em relação aos outros escalonadores, uma vez que o APF prioriza a justiça, isso pode ser explicado pela equação base do APF na qual a função  $\beta(t)$  é aplicada no denominador da fórmula do PF qual de acordo com (LI et al., 2010) trabalha exatamente com a justiça do escalonador. Dessa forma, é possível notar uma boa diferença para os demais algoritmos nas métricas de Eficiência Espectral, principalmente com a aplicação das técnicas eICIC e FeICIC que mesmo com a melhoria em geral dos escalonadores o APF não apresenta uma boa performance.

Outro ponto importante de ressaltar é o mesmo comportamento que o GPF e o PF apresentam entre a relação das técnicas eICIC e FeICIC. Ao longo da densificação do sistema as métricas da FeICIC vão superando às da eICIC. Uma vez que, a densificação da rede é um elemento chave para aumentar a cobertura do sistema e atender a crescente demanda, reforça a importância da utilização de técnicas de coordenação de interferências, principalmente a FeICIC para sistemas mais densos.

### 3.3.3.3 Eficiência Energética em cenário de uma *picocell*

A eficiência energética é calculada como o número de bits transmitidos dividido pela potência de transmissão. A média da Eficiência Energética do cenário de uma *picocell* é apresentada na Tabela 4 e na Figura 10.

Tabela 4 – Tabela de Dados Eficiência Energética uma *picocell*

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
0,964	1,048	1,157	1,014	1,097	1,274	1,405	0,960	1,101	1,301	1,531	0,864

Fonte: Própria autoria

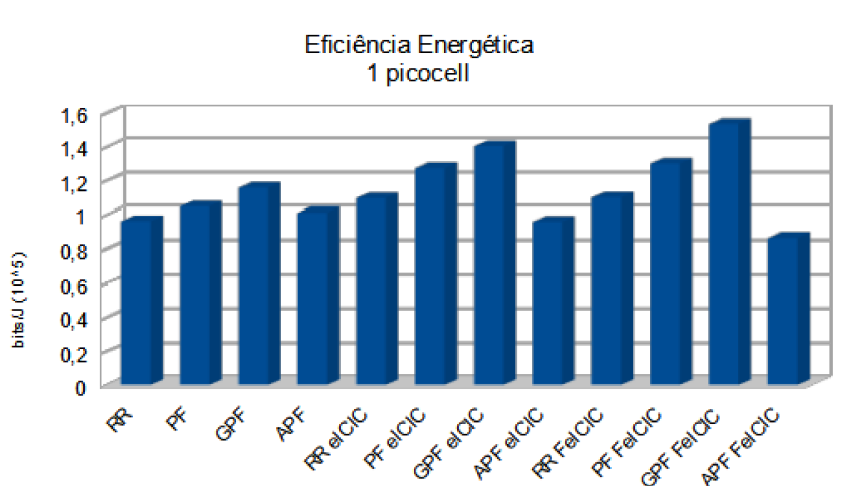


Figura 10 – Gráfico de Eficiência Energética de uma *picocell*

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Energética o escalonador APF, novamente, não teve um bom desempenho em relação aos escalonadores PF e GPF, uma vez que o APF prioriza a justiça, como dito anteriormente. É possível notar uma boa diferença para os demais algoritmos nas métricas de Eficiência Energética, principalmente com a aplicação das técnicas eICIC e FeICIC nas quais ele apresenta o pior desempenho em relação aos demais algoritmos.

### 3.3.3.4 CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de uma *picocell*

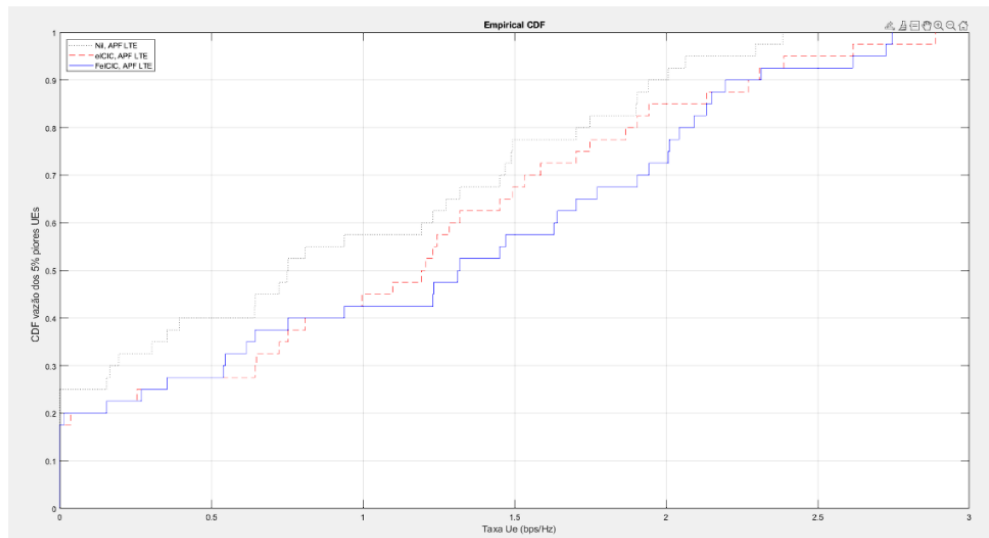


Figura 11 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de uma *picocell* para o APF

Fonte: Própria autoria

A CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários, apresentam níveis de interferências maiores, uma vez que tais usuários encontram-se nas bordas da célula do sistema. Nessa análise é possível identificar um aumento da vazão em consequência da melhoria da eficiência espectral, porém é visível que a melhora não seja tão expressiva, uma vez que o APF apresentou um comportamento ruim às métricas de eficiência energética obtidas pelas técnicas de ICIC, conforme visto na Figura 11.

### 3.3.3.5 Comparativo da CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de uma *picocell* entre os escalonadores RR PF GPF e APF

A CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários entre os escalonadores apresenta uma boa vantagem principalmente ao GPF, pois apesar de não apresentar uma boa justiça em relação ao PF e o APF, as demais métricas de eficiência são superiores, o que pode explicar essa margem na vazão dos piores usuários. Essa analogia também pode ser aplicada ao RR que apresenta uma grande margem de piora na vazão dos piores usuários e não apresenta uma justiça ruim quando comparado aos escalonadores PF, GPF e APF, conforme observado na Figura 12.



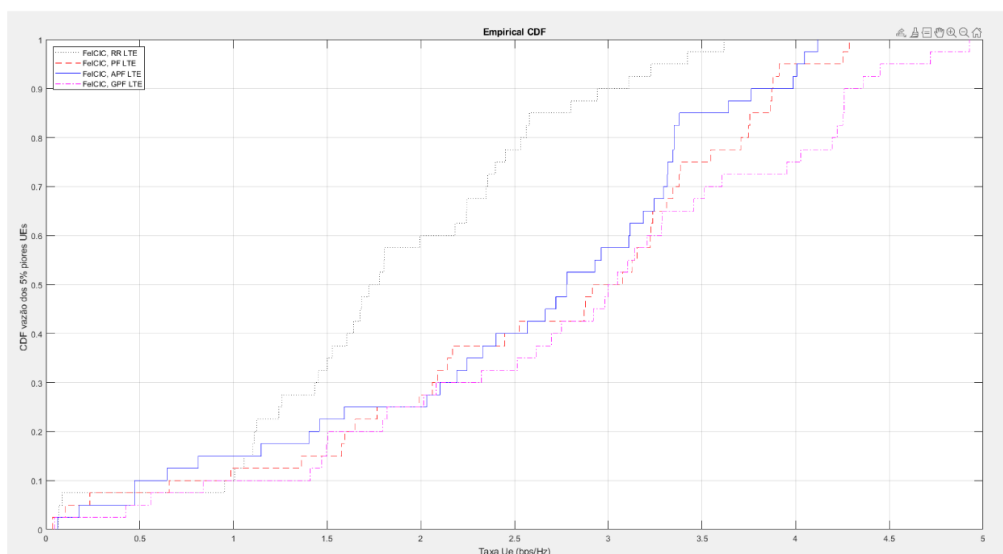


Figura 12 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de uma *picocell*

Fonte: Própria autoria

### 3.3.4 Cenário: duas *picocells*

#### 3.3.4.1 Justiça em cenário de duas *picocells*

A média dos índices de justiça do cenário de duas *picocells* é apresentada na Tabela 5 e na Figura 13.

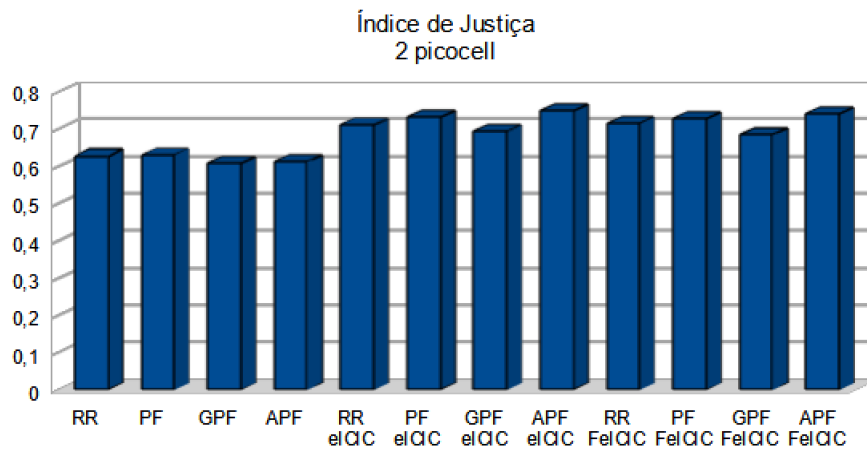
Tabela 5 – Tabela de Dados Índice de Justiça duas *picocells*

RR	PF	GPF	APF	RR eI- CIC	PF eI- CIC	GPF eI- CIC	APF eI- CIC	RR FeI- CIC	PF FeI- CIC	GPF FeI- CIC	APF FeI- CIC
0,627	0,630	0,6076	0,612	0,711	0,731	0,693	0,748	0,714	0,727	0,684	0,740

Fonte: Própria autoria

Pelo Gráfico e Tabela é perceptível que o índice de Justiça do Algoritmo APF é ligeiramente maior na maioria dos cenários, mesmo com a aplicação das coordenações de interferências. Há uma ligeira diferença com a aplicação das técnica eICIC e FeICIC, no qual o PF apresenta um desempenho similar ao APF. É importante notar também que, de um cenário de menor densificação para outro de maior o índice de justiça teve uma ligeira queda, isso será mais notório em cenários de maior densificação do sistema.

No entanto, é possível notar que a diferença entre os demais algoritmos para o APF, que começam a acentuar-se quanto maior a densificação do sistema, de modo que o APF apresenta uma melhoria nos índices de justiça mesmo para cenários mais complexos. A

Figura 13 – Gráfico do índice de justiça de duas *picocells*

Fonte: Própria autoria

sua atenuação desse índice para o APF, em sistemas mais densificados, é menor que os demais escalonadores.

### 3.3.4.2 Eficiência Espectral em cenário de duas *picocells*

A média da Eficiência Espectral do cenário de duas *picocells* é apresentada na Tabela 6 e na Figura 14.

Tabela 6 – Tabela de Dados Eficiência Espectral duas *picocells*

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
19,825	23,614	24,853	21,339	24,985	29,065	30,085	27,785	25,328	29,647	32,447	26,280

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Espectral o escalonador APF, novamente, não apresenta um desempenho bom quando comparado os demais escalonadores PF e GPF. Contudo, é visível que há uma melhora em comparação com sistema de uma *picocell* na qual as diferenças com os outros escalonadores eram bem mais acentuadas. E novamente, ocorre o padrão da melhora das métricas de eficiência espectral quando são aplicadas as técnicas de coordenação de interferência.

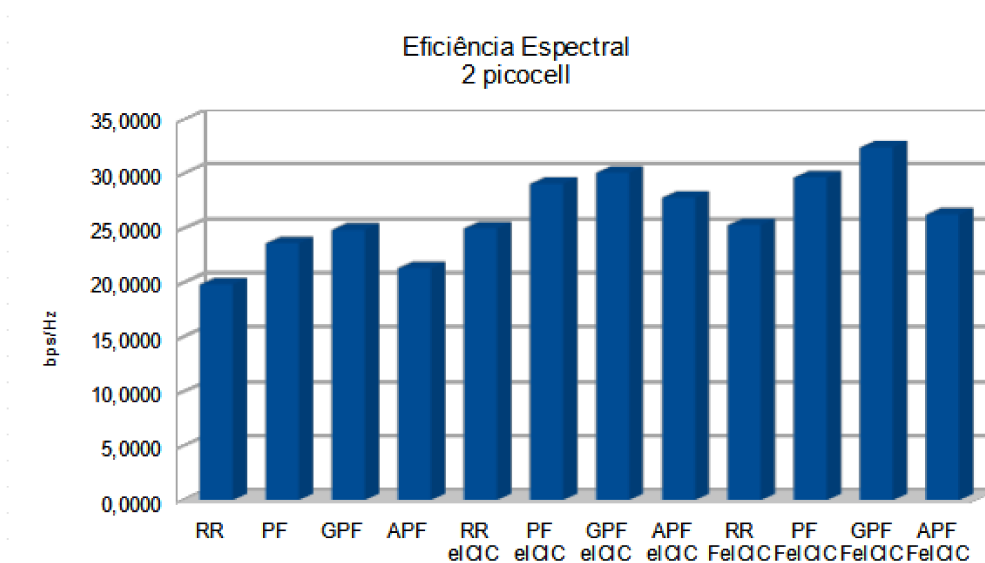


Figura 14 – Gráfico de Eficiência Espectral de duas *picocells*

Fonte: Própria autoria

### 3.3.4.3 Eficiência Energética em cenário de duas *picocells*

A média da Eficiência Energética do cenário de duas *picocells* é apresentada na Tabela 7 e na Figura 15.

Tabela 7 – Tabela de Dados Eficiência Energética duas *picocell*

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
1,178	1,321	1,359	1,218	1,767	1,793	1,794	1,361	1,904	2,140	2,453	1,541

Fonte: Própria autoria

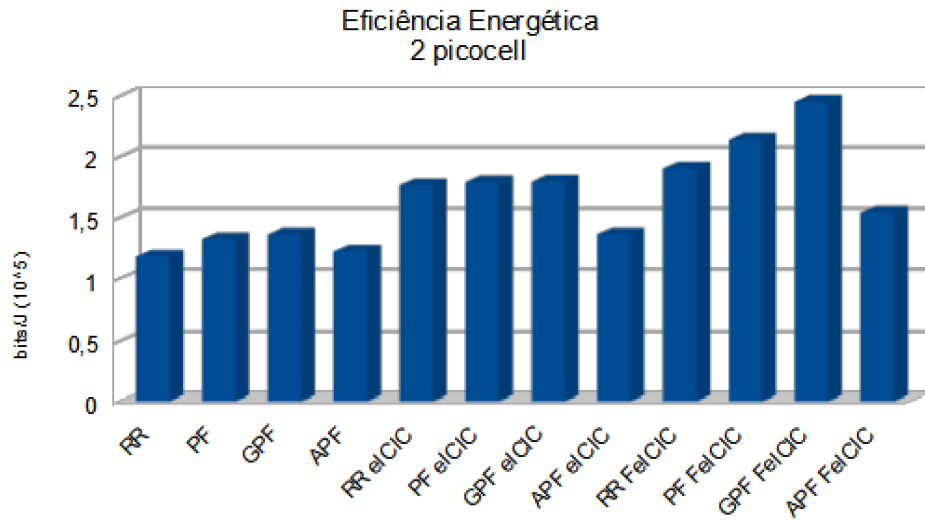


Figura 15 – Gráfico de Eficiência Energética de duas *picocells*

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Energética o escalonador APF, novamente apresenta um desempenho ruim, entretanto, como ocorreu com a eficiência espectral, a diferença para os demais está atenuando conforme o sistema torna-se mais densificado. E nesse cenário de duas *picocells* por célula, os resultados obtidos com as técnicas de coordenação apresentam melhorias na eficiência energética do APF.

#### 3.3.4.4 CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de duas *picocells*

Nessa análise é possível identificar um aumento da vazão em consequência da melhoria da eficiência espectral e energética obtidas pelas técnicas de ICIC. Visto que, nesta densificação de duas *picocells* houve uma melhora tanto na eficiência espectral quanto na energética. Assim, neste cenário a melhora da vazão foi ligeiramente melhor que no sistema anterior, conforme visto pela Figura 16.

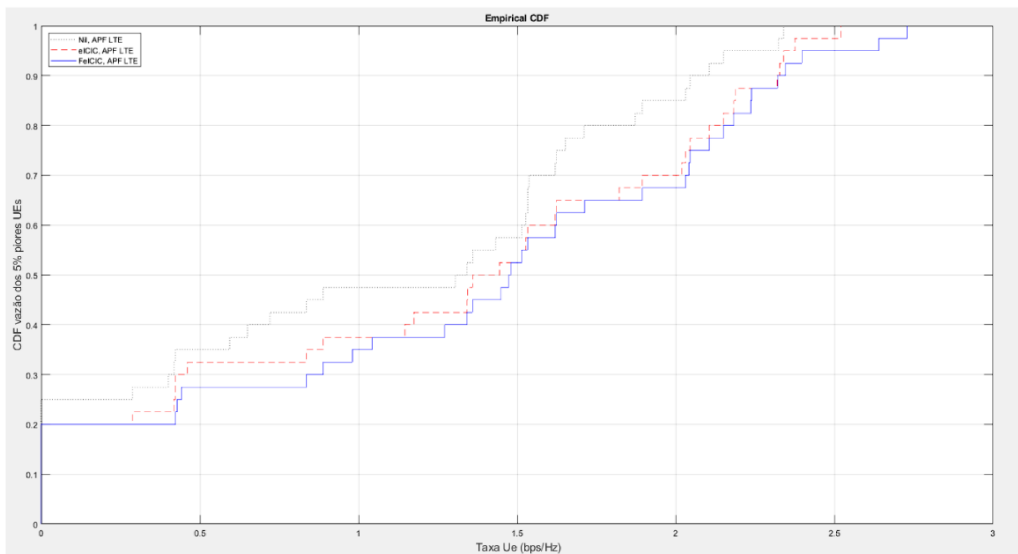


Figura 16 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de duas *pico cells* para o APF

Fonte: Própria autoria

### 3.3.4.5 Comparativo da CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de duas *pico cells* entre os escalonadores RR PF GPF e APF

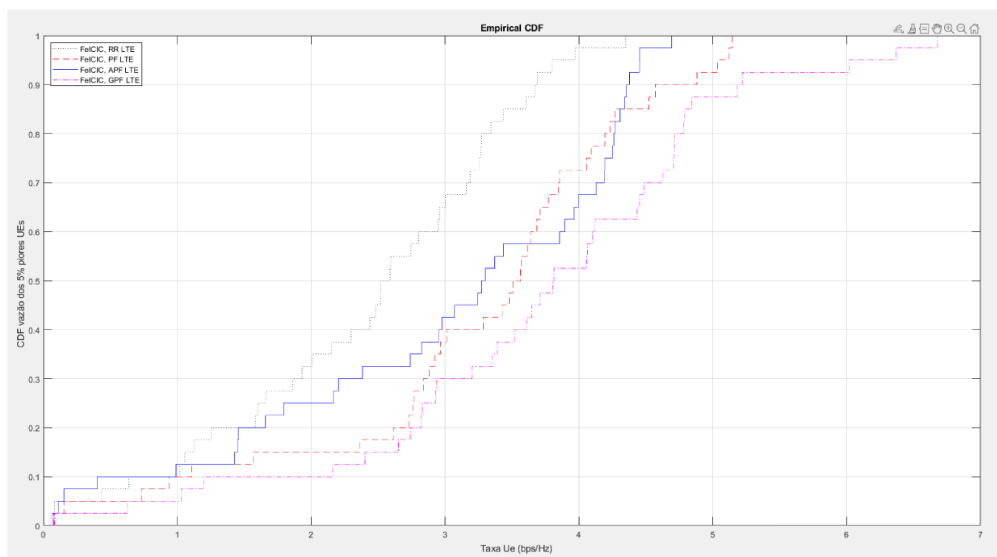


Figura 17 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de duas *pico cells*

Fonte: Própria autoria

Para o cenário de duas *pico cells*, a CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários entre os escalonadores, ainda apresenta uma boa vantagem principalmente ao GPF, entretanto é possível observar uma ligeira melhora na vazão do APF em relação ao PF,

aspecto que não ocorreu no cenário de apenas uma *picocell* no sistema, conforme visto na Figura 17.

### 3.3.5 Cenário: três *picocells*

#### 3.3.5.1 Justiça em cenário de três *picocells*

A média dos índices de justiça do cenário de três *picocells* é apresentada na Tabela 8 e na Figura 18.

Tabela 8 – Tabela de Dados Índice de Justiça três *picocells*

RR	PF	GPF	APF	RR eI- CIC	PF eI- CIC	GPF eI- CIC	APF eI- CIC	RR FeI- CIC	PF FeI- CIC	GPF FeI- CIC	APF FeI- CIC
0,598	0,607	0,560	0,619	0,622	0,637	0,590	0,675	0,645	0,659	0,628	0,702

Fonte: Própria autoria

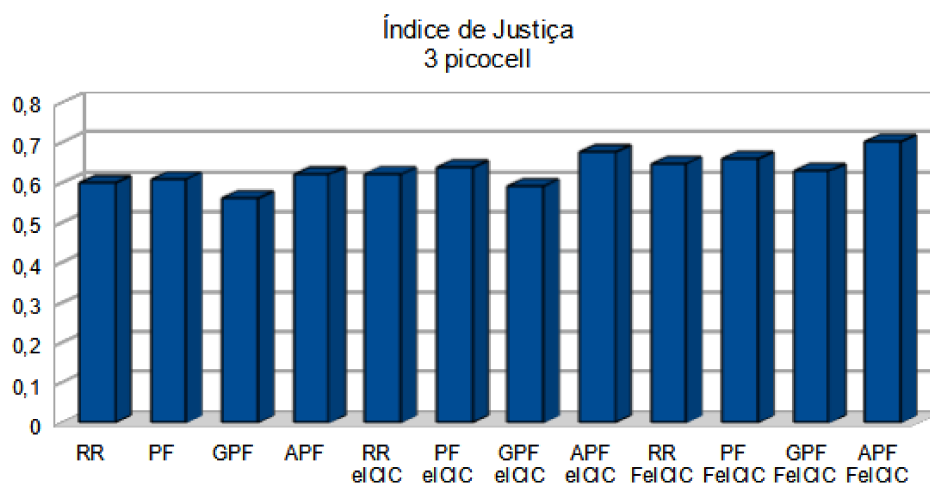


Figura 18 – Gráfico do índice de justiça de três *picocells*

Fonte: Própria autoria

Pelo Gráfico e Tabela é perceptível que o índice de Justiça do Algoritmo APF é ligeiramente maior em todos os cenários. Como dito anteriormente, o APF, a partir desta densificação, apresenta um desempenho melhor em relação ao índice de justiça quando comparado com qualquer escalonador analisado. Mesmo que, de uma densificação menor para uma maior o índice de justiça tende a diminuir para todos os escalonadores, o APF apresentam um bom desempenho, apresentando uma redução na justiça menor que os demais.

### 3.3.5.2 Eficiência Espectral em cenário de três *picocells*

A média da Eficiência Espectral do cenário de três *picocells* é apresentada na Tabela 9 e na Figura 19.

Tabela 9 – Tabela de Dados Eficiência Espectral três *picocells*

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
21,914	26,245	29,418	24,392	24,380	30,966	33,240	26,685	25,881	33,540	37,501	31,910

Fonte: Própria autoria

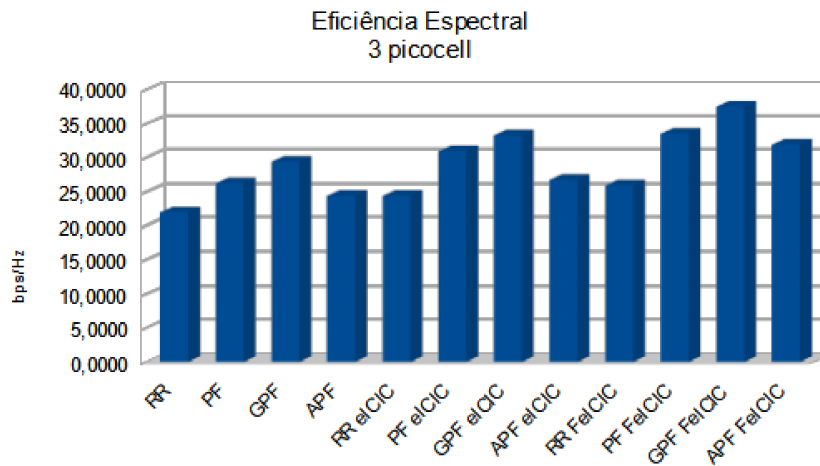


Figura 19 – Gráfico de Eficiência Espectral de três *picocells*

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Espectral o escalonador APF começa a alcançar boas métricas e, novamente, a diferença das eficiências espectrais começam a acentuar ainda mais entre os escalonadores. Principalmente com a aplicação das técnicas eI-CIC e FeI-CIC, onde na ultima técnica o APF apresentou um desempenho superior ao RR.

Com essa diferença nas métricas de desempenho do APF irão se refletir diretamente na vazão, conforme será apresentado posteriormente, a vazão para os piores usuários no cenário com três *picocells* começa a apresentar uma melhora em relação ao PF.

### 3.3.5.3 Eficiência Energética em cenário de três *picocells*

A média da Eficiência Energética do cenário de três *picocells* é apresentada na Tabela 10 e na Figura 20.

Na métrica de eficiência energética o escalonador APF apresenta um comportamento semelhante à métrica de eficiência espectral, na qual, há uma notável melhora na diferença com os demais escalonadores analisados. Outro aspecto interessante para a análise é a melhoria geral das métricas de eficiência energética e espectral para maiores densificações do sistema.

Tabela 10 – Tabela de Dados Eficiência Energética três *picocells*

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
1,364	1,539	1,674	1,383	1,998	2,293	2,422	1,846	2,031	2,652	2,884	2,211

Fonte: Própria autoria

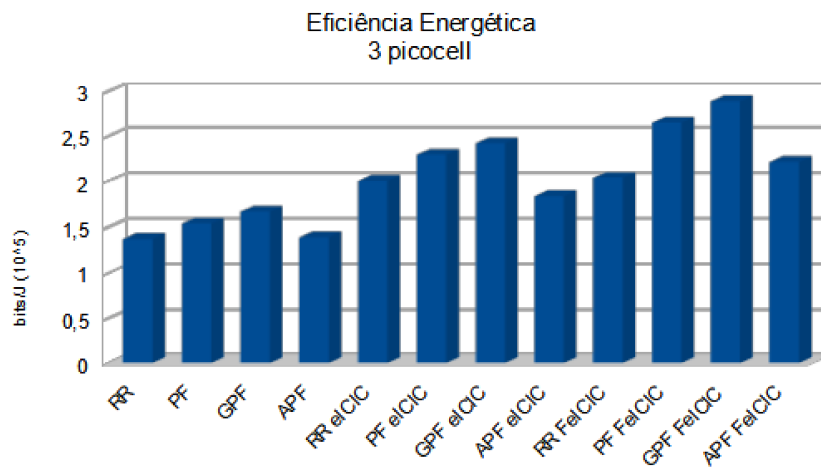


Figura 20 – Gráfico de Eficiência Energética de três *picocells*

Fonte: Própria autoria



### 3.3.5.4 CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de três *picocells*

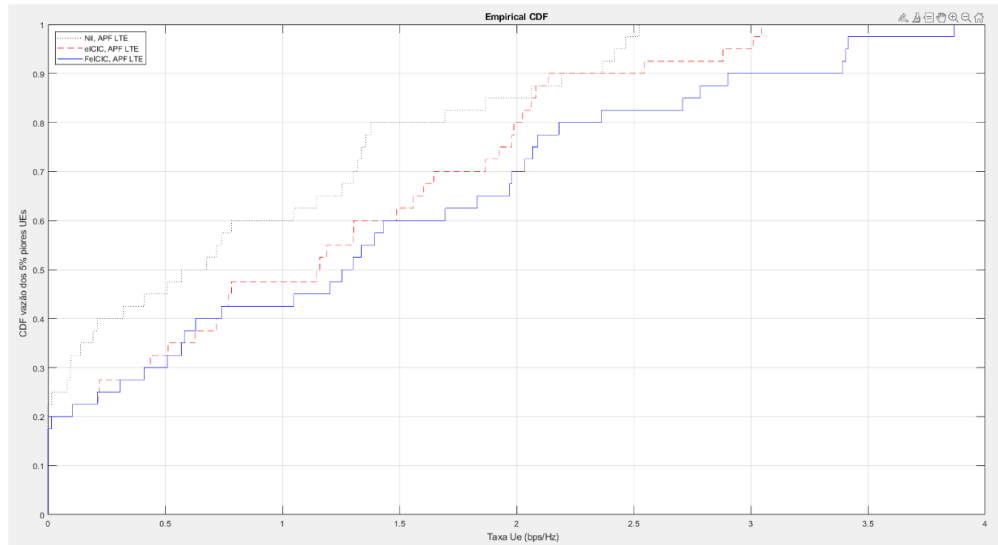


Figura 21 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de três *picocell* para o APF

Fonte: Própria autoria

Nessa análise é possível identificar um aumento da vazão em consequência da melhoria da eficiência espectral e energética obtidas pelas técnicas de ICIC. Além disso, é visível um distanciamento ainda maior da vazão devido principalmente à melhora significativa nas métricas para esse sistema de três *picocells*, como pode ser observado pela Figura 21.

### 3.3.5.5 Comparativo da CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de três *picocells* entre os escalonadores RR PF GPF e APF

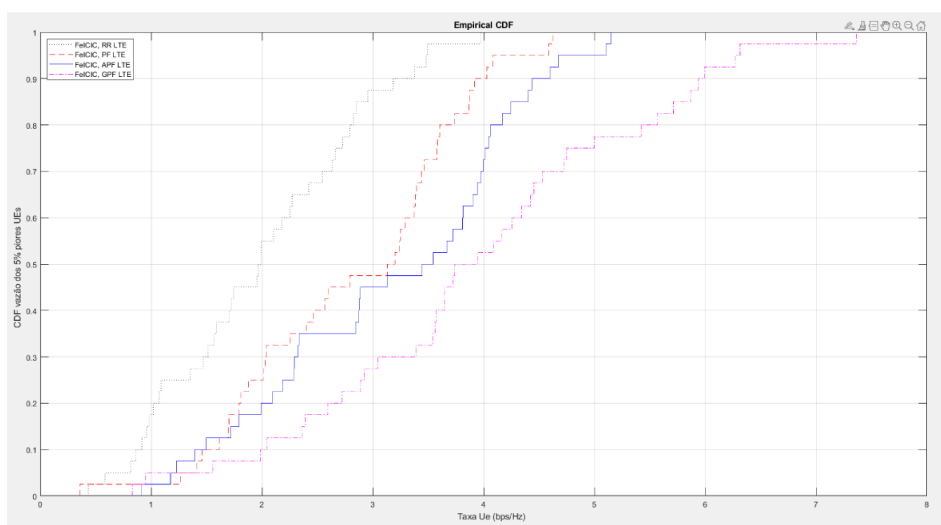


Figura 22 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de três *picocells*

Fonte: Própria autoria

Para o cenário de três *picocells*, a CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários apresenta uma boa melhora para o escalonador APF. Isso pode ser resultado da melhora das demais métricas de desempenho que começam a apresentar bom desempenho em sistemas mais densificados, conforme visto pela Figura 22.

### 3.3.6 Cenário: quatro *picocells*

#### 3.3.6.1 Justiça em cenário de quatro *picocells*

A média dos índices de justiça do cenário de quatro *picocells* é apresentada na Tabela 11 e na Figura 23.

Tabela 11 – Tabela de Dados Índice de Justiça quatro *picocells*

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
0,4854	0,510	0,472	0,524	0,483	0,498	0,478	0,508	0,475	0,498	0,453	0,537

Fonte: Própria autoria

Neste cenário de densificação de quatro *picocells* fica mais evidente a diferença no índice de justiça entre todos os cenários já analisados. De modo geral, o índice de justiça

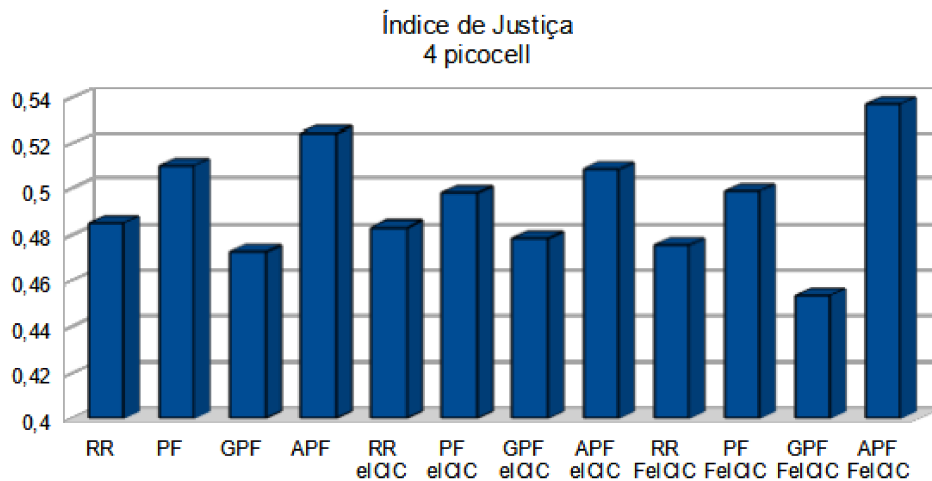


Figura 23 – Gráfico do índice de justiça de quatro *picocells*

Fonte: Própria autoria

de todos os algoritmos teve uma queda se comparado aos anteriores. Contudo, é visível que a atenuação da justiça para o algoritmo APF é bem menor que os demais.

### 3.3.6.2 Eficiência Espectral em cenário de quatro *picocells*

A média da Eficiência Espectral do cenário de quatro *picocells* é apresentada na Tabela 12 e na Figura 24.

Tabela 12 – Tabela de Dados Eficiência Espectral quatro *picocells*

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
26,881	29,207	31,280	27,353	35,729	38,068	39,612	34,526	35,437	42,779	44,414	37,883

Fonte: Própria autoria

Novamente o APF apresenta uma melhora considerável nos valores de eficiência espectral quanto maior a densificação do sistema. Neste cenário os valores do APF aproximam-se bastante com os valores mais altos do PF e do GPF e novamente tem-se o mesmo padrão de melhora nas métricas de desempenho conforme adiciona-se mais *picocells* no sistema.

### 3.3.6.3 Eficiência Energética em cenário de quatro *picocells*

A média da Eficiência Energética do cenário de quatro *picocells* é apresentada na Tabela 13 e na Figura 25.

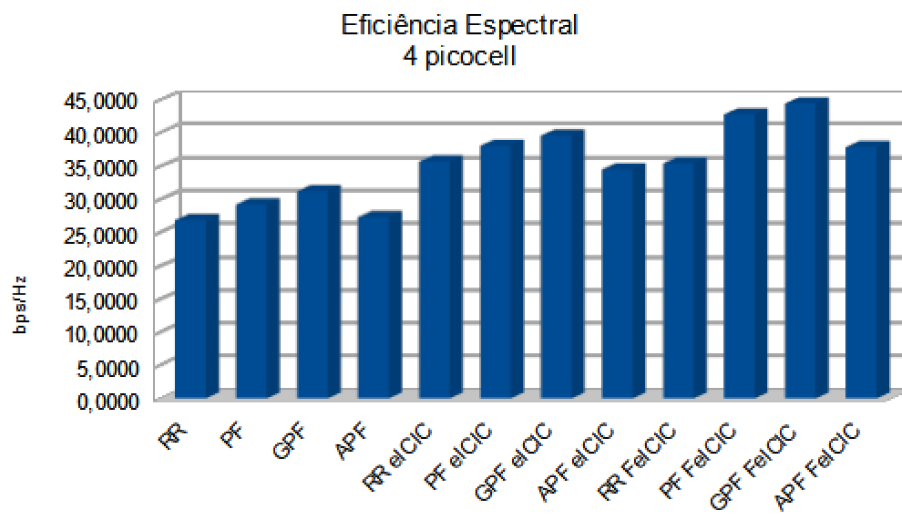


Figura 24 – Gráfico de Eficiência Espectral de quatro *picocells*

Fonte: Própria autoria

Tabela 13 – Tabela de Dados Eficiência Energética quatro *picocells*

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
1,926	2,021	2,096	1,960	3,194	3,293	3,339	2,846	3,375	3,636	3,822	3,398

Fonte: Própria autoria

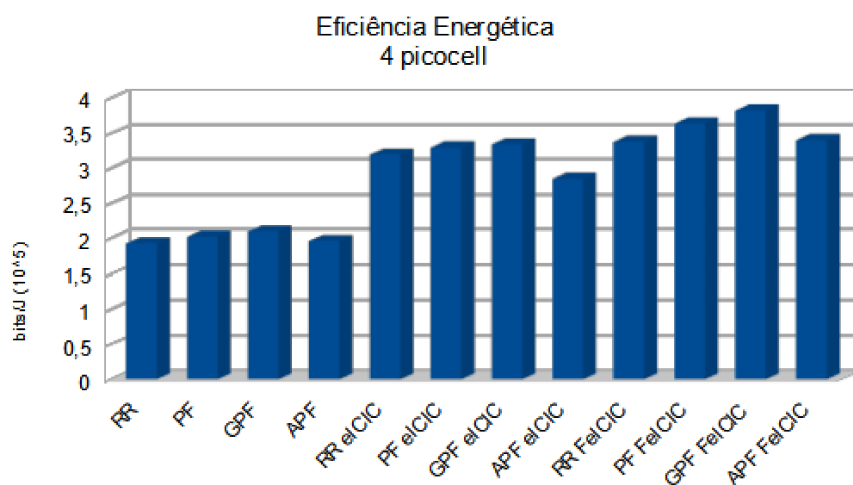


Figura 25 – Gráfico de Eficiência Energética de quatro *picocells*

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Energética, assim como na anterior, o APF aproxima-se ainda mais aos escalonadores PF e GPF. Contribuindo para o que foi dito dos resultados anteriores, a partir do momento em que adiciona-se mais *picocells* por célula no sistema, os resultados tendem a apresentar melhores desempenhos.

#### 3.3.6.4 CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de quatro *picocells*

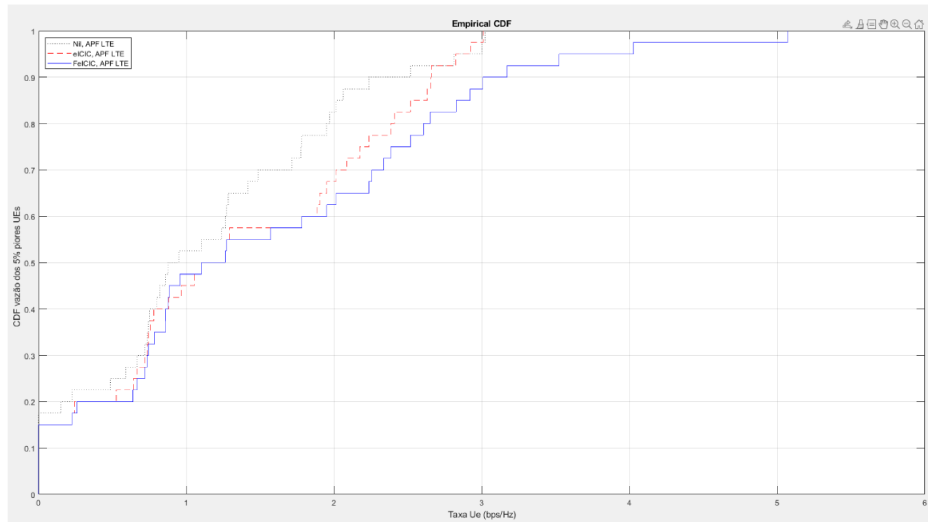


Figura 26 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de quatro *picocells* para o APF

Fonte: Própria autoria

Nessa análise é possível identificar um aumento da vazão em consequência da melhoria da eficiência espectral e energética obtidas pelas técnicas de ICIC, ainda mais para a técnica de FeICIC juntamente com o escalonador APF a medida que são inseridas novas *picocells* no sistema de simulação, conforme visto pela Figura 26.

### 3.3.6.5 Comparativo da CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de quatro *picocells* entre os escalonadores RR PF GPF e APF

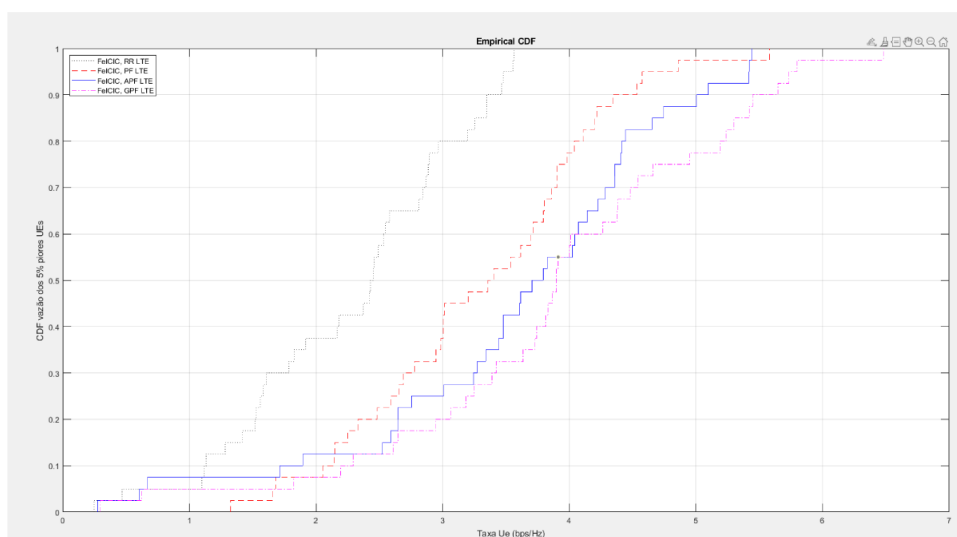


Figura 27 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de quatro *picocells*

Fonte: Própria autoria

Para o cenário de quatro *picocells*, a CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários do escalonador APF aproxima-se em valores para a vazão do GPF, visto, principalmente, pela melhora das demais métricas e da sua justiça que neste cenário teve um significativo desempenho, conforme visto pela Figura 27.

### 3.3.7 Cenário: 10 usuários na HetNet

#### 3.3.7.1 Justiça em cenário de 10 usuários

A média dos índices de justiça do cenário de 10 usuários é apresentada na Tabela 14 e na Figura 28.

Tabela 14 – Tabela de Dados Índice de Justiça 10 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI- CIC	PF eI- CIC	GPF eI- CIC	APF eI- CIC	RR FeI- CIC	PF FeI- CIC	GPF FeI- CIC	APF FeI- CIC
0,6228	0,625	0,577	0,6511	0,699	0,717	0,6617	0,729	0,737	0,750	0,705	0,773

Fonte: Própria autoria

Pelo Gráfico e Tabela é possível notar um leve decréscimo geral no índice de justiça para os escalonadores propostos. Entretanto, é notável o desempenho do APF sobre os

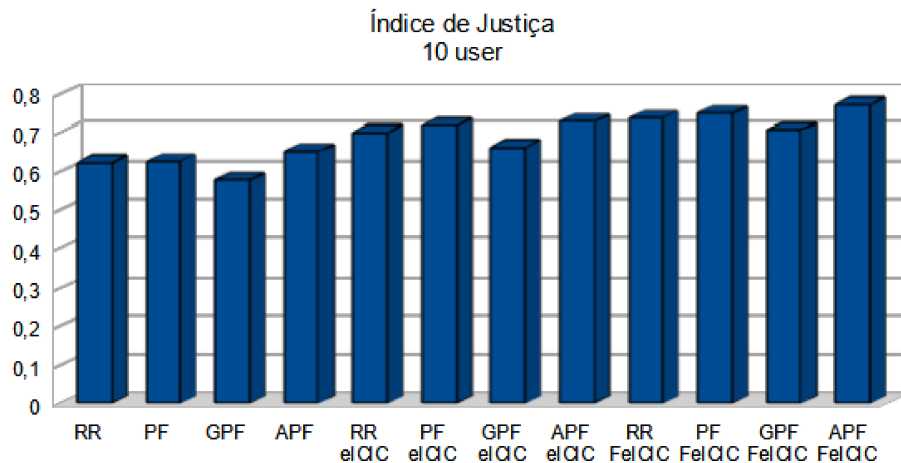


Figura 28 – Gráfico do índice de justiça de 10 usuários

Fonte: Própria autoria

demais quando se comparado com o cenário de 8 usuários visto na seção de 2 *picocells*, uma vez que, neste cenário a diferença aos demais no índice de justiça começa a acentuar-se, conforme poderá ser visto posteriormente.

Entretanto, quando se comparado com o cenário de 8 usuários é possível ver uma leve diferença entre os escalonadores, com o APF acentuando ainda mais a superioridade do APF para a justiça do sistema.

### 3.3.7.2 Eficiência Espectral em cenário de 10 usuários

A média da Eficiência Espectral do cenário de 10 usuários é apresentada na Tabela 15 e na Figura 29.

Tabela 15 – Tabela de Dados Eficiência Espectral 10 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
19,766	22,361	24,164	21,071	26,919	30,470	32,165	27,679	26,0620	29,149	31,617	25,991

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Espectral o escalonador APF apresenta um desempenho similar quanto ao cenário de 8 usuários. Pelo que nota-se a inserção de mais usuários no sistema não gerou uma alteração tão grande para ser notada nas eficiências do sistema uma vez que a alteração de 8 para 10 usuários é uma acréscimo de apenas 25% é razoável concluir que a alteração não é tão significativa.

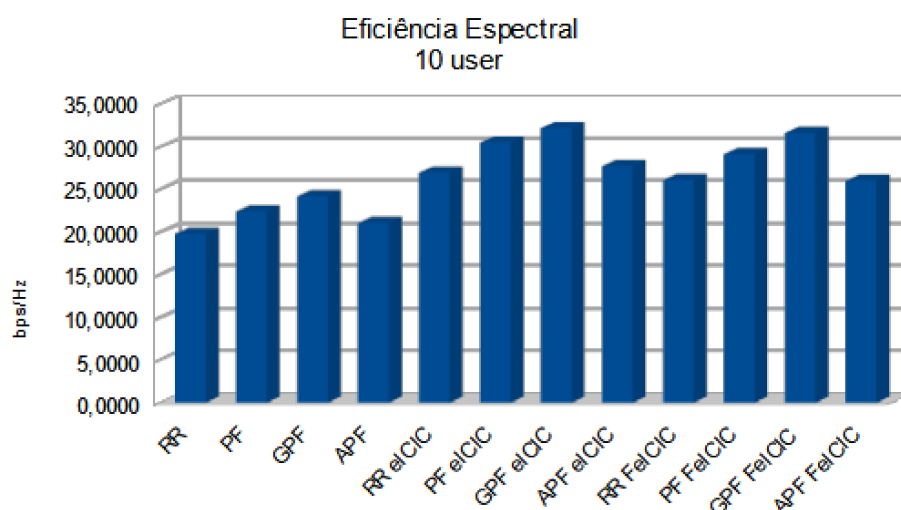


Figura 29 – Gráfico de Eficiência Espectral de 10 usuários

Fonte: Própria autoria

### 3.3.7.3 Eficiência Energética em cenário de 10 usuários

A média da Eficiência Energética do cenário de 10 usuários é apresentada pela Tabela 16 e na Figura 30.

Tabela 16 – Tabela de Dados Eficiência Energética 10 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
1,058	1,215	1,312	1,138	1,806	2,116	2,217	2,060	1,965	2,293	2,363	1,944

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Energética o escalonador APF apresenta um desempenho similar quanto ao cenário de 8 usuários. Pelo que nota-se a inserção de mais usuários no sistema não gerou uma alteração tão grande para ser notada nas eficiências do sistema.

Contudo, posteriormente é possível notar um leve declínio da eficiência espectral e energética quando se adicionam mais usuários, como a alteração de 8 para 10 usuários é uma Acréscimo de apenas 25% é razoável concluir que a alteração não é tão significativa.

### 3.3.7.4 CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de 10 usuários

Nessa análise é possível identificar um afastamento na vazão quando se adiciona mais usuários no sistema, principalmente nas técnicas de coordenação de interferência. De



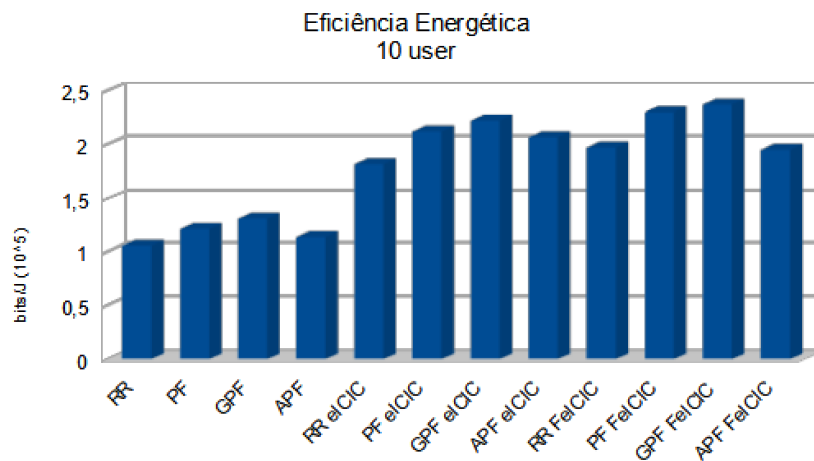


Figura 30 – Gráfico de Eficiência Energética de 10 usuários

Fonte: Própria autoria

acordo com o artigo original (LI et al., 2010) é possível concluir que mesmo com poucos usuários a mais, é notável uma diferença quanto a vazão dos usuários. Mesmo que não haja uma diferença expressiva quanto as demais métricas de eficiência espectral e energética, conforme visto na Figura 31.

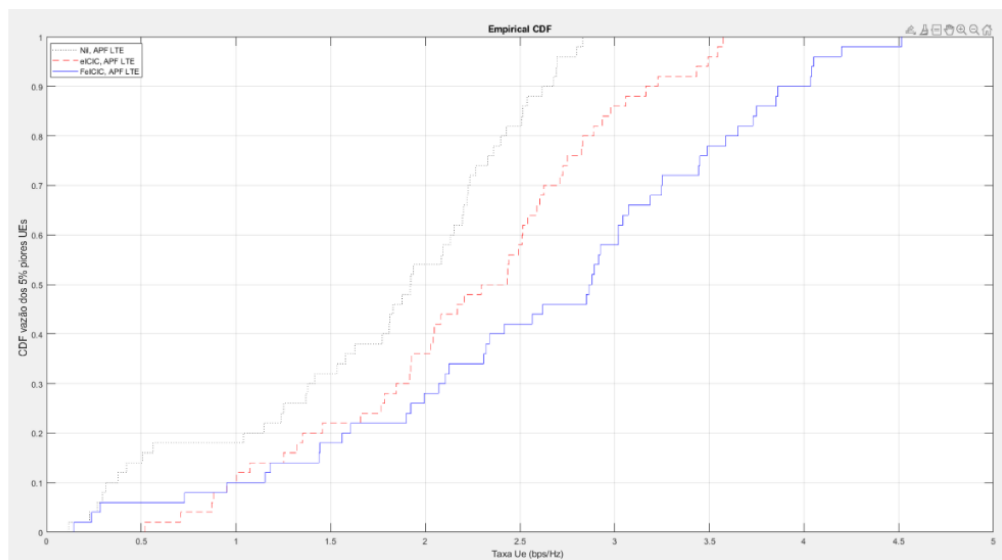


Figura 31 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de 10 usuários para o APF

Fonte: Própria autoria

### 3.3.7.5 Comparativo da CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de 10 usuários entre os escalonadores RR PF GPF e APF

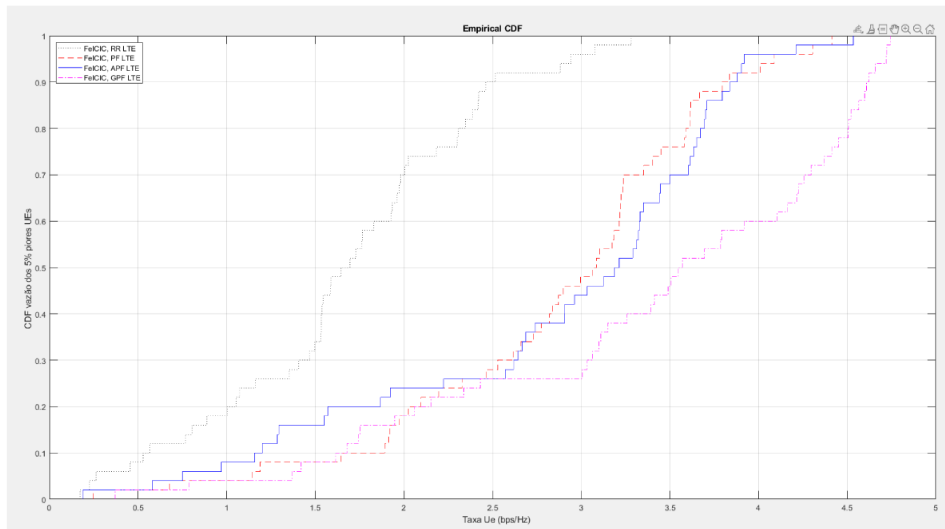


Figura 32 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de 10 usuários

Fonte: Própria autoria

Para o cenário de 10 usuários no sistema, a CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários do escalonador APF melhora sua vazão em relação ao PF. Visto principalmente pela melhora das demais métricas e da sua justiça que neste cenário teve um significativo desempenho, conforme visto pela Figura 32.

### 3.3.8 Cenário: 12 usuários na HetNet

#### 3.3.8.1 Justiça em cenário de 12 usuários

A média dos índices de justiça do cenário de 12 usuários é apresentada na Tabela 17 e na Figura 33.

Tabela 17 – Tabela de Dados Índice de Justiça 12 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
0,5335	0,5371	0,486	0,5801	0,7406	0,713	0,6892	0,7495	0,723	0,7320	0,696	0,772

Fonte: Própria autoria

Pelo Gráfico e Tabela, novamente, é possível notar um leve decréscimo geral no índice de justiça para os escalonadores propostos, com 8 e 10 usuários. Dessa forma, a melhoria

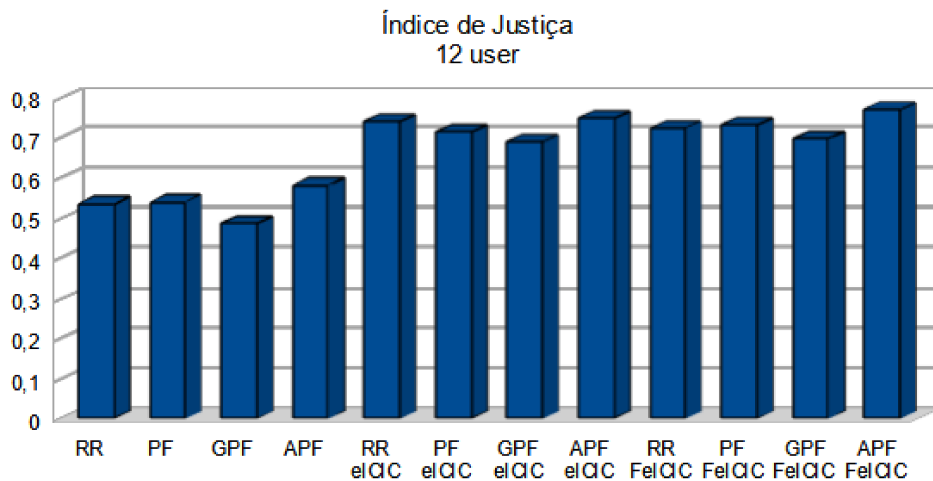


Figura 33 – Gráfico do índice de justiça de 12 usuários

Fonte: Própria autoria

do APF torna-se ainda mais evidente. Como já analisado no cenário anterior, o APF apresenta índices maiores que os demais para o ambiente de 12 usuários.

### 3.3.8.2 Eficiência Espectral em cenário de 12 usuários

A média da Eficiência Espectral do cenário de 12 usuários é apresentada na Tabela 18 e na Figura 34.

Tabela 18 – Tabela de Dados Eficiência Espectral 12 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
19,800	22,210	24,0024	20,783	26,464	28,422	29,609	27,159	22,964	25,851	27,032	24,387

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Espectral o escalonador APF o escalonador ainda não apresenta uma boa performance em relação aos outros escalonadores. Entretanto a diferença das métricas fica menor a medida que vão se adicionando mais usuários. Na técnica FeICIC o escalonador APF apresentou valores melhores que o RR.

Outro ponto importante para a análise são os valores gerais de eficiência que começaram a mudar devido a inserção de mais 50% dos usuários no sistema.

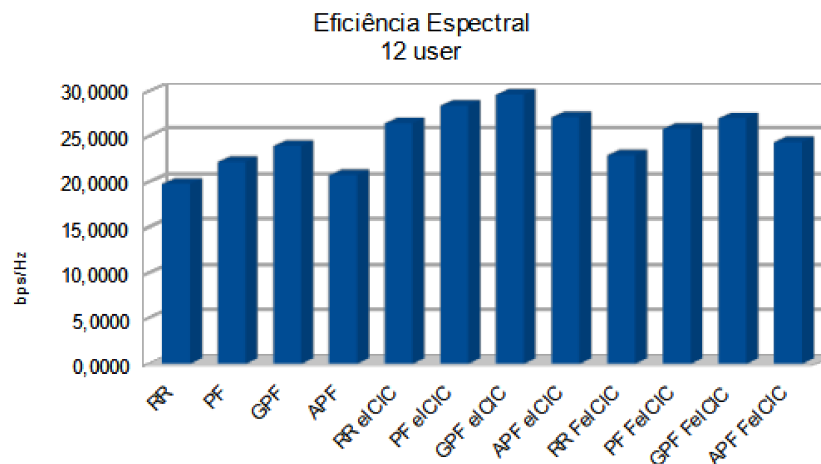


Figura 34 – Gráfico de Eficiência Espectral de 12 usuários

Fonte: Própria autoria

### 3.3.8.3 Eficiência Energética em cenário de 12 usuários

A média da Eficiência Energética do cenário de 12 usuários no sistema é apresentada pela Tabela 19 e na Figura 35.

Tabela 19 – Tabela de Dados Eficiência Energética 12 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
1,0569	1,211	1,295	1,306	1,835	2,044	2,152	1,894	1,757	2,122	2,151	1,887

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Energética o escalonador APF também começou a se aproximar das métricas do PF e GPF ganhando em valor do RR na técnica de coordenação FeI-CIC. Isso irá contribuir principalmente na vazão do sistema como é possível notar na vazão dos 5% piores usuários.

### 3.3.8.4 CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de 12 usuários

Nessa análise é notável um grande afastamento na vazão entre as técnicas de coordenação principalmente no cenário de não utilização de nenhuma técnica para os demais. Dessa forma, nota-se que as técnicas de coordenação ajudam em grande parte na melhoria da transmissão em geral até mesmo para escalonadores que priorizam a justiça em comparação com outras métricas de qualidade do sinal, conforme visto na Figura 36.

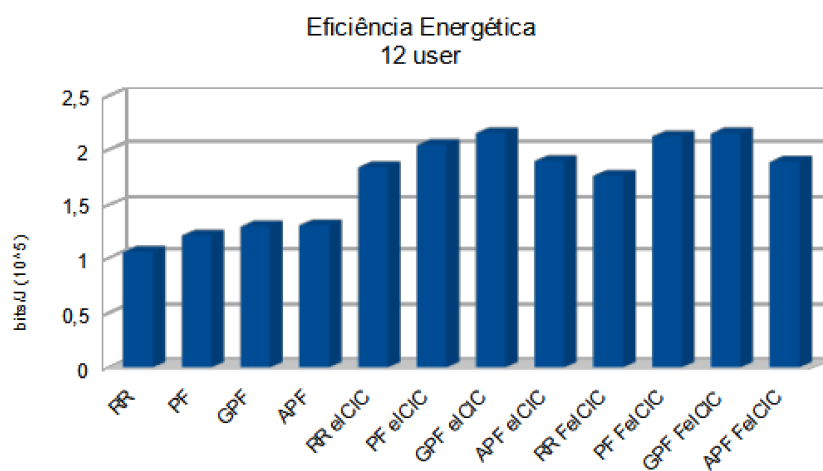


Figura 35 – Gráfico de Eficiência Energética de 12 usuários

Fonte: Própria autoria

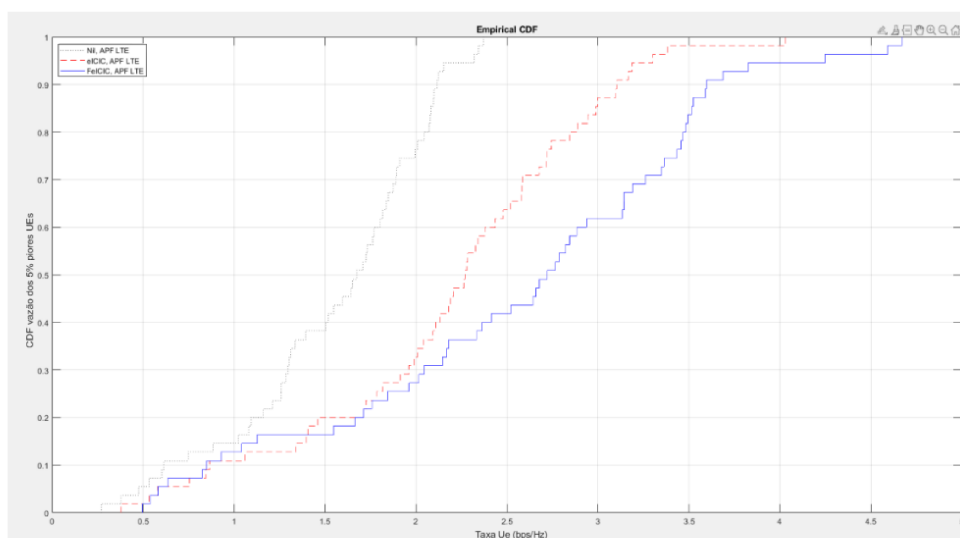


Figura 36 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de 12 usuários para o APF

Fonte: Própria autoria

### 3.3.8.5 Comparativo da CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de 12 usuários entre os escalonadores RR PF GPF e APF

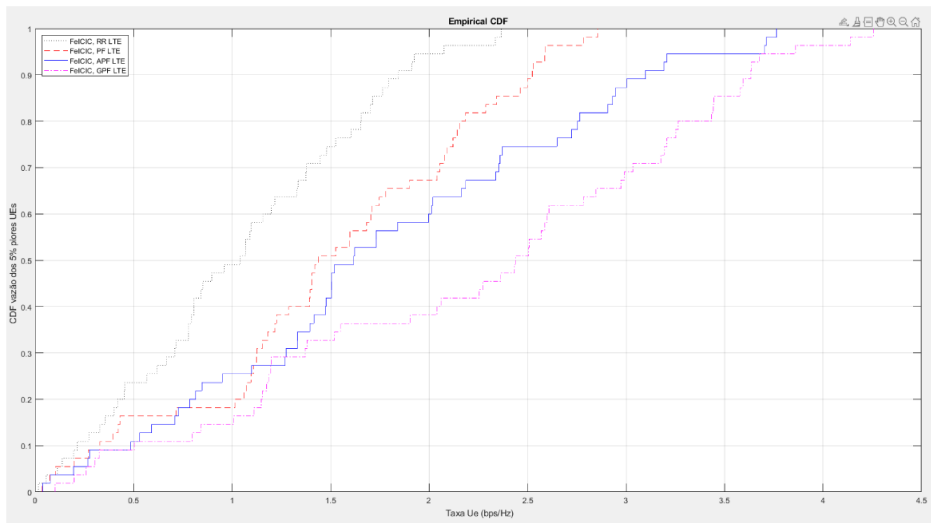


Figura 37 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de 12 usuários

Fonte: Própria autoria

Para o cenário de 12 usuários no sistema, a CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários do escalonador APF aproxima-se mais a vazão do GPF e começa a se distanciar da vazão do PF, conforme visto pela Figura 37.

### 3.3.9 Cenário: 15 usuários na HetNet

#### 3.3.9.1 Justiça em cenário de 15 usuários

A média dos índices de justiça do cenário de 15 usuários é apresentada na Tabela 20 e na Figura 38.

Tabela 20 – Tabela de Dados Índice de Justiça 15 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI- CIC	PF eI- CIC	GPF eI- CIC	APF eI- CIC	RR FeI- CIC	PF FeI- CIC	GPF FeI- CIC	APF FeI- CIC
0,6893	0,6836	0,6134	0,7212	0,8405	0,8143	0,7231	0,8197	0,7048	0,7241	0,647	0,7820

Fonte: Própria autoria

Entre todos os cenários de variação de usuário, este se apresenta mais evidente graficamente, os ganhos de justiça do escalonador APF aos demais, num cenário em que a

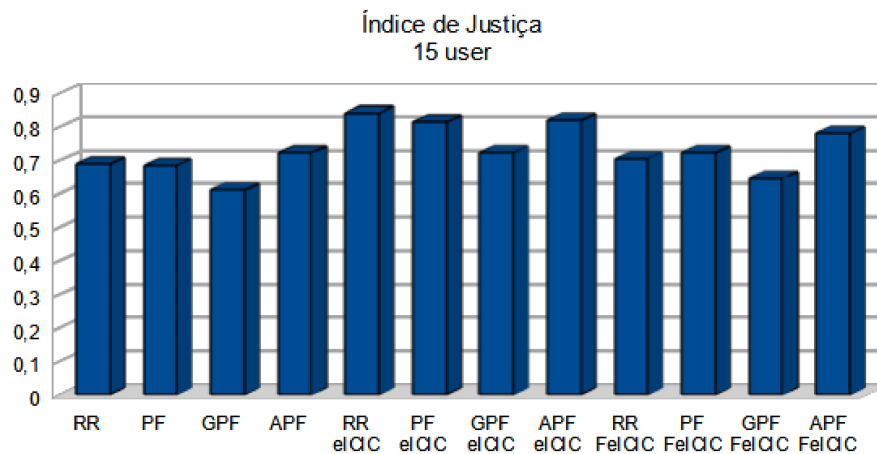


Figura 38 – Gráfico do índice de justiça de 15 usuários

Fonte: Própria autoria

diferença de usuários começa a tornar-se relevante, um vez que, é uma inserção de mais de 87,5%.

Dessa forma, as diferenças gerais no índice de justiça são visíveis principalmente pela forma com que o APF trabalha na sua formula a probabilidade de escalonamento, já que, para um número maior de usuários ativos no sistema a probabilidade de escalonamento tende a se distanciar ainda mais entre os usuários ativos no sistema e isso irá se refletir diretamente na Equação 8 de justiça para o sistema.

### 3.3.9.2 Eficiência Espectral em cenário de 15 usuários

A média da Eficiência Espectral do cenário de 15 usuários é apresentada na Tabela 21 e na Figura 39.

Tabela 21 – Tabela de Dados Eficiência Espectral 15 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
18,661	21,432	22,491	19,940	26,022	28,976	30,192	27,141	20,286	28,310	29,685	26,617

Fonte: Própria autoria

Nesse métrica o padrão do APF permaneceu a mesma. Houve um leve desvio nos valores do RR quanto a técnica FeI-CIC na qual os valores do APF se apresentam bem melhores. Entretanto de maneira geral, o APF ainda é pior em eficiência espectral quando comparado com o PF e o GPF.

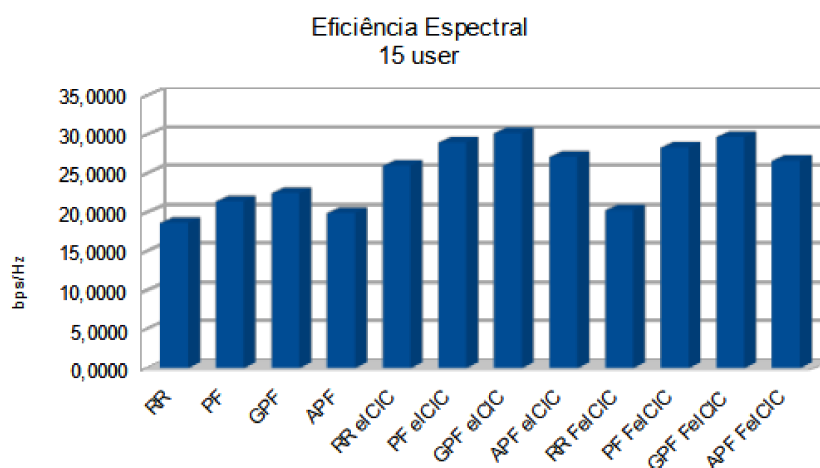


Figura 39 – Gráfico de Eficiência Espectral de 15 usuários

Fonte: Própria autoria

### 3.3.9.3 Eficiência Energética em cenário de 15 usuários

A média da Eficiência Energética do cenário de 15 usuários é apresentada na Tabela 22 e na Figura 40.

Tabela 22 – Tabela de Dados Eficiência Energética 15 usuários

RR	PF	GPF	APF	RR eI-CIC	PF eI-CIC	GPF eI-CIC	APF eI-CIC	RR FeI-CIC	PF FeI-CIC	GPF FeI-CIC	APF FeI-CIC
1,133	1,283	1,398	1,197	1,899	2,110	2,230	2,049	1,870	2,398	2,589	2,493

Fonte: Própria autoria



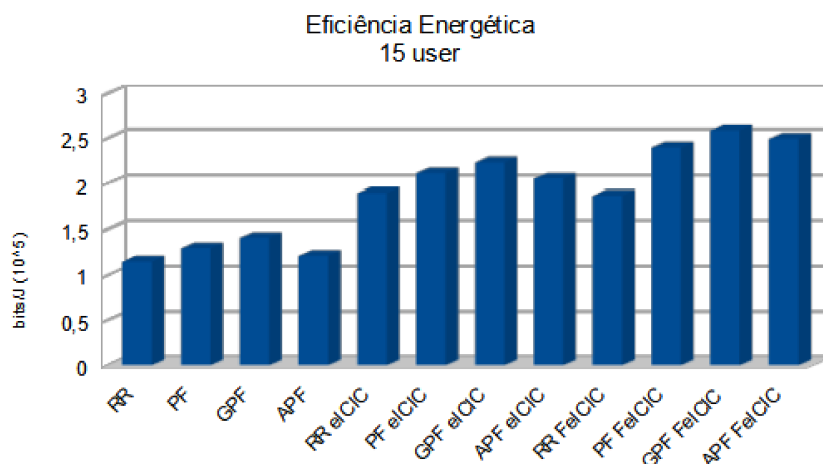


Figura 40 – Gráfico de Eficiência Energética de 15 usuários

Fonte: Própria autoria

Na métrica de Eficiência Energética o escalonador APF apresenta uma melhora significativa nas simulações de ICIC de forma geral. Em relação ao PF e GPF houve uma boa aproximação de valores, entretanto, o APF teve uma pior performance em todos os cenários avaliados em relação a esses dois escalonadores.

#### 3.3.9.4 CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de 15 usuários

Nesse cenário há um bom afastamento das CDFs de todos os cenários, apresentando uma boa performance para a técnica de FeICIC em relação as demais e, principalmente, para a simulação sem nenhuma técnica de coordenação de interferência. É possível afirmar, com base nos valores de eficiência espectral e energética, que isso ocorreu devido a boa integração entre o escalonador APF e as técnicas FeICIC principalmente nos seus valores, conforme visto na Figura 41.

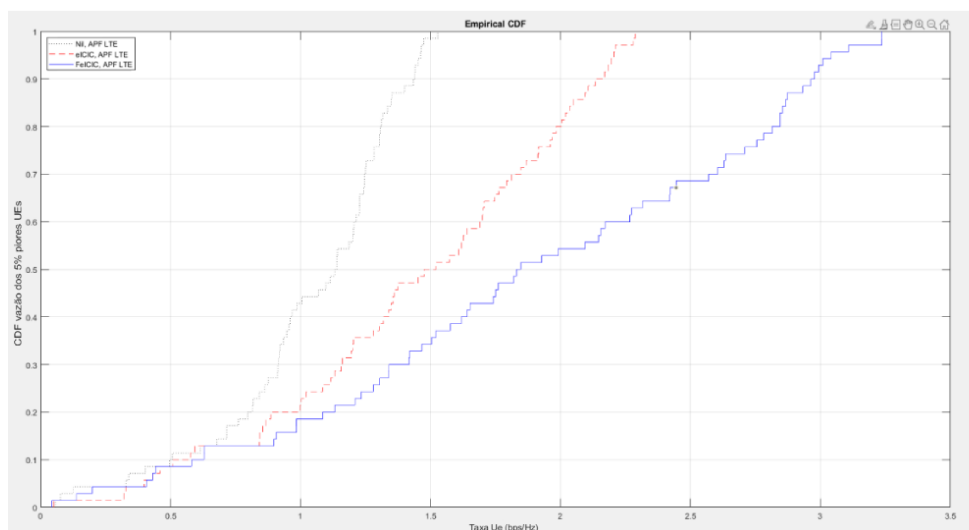


Figura 41 – Gráfico da CDF da vazão para o cenário de 15 usuários para o APF

Fonte: Própria autoria

### 3.3.9.5 Comparativo da CDF da vazão dos 5% piores usuários em cenário de 15 usuários entre os escalonadores RR PF GPF e APF

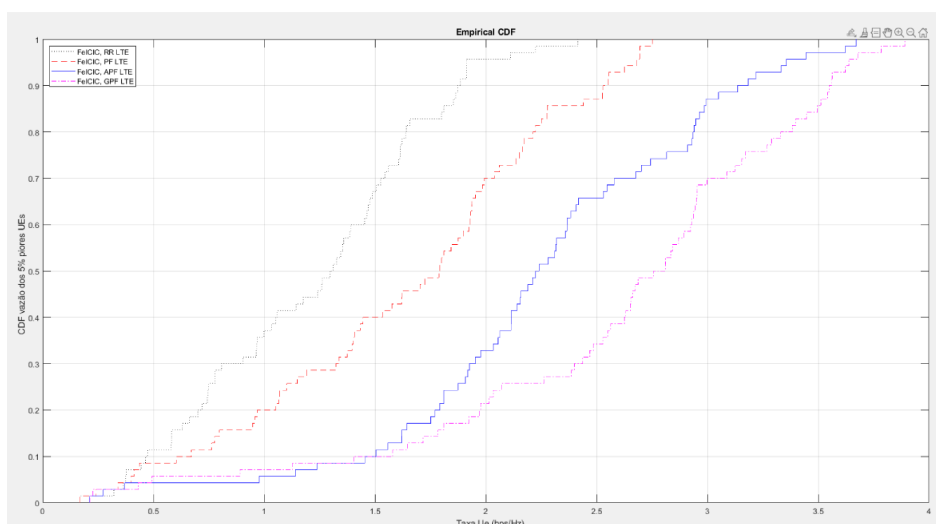


Figura 42 – Gráfico comparativo da CDF para o cenário de 15 usuários

Fonte: Própria autoria

Para o cenário de 15 usuários no sistema, a CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários dos escalonadores apresentam um distanciamento geral entre elas. Entretanto pode-se ver uma boa melhora do APF em relação ao PF, conforme visto pela Figura 42.

## 3.4 Avaliação dos Resultados

Em resumo de todas as avaliações até aqui apresentadas é possível observar que o escalonador proposto por (LI et al., 2010) é muito superior no quesito de justiça na transmissão, apresentando um ganho superior em cenários de vários usuários no sistema e também quanto ao aumento de densificação de *picocells* para uma *macrocell*. Contudo, quanto às métricas de eficiência espectral e energética, foi um dos piores escalonadores analisados.

Isso deve-se principalmente ao foco do escalonador que é uma variação do PF com objetivo principal no aumento das métricas de justiça.

---

## Conclusão

Este capítulo visa apresentar considerações finais a respeito de todas as análises do presente trabalho, apresentando conclusões a partir dos resultados obtidos nas simulações e análises apresentadas anteriormente. Além disso, também são apresentados os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir deste.

### 4.1 Análise Geral

No Capítulo 1 foi introduzido a necessidade de análise dos sistemas de comunicação em geral, devido principalmente às adversidades e desafios que o mundo está passando. No Capítulo 2 nas Seções 2.1 e 2.2, foi introduzido o contexto geral de todas as transformações que as redes passaram até a quarta geração.

O Capítulo 2 forneceu as informações básicas e estudos necessários para compreender minimamente o sistema de objeto de estudo deste trabalho. Assim, na Seção 2.3 as redes LTE-A Heterogêneas foram apresentadas com suas características gerais e na Seção 2.6 os algoritmos de escalonamento, foram contextualizados. Na Seção 2.5 foram apresentadas as técnicas que seriam utilizadas para simulação e, por fim na Seção 2.7 foram apresentados as principais métricas para análise do sistema.

O Capítulo 3 apresentou os experimentos que foram desenvolvidos e sua análise com os resultados obtidos. Dito isso, é possível concluir, com base nas análises até aqui apresentadas, que o algoritmo de escalonamento APF adicionado, se apresenta nos cenários avaliados como uma técnica simples e que mostrou grande eficiência quando implementado em conjunto com a técnica FeICIC, em termos de justiça.

A contribuição do APF não se mostra visível em primeiro momento, já que há uma boa diferença entre as métricas gerais dos outros escalonadores analisados em relação ao APF, nos sistemas mais simples, menos densificados quanto ao número de *picocells* e usuários. Contudo a medida que o sistema torna-se mais densificado seu desempenho começa a se destacar.

Em aditivo, observa-se que a melhora citada é acentuada à medida que se inclui mais usuários no sistema, com o melhoramento dos índices de justiça como já foi observado nos trabalhos de (LI et al., 2010) em relação aos índices de justiça obtidos em (LIU et al., 2017) para o PF e em (ARAMIDE et al., 2017) para o GPF.

Em suma, pode-se afirmar que este escalonador se apresenta como uma boa alternativa para a geração atual e as próximas gerações de comunicações móveis quanto a sistemas que a justiça tenha um foco especial.

## 4.2 Trabalhos Futuros

O sistema ainda pode ser estudado para verificar a utilização de outros escalonadores e fazer comparações com o escalonador analisado por este trabalho. É possível ainda, uma proposta de novos cenários com o mesmo, como também a utilização de outros ambientes de simulação, por meio da alteração de parâmetros seja em topologia da rede ou em uma variação crítica quando ao número de usuários por exemplo. Visto que de acordo com o trabalho de (LIU et al., 2017) o PF apresenta uma boa vantagem quanto mais usuários são inseridos na rede.

---

## Referências

- 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (e-utra) and evolved universal terrestrial radio access network (e-utran); overall description; stage 2. 3GPP, 2009.
- ACHARYA, J.; GAO, L.; GAUR, S. **Heterogeneous Networks in LTE-advanced**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.
- ARAMIDE, S. O. et al. Generalized proportional fair (gpf) scheduler for lte-a. In: **IEEE. 2017 9th Computer Science and Electronic Engineering (CEECE)**. [S.l.], 2017. p. 128–132.
- BERNERS-LEE, T. et al. World-wide web: the information universe. **Internet Research**, MCB UP Ltd, 1992.
- BOUJELBEN, M.; REJEB, S. B.; TABBANE, S. A comparative study of interference coordination schemes for wireless mobile advanced systems. In: **IEEE. The 2014 international symposium on networks, computers and communications**. [S.l.], 2014. p. 1–5.
- BR, N. de Informação e Coordenação do P. **Cresce o uso de Internet durante a pandemia e número de usuários no Brasil chega a 152 milhões, é o que aponta pesquisa do Cetic.br**. 2021. Disponível em: <<https://cetic.br/>>.
- CERF, V.; KAHN, R. A protocol for packet network intercommunication. **IEEE Transactions on Communications**, v. 22, n. 5, p. 637–648, 1974.
- DHILLON, H. S. et al. Modeling and analysis of k-tier downlink heterogeneous cellular networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 30, n. 3, p. 550–560, 2012.
- GLOWNIAK, J. History, structure, and function of the internet. In: **ELSEVIER. Seminars in nuclear medicine**. [S.l.], 1998. v. 28, n. 2, p. 135–144.
- HAMZA, A. S. et al. A survey on inter-cell interference coordination techniques in ofdma-based cellular networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 15, n. 4, p. 1642–1670, 2013.
- HOSSAIN, E. **Heterogeneous wireless access networks: Architectures and protocols**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. v. 129.

- JAIN, R. K. et al. A quantitative measure of fairness and discrimination. **Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, Hudson, MA**, v. 21, 1984.
- JALALI, A.; PADOVANI, R.; PANKAJ, R. Data throughput of cdma-hdr a high efficiency-high data rate personal communication wireless system. In: IEEE. **VTC2000-Spring. 2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37026)**. [S.l.], 2000. v. 3, p. 1854–1858.
- JUNIOR, L. F. D. **Programação Web com Node.Js, Completo, do front-end ao back-end**. [S.l.]: Luiz, 2020. volume 1.
- LI, X. et al. Adaptive pf scheduling algorithm in lte cellular system. In: IEEE. **2010 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)**. [S.l.], 2010. p. 501–504.
- LIU, Y. et al. A game theoretic distributed algorithm for feicic optimization in lte-a hetnets. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, IEEE, v. 25, n. 6, p. 3500–3513, 2017.
- MOREIRA, J.; SILVA, E. R.; GUARDIEIRO, P. R. Técnicas de coordenação de interferência inter-celular para redes heterogêneas no downlink lte-a. In: SBC. **Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. [S.l.], 2019. p. 890–903.
- PAULA, T. D. d.; SOUSA, D. A.; MACIEL, T. F. Estudo do compromisso entre eficiência espectral e justiça na alocação de recursos de rádio. 2017.
- PRADO, M. P. **Um estudo de caracterização e avaliação de critérios de teste estruturais entre os paradigmas procedimental e OO**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.
- PROJECT 3rd G. P. **LTE Long Term Evolution**. 1999. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>.
- SHIN, W. et al. Hierarchical interference alignment for downlink heterogeneous networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 11, n. 12, p. 4549–4559, 2012.
- WU, X. et al. Hybrid lifi and wifi networks: A survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 23, n. 2, p. 1398–1420, 2021.

# Apêndices



## APF Scheduling Algorithm

```

1  % The LTE Adaptive proportional fair scheduling scheme described in "Adaptive pf
    scheduling algorithm in lte cellular system (Xiaowei LI)"
2  % Author: Joao Gabriel Carlos Franca
3  %
4
5  % window: the time window over which fairness is imposed (t_c in the
6  %      reference)
7
8  function [station,UE,AttachList] = APF_scheduler_LTE(station,UE,NumPRB,NoiseDen,
    NoiseFigure,BWperRB,NumTimeSlots,NumFreqSlots>window)
9
10 AttachList = find([UE.attach]==station.NameTag);
11 AvaTimeSlots = sum(station.ABS(1:NumTimeSlots)); % Available subframes (time slots), less
    than or equal to NumTimeSlots due to ABS
12 NumUE = length(AttachList);
13
14 if AvaTimeSlots > 0 && NumUE > 0
15     [UE(AttachList)] = Throughput(station.NameTag,UE(AttachList),NoiseDen,NoiseFigure,
    BWperRB,NumTimeSlots,NumFreqSlots);
16     UEID = [UE(AttachList).ID];
17     allocation = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots);
18     ABSix = find(station.ABS(1:NumTimeSlots) == 0); % The indices of subframes that are
    ABSs
19     T = zeros(NumUE,NumTimeSlots+1); % Long-term average throughput of each user in each
    subframe.
20     % The first column represents the past history, the second column represents the
    first subframe, ...
21     ThroughputProfile = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots,NumUE); % Record the throughput
    of each UE at each PRB
22     for ue = 1:NumUE
23         ThroughputProfile(:, :, ue) = [reshape(UE(AttachList(ue)).ThroughputPerPRB,[
    NumTimeSlots,NumFreqSlots]) '];
24     end
25
26     % Allocate PRB according to (12.2)
27     memory = 0; % This is to avoid unnecessary calculations of T
28     for prb = 1:NumTimeSlots*NumFreqSlots
29         % Find out which subframe it is
30         sf = ceil(prb/NumFreqSlots);
31         if sf ~= memory
32             % Update the long-term average throughput for each UE
33             for ue = 1:NumUE

```

```

34         T(ue, sf+1) = (1-1/window)*T(ue, sf) + 1/window * sum([ allocation(:, sf)==
35             UEID(ue) ].* ThroughputProfile(:, sf, ue));
36     end
37     memory = sf;
38 end
39 if isempty(find(ABSix==sf))
40     % Get UE throughputs on that PRB
41     PRB_ix = [prb prb+cumsum(NumFreqSlots*NumTimeSlots*ones(1, NumUE-1))];
42     throughput = ThroughputProfile(PRB_ix)';
43     % Find out to which UE should this PRB be allocated
44     if ~isempty(find(T(:, sf+1)==0))
45         nonzero_ix = find(T(:, sf+1));
46         throughput(nonzero_ix) = 0;
47         [nouse, ueix] = max(throughput);
48     else
49         [nouse, ueix] = max(throughput./T(:, sf+1));
50     end
51     allocation(prb) = UEID(ueix);
52     % Calculation of APF k and beta
53     if sf<=1
54         throughputInstantaneous(ueix, sf) = sum([ allocation(:, sf)==UEID(ueix)
55             ].* ThroughputProfile(:, sf, ueix));
56         % There is no throughputInstantaneous(ueix, sf - 1) index on MatLab
57         % starts with 1 but the value is 0;
58         % my avaregeThroughput(ueix, sf) is the same of T(ueix, sf);
59         % There is no avaregeThroughput(ueix, sf - 1) index on MatLab starts
60         % with 1 but the value is 0;
61         k(ueix, sf) = (throughputInstantaneous(ueix, sf)-0) / (T(ueix, sf) - 0);
62         betaiT(ueix, sf) = power(k(ueix, sf), sign((k(ueix, sf)-1) * (
63             throughputInstantaneous(ueix, sf) - 0)));
64     else
65         throughputInstantaneous(ueix, sf) = sum([ allocation(:, sf)==UEID(ueix)
66             ].* ThroughputProfile(:, sf, ueix));
67         % my avaregeThroughput(ueix, sf) is the same of T(ueix, sf);
68         k(ueix, sf) = (throughputInstantaneous(ueix, sf) -
69             throughputInstantaneous(ueix, sf-1)) / (T(ueix, sf) - T(ueix, sf-1))
70         ;
71         betaiT(ueix, sf) = power(k(ueix, sf), sign((k(ueix, sf)-1) * (
72             throughputInstantaneous(ueix, sf) - throughputInstantaneous(ueix,
73             sf-1))));
74     end
75     % Update the long-term average throughput with beta APF
76     T(ueix, sf+1) = power((1-1/window)*T(ueix, sf) + 1/window * sum([ allocation(:,
77         sf)==UEID(ueix) ].* ThroughputProfile(:, sf, ueix)), betaiT(ueix, sf));
78 end
79 end
80
81 % Update the allocation patterns in station and UE
82 station.UEinPRB = reshape(allocation', 1, []);
83 for ue = 1:length(AttachList)
84     UE(AttachList(ue)).Allocation = zeros(1, NumPRB);
85     UE(AttachList(ue)).Allocation(find(station.UEinPRB==UEID(ue))) = 1;
86 end
87 end

```