

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

PAULO VITOR COSTA LIMA

**APLICAÇÃO E ESTUDO DE TÉCNICAS DE ESCALONAMENTO E
COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM REDES LTE-A HETEROGÊNEAS**

UBERLÂNDIA
2019

PAULO VITOR COSTA LIMA

**APLICAÇÃO E ESTUDO DE TÉCNICAS DE ESCALONAMENTO E
COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM REDES LTE-A HETEROGÊNEAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial para conclusão do curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus Santa Mônica*.

Orientador: Prof. Dr. Éderson Rosa da Silva

UBERLÂNDIA
2019

Dedico a minha família, minha namorada e meus amigos que sempre me auxiliaram, com quem compartilhei minhas alegrias e dificuldades e ao meu orientador Éderson por toda a colaboração e pelo auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Com o passar dos anos o aumento do número de usuários (UEs (*users equipments*)) se tornou bastante expressivo, e um fato esperado é que esse aumento se torne cada vez mais potencializado. Adicionalmente, o avanço de tecnologias e técnicas empregadas em redes móveis, permite um aumento de eficiência significativo, possibilitando serviços de qualidade para uma grande quantidade de usuários. Atualmente, nas comunicações móveis um fator que merece bastante atenção são as interferências intercelular, principalmente em redes Heterogêneas, e também a questão dos algoritmos de escalonamento, que de fato, contribuem muito para uma maior eficiência da rede o que, conseqüentemente, resulta em uma maior qualidade de serviço entregue ao usuário. Para estudo da importância e impacto desses dois fatores, utilizou-se modelagem e simulação. Neste sentido, dois esquemas de coordenação de interferência são testados e analisados sendo o eICIC e o FeICIC, (*enhanced inter-cell interference coordination* e *further eICIC* respectivamente). Além disso, os algoritmos de escalonamento avaliados são: o RR (*Round Robin*), o PF (*Proportional Fair*) e o GPF (*Generalized Proportional Fair*). Por fim, os resultados das simulações realizadas permitiram a visualização dos benefícios proporcionados pelas técnicas mais elaboradas testadas, a saber, FeICIC e GPF.

Palavras-chave: LTE-A; eICIC; FeICIC; algoritmo de escalonamento; Redes Heterogêneas.

ABSTRACT

Over the years, the increase in the number of users became quite expressive, and one fact was the one that stood out more and more potentialized. In addition, advanced technologies and techniques used in mobile networks, allows a significant increase in speed, enabling quality services for a large number of users. Nowadays, mobile communications are a factor that deserve more attention, such as intercellular interferences, especially in Heterogeneous networks, and also a matter of scheduling algorithms, which in fact contribute a lot to a greater efficiency of the network, consequently results in a Higher quality of service to the user. For the study of the influence and use of two factors, we used modeling and simulation. In this sense, the two interference communication schemes are tested and propagated by eICIC and FeICIC, (better coordination of inter-cell interference and more eICIC respectively). In addition, the scheduling algorithms are evaluated: the RR (Round Robin), the FP (Proportional Fair) and the GPF (Generalized Proportional Fair). Finally, the results of the simulations performed allowed a visualization of the tests provided by the most elaborated techniques tested, to know, FeICIC and GPF.

Keywords: LTE-A; eICIC; FeICIC; scheduling algorithm; Heterogeneous Networks.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ARQUITETURA DE REDE EM COMUM: UMTS E GSM.....	19
FIGURA 2 – MODELO RAN DO UMTS.....	21
FIGURA 3 – TENDÊNCIA DO TRÁFEGO NAS REDES DE TELECOMUNICAÇÕES.....	22
FIGURA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE AS ARQUITETURAS DO LTE COM O UMTS E GSM.....	23
FIGURA 5 – DIVISÃO NO TEMPO E NA FREQUÊNCIA NOS QUADROS DE TRANSMISSÃO DO ENLACE DOWNLINK.....	27
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS NA REDE LTE-A PELO RR.....	32
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS NA REDE LTE-A PELO PF.....	33
FIGURA 8 – EFICIÊNCIA ESPECTRAL EM FUNÇÃO DAS TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA COM UMA <i>PICOCELL</i> POR <i>CÉLULA</i>	43
FIGURA 9 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DAS TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA COM UMA <i>PICOCELL</i> POR <i>CÉLULA</i>	44
FIGURA 10 – A <i>CUMULATIVE DISTRIBUTION FUNCTION (CDF)</i> EM FUNÇÃO DA VAZÃO DOS 5% PIORES USUÁRIOS COM UMA <i>PICOCELL</i> POR <i>CÉLULA</i>	45
FIGURA 11 - CDF EM FUNÇÃO DA VAZÃO DOS 5% PIORES USUÁRIOS DOS ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO UTILIZANDO A TÉCNICA FEICIC COM UMA <i>PICOCELL</i> POR <i>CÉLULA</i>	46
FIGURA 12 – EFICIÊNCIA ESPECTRAL EM FUNÇÃO DAS TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA COM DUAS <i>PICOCELLS</i> POR <i>CÉLULA</i>	48
FIGURA 13 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DAS TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA COM DUAS <i>PICOCELLS</i> POR <i>CÉLULA</i>	49

FIGURA 14 – A <i>CUMULATIVE DISTRIBUTION FUNCTION (CDF)</i> EM FUNÇÃO DA VAZÃO DOS 5% PIORES USUÁRIOS COM DUAS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	50
FIGURA 15 - CDF EM FUNÇÃO DA VAZÃO DOS 5% PIORES USUÁRIOS DOS ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO UTILIZANDO A TÉCNICA FEICIC COM DUAS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	51
FIGURA 16 – EFICIÊNCIA ESPECTRAL EM FUNÇÃO DAS TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA COM TRÊS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	52
FIGURA 17 – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DAS TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA COM TRÊS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	54
FIGURA 18 – A <i>CUMULATIVE DISTRIBUTION FUNCTION (CDF)</i> EM FUNÇÃO DA VAZÃO DOS 5% PIORES USUÁRIOS COM TRÊS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	55
FIGURA 19 - CDF EM FUNÇÃO DA VAZÃO DOS 5% PIORES USUÁRIOS DOS ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO UTILIZANDO A TÉCNICA FEICIC COM TRÊS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	56
FIGURA 20 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DAS QUANTIDADES DE BS POR CÉLULA, UTILIZANDO O FEICIC COMO TÉCNICA DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA.....	57
FIGURA 21 – DIFERENÇA ENTRE OS VALORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PELA QUANTIDADE DE <i>PICOCELL</i> POR CÉLULA.....	58
FIGURA 22 – DIFERENÇA ENTRE OS VALORES DE EFICIÊNCIA ESPECTRAL PELA QUANTIDADE DE <i>PICOCELL</i> POR CÉLULA.....	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – REQUISITOS DO PADRÃO LTE-A.....	24
TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS REDES UMTS E LTE.....	24
TABELA 3 – DISTRIBUIÇÃO DOS RECURSOS NO ESCALONADOR RR.....	31
TABELA 4 – DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS E DOS PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.....	40
TABELA 5 – VALORES DA EFICIÊNCIA ESPECTRAL MEDIDOS EM BPS/HZ COM UMA <i>PICOCELL</i> POR CÉLULA.....	42
TABELA 6 – VALORES DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA MEDIDOS EM BITS/J x 10 ⁵ COM UMA <i>PICOCELL</i> POR CÉLULA.....	44
TABELA 7 – VALORES DA EFICIÊNCIA ESPECTRAL MEDIDOS EM BPS/HZ COM DUAS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	47
TABELA 8 – VALORES DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA MEDIDOS EM BITS/J x 10 ⁵ COM DUAS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	49
TABELA 9 –VALORES DA EFICIÊNCIA ESPECTRAL MEDIDOS EM BPS/HZ COM TRÊS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	52
TABELA 10 – VALORES DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA MEDIDOS EM BITS/J x 10 ⁵ COM TRÊS <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS

2G	-	Segunda Geração
3G	-	Terceira Geração
3GPP	-	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	-	Quarta Geração
ABS	-	<i>Almost Blank Subframe</i>
AMPS	-	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
BSC	-	<i>Base Station Controller</i>
BTS	-	<i>Base Transceiver Station</i>
CRE	-	<i>Cell Range Extension</i>
CS	-	<i>Circuit Switched</i>
eICIC	-	<i>Enhanced Inter-Cell Interference Coordination</i>
EPC	-	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	-	<i>Evolved Packet System</i>
E-UTRAN	-	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
FeICIC	-	<i>Further Enhanced Inter-Cell Interference Coordination</i>
GERAN	-	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>
GPF	-	<i>Generalized Proportional Fair</i>
GSM	-	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IMT-Advanced	-	<i>International Mobile Telecommunications-Advanced</i>
ITU	-	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE-A	-	<i>Long Term Evolution-Advanced</i>
OFDM	-	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	-	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>

PDNs	-	<i>Packet Data Networks</i>
PDSCH	-	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PF	-	<i>Proportional Fair</i>
PS	-	<i>Packet Switched</i>
PSTN	-	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QoS	-	<i>Quality of Service</i>
RAN	-	<i>Radio Access Network</i>
RB	-	<i>Resource Block</i>
RNC	-	<i>Radio Network Controller</i>
RP- ABSs	-	<i>Reduced Power Almost Blank Subframes</i>
RR	-	<i>Round Robin</i>
UE	-	<i>User Equipment</i>
UMTS	-	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
VoIP	-	<i>Voice over IP</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 REDES LTE-A HETEROGÊNEAS.....	18
2.1.1 Arquitetura de redes UMTS e GSM – <i>Core Network, Radio Access Network</i> e Diferenças.....	18
2.1.2 Surgimento do LTE.....	21
2.1.3 Enlace <i>Downlink</i> do LTE.....	26
2.2 TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA.....	28
2.2.1 eICIC.....	29
2.2.2 FeICIC.....	30
2.3 TÉCNICAS DE ESCALONAMENTO.....	30
2.3.1 <i>Round Robin</i>	31
2.3.2 <i>Proportional Fair</i>	32
2.3.3 <i>Generalized Proportional Fair</i>	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 MÉTODOS DE PESQUISA.....	36
3.2 MATERIAL DE PESQUISA.....	37
3.2.1 Métricas de Desempenho.....	38
3.2.2 Parâmetros de Simulação.....	40
3.2.2.1 Técnicas Avaliadas.....	40
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 CENÁRIO 1.....	42
4.1.1 Eficiência Espectral com uma <i>picocell</i> por célula.....	42
4.1.2 Eficiência Energética com uma <i>picocell</i> por célula.....	44
4.1.3 Vazão dos 5% piores usuários com uma <i>picocell</i> por célula.....	45
4.2 CENÁRIO 2.....	47
4.2.1 Eficiência Espectral com duas <i>picocells</i> por célula.....	47
4.2.2 Eficiência Energética com duas <i>picocells</i> por célula.....	49

4.2.3 Vazão dos 5% piores usuários com duas <i>picocells</i> por célula.....	50
4.3 CENÁRIO 3.....	52
4.3.1 Eficiência Espectral com três <i>picocells</i> por célula.....	52
4.3.2 Eficiência Energética com três <i>picocells</i> por célula.....	53
4.3.3 Vazão dos 5% piores usuários com três <i>picocells</i> por célula	54
4.4 COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS COM O AUMENTO DO NÚMERO DE <i>PICOCELLS</i> POR CÉLULA.....	57
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	60
5.1 CONCLUSÕES.....	60
5.2 TRABALHOS FUTUROS.....	60
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE 1.....	63

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das tecnologias e a tendência cada vez maior de se romper barreiras geográficas, é notável a necessidade de estabelecer a comunicação entre os seres humanos desde locais próximos um do outro, como também com os lugares mais diversos do globo. Com o desenvolvimento das comunicações foi possível uma maior proximidade com relação as pessoas, pois se tornou algo rotineiro manter o contato, mesmo que estando em lugares que não possibilitavam isso no passado. Atualmente, uma pessoa, mesmo em movimento, em uma rodovia por exemplo, é capaz de se comunicar normalmente com quem quer que seja; além também de conseguir navegar na internet tranquilamente. Com o desenvolvimento das tecnologias a necessidade por serviços ligados a comunicação foi crescendo cada vez mais, e com isso a exigência para uma maior qualidade na entrega deste serviço.

O mundo hoje é servido com uma grande diversidade de meios de transmissão e propagação, em que pode-se citar como exemplo: comunicações via satélite, propagação por linhas de transmissão, comunicações via fibra óptica, transmissões via rádio, dentre outras. Com o passar dos anos cada sistema foi se desenvolvendo à medida que a demanda crescia, uns de forma mais acelerada, isso devido a maior viabilidade de alguns sistemas em vista de outros. No caso das comunicações móveis é notável o impacto da tecnologia no dia a dia das pessoas nos últimos anos. Com o decorrer do seu desenvolvimento, as comunicações se tornaram cada vez mais práticas e possíveis de se estabelecer. No âmbito do acesso móvel esse desenvolvimento se torna mais rápido a cada ano que se passa, como se fosse uma corrida tecnológica, com o intuito de entregar com maior qualidade e ofertar primeiro a próxima geração móvel para o celular.

É possível notar o nível de evolução das redes móveis pelo passar dos anos e o quão rápido foi o seu desenvolvimento pelo início da Primeira Geração e chegando até hoje, em que já se fala e realiza-se testes com relação a Quinta Geração. Em 1990 deu-se o início da Primeira Geração do celular, com o sistema *AMPS (Advanced Mobile Phone System)* que foi o mais popularizado, em que se baseava somente no tráfego de voz. Por volta de 1997 veio a Segunda Geração, em que se teve o início dos serviços digitais dando ao sistema uma maior eficiência quando comparado com a Primeira Geração, além de ofertar agora não apenas o tráfego de voz, mas também dados. O sistema mais popular foi o *GSM (Global System for Mobile Communications)*.

Vale ressaltar que a evolução das redes móveis não ficou restrita as gerações em si, de forma que, no período entre uma geração e outra, houve diversos aperfeiçoamentos até se chegar nas especificações daquela determinada geração. Por volta de 2003, foi instaurada a Terceira Geração, ofertando serviços até então impossíveis de se atingir com as gerações anteriores, como: alta qualidade de conteúdo de multimídia móvel, *streaming* de vídeo HD, jogos online, vídeo ao vivo, rede social, troca de arquivos peer2peer, dentre outros, de forma que o sistema mais utilizado foi o UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*). Para a evolução das gerações do acesso móvel, foram elaboradas diversas técnicas tanto de modulação quanto de codificação, buscando sempre otimizar a utilização do espectro, assim como, usá-lo de maneira mais eficiente com o intuito de aperfeiçoar cada vez mais os serviços oferecidos ao usuário. Com a implantação do 4G pelas operadoras, utilizando a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) houve um grande avanço no que diz respeito as velocidades atingidas pelos dispositivos móveis, com taxas acima de 200Mbps, representando uma grande evolução com relação a Terceira Geração, chegando ao Brasil por volta de 2013.

Além disso, para auxiliar a crescente demanda por parte dos usuários, surgiram 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*. As redes heterogêneas são formadas com o intuito de estabelecer a diversificação celular. A diversidade da rede é importante por apresentar-se com um elemento que garante uma maior cobertura do sistema, podendo assim atender a crescente demanda de dados móveis de maneira eficiente. As redes heterogêneas são vantajosas por obterem um excelente aproveitamento do uso do espectro de frequência, além de cobrir eficientemente os UE (*user equipamnt*). Porém um fator que deve ser levado em consideração é o cenário de interferência inter-celular, que é bastante crítico em redes heterogêneas, justamente pela suas proximidades entre as estações. As técnicas de coordenação de interferência, juntamente com os algoritmos de escalonamento são responsáveis por tratar esse limitante tendo em vista a alocação de recursos de maneira adequada, justa e eficiente feita pelos escalonadores e ao mesmo tempo as tratativas com relação as interferências por meio das técnicas de coordenação de interferências, tornando assim o sistema ainda mais adequado.

As redes atuais, com foco nas chamadas redes heterogêneas, possuem diversos desafios para acompanhar o aumento da demanda por parte dos usuários e fornecer uma qualidade de serviço (QoS) para as aplicações. Nos últimos anos têm-se

notado o crescimento cada vez maior do tráfego de dados móveis e, para acompanhar essa tendência, surge a necessidade de novas estratégias para que as redes celulares atendam esse aumento da demanda com qualidade e confiabilidade. Um dos problemas específicos que são tratados diz respeito a interferência inter-celular em redes heterogêneas, que por meio de técnicas de coordenação de interferência seu impacto é diminuído significativamente ao passo que em conjunto com os algoritmos de escalonamento consegue-se estabelecer uma alocação mais adequada dos recursos da rede.

Ao longo do trabalho são apresentadas algumas técnicas de escalonamento, além da modificação do algoritmo de escalonamento PF (*Proportional Fair*) seguindo a referência [11], chamado de GPF (*Generalized Proportional Fair*) e duas técnicas de coordenação de interferência (eICIC e FeICIC). O objetivo inicial foi o estudo e compreensão de técnicas de coordenação de interferência e a sua integração com os algoritmos de escalonamento em redes LTE-A, seguindo a abordagem apresentada em [16]. Como contribuição o presente trabalho visa inserir um algoritmo de escalonamento simples (o GPF), mas mais eficiente do que os básicos testados no artigo referenciado [1], tomados como base deste trabalho, e comparar os resultados em diferentes cenários. Os resultados foram gerados por meio de simulações, com o intuito de realização de testes e análise dos diferentes resultados.

1.1 MOTIVAÇÃO

O presente trabalho consiste na análise do código base e resultados apresentados na publicação [1], além de realizações de simulações de uma rede LTE-A heterogênea, utilizando o software MatLab. O seu desenvolvimento foi motivado pela possibilidade de análise de problemas importantes enfrentados nas redes atuais, além de avaliar possíveis implementações que possam vir a tornar o sistema mais eficiente para determinados serviços.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho tem como principal objetivo o estudo e, conseqüentemente, uma maior experiência com técnicas de escalonamento e coordenação de interferência para redes heterogêneas LTE-A. Para enriquecimento da análise, implementou-se uma modificação em um algoritmo de escalonamento bem conhecido, a saber, o PF (*Proportional Fair*) resultando no GPF (*Generalized Proportional Fair*). Além disso, objetivou-se estudar as vantagens encontradas na proposta original do GPF [11] em redes LTE-A heterogêneas e atuação conjunta com técnicas de coordenação de interferência.

Além disso, realiza-se uma avaliação das técnicas considerando diferentes quantidades de *pico cells* por célula. Ao fim das simulações analisa-se quais as melhores técnicas tanto de coordenação de interferência como de escalonamento, de maneira que ilustre bem quais os esquemas que em conjunto ofertam a rede um serviço mais eficiente ao usuário.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho em questão está organizado conforme descrição a seguir. No Capítulo 2 têm-se a Fundamentação teórica, com os principais conceitos básicos acerca do tema, como redes LTE-A Heterogêneas, técnicas de coordenação de interferência, técnicas de escalonamento, dentre outros conceitos que são importantes para o embasamento teórico acerca do assunto tratado. O Capítulo 3 refere-se ao objeto de estudo deste trabalho, desde o código e também o software utilizado para as simulações,

além de todo o ambiente estudado criado para a simulação e métodos utilizados para a geração dos resultados; no Capítulo 4 são apresentados e detalhados os resultados obtidos por meio das simulações em diferentes cenários; no Capítulo 5 tem-se as conclusões acerca do trabalho ao todo, bem como as observações e comparações a respeito dos resultados obtidos, além de informar as contribuições do trabalho com relação ao sistema no geral e também a possibilidade de trabalhos futuros a partir do tema abordado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para que se possa compreender o que diz respeito às técnicas de escalonamento e de coordenação de interferência, é necessário, primeiramente, entender e adquirir um conhecimento básico sobre o sistema na qual elas vão estar inseridas, no caso as redes LTE-A heterogêneas. Ao longo deste capítulo, são descritos os aspectos gerais desses conceitos básicos presentes no sistema de análise, a fim de contextualizar o assunto tratado.

2.1 REDES LTE-A HETEROGÊNEAS

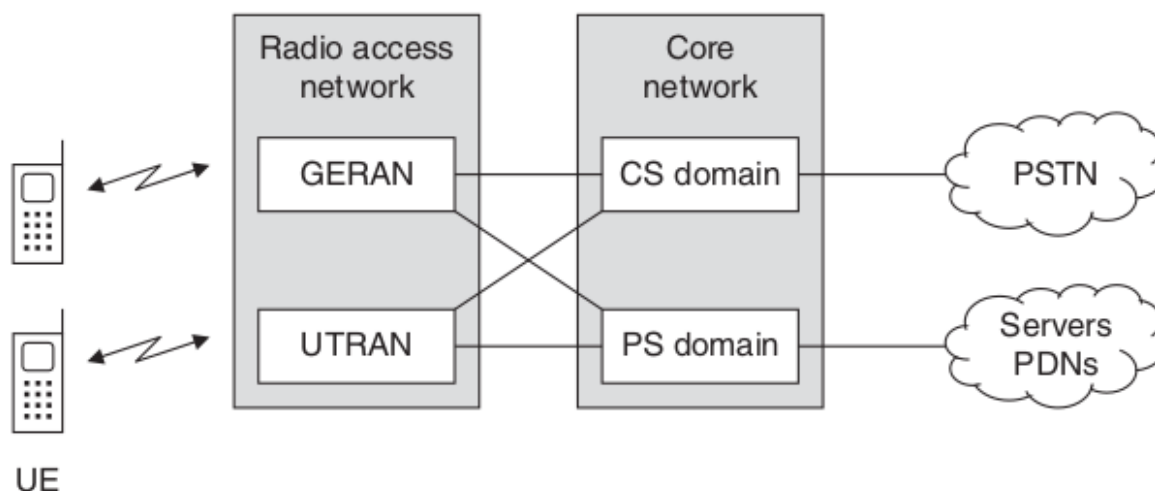
As redes LTE-A (*Long Term Evolution-Advanced*) se referem a quarta geração das redes celulares, estabelecendo uma grande evolução e mudança no cenário das comunicações móveis, levando o mesmo para um novo patamar. O sistema LTE foi projetado por uma colaboração de padrões nacionais e regionais de telecomunicações, conhecido como *The Third Generation Partnership Project* (3GPP). O LTE é um sistema desenvolvido a partir da tecnologia do 3GPP, que ficou conhecida como *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS), que foi uma evolução do chamado *Global System for Mobile Communications* (GSM). Para entender com mais detalhes a respeito da rede LTE-A, é necessário se ter uma visão geral com relação a arquitetura das redes de terceira e segunda geração.

2.1.1 Arquitetura das redes UMTS e GSM – *Core Network, Radio Access Network* e Diferenças

As redes UMTS e GSM compartilham de uma arquitetura de rede em comum, como mostrado na Figura 1.

Os três componentes principais da arquitetura de rede no UMTS e no GSM são: *Core Network, The Radio Access Network* e *The Mobile Phone*.

Figura 1: Arquitetura de rede em comum: UMTS e GSM



FONTE: Retirado de [3]

No *Core Network* são observados dois domínios, no caso o CS (*circuit switched*) e o PS (*packet switched*). O domínio CS funciona de maneira semelhante a uma linha tradicional de um sistema de telecomunicações, de forma que, estabelece e transfere ligações telefônicas para toda a região geográfica na qual a rede possui cobertura. A mesma estabelece comunicação com a PSTN (*public switched telephone network*), dessa forma, os usuários podem estabelecer comunicação com telefones fixos, além de permitir a interação com os operadores de outras redes. O domínio PS transmite os fluxos de dados, como páginas web, e-mails, entre os usuários e as PDNs (*packet data networks*).

Os dois domínios transportam suas informações de duas maneiras diferentes. O domínio CS utiliza a técnica conhecida como comutação de circuitos (*circuit switching*), na qual é baseada em uma conexão bidirecional individual para cada ligação telefônica, de forma que é possível transmitir a informação com uma taxa constante de dados e um *delay* mínimo. O domínio PS utiliza uma técnica diferente, conhecida como comutação de pacotes (*packet switching*). Nessa técnica, o fluxo de dados é dividido em pacotes, de forma que, cada um contém as suas marcações de origem e destino. Nessas redes, os roteadores interpretam a etiqueta de endereço, incluída nos pacotes, e os direciona para seus respectivos destinos. Os recursos da rede são compartilhados com todos os usuários, fazendo com que essa técnica seja mais eficiente com relação a comutação de circuitos, que reserva todo o canal para apenas alguns usuários ao longo da duração da

chamada. Ao passo que, com a técnica PS, o *delay* pode variar muito, de forma que, dependerá da quantidade de usuários que desejam transmitir em um dado momento.

Dessa forma, é mostrado uma visão geral com relação ao *core network* das redes UMTS e GSM, compartilhando de um esquema em comum de rede.

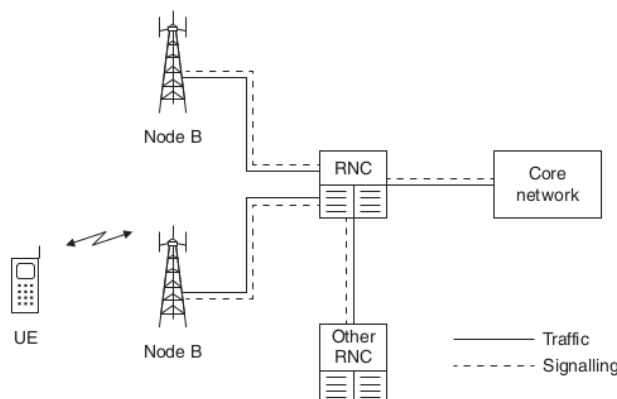
Na *Radio Access Network* é realizado a comunicação entre o *core network* e o usuário. Na figura 1 é bem ilustrado como essa arquitetura é definida, sendo dividida em GSM EDGE *radio access network* (GERAN) e também o UMTS *terrestrial radio access network* (UTRAN), ou seja, essas são as duas técnicas de comunicação de rádio distintas para o GSM e UMTS, porém as mesmas compartilham em comum o *core network* entre elas. O usuário, que pode ser conhecido como UE (*user equipment*) e também coloquialmente como usuário móvel, comunica-se com a RAN (*Radio Access Network*) por meio do ar, conhecido também como interface de rádio.

A comunicação pode ser feita em dois sentidos, no caso do móvel se comunicando com a RAN se diz que está no sentido *uplink*, agora no caso da RAN para o móvel a comunicação é realizada no sentido *downlink*. Uma característica importante do UE se trata da possibilidade de mobilidade ao longo de diversas redes, de forma que, a nova rede é chamada de rede visitada. Mesmo com a mobilidade do usuário ao longo de novas redes, suas características e dados ficarão contidos em sua rede local, para que a mesma possa ser solicitada sempre que outro usuário deseja-se comunicar com ele, passando as informações necessárias com respeito a rede visitada. A situação anteriormente descrita é conhecida como *roaming*, que se trata basicamente da capacidade de enviar e receber dados através de redes móveis fora do serviço local da própria companhia.

Os sistemas UMTS e GSM compartilham uma arquitetura de *core network* semelhantes, de forma que, suas diferenças significativas se encontram nos equipamentos e estruturas com relação a RAN.

Na terceira geração a RAN é composta, basicamente, por uma estação base que recebe o nome de Node B e da mesma forma por uma estação de controle, chamada de RNC (*radio network controller*). No sistema UMTS, a estação base têm a função de transmitir a informação aos usuários por meio de setores, de forma que, cada setor possui uma região de cobertura, formando assim as chamadas células que atendem certa região e, respectivamente, os usuários que ali se encontrarem. O modelo RAN do UMTS é ilustrado na Figura 2.

FIGURA 2: Modelo RAN do UMTS



FONTE: Retirado de [3]

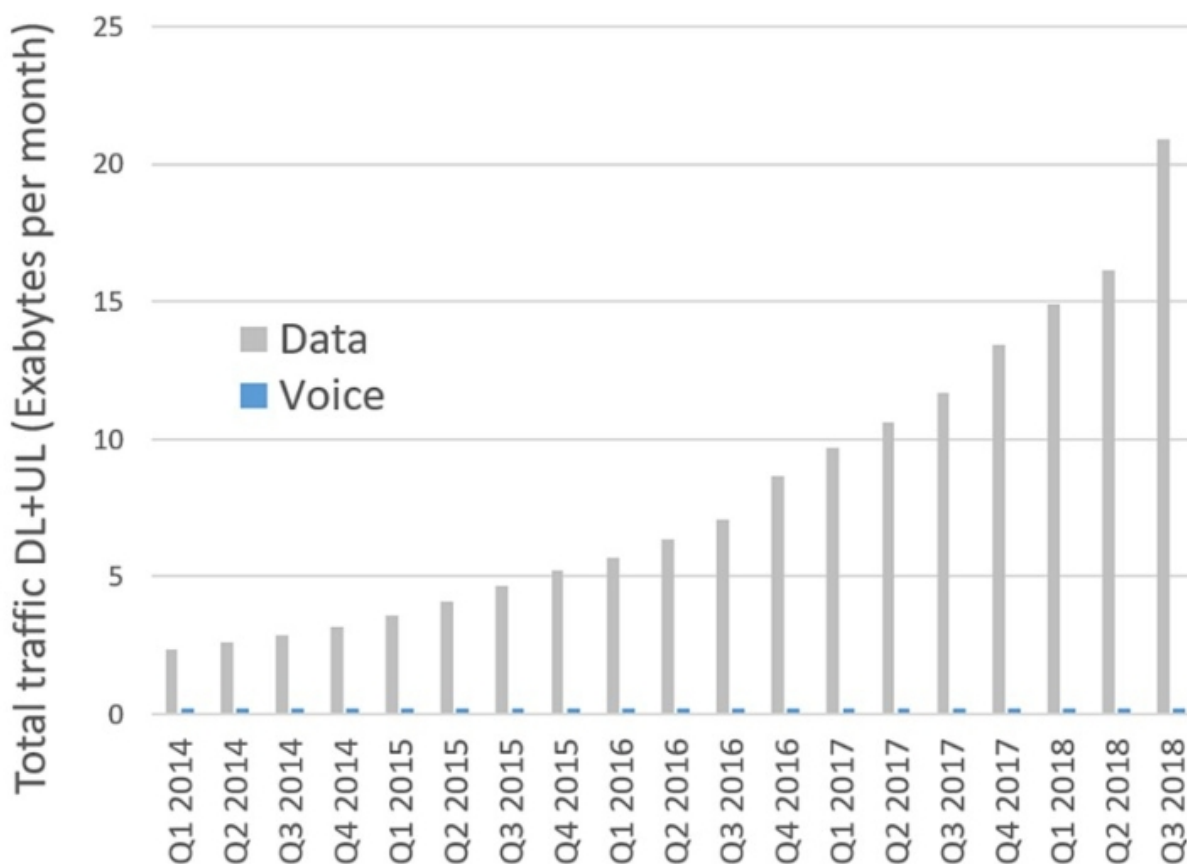
No caso do GSM é bastante similar, porém suas capacidades são menores, além de que entregam uma menor quantidade de serviços e com uma qualidade inferior ao sistema UMTS. Na segunda geração a estação base é chamada de *Base Transceiver Station* (BTS) e sua estação de controle é conhecida como *Base Station Controller* (BSC).

Apesar das gerações 2G e 3G possuírem bastante semelhanças no que diz respeito às suas arquiteturas, a terceira geração trouxe melhorias significativas com relação as aplicações de dados, além de maiores taxas de transmissão tanto de *download* como *upload*, de maneira que introduzisse no ambiente das comunicações móveis uma maior variabilidade na taxa de dados e também um aperfeiçoamento no tempo de chegada das informações.

2.1.2 Surgimento do LTE

Com o passar dos anos a quantidade de dados móveis sofreu um crescimento bastante expressivo, de forma que, necessitou-se de uma rede capaz de oferecer uma maior quantidade de tráfego além de maiores taxas de transmissão. A terceira geração foi eficaz e ainda atende grande parcela de usuários das operadoras, porém com o crescimento exponencial do número de usuários a demanda foi se tornando alarmante para os dados analíticos de capacidade das redes UMTS. No início as ligações de voz dominavam o tráfego das redes de telecomunicações, porém com o passar dos anos e das tecnologias, percebeu-se uma inversão das tendências com relação a como estava sendo direcionado o tráfego da rede, como pode ser percebido pela Figura 3.

Figura 3: Tendência do tráfego das redes de telecomunicações



FONTE: Retirado de [15]

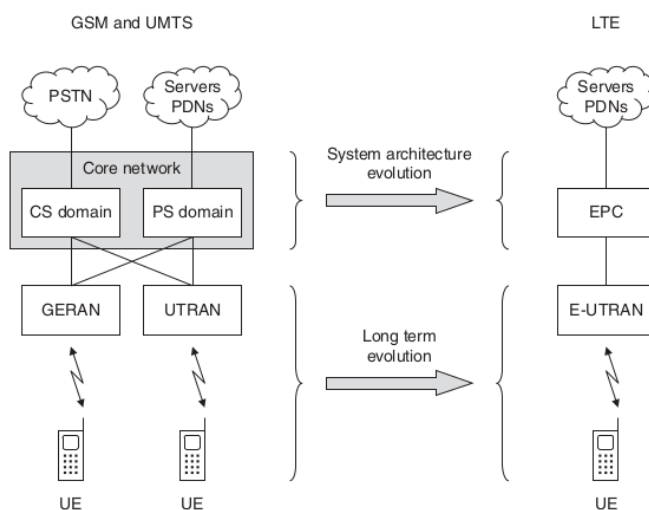
É notado que o tráfego sobre a rede móvel sofreu uma grande alteração nos últimos anos, de maneira que, as operadoras e fabricantes se viram obrigadas a acompanhar todo esse desenvolvimento, buscando ofertar um serviço ao usuário de acordo com as suas necessidades. Outros fatores colaboraram para o surgimento da quarta geração, dentre eles, a necessidade de se manter duas redes core, uma para a comutação de circuitos (aplicação em ligações de voz) e outra para a comutação de pacotes (aplicação na transmissão de dados). Com uma rede com uma maior capacidade e taxa de transmissão, se tornou viável a comunicação de voz por meio do VoIP (*voice over IP*), de forma que, todos os dados seriam transmitidos por meio da comutação de pacotes, tornando assim a rede mais eficiente.

Com todas essas demandas que estavam surgindo no cenário das redes móveis, o desenvolvimento do 4G se tornou cada vez mais uma realidade, resultando assim em uma mudança significativa em termos de arquitetura, quando comparado com

as redes UMTS e GSM. No caso do LTE, o chamado EPC (*evolved packet core*) substituiu o que corresponde ao comutador de pacotes nas redes de terceira e segunda geração. No caso do 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. No sistema LTE, o chamado E-UTRAN (*evolved UMTS terrestrial radio access network*) 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 (*evolved packet system*), de forma que ficou conhecido como LTE (*long term evolution*), devido a evolução com relação a utilização do enlace de rádio.

É possível notar a diferença do LTE com relação as arquiteturas UMTS e GSM por meio da Figura 4.

Figura 4: Comparação entre as arquiteturas do LTE com o UMTS e GSM



FONTE: Retirado de [3]

Uma das principais diferenças com relação ao LTE se trata dos requisitos bastante específicos no que diz respeito a interface de rádio. Os enlaces necessitam de uma taxa de 100Mbps de *downlink* e uma taxa de 50Mbps no *uplink*, de forma que essas taxas sejam as mínimas aceitáveis para ser considerada uma rede 4G, podendo assim serem excedidas.

Seguem duas tabelas que especificam os principais requisitos de uma rede LTE, além de estabelecer comparações com a rede UMTS (TABELA 1, TABELA 2).

TABELA 1 – REQUISITOS DO PADRÃO LTE-A

Características	LTE
Técnica de Acesso Múltiplo	OFDMA e SC-FDMA
Bandwidth	1, 4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz
Frame Duration	10 ms
Intervalo de tempo de transmissão	1 ms
Modos de operação	FDD e TDD
Canais de transporte	Compartilhados

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS REDES UMTS E LTE

Características	UMTS	LTE
Radio Access Network	Node B, RNC	eNodeB
Versão do protocolo IP suportado	IPv4 e IPv6	IPv4 e IPv6
Mecanismos de transporte	Comutação de circuito e pacotes	Comutação de pacotes
CS (circuit switched) domain	MSC, MGW	N/A
PS (packet switched) domain	SGSN, GGSN	MME, S-GW, P-GW
Voz e mensagens SMS	Incluído	Externo

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Por volta de 2008 a União Internacional de Telecomunicações (ITU) lançou o chamado *IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications)*, em que estabeleceu uma série de parâmetros para a quarta geração de maneira aperfeiçoada. De acordo com essa publicação, os requisitos para uma rede 4G avançada seria de taxas em torno de 600Mbps de *downlink* e 270Mbps de *uplink*, o que estaria indo além das capacidades da rede de quarta geração convencional, sendo assim chamada de LTE-A (*Long Term Evolution Advanced*).

No processo de desenvolvimento do LTE-A se teve a preocupação com relação a compatibilidade com o LTE convencional, de forma que, aprimoraram a técnica permitindo assim a conectividade ainda com os outros sistemas LTE e vice e versa. As redes LTE sofreram grandes alterações ao longo dos anos, sempre com o intuito de

buscar uma melhor qualidade de serviço para se ofertar ao usuário. O sistema LTE foi inicialmente especificado pelas *releases* 8 e 9, ao passo que o LTE-A pelas *releases* 10 a 12, de forma que suas adaptações continuam com o chamado LTE-*Advanced Pro* (LTE-A Pro).

Conforme o 3GPP, o desenvolvimento do LTE-A é um esforço realizado para que a internet móvel de alta velocidade consiga prover uma taxa ainda mais alta de transferência de bits, com uma eficiência capaz de entregar um serviço com mais qualidade, tornando-se muito mais atraente para o usuário. Além disso, a ideia é cumprir todos os requisitos impostos pela ITU, que vão além daqueles citados anteriormente. Seguem alguns dos requisitos atuais para uma rede ser considerada LTE-A:

- Taxas de pico de 1Gbps para *Downlink* e 500Mbps para *uplink*;
- Largura de banda maior que 70 MHz para o *downlink* e 40 MHz para o *uplink*;
- Taxa de transferência média para o usuário três vezes maior do que no LTE;
- Capacidade três vezes maior do que no LTE, refletida como a eficiência do espectro;
- Capacidade de pico – *Downlink*: 30bps/Hz, *Uplink*: 15bps/Hz;
- Flexibilidade do espectro: suporte à agregação espectral e largura de banda escalável;
- Mobilidade igual à do padrão LTE;
- Cobertura deve ser otimizada;
- Compatibilidade com redes anteriores.

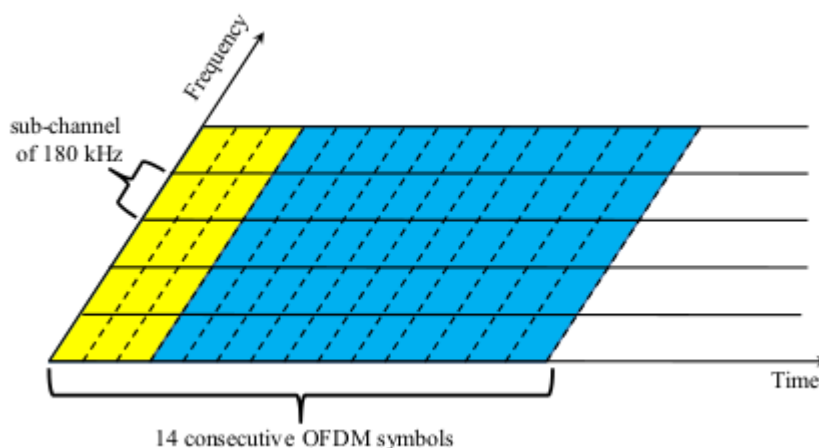
No caso deste trabalho, o foco é a aplicação de técnicas de escalonamento em conjunto com coordenadores de interferência em redes LTE-A heterogêneas. Tendo o conhecimento no que diz respeito as redes LTE-A, é importante falar sobre as redes heterogêneas. Uma rede heterogênea é composta por algumas *macrocells* que são rodeadas pelas *picocells*, que buscam entregar uma cobertura mais efetiva ao usuário. As redes heterogêneas são responsáveis por entregar um serviço com maior taxa de dados, por justamente se fazer mais próxima dos UEs e ajudar a "desafogar" uma *macrocell* com tráfego excessivo. Com a redução das distâncias entre os UEs e as BS, consegue-se diminuir as perdas de percurso do sinal transmitido, melhorando assim o ganho e a capacidade do canal, além de permitir taxas de dados elevadas.

Contudo, ao usuário utilizar os sistemas de redes heterogêneas, que é o que acontece atualmente devido a constante evolução tecnológica e com isso a necessidade por melhores condições de conexão, se torna necessário o uso de redes com essas características e conseqüentemente, o avanço com relação as redes móveis deve acompanhar todo esse processo. Diante disso, as redes LTE-A Heterogêneas serão objeto de estudo e análise ao longo deste trabalho, com conclusões a serem obtidas acerca do desempenho da rede, colocando assim em confronto as mais diversas técnicas tanto de escalonamento quanto de coordenação de interferência, para se obter um maior desempenho da rede.

2.1.3 Enlace *Downlink* do LTE

Os dados de *Downlink* são transmitidos pela *eNodeB* por meio do PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*). Pelo próprio nome pode-se inferir que o PDSCH é o responsável por compartilhar para todos os usuários ao longo de uma célula os recursos reservados no LTE. Pela Figura 5, pode-se visualizar melhor como é feita a transmissão dos dados no enlace *downlink*.

FIGURA 5: Divisão no tempo e na frequência nos quadros de transmissão do enlace *downlink*



FONTE: Retirado de [12]

Nos primeiros quadros de transmissão (amarelos) da Figura 5 são representados os símbolos dedicados a sinalização, agora nos quadros em azul já são representados os símbolos usados para transmissão de dados. Os canais são divididos em *sub-frames* específicos, cada um com uma frequência e tempo determinados. Da mesma forma os sinais são transmitidos por meio de símbolos OFDM, que se trata especificamente da multiplexação por divisão de frequências, em que é uma técnica de transmissão de dados que utiliza sua banda dividida em múltiplas portadoras ortogonais, chamadas de subportadoras, para modulação, cada sub-portadora é escolhida, em termos do espaçamento entre elas, de forma que, cada uma esteja centrada nos zeros das restantes [12].

Os recursos são transmitidos por meio das técnicas já citadas, de maneira que tanto dados quando sinais de controle e sinalização passam pelo mesmo processo. Os dados transmitidos em redes LTE se constituem pela junção de vários recursos que são alocados ao canal, como os chamados RBs (*resource blocks*) que representam a menor parcelada de recurso que pode ser escalonado em redes LTE para transmissão.

2.2 TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA

A crescente requisição de dados na borda da célula é desafiadora em redes heterogêneas, principalmente quando se depara com o congestionamento de espectro como acontece à medida que as redes de telecomunicações se desenvolvem. As redes heterogêneas são compostas de diferentes estruturas de células, como *macro*, *pico*, *femto*, e também nós retransmissores. Com o desenvolvimento das redes móveis, a tendência é a de que as células diminuam cada vez mais, buscando aumentar a capacidade das eNodeBs, sendo assim instaladas cada vez mais próximas aos usuários. Com todo esse cenário, a alta eficiência espectral é um desafio, de maneira que, técnicas avançadas de coordenação serão necessárias para gerenciar a estrutura toda, de forma que as eNodeBs não interfiram umas nas outras.

Ao se utilizar técnicas de coordenação de interferências, as mesmas, possuem a tarefa de gerir os recursos de rádio de tal forma que a interferência entre as células seja a mínima possível. São chamados de Coordenação de Interferência entre Células (ICIC) os esquemas que gerenciam a comunicação que ocorrem entre as células, de forma que, são essenciais no modelo atual de redes móveis, para se obter uma boa transmissão e recepção sem que haja tantas interferências que cheguem a prejudicar a qualidade do sinal. O ICIC é uma função de gestão de recursos de rádio *multi-cell*, que leva em conta as informações a partir de várias células, como por exemplo, o estado de uso, o uso de recurso e também a situação de carga de tráfego. [8]

A necessidade de esquemas de gerenciamento de interferência em redes heterogêneas origina-se do fato de que os usuários na área de expansão das faixas das células pequenas (nesse trabalho denominada de *picocell*), se tornam vulneráveis com relação a sinais de interferência mais fortes (originados, por exemplo, na *MacroCell*) do que os próprios sinais úteis da célula pequena, com a qual o usuário está associado. Outra técnica utilizada se trata do chamado eICIC (*enhanced ICIC*) que inclui componentes no domínio da frequência e do tempo com a utilização do ABS (*Almost Blank Subframes*) e também do chamado CRE (*Cell Range Expansion*) sendo uma evolução das técnicas ICICs [1].

No caso do eICIC ao utilizar a técnica ABS, que são configuradas nas *macrocells*, o intuito é cessar as transmissões de dados em determinados intervalos de tempo, reduzindo assim as interferências nas *picocells*. Já quando se utiliza a técnica

CRE o usuário não necessariamente se associa a estação base que fornece a maior potência.

O fato das redes LTE/LTE-A possuírem atualmente preocupação acerca do uso e da otimização dos recursos, ao utilizarem a técnica ABS esse problema se agrava, devido ao fato de que pelas restrições das *macrocells* de que silenciem suas transmissões de dados inteiramente, em certos momentos, pode resultar em um uso ineficiente desses recursos, que se mostram escassos. Nesse contexto surge a técnica de coordenação de interferências chamada de FeICIC (*Further enhanced Inter-cell Interference Coordination*) para lidar melhor com esse cenário. Dessa forma nessa técnica é proposta a chamada RP-ABSs (*Reduced Power Almost Blank Subframes*). Com a RP-ABSs as transmissões não são cessadas em intervalos de tempo, mas sim, atendendo os usuários ao invés disso, em níveis reduzidos de potência, gerando assim um uso mais eficiente dos recursos, quando comparado a técnica eICIC.

2.2.1 eICIC

Com o objetivo de tratar dos problemas relacionados com interferências em redes heterogêneas, foi evoluindo constantemente os estudos acerca das técnicas de coordenação de interferência. Como tentativas de aprimorar as técnicas ICIC, foi padronizada pelo 3GPP o eICIC, com o intuito de superar as limitações dos esquemas anteriores.

Uma das principais mudanças, com relação ao ICIC, se trata da adição de técnicas no domínio do tempo, podendo assim particionar os recursos no tempo, resultando em uma maior limitação na interferência aos usuários na borda das *picocells*. A técnica é feita da seguinte forma: uma *macrocell* cria *sub-frames* de certa forma “protegidos” para uma *picocell*, de maneira a reduzir sua potência ou até cessar sua transmissão em certos *sub-frames*, ou seja, a técnica ABS. Outra técnica também utilizada no esquema eICIC é o chamado CRE (do inglês *Cell Range Expansion*) que têm o objetivo de descarregar o tráfego das *macrocells* e aumentar a capacidade do sistema, de maneira que, essas áreas possam ser cobertas pela *picocell*, ainda que o UE esteja recebendo um sinal de potência maior vindo da *macrocell*.

O eICIC definido pela Realease 10, onde seu desempenho é identificado e analisado em termos de mobilidade, quando se trata das Redes Heterogêneas.

Suas principais características são descritas a seguir:

- Introduzido no 3GPP LTE pela reelease 10;
- Trata o ambiente de Redes Heterogêneas (*Macro* e *Picocells*);
- Considera as interferências dos canais de controle e de dados;
- Usa os domínios de potência, tempo e frequência, para lidar com as interferências;
- Conceito de ABS (*Almost Blank Subframe*) introduzido para minimizar a interferência de *downlink*;
- Conceito de CRE (*Cell Range Expansion*) de forma que, as *picocells* consigam abranger mais usuários.

2.2.2 FeICIC

Na técnica FeICIC (do inglês *Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination*), ao invés de oferecer o esquema ABS, as macrocells utilizam o RP-ABS (do inglês, *Reduced Power Almost Blank Subframe*), de forma que atende os usuários em níveis reduzidos de potência, ao passo que não causa subutilização dos recursos do canal, além de reduzir as interferências de maneira eficiente ao longo da comunicação [8]. Suas principais características são descritas a seguir:

- Introduzido no 3GPP LTE pela Reelease 11;
- Considera interferências dos canais de controle e de dados;
- Usa o domínio da potência, tempo e frequência para lidar com as interferências;
- Conceito de RP-ABS (*Reduced Power – Almost Blank Subframe*);
- Conceito de CRE (*Cell Range Expansion*), permitindo as *picocells* atender uma maior quantidade de usuários;
- Pode cancelar a interferência em até 2 células vizinhas.

2.3 TÉCNICAS DE ESCALONAMENTO

O estudo acerca das técnicas de escalonamento diz respeito ao sistema no enlace de *downlink*, buscando assim otimizar os recursos com algoritmos eficientes e que buscam garantir uma justiça aos usuários no cenário real 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 maneira que, quanto melhor é o sinal emitido pela estação, o usuário poderá receber em seu dispositivo móvel uma maior velocidade de conexão.

O procedimento pelo qual a estação base seleciona qual usuário irá transmitir se trata dos algoritmos de escalonamento, implementados na própria estação. De acordo com essa seleção de usuários através do algoritmo, serão alocados os recursos da rede, atribuindo um RB (*Resource Block*), 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* que são, basicamente, certos intervalos ao longo do tempo em que uma parcela dos recursos da rede é destinada para cada usuário solicitante. Outro processo bastante utilizado no escalonamento 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 [5].

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 três em destaque, no caso o *Round-Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF) e o *Generalized Proportional Fair* (GPF), em que cada um possui uma política diferenciada para a distribuição dos recursos.

2.3.1 Round Robin

O RR compartilha os recursos da rede definindo um intervalo de tempo para cada processo, ao passo que o tempo de transmissão é igual para todos os usuários do sistema. Esse algoritmo é considerado muito simples em termos de processamento em comparação com os outros algoritmos de escalonamento. O algoritmo consome poucos recursos da eNodeB para selecionar os usuários, ao passo que, não avalia a qualidade do enlace e nem a latência requisitada pelo usuário, além de que os parâmetros de QoS também não são considerados [12].

Na Tabela 3 é exemplificada a política de escalonamento do algoritmo RR. Supondo que em uma rede sejam alocados recursos para seis usuários, sendo eles UE1, UE2, UE3, UE4, UE5, UE6.

TABELA 3: Distribuição dos recursos no escalonador RR

UE1	UE2	UE3	UE4	UE5	UE6	UE1	UE2	UE3	UE4
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

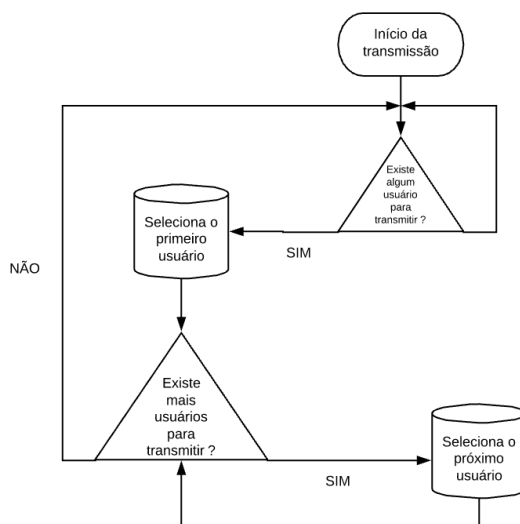
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Por meio do fluxograma da Figura 6 pode-se visualizar melhor como é realizada a alocação de recursos da rede LTE-A por meio do RR.

No RR cada cliente recebe uma fatia de tempo do servidor (quantum), dentro do qual é atendido, sendo que após a expiração desse tempo, caso a atividade não seja completada, o usuário é retirado e outro passa a ser atendido. No caso o usuário que foi interrompido retorna ao servidor e continua a sua atividade.

Dessa maneira pode-se concluir que o RR é o tipo mais simples de escalonador dentre todos os outros algoritmos, sendo que, sua função engloba a verificação dos usuários que se encontram na lista para transmitir e alocam os recursos necessários para os mesmos à medida de que chegam na fila.

FIGURA 6: Fluxograma para alocação de recursos na rede LTE-A pelo RR



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

2.3.2 Proportional Fair

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 [11].

$$W_{(i)} = r_{(i)}(t) / R_{(i)}(t) \quad (\text{Eq. 1})$$

De maneira que:

$r_i(t)$ – taxa de dados instantânea do canal do usuário

$R_i(t)$ – taxa média de dados do usuário i .

O cálculo de $R_i(t)$, ou seja, a taxa média de dados é realizado pela equação 2.

$$\begin{aligned} R_i(t+1) &= (1 - 1/t_c) * R_i(t) + (1/t_c) * r_i(t) & i=i' \\ R_i(t+1) &= (1 - 1/t_c) * R_i(t) & i \neq i' \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2})$$

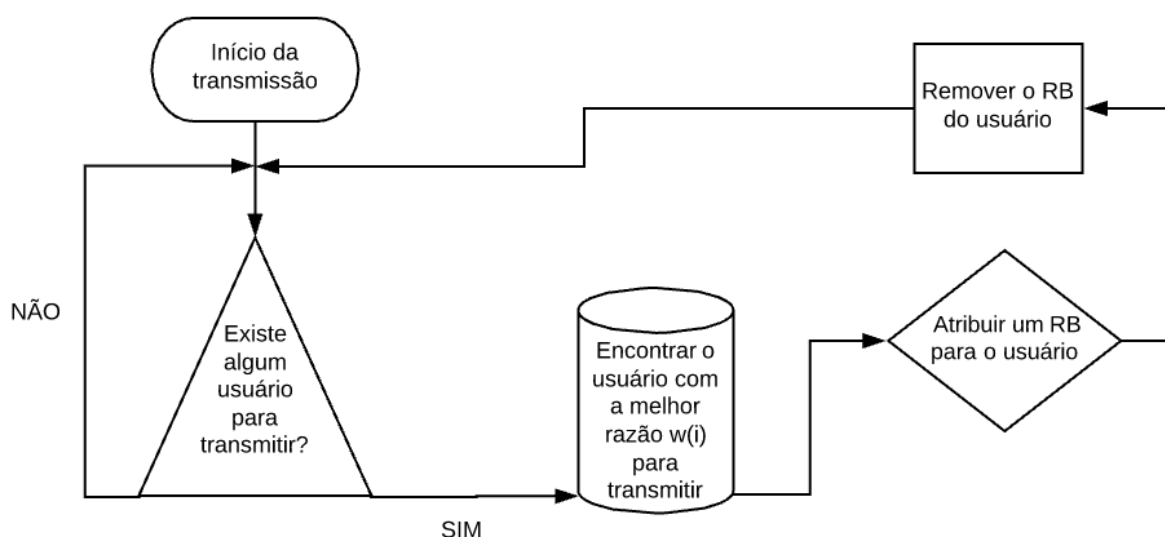
Em que:

i' - refere-se ao usuário selecionado

t_c - parâmetro de controle do escalonador

Logo em seguida é mostrado pela Figura 7 o fluxograma que exemplifica a alocação dos recursos da rede pelo PF.

FIGURA 7: Fluxograma para alocação de recursos na rede LTE-A pelo PF



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Dessa maneira o escalonador PF baseia-se em manter um equilíbrio entre dois interesses concorrentes: Tentar maximizar a taxa de transferência total e, ao mesmo tempo, permitir a todos os usuários pelo menos um nível mínimo de serviço. Esse procedimento como foi visto anteriormente é feito atribuindo a cada fluxo de dados uma taxa de dados ou uma prioridade de agendamento (dependendo da implementação), que de certa forma é inversamente proporcional ao consumo antecipado dos recursos, contribuindo assim de maneira mais eficiente que o escalonador RR para a otimização dos recursos disponíveis na rede.

2.3.3 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 certo entre justiça e taxa de transferência, ajustando certas variáveis na métrica GPF [11]. Esse escalonador analisa o *throughput* alcançado 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 e, portanto, obter um melhor desempenho da rede.

A métrica de escalonamento do GPF visa equilíbrio entre o desempenho da taxa de transferência e a justiça na distribuição dos recursos pelo PF. A métrica do escalonador GPF pode ser expressa pela equação 3.

$$W_i = [r_i(t)]^\beta / [R_i(t)]^\gamma \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

$r_i(t)$ - taxa de dados esperada para o usuário em determinado instante – taxa de dados instantânea

$R_i(t)$ - trata-se da vazão média do usuário até determinado tempo

Os índices beta e gama são aqueles responsáveis por modificar o impacto da taxa média de dados e da taxa instantânea de dados.

Ressaltando que quando $\gamma = 0$, o rendimento máximo e a eficiência espectral máxima serão garantidos à custa da justiça, pois não se levará em conta o valor médio dos dados anteriores da taxa de dados. A métrica do GPF modifica o peso da taxa média de dados anteriores dos UEs no intervalo de tempo atual. Como por exemplo: Se a taxa de transferência alcançada no passado fosse maior, o algoritmo escalonador seria capaz de alocar mais recursos aos UEs para ajuda-los a alcançar taxas de dados mais altas. Agora por outro lado, quando $\beta = 0$, o cenário de escalonamento de taxas iguais aos usuários é alcançado, entregando assim a mesma taxa para todos que solicitam. Dessa forma, a métrica do escalonador é responsável por modificar o impacto da política de alocação de recursos na taxa de dados instantâneas esperadas para os UEs na rede, de

maneira que com uma taxa igual para todos os usuários, o escalonador aloca recursos para os UEs de tal forma que eles alcancem uma taxa de transferência igual.

Quanto maiores os valores de beta, maior será a influência da taxa de dados instantânea que pode ser alcançada, logo, melhora a probabilidade de servir um usuário com boas condições de canal. Isso se traduz em uma maior taxa de transferência na rede, mas com um índice de justiça de taxa de transferência mais baixo. No momento em que se têm um aumento na métrica, procura-se ampliar a influenciadora da vazão alcançada em momentos anteriores, isso aumenta a chance de um usuário que alcançou menores valores de taxa de transferência ser agendado, resultando em uma baixa taxa de transferência de rede, mas um alto índice de justiça pode ser previsto.

Dessa forma é visto que o escalonador GPF busca uma adaptação tanto para entregar justiça aos usuários, assim como também altas taxas de transferência. Por meio de inúmeras simulações, adaptações e alterações de valores, os valores ótimos a serem utilizados como padrão para β e γ são 0,6 e 0,7, respectivamente [11].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo detalhar quais os métodos utilizados nas pesquisas para a elaboração do presente trabalho, citando também a ferramenta utilizada, o objetivo de análise e estudos, além de suas principais características.

3.1 MÉTODOS DE PESQUISA

No presente trabalho são realizados dois tipos de pesquisas:

- Referencial Teórico: trata-se de todo o embasamento teórico e contextualização dos termos a serem trabalhados, por meio de pesquisas utilizando materiais já existentes, com o intuito de uma melhor compreensão sobre o funcionamento e os impactos em todo o sistema de acordo com os cenários estudados.
- Simulações: os testes de simulação são realizados por meio do software MATLAB, de maneira a estudar o comportamento da rede ao adicionar um algoritmo de escalonamento distintos dos contidos em [1], e também verificar o seu desempenho quando comparado com as técnicas já implementadas em cenários semelhantes.

No momento em que se tem um embasamento dos principais componentes do sistema a serem analisados, como, por exemplo, conceito de redes LTE-A heterogêneas, técnicas de coordenação de interferência e de escalonamento, é possível realizar e compreender as alterações de alguns parâmetros em específico, possibilitando assim a análise e comparação dos resultados entre si. Com os resultados obtidos, a intenção é estabelecer os pontos positivos e negativos da técnica de escalonamento GPF, que foi adicionada ao código original, e as alterações dos parâmetros, com o objetivo de verificar as vantagens na aplicação desse sistema.

3.2 MATERIAL DE PESQUISA

O ambiente de simulação trata-se de uma rede LTE-A heterogênea utilizando para coordenação de interferências as técnicas eICIC e FeICIC, e três algoritmos de escalonamento, a saber: RR, PF e GPF. O sistema é analisado utilizando o MATLAB como software de simulação para um cenário de redes móveis.

O código é dividido por diversas funções, as quais, são chamadas na função principal (`main_ideal`) à medida que a simulação entra em execução. No código como um todo, o processo roda em cima dessa função principal, de forma que, ao longo da simulação as funções são buscadas pelo código principal, enviando assim os parâmetros adequados para a geração dos valores desejados. A função neste trabalho implementada foi a do algoritmo de escalonamento GPF, com o intuito de comparar seu desempenho com os outros escalonadores e verificar a sua viabilidade. A função que implementa o escalonador é denominada de `GPF_scheduler_LTE`, podendo ser encontrada no apêndice 1 ao final deste trabalho. Os procedimentos adotados na implementação do algoritmo foram baseados na literatura em questão [1] com justamente uma adição e alteração de parâmetros à função pré-existente do escalonador PF.

Com o algoritmo do escalonador GPF implementado foi possível a geração dos resultados que conseqüentemente foram comparados com aqueles já implementados (RR e PF). Os resultados foram gerados de maneira que os valores de eficiência energética e de eficiência espectral foram setados para os três tipos de escalonadores. Com os resultados gerados, foi possível a simulação em três diferentes cenários, de forma que pudessem estabelecer conclusões acerca do desempenho do algoritmo de escalonamento GPF incluído. Com o código foram gerados os três cenários, de forma que, a simulação ocorreu em diferentes momentos, de maneira a variar o número de *picocells* para cada célula e então gerar os resultados para cada respectivo cenário.

O código como já foi dito anteriormente é composto por várias funções, dentre as quais, algumas são descritas a seguir:

- `BetterResp_eICIC`: responsável por implementar a técnica de coordenação de interferência eICIC;
- `BetterResp_FeICIC`: responsável por implementar a técnica de coordenação de interferência FeICIC;
- `main_ideal`: função principal, responsável por chamar todas as outras;

- `round_robin_scheduler`: função implementada para o algoritmo escalonador RR;
- `PF_scheduler_LTE`: função implementada para o algoritmo escalonador PF;
- `GPF_scheduler_LTE`: função implementada para o algoritmo escalonador GPF;
- `Troughput`: função responsável por calcular os valores de taxa de transferência em determinados instantes da simulação.

Outras funções ainda foram utilizadas, porém de maneira geral as aqui descritas são as principais influenciadoras nos resultados deste trabalho, de maneira que o algoritmo implementado diz respeito a função denominada por `GPF_scheduler_LTE`. O código no geral depende de todas as funções para a geração correta dos resultados, de forma que são gerados pelo software MATLAB apenas os valores e não os respectivos gráficos, pelo qual foi usado um software do sistema operacional Linux (Xubuntu) chamado de LabPlot.

3.2.1 Métricas de Desempenho

Para avaliação das técnicas de escalonamento e coordenação de interferência são utilizadas métricas de desempenho, que mostram o quanto o sistema está reagindo as alterações, seja de maneira negativa ou positiva. Existem diferentes tipos de métricas que podem ser objeto de análise, porém o foco principal está nas descritas a seguir:

- Eficiência Espectral
- Eficiência Energética
- Vazão dos 5% piores usuários

As métricas de desempenho são responsáveis para se obter conclusões a respeito do ambiente de simulação, possibilitando assim a comparação de seus resultados para os mais diferentes cenários.

Eficiência Espectral

Eficiência Espectral diz respeito à taxa de informação que pode ser transmitida através de uma determinada largura de banda em um sistema de comunicação

específico. Trata-se de uma medida de eficiência com que um espectro de frequência limitado impacta de maneira significativa tanto nos recursos físicos da rede, como também no acesso às aplicações.

Sua unidade de medida é em bps/Hz (bits por segundo por *Hertz*), em que, trata-se da taxa de transferência máxima dividida pela largura de banda em *Hertz* de um canal de comunicação ou de um link de dados.

Eficiência Energética

Eficiência energética está diretamente ligada ao fato de se usar menos energia para realizar a mesma tarefa, ou seja, eliminar cada vez mais o desperdício de energia. A eficiência energética é medida em bits/J (bits por *Joule*), de maneira que se trata da quantidade de bits transmitidos para determinada quantidade de energia medida em *Joules*.

Vazão dos 5% piores usuários

Trata-se da quantidade de dados transferidos de um lugar a outro, ou também a quantidade de dados processados em um determinado espaço de tempo. Suas unidades básicas são Kbps, Mbps e o Gbps. No trabalho as taxas de transferência são objeto de análise a todo momento, de maneira que, quanto maior a taxa entregue ao usuário, melhor estará sendo o serviço ofertado. A taxa de transferência é responsável dentre vários fatores por reproduzir indiretamente se um sistema é eficiente ou não, tanto energeticamente quanto espectralmente.

Uma análise importante a ser feita e tratada ao longo desse trabalho, se trata do cálculo de vazão dos 5% piores usuários, por se tratar, normalmente, de usuários na borda da célula, sendo assim um cenário ideal para a verificação da contribuições do algoritmo de escalonamento GPF em conjunto com a técnica de coordenação de interferência FeCIC.

Tendo conhecimento de todas as partes que compõem o sistema, as características de cada cenário e os valores que são modificados para realizar as simulações e análises são descritos a seguir.

3.2.2 Parâmetros de Simulação

Os parâmetros de simulação foram definidos com base em [1] conforme mostrado pela Tabela 4.

Aqui são listados em forma de tabela os principais parâmetros utilizados na simulação da rede:

TABELA 4: Parâmetros da simulação

Parâmetros	Valores
Geometria da célula	Hexagonal
Distância entre <i>macrocells</i>	1000m
Dist. Min. Da <i>macrocell</i> p/ usuário	35m
Dist. Min. Da <i>picocell</i> p/ usuário	10m
Dist. Min. Da <i>macrocell</i> p/ <i>picocell</i>	75m
Largura de banda	5 MHz
Número de RBs	25
TTI	1 ms
Potência <i>macrocell</i>	40 W
Potência <i>picocell</i>	1 W

FONTE: Autoria Própria

Para análise das técnicas investigadas, optou-se por variar a quantidade de *picocells* por células.

3.2.2.1 Técnicas Avaliadas

Com relação à coordenação de interferência, o sistema é submetido a três situações, dentre elas o uso de nenhuma técnica de coordenação de interferência, em segundo lugar um esquema com a técnica eICIC e, por último, a implementação de um cenário com a FeICIC.

Os algoritmos de escalonamento avaliados são: RR, o PF e o GPF.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreveu os procedimentos experimentais do presente trabalho, bem como as pesquisas realizadas e as simulações utilizadas como objeto de análise, estudo e conclusões. Ao final das simulações são obtidos resultados para avaliar o desempenho do sistema em diversas situações. Dessa maneira, o capítulo 4 apresenta os

resultados obtidos em cada procedimento experimental e as discussões e conclusões cabíveis em cada resultado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo deste capítulo são apresentados os resultados obtidos logo após a realização das simulações descritas no capítulo 3 deste trabalho. Os resultados são apresentados nas formas de gráficos e tabelas, a partir dos quais analisa-se o desempenho do sistema em diferentes cenários e situações.

4.1 CENÁRIO 1

No primeiro cenário, os resultados são divididos de acordo com as variáveis descritas no capítulo anterior, ou seja, a Eficiência Espectral, a Eficiência Energética e a Vazão dos 5% piores usuários. Neste cenário é considerada uma única *picocell* por célula e as técnicas de coordenação de interferência eICIC e FeICIC, assim como os algoritmos de escalonamento RR, PF e GPF. O cenário Null indica que nenhuma técnica de coordenação de interferência foi utilizada. 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.

4.1.1 Eficiência Espectral com uma *picocell* por célula

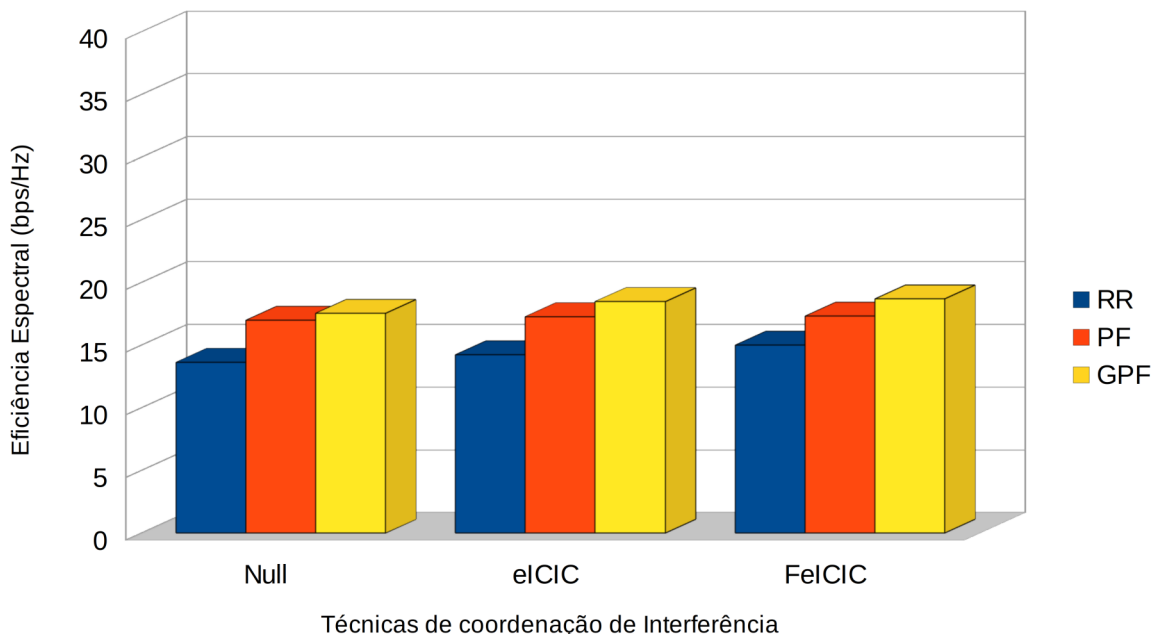
Ao simular o sistema no primeiro cenário, com uma única *picocell* por célula, foram obtidos os resultados de eficiência espectral contidos na Tabela 5 abaixo e mostrados na Figura 8.

TABELA 5: Valores da eficiência espectral medidos em bps/Hz com uma *picocell* por célula

1 pico BS por célula	RR	PF	GPF
Null	13,652	16,997	17,550
eICIC	14,233	17,292	18,497
FeICIC	15,013	17,324	18,679

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

FIGURA 8: Eficiência Espectral em função das técnicas de coordenação de Interferência com uma *picocell* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

No cenário analisado, por meio da tabela e da figura é possível concluir que mesmo com a alteração das técnicas de coordenação de interferência, assim como os algoritmos de escalonamento, se teve um aumento significativo da eficiência espectral dos esquemas mais elaborados com relação aos métodos mais simples. Houve certa mudança ligada ao fato da adição de alguma coordenação de interferência, como no primeiro momento ao se adicionar à implantação a técnica eICIC. É perceptível um aumento a partir da adição do mesmo, porém deve-se contrabalancear quando se trata de melhorias, ou seja, levar ao questionamento se a melhoria em termos de eficiência espectral foi tamanha a ponto de superar a complexidade adicionada ao sistema com essa técnica. A eficiência espectral é medida em bits por segundo por Hertz, e a maior contribuição em termos de eficiência será a partir da adição das técnicas de coordenação de interferência.

Os algoritmos de escalonamento como o PF e o GPF também contribuem para a melhoria do desempenho do sistema. Entretanto no cenário *Null* não há uma mudança significativa em termos de contribuição, ou seja, seus resultados de eficiência espectral são bastantes semelhantes. Porém um fator é importante destacar, mesmo que não se tenha valores tão significativos, o de que sem nenhuma técnica de coordenação de interferências os valores entre o GPF e o PF eram bastante próximos, mas à medida que

a técnica eICIC foi implementada ambos cresciam e logo que o FeICIC era utilizado a diferença entre os dois aumentava. Assim sendo, esse cenário contribui de maneira inicial para se ter uma noção de que as técnicas de coordenação de interferência juntamente com os algoritmos de escalonamento são capazes de entregar serviços com maior eficiência espectral.

4.1.2 Eficiência Energética com uma *picocell* por célula

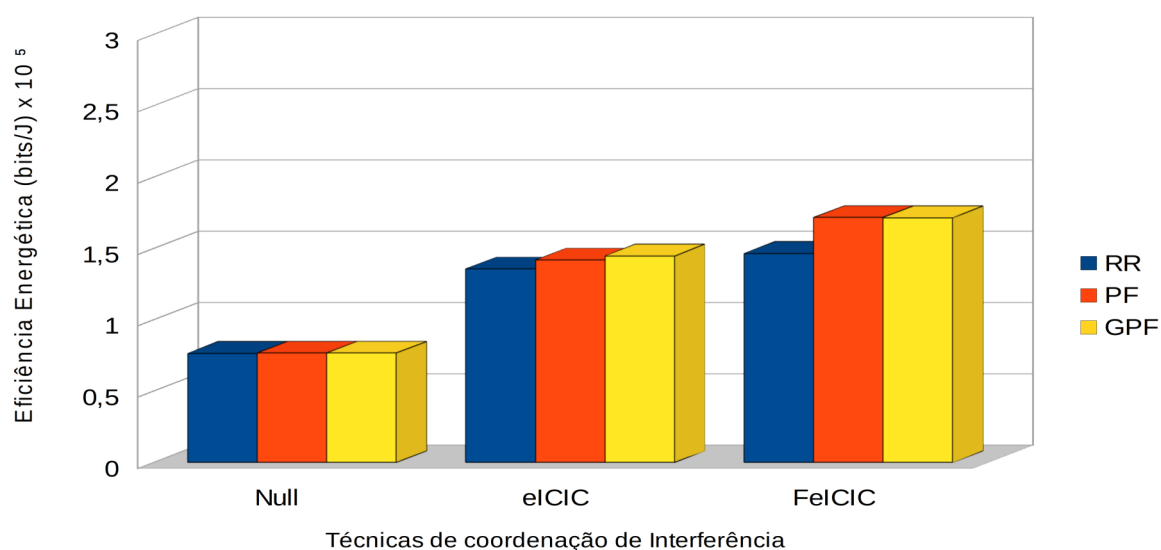
Ao simular o sistema, com uma *picocell* por célula, foram obtidos os resultados de eficiência energética contidos na Tabela 6 abaixo e mostrados na Figura 9.

TABELA 6: Valores da eficiência energética medidos em bits/J x 10⁵ com uma *picocell* por célula

1 pico BS por célula	RR	PF	GPF
Null	0,7667	0,76866	0,76769
eICIC	1,35885	1,42119	1,44872
FeICIC	1,46669	1,71891	1,71638

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

FIGURA 9: Eficiência Energética em função das técnicas de coordenação de Interferência com uma *picocell* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Os valores de eficiência energética são representados por bits por Joule x 10⁵. No caso da eficiência energética, os valores, as suas diferenças e contribuições relativas

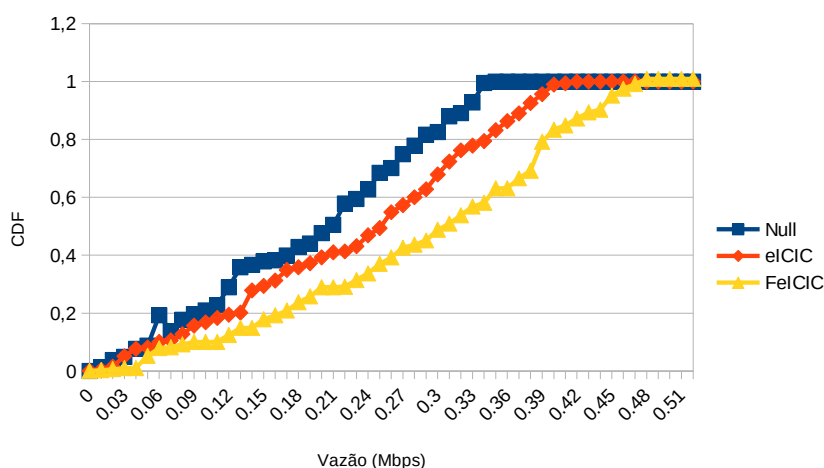
ao GPF são mais significativos já de início, de maneira que o GPF se mostra mais eficaz e suas contribuições se destacam com relação ao PF, à medida que também é possível inferir sobre a contribuição das técnicas de coordenação de interferência, principalmente nos valores elevados de eficiência e vazão do FeICIC em comparação com o eICIC. Com a adição de escalonadores mais elaborados, a performance do ambiente já mostra bem mais eficiente e melhor com relação ao escalonador mais simples, o RR (*Round Robin*) em comparação com os demais.

Os valores de eficiência energética para esquemas sem nenhuma coordenação de interferência acabam por se mostrarem bem próximas, independente do escalonador escolhido. Por outro lado, ao serem implementadas as técnicas de coordenação de interferência, diferenças começam a acentuar, podendo-se observar o melhor desempenho da adição de escalonadores em conjunto com os esquemas de coordenação de interferência, de maneira que, juntos estabelecem um desempenho crescente em comparação com as técnicas mais simples.

4.1.3 Vazão dos 5% piores usuários com uma *picocell* por célula

Ao simular o sistema, com uma *picocell* por célula, foram obtidos os resultados de vazão contidos na Figura 10 e Figura 11.

FIGURA 10: A *cumulative distribution function* (CDF) em função da vazão dos 5% piores usuários com uma *picocell* por célula

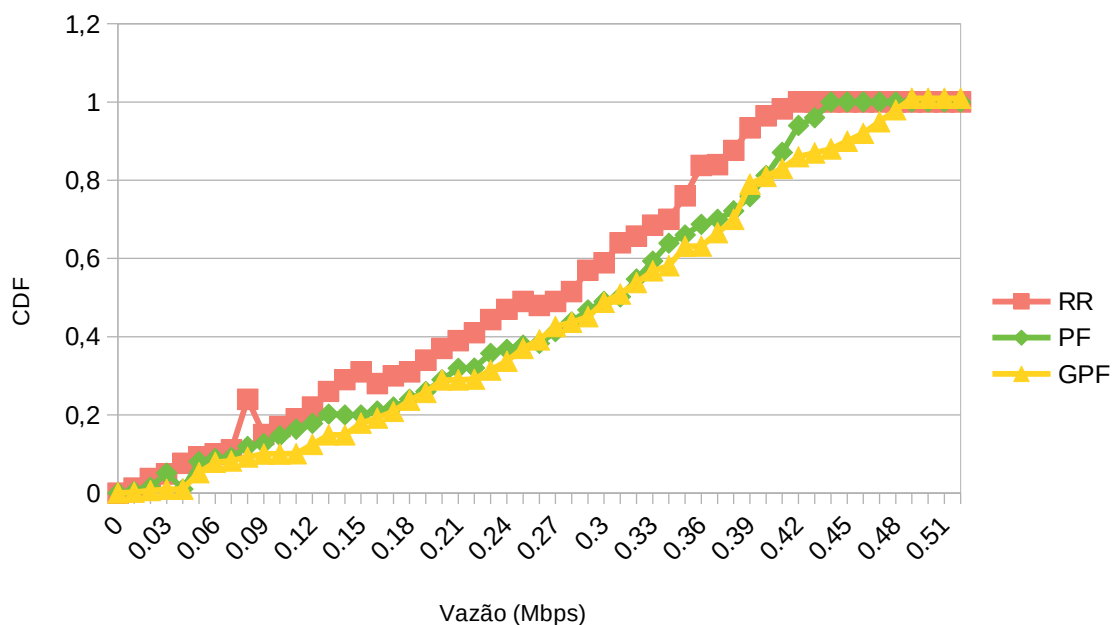


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Na Figura 10, são apresentados os valores de vazão calculados ao utilizar como algoritmo escalonador o GPF. A figura mostra os valores de CDF para as taxas de vazão dos 5% piores usuários, ou seja, aqueles que apresentam maiores níveis de interferência, pelo fato de estarem na borda das células. Os resultados são para o cenário

de uma *pico cell* por célula e, através dessa configuração já é possível notar as contribuições em termos de vazão referentes às técnicas de coordenação de interferência. Ao utilizar a técnica eICIC é notável o seu desempenho de melhorias com valores de vazão mais elevados quando comparados a situação em que nenhuma técnica coordenação de interferência é implementada. No momento em que se utiliza a técnica FeICIC deixa ainda mais claro a importância e grande contribuição ao sistema pelas técnicas de coordenação de interferência, gerando resultados ainda mais satisfatórios quando comparados com o eICIC. Esse comportamento é resultado justamente das melhorias em termos de eficiência espectral e energética obtidas pelas técnicas ICIC. Neste cenário são utilizadas apenas uma *pico cell* por célula, de forma que, espera-se que com o aumento da densificação celular com o acréscimo de *pico cells* na célula o desempenho em termos de vazão venha a melhorar cada vez mais, como será tratado nos cenários subsequentes.

FIGURA 11: CDF em função da vazão dos 5% piores usuários dos algoritmos de escalonamento utilizando a técnica FeICIC com uma *pico cell* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Pela Figura 11, pode-se notar que inicialmente no cenário com uma *pico cell* por célula apenas, os resultados de vazão entre os algoritmos PF e GPF se mostraram de certa forma bastante próximos em comparação com os resultados obtidos para o algoritmo escalonador RR. Foi utilizado na simulação todos os algoritmos de escalonamento em conjunto com a técnica FeICIC, pela qual representa o melhor

desempenho dentre todas as técnicas de coordenação de interferências. Pela adição de mais *picocells* por célula ao longo dos cenários é notado as contribuições do algoritmo de escalonamento GPF em conjunto com a técnica FeICIC.

4.2 CENÁRIO 2

No segundo cenário, os resultados também são divididos de acordo com os parâmetros de desempenho: Eficiência Espectral, Eficiência Energética e Vazão. Porém neste cenário são consideradas duas *picocells* por célula. São mostrados os resultados das simulações, variando as técnicas de coordenação de interferência (eICIC e FeICIC), assim como os algoritmos de escalonamento (RR, PF e GPF). Em todas as situações foram construídas tabelas que informam os resultados obtidos com relação a eficiência energética do sistema simulado

4.2.1 Eficiência Espectral com duas *picocells* por célula

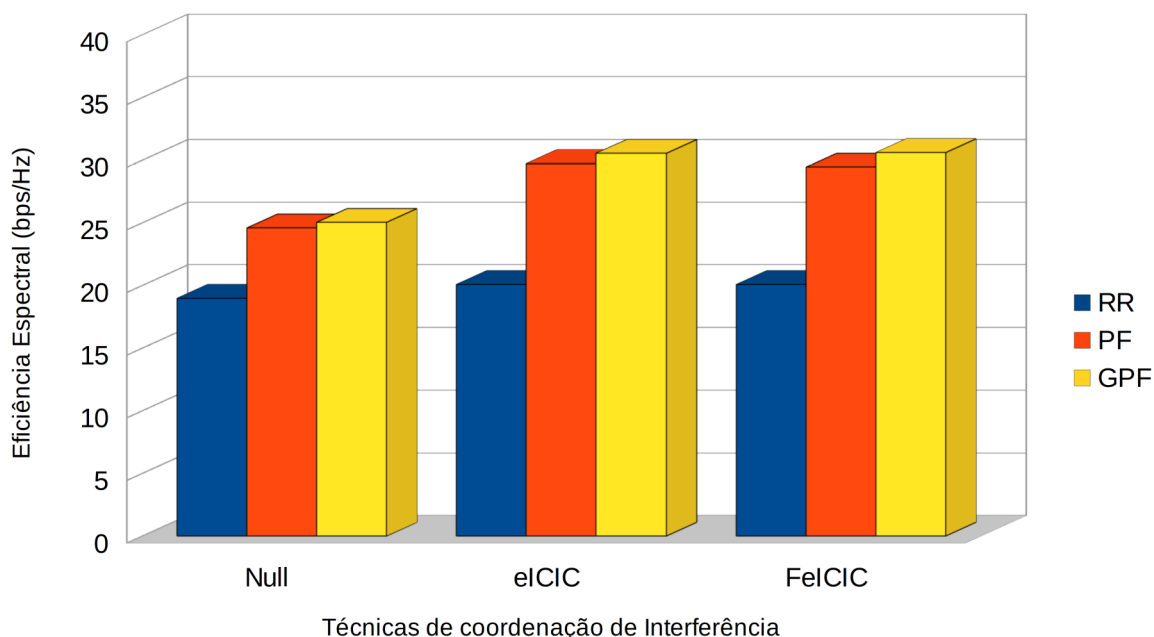
Ao simular o sistema, com duas *picocells* por célula, foram obtidos os resultados de eficiência espectral contidos na Tabela 7 abaixo e mostrados na Figura 12.

TABELA 7: Valores da eficiência espectral medidos em bps/Hz com duas *picocells* por célula

2 pico BS por célula	RR	PF	GPF
Null	18,992	24,578	25,017
eICIC	20,106	29,739	30,558
FeICIC	20,097	29,436	30,627

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

FIGURA 12: Eficiência Espectral em função das técnicas de coordenação de Interferência com duas *picocells* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Pode-se observar que com o aumento do número de *picocells* por células, a diferença entre os valores de eficiência espectral se torna mais notável com a utilização das técnicas de coordenação de interferência e escalonamento. Pelos resultados, a impressão é de que tanto as técnicas de coordenação de interferência como as de escalonamento, passaram a interferir mais, em relação ao cenário anterior. Independente da utilização de um escalonador, apenas com o uso de mais *picocells* por célula, obtém-se elevados e expressivos ganhos. Um fato importante de se destacar é que a partir do aumento do número de *picocells*, as diferenças acabam aumentando com o uso tanto de escalonadores como também de coordenadores de interferência, mostrando mais suas reais contribuições e possibilitando uma comparação entre as diferentes técnicas de maneira mais efetiva, de forma que possa tomar decisões mais assertivas acerca de qual esquema utilizar. Com o cenário 2, foi percebido uma maior elevação de valores daqueles que possuem um escalonador de maior complexidade em comparação com àquele que possui apenas o mais simples de todos (RR). De forma que, os valores entre os esquemas que utilizaram as técnicas PF e GPF se mostraram bastante semelhantes, embora o GPF apresenta uma performance ligeiramente superior, porém não tão significativa.

A técnica GPF não inclui complexidade significativa ao sistema quando

comparada com a técnica PF, pois apenas se têm a adição de expoentes à expressão do PF, produzindo resultados melhores com basicamente a mesma complexidade.

É visto que, com o cenário de duas *picocells*, foi mais perceptível a concepção da contribuição dos algoritmos de escalonamento e técnicas de coordenação de interferência para o sistema de redes móveis.

4.2.2 Eficiência Energética com duas *picocells* por célula

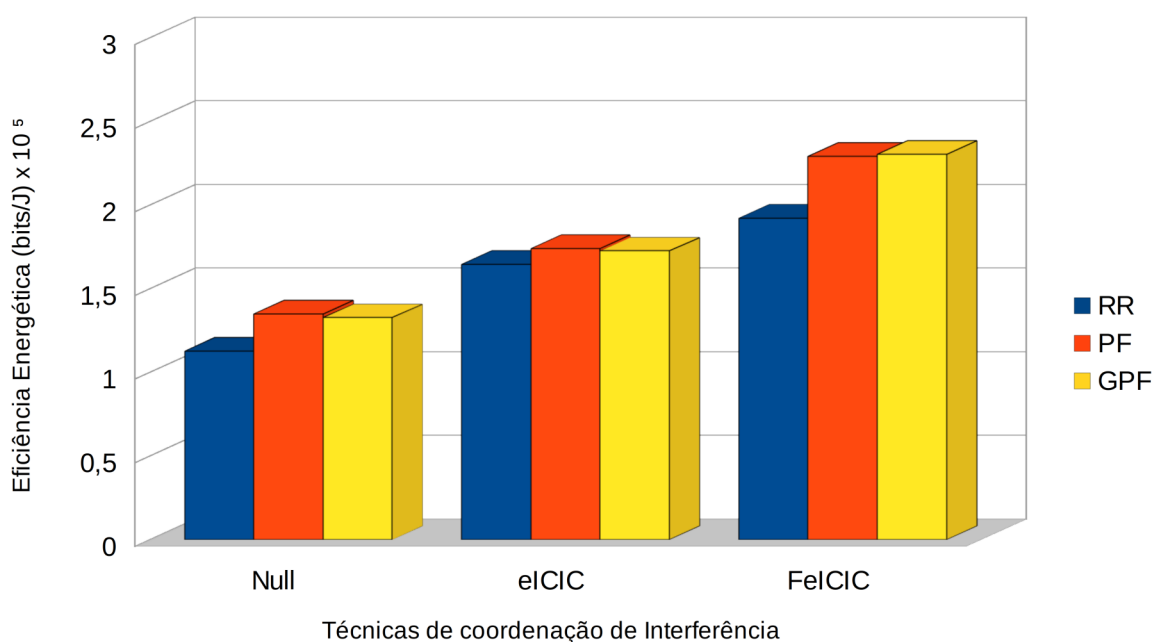
Ao simular o sistema, com duas *picocells* por célula, foram obtidos os resultados de eficiência energética contidos na Tabela 8 e mostrados na Figura 13.

TABELA 8: Valores da eficiência energética medidos em bits/J x 10⁵ com duas *picocells* por célula

2 pico BS por célula	RR	PF	GPF
Null	1,12573	1,34776	1,32569
eICIC	1,64437	1,73895	1,72491
FeICIC	1,92171	2,28961	2,30195

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

FIGURA 13: Eficiência Energética em função das técnicas de coordenação de Interferência com duas *picocells* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

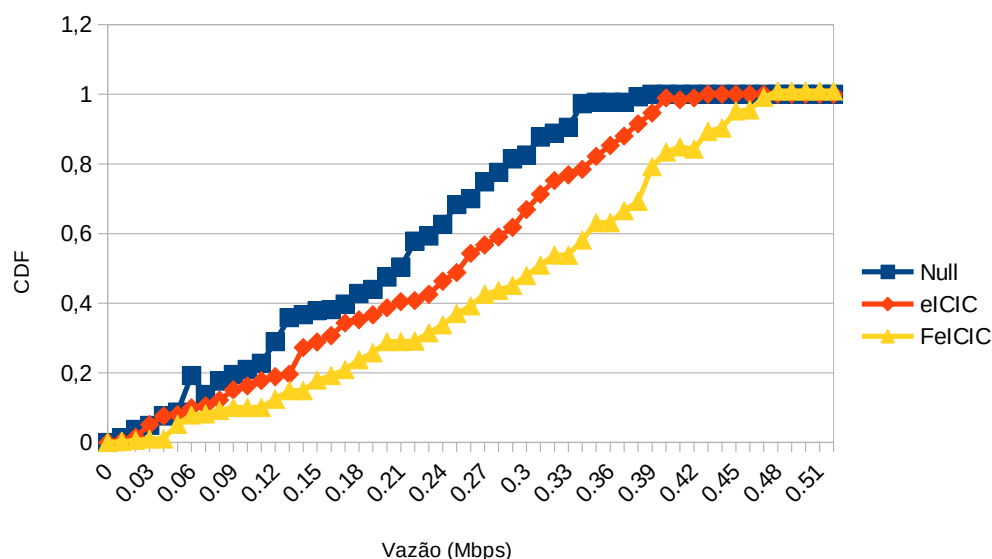
No momento em que se adiciona mais uma *picocell* por célula, os valores em questão de eficiência energética continuam aumentando, de maneira que as diferenças entre os sistemas que não utilizam coordenação de interferência e os que utilizam aumentam da mesma forma. Os sistemas sem coordenação de interferência começam a apresentar uma discrepância entre as opções de escalonadores, podendo analisar assim da mesma forma como na seção anterior, a contribuição e a importância da quantidade de *picocell* por célula, de forma que, quando são adicionadas ao sistema é incrementado consequentemente os valores de eficiência com a utilização de escalonadores eficazes.

É notável que com o aumento do número de *picocells* por célula a diferença entre os sistemas com coordenação de interferência aumenta gradativamente. Além disso, que a técnica FeICIC se mostra cada vez mais com um melhor desempenho comparada com o eICIC diante do aumento do número de *picocells*.

4.2.3 Vazão dos 5% piores usuários com duas *picocells* por célula

Ao simular o sistema, com duas *picocells* por célula, foram obtidos os resultados de vazão contidos na Figura 14 e Figura 15.

FIGURA 14: A *cumulative distribution function* (CDF) em função da vazão dos 5% piores usuários com duas *picocells* por célula

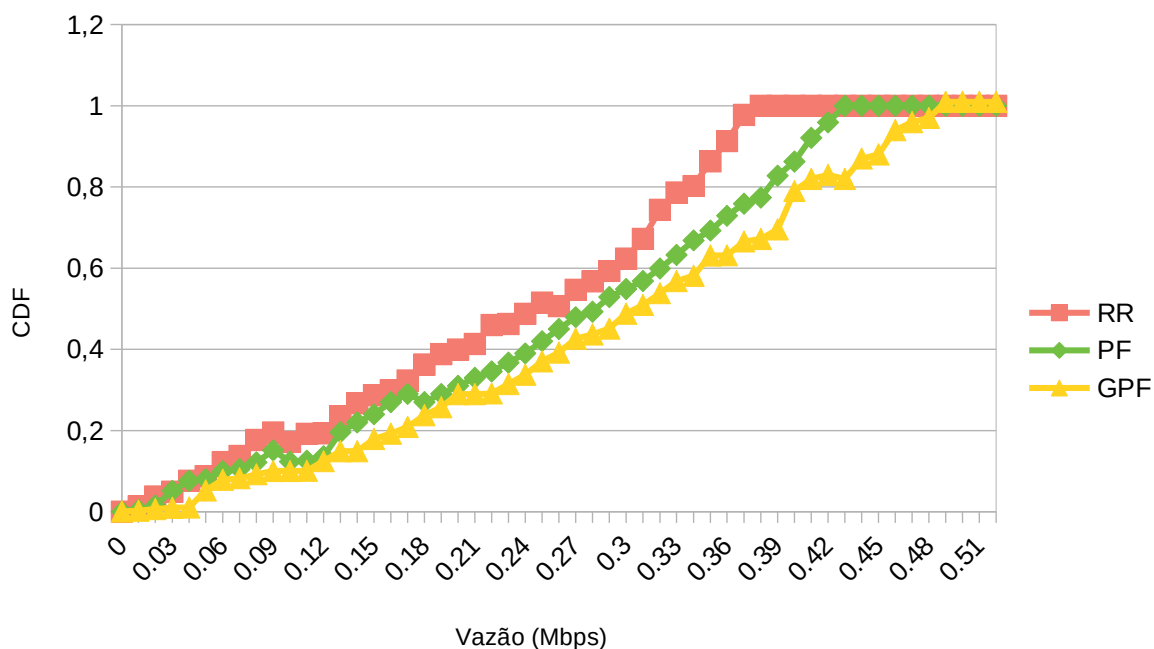


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

No momento em que se adiciona duas *picocells* por célula os valores de vazão acabam aumentando ainda mais quando comparados com o cenário 1. Um fator importante de se notar, é o de que os aumentos se tornam mais significativos para os

ambientes que utilizam as técnicas de coordenação de interferência. Como destaque para o FeICIC que expande ao longo do eixo da vazão, assumindo valores cada vez mais satisfatórios, que tendenciam também a se distanciar cada vez mais do eICIC, em termos de valores da vazão, à medida que se adiciona mais *picocells* por célula, registrando melhores desempenhos.

FIGURA 15: CDF em função da vazão dos 5% piores usuários dos algoritmos de escalonamento utilizando a técnica FeICIC com duas *picocells* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

No cenário com duas *picocells* por célula é notado um maior distanciamento em termos de vazão do algoritmo GPF com relação aos outros dois, RR e PF. É notado que à medida que o algoritmo GPF é implementado em conjunto com a técnica de coordenação de interferência FeICIC, seus resultados de vazão aumentam em uma maior proporção com o acréscimo de *picocells* por célula com relação aos outros escalonadores.

4.3 CENÁRIO 3

No terceiro cenário, os resultados também são divididos de acordo com as variáveis: Eficiência Espectral, Eficiência Energética e Vazão. Porém neste cenário são

consideradas três *picocells* por célula. São mostrados os resultados das simulações, variando as técnicas de coordenação de interferência (eICIC e FeICIC), assim como os algoritmos de escalonamento (RR, PF e GPF). Em todas as situações foram construídas tabelas que informam os resultados obtidos com relação a eficiência energética do sistema simulado

4.3.1 Eficiência Espectral com três *picocells* por célula

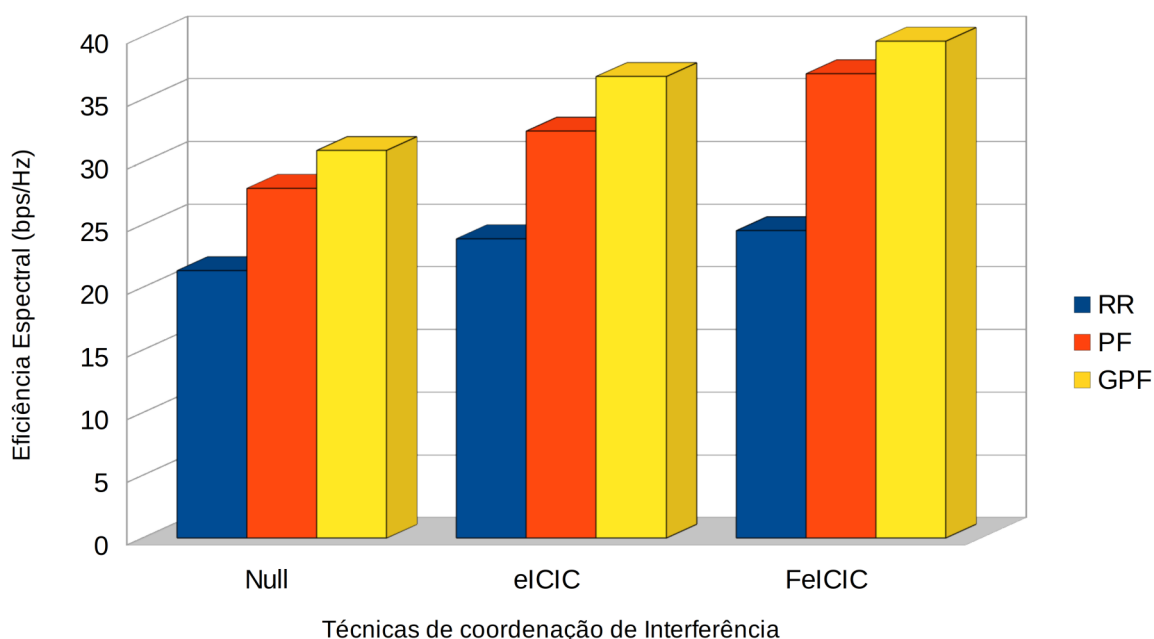
Ao simular o sistema, com três *picocells* por célula, foram obtidos os resultados de eficiência espectral contidos na Tabela 9 abaixo e mostrados na Figura 16.

TABELA 9: Valores da eficiência espectral medidos em bps/Hz com três *picocells* por célula

3 pico BS por célula	RR	PF	GPF
Null	21,355	27,931	30,914
eICIC	23,901	32,466	36,834
FeICIC	24,519	37,067	39,662

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

FIGURA 16: Eficiência Espectral em função das técnicas de coordenação de Interferência com três *picocells* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

No cenário com três *picocells* por célula pode-se notar o quão grande é a contribuição para os valores de eficiência espectral a utilização de mais *picocells* por célula. Isso se justifica pelo fato de uma maior otimização dos recursos o que possibilita uma maior qualidade de serviço aos usuários. Em comparação com os gráficos e resultados anteriores, é notável a contribuição maior em termos de eficiência utilizando uma maior quantidade de *picocells*, além de acentuar a implementação tanto dos algoritmos de escalonamento quanto também dos esquemas de coordenação de interferência.

Comparando com os valores apresentados na seção 4.1.1, é visto que a diferença entre os escalonadores aumentou significativamente com o aumento no número de *picocells* por célula, além de que, da mesma maneira as técnicas de coordenação de interferência tornaram-se mais efetivas.

4.3.2 Eficiência Energética com três *picocells* por célula

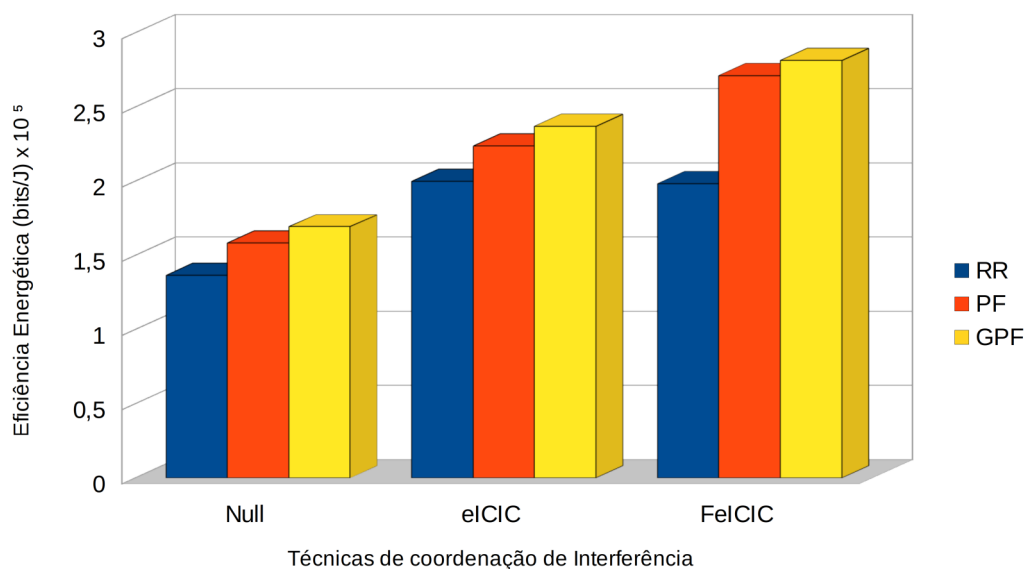
Ao simular o sistema, com três *picocells* por célula, foram obtidos os resultados de eficiência energética contidos na Tabela 10 e mostrados na Figura 17.

TABELA 10: Valores da eficiência energética medidos em bits/J x 10⁵ com três *picocells* por célula

3 pico BS por célula	RR	PF	GPF
Null	1,36324	1,58191	1,6921
eICIC	1,99731	2,23552	2,37028
FeICIC	1,98377	2,71203	2,81327

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

FIGURA 17: Eficiência Energética em função das técnicas de coordenação de Interferência com três *picocells* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

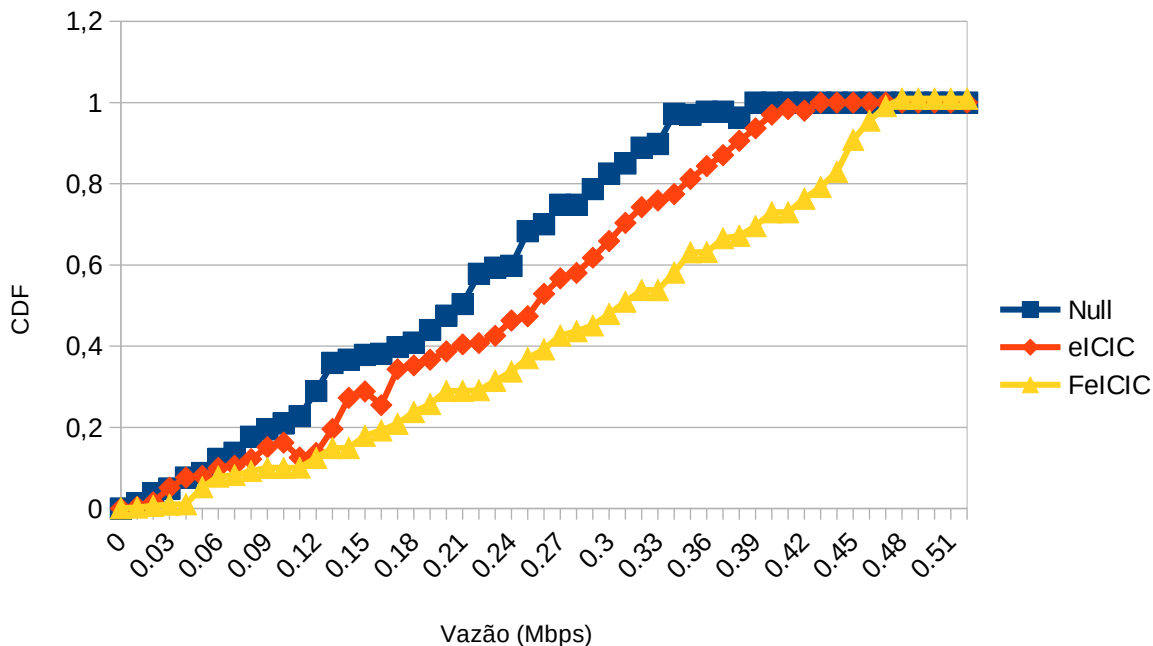
É importante considerar o destaque para o escalonador GPF que em conjunto com a técnica de coordenação de interferência FeICIC conseguiu resultados bastante satisfatórios quando comparados com as outras técnicas utilizadas.

Contribuindo para o que foi dito dos resultados anteriores, a partir do momento em que se adiciona mais *picocells* por célula no ambiente, os resultados tenderam a apresentar melhores desempenho. Da mesma forma que, a técnica GPF juntamente com o FeICIC se mostrava em todos os cenários crescer à medida que se adicionava mais *picocells* na rede simulada, cenário esse analisado na seção a seguir.

4.3.3 Vazão dos 5% piores usuários com três *picocells* por célula

Ao simular o sistema, com três *picocells* por célula, foram obtidos os resultados de vazão contidos na Figura 18 e Figura 19.

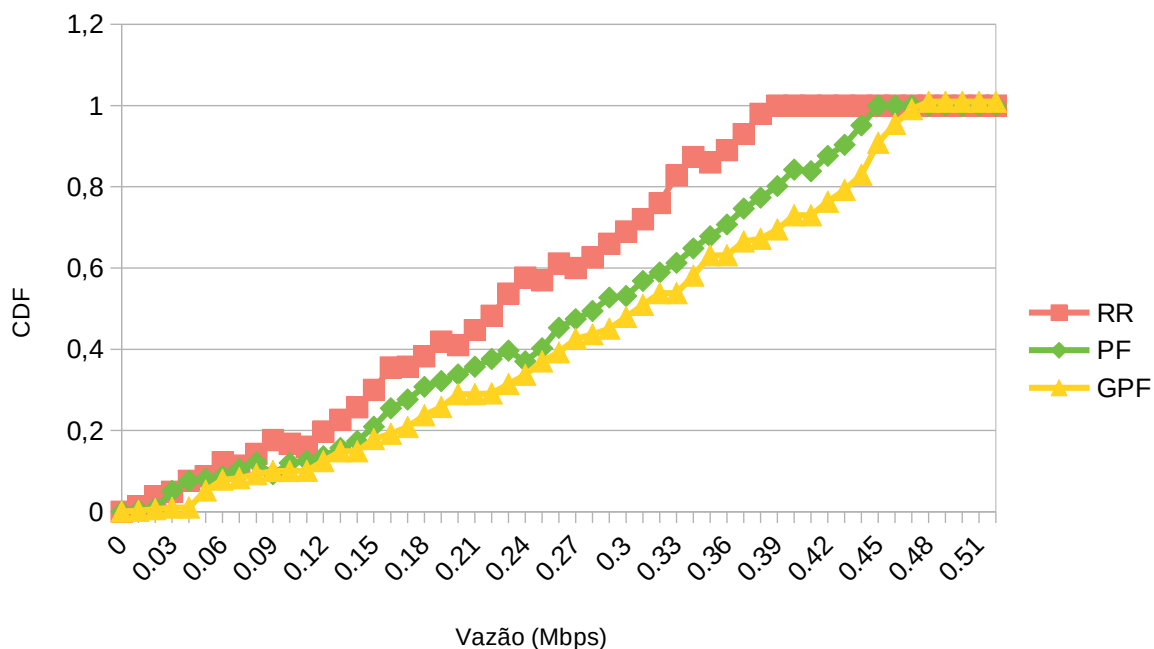
FIGURA 18: A *cumulative distribution function (CDF)* em função da vazão dos 5% piores usuários com três *picocells* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Por fim é notado uma maior contribuição em termos de vazão com a utilização da técnica FeICIC, aumentando assim mais os seus respectivos valores, se distanciando cada vez mais do eICIC e do cenário em que nenhuma técnica de coordenação de interferência é implementada. Dessa forma, quando as operadoras que fornecem os serviços de redes móveis, necessitam entregar/melhorar a vazão dos usuários, por todos os cenários a técnica FeICIC se mostra mais adequada. Como todos os valores de eficiência energética e também eficiência espectral se mostraram mais efetivos com o algoritmo de escalonamento GPF, o mesmo foi o escolhido para a utilização nas simulações de vazão apresentadas. Pode-se considerar que o cenário com resultados mais satisfatórios seria o da utilização do algoritmo GPF em conjunto com a técnica de coordenação de interferência FeICIC, de maneira que, com o aumento do número de *picocells* por célula, os resultados tendem a melhorar cada vez mais em conjunto com as técnicas apresentadas e estudadas.

FIGURA 19: CDF em função da vazão dos 5% piores usuários dos algoritmos de escalonamento utilizando a técnica FeICIC com três *picocells* por célula



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

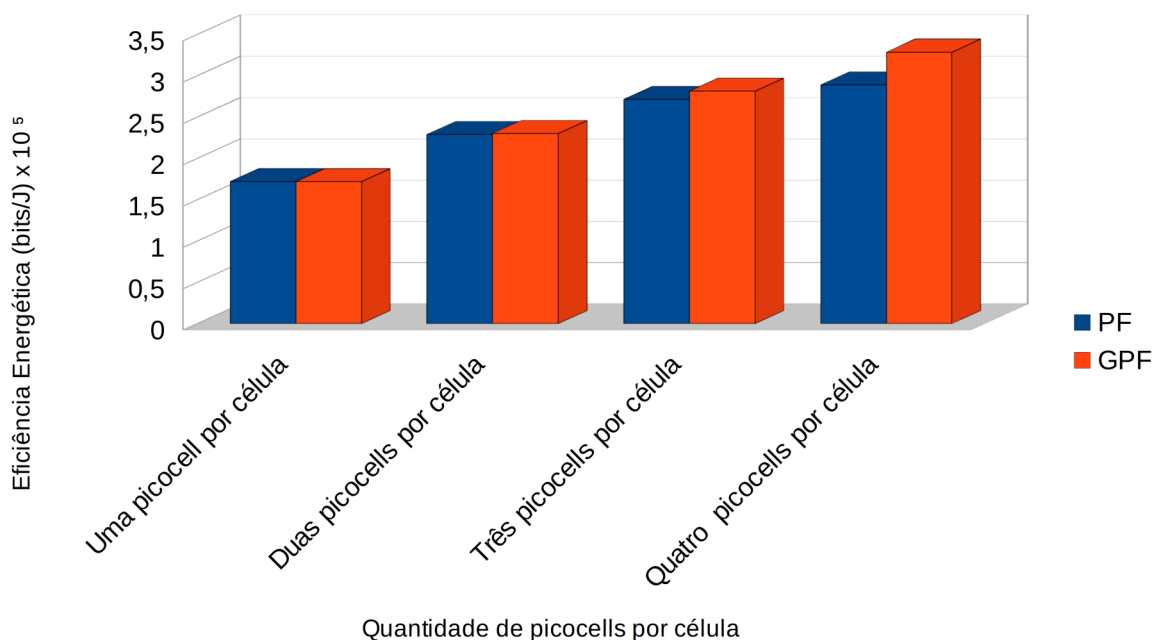
Pela Figura 19 é notado uma maior contribuição do GPF em termos de desempenho de vazão ao longo do acréscimo de *picocells* por célula. No cenário com três *picocells* isso fica mais evidente, porque os valores de vazão para o algoritmo GPF em conjunto com a técnica de coordenação de interferência FeICIC se distanciam ainda mais dos resultados do PF em conjunto com o FeICIC. É notável que à medida em que se aumenta o número de *picocells* por célula o algoritmo GPF se mostra cada vez mais eficiente, estabelecendo-se como um algoritmo de baixa complexidade de implementação que gera resultados satisfatórios em comparação com as outras técnicas abordadas.

4.4 COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS COM O AUMENTO DO NÚMERO DE *PICOCELLS* POR CÉLULA

Quanto maior a quantidade de *picocells* por célula, acentua-se mais a diferença entre as técnicas de escalonamento e os benefícios da GPF com relação a PF.

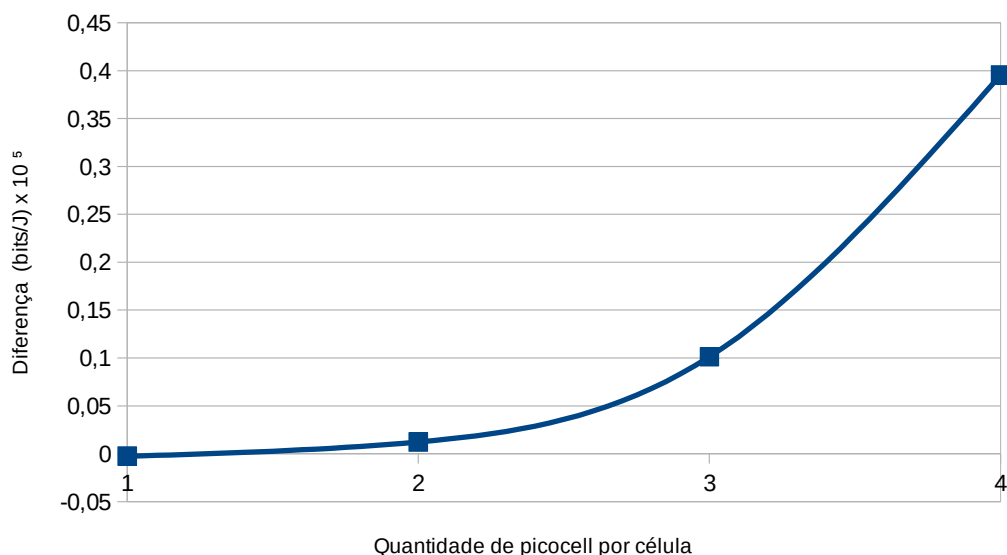
Utilizando o FeICIC como técnica de coordenação de interferência base para gerar um comparativo entre os esquemas de escalonamento PF e GPF variou-se a quantidade de *picocells* por célula. Este cenário é representado pela Figura 20 logo em seguida, tomando como exemplo os valores gerados de eficiência energética anteriormente apresentados, assim como o cenário com 4 *picocells* por célula.

FIGURA 20: Eficiência Energética em função das quantidades de *picocells* por célula, utilizando o FeICIC como técnica de coordenação de interferência.



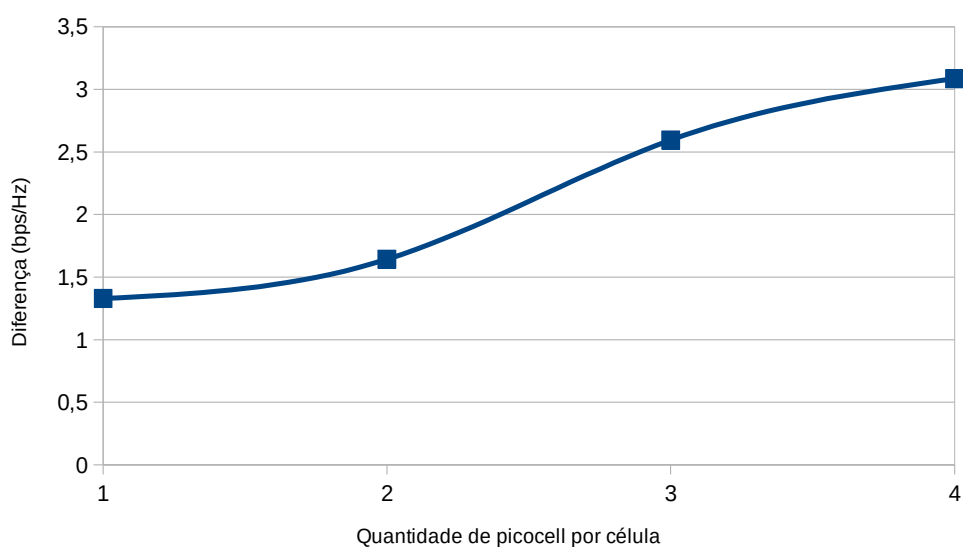
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

A seguir é representado pela Figura 21 a diferença entre os valores de Eficiência Energética entre as técnicas GPF e PF de escalonamento, utilizando o FeICIC para coordenação de interferência, a medida em que se aumenta o número de *picocells* por célula.

FIGURA 21: Diferença entre os valores de eficiência energética pela quantidade de *picocells* por célula

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

A seguir é representado pela Figura 22 a diferença entre os valores de Eficiência Espectral entre as técnicas GPF e PF de escalonamento, utilizando o FeICIC para coordenação de interferência, a medida em que se aumenta o número de *picocells* por célula.

FIGURA 22: Diferença entre os valores de eficiência espectral pela quantidade de *picocells* por célula

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

Pelos resultados anteriormente mostrados é possível concluir que em ambientes com maiores quantidades de *picocells*, maior será a performance da técnica

GPF em conjunto com a FeICIC em comparação com os outros esquemas. De maneira que, é projetado a partir dos resultados analisados, que com um cenário com uma maior quantidade de *picocells* por célula a rede tende a se tornar cada vez mais eficiente, tanto em termos de espectro quanto de energia. Ao passo que ao mesmo tempo não é adicionado basicamente nada de complexidade ao sistema, e também, com o aumento das *picocells*, por um lado cresce-se a interferência, por outro lado há mais possibilidades de utilizar as *picocells* como alternativas de tráfego para desafogar a *macrocell*.

Com todos os resultados gerados e analisados é possível elaborar conclusões com relação ao desempenho do algoritmo de escalonamento implementado e, da mesma forma, estabelecer um comparativo com relação aos resultados apresentados em [11]. A eficiência espectral é essencial para o uso adequado dos recursos da rede, dessa forma, se torna importante a sua análise e simulação. Como demonstrado em [11], o algoritmo GPF consegue fornecer uma eficiência espectral superior com relação ao PF, de maneira que, condiz com os resultados obtidos neste trabalho, mostrando que o algoritmo de escalonamento GPF entrega uma maior eficiência espectral ao distribuir os recursos da rede entre os usuários. De maneira semelhante ocorre para os resultados obtidos de eficiência energética e também para os valores de vazão dos 5% piores usuários.

No final de todas as simulações é possível verificar que o comportamento do algoritmo GPF esteve de acordo com o que foi apresentado em [11], pode-se notar ainda que à medida que o número de *picocells* por células aumenta o seu desempenho cresce ainda mais em comparação com as técnicas PF e RR, sugerindo que quanto mais *picocells* sejam adicionadas, maiores serão as contribuições em termos de eficiência espectral, energética e vazão pelo algoritmo de escalonamento GPF.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados fornecidos a partir das simulações realizadas, o Capítulo 5 apresenta um apanhado geral sobre o algoritmo de escalonamento GPF, bem como quais são as contribuições do presente trabalho e quais as perspectivas de trabalhos futuros abordando o assunto.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo visa fornecer algumas considerações finais acerca do trabalho como um todo, apresentando conclusões a partir dos resultados obtidos nas simulações realizadas. Além disso, também são apresentados os trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir do aqui desenvolvido.

5.1 CONCLUSÕES

Durante o Capítulo 1, as redes LTE-A Heterogêneas, assim como os algoritmos de escalonamento, foram contextualizados. O Capítulo 2 forneceu as informações básicas e estudos necessários para compreender minimamente o sistema de objeto de estudo deste trabalho. O Capítulo 3 detalhou a forma que os experimentos foram desenvolvidos para, no Capítulo 4, apresentar os resultados obtidos. Analisando os resultados fornecidos no capítulo anterior, é possível afirmar que o algoritmo de escalonamento GPF adicionado, se apresenta nos cenários avaliados como uma técnica simples e que mostrou grande eficiência quando implementado em conjunto com a técnica FeICIC.

A contribuição do GPF não se mostra bem visual para quem está analisando o seu desempenho em um primeiro momento, porém a medida que se inclui mais *picocells* no sistema seu desempenho começa a se destacar. Além disso, observa-se que a melhora citada é acentuada à medida que se inclui mais *picocells* por célula. Por fim, destaca-se que esse é o cenário esperado para que as redes móveis de última geração atendam aos requisitos esperados.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

O sistema ainda pode ser estudado para verificar a utilização de outros escalonadores e também comparar com o aqui implementado. É possível a proposta de novas técnicas e implementações tanto aos cenários aqui trabalhados, como também a utilização de outros ambientes de simulação, por meio da alteração de parâmetros. Para trabalhos futuros, pretende-se a adição de novas métricas de desempenho, de forma que, possam contribuir para tornar mais completa a análise realizada.

REFERÊNCIAS

- [1] LIU, Y.; CHEN, C. S.; SUNG C. W.; SINGH C. **A Game Theoretic Distributed Algorithm for FeICIC Optimization in LTE-A HetNets**. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, 2017.
- [2] Dahlman, E.; Parkvall, S.; Sköld, J. **4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G**. 3. ed. 2016.
- [3] Cox, C.; **AN INTRODUCTION TO LTE, LTE-ADVANCED, SAE, VoLTE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS**. 2. ed. 2014.
- [4] Sesia, S., Toufik, I., and Baker, M. **LTE - the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice**. Wiley, 2nd edition. 2011.
- [5] Ali, M. S. **An overview on interference management in 3 gpp lte-advanced heterogeneous networks**. 2015.
- [6] Holma, H. and Toskala, A. **LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced**. New York, NY, USA: Wiley. 2012.
- [7] Liu, Y., Chen, C. S., and Sung, C. W. **Distributed enhanced inter-cell interference coordination (eicic) in lte-advanced hetnets: A potential game approach**. In 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pages 1–5. 2015.
- [8] Holma, H. and Toskala, A. **LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced**. New York, NY, USA: Wiley. 2012.
- [9] Archi Delphinanto; Ben Hillen; Igor Passchier; Bas van Schoonhoven; Frank den Hartog (January 2009). **"Remote Discovery and Management of End-User Devices in Heterogeneous Private Networks"**. 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2009): 1–5. doi:10.1109/CCNC.2009.4784889
- [10] Samuel O. A., Basel B., Yi W., Simeon K., **Generalized Proportional Fair (GPF) Scheduler for LTE-A**, 2017.
- [11] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, **"Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey,"** IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 15, no. 2, pp. 678–700, 2013.
- [12] M. Dehghani, K. Arshad, and R. MacKenzie, **"LTE-Advanced Radio Access Enhancements: A Survey,"** Wirel. Pers. Commun., vol. 80, no. 3, pp. 891–921, 2014
- [13] M. Simsek, M. Bennis, and I. Güvenç, **"Enhanced intercell interference coordination in HetNets: Single vs. multiflow approach,"** in Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Dec. 2013, pp. 725–729.

- [14] N. Trabelsi, C. S. Chen, R. El Azouzi, L. Roullet, and E. Altman, “**User association and resource allocation optimization in LTE cellular networks,**” *IEEE Trans. Netw. Service Manage.*, vol. 14, no. 2, pp. 429–440, Jun. 2017.
- [15] Y. Liu, C. S. Chen, and C. W. Sung, “**Distributed enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE-Advanced HetNets: A potential game approach,**” in *Proc. IEEE 81st Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, May 2015, pp. 1–5.
- [16] Júnio M., Éderson R. S., Paulo R. Guardieiro., “**Algoritmos QoS-aware para o Escalonamento Downlink LTE-A em Cenários de Tráfego Misto: Uma Comparação de Desempenho**”. XXXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, 16-19 de setembro de 2018, Campina Grande, PB.

APÊNDICE 1 – CÓDIGO DA FUNÇÃO GPF IMPLEMENTADA

```

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

AttachList = find([UE.attach]==station.NameTag);
AvaTimeSlots = sum(station.ABS(1:NumTimeSlots)); % Subframes disponíveis (intervalos de tempo),
% menores ou iguais a NumTimeSlots devido a ABS
NumUE = length(AttachList);

if AvaTimeSlots > 0 && NumUE > 0
    [UE(AttachList)] = Throughput(station.NameTag,UE(AttachList),
    NoiseDen,NoiseFigure,BWperRB,NumTimeSlots,NumFreqSlots);
    UEID = [UE(AttachList).ID];
    allocation = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots);
    ABSix = find(station.ABS(1:NumTimeSlots) == 0); % Os índices de subframes que são ABSs
    T = zeros(NumUE,NumTimeSlots+1); % Long-term taxa de transferência média de cada usuário
    %em cada subquadro.
    % A primeira coluna representa o histórico passado, a segunda coluna
    %representa o primeiro subquadro, ...
    ThroughputProfile = zeros(NumFreqSlots,NumTimeSlots,NumUE); % Registra a taxa de transferência
    % de cada UE em cada PRB
    for ue = 1:NumUE
        ThroughputProfile(:, :, ue) = [reshape(UE(AttachList(ue)).ThroughputPerPRB,
        [NumTimeSlots,NumFreqSlots])'];
    end

    memory = 0;
    for prb = 1:NumTimeSlots*NumFreqSlots
        % Descobrimo qual subquadro é
        sf = ceil(prb/NumFreqSlots);
        if sf ~= memory

            for ue = 1:NumUE
                T(ue,sf+1) = [(1-1/window)*T(ue,sf) + 1/window *
                sum([allocation(:,sf)==UEID(ue)].*ThroughputProfile(:,sf,ue))]^0.7;
            end
            memory = sf;
        end
        if isempty(find(ABSix==sf))
            % Obtém taxas de transferência do UE nesse PRB
            PRB_ix = [prb prb+cumsum(NumFreqSlots*NumTimeSlots*ones(1,NumUE-1))];
            throughput = [ThroughputProfile(PRB_ix)]^0.6;
            % Descubre para qual UE este PRB deve ser alocado
            if ~isempty(find(T(:,sf+1)==0))
                nonzero_ix = find(T(:,sf+1));
                throughput(nonzero_ix) = 0;
                [nouse,ueix] = max(throughput);
            else
                [nouse,ueix] = max(throughput./T(:,sf+1));
            end
            allocation(prb) = UEID(ueix);

            T(ueix,sf+1) = [(1-1/window)*T(ueix,sf) + 1/window *
            sum([allocation(:,sf)==UEID(ueix)].*ThroughputProfile(:,sf,ueix))]^0.7;
        end
    end
end

```