



## ANÁLISE DE TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA INTER-CELULAR PARA REDES LTE-A HETEROGÊNEAS

Raoni Exaltação Masson<sup>\*1</sup> e Ederson Rosa da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FEELT - Universidade Federal de Uberlândia

<sup>2</sup>FEELT - Universidade Federal de Uberlândia

**Resumo** - O objetivo desta pesquisa foi analisar estratégias importantes em redes móveis LTE-A através do estudo e simulação de técnicas avançadas de coordenação de interferência em redes heterogêneas. A evolução das redes móveis celulares trouxe consigo métodos para otimizar as eficiências energética e espectral de modo que seja possível atender a crescente demanda dos usuários. A densificação da rede permite um melhor aproveitamento do espectro, mas tem como consequência o aumento da interferência inter-celular. O artigo faz uma breve explanação sobre os métodos utilizados para reduzir o impacto da interferência e melhorar o desempenho das redes móveis LTE-A. Os resultados obtidos na simulação trazem uma comparação das técnicas eICIC e FeICIC quando variados certos parâmetros na topologia da rede.

**Palavras-Chave**- Escalonamento, FeICIC, LTE/LTE-Advanced, redes móveis, redes heterogêneas, técnica de coordenação de interferência.

### ANALYSIS OF INTER-CELL INTERFERENCE COORDINATION TECHNIQUES FOR HETEROGENEOUS LTE-A NETWORKS

**Abstract** - The objective of this research was to analyze important strategies in mobile networks LTE-A through the study and simulation of advanced interference coordination techniques in heterogeneous networks. The evolution of cellular mobile networks has brought with it methods for optimizing energy and spectral efficiencies so that it can meet growing user demand. Network densification allows for better spectrum utilization but results in increased inter-cellular interference. The article gives a brief explanation of the methods used to reduce the impact of interference and improve the performance of LTE-A mobile networks. The results obtained in the simulation provide a comparison of eICIC and FeICIC techniques when varying certain parameters in the network topology.

**Keywords** - FeICIC, LTE/LTE-Advanced, mobile network, heterogeneous network, coordination interference techniques, scheduling.

\*raoniemasson@gmail.com

## I. INTRODUÇÃO

O aumento crescente na demanda de usuários de comunicações *wireless*, em especial serviços de redes móveis como LTE-A (*Long Term Evolution - Advanced*) e a próxima geração (5G), exigirá uma maior capacidade das redes de celulares atuais. É esperado um aumento de aproximadamente 1000 vezes no volume de tráfego de dados para as redes 5G, uma tarefa desafiadora para a próxima década de evoluções de redes móveis [1]. Além disso, a tecnologia 5G tem como proposta três grandes melhorias se comparado com as redes LTE: conectar tudo à qualquer coisa, diminuição da latência, e um aumento considerável do *throughput* [2].

Para oferecer serviços que são sensíveis à latência da rede, como *streaming* de vídeos e VoIP (*Voice over IP*), as operadoras de telefonia móvel investem fortemente em pesquisas em busca de alcançar a QoS (*Quality of Service*) necessária para tais aplicações. Neste sentido, um dos maiores objetivos das redes LTE e LTE-A é o de alcançar uma alta eficiência espectral [3]. Para tal, as redes LTE-A utilizam o reuse-1, um modelo FRF (*Frequency Reuse Factor*) para melhorar a QoE (*Quality of Experience*). Como o espectro é um recurso finito e bastante caro, a vantagem de utilizar esquemas de reutilização de frequência é a capacidade de poder utilizar o mesmo espectro para transmissão em células diferentes. Entretanto, o reuso do espectro também trás pontos negativos como o surgimento da ICI (*Inter-Cell Interference*), principalmente para os usuários que estão nas bordas das células [8].

De maneira geral, as redes de comunicações móveis sofrem com dois tipos de interferência, chamadas interferência intra-celular e interferência inter-celular [7]. A interferência intra-celular ocorre entre canais dentro de uma mesma célula, quando usadas portadoras com frequências adjacentes. Já a interferência inter-celular é causada quando células adjacentes utilizam o mesmo canal de frequência para transmissão. Os modelos de FRF, por exemplo, normalmente ocasionam na ICI.

Com o intuito de otimizar a utilização de espectro e para alcançar altas taxas de transmissão de dados, as redes LTE se baseiam no emprego do OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) no sentido de *downlink* [4]. A técnica

de acesso OFDMA consiste na transmissão de um grande número de *sub-carriers* de banda estreita, paralelas e ortogonais entre si, sendo que a menor unidade de alocação de recurso para o UE (*User Equipment*) é denominada RB (*Resource Block*) [5]. Uma das grandes vantagens desta técnica é a ortogonalidade entre as *sub-carriers*, pois, deste modo, não há interferência intra-celular. Entretanto, por causa do fator de reuso de frequência a interferência inter-celular é um dos maiores problemas das redes LTE, causando colisões entre RBs de células adjacentes [5]. Três abordagens foram consideradas para lidar com o problema de interferência inter-celular: 1) randomização de interferência; 2) cancelamento de interferência; e 3) coordenação de interferência;

Através da utilização de um embaralhamento pseudo-aleatório, a randomização busca suprimir a interferência por um processo específico no terminal móvel. O método de randomização não diminui o nível de interferência e, portanto, não melhora a performance dos usuários nas bordas da célula. O cancelamento de interferência inter-celular objetiva suprimir a interferência no receptor (UE) através da utilização de processamento espacial com múltiplas antenas ou detecção/subtração de interferência. O método de cancelamento de interferência implica em uma alta complexidade computacional e necessita de características específicas do receptor. Por fim, a coordenação de interferência inter-celular utiliza a técnica de escalonamento dos dados transmitidos. Os recursos do tempo e frequência são distribuídos entre os usuários da rede de um maneira coordenada entre as células [6].

Para permitir que o 5G seja capaz de lidar com o aumento expressivo de dados, três áreas de desenvolvimento foram propostas para as redes *wireless*, sendo essas:

- 1) Densificação da rede - desenvolvimento massivo de *smallcell*;
- 2) Aumento da eficiência espectral - CoMP (*Coordinated Multi-Point operation*), MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), técnicas de codificação aprimoradas;
- 3) Espectro adicional - possível utilização de ondas milimétricas.

CoMP ou MIMO são tecnologias emergentes que foram propostas para reduzir a interferência inter-celular. CoMP foi introduzida no LTE-A pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) na *Release 11*. Entretanto, a coordenação entre todas as células na rede é uma tarefa extremamente complexa, devido a necessidade de sincronização entre as células que serão coordenadas, cabeçalho adicional, processamento de sinais adicional, formação de feixes (*beamforming*) complexos e escalonamento entre todas as BSs (*Base Station*) [9].

Estudos recentes apontam que ondas milimétricas podem ser usadas para aumentar a capacidade das já saturadas frequências de 700 MHz até 2.6 GHz. O congestionamento do espectro é muito menor na faixa das ondas milimétricas, o que se traduz diretamente em uma alta taxa de transferência de dados. O espectro nas ondas milimétricas permite uma expansão significativa das larguras de bandas dos canais presentes na atual tecnologia das redes LTE-A, diminuindo também a latência para o tráfego de dados digitais, provendo assim uma melhora substancial para aplicações que requerem latência baixa. Além disso, por causa do seu pequeno comprimento

de onda, pode-se explorar melhor a polarização e novas técnicas de processamento espacial como massivo MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e formações de feixes adaptativos [11].

Dois grandes problemas surgem quando se fala na utilização de ondas milimétricas para comunicações *wireless*: atenuação por causa da absorção do sinal pelos componentes atmosféricos e atenuação da potência do sinal por causa de penetração e/ou reflexão em áreas com uma grande quantidade de obstáculos. Entretanto, deve-se levar em consideração que o tamanho das células em utilização atualmente em ambientes urbanos já são consideravelmente reduzidas - na ordem de 200 metros. Em células desta ordem, a absorção atmosférica (incluindo chuvas) não cria uma grande perda adicional de sinal, principalmente na faixa de 28 GHz e 38 GHz [11]. Indiretamente, a adição de espectro na faixa de ondas milimétrica já faz com que as redes móveis caminhem mais ainda em direção à densificação.

O tamanho das células é um fator que afeta o número de usuários que uma BS pode suportar. Uma das estratégias mais utilizadas para aumentar a capacidade das redes móveis através do aumento do reuso de frequência é a utilização de células chamadas SC (*small cells*) que empregam pico BSs, isto é, BSs com complexidade e potência menores. Baseada na densificação celular, as HetNets (*Heterogeneous Network*) foram propostas pelo 3GPP para lidar com a quantidade limitada de espectro [12].

A ideia por trás das HetNets é sobrepor as redes LTE homogêneas existentes, comumente chamadas de camada macro, com BSs de baixa complexidade e menor potência, reutilizando o espectro para aumentar a taxa de bits por unidade de área. Como a cobertura já é fornecida pela macro BS, as SC são frequentemente colocadas em áreas densamente povoadas para aumentar a capacidade da rede LTE [12]. O desenvolvimento de SC altamente densificadas em HetNets levará a uma rede severamente limitada por interferência devido a transmissão de diferentes usuários sobre as mesmas bandas de frequência, o que torna um fator limitante para o desempenho das HetNets [13].

O surgimento das HetNets dá origem a dois problemas desafiadores no gerenciamento de redes *wireless*. Primeiramente, como as pico BSs transmitem seus sinais em baixa potência se comparado com as macro BSs, alguns usuários podem ser atraídos a se conectar com as macro BSs mesmo que estejam próximos das pico BSs, o que causará uma subutilização das pico BSs e sobrecarregará as macro BSs. O segundo problema é a grande quantidade de interferência inter-celular gerada pelas macro BSs aos usuários conectados à pico BS. Para prevenir que estes usuários sofram com baixíssimas taxas de transmissão o 3GPP propôs nas *Releases 10 e 11* a utilização da eICIC (*enhanced Inter-Cell Interference Coordination*) e FeICIC (*Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination*) respectivamente [10].

## A. TRABALHOS CORRELACIONADOS

Diversos tipos de pesquisas sobre técnicas de coordenação de interferência inter-celular foram realizadas na literatura. A pesquisa em [10] e [12] tiveram uma abordagem diferente e propuseram um algoritmo baseado em *Game Theory* para oti-

mizar as técnicas de eICIC e FeICIC em HetNets LTE-A. Foram realizadas diversas análises como ganho de eficiência espectral e energética, justiça e *throughput* para usuários nas bordas das células, e demonstrado um ganho de desempenho significativo se comparado com um ambiente sem ICIC.

Várias técnicas de ICIC para redes LTE-A heterogêneas foram abordadas em [14]. O artigo realiza uma extensa análise sobre as vantagens e desvantagens de cada técnica, sendo que o autor as classifica em técnicas ICIC baseadas em TDM e FDM. Por fim é feito uma análise sobre a utilização de CA (*Carrier Aggregation*) e CoMP como um esquema complementar das técnicas ICIC para solução de problemas de interferência em redes heterogêneas.

Na pesquisa desenvolvida em [15] é feito um estudo da evolução de mecanismos de atenuação de interferências abrangendo as *Releases* 8-11 do 3GPP, sendo realizado também uma comparação entre diferentes modelos de ICIC como eICIC, FeICIC e CoMP. Os autores concluíram, finalmente, uma evolução nos ganhos de performance no *throughput* para usuários nas bordas das células se comparado os métodos utilizados do *Release* 8 para o 11.

No artigo [16] foi realizado a comparação de técnicas ICIC tradicionais como reuse-3, FFR e SFR (*Soft Frequency Reuse*) com o modelo reuse-1. A pesquisa efetuou um estudo de desempenho dos seguintes parâmetros: eficiências espectrais e energética, índice justiça, *throughput* e satisfação do usuário. Os resultados da simulação mostram uma comparação entre os modelos citados.

Ainda que haja inúmeras pesquisas relacionadas às técnicas de coordenação de interferência inter-celular, é possível notar que o assunto é abrangente e diverso, sendo factível o estudo em diferentes ambientes de simulação com a utilização de diversas formas de otimização das técnicas já conhecidas. Desta forma, não encontra-se muitas fontes que avaliem diretamente a comparação entre as técnicas de coordenação eICIC, FeICIC e um ambiente sem controle de interferência em função do número de usuários na rede. Tal estudo justifica-se devido a alta mobilidade esperada nas células.

## B. PROPOSTA

Neste artigo foi realizada a análise da eficiência espectral, eficiência energética e *throughput* para usuários nas bordas das células de uma rede heterogênea LTE-A. Para isso comparou-se a simulação de um ambiente sem a utilização de técnicas de coordenação de interferência e com a utilização das técnicas eICIC e FeICIC. Os parâmetros variados foram a quantidade de pico BSs e a quantidade de usuários dentro do hexágono central, e assim pôde-se aferir quais as vantagens e desvantagens de cada técnica dependendo do ambiente de utilização.

## C. ORGANIZAÇÃO

As seções restantes do artigo estão organizadas como exposto a seguir. Na Seção 2 é feito um estudo sobre as técnicas de ICIC para redes LTE/LTE-A. Na Seção 3 apresenta-se o ambiente de simulação utilizado no software do MATLAB. Na Seção 4 são dispostos os resultados da simulação e a análise comparativa entre as técnicas eICIC e FeICIC. Por fim, o

artigo é concluído na Seção 5.

## II. ICIC - INTER-CELL INTERFERENCE COORDINATION

De um modo geral, as técnicas ICIC podem ser classificadas em técnicas de mitigação e prevenção de interferência. As técnicas de mitigação de interferência são empregadas para reduzir o impacto da interferência durante a transmissão ou após a recepção do sinal. Técnicas de mitigação de interferência incluem: (1) Randomização de interferência; (2) cancelamento de interferência; e (3) formação de feixe adaptável [7].

Esquemas de prevenção de interferência representam os algoritmos de reutilização de frequência usados pelos elementos de rede para restringir ou alocar certos recursos (nos domínios do tempo e da frequência) e níveis de energia entre usuários em células diferentes. O objetivo destes algoritmos de planejamento de reutilização de frequência é aumentar a SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) e, assim, permitir que o sistema suporte o máximo de usuários possível [7].

Várias técnicas de prevenção de interferência têm sido abordadas na literatura. Esquemas sob esta categoria normalmente são classificados como: esquemas estáticos e esquemas dinâmicos [15].

### A. Esquemas estáticos

Em esquemas de alocação estáticos, os recursos alocados para cada célula e usuário são computados durante o processo de planejamento da rede e apenas reajustes de longo prazo são realizados durante a operação da rede [7]. Os esquemas estáticos são baseados em técnicas de reuso de frequência, quando não há uma entidade que gereencie as eNBs (*eNodeBs*) da rede.

Tais esquemas normalmente recaem em uma das três categorias a seguir: FFR, SFR e PFR (*Partial Frequency Reuse*). Os esquemas citados são especificados nas *Release* 8 e 9 do 3GPP, baseados em redes homogêneas e, portanto, fornecem meios relativamente simples para tratar de problemas de ICI [14]. Consequentemente, esses esquemas não são adaptativos para atender às demandas dinâmicas da rede e têm se mostrado inadequados como solução para ICI em redes LTE-A.

### B. Esquemas dinâmicos

Os esquemas dinâmicos executam coordenação entre as células em tempo real para alocar os recursos entre as estações adjacentes. Esses esquemas são bem mais flexíveis comparado com os esquemas estáticos, entretanto, exigem coordenação e sinalização entre as células, portanto são muito mais complexos de implementar. As técnicas de coordenação de interferência dinâmica englobam: eICIC, FeICIC e CoMP. Aqui serão abordados apenas as duas primeiras técnicas, que foram os alvos de simulação nessa pesquisa.

#### eICIC

A eICIC, foi padronizada pela 3GPP como uma evolução dos esquemas estáticos com o objetivo de amenizar problemas de interferência em redes HetNets. A eICIC utiliza a chamada

CRE (*Cell Range Expansion*) [17]. A ideia é o sistema do UE aplicar um *offset* no sinal recebido das BSs (CSB). Deste modo, é possível estender a área de cobertura de uma pico BS, já que o UE irá associar-se à ela mesmo que o sinal recebido da mesma seja mais fraco do que de uma macro BS, por exemplo. Por causa da diferença na potência do sinal de transmissão entre pico e macro BSs, principalmente quando um UE é associado à pico BS quando esta produz um sinal recebido de menor potência, a interferência presente nessas áreas de cobertura estendida das pico BSs é muito maior.

Em busca de mitigar a interferência sofrida pelos usuários associados à uma pico BS, as macro BSs utilizam os chamados *Almost Blank Subframes* (ABS), reduzindo ou cessando a potência do sinal de transmissão em certos *time slots*. A proposta da técnica é permitir o compartilhamento de *subframes* no tempo entre as macros e picos BS, de forma a diminuir a interferência sofrida principalmente por usuário nas bordas das células das pico BSs. Deste modo, as pico BSs conseguem transmitir nesse *subframe* "protegido" de interferência.

### FeICIC

A FeICIC, *Further enhanced ICIC*, como o próprio nome diz é uma otimização da técnica eICIC. Na técnica eICIC, a utilização do ABS implica na redução de potência de transmissão do PDSCH (*Physical Downlink Shared channel*) da macro BS para praticamente zero. O PDSCH nada mais é do que o canal responsável por transportar os dados do UE até a eNB. Deste modo, neste *subframe* a macro BS é silenciada para que as pico BSs possam se comunicar com os UE a elas associados.

Ao invés do ABS, a técnica FeICIC emprega o RP-ABS (*Reduced Power Almost Blank Subframe*). O RP-ABS permite que a macro BS reduza a potência de seu sinal ao invés de ser totalmente silenciada. Assim, a macro BS consegue atender um UE que está próximo de si com uma potência de transmissão reduzida sem interferir no sinal da pico BS, deste modo evitando a perda de recurso durante o RP-ABS. Para utilizar o RP-ABS, é necessário que haja um escalonamento inteligente e coordenação entre as BSs, tornando assim a rede mais complexa. A FeICIC é bastante complexa, e no artigo [14] é possível encontrar uma explicação mais detalhada sobre seu funcionamento.

### III. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Utilizando como base os trabalhos de Liu et al. (2017) [10] e Moreira et al. (2019) [17] foi possível simular, através do emprego do software MATLAB, um ambiente modelado para testar o desempenho das técnicas ICIC. Na Tabela 1 estão dispostos os parâmetros mais importantes utilizados nesta modelagem.

Em [10], o artigo faz uma comparação no ganho de EE (*Energy Efficiency*) e SE (*Spectral Efficiency*) utilizando *Game Theory* para otimizar as técnicas ICIC. Os primeiros resultados mostram uma comparação entre eICIC, FeICIC, e Nil (termo utilizado para representar os resultados quando nenhuma das duas técnicas foram empregadas) utilizando os algoritmos de

escalonamento *downlink* RR (*Round Robin*) e PF (*Proportional Fair*). Posteriormente, os autores propõem e implementam o algoritmo de escalonamento *downlink* CC (*Cake-Cutting*) e comparam esses resultados com os anteriores, demonstrando ganho de EE e SE, além de um ganho de *throughput* e maior índice de justiça para usuários nas bordas das células.

Tabela 1: Parâmetros utilizados para gerar as topologias das HetNets

Parâmetros	Valores
Geometria da célula	Hexagonal
Quantidade de <i>clusters</i>	7
Quantidade de célula por <i>cluster</i>	19
Total de topologias criadas	10
Distância entre macro BSs	1000 m
Distância mínima entre pico BSs	40 m
Distância mínima entre macro BS e pico BS	75 m
Distância mínima entre usuário e pico BS	10 m
Distância mínima entre usuário e macro BS	35 m
Potência da macro BS	40 W
Potência da micro BS	1 W
Figura de ruído	9 dB
Densidade de ruído térmico	-174 dBm/Hz
Perda de percurso da macro BS até usuário	$128,1 + 37,6 \log_{10} d$ em km
Perda de percurso da pico BS até usuário	$140,7 + 37,6 \log_{10} d$ em km

Já em [17], o artigo realiza uma comparação completa das técnicas eICIC, FeICIC e quando não há utilização de técnicas ICIC. Tem-se, novamente, uma comparação do ganho de EE, SE, *throughput* e maior índice de justiça para usuários nas bordas das células. Neste caso, cada célula de formato hexagonal continha em seu centro uma macro BS e variou-se a quantidade de pico BS de 1 à 5 para determinar o desempenho das técnicas ICIC em tais ambientes.

Para a presente pesquisa o cenário foi modelado como expandido a seguir. O ambiente é composto por 7 *clusters*, sendo 1 *cluster* central e 6 cópias exatas do *cluster* central adjacentes à ele. Cada *cluster* é composto por 19 hexágonos, sendo que em cada hexágono há apenas uma macro BS localizada em seu centro. Há sempre a mesma quantidade de pico BSs em cada hexágono e, para esta simulação, variou-se a quantidade de pico BSs de 2 à 4 sendo que as pico BSs são alocadas de forma aleatória dentro do hexágono.

Assim, são geradas também de modo aleatório 10 topologias diferentes de uma rede heterogênea e o resultado final da simulação é dado pela média do total de topologias. A distância entre as macro BSs adjacentes foi fixada em 1000 metros. As distâncias entre diferentes BSs e as distâncias entre os usuários e as BSs de cada célula estão definidas na Tabela 1.

Os usuários são considerados estáticos. A taxa de usuários próximos às pico BSs foi fixada em 0,5. Deste modo, 50% dos usuários de uma célula são alocados de forma aleatória à até 100 metros da pico BS. Caso a célula tenha uma quantidade  $p$  de pico BS, sendo  $p > 1$ , 50% dos usuários são divididos em  $p$  grupos e um desses grupos é aleatoriamente alocado próximo à pico BS. Finalmente, variou-se o número de usuários em cada célula de 10 à 20 para estudar o comportamento da otimização do eICIC e FeICIC. O algoritmo de escalonamento utilizado para os resultados dispostos nessa pesquisa foi o PF.

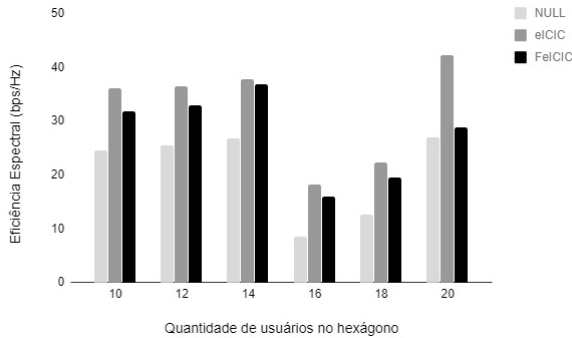
## IV. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durante a simulação. Além disso, realiza-se uma análise sobre o desempenho da otimização das técnicas de eICIC e FeICIC variando-se a quantidade de usuários dentro da célula. As métricas utilizadas para analisar tal desempenho foram: eficiências energética e espectral e *throughput* de usuários nas bordas das células.

### A. Eficiência Espectral

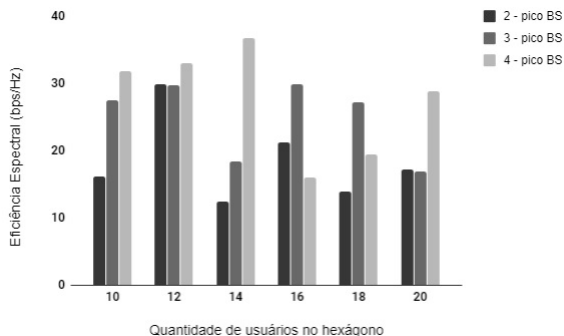
A eficiência espectral é definida como a média de bits transmitidos por Hz de todos PRBs alocados para a conexão [17]. A Figura 1 mostra uma comparação entre as técnicas eICIC, FeICIC e o ambiente sem controle de interferência. Manteve-se fixado o número de pico BSs em 4 e variou-se o número de usuários dentro do hexágono. Os resultados mostram que a utilização de técnicas ICIC aumentaram consideravelmente a eficiência espectral. No geral, a eICIC manteve a maior eficiência espectral em todos os cenários.

Figura 1: Comparação de eficiência espectral em função do número de usuários para uma quantidade fixa de 4 pico BS.



A Figura 2 mostra a diferença no desempenho da FeICIC variando-se o número de usuários em função da quantidade de pico BS no hexágono. Teoricamente, espera-se que com o maior número de pico BS, aumentaria-se a eficiência espectral. Isso é observado em todos resultados, menos para 16 e 18 usuários. Apesar da eficiência espectral da eICIC ter se mostrado satisfatória, os resultados obtidos na simulação para esses casos com a FeICIC fogem do comportamento esperado da rede.

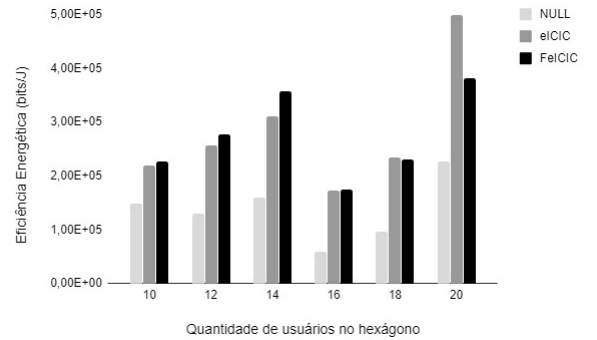
Figura 2: Eficiência espectral da FeICIC em função do número de usuários, variando a quantidade de pico BSs.



### B. Eficiência Energética

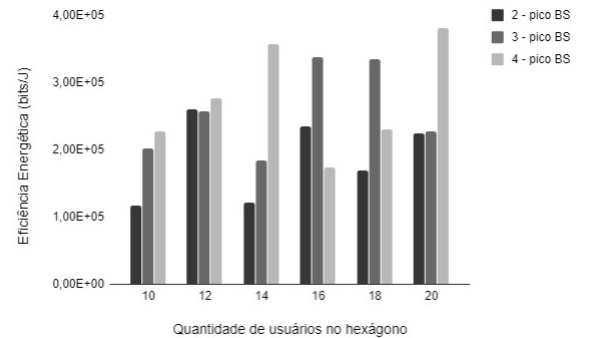
A eficiência energética é calculada como o número de bits dividido pela potência de transmissão [17]. A Figura 3 mostra uma comparação do desempenho de eficiência energética entre as técnicas eICIC, FeICIC e o ambiente sem o emprego de técnicas ICIC. Os resultados da simulação mostram claramente a superioridade no emprego das técnicas de controle de interferência. Pode-se notar, também, que com o aumento da quantidade de usuários o desempenho da eICIC foi superior ao da FeICIC.

Figura 3: Comparação de eficiência energética em função do número de usuários para uma quantidade fixa de 4 pico BS.



A Figura 4 mostra a eficiência energética para diferentes quantidades de usuários no hexágono, quando empregou-se a técnica FeICIC variando a quantidade de pico BS. Novamente, nota-se a discrepância nos resultados obtidos para a quantidade de 16 e 18 usuários. No geral, pode-se afirmar que a FeICIC obteve o melhor desempenho nos diferentes cenários de eficiência energética.

Figura 4: Eficiência espectral da FeICIC em função do número de usuários, variando a quantidade de pico BSs.

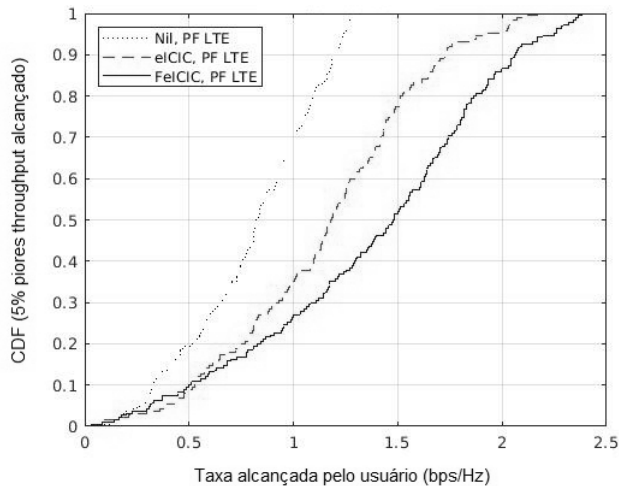


### C. Throughput

A Figura 5 mostra a CDF (*Cumulative Distribution Function*) para os 5% piores *throughput* na borda da células dentre todos usuários. Esse ambiente contava com 20 usuários e 4 pico BSs dentro de cada hexágono. Os resultados mostram que o eICIC alcança uma melhora de aproximadamente 22% enquanto o FeICIC consegue obter até em torno de 24% de melhora no *throughput* para os usuários na borda da célula. Esse resultado repete-se na simulação para as demais quantidade de usuários. Portanto, apesar de que em alguns resultados a eICIC ter sobressaído a FeICIC em métricas como eficiên-

cia energética ou espectral, a FeICIC é a melhor escolha para beneficiar os usuários nas bordas das células, que são os que sofrem as maiores interferências, sendo esse o maior benefício da técnica mais complexa.

Figura 5: CDF para os 5% piores *throughput* na borda da células. Figura adaptada do MATLAB.



## V. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa realizou-se uma abordagem diferente nos estudos da otimização de técnicas ICIC em redes LTE-A heterogêneas ao variar a quantidade de usuários, simulando assim um ambiente de alta mobilidade com é o esperado para a evolução das HetNets. Os resultados da pesquisa mostram de forma clara que o desempenho das técnicas ICIC foi muito superior se comparado a um ambiente sem a utilização de tais técnicas em métricas como EE, SE e *throughput*. A eICIC se mostrou como a melhor técnica para melhorar a eficiência espectral no ambiente simulado. A FeICIC se sobressaiu nas métricas de eficiência energética e *throughput* para usuários nas bordas das células, que são os usuários que sofrem com a maior quantidade de interferência. Como trabalhos futuros destaca-se a necessidade de um estudo mais aprofundado para identificar as razões de discrepâncias observadas em alguns resultados.

## REFERÊNCIAS

- [1] Q. C. Li, H. Niu, A. T. Papathanassiou, and G. Wu. "5g network capacity: Key elements and technologies.", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1):71–78, 2014.
- [2] A. Imran, A. Zoha and A. Abu-Dayya. "Challenges in 5g: how to empower son with big data for enabling 5g.", *IEEE Network*, 28(6):27–33, 2014.
- [3] 3GPP TR 25.814, "Physical layer aspects for evolved UTRA (release 7)," 2006.
- [4] P. Lee, T. Lee, J. Jeong, and J. Shin. "Interference management in LTE femtocell systems using Fractional Frequency Reuse", *International Conference on Advanced Communication Technology*, 1047-1051, 2010.
- [5] M. A. AboulHassan, M. Yassin, S. Lahoud, M. Ibrahim, D. Mezher, B. Cousin and E. A. Sourour. Classification and comparative analysis of inter-cell interference coordination techniques in lte networks., in *7th International Conference on New Technologies, Mobility and Security*, pages 1–6, 2015.
- [6] M. Assaad. Optimal Fractional Frequency Reuse (FFR) in Multicellular OFDMA System, *IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, 2008.
- [7] A. S. Hamza, S. S. Khalifa, H. S. Hamza and K. Elsayed. A survey on inter-cell interference coordination techniques in ofdma-based cellular networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(4):1642–1670, 2013.
- [8] D. Xiao, X. Yu and D. Yang. A novel downlink icic method based on user position in lte-advanced systems. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pages 1–5, 2012.
- [9] S. Bassooy, H. Farooq, M. A. Imran and A. Imran. Coordinated multi-point clustering schemes: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):743–764, 2017.
- [10] Y. Liu, C. S. Chen, C. W. Sung and C. Singh. A game theoretic distributed algorithm for feicic optimization in lte-a hetnets. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25(6):3500–3513, 2017.
- [11] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi and F. Gutierrez. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! *IEEE Access*, 335-349, 2013.
- [12] N. Trabelsi, C. S. Chen, R. E. Azouzi, L. Roullet and E. Altman. User association and resource allocation optimization in lte cellular networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 14(2):429–440, 2017.
- [13] W. Shin, W. Noh, K. Jang and H. Choi. Hierarchical interference alignment for downlink heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(12):4549–4559, 2012.
- [14] M. S. Ali. An overview on interference management in 3 gpp lte-advanced heterogeneous networks. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 8(1):55-68, 2015.
- [15] M. Boujelben, S. B. Rejeb and S. Tabbane. A comparative study of interference coordination schemes for wireless mobile advanced systems. *International Symposium on Networks, Computers and Communications*, pages 1–5, 2014.
- [16] M. Yassin, M. A. AboulHassan, S. Lahoud, M. Ibrahim, D. Mezher, B. Cousin and E. A. Sourour. Survey of icic techniques in lte networks under various mobile environment parameters. *Wireless Networks*, 403–418, 2017.
- [17] J. Moreira, E. R. Silva and P. R. Guardieiro. Técnicas de Coordenação de Interferência Inter-Celular para Redes Heterogêneas no Downlink LTE-A, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 2019.