



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

Gabriel Andrade Queiroz*¹ e Ederson Rosa da Silva¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – A popularização das redes móveis tornou essencial a averiguação da eficácia em lidar com a crescente demanda por requisitos de capacidade de tráfego. A densificação de tais redes proporciona de maneira eficiente uma melhor utilização do espectro, bem como da energia empregada. Contudo, a interferência intercelular permanece um fator limitador à performance do sistema. Este artigo faz uma explicação sucinta sobre as técnicas ICIC aplicadas ao *downlink* LTE-A visando a redução do impacto da interferência e melhoria da performance. Os resultados alcançados por meio de simulação expõem uma comparação das técnicas eICIC e FeICIC em relação ao cenário sem coordenação de interferência, variando determinadas especificações na topologia de rede.

Palavras-Chave – eICIC, FeICIC, LTE/LTE-Advanced, redes móveis, técnica de coordenação de interferência

STUDY OF INTER-CELL INTERFERENCE COORDINATION TECHNIQUES *DOWNLINK* LTE-A FOR HETEROGENEOUS NETWORKS

Abstract – The popularization of mobile networks has made it essential to investigate the effectiveness in dealing with the growing demand for traffic capacity requirements. The densification of such networks efficiently provides a better usage of the spectrum, as well as the energy used. However, inter-cell interference remains a limiting factor to the system's performance. This article provides a brief explanation of the ICIC techniques applied to the LTE-A *downlink* to reduce the impact of interference and improve performance. The results achieved through simulation show a comparison of the eICIC and FeICIC techniques in relation to the scenario without interference coordination, varying certain specifications in the network topology.

Keywords – eICIC, FeICIC, interference coordination technique, LTE/LTE-Advanced, mobile network.

I. INTRODUÇÃO

As redes celulares como a LTE-A (*Long Term Evolution – Advanced*) e a quinta geração (5G) são requisitadas para garantir acesso de banda larga para um número de usuários crescente, aumentando serviços baseados em dados, a exemplo do VoIP (*Voice over Internet Protocol*) e *streaming* de vídeo. Uma pesquisa atual em [1] indica que as conexões utilizando o padrão 5G irão abranger mais de 10% do valor global em 2023. Ademais, as melhorias nos padrões de redes móveis visam ofertar conectividade a aplicações como IoT (*Internet of Things*), M2M (*Machine-to-Machine*) e D2D (*Device-to-Device*).

O desenvolvimento acelerado dos meios de comunicação possibilitou a implementação de níveis mais satisfatórios de QoS (*Quality of Service*) às aplicações móveis. Assim, a organização 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) instaurou o padrão LTE-A, visando maior capacidade de rede e eficiência espectral em relação ao sucessor LTE. Para tanto, foi implementado o modelo de fator de reutilização de frequência, *reuse-1*, visando maior capacidade de rede e QoE (*Quality of Experience*) para o usuário. Entretanto, tal modelo limita a SINR (*Signal to Interference and Noise Ratio*) ao induzir a ICI (*Inter-Cell Interference*), prejudicando o *throughput* especialmente para os UEs (*User Equipments*) ativos na borda de uma célula [2].

Em geral, dois tipos de interferência predominam em sistemas de comunicações móveis, sendo elas: interferência intracelular e interferência intercelular. A primeira ocorre entre os canais de uma mesma célula em razão da proximidade das frequências e o desvio de potência entre canais. Já a interferência intercelular decorre entre células vizinhas que compartilham um mesmo canal devido ao reuso de frequência [3].

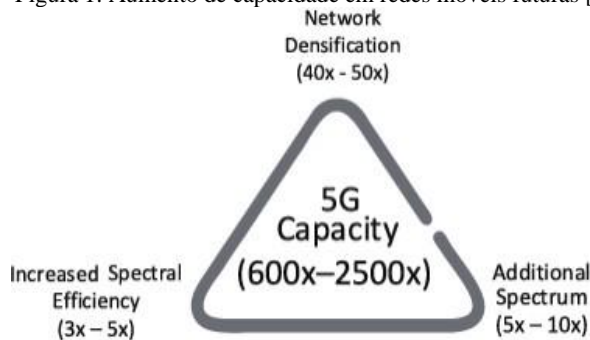
Como forma de minimizar a interferência e garantir os requisitos de melhor desempenho para o LTE-A, utiliza-se o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) no *downlink* [4]. A interferência intracelular é eliminada diante do OFDMA, visto que são utilizadas *sub-carriers* ortogonais e independentes na transmissão dos dados. Todavia, a interferência intercelular continua sendo um problema, tendo em vista a colisão entre os blocos de recursos diante de canais utilizados por células adjacentes [5].

Para adequar os sistemas de comunicações móveis aos problemas impostos pela interferência intercelular, três ideias

*gabqueiroz@yahoo.com

são propostas: 1) Espectro adicional; 2) Aumento da eficiência espectral: MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), CoMP (*Coordinated Multi-Point operation*) e técnicas de codificação adaptativa, e; 3) Densificação da rede: desenvolvimento das *smallcells*. A Figura 1 ilustra essas três técnicas para aumento de capacidade das redes móveis.

Figura 1: Aumento de capacidade em redes móveis futuras [6].



Observa-se que o espectro é limitado, de forma que a potencial capacidade em razão de adição de espectro também seja. Em segundo plano, o aumento da eficiência espectral também fica limitado em razão de técnicas bastante desenvolvidas já citadas. Por fim, mostra-se como melhor opção a densificação da rede, que aumenta a cobertura do sistema de maneira econômica em razão da reutilização de frequência e preservação da SINR, além de diminuir a distância entre os UEs e a BS (*base station*) [7].

A implementação da densificação celular pode ocorrer a partir da utilização de uma arquitetura constituída por *macrocells* e *smallcells* (SC), ou seja, células de diferentes capacidades e potências. As *smallcells* podem ser, por exemplo, *picocells* (*pico base station*) ou *femtocells* (*femto base station*). Essa configuração dá origem às HetNets (*Heterogeneous Networks*), que devido ao desenvolvimento de células menores e altamente densificadas, ocasiona interferência intercelular sobre a rede [8].

Em arquiteturas HetNet, as *macrocells* apresentam maior potência quando comparadas às *smallcells*, de forma que os UEs localizados próximos às últimas sejam atraídos para as *macrocells*, causando superlotação nestas e subutilização nas *smallcells*. Além disso, quando as *macrocells* se encontram muito próximas das *smallcells*, tem-se grande interferência aos usuários associados às *smallcells*, havendo necessidade de implementação de esquemas de alocação de recursos aos usuários. Para tratar de tais problemas foram propostas na 3GPP Release 10 [9] e na 3GPP Release 11 [10], respectivamente, as técnicas eICIC (*enhanced Inter-cell Interference Coordination*) e FeICIC (*Further enhanced Inter-cell Interference Coordination*).

O objetivo deste artigo é o estudo das técnicas de ICIC (*Inter-cell Interference Coordination*) no *downlink* LTE-A de redes heterogêneas por meio das análises de eficiência espectral, eficiência energética, índice de justiça e *throughput* dos usuários localizados na borda da célula. Os resultados obtidos via simulação visam comparar os cenários sem coordenação de interferência e utilizando as técnicas eICIC e FeICIC com níveis diversos de densificação.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção são apresentados trabalhos de ICIC em sistemas de redes de comunicação móveis, tendo em vista o interesse em pesquisas de Coordenação de Interferência Intercelular.

O artigo disposto em [11] utiliza o *Game Theory* para o aperfeiçoamento das técnicas de ICIC, comparando os ganhos de eficiência espectral e eficiência energética, além dos ganhos em relação a *throughput* e índice de justiça. A comparação foi feita sobre cenários que utilizaram as técnicas eICIC, FeICIC, ou nenhuma técnica empregada. Desse modo, foram testados os seguintes algoritmos de escalonamento para *downlink*: RR (*Round Robin*) e PF (*Proportional Fair*). Em uma segunda análise, foi implementado o algoritmo de escalonamento *downlink* CC (*Cake-Cutting*) e os resultados comparados aos da análise anterior. Com isso, demonstrou-se um ganho superior em relação a todos os parâmetros analisados.

Assim como em [11], vários trabalhos relacionados à mitigação de interferência com base em *Game Theory* para redes LTE, LTE-A e 5G foram publicados. As pesquisas consideradas em [12] e [13] estudam a otimização eICIC distribuída a partir de jogos potenciais.

Em relação a [14], o artigo compara os cenários utilizando as técnicas eICIC, FeICIC e nenhuma técnica ICIC. Os parâmetros estudados também foram os ganhos das eficiências energética e espectral, índice de justiça para usuários nas bordas das células e *throughput*. Para tanto, as células foram configuradas para uma *macrocell* central e variou-se o número de *picocells* para analisar o comportamento de cada técnica ICIC.

No artigo [15], as técnicas eICIC e FeICIC foram comparadas ao cenário sem o emprego de técnicas ICIC, tendo como diferencial o estudo da variação do número de usuários. A partir disso, analisou-se o ganho em relação às eficiências espectral e energética, bem como o *throughput* para usuários localizados na borda da célula. Entretanto, algumas discrepâncias nos resultados foram observadas.

Em relação ao trabalho realizado em [3], foram analisadas diversas técnicas ICIC tendo por base modelos estáticos e dinâmicos, sendo, respectivamente, o *frequency reuse-based* e o *cell coordination-based*. Para tanto, uma nova classificação foi apresentada para as técnicas ICIC quanto aos dois modelos citados.

A pesquisa sobre ICIC realizada em [16] revisa soluções de atenuação de interferência propostas entre as Releases 8 e 11 do 3GPP. Diante da comparação das técnicas ICIC, eICIC e CoMP, os resultados indicam a melhoria de performance com relação ao *throughput* de usuários na borda da célula.

Mesmo que a ICIC seja um tópico de grande estudo pela academia e pela indústria de telecomunicações, nota-se que o assunto é bastante extenso e diverso, justificando o estudo dos vários métodos de otimização das técnicas conhecidas. Assim, não se encontra muitos trabalhos que avaliam de maneira direta as técnicas eICIC e FeICIC em função do número de usuários na rede. Diante disso, a variação da quantidade de usuários visa reproduzir a alta mobilidade e variação da densidade de usuários esperadas nas células.

III. TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA

O padrão LTE-A, como já foi dito, utiliza o fator de reutilização de frequência *reuse-1* na busca do melhor aproveitamento do espectro disponível, ofertando serviço a uma gama maior de usuários. Entretanto, os sistemas de reutilização de frequência acarretam na ICI, tendo por base o escalonamento de recursos entre canais de células adjacentes. Assim, a ICIC foi introduzida inicialmente na 3GPP Release 8 para lidar com a interferência imposta à borda da célula.

As técnicas de coordenação de interferências são divididas em estáticas e dinâmicas, mas independente do modelo avaliado, são baseadas em algoritmos de reuso de frequência que a rede implementa nos elementos para adequar a maneira de alocar os recursos. A alocação pode ser feita, por exemplo, no domínio do tempo (ICIC e eICIC), frequência (FeICIC) e espacial (CoMP). Com exceção da ICIC, todas as demais técnicas apresentam sincronização entre eNBs (eNodeBs). Os algoritmos utilizados visam adequar o sistema para o maior número de UEs possível, baseado no aumento da SINR [3].

A. Modelos estáticos

Os modelos estáticos fundamentam-se em técnicas de reuso de frequência como o FFR (*Fractional Frequency Reuse*), o SFR (*Soft Frequency Reuse*) e o PFR (*Partial Frequency Reuse*). Essas técnicas compreendem arquiteturas nas quais não há gerenciamento centralizado de eNBs presentes na rede. O particionamento do espectro existente no reuso de frequência mostra-se inefetivo para o padrão LTE [17].

Na alocação de recursos para modelos estáticos os recursos alocados entre usuário e célula são apurados apenas quando a rede é planejada, ao passo que durante a operação da rede são permitidos poucos reajustes [3]. Esses esquemas são baseados em redes homogêneas, de forma que as condições desfavoráveis causadas pela ICI sejam tratadas de maneira superficial. Portanto, pela falta de adaptação, esses modelos não suprem as necessidades de uma rede dinâmica configurada pelo padrão LTE-A.

Em compensação, os modelos dinâmicos alocam os RBs (*resource blocks*) por meio da interface X2, responsável pela sinalização entre eNBs, em células adjacentes para redução da ICI. A ICI influencia negativamente na qualidade de serviço ofertada aos usuários, tendo em vista a redução do *throughput* dos UEs e da eficiência espectral. Assim sendo, há grande interesse na utilização de métodos dinâmicos visando a melhor utilização do espectro disponível, bem como a QoE ofertada aos UEs [17].

B. Modelos dinâmicos

Os modelos dinâmicos utilizam a coordenação de estações base adjacentes, considerando a utilização de *sub-carriers* e diferentes níveis de potência empregados. Para tanto, exige coordenação das células utilizando esquemas de sinalização, o que garante maior adaptabilidade às possíveis variações [3] e controle de alocação de recursos em tempo real. Sendo assim, na hierarquia das técnicas de ICIC, os esquemas dinâmicos são divididos em eICIC, FeICIC e CoMP. Este artigo engloba

apenas as duas primeiras, comparando-as com base em simulação.

i) eICIC

A questão de interferência das redes heterogêneas foi tratada pela eICIC na 3GPP Release 10 [9] considerando o problema de sobreposição de células. Para tanto, diversas mudanças foram implementadas. Dentre elas, a CRE (*Cell Range Expansion*) é utilizada para aumentar a capacidade da rede por meio de uma distribuição maior de serviços para as *smallcells*, mesmo quando a potência do sinal recebido é inferior quando comparado ao das *macrocells*. Essa estratégia alivia o tráfego de dados imposto às *macrocells*, sendo que a distribuição é realizada baseada no aumento da área de cobertura das *smallcells*, utilizando *offset* nos sinais recebidos das mesmas.

Outra mudança é a utilização de particionamento dos recursos temporais, diante de modelos cujo domínio é temporal, permitindo diminuir a interferência sofrida nas bordas de *smallcells*. Para tanto, alguns *sub-frames*, ditos ABS (*Almost Blank Sub-frames*), são protegidos na presença da *macrocell*, que tem sua potência limitada ou até mesmo encerrada. Para que o ABS opere corretamente, as transmissões de eNBs devem ser sincronizadas no tempo, tendo em vista a fragilidade da ICIC que trabalha no domínio do tempo.

A eICIC propicia o compartilhamento de *subframes* no tempo para transmissões que englobam *macrocells* e *smallcells*, suavizando a interferência sofrida por UEs localizados principalmente na borda das *smallcells*. Por exemplo, em um sistema de uma única *macrocell* que contém uma única *smallcell*, onde há um UE localizado na borda, para um cenário sem ABS os *sub-frames* apresentam transmissão normal, causando enorme interferência sobre esse UE. Contudo, na presença do ABS, durante os *sub-frames* específicos a *macrocell* não envia dados, permitindo o escalonamento do UE por parte da *smallcell*. Consoante a isso, deve-se implementar nas HetNets uma alocação apropriada de recursos, não sobrecarregando ou subutilizando as *smallcells*.

ii) FeICIC

A FeICIC, proposta na 3GPP Release 11 [10], apresenta a alocação de recursos nas *macrocells* por meio de RP-ABSs (*Reduced Power Almost Blank Sub-frames*), em que há a redução da potência para tratar seus usuários. Ao utilizar o ABS, a *macrocell* deve anular a potência de transmissão sobre os recursos de determinados *subframes*, o que resulta na perda de recursos ao optar pelo TDM (*Time Division Multiplexing*) tanto em *subframes* eICIC quanto nos *subframes* não-eICIC. Assim, enquanto as *smallcells* podem escalar seus usuários com base nos dois *subframes* citados, restam apenas os não-eICIC para as *macrocells*.

Na utilização de *subframes* eICIC, as medições dos UEs recebem suporte a partir da transmissão dos CRSs (*Cell-specific Reference Signals*), que podem gerar interferência tanto aos canais de controle de sinalização quando de tráfego de dados. Os símbolos CRS de células adjacentes podem ser divididos em *colliding* e *non-colliding*, conforme a presença

ou não de salto em frequência nos sinais de referência. O primeiro caso ocorre na presença de salto, gerando estimativas incoerentes dos canais utilizados. A FeICIC trata ambos os casos de interferência diante do CRS a partir do transmissor ou do receptor.

Para eliminar a interferência advinda do CRS do ponto de vista do receptor, tem-se a análise da FeICIC dependente de abrandar a interferência no próprio UE. No caso do transmissor, a análise da FeICIC fica sujeita ao encerramento do tráfego de elementos de recursos do PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) diante dos *sub-frames* de um ABS da *smallcell* que é prejudicada pela interferência do CRS da *macrocell* correspondente. Por isso, o RP-ABS pode fornecer um ganho considerável quando comparado a sistemas que utilizam o ABS [18].

IV. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Dispondo de um ambiente de simulação empregando o *software* MATLAB e tomando como referência os trabalhos em Liu et al. 2017 [13] e Moreira et al. 2019 [14], foram executadas diferentes simulações para analisar o comportamento das técnicas de ICIC. A Tabela 1 dispõe os parâmetros fundamentais da simulação, sendo baseados nos trabalhos citados anteriormente.

Tabela 1: Parâmetros de simulação das topologias das HetNets

Parâmetros	Valores
Geometria da célula	Hexagonal
Número de <i>clusters</i>	7
Número de células por <i>cluster</i>	19
Número de topologias criadas	10
Distância entre <i>macrocells</i>	1000 m
Dist. mín. da <i>macrocell</i> p/ usuário	35 m
Dist. mín. da <i>picocell</i> p/ usuário	10 m
Dist. mín. da <i>macrocell</i> p/ <i>picocell</i>	75 m
Potência da <i>macrocell</i>	40 W
Potência da <i>picocell</i>	1 W
Densidade de ruído térmico	-174 dBm/Hz
Figura de ruído	9 dB
Duração por <i>subframe</i>	1 ms
Largura de banda RB	180 kHz
Valores CSB	C := {0,3,6,9,12,15} dB
Perda de propagação	10 dB
Perda de percurso da <i>macrocell</i> p/ usuário	$128.1 + 37.6 \log_{10} d, d$ em km
Perda de percurso da <i>picocell</i> p/ usuário	$140.7 + 36.7 \log_{10} d, d$ em km
Escalação	<i>Proportional Fair</i>

Para esta pesquisa, a geometria da célula do sistema permanece hexagonal, sendo composta por 7 *clusters* formadas por *macrocells* e *picocells*. Esses 7 *clusters* são dispostos da seguinte maneira: 1 *cluster* central e outros 6 *clusters* idênticos ao central adjacentes a ele. As *macrocells* estão distanciadas por 1000 m, o equivalente a uma rede LTE implementada para regiões urbanas. Quanto à distância das *picocells* para a *macrocell* correspondente, tem-se 75 m. Por fim, as distâncias entre *macrocell* até o usuário e *picocell* e usuário são, respectivamente, 35 e 10 m.

Então, elaborou-se a análise de simulações dos cenários sem técnica ICIC, bem como utilizando eICIC e FeICIC. Foram geradas 10 topologias de HetNets, sendo o resultado de performance a média obtida dentre todas as topologias. Assim, cada hexágono possui apenas uma *macrocell* em seu centro,

além de apresentar a mesma quantidade de *picocells*. Dentro do *cluster* central de cada topologia são colocados um determinado número de *picocells*, variado de 1 a 4, e de usuários. As *picocells* são dispostas de maneira aleatória dentro desse *cluster* central. Finalmente, o número de usuários colocados de maneira arbitrária até 100 metros das *picocells* de um mesmo hexágono foi variado dois a dois entre 10 e 20, ocorrendo para cada hexágono central dos *clusters*.

A fração de todos os usuários de uma célula que são colocados próximos de uma *picocell* dentro daquela célula é de 0,5. Isto é, metade dos usuários da célula são dispostos aleatoriamente em uma distância de até 100 metros da *picocell*. Caso existam p *picocells*, para $p > 1$, observa-se que o número de usuários selecionado é dividido nos p grupos disponíveis, e um grupo selecionado de modo aleatório é posicionado na vizinhança de uma *picocell*. Por fim, foi utilizado o *Proportional Fair* como algoritmo de escalonamento.

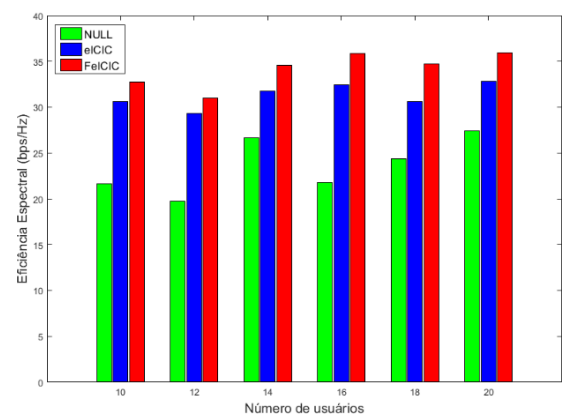
V. RESULTADOS

Nesta seção, diante dos resultados obtidos via simulação, faz-se uma análise referente à performance do sistema em relação à variação do número de usuários para o cenário sem técnica de ICIC (*NULL*) e as técnicas de coordenação de interferência eICIC e FeICIC. Para tal análise foram utilizadas como medidas: eficiência espectral, eficiência energética, índice de justiça e *throughput* dos usuários localizados na borda da célula do *cluster* central.

A. Eficiência Espectral

A eficiência espectral é determinada como a média de bits transmitidos por segundo por Hz (bits/s/Hz) para todos os PRBs (*Physical Resource Blocks*) alocados durante a conexão [14]. A Figura 2 compara o cenário sem técnica de ICIC aos cenários em que se utilizam as técnicas eICIC e FeICIC. Variou-se o número de usuários diante de uma quantidade fixa de 4 *picocells*.

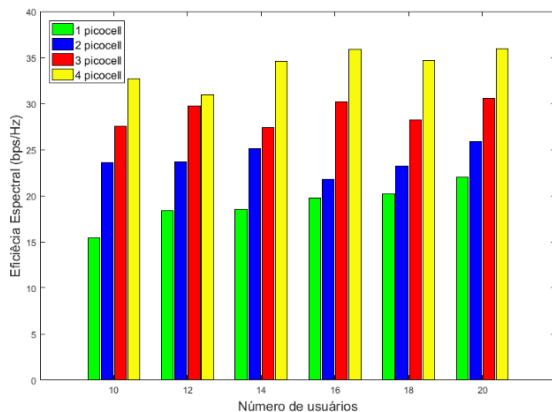
Figura 2: Indicador comparativo da eficiência espectral em função do número de usuários para o valor fixo de 4 *picocells*.



Já a figura 3 compara a performance da FeICIC quanto à variação da quantidade de *picocells*. Nota-se que a utilização de técnicas de ICIC converteu-se no aumento considerável da

eficiência espectral, principalmente, diante do aumento da quantidade de *picocells*. De modo geral, a FeICIC mostrou-se a técnica mais eficiente quando comparada à eICIC e ao cenário *NULL*. Além disso, ressalta-se a vantagem de utilizar HetNets com maior nível de densificação, como observado mediante a variação do número de usuários.

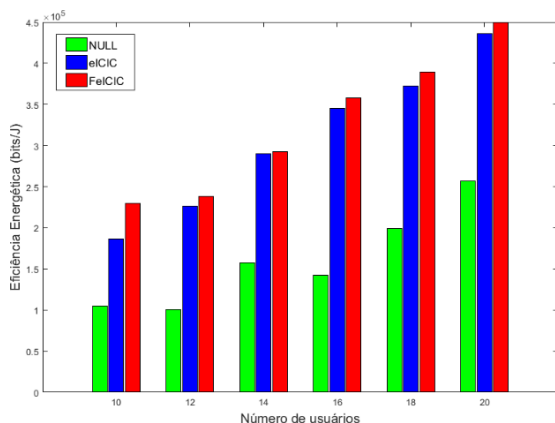
Figura 3: Indicador comparativo da eficiência espectral em função do número de usuários, diante da variação do número de *picocells*.



B. Eficiência Energética

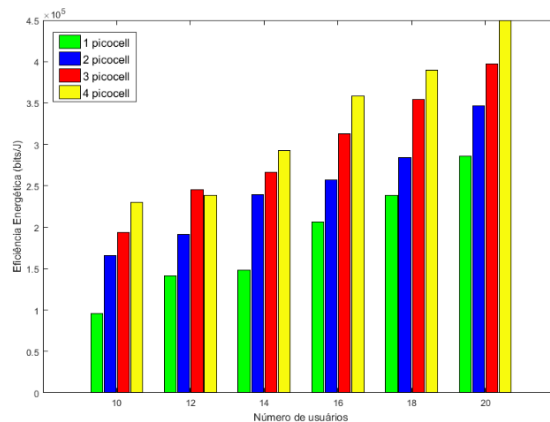
A eficiência energética é definida pelo número de bits transmitidos em relação à potência de transmissão (bits/J) [14]. A Figura 4 compara os cenários sem técnica de ICIC e utilizando as técnicas eICIC e FeICIC. Novamente, variou-se o número de usuários, mas manteve-se a quantidade de *picocells* fixa em 4. Pode-se observar que o aumento do número de usuários proporcionou uma maior eficiência energética, além de haver um melhor desempenho da FeICIC em relação a eICIC.

Figura 4: Indicador comparativo da eficiência energética em função do número de usuários para valor fixo de 4 *picocells*.



Ainda com relação à eficiência energética, a Figura 5 mostra a comparação da eficiência energética para a técnica FeICIC quando a quantidade de *picocells* foi variada junto do número de usuários. Novamente, observou-se a predominância de melhor desempenho da FeICIC para a HetNet com maior nível de densificação, ou seja, maior número de *picocells*.

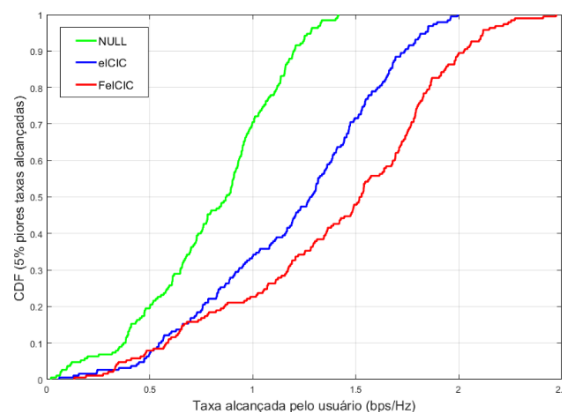
Figura 5: Indicador comparativo da eficiência energética em função do número de usuários, diante da variação do número de *picocells*.



C. Throughput

A Figura 6 mostra a CDF (*Cumulative Distribution Function*) para o *throughput* dos 5% de usuários que apresentam maiores níveis de interferência por estarem localizados na borda da célula do *cluster* central. Os resultados apresentados correspondem ao cenário de 20 usuários e 4 *picocells*. Para essa configuração, tem-se uma melhoria de *throughput* de cerca de 29% para a eICIC e 43% para a FeICIC.

Figura 6: CDF do *throughput* para os 5% piores usuários localizados na borda da célula do *cluster* central.



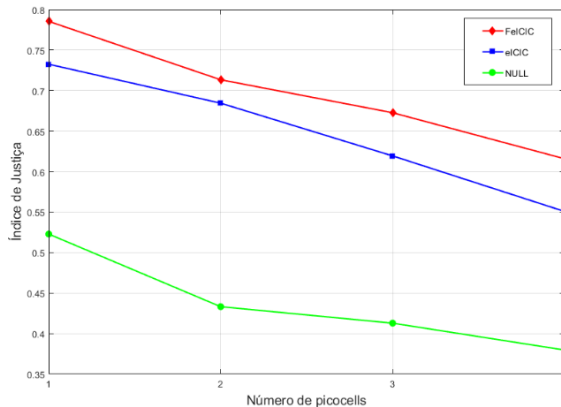
A melhoria dos parâmetros de eficiência espectral e eficiência energética ocasiona o aumento de *throughput* nos cenários em que as técnicas de ICIC foram utilizadas. Ademais, a densificação da HetNet proporciona maior diferença de performance quanto ao *throughput* para os cenários estudados. Como observado, a FeICIC mostrou-se a técnica de ICIC mais adequada para a melhoria de *throughput* dos usuários localizados na borda da célula, que são os que sofrem as maiores interferências.

D. Índice de Justiça

A figura 7 mostra o índice de justiça para os usuários localizados no *cluster* central, variando o número de *picocells*

das células, na configuração de 20 usuários e 4 *picocells*. Observa-se, para todos os cenários, a diminuição do índice de justiça perante o aumento do número de *picocells*. Além disso, o cenário de utilização da FeICIC mostrou melhores índices de justiça quando comparado à técnica eICIC e ao cenário sem ICIC, denotado por *NULL*. Isso mostra que a técnica FeICIC propõe a melhoria da eficiência espectral e energética, bem como do *throughput* analisados sem prejudicar a justiça.

Figura 7: Índice de justiça para os usuários localizados o *cluster* central em função da quantidade de *picocells*.



VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram estudadas as técnicas de ICIC em redes heterogêneas no *downlink* LTE-A tendo em vista a análise da variação da eficiência espectral, eficiência energética, *throughput* e índice de justiça em função do número de usuários. Sendo assim, comparou-se o desempenho do cenário sem técnica de ICIC aos cenários utilizando as técnicas eICIC e FeICIC. A partir dos resultados da simulação, observa-se a densificação da rede como um elemento fundamental no aumento de cobertura do sistema, acompanhando a demanda progressiva. A utilização das técnicas de coordenação de interferência, em especial a FeICIC, possibilitou melhorar todos os parâmetros analisados e, portanto, mostrou-se valiosa ferramenta para estender a capacidade das redes móveis. Como sequência desta pesquisa salienta-se a importância do estudo da associação das técnicas de ICIC a algoritmos de escalonamento que considerem função de utilidade modificada para utilização da SINR, com o objetivo de aperfeiçoar a performance do sistema.

REFERÊNCIAS

[1] Cisco (2020). Cisco Annual Internet Report: Global Internet adoption and devices and connection, 2018-2023, White Paper.

[2] 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.

[3] 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.

[4] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker. LTE – the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. Wiley, 2ª Edição, 2011.

[5] G. Fodor, C. Koutsimanis, A. Rácz, N. Reider, A. Simonsson and W. Müller. Inter-cell interference coordination in ofdma networks and in the 3gpp long term evolution system. *JCM*, (4):445-453.

[6] E. Dahlman, S. Parkvall and J. Skold. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. *Academic Press*, 1ª Edição, 2018.

[7] H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli and J. G. Andrews. Modeling and analysis of k-tier downlink heterogeneous cellular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(3):550-560, 2012.

[8] 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.

[9] 3GPP TS 36.101 V0.2.1, Enhanced ICIC for non-CA based deployments of heterogeneous networks for LTE, 2012.

[10] 3GPP TS 36.508 V0.2.0, Further Enhanced Non CA-based ICIC for LTE, 2012.

[11] 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.

[12] Y. Liu, C. S. Chen and C. W. Sung. Distributed enhanced inter-cell interference coordination (eicic) in lte-advanced hetnets: A potential game approach. *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1-5, 2015.

[13] Y. Liu, C. S. Chen and C. W. Sung. Joint optimization on inter-cell interference management and user attachment in lte-a hetnets. *13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, pages 62-69, 2015.

[14] 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.

[15] R. E. Masson. Análise de Técnicas de Coordenação de Interferência Inter-Celular para Redes LTE-A Heterogêneas, *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL)*, 2019.

[16] M. Boujelben, S. B. Rejeb and S. Tabbane. A comparative study of interference coordination schemes for wireless mobile advanced systems. *The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications*, pages 1-5, 2014.

[17] M. Yassin, M. A. AboulHassan, S. Lahoud, M. Ibrahim, D. Mezher, B. Cousin and E. A. Sourour. Survey of icic techniques in lte networks under various mobile environment parameters. *Wireless Networks*, 23(2):403-418, 2017.

[18] M. S. Ali. An overview on interference management in 3gpp lte-advanced heterogeneous networks. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 8(11):55-68, 2015.