Técnicas de Coordenação de Interferência Inter-Celular para Redes Heterogêneas no *Downlink* LTE-A

Júnio Moreira[1], Éderson R. Silva[2], Paulo R. Guardieiro[2]

[1]Campus Patrocínio – Instituto Federal do Triângulo Mineiro
Patrocínio – MG – Brasil

[2]Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG - Brazil

juniomoreira@iftm.edu.br, ersilva@ufu.br, prguardieiro@ufu.br

Abstract. *Future generation cellular networks (5G) are expected to provide broadband access to a continuously growing number of mobile users. Cell densification serves as a promising candidate solution to meet the demand of mobile users. However, ICI represents a real challenge that limits system performance, especially cell-edge throughput. This paper briefly reviews the ICIC techniques in the downlink LTE-A of mobile cellular networks as an approach to alleviate the impact of interference and improve performance. Simulation results show the advantages and limitations of the eICIC and FeICIC techniques compared to the model without interference control.*

Resumo. *Redes celulares de geração futura (5G) são esperadas para fornecer acesso de banda larga para um número continuamente crescente de usuários móveis. A densificação das redes celulares apresenta-se como uma solução promissora para aumentar a eficiência espectral. No entanto, a interferência inter-celular ainda representa um desafio que limita o desempenho do sistema, especialmente para usuários localizados na borda da célula. Este artigo faz uma breve revisão das técnicas de ICIC no downlink LTE-A de redes móveis celulares para reduzir o impacto da interferência e melhorar o desempenho. Os resultados de simulação mostram as vantagens e as limitações das técnicas eICIC e FeICIC em comparação com um cenário sem controle de interferência.*

1. Introdução

A crescente demanda por serviços de redes móveis, tais como VoIP e *streaming* de vídeo, com requisitos mínimos de atrasos e taxa de transmissão, coloca novos desafios no projeto de futuras redes celulares. Um estudo recente realizado em [Cisco 2018], enfatiza que o tráfego de dados móveis cresceu 54% em 2018, e espera-se que cresça 8 vezes até 2020. Além disso, um aumento de 1000 vezes no volume de tráfego de dados móveis é esperado para as redes 5G [Li et al. 2014].

Com meios de comunicação cada vez mais ágeis e eficientes, a possibilidade de oferecer às aplicações um nível adequado de QoS (do inglês, *Quality of Service*) atraiu a atenção das operadoras de telefonia móvel e da área de pesquisa nos últimos anos. Nesse contexto, o 3GPP (do inglês, *Third Generation Partnership Project*) introduziu o padrão LTE-*Advanced* (do inglês, *Long Term Evolution Advanced*) [Holma and Toskala 2012].

Na rede LTE-A, o principal objetivo é alcançar maior capacidade de rede em comparação com a rede LTE.

A rede LTE-A usa o modelo de fator de reutilização de frequência, *reuse-1*, para melhorar a capacidade do sistema e aumentar a QoE (do inglês, *Quality of Experience*) do usuário. No entanto, o *reuse-1*, leva à ICI (do inglês, *Inter-Cell Interference*), afetando fortemente a SINR (do inglês, *Signal to Interference and Noise Ratio*) dos UEs (do inglês, *User Equipments*) ativos, especialmente os UEs da borda da célula [Xiao et al. 2012], o que leva a uma degradação significativa no *throughput* total.

De um modo geral, em sistemas de comunicação móvel celular, existem duas grandes classes de interferência, a saber, interferência intra-celular e interferência inter-celular. No primeiro caso, a interferência é causada entre os canais dentro da mesma célula devido à adjacência de ambas as frequências e o desvio de potência de um canal para um canal adjacente. Neste último, no entanto, a interferência é causada entre um canal em uma célula e o mesmo canal usado em outra célula adjacente [Hamza et al. 2013].

O OFDMA (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) foi selecionado no *downlink* LTE-A, para reduzir a interferência e atender eficientemente seus requisitos de alto desempenho [Sesia et al. 2011]. O OFDMA elimina a interferência intra-celular, uma vez que os dados são transmitidos através de *sub-carriers* ortogonais independentes, no entanto, a interferência inter-celular (ICI), em sistemas OFDMA, é causada pela colisão entre os blocos de recursos [Fodor et al. 2009]. Em vista disso, a interferência inter-celular será estudada com maiores detalhes neste artigo.

Os sistemas celulares de próxima geração prometem um significativo aumento no *throughput* da célula e uma eficiência espectral melhorada em comparação com os sistemas atuais. Para tais objetivos, são propostas três áreas emergentes [Li et al. 2014, Imran et al. 2014, Nokia 2014] no cenário de redes sem fio: 1) Densificação da rede: desenvolvimento massivo de *smallcell*; 2) Aumento da eficiência espectral: CoMP (do inglês, *Coordinated Multi-Point operation*), MIMO (do inglês, *Multiple Input Multiple Output*), técnicas de codificação aprimoradas, e; 3) Espectro adicional. A Figura 1 representa os ganhos potenciais de capacidade esperados para futuras redes móveis.

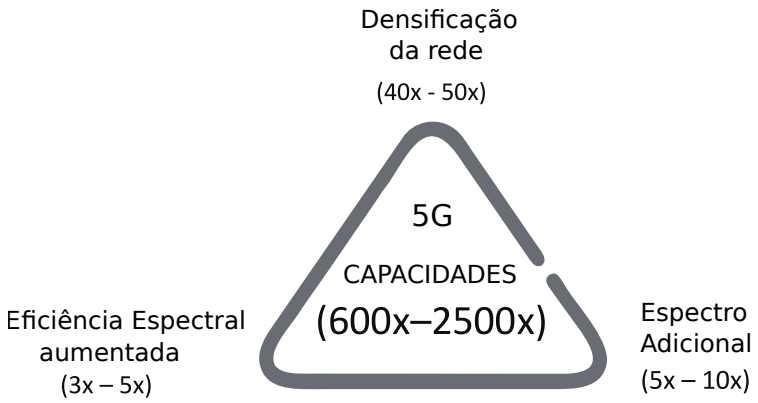

Figura 1. Proposta de melhoria das capacidades em futuras redes móveis (Adaptado de [Dahlman et al. 2018]).

A densificação da rede apresenta-se como um elemento chave para aumentar a cobertura do sistema e atender à crescente demanda por dados móveis de maneira econômica devido a sua capacidade de reutilização do espectro de frequência e a propriedade de preservação da SINR [Dhillon et al. 2012]. Além disso, a técnica reduz as distâncias médias entre um UE e a BS (do inglês, *base station*) mais próxima e, assim, diminui a perda de percurso do sinal transmitido e melhora o ganho e a capacidade do canal [Trabelsi et al. 2017]. Com isso, obtém-se uma capacidade do sistema (volume de tráfego por unidade de área) e taxas de dados elevadas.

Uma alternativa para a densificação celular, é implantar nós adicionais de baixa potência, ou SC (do inglês, *smallcell*), sob a área de cobertura da MC (do inglês, *macrocell*) convencional, dando origem as HetNets (do inglês, *Heterogeneous Networks*). As HetNets são vistas como a solução chave para melhorar a eficiência espectral e aumentar a área de cobertura. O desenvolvimento de pequenas células 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 [Shin et al. 2012].

Em uma arquitetura HetNet, a área de cobertura de uma *macro base station* (*macrocell*) é sobreposta a vários nós de acesso de baixa potência, como *pico base station* (*picocells*), *femto base station* (*femtocells*) e *relays* [3GPP 2010]. A potência de transmissão das *macrocells* é muito maior do que das *picocells*, dessa forma, os usuários móveis que estão fisicamente localizados perto das *picocells* são atraídos para as *macrocells* e, portanto, as *picocells* podem ficar subutilizadas e as *macrocells* superlotadas. Por outro lado, a *macrocell* próxima às *picocells* gera grande interferência para um usuário associado à *picocell*, dessa forma, nessas redes, são necessários esquemas inteligentes de associação de usuários, alocação de recursos e gerenciamento de interferências para obter ganhos de desempenho.

Para lidar com os problemas citados anteriormente, foi proposta a eICIC (do inglês, *enhanced Inter-Cell Interference Coordination*) na 3GPP *Release* 10 [3GPP 2012b]. Duas técnicas representativas são descritas brevemente a seguir.

(i) CRE (do inglês, *Cell Range Expansion*) é usada para equilibrar a RSRP (do inglês, *Reference Signal Received Power*) das *macrocells*, através da aplicação de *biases* [1] não negativos para um usuário que não esteja necessariamente associado à BS que fornece a potência recebida mais forte e,

(ii) ABS (do inglês, *Almost blank subframe*) é configurado nas *macrocells*, de modo que a *macrocell* cesse as transmissões de dados em determinados intervalos de tempo, o que reduz a interferência nas *picocells*.

A AMC (do inglês, *Adaptive Modulation and Coding*) é adotada nas redes LTE / LTE-A, no entanto, a restrição de que as *macrocells* devem silenciar suas transmissões de dados inteiramente em ABSs pode resultar no uso ineficiente dos recursos cada vez mais escassos [Kuang et al. 2016]. FeICIC (do inglês, *Further enhanced Inter-cell Interference Coordination*) é proposta na 3GPP *Release* 11 [3GPP 2012a], nela, as *macrocells* não utilizam ABSs, mas RP-ABSs (do inglês, *Reduced Power Almost Blank Subframes*) para atender seus usuários em níveis reduzidos de potência.

[1] O valor de *bias* para a estratégia de CRE afeta principalmente o desempenho das HetNets, alterando a área de cobertura das *picocells*.

Neste artigo, propõe-se um estudo das técnicas de ICIC (do inglês, *Inter-cell Interference Coordination*) para redes heterogêneas no *downlink* LTE-A através das análises de eficiência espectral, eficiência energética, *throughput* de usuários na borda da célula e índice de justiça. Os resultados de simulação mostram as vantagens e as limitações das técnicas eICIC e FeICIC ao compará-las em cenários sem coordenação de interferência e com diferentes níveis de densificação da rede.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, uma breve revisão da literatura, com base nos trabalhos correlacionados, é realizada. As técnicas de ICIC nas redes LTE-A são discutidas na Seção 3. O ambiente de simulação é apresentado na Seção 4. Os resultados da simulação e desempenho das técnicas eICIC e FeICIC são analisados na Seção 5. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros são apresentadas na Seção 6.

2. Revisão da Literatura

A Coordenação de Interferência Inter-Celular tem sido objeto de intensa pesquisa e padronização. Nessa Seção apresenta-se uma breve revisão da literatura com diversos trabalhos de ICIC em sistemas móveis de comunicação.

A pesquisa de ICIC desenvolvida em [Boujelben et al. 2014], é uma revisão das soluções de atenuação de interferência da *Release* 8 até a *Release* 11. Compara-se os diferentes métodos, a saber, ICIC, eICIC e CoMP. Várias semelhanças são observadas e os resultados obtidos mostram o aprimoramento de desempenho em termos de *throughput* na borda da célula.

No trabalho desenvolvido em [Hamza et al. 2013], os autores revisam várias técnicas ICIC propostas sob as duas principais classes de prevenção de interferência, especificamente, a *frequency reuse-based* (estática) e a *cell coordination-based* (dinâmica). Para este fim, novos modelos de classificação são apresentados e usados para descrever as técnicas sob as classes de prevenção estática e dinâmica da ICIC.

Para os autores do trabalho apresentado em [AboulHassan et al. 2015], o objetivo é analisar o desempenho das técnicas *reuse*-1, *reuse*-3, FFR (do inglês, *Fractional Frequency Reuse*) e *Soft Frequency Reuse* (SFR) sob vários cenários de rede. Resultados de simulações estabelecem a técnica ICIC mais adequada a ser usada, com destaque para a SFR, que mostra a maior eficiência espectral para todas as distribuições de UEs, com exceção dos UEs em boas condições de rádio, onde a técnica *reuse*-1 é melhor.

De maneira semelhante ao trabalho em [AboulHassan et al. 2015], o trabalho [Yassin et al. 2017] considera uma pesquisa abrangente sobre técnicas de ICIC, e estuda-se o desempenho sob diversos parâmetros, como eficiência espectral, eficiência energética, *throughput*, índice de justiça e satisfação do usuário. Os resultados de simulação mostram as vantagens e as limitações de cada técnica em comparação com o modelo *reuse*-1 de frequência. A técnica *reuse*-3 mostra a menor eficiência espectral, enquanto a SFR supera o modelo *reuse*-1. A técnica FFR é um equilíbrio entre o modelo *reuse*-1 e *reuse*-3.

Atualmente, diversos trabalhos com propostas de mitigação de interferências baseados em *Game Theory* para redes LTE/LTE-A/5G têm sido publicados. Soluções em jogos potenciais para otimização eICIC distribuída são consideradas nos estudos em

[Trabelsi et al. 2017, Liu et al. 2015a, Liu et al. 2015b].

Uma abordagem similar também foi empregada no trabalho apresentado em [Liu et al. 2017] utilizando *Game Theory*. Os autores desenvolvem um escalonador *downlink* baseado no algoritmo *Cake Cutting* que supera o desempenho dos algoritmos de otimização em comparação com escalonadores convencionais.

Apesar da ICIC ser um assunto extremamente explorado pela academia e pela indústria de telecomunicações, a literatura é carente de trabalhos que exploram a comparação entre as técnicas de coordenação eICIC e FeICIC. Dessa forma, este trabalho avalia o desempenho de duas soluções de coordenação de interferência, a eICIC e a FeICIC, quando comparados com um cenário sem controle de interferência.

3. Técnicas de Coordenação de Interferência

Como mencionado anteriormente, o padrão LTE é projetado para utilizar o fator *reuse*-1 de frequência. O objetivo é fazer uso de todo o espectro disponível para lidar com a grande demanda de dados em redes móveis. A principal desvantagem dos sistemas universais de reutilização de frequências é a ICI causada por transmissões simultâneas escalonadas nos mesmos recursos de frequências por estações base vizinhas [Frank et al. 2010].

A ICIC foi introduzida pela primeira vez nas especificações 3GPP *Release* 8 LTE para lidar com problemas de interferência na borda da célula. As técnicas de ICIC podem ser agrupadas em modelos estáticos ou modelos dinâmicos. A Figura 2 resume a classificação das técnicas de ICIC.

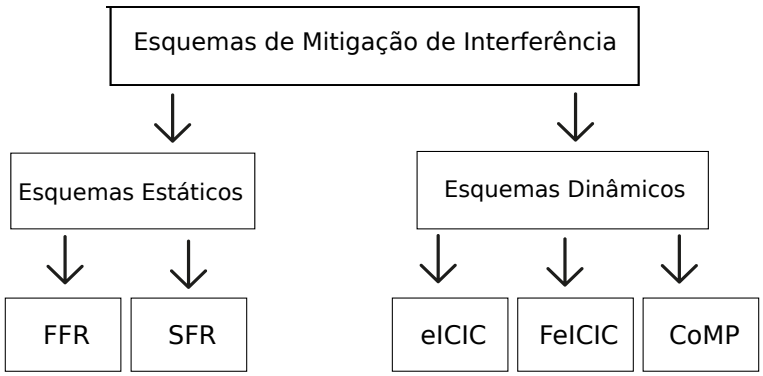

Figura 2. Técnicas de coordenação de interferência inter-celular (Adaptado de [Boujelben et al. 2014]).

As técnicas estáticas atendem à particularidade da arquitetura LTE, onde não existe uma entidade central que gerencie as eNBs (do inglês, eNodeBs) da rede. Os esquemas estáticos são baseados em esquemas de reuso da frequência que se enquadram nas categorias de FFR (do inglês, *Fractional Frequency Reuse*) e de SFR (do inglês, *Soft Frequency Reuse*). Para um maior aprofundamento das técnicas consultar o FFR em [Hassan and Assaad 2009] e SFR em [Qin et al. 2012].

Técnicas de ICIC baseadas em reuso de frequência tem se mostrado inadequadas para redes LTE, pois particionam o espectro [Yassin et al. 2017]. Por outro lado, métodos dinâmicos fazem uso de indicadores trocados entre as eNodeBs vizinhas via interface X2 para alocar RBs (do inglês, *resource blocks*) em células adjacentes de uma maneira que reduza a ICI. A Tabela 1 resume as principais características de técnicas de ICIC.

Tabela 1. Principais Características de Diferentes Técnicas de ICIC

TÉCNICAS	ICIC	eICIC	FeICIC	CoMP
3GPP Release	8	10	11	11
Domínio	Tempo	Tempo	Frequência	Espacial
Esquema	Estático	Dinâmico	Dinâmico	Dinâmico
Sincronização entre eNBs		✓	✓	✓

A ICI reduz a eficiência do espectro, diminui o *throughput* do UE e tem um impacto negativo na qualidade dos serviços prestados. Assim, as operadoras têm grande interesse na implementação de técnicas de ICIC dinâmicas para otimizar a utilização do do espectro e melhorar a QoE do UE [Yassin et al. 2017]. Apresenta-se, a seguir, os esquemas de coordenação de ICI dinâmicos, objetos de estudo do presente artigo.

3.1. Coordenação de Interferência Dinâmica

Os esquemas dinâmicos são baseados em coordenação da célula, onde a coordenação entre estações base vizinhas, tanto em nível de *sub-carriers* quanto em níveis de potência é usada. Como resultado, tais esquemas permitem uma adaptação eficiente às variações [Hamza et al. 2013]. As técnicas de coordenação de interferência dinâmicas são divididas em eICIC, FeICIC e CoMP. Para um maior aprofundamento na técnica CoMP, verificar o trabalho em [Bassoy et al. 2017].

3.1.1. eICIC

Para lidar com o problema de interferência em HetNets, como a sobreposição de células entre as *macrocells* e as *picocells*, a *enhanced* ICIC (eICIC) foi padronizada pela 3GPP *Release* 10 [3GPP 2013]. Vários aprimoramentos foram feitos para superar as limitações dos esquemas de ICIC anteriores.

A CRE (do inglês, *Cell Range Expansion*) é usada na eICIC para descarregar o tráfego das *macrocells* e aumentar a capacidade do sistema. Uma maneira de fazer isso é aumentar a área servida pela *smallcell*, mesmo se o UE estiver recebendo um nível de potência de sinal maior da *macrocell*.

A principal mudança em relação ao ICIC estático é a adição de esquemas no domínio do tempo baseados no particionamento de recursos de tempo para limitar a interferência aos usuários da borda das *smallcells*. A *macrocell* cria *sub-frames* "protegidos" para uma *picocell* reduzindo sua potência de transmissão ou "silenciando" durante certos *sub-frames*, chamados ABS (do inglês, *Almost Blank Sub-frames*). Durante o ABS, a *macrocell* não transmite o PDSCH (do inglês, *Physical Downlink Shared Channel*), mas, para compatibilidade com versões anteriores, certos sinais devem ser transmitidos em todos os *sub-frames* DL, mesmo que silenciados [Boujelben et al. 2014].

As especificações 3GPP definem o ABS no formato de um padrão de *bitmap* de 40 *sub-frames* com duração de 40 ms. As eNBs trocam esses padrões de ABS por meio de OAM (do inglês, *Operation Administration and Maintenance*) ou via interface X2. Para permitir isso, a ICIC no domínio do tempo requer transmissões de eNodeBs sincronizadas no tempo. O mecanismo do ABS é ilustrado na Figura 3.

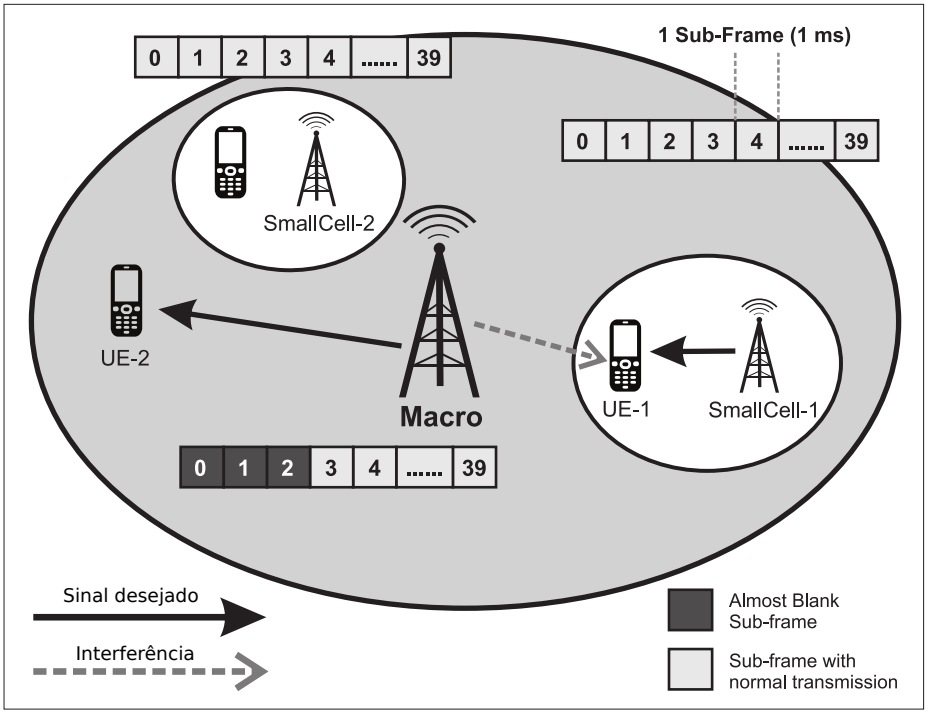

Figura 3. Técnica ABS para interferência (Adaptado de [Trabelsi et al. 2017]).

O UE-1, associado à *smallcell*-1, sofre interferência da *macrocell*, por estar localizado na borda da *smallcell*. Durante cada um dos três *subframes* do padrão de 40 ms, a *macrocell* é silenciada e não envia nenhum tráfego de dados. A interferência é reduzida durante esses ABSs e, portanto, a *smallcell*-1 aproveitará para escalonar o UE-1.

A proposta do eICIC nos padrões LTE permite o compartilhamento no tempo de *subframes* para link de transmissões entre as *macrocells* e *smallcells*, de modo a mitigar a alta interferência experimentada especialmente por usuários da *smallcell* no *downlink*. A noção de eICIC via ABS é geralmente acoplada na literatura com outra técnica importante para as HetNets, ou seja, a alocação de recursos apropriada para garantir que as *smallcells* não fiquem subutilizadas e nem sejam sobrecarregadas.

3.1.2. FeICIC

FeICIC (do inglês, *Further enhanced Inter-cell Interference Coordination*) foi proposta na 3GPP *Release* 11 [3GPP 2012a]. Nessa técnica, em vez de oferecer ABSs, as *macrocells* alocam RP-ABSs (do inglês, *Reduced Power Almost Blank Subframes*) para atender seus usuários em níveis reduzidos de potência.

O ABS requer que a *macrocell* anule a potência de transmissão nos elementos de recurso do PDSCH nos *subframes*. Isso se traduz em perda de recursos que é resultado da utilização de TDM (do inglês, *Time Division Multiplexing*) em *subframes* eICIC e *subframes* não-eICIC. Enquanto a *smallcell* poderia usar *subframes* eICIC e não-eICIC, as *macrocells* só poderiam usar *subframes* não-eICIC para escalonar seus usuários.

Em *subframes* eICIC, o CRS (do inglês, *Cell-specific Reference Signals*) deve ser transmitido para suportar medições e relatórios dos UEs. A interferência do CRS pode ser prejudicial para vários canais de dados e controle. Com o salto em frequência nos sinais de referência, os símbolos CRS das células vizinhas são classificados como "*non-colliding*" e os salto em frequência dos sinais de referência. Sem saltos em frenquência nos sinais de referência, os símbolos CRS das células vizinhas são classificados como "*colliding*" e os símbolos CRS interferem nos símbolos CRS das células vizinhas, o que leva a uma estimativa imprecisa do canal [Ali 2015]. Na FeICIC, ambos os casos de interferência do CRS podem ser evitados pelo transmissor ou removidos pelo receptor.

A abordagem FeICIC baseada no receptor depende da mitigação da interferência no UE para eliminiar a interferência dominante do CRS, o que requer a estimativa do mesmo no receptor. Por outro lado, a abordagem FeICIC baseada no transmissor depende do silenciamento dos elementos de recurso do PDSCH dentro de um ABS da *smallcell* que experimenta forte interferência do CRS da *macrocell*. Dessa forma, RP-ABS proporciona ganhos substanciais no desempenho do sistema em relação ao ABS [Ali 2015].

4. Ambiente de Simulação

Para avaliar o desempenho das técnicas de ICIC, um ambiente de simulação no *software* MATLAB foi modelado com referência no trabalho em [Liu et al. 2017]. A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros de simulação, os quais são baseados no trabalho descrito em [Yassin et al. 2017].

A geometria da célula para o sistema LTE simulado é hexagonal. O cenário é composto por 7 *clusters* constituídas por *macrocells* e *picocells*, sendo seis adjacentes ao *cluster* central. Os seis *clusters* vizinhos do *cluster* central são cópias exatas do *cluster* central. A distância *inter-macrocells* é igual a 1000 m, o que corresponde a uma rede LTE implantada em uma área urbana. Em cada célula, 25 RBs estão disponíveis, já que a largura de banda operacional é igual a 5 MHz. No entanto, o modelo de tráfego é o *full buffer*, ou seja, todos os RBs disponíveis são alocados permanentemente para os UEs ativos na rede.

Realiza-se estudos de simulação em otimizações eICIC e FeICIC, gerando aleatoriamente 10 topologias de HetNets e, em seguida, calcula-se a média dos indicadores de desempenho de todas as topologias. Assume-se que há apenas uma *macrocell* localizada no centro de cada hexágono, e cada hexágono tem o mesmo número de *picocells*. No *cluster* central de cada topologia, um número de *picocells* (variando de 1 a 5) e usuários são colocados dentro de cada hexágono, onde as *picocells* são colocadas aleatoriamente. Além disso, em cada hexágono no centro do *cluster*, 10 usuários são colocados aleatoriamente até 100 metros das *picocells* no mesmo hexágono [2].

Assume-se que os usuários são estáticos. Além disso, cada PRB (do inglês, *Physical Resource Block*) experimenta o desvanecimento de *Rayleigh* com a variância 1. O *shadow fading* de uma *macrocell* para um usuário é calculado adicionando primeiro um valor de sombreamento comum e um valor de sombreamento aleatório e dividindo a soma por $\sqrt{2}$, onde ambos os valores de sombreamento são gerados de acordo com a distribuição log-normal.

[2]Se existe p *picocells* onde p $>$ 1, então os 10 usuários são divididos em p grupos, e um grupo de usuários é colocado aleatoriamente perto de uma *picocell*

Tabela 2. Parâmetros de Simulação

Parâmetros	Valores	Descrição
Geometria da célula	Hexagonal	Uma célula é servida por uma eNodeB
Número de *clusters*	7	–
Distância entre *macrocells*	1000 m	Área Urbana
Dist. min. da *macrocell* p/ usuário	35 m	–
Dist. min. da *picocell* p/ usuário	10 m	–
Dist. min. da *macrocell* p/ *picocell*	75 m	–
Largura de banda	5 MHz	–
Número de RBs	25	–
Frequência de *sub-carrier*	15 kHz	1 RB = 12 *sub-carriers*
Largura de banda RB	180 kHz	12 x 15 kHz
Valores CSB	C := {0,3,6,9,12,15} dB	–
TTI	1 ms	*Transmit time interval*
Densidade de ruído térmico	-174 dBm/Hz	–
Escalonador	*Proportional Fair*	–
Modelo de tráfego	*Full buffer*	–
Potência *macrocell* (P_t)	40 W	–
Potência *picocell* (P_t)	1 W	–
Potência máxima por RB	0.8 W	$\frac{P_t}{num.deRBs}$
$SINR_{threshold}$	5 dB	Classificação UE [Kawser et al. 2012, Fujitsu 2011]
Ganho de antena	14 dBi	–
Penetration loss (PenL)	10 dB	–
Modelo de perda de percuso	$15,3 + 37,6log_{10}(D)$	Como em [3GPP 2006a, 3GPP 2006b]
Shadow fading (ζ)	Distribuição *Log-normal*	Desvio padrão = 6 dB [3GPP 2010]

5. Apresentação e Análise de Resultados

Nesta Seção é analisado o desempenho das seguintes técnicas de coordenação de interferência: eICIC e FeICIC. As métricas de desempenho utilizadas para a análise foram: eficiência espectral, eficiência energética, *throughput* de usuários na borda da célula e índice de justiça.

5.1. Eficiência Espectral e Eficiência Energética

A eficiência espectral é definida como a média de bits transmitidos por segundo por Hz (bps/Hz) de todos os PRBs alocados, com os resultados obtidos mostrados na Figura 4. Observa-se que a utilização das técnicas de ICIC resultaram em um aumento da eficiência espectral, principalmente, com o aumento do número de *picocells*. Além disso, a técnica FeICIC possui melhor desempenho do que a eICIC apenas no cenário com 5 *picocells*. Isso indica que a FeICIC é mais adequada em termos de eficiência espectral em HetNets com maior nível de densificação.

A Figura 5 mostra a eficiência energética de diferentes esquemas de otimização no *cluster* central, onde a eficiência energética é calculada como o número de bits transmitidos dividido pela potência de transmissão. Novamente, a utilização das técnicas de ICIC resultaram em um aumento da eficiência energética em todos os cenários. Nota-se que a estratégia FeICIC obteve resultados superiores ao da técnica eICIC, mostrando-se uma técnica mais adequada para a coordenação de interferências no cenário analisado.

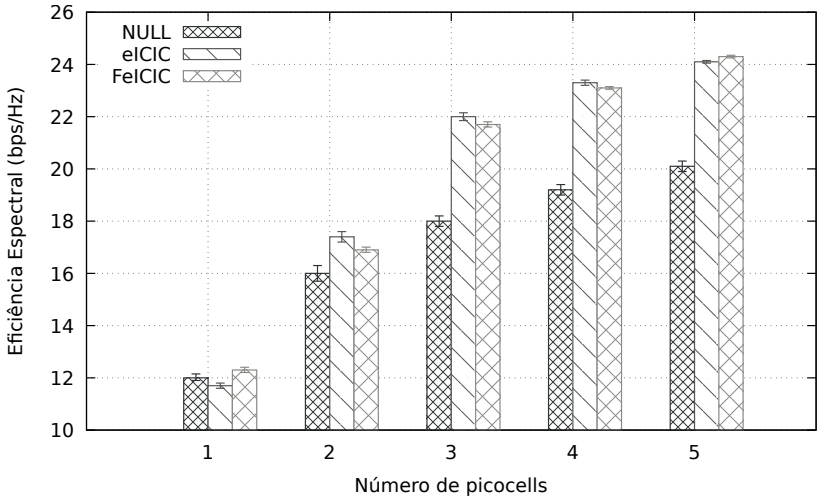

Figura 4. Índice comparativo da eficiência espectral em função do número de *picocells*.

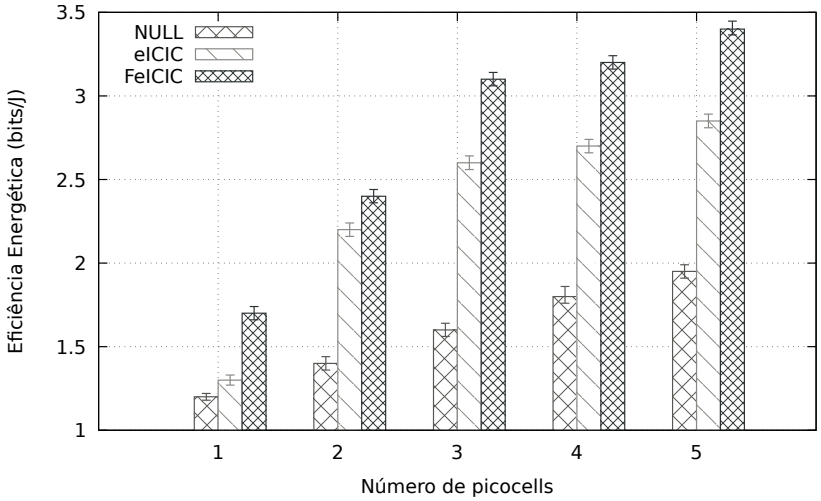

Figura 5. Índice comparativo da eficiência energética em função do número de *picocells*.

Uma vez que a densificação da rede é um elemento chave para aumentar a cobertura do sistema e atender a crescente demanda, a utilização de técnicas de coordenação de interferências, principalmente a FeICIC, permitiram melhoras na eficiência espectral e energética sendo, portanto, importantes para ampliar a capacidade da rede.

5.2. *Throughput*

A Figura 6 mostra a CDF (do inglês, *Cumulative Distribution Function*) para as taxas de *throughput* dos 5% de usuários que tendem a apresentar os maiores níveis de interferência, isto é, estão na borda da célula no *cluster* central. Os resultados são para o cenário com 2 *picocells* e, através dessa configuração, a otimização eICIC obtém uma melhora do *throughput* em torno de 33% e a FeICIC melhora em torno de 37%. Consequentemente, quando as operadoras de redes móveis buscam melhorar o *throughput* dos usuários na borda da célula, novamente, a FeICIC é a técnica mais adequada entre os esquemas de ICIC estudados.

O aumento do *throughput* é uma consequência da melhoria da eficiência espectral e energética obtidas pelas técnicas de ICIC. Com uma maior densificação do sistema, espera-se que a diferença de desempenho em relação ao *throughput* das três estratégias avaliadas (*NULL*, eICIC e FeICIC) se intensifique.

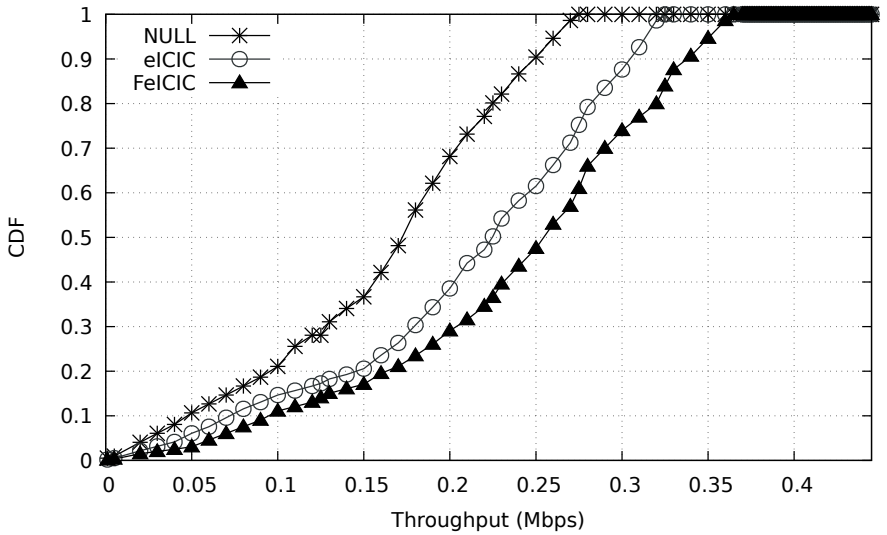

Figura 6. A *cumulative distribution function* (CDF) das taxas de *throughput* dos 5% piores usuários no *cluster* central.

5.3. Índice de Justiça

O índice de justiça é apresentado na Figura 7 para os usuários do *cluster* central configurado para vários tipos de topologias, alternando o número de *picocells* nas células.

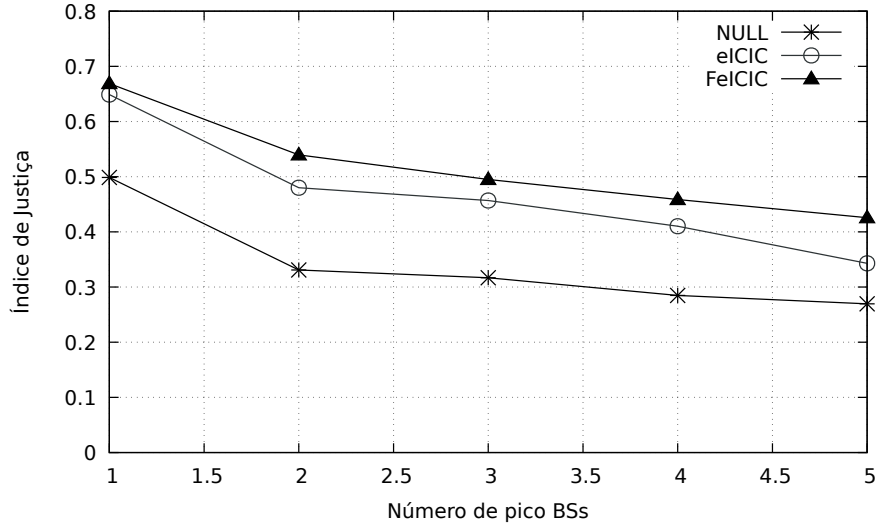

Figura 7. Índice de justiça para usuários do *cluster* central configurado para vários tipos de topologias.

Observa-se que com o aumento do número de *picocells*, há uma dimuição do índice de justiça para todas as técnicas analizadas. Entretando, em todos os cenários a

utilização da FeICIC resultou em índices de justiça superiores aos da técnica eICIC e do cenário sem coordenação de interferência (*NULL*), que apresentou os piores índices.

Por fim, conclui-se que a técnica FeICIC melhora a eficiência energética, eficiência espectral e *throughput* sem prejudicar a justiça, nos cenários avaliados. Dessa forma, em cenários com uma maior densificação, como é esperado para futuras redes móveis, a técnica FeICIC mostra-se importante para a coordenação de interferência.

6. Conclusões

A crescente demanda por acesso a serviços de redes banda larga sem fio, assim como o crescimento exponencial de aplicativos móveis tem motivado as operadoras de redes móveis a escolher modelos de reutilização de frequência para melhorar a eficiência espectral. Além disso, uma das estratégias para aumentar a capacidade do sistema é a densificação da rede através de estações de baixa potência dando origem as HetNets. Como consequência, surgem problemas de interferência inter-celular que têm um impacto negativo no *throughput* do UE e no desempenho do sistema. As técnicas de ICIC são propostas para mitigar a ICI e para melhorar o *throughput* dos UEs sem reduzir a eficiência espectral.

Neste artigo, propôs-se um estudo das técnicas de ICIC para as Hetnets no *downlink* LTE-A através das análises de eficiência espectral, eficiência energética, *throughput* e índice de justiça. Apresenta-se uma comparação de desempenho entre os métodos de coordenação eICIC e FeICIC. Os resultados de simulação demonstraram que a otimização FeICIC pode melhorar a eficiência espectral e energética quando comparado a outras técnicas analisadas, principalmente em cenários de maior densificação da rede. Adicionalmente, a FeICIC pode gerar ganhos significativos no *throughput* de usuários localizados na borda da célula, que são os que enfrentam os maiores níveis de interferência. Em paralelo aos ganhos obtidos, a técnica FeICIC manteve os melhores índices de justiça dos usuários nos cenários avaliados.

Para a continuidade deste trabalho destaca-se a necessidade de um estudo da integração das técnicas eICIC e FeICIC com um algoritmo de escalonamento que utilize SINR na sua função de utilidade, visando otimizar o desempenho em uma HetNet.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro fornecido através do processo TEC-APQ-03279-17.

Referências

3GPP (2006a). Radio frequency (RF) system scenarios, 3GPP TR 36.922.

3GPP (2006b). Radio frequency (RF) system scenarios, 3GPP TR 36.931 release 9.

3GPP (2010). 3GPP TR 36814 V9.0.0 Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9).

3GPP (2012a). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Mobility Enhancements in Heterogeneous Networks (Release 11).

3GPP (2012b). Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced).

3GPP (2013). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2.

AboulHassan, M. A., Yassin, M., Lahoud, S., Ibrahim, M., Mezher, D., Cousin, B., and Sourour, E. A. (2015). Classification and comparative analysis of inter-cell interference coordination techniques in lte networks. In *2015 7th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, pages 1–6.

Ali, M. S. (2015). An overview on interference management in 3 gpp lte-advanced heterogeneous networks.

Bassoy, S., Farooq, H., Imran, M. A., and Imran, A. (2017). Coordinated multi-point clustering schemes: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):743–764.

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

Cisco (2018). Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016-2021, White Paper.

Dahlman, E., Parkvall, S., and Skold, J. (2018). *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Academic Press, first edition.

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

Fodor, G., Koutsimanis, C., Rácz, A., Reider, N., Simonsson, A., and Müller, W. (2009). Intercell interference coordination in ofdma networks and in the 3gpp long term evolution system. *JCM*, 4:445–453.

Frank, P., Müller, A., Droste, H., and Speidel, J. (2010). Cooperative interference-aware joint scheduling for the 3gpp lte uplink. In *21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 2216–2221.

Fujitsu (2011). Enhancing LTE cell-edge performance via PDCCH ICIC, White Paper.

Hamza, A. S., Khalifa, S. S., Hamza, H. S., and Elsayed, K. (2013). A survey on inter-cell interference coordination techniques in ofdma-based cellular networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(4):1642–1670.

Hassan, N. U. and Assaad, M. (2009). Optimal fractional frequency reuse (ffr) and resource allocation in multiuser ofdma system. In *2009 International Conference on Information and Communication Technologies*, pages 88–92.

Holma, H. and Toskala, A. (2012). *LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced*. New York, NY, USA: Wiley.

Imran, A., Zoha, A., and Abu-Dayya, A. (2014). Challenges in 5g: how to empower son with big data for enabling 5g. *IEEE Network*, 28(6):27–33.

Kawser, M. T., Hamid, N. I. B., Hasan, M. N., Alam, M. S., M., and Rahman, M. (2012). Downlink snr to cqi mapping for different multiple antenna techniques in lte. In *International Journal of Information and Electronics Engineering*, page 756–760.

Kuang, Q., Utschick, W., and Dotzler, A. (2016). Optimal joint user association and multi-pattern resource allocation in heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(13):3388–3401.

Li, Q. C., Niu, H., Papathanassiou, A. T., and Wu, G. (2014). 5g network capacity: Key elements and technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1):71–78.

Liu, Y., Chen, C. S., and Sung, C. W. (2015a). 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.

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

Liu, Y., Chen, C. S., Sung, C. W., and Singh, C. (2017). A game theoretic distributed algorithm for feicic optimization in lte-a hetnets. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25(6):3500–3513.

Nokia (2014). Looking ahead to 5G, White Paper.

Qin, Z., Zhong, Z., Xu, R., and Bai, G. (2012). System performance of soft frequency reuse in lte railway networks. In *2012 IEEE 11th International Conference on Signal Processing*, volume 2, pages 1566–1570.

Sesia, S., Toufik, I., and Baker, M. (2011). *LTE - the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley, 2nd edition.

Shin, W., Noh, W., Jang, K., and Choi, H. (2012). Hierarchical interference alignment for downlink heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(12):4549–4559.

Trabelsi, N., Chen, C. S., Azouzi, R. E., Roullet, L., and Altman, E. (2017). User association and resource allocation optimization in lte cellular networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 14(2):429–440.

Xiao, D., Yu, X., and Yang, D. (2012). A novel downlink icic method based on user position in lte-advanced systems. In *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pages 1–5.

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