




Análise de Algoritmos de Escalonamento e Gerenciamento de Interferência para Redes Heterogêneas no *Downlink* LTE-A e 5G

Júnio Moreira , Éderson R. Silva  e Paulo R. Guardieiro , *Member, IEEE*

Resumo—A demanda por serviços relacionados à internet móvel aumentou a necessidade de largura de banda nas redes celulares de quinta geração (5G). A densificação das redes apresenta-se como uma solução promissora para aumentar a cobertura do sistema e atender à crescente demanda por dados móveis. No entanto, a interferência inter-celular representa um desafio que limita o desempenho do sistema, especialmente para os usuários localizados na borda da célula. Em vista disso, propõe-se neste artigo uma análise dos algoritmos de escalonamento tradicionais, tais como o *Proportional Fair* (PF) e o *Round Robin* (RR), além de um estudo das técnicas de *enhanced Inter-cell Interference Coordination* (eICIC) e *Further ICIC* (FeICIC), para redes heterogêneas no *downlink* do *Long Term Evolution Advanced* (LTE-A) e 5G. Ademais, apresenta-se uma melhoria no algoritmo de escalonamento PF, referido como *Proportional Fair Plus* (PF+). Os resultados de simulação mostram as vantagens e limitações das técnicas de ICIC e o desempenho dos algoritmos de escalonamento nos cenários analisados.

Palavras-Chave—5G, Densificação de Redes, Interferência Inter-Celular, *Downlink*, LTE-A.

Abstract—The demand on mobile Internet related services has increased the need for higher bandwidth in fifth generation cellular networks (5G). Cell densification serves as a promising candidate solution for increasing system coverage and meeting the growing demand for mobile data. However, ICI represents a real challenge that limits system performance, especially cell-edge throughput. In view of this, we propose in this paper an analysis of the traditional scheduling algorithms *Proportional Fair* (PF) and *Round Robin* (RR), besides a study of the enhanced *Inter-cell Interference Coordination* (eICIC) and *Further ICIC* (FeICIC) techniques for hetnets in the *downlink* *Long Term Evolution Advanced* (LTE-A) and 5G. In addition, there is an improvement in the PF scheduling algorithm, referred to as *Proportional Fair Plus* (PF+). The simulation results show the advantages and limitations of the ICIC techniques and the performance of the scheduling algorithms in the analyzed scenarios.

Keywords—5G, Cell Densification, Interference Inter-Celular, *Downlink*, LTE-A.

I. INTRODUÇÃO

O volume de tráfego de dados gerado nas redes móveis celulares está aumentando continuamente [1]. Os sistemas sem fio existentes não são capazes de lidar com o aumento de dados móveis consumidos por novos aplicativos e serviços, como multimídia 3D difundida, vídeos 4k, realidade virtual

Os autores estão vinculados ao Grupo de Pesquisa em Redes de Computadores da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia-MG, Brasil. E-mails: {ersilva, prguardieiro}@ufu.br. Júnio Moreira é vinculado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM). E-mail: juniomoreira@iftm.edu.br

e aumentada, *internet of things* (IoT) e jogos. A rede 5G é uma tecnologia promissora para satisfazer a demanda futura de serviços de dados, pois é planejada para fornecer altas taxas, maior área de cobertura, maior disponibilidade, baixa latência e baixo consumo de energia [2].

A rede 5G promete um significativo aumento no *throughput* da célula e uma eficiência espectral melhorada em comparação com os sistemas anteriores. Para alcançar esses objetivos, 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 *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR) [3].

Por outro lado, a densificação da rede leva à *Inter-Cell Interference* (ICI), afetando fortemente a SINR de *User Equipments* (UEs) ativos, especialmente os UEs localizados na borda da célula [4], o que gera uma degradação significativa no *throughput* total desses usuários. Assim, é necessário coordenar a alocação de recursos entre as células e minimizar a ICI.

Nesse sentido, o mecanismo de alocação de recursos e o gerenciamento de ICIC são características fundamentais das redes LTE-A e 5G. Diversos trabalhos apresentaram propostas para ICIC em sistemas móveis de comunicação. Por exemplo, em [5], compara-se os diferentes métodos de ICIC e apresenta-se os resultados obtidos com o aprimoramento de desempenho em termos de *throughput* na borda da célula. No trabalho desenvolvido em [6], novos modelos de classificação das técnicas de ICIC são apresentados e usados para descrever as classes estáticas e dinâmicas. Já em [7], o autor considera uma pesquisa abrangente sobre técnicas de ICIC, e estuda-se o desempenho sob diversos parâmetros. Os resultados de simulação mostram as vantagens e as limitações de cada técnica em comparação com o modelo reuse-1 de frequência. De forma semelhante em [8], o objetivo é analisar o desempenho das técnicas de coordenação estáticas sob vários cenários de rede.

Vários trabalhos com propostas de mitigação de interferência baseados em *Game Theory* para redes LTE/LTE-A/5G têm sido publicados. Soluções utilizando jogos potenciais exatos para otimização eICIC distribuída são consideradas nos estudos em [9]–[11]. Uma abordagem similar também foi empregada no trabalho apresentado em [12] utilizando *Game Theory*. Os autores desenvolvem um escalonador 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 explorem a comparação entre as técnicas de coordenação eICIC e FeICIC juntamente com uma análise de algoritmos de escalonamento em redes LTE-A e 5G. Portanto, as principais contribuições deste artigo são:

- (i) Uma proposta de melhoria do algoritmo de escalonamento *Proportional Fair* (PF) através de uma função de utilidade modificada, denominado PF+, visando otimizar o desempenho em termos de eficiência espectral, eficiência energética, *throughput* de usuários na borda da célula e índice de justiça.
- (ii) Uma análise de desempenho de diferentes algoritmos de escalonamento (PF, PF+ e RR), além de um estudo das técnicas eICIC e FeICIC ao compará-las em cenários sem coordenação de interferência e com diferentes níveis de densificação para redes LTE-A e 5G.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II, uma breve revisão dos algoritmos de escalonamento utilizados no trabalho, é realizada. As técnicas de ICIC nas redes LTE-A e 5G são discutidas na Seção III. O ambiente de simulação é apresentado na Seção IV. Os resultados da simulação e desempenho das técnicas eICIC e FeICIC são analisados na Seção V. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros são apresentadas na Seção VI.

II. ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO *Downlink* EM REDES LTE-A E 5G

Apresenta-se, a seguir, os algoritmos de escalonamento *downlink* para as redes heterogêneas LTE-A e 5G, estudados neste trabalho.

A. Escalonador *Proportional Fair* (PF)

O escalonador PF provê uma entrega justa de recursos para os usuários do sistema, uma vez que, tenta encontrar um equilíbrio entre eficiência espectral e justiça, ajustando o índice de escalonamento de acordo com a qualidade instantânea do canal em relação ao seu desempenho ao longo do tempo [13]. Para a estação s , o b -th *physical resource block* (PRB) no *subframe* $\tau(b)$, dado que o *subframe* não é um *almost blank subframe* (ABS), será alocado para o seguinte usuário:

$$\hat{u}_b \triangleq \underset{u \in \mathcal{U}_i}{\operatorname{argmax}} \frac{r_{u,b}}{\bar{r}_u(\tau(b))}, \quad (1)$$

onde $\tau(b)$ é o index do *subframe* do b -th PRB, $b \in [1, B]$, $r_{u,b}$ é o *throughput* do usuário u no *subframe* b e $\bar{r}_u(\tau(b))$ é o *throughput* médio ao longo do tempo do usuário u no *subframe* $\tau(b)$, que é calculado como:

$$\bar{r}_u(t) = \left(1 - \frac{1}{s_w}\right) \bar{r}_u(t-1) + \frac{1}{s_w} \sum_{b|\tau(b)=t} r_{u,b} \cdot \mathcal{I}\hat{u}_b = u. \quad (2)$$

Na equação 2, s_w é o tamanho da janela e $\mathcal{I}\{\cdot\}$ é uma função que tem como objetivo usar o *throughput* médio do passado $\bar{r}_u(t)$ para atuar como um fator de ponderação da taxa de dados $r_{u,b}$, para que os usuários em condição de qualidade baixa de canal sejam atendidos dentro de um determinado período de tempo.

B. Proposta de Melhoria do Algoritmo *Proportional Fair*: *Proportional Fair Plus* (PF+)

O escalonador *Proportional Fair Plus* (PF+) foi proposto com base no trabalho descrito em [14] e adaptação de pesos afim de maximizar uma função utilidade para melhorias na alocação de recursos. A métrica de escalonamento do PF+ visa o equilíbrio entre o desempenho da taxa de transferência e a justiça na distribuição dos recursos pelo PF. Segue-se abaixo a equação que define o algoritmo PF+:

$$\hat{u}_b \triangleq \underset{u \in \mathcal{U}_i}{\operatorname{argmax}} (s_w) \cdot \frac{[r_{u,b}]^\beta}{[\bar{r}_u(\tau(b))]^\gamma}, \quad (3)$$

onde o objetivo de β e γ é modificar o impacto na política de alocação da taxa de *throughput* e da taxa média de dados obtido no passado, respectivamente. Intuitivamente, se $\beta = 0$, a métrica do escalonador PF+ se tornaria igual à métrica do escalonador *blind equal throughput* (BET), o que significa que a justiça pode ser alcançada pelo sistema, independentemente das condições do canal [15]. Em contrapartida, definir $\gamma = 0$ transformaria no escalonador *maximum throughput* (MT), sem justiça para o escalonamento, porém com um nível mínimo de serviço [15]. Observe que a métrica do PF definida na Equação 1 resulta em um caso particular do PF+ com $\beta = \gamma = 1$.

Diferentes realizações de β e γ afetarão os elementos na taxa de transmissão instantânea e na taxa média de dados. Portanto, define-se o tamanho da janela, $s_w = 20$, o valor de $\beta = 0.6$ e de $\gamma = 0.7$ através do método de força bruta após a simulação em vários cenários. O principal objetivo do escalonador PF+ é atender aos usuários de acordo com os requisitos prioritários e, portanto, obter um melhor desempenho da rede através do ajuste adequado de β e γ .

C. Escalonador *Round-Robin* (RR)

O escalonador *Round-Robin* (RR) é provavelmente o mais simples encontrado na literatura [16]. Atribui *resource block groups* (RBGs) sequencialmente aos UEs sem nenhuma preocupação com as condições do canal, dividindo assim os recursos disponíveis entre os fluxos ativos.

Se o número de RBGs for maior que o número de fluxos ativos, todos os fluxos poderão ser alocados no mesmo *subframe*. Caso contrário, no próximo *subframe*, a alocação começará a partir do último fluxo que não foi alocado. Isso pode ser considerado um escalonamento justo, no sentido de que a mesma quantidade de recursos de rádio é dada a cada link de comunicação. No entanto, não é justo no sentido de fornecer a mesma qualidade de serviço para todos os usuários.

No escalonamento, os recursos de tempo são divididos igualmente entre os usuários, um após o outro e sem nenhuma prioridade, baseado na disponibilidade de RBs durante o processo de escalonamento. A métrica é semelhante ao escalonador FIFO, a diferença está em T_u , que é o último acesso ao canal de transmissão do usuário u :

$$\hat{u}_b \triangleq \underset{u \in \mathcal{U}_i}{\operatorname{argmax}} t - T_u \quad (4)$$

III. TÉCNICAS DE COORDENAÇÃO DE INTERFERÊNCIA

A ICI reduz a eficiência espectral, diminui o *throughput* do UE e tem um impacto negativo na qualidade dos serviços prestados. No entanto, as técnicas de ICIC baseadas em reuso de frequência não são adequadas para redes LTE, pois particionam o espectro [7]. Dessa forma, apresenta-se, a seguir, os esquemas de coordenação de ICI dinâmicos, cujas técnicas são utilizadas em sistemas LTE-A e 5G para otimizar a utilização do espectro.

A. eICIC

Para lidar com o problema de interferência em redes heterogêneas, como a sobreposição de células entre as *macrocells* e as *picocells*, a eICIC foi padronizada pela 3GPP Release 10 [17]. Duas técnicas representativas são descritas brevemente a seguir.

- *Cell Range Expansion* (CRE) é usada para equilibrar a *Reference Signal Received Power* (RSRP) das *macrocells*, através da aplicação de *biases*¹ não negativos para um usuário que não esteja necessariamente associado à estação base que fornece a potência recebida mais forte e,
- *Almost blank subframe* (ABS) 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*.

No entanto, sua implementação real não é claramente especificada pelo padrão e não há indicação de como definir os parâmetros CRE e ABS para diferentes configurações de rede.

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

B. FeICIC

A FeICIC foi proposta na 3GPP Release 11 [18]. Nessa técnica, em vez de oferecer ABSs, as *macrocells* alocam *Reduced Power Almost Blank Subframes* (RP-ABSs) 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 canal físico compartilhado de *downlink* (PDSCH) nos *subframes*. Isso se traduz em perda de recursos que é resultado da utilização de multiplexação da divisão de tempo (TDM) em *subframes* eICIC e *subframes* não-eICIC. Enquanto a *picocell* poderia usar *subframes* eICIC e não-eICIC, as *macrocells* só poderiam usar *subframes* não-eICIC para escalar seus usuários.

O objetivo da FeICIC é o tratamento de interferência pelo UE através do cancelamento de interferência entre células.

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

A abordagem FeICIC baseada no receptor depende da mitigação da interferência no UE para eliminar a interferência dominante do CRE, 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 *picocell* que experimenta forte interferência do CRE da *macrocell*. Dessa forma, RP-ABS proporciona ganhos substanciais no desempenho do sistema em relação ao ABS [18].

IV. 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 [12], esse modelo foi escolhido porque a adição de pequenas células (*picocells*) na área de cobertura das células tradicionais (*macrocells*) é uma das principais estratégias para aumentar a capacidade dos sistemas 5G. A Tabela I apresenta os principais parâmetros de simulação, os quais são baseados no trabalho descrito em [19].

TABELA I: Parâmetros de Simulação.

Parâmetros	Valores
Antena por <i>site</i>	Omnidirectional \times 1
Densidade de ruído térmico	-174 dBm/Hz
Distância entre <i>macrocells</i>	1000 m
Dist. min. da <i>macrocell</i> p/ <i>picocell</i>	75 m
Dist. min. da <i>macrocell</i> p/ UE	35 m
Dist. min. da <i>picocell</i> p/ UE	10 m
Escalonadores	<i>Proportional Fair</i> (PF) <i>Proportional Fair Plus</i> (PF+) <i>Round-Robin</i> (RR)
Ganho de antena	14 dBi
Geometria da célula	Hexagonal
Largura de banda	5 MHz
Modelo de tráfego	<i>Full buffer</i>
Número de <i>clusters</i>	7
Número de RBs	25
<i>Penetration loss</i> (PenL)	10 dB
Perda de percurso da <i>macrocell</i> p/ UE	$128.1 + 37.6 \log_{10} d$, d in km
Perda de percurso da <i>picocell</i> p/ UE	$140.7 + 36.7 \log_{10} d$, d in km
Potência da <i>macrocell</i> (P_t)	40 W
Potência da <i>picocell</i> (P_t)	1 W
Valores de <i>Cell Selection Bias</i> (CSB)	$C := \{0,3,6,9,12,15\}$ dB

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 com as otimizações eICIC e FeICIC, através de 10 topologias de *HetNets* geradas aleatoriamente e, em seguida, calcula-se a média dos indicadores de desempenho. 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 *pico cells* são colocadas aleatoriamente. Além disso, em cada hexágono no centro do *cluster*, 10 usuários são colocados aleatoriamente até 100 metros das *pico cells* no mesmo hexágono.

Assume-se que os usuários são estáticos. Além disso, cada PRB experimenta o desvanecimento de *Rayleigh* com a variância 1. O *shadow fading* de uma *macro cell* 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.

V. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção é analisado o desempenho das seguintes técnicas de coordenação de interferência: eICIC, FeICIC e um cenário sem coordenação de interferência (*NULL*), utilizando os algoritmos de escalonamento da Seção II, PF, PF+ e RR. As métricas de desempenho utilizadas para a análise foram: eficiência espectral, eficiência energética, *throughput* de usuários na borda da célula e índice de justiça.

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 1. Observa-se que a utilização da técnica FeICIC resulta em um aumento da eficiência espectral, principalmente, com o aumento do número de *pico cells*. Isso indica que a FeICIC é mais adequada em termos de eficiência espectral em *Heterogeneous Networks* (HetNets) com maior nível de densificação. Além disso, houve um ganho de desempenho do PF+ em comparação com os demais algoritmos de escalonamento em todos os cenários analisados.

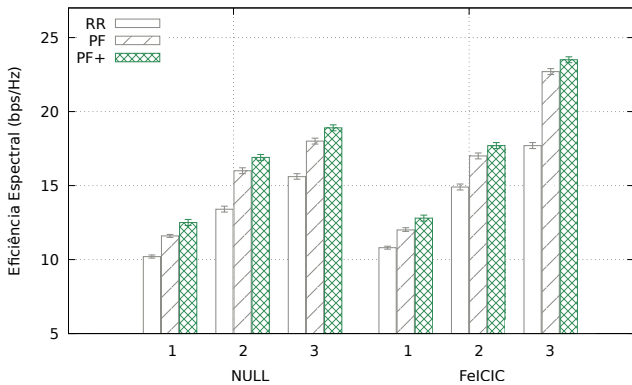


Fig. 1: Índice comparativo da eficiência espectral em função do número de *pico cells* por otimização.

A Figura 2 mostra a eficiência energética com a utilização da técnica FeICIC e um cenário sem controle de interferência no *cluster* central, onde a eficiência energética é calculada como o número de bits transmitidos dividido pela potência de transmissão. Novamente, a utilização da técnica FeICIC resulta em um aumento da eficiência energética em todos os cenários. Nota-se que a estratégia FeICIC obteve resultados superiores ao esquema *NULL*, mostrando a importância de técnicas de coordenação de interferências no cenário analisado. Nota-se também, uma melhoria de desempenho com o algoritmo PF+

que supera os algoritmos RR e PF, sendo que, o algoritmo RR sempre obtém os piores resultados.

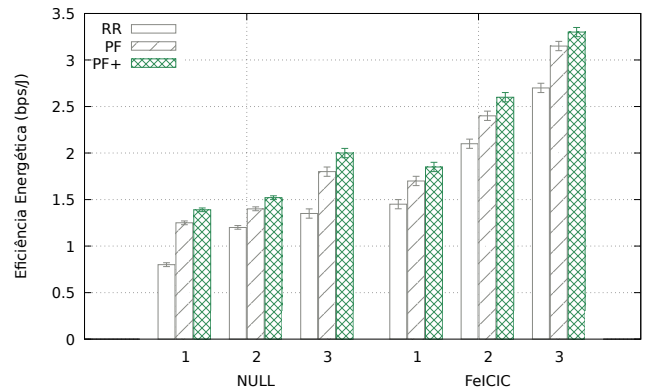


Fig. 2: Índice comparativo da eficiência energética em função do número de *pico cells* por otimização.

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

A Figura 3 mostra a *Cumulative Distribution Function* (CDF) 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, através dos escalonadores PF e PF+.

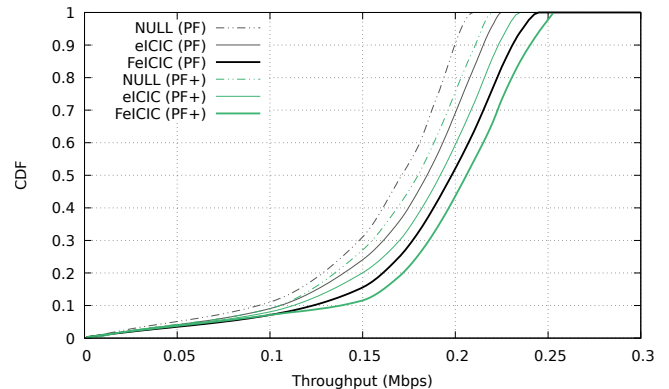


Fig. 3: CDF das taxas de *throughput* dos 5% piores usuários no *cluster* central.

Os resultados são para o cenário com 2 *pico cells* e, através dessa configuração, verifica-se um ganho de desempenho do PF+ em relação ao escalonador PF, em todas as técnicas de ICIC. Por questões de transparência, o escalonador RR não foi impresso no gráfico, porém obteve os piores resultados 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.

O índice de justiça é apresentado na Tabela II, observa-se que com o aumento do número de *picocells*, há uma diminuição do índice de justiça para todas as técnicas analisadas. Entretanto, em todos os cenários a utilização da FeICIC e do algoritmo PF+ resultaram em índices de justiça superiores aos da técnica eICIC e do cenário sem coordenação de interferência (*NULL*) com a utilização de outros algoritmos de escalonamento, que apresentaram os piores índices.

TABELA II: Índice de justiça para usuários do *cluster* central configurado para vários tipos de topologias.

Picocells	Escalonadores	NULL	Otimização eICIC	Otimização FeICIC
1	RR	43.44	60.54	60.88
	PF	49.89	61.04	62.29
	PF+	51.05	62.33	63.12
2	RR	32.21	50.09	48.56
	PF	33.43	50.04	53.77
	PF+	33.90	50.87	54.93
3	RR	29.32	43.43	42.78
	PF	32.88	43.99	48.67
	PF+	33.18	44.56	50.72
4	RR	27.09	38.99	39.02
	PF	29.08	41.66	43.09
	PF+	30.55	42.39	43.55
5	RR	25.76	33.87	32.32
	PF	27.77	37.55	41.04
	PF+	27.95	39.12	40.09

Por fim, conclui-se que a utilização do PF+ (com ajuste adequado de α e γ) em conjunto com a técnica FeICIC proporcionou melhorias na 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, técnicas de coordenação de interferência adequadas em conjunto com algoritmos de escalonamento mostram-se importantes.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, propôs-se um estudo das técnicas de ICIC para as redes Heterogêneas no *downlink* LTE-A e 5G 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, principalmente em cenários de maior densificação da rede. Em paralelo aos ganhos obtidos, a técnica FeICIC manteve os melhores índices de justiça dos usuários nos cenários avaliados.

Adicionalmente, o escalonador PF+ pode gerar ganhos significativos no *throughput* de usuários localizados na borda da célula, que são os que enfrentam os maiores níveis de interferência. A integração da otimização FeICIC com o algoritmo de escalonamento PF+ mostrou-se uma boa opção nos cenários analisados.

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 como técnica *game theory*, visando otimizar o desempenho em uma rede heterogênea LTE-A e 5G.

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

- [1] F. Hu, *Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective*. New York, NY, USA: CRC Press, 2016.
- [2] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, 1st ed. Academic Press, 2018.
- [3] 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*, vol. 30, no. 3, pp. 550–560, April 2012.
- [4] D. Xiao, X. Yu, and D. Yang, "A novel downlink icic method based on user position in lte-advanced systems," in *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Sept 2012, pp. 1–5.
- [5] M. Boujelben, S. B. Rejeb, and S. Tabbane, "A comparative study of interference coordination schemes for wireless mobile advanced systems," in *The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications*, June 2014, pp. 1–5.
- [6] 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*, vol. 15, no. 4, pp. 1642–1670, Fourth 2013.
- [7] 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*, vol. 23, no. 2, pp. 403–418, Feb 2017.
- [8] 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 *2015 7th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, July 2015, pp. 1–6.
- [9] N. Trabelsi, C. S. Chen, R. E. Azouzi, L. Rouillet, and E. Altman, "User association and resource allocation optimization in lte cellular networks," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 14, no. 2, pp. 429–440, June 2017.
- [10] Y. Liu, C. S. Chen, and C. W. Sung, "Distributed enhanced inter-cell interference coordination (eicic) in lte-advanced hetnets: A potential game approach," in *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2015, pp. 1–5.
- [11] J. Moreira, E. da Silva, and P. Guardiero, "eicic optimization improvements in downlink resource allocation in lte-a hetnets," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 15–24, Jan. 2020.
- [12] 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*, vol. 25, no. 6, pp. 3500–3513, Dec 2017.
- [13] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley Publishing, 2009.
- [14] C. Wengertter, J. Ohlhorst, and A. G. E. von Elbwart, "Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in ofdma," in *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, vol. 3, May 2005, pp. 1903–1907 Vol. 3.
- [15] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, "Downlink packet scheduling in lte cellular networks: Key design issues and a survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 678–700, Second 2013.
- [16] M. T. Kawser, H. M. A. B. Farid, A. R. Hasin, A. M. J. Sadik, and I. K. Razu, "Performance comparison between round robin and proportional fair scheduling methods for lte," in *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 2, no. 5, September 2012, pp. 678–671.
- [17] 3GPP, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2," p. 104, 2013.
- [18] —, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Mobility Enhancements in Heterogeneous Networks (Release 11)," p. 104, 2012.
- [19] J. Moreira, E. Silva, and P. Guardiero, "Técnicas de coordenação de interferência inter-celular para redes heterogêneas no downlink lte-a," in *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019, pp. 890–903.