

Análise de desempenho de técnicas ICIC usando o ns-3

Luciana F. de O. Nóbrega, Iago D. do Rêgo, Vicente A. de Sousa Jr.¹

¹Departamento de Engenharia de Comunicações
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) – Natal, RN – Brasil

{luciana, iagodiogenes, vicente}.gppcom@gmail.com

Abstract. *The ICIC was developed in order to control the co-channel interference effect on LTE systems through the fractional reuse of available bandwidth, without compromising user throughput. This project compares some known ICIC techniques in a controlled scenery. That allowed to quantify the impact of fractional frequency reuse on users located on the border and centre of a cell independently. The LTE modeling was made using the open-source software ns-3. At the end of the analysis, it was noticed that, although the simplest algorithm has a good performance perceived by the center users, the edge users have the worst performance, proving that the use of new techniques is necessary.*

Resumo. *O ICIC foi desenvolvido objetivando controlar o efeito da interferência co-canal em sistemas LTE por meio do reuso fracionário da banda, sem comprometer excessivamente o throughput dos usuários. Este trabalho compara algumas técnicas de ICIC em um cenário controlado, observando o impacto do reuso fracionário nos usuários da borda e do centro da célula de forma independente. Para modelagem do sistema LTE foi utilizado o software ns-3. Com as análises, percebeu-se que, apesar do algoritmo mais simples ter um bom desempenho percebido pelos usuários do centro, os usuários da borda saem com pior desempenho, comprovando a necessidade de técnicas de ICIC mais avançadas.*

1. Introdução

O padrão 3GPP *Long Term Evolution* (LTE) é um tipo de comunicação sem fio que alcança altos níveis de eficiência espectral e altas taxas de transmissão, tendo sido desenvolvido para suprir os atuais requisitos de demanda por dados nas redes móveis. Com o crescimento não só da demanda por dados, como também do uso de redes móveis, é de interesse geral encontrar maneiras de aumentar a capacidade da rede sem, contudo, prejudicar a qualidade da comunicação. Uma das técnicas utilizadas em sistemas LTE para maximizar a eficiência espectral é usar um fator de reuso de 1 (toda banda é utilizada em todas células). Porém, células vizinhas utilizando os mesmos recursos de frequência ao mesmo tempo podem causar interferência significativa umas nas outras, fazendo com que os usuários, em especial aqueles localizados na borda da região de cobertura, tenham sua comunicação prejudicada.

Assim, a interferência co-canal ou inter-células (ICI - *Inter-cell Interference*), i.e., a distorção de sinal causada por células utilizando a mesma frequência e ao mesmo tempo, é responsável por diminuir a capacidade dessas redes [Rappaport 2001]. Com isso, foram desenvolvidas algumas técnicas de coordenação de ICI (ICIC - *Inter-cell Interference Coordination*), com controle sobre a frequência utilizada por cada célula, além da potência de transmissão. Essas técnicas também são chamadas de Reuso Fracionário de Frequência (FFR - *Fractional Frequency Reuse*), pois divide a célula em regiões interiores e exteriores, diferenciando a banda de cada uma delas e, assim, reduzindo a interferência.

Este artigo traz uma descrição e uma análise de desempenho das principais técnicas de ICIC propostas pelo 3GPP para sistemas LTE, a saber: *Full Frequency Reuse*, *Hard*

Frequency Reuse, *Soft Frequency Reuse*, *Soft Fractional Frequency Reuse* e *Strict Frequency Reuse*, descritas em [Kimura and Seki 2012] e [Hamza et al. 2013]. Ele é organizado como a seguir. O procedimento e a taxonomia envolvidos na alocação de recursos do LTE são apresentados na seção 2. Os trabalhos relacionados são comparados com a proposta deste artigo na seção 3. As seções 4 e 5 trazem os algoritmos de ICIC e o cenário de avaliação, respectivamente. Os resultados e suas discussões são apresentados na seção 6. O artigo é finalizado com discussões sobre trabalhos futuros (seção 7).

2. Alocação de recursos em sistemas LTE

Uma estação base LTE (eNB) utiliza como técnica de múltiplo acesso no *downlink* o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), no qual se utiliza sub-portadoras ortogonais para multiplexar dados de diferentes UEs (*User Equipments*). Cada quadro OFDM possui 10 ms e é composto por 10 sub-quadros, de 1 ms cada. Por fim, cada sub-quadro é formado por dois *timeslots* de 0,5 ms [Holma and Toskala 2011].

Um aspecto importante do OFDMA é que os usuários podem ser alocados basicamente para qualquer uma das sub-portadoras no domínio da frequência. Mais que isso, a alocação é baseada em blocos (*Resource Blocks*, ou RBs), cada um sendo constituído por 12 sub-portadoras. As sub-portadoras são espaçadas em 15 kHz, resultando, então, na alocação de largura de banda mínima de 180 kHz. Assim, cada *timeslot* é formado por sete símbolos OFDM e doze subportadoras [Holma and Toskala 2011].

Um mudança importante do LTE é nova interface (interface X2), que provê sinalização direta entre estações bases. Por meio dela, o reuso fracionário implementado pelas técnicas de ICIC do LTE gerencia a distribuição de RBs para diferentes regiões (centro e bordas) de células vizinhas, ortogonalizando completamente e/ou gerenciando a potência entre transmissões co-canais [Holma and Toskala 2011].

3. Trabalhos relacionados

Um estudo comparativo em relação ao *throughput*, *Packet Loss Ratio* (PLR) e *delay* de métodos de ICIC foi realizado em [Lam et al. 2015]. Os resultados são calculados para as 19 células e para a célula com pior cenário de ICI (célula central). No entanto, a análise dos parâmetros foi feita apenas considerando todo o sistema, sem classificar os usuários com relação à sua distância para a eNB. Dessa forma, não é possível fazer uma análise fidedigna quanto ao impacto das diferentes técnicas de ICIC nos UEs da borda ou do centro.

Em [Elfadil et al. 2015], é realizada uma análise da SINR (*Signal-to-interference-plus-noise ratio*), da eficiência espectral e do *throughput* dos UEs em função da distância relativa à eNB que os serve. Embora seja feita uma avaliação dos UEs próximos e distantes da eNB, o estudo se limita a um número fixo de UE, distribuídos aleatoriamente.

Neste artigo, é feita uma análise de *throughput*, SINR e PLR para quatro técnicas de ICIC, controlando o número de UEs na borda e nos centros das células. Com base no módulo de simulação do ICIC para sistemas LTE do ns-3.25, apresentado em [Gawlowicz et al. 2015], este artigo traz como novidade a investigação das características das diferentes técnicas de ICIC e suas influências no desempenho dos usuários do sistema, levando em consideração sua localização em relação à eNB¹.

4. Estratégias de ICIC Avaliadas

4.1. Full Frequency Reuse

O *Full Frequency Reuse* corresponde ao cenário em que o fator de reuso de frequência é 1. Dessa forma, todas as células do sistema em questão tem acesso à mesma banda e transmitem com o mesmo nível de potência. Esse caso pode apresentar a maior taxa de transmissão média, principalmente se o sistema estiver com baixa carga (baixa interferência).

¹As simulações deste artigo foram realizadas no Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

No entanto, os usuários das bordas das células podem ser demasiadamente prejudicados, devido à maior interferência ocasionada pelas células adjacentes. Isso pode resultar em um baixo nível de *throughput* e alta PLR para os piores usuários do sistema. O objetivo das técnicas apresentadas a seguir é aumentar a SINR desses usuários sem causar forte redução de desempenho dos demais. O método Full Frequency Reuse também será chamado aqui de NoOp (*No Operation*), com base na nomenclatura dada em [Gawlowicz et al. 2015].

4.2. Hard Frequency Reuse

O *Hard Frequency Reuse* consiste em dividir o espectro disponível de forma que nenhuma célula adjacente utilize qualquer faixa de frequência em comum, sem distinção de banda no interior da própria célula, isto é, utiliza o reuso 3. Todos os UEs servidos por uma célula estão alocados na mesma banda.

Essa estratégia estreita a banda que pode ser utilizada por cada célula, podendo ou não reduzir o *throughput* dependendo da carga oferecida [Kimura and Seki 2012]. Para altas cargas (situação de baixa SINR), essa estratégia pode reduzir a interferência, melhorando a SINR e, conseqüentemente, o *throughput*, quando comparado ao NoOp.

4.3. Strict Frequency Reuse

O *Strict Frequency Reuse* subdivide cada célula em duas regiões, como apresentado na Figura 1(b). A região interna (sub-banda comum) possui fator de reuso 1, de sorte que os centros das células compartilham a mesma banda. A região externa, que possui uma sub-banda privada, possui fator de reuso 3, com o objetivo de diminuir a interferência entre os usuários das bordas de células adjacentes, visto que estes, por estarem mais distantes da eNB, podem apresentar menor qualidade de recepção do sinal. Dessarte, os usuários da borda de células adjacentes não compartilham a mesma faixa de frequência.

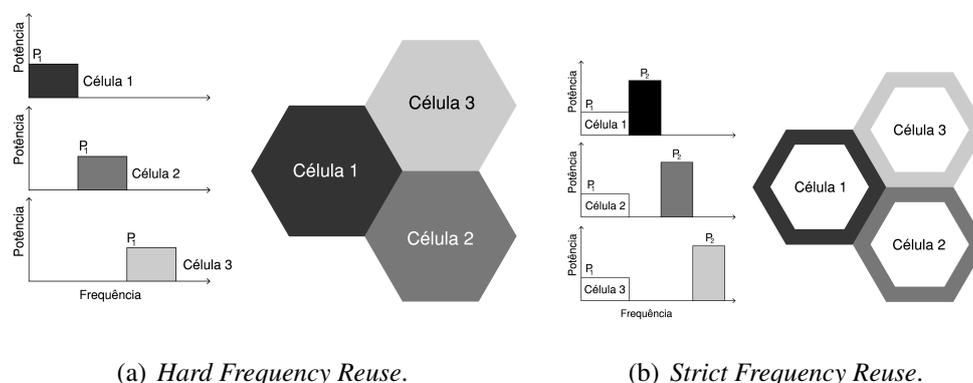


Figura 1. Hard FR e Strict FR ICIC - adaptado de [Gawlowicz et al. 2015].

Também é importante ressaltar que as sub-bandas são servidas com níveis de potência diferentes, sendo maior a potência de transmissão da região externa. Neste artigo, a potência de transmissão para o centro foi configurada para -6 dB e, para as bordas, 3 dB, relativos à potência do sinal de referência [3GPP 2010].

No ns-3, o algoritmo utiliza o parâmetro RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) para determinar se um usuário deve ser considerado da borda ou do centro [ns 3 2017]. Dessa forma, caso um UE tenha um valor reportado de RSRQ 32 , isto é, -4 dB de acordo com a tabela 9.1.7-1 de [3GPP 2010], ele estará na região da borda. Mais que isso, ele será considerado na região do centro.

4.4. Soft Frequency Reuse

O *Soft Frequency Reuse* também subdivide a célula em duas regiões. No entanto, a região externa não tem acesso exclusivo à uma faixa de frequência, como apresenta a Figura 2(a).

As regiões externas de células adjacentes não compartilham a mesma banda e, como no algoritmo anterior, a potência de transmissão da região externa é maior. Como há compartilhamento de banda entre a borda e o centro, a região externa de cada célula pode ocupar até 1/3 da banda total sem interferir com as bordas das células adjacentes.

O *Soft Frequency Reuse*, quando comparado à técnica *Strict Frequency Reuse*, pode resultar em uma melhor eficiência espectral, já que usa toda a banda do sistema para a região central. Entretanto, pode aumentar a interferência tanto nos usuários do centro quanto nos da borda da célula e seu ganho será dependente da carga das células.

4.5. *Soft Fractional Frequency Reuse*

O esquema *Soft Fractional Frequency Reuse* foi proposto com o intuito de melhorar o *throughput* do sistema, em comparação com as estratégias vistas anteriormente. Nesta estratégia, a célula é subdividida em três regiões distintas: central, média e externa, como apresenta a Figura 2(b). De forma similar ao *Strict Frequency Reuse*, a região média possui fator de reúso 1 e a região externa possui fator de reúso 3. No entanto, a região central reutiliza as faixas de frequência utilizadas nas bordas das células adjacentes, visando tornar o uso de frequência ainda mais eficiente.

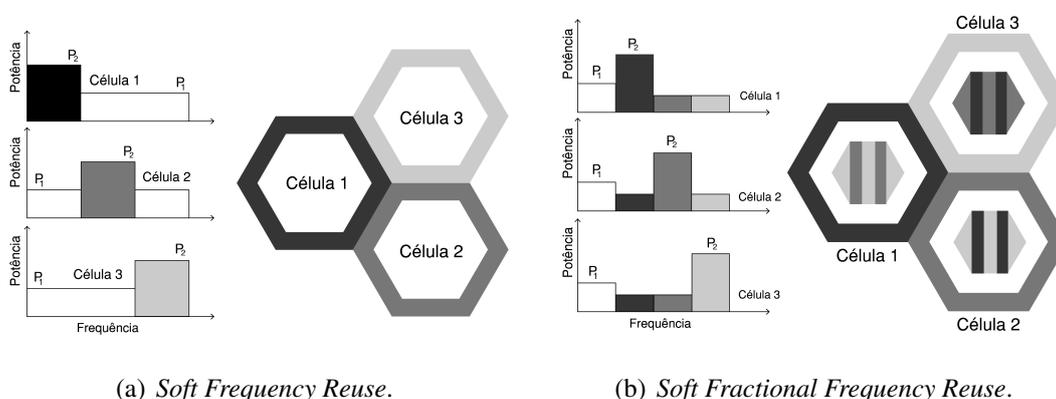


Figura 2. Soft FR e Soft FFR ICIC - adaptado de [Gawlowicz et al. 2015].

Assim como descrito nos algoritmos anteriores, o controle de potência tem um importante papel na sua execução, de forma que a potência de transmissão aumenta do centro para a borda da célula. As potências de transmissão para a região central, média e externa são, respectivamente, -6dB, -1,77 dB e 3 dB [3GPP 2010]. O RSRQ limite para um usuário ser considerado da região média é 34, ou -3 dB e, para ser considerado da região externa, esse valor é de 32, ou -4 dB [3GPP 2010].

5. Cenário de avaliação

O cenário escolhido para avaliar o desempenho das diferentes técnicas de ICIC é apresentado na Figura 3. Três eNBs são inseridas nos vértices de um triângulo equilátero, de

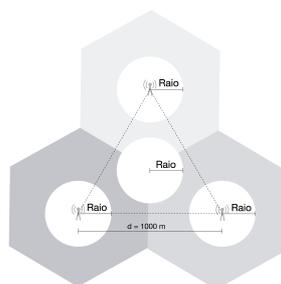


Figura 3. Localização das eNBs e das regiões de alocação de usuários.

lado igual a 1000 metros. A distribuição dos UEs é controlada e feita em quatro regiões

circulares. Há um círculo centrado em cada eNB e um círculo adicional no baricentro do triângulo. Os UEs serão posicionados nessas regiões, com intuito de analisar os efeitos das estratégias de ICIC na região mais distante das eNBs (usuários da borda da célula).

A alocação dos UEs nessas regiões é aleatória, com todos os círculos possuindo o mesmo raio, o qual é um parâmetro de simulação. Assim, foi possível modificar a concentração de UEs, de forma que a diminuição do raio conduz a regiões mais densas (*hotspots*). Alguns parâmetros de simulação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de Simulação.

Parâmetros	Valores
Largura de banda (RBs)	25
Distribuição de UEs	Distribuição uniforme
Distância entre eNBs	1000 m
Algoritmo de escalonamento	<i>Proportional Fair</i>
Tempo de simulação	6 s (sem sombreamento) 60 s (com sombreamento)
Número de <i>jobs</i> simulados	100

6. Resultados

A análise de desempenho foi realizada em dois conjuntos de cenários: um em que os UEs estão concentrados no centro de cada eNB e no centro do círculo no baricentro do triângulo (raio de alocação de 100 m), e outro em que os UEs estão dispersos (raio de alocação de 500 m). Os cenários também se diferenciam pela presença ou não de sombreamento.

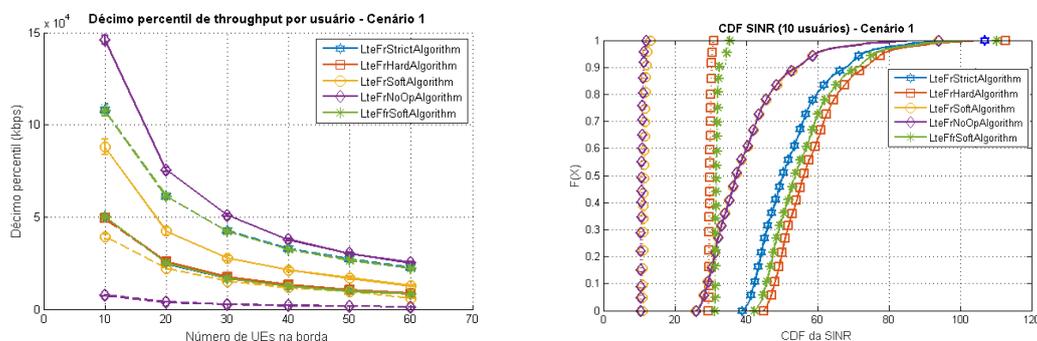
6.1. Cenário 1

A primeira análise realizada, apresentada na Figura 4(a) foi obtida de simulações com duração de seis segundos e somente com perda de percurso como manifestação do canal. Essa foi uma maneira de controlar o cenário e analisar o caso em que o posicionamento dos usuários corresponde exatamente à sua situação de qualidade do enlace. Os primeiros resultados são para alocação concentrada de usuários em que o décimo percentil de *throughput* dos usuários representa a situação dos 10% piores usuários (usuários da borda). As curvas com linhas contínuas representam usuários no centro das células, enquanto que as curvas com linhas pontilhadas os usuários das bordas e, portanto, mais distantes de sua respectiva eNB. Nota-se que o desempenho do algoritmo NoOp para usuários do centro foi um dos melhores, o que já era esperado. Afinal, ao permitir que mais RBs sejam utilizados por célula, uma maior taxa de transmissão é alcançável. Contudo, ao utilizar o reuso 1, a interferência inter-célula nas bordas será maior, como será evidenciado a seguir, prejudicando o desempenho do algoritmo nessa região.

Também observou-se que o *throughput* obtido para os algoritmos Soft FFR e Strict foram praticamente idênticos, tanto na borda quanto no centro das células. Como neste caso os usuários estão concentrados, a região média do Soft FFR não é utilizada, fazendo com que os algoritmos tenham comportamento semelhantes. Ademais, o *throughput* que esses algoritmos fornecem aos usuários da borda é o mais elevado, provando que a técnica de atribuir o reuso 3 para as bordas das células apresenta bons resultados. Entretanto, ao atribuir apenas 25% da banda total para o centro, a redução no *throughput* se torna inevitável para usuários próximos à eNB. O método Soft também apresentou bom desempenho no centro. Na borda, porém, ele não alcançou um desempenho satisfatório, de modo que o alto número de RBs reservados para usuários da borda - oito RBs para cada célula - não foi capaz de compensar totalmente a ICI. Afinal, a banda utilizada nas bordas de uma célula também é utilizada no centro de células adjacentes. Assim, apesar da distância entre as células, a ICI ainda é alta. O algoritmo Hard apresenta um resultado semelhante na borda e centro, o que já era esperado devido à sua estratégia de divisão de faixas de frequência para cada célula específica, sem diferenciar borda do centro. O desempenho desse método não é um dos melhores, pois cada célula utiliza apenas um terço da banda

disponível, de forma que esse método possui *throughput* aproximadamente três vezes inferior quando comparado ao NoOp, que utiliza a banda disponível em sua totalidade.

Para analisar a SINR, utilizou-se como base os resultados apresentados na Figura 4(b), sendo este o caso de simulação em que existem 10 UEs na região central (borda) e 10 em cada eNB, resultando em 40 UEs no total. Observa-se que a SINR é menor para



(a) Décimo percentil de *throughput* para usuários (b) CDF da SINR para cenário com 10 usuários concentrados.

Figura 4. ICIC para o Cenário 1.

os usuários da borda em todos os algoritmos, mesmo considerando que sinais com maior potência são transmitidos para essa região - afinal, há perda de percurso, e o sinal chega ao seu destino na borda muito mais fraco. No centro, o algoritmo Hard é o que possui melhor SINR, devido ao fato que a banda de cada célula não é compartilhada e, portanto, não há ICI. Em seguida, o método que apresenta segunda melhor SINR é o Soft FFR, pois apesar de haver reuso de frequência, o fato dos usuários estarem concentrados faz com que a banda da região média não seja utilizada, de sorte que usuários que utilizam a mesma banda em células diferentes estão mais distantes uns dos outros, reduzindo a ICI. O método Strict possui menor interferência que o Soft, pois neste último método, a banda utilizada no centro de uma célula é a mesma da banda utilizada nas bordas da célula adjacente. Por outro lado, na técnica Strict, a banda utilizada no centro de uma célula é usada apenas no centro das células adjacentes, sendo, portanto, mais distantes, e resultando em uma menor ICI. Por fim, os algoritmos NoOp e Soft apresentam comportamentos de SINR semelhantes e de menor desempenho em relação aos demais.

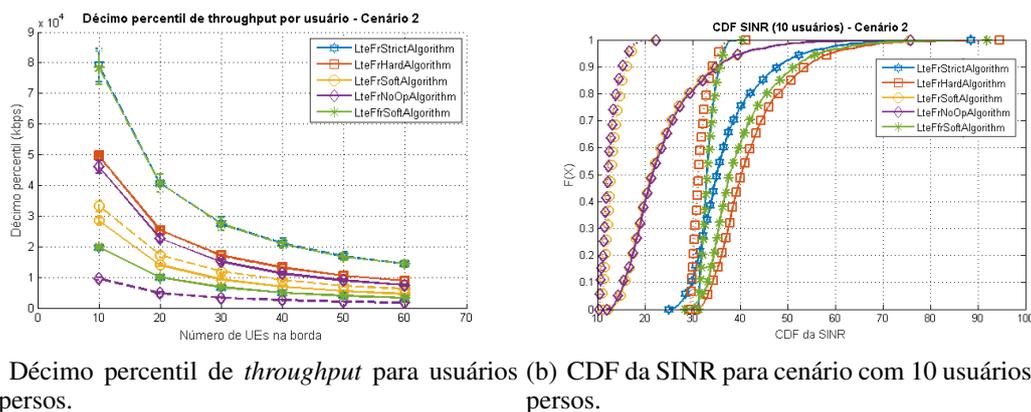
Já em relação à borda, tem-se que os métodos Soft FFR e Strict apresentam resultados similares. Afinal, como explicado na sessão 4.5, a atribuição de banda para a região externa em ambos os algoritmos é realizada de maneira semelhante. Esses métodos, assim, se provam eficientes no que tange a menor interferência nos usuários da borda. O algoritmo Hard também apresenta bom desempenho de SINR para usuários da borda, também devido à pouca interferência existente. Por fim, os piores desempenhos em relação à SINR foram dos métodos Soft e NoOp, comprovando que a interferência nessas técnicas é ainda maior quando os usuários se aproximam de outra eNB.

6.2. Cenário 2

Para efeito comparativo, foi realizada também uma simulação com usuários dispersos no cenário, mas ainda com somente com perda de percurso como manifestação do canal. Nota-se, na Figura 5(a), que os usuários nas bordas das células no Strict e Soft FFR apresentam o melhor *throughput*. Enquanto isso, o NoOp apresenta aqui piores resultados que no caso anterior. Já na Figura 5(b), percebe-se que a SINR de UEs que utilizam o método NoOp é, no geral, inferior em relação à SINR de UEs na borda da maioria dos algoritmos (a exceção é o próprio NoOp e Soft). Como neste caso os usuários estão mais dispersos e, portanto, mais distantes de sua respectiva eNB, a SINR geral do sistema foi reduzida.

6.3. Cenário 3

Neste cenário, foram realizadas simulações de 60 segundos adicionando o efeito de sombreamento (de distribuição log-normal, com $\sigma = 8$ dB). Essas simulações mais longas

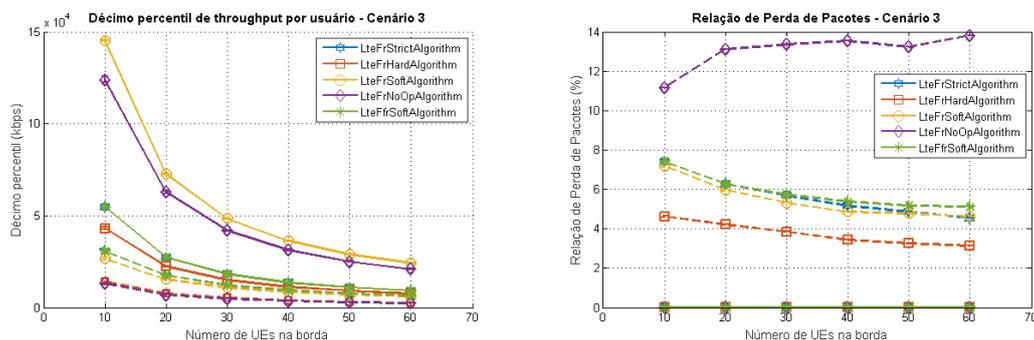


(a) Décimo percentil de *throughput* para usuários (b) CDF da SINR para cenário com 10 usuários dispersos.

Figura 5. ICIC para o Cenário 2.

almejam observar o desempenho das técnicas de ICIC em um cenário mais realista que inclua a variabilidade do canal sem fio. Para a primeira situação, com UEs concentrados, os resultados de *throughput* são apresentados na Figura 6(a).

Nota-se que, como no caso sem sobreposição, os algoritmos NoOp e Soft apresentam os melhores desempenhos para UEs no centro. Contudo, o comportamento de ambos para UEs da borda permanecem os mais baixos. Além disso, como é possível observar na Figura 6(b), a perda de pacotes é muito alta para UEs na borda ao utilizar o NoOp. O algoritmo que possui menor perda de pacotes para usuários distantes da eNB é o Hard.



(a) Décimo percentil de *throughput* para usuários (b) PLR para usuários concentrados, em cenário concentrados, em cenário com sobreposição.

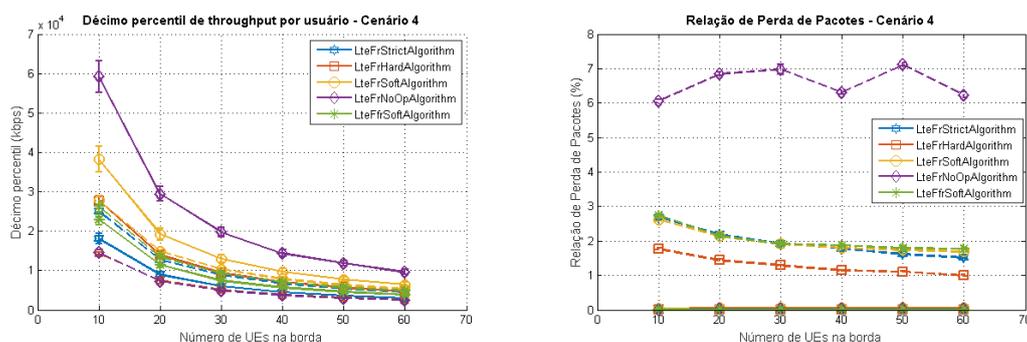
Figura 6. ICIC para o Cenário 3.

6.4. Cenário 4

Por fim, o último caso, com usuários dispersos e num cenário considerando o sobreposição (mesmo que o Cenário 3), analisa-se a Figura 7(a) e vê-se, mais uma vez, que o NoOp é o algoritmo com melhor desempenho no centro e pior na borda. Além disso, pode-se concluir que o algoritmo Soft apresenta um compromisso interessante entre o desempenho dos usuários de qualquer parte do cenário, seja perto ou longe da eNB. Já na Figura 7(b), os resultados são semelhantes da situação quando os UEs estão concentrados.

7. Conclusões e comentários finais

Este artigo investigou, por meio de simulação, algoritmos de ICIC em sistemas LTE. Conclui-se que a separação de faixas de frequência para regiões distintas de uma célula é uma forma eficiente para reduzir interferência inter-célula de usuários mais distantes da eNB, como visto nos casos de Soft FFR, Strict e Hard. Contudo, a divisão excessiva, apesar de reduzir a interferência, pode resultar em um *throughput* inferior, como no caso do Soft FFR.



(a) Décimo percentil de *throughput* para usuários (b) PLR para usuários dispersos, em cenário com sombreamento.

Figura 7. ICIC para o Cenário 4.

Além disso, não houve um algoritmo que se destacasse mais que os demais em todos os casos e em todas as regiões. Por exemplo, no caso dos cenários com sombreamento, o algoritmo Soft FFR apresenta um *throughput* razoável na borda e centro para UEs concentrados e, no caso com usuários dispersos, o Soft parece ser uma melhor opção. Dessa forma, para uma aplicação prática, é necessária a análise prévia da região e do posicionamento das eNBs. É válido frisar que o desenvolvimento de pesquisas no assunto pode contribuir para que as novas tecnologias de comunicação móvel alcancem suas demandas de alta capacidade e taxa de transmissão. Assim, trabalhos futuros incluem: criação de cenário com *small scale fading* e uso de técnicas de aprendizado de máquina para escolha do melhor ICIC, com base no posicionamento de eNBs, dos UEs e da condição de interferência do sistema. Afinal, a variação dinâmica dos parâmetros de ICIC pode trazer ganhos em relação ao desempenho percebido pelos usuários e se refletir em uma boa estratégia de redes SON (*Self-Organising Networks*, definido em [3GPP 2008]).

Referências

- 3GPP (2008). TS 32.500: Telecommunication management; Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements.
- 3GPP (2010). TS 36.133: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management (Release 8).
- Elfadil, H. E. E. O. M., Ali, M. A. I., and Abas, M. (2015). Fractional Frequency Reuse in LTE Networks. *IEEE Communications Magazine*.
- Gawlowicz, P., Baldo, N., and Miozzo, M. (2015). An Extension of the ns-3 LTE Module to Simulate Fractional Frequency Reuse Algorithms. *IEEE Communications Magazine*.
- 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. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 15:1642–1670.
- Holma, H. and Toskala, A. (2011). *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*. Second edition.
- Kimura, D. and Seki, H. (2012). Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) Technology. *FUJITSU Tech*, 48(1):89–84.
- Lam, S. G., Subramanian, R., Sandrasegaran, K., Ghosal, P., and Barua, S. (2015). Performance of well-known frequency reuse algorithms in LTE downlink 3GPP LTE systems. *IEEE Communications Magazine*.
- ns 3 (2017). Documentação do sistema LTE no ns-3.
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edition.