

Análise paramétrica do *Strict Frequency Reuse* utilizando o ns-3

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

Resumo—O *Strict Frequency Reuse* (SFR) é uma técnica de coordenação de interferência (ICIC) que se propõe a diminuir os efeitos ICI (*Inter-Cell Interference*) em sistemas LTE por meio da divisão de sub-bandas para diferentes regiões da célula. Esse estudo realiza uma análise 2k fatorial com o objetivo de determinar quais parâmetros do SFR são mais relevantes. Em seguida, um experimento fatorial completo foi conduzido, a fim de avaliar o impacto desses parâmetros no desempenho do *Strict Frequency Reuse*, especialmente considerando o décimo percentil do *throughput* dos usuários. Para modelagem do sistema LTE, foi utilizado o *Network Simulator ns-3*. Os resultados mostram que alguns parâmetros do algoritmo de ICIC não são relevantes, no entanto, seu desempenho depende fortemente da correta configuração dos parâmetros primários.

Palavras-Chave—ICIC, FFR, ns-3, LTE, *Strict Frequency Reuse*, 2k Fatorial, Análise Fatorial Completa

Abstract—*Strict Frequency Reuse* (SFR) is an *Interference Coordination technique* (ICIC) that aims to reduce the effects of ICI (*Inter-Cell Interference*) in LTE systems through the division of cell bandwidth into distinct sub-bands for different regions of the cell. This paper conducted a 2k factorial analysis in order to determine which algorithm parameters are relevant. Then a full factorial experiment was made to evaluate the impact of these parameters on the performance of the algorithm *Strict Frequency Reuse*, specially considering the users' tenth percentil. The network simulator ns-3 was used to model the LTE system. The results showed that not all the ICIC algorithm's parameters are relevant, however, its performance depends strongly on the correct configuration of its primary parameters.

Keywords—ICIC, FFR, ns-3, LTE, *Strict Frequency Reuse*, 2k Factorial, Full Factorial Analysis

I. INTRODUÇÃO

O LTE (*Long Term Evolution*) é um padrão de comunicação sem fio introduzido pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) no *Release 8*, que teve como objetivo alcançar alta eficiência espectral, altas taxas de transmissão e fornecer maior flexibilidade em frequência e distribuição de banda.

Sendo o espectro eletromagnético um recurso escasso e de alto custo, a crescente demanda por transmissão de dados e acesso à redes móveis estimula o desenvolvimento de técnicas que possibilitem o aumento da capacidade da rede, sem comprometer a qualidade da comunicação. Uma das alternativas é usar fator de reuso 1, em que todas as células (chamadas de eNBs) compartilham a mesma banda. No entanto, esse cenário pode não ser favorável para usuários que estão na borda da célula devido à interferência inter-células (ICI - *Inter-cell Interference*), ou seja, a distorção de sinal causada por eNBs utilizando a mesma banda ao mesmo tempo.

Nesse contexto, foram desenvolvidas técnicas de coordenação de ICI (ICIC - *Inter-cell Interference*

Coordination) para reduzir o efeito da interferência co-canal. Por meio do Reuso Fracionário de Frequência (FFR - *Fractional Frequency Reuse*), as técnicas ICIC dividem a banda disponível para uma eNB em regiões que podem apresentar fatores de reuso distintos, assim como diferentes níveis de potência de transmissão. Dessa forma, os usuários são alocados para uma das regiões a depender da qualidade da sua comunicação, tentando minimizar o efeito da ICI para usuários das bordas das células.

Este artigo se propõe a fazer a análise paramétrica de uma técnica ICIC previamente apresentada em [1], o *Strict Frequency Reuse* (SFR). A escolha do SFR foi motivada pelo seu bom desempenho, como evidenciado em [2] e [3], e também por possuir um bom número de parâmetros passíveis de configuração (flexibilidade para ser aplicado em cenários desafiadores). Uma análise 2k fatorial foi conduzida para encontrar os parâmetros mais relevantes e os resultados gerais foram analisados em relação ao *throughput* e a SINR (*Signal to Interference Noise Ratio*).

A. Trabalhos relacionados

Em [2] é feito um estudo comparativo de duas técnicas ICIC (*Soft Frequency Reuse* e *Strict Frequency Reuse*) em relação a SINR, eficiência espectral e *throughput*. No entanto, para o algoritmo SFR, nenhum parâmetro é variado nas simulações e, para o algoritmo *Soft*, apenas a relação de potência de transmissão entre o centro e a borda é avaliada. Além disso, não é feita uma análise prévia por meio do 2k fatorial.

Há outro estudo comparativo feito entre duas técnicas ICIC em [3], em que é feita a variação da relação de potência entre o centro e a borda para encontrar o melhor ponto de operação com relação à capacidade da célula e a SINR. No entanto, nenhum outro parâmetro do algoritmo é avaliado e não é usada metodologia estatística para análise dos parâmetros.

Encontra-se em [4] a execução da análise 2k fatorial para a escolha dos parâmetros relevantes dos algoritmos de economia de potência de sistemas WIMAX IEEE 802.16. No entanto, não foram encontrados na literatura estudos fatoriais completos realizados com os parâmetros do SFR ou de outras técnicas ICIC aplicadas ao sistema LTE.

Este artigo traz como novidade uma análise 2k fatorial para encontrar os parâmetros do SFR que produzem efeito significativo no *throughput* médio dos usuários, bem como no *throughput* dos piores usuários e em sua SINR. Adicionalmente, é realizada uma análise fatorial completa a fim de avaliar o desempenho do SFR em diferentes configurações. De acordo com pesquisa nos bancos de dados de publicações na área de telecomunicações, estudo similar não foi apresentado na literatura até o momento.

O trabalho é organizado como a seguir. A metodologia é apresentada na Seção II e os detalhes da análise 2k

Os autores estão vinculados ao Departamento de Engenharia de Comunicações da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, Brasil. E-mails: {iagodiogenes,luciana,vicente}.gppcom@gmail.com.

As simulações de prova de conceito deste artigo foram realizadas graças ao Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

fatorial na Seção III. Enquanto os resultados são apresentados e discutidos na Seção IV, o artigo é finalizado com os comentários finais e discussões sobre trabalhos futuros na Seção V.

II. METODOLOGIA

Esse estudo foi realizado usando o ns-3 [5], um simulador de redes desenvolvido especialmente para fins de pesquisa e uso educacional. Assim, por ser um software de código livre, tem sido amplamente utilizado no meio acadêmico. O ns-3 tem o objetivo de fornecer um ambiente de simulação sólido e bem documentado, que possibilita o desenvolvimento de modelos bem próximos das especificações técnicas dos sistemas. Por essas razões, o ns-3 é utilizado como ferramenta de prototipagem para as análises propostas neste trabalho.

A. Strict Frequency Reuse

O SFR subdivide cada célula em duas regiões, como ilustrado na Fig. 1. 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 (sub-banda privada) possui fator de reuso 3, com o objetivo de diminuir a interferência entre os usuários das bordas. Ou seja, usuários localizados nas bordas de células adjacentes não compartilham a mesma faixa de frequência, não interferindo entre si. Para

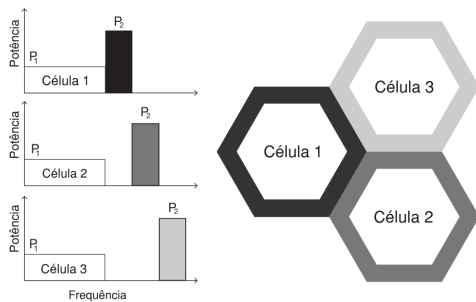


Fig. 1: Cenário com o algoritmo *Strict Frequency Reuse*.

esse algoritmo, existem três parâmetros principais que podem ser configurados: a relação entre as potências de transmissão da sub-banda comum e privada, o número de *Resource Blocks* (RBs) disponível para cada região e o critério de RSRQ (*Reference Signal Received Quality*). Tais parâmetros são detalhados a seguir.

No ns-3, a potência de transmissão das sub-bandas é configurável por meio de variáveis que determinam o nível de potência do *PDSCH* (*Physical Downlink Shared Channel*) em relação à potência do *Reference Signal*. Essas variáveis são o *CenterPowerOffset* e o *EdgePowerOffset*, valores em dB que representam o *offset* de potência das regiões do centro e da borda da célula, respectivamente.

O LTE define o *Resource Block* como a menor unidade de recurso que pode ser alocada para um usuário. O RB consiste em 12 subportadoras de 15 kHz, 180 kHz por RB, possui duração de 0,5 ms (1 *timeslot*) e, considerando o uso de Prefixo Cíclico curto, contém 7 símbolos OFDM. No entanto, a distribuição de banda é feita em número de *Resource Block Groups* (RBG) e seu tamanho depende da banda total do sistema [6]. Por exemplo, para uma banda que proporciona um total de 25 RBs, cada RBG é formado por 2 RBs.

Por fim, o critério de RSRQ determina para qual sub-banda um usuário é alocado. Se o RSRQ reportado por um usuário for maior que esse critério, ele será alocado para a sub-banda comum, caso contrário, será alocado na sub-banda privada. Os valores de RSRQ são reportados de acordo com o mapeamento definido em [7]. Neste artigo, o sistema simulado será o *Release 8* do 3GPP. Nesse *Release*, a faixa de valores de RSRQ suportada está entre 0 e 34.

B. Cenário de avaliação

O cenário utilizado para a análise paramétrica consiste de três células distribuídas nos vértices de um triângulo equilátero de lado igual a 1000 metros e ao centro de cada célula está localizada uma eNB, conforme apresentado na Fig. 2. Os usuários são distribuídos aleatoriamente em todo o cenário, sorteados com base em uma distribuição uniforme, não possuem mobilidade e são servidos pela eNB mais próxima. Os principais parâmetros de simulação estão resumidos na TABELA I.

TABELA I: Parâmetros de simulação.

Parâmetros	Valores
Largura de banda	25 RBs
Distribuição de UEs	Uniforme, sem deslocamento
Distância das eNBs	1000 m
Algoritmo de escalonamento	<i>Proportional Fair</i>
Duração da simulação	6000 subframes
Número de usuários	80
Jobs de simulação	100

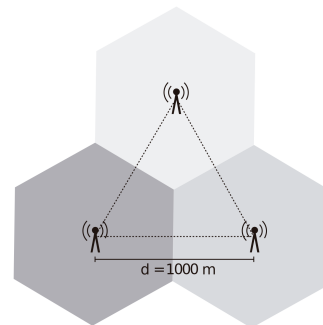


Fig. 2: Cenário de avaliação.

III. ANÁLISE 2K FATORIAL

O planejamento 2k fatorial é uma forma de análise estatística que permite identificar quais parâmetros (fatores) de um experimento exercem influência em uma determinada resposta final [8]. Seu principal benefício é a possibilidade de reduzir substancialmente a quantidade de repetições necessárias em uma análise fatorial completa, na qual o experimento é replicado para todas as combinações possíveis entre os valores (níveis) dos parâmetros.

O 2k fatorial consiste em uma Análise de Variância (ANOVA) em que k fatores assumem apenas dois níveis distintos que sejam, preferencialmente, extremos. De forma que a ANOVA testa a hipótese de que um determinado parâmetro não influencie na resposta final (hipótese nula) por meio da comparação de variâncias.

A TABELA II ilustra um experimento que foi replicado n vezes, em que um único fator possui dois níveis distintos, servindo de referência para os cálculos detalhados a seguir.

O cálculo de variância para o nível 1 do Fator (análogo para o nível 2) pode ser feito da seguinte forma:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{1i} - \bar{y}_{1r})^2}{n-1}, \quad (1)$$

em que y_{1i} representa a resposta obtida em cada réplica e \bar{y}_{1r} representa a média real da população.

TABELA II: Experimento replicado n vezes.

Níveis do fator	Réplicas	Soma	Média
1	$y_{11}, y_{12}, [\dots], y_{1n}$	y_1	\bar{y}_1
2	$y_{21}, y_{22}, [\dots], y_{2n}$	y_2	\bar{y}_2

Visto que a média real não é conhecida, pois se conhece apenas um número limitado de amostras da população, usa-se a Soma dos Quadrados como uma medida da variabilidade total do experimento:

$$SQ_{total} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2, \quad (2)$$

tal que y_{ij} é a resposta obtida para o i -ésimo nível do fator para a j -ésima réplica do experimento e \bar{y} é a média global, obtida com relação aos dois níveis do fator.

Em seguida, a SQ_{total} é decomposta em função da Soma Quadrática dos níveis dos fatores e a Soma Quadrática do Erro:

$$SQ_{total} = SQ_{niveis} + SQ_{erro} \quad (3)$$

$$SQ_{total} = n \sum_{i=1}^2 (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (4)$$

Em seguida, o Valor Esperado das Somas dos Quadrados é:

$$E(SQ_{niveis}) = (2-1)\sigma^2 + n \sum_{i=1}^2 \tau_i^2 \quad (5)$$

$$E(SQ_{erro}) = 2(n-1)\sigma^2 \quad (6)$$

Em que $(2-1)$ e $2(n-1)$ são os graus de liberdade da SQ_{niveis} e da SQ_{erro} , respectivamente, e o somatório de τ_i^2 representa o efeito da mudança dos níveis do fator. Adicionalmente, dividindo-se as Somas dos Quadrados pelos respectivos graus de liberdade, obtém-se as Médias Quadráticas:

$$MQ_{niveis} = \frac{SQ_{niveis}}{(2-1)} \quad (7)$$

$$MQ_{erro} = \frac{SQ_{erro}}{2(n-1)} \quad (8)$$

Assim, analisando o Valor Esperado, pode-se observar que a MQ_{erro} é um estimador não tendencioso da variância e, caso a mudança de níveis do fator não tenha efeito significativo na resposta, o somatório de $\tau_i^2 = 0$ e a MQ_{niveis} também será um estimador não tendencioso da variância, isto é:

$$(MQ_{niveis}) = \sigma^2 + 0 \quad (9)$$

$$E(MQ_{erro}) = \sigma^2 \quad (10)$$

Sequencialmente, pode-se definir o valor F_0 :

$$F_0 = \frac{MQ_{niveis}}{MQ_{erro}} \quad (11)$$

Se a hipótese nula for rejeitada, MQ_{niveis} será maior que MQ_{erro} . Logo, pode-se concluir que, quanto maior o valor de F_0 , maior é o efeito de um determinado fator.

Dessa forma, o objetivo é determinar o limiar do valor de F_0 que garante a relevância de um parâmetro. Geralmente, pode-se assumir F_0 como uma variável aleatória com distribuição F -Snedecor [8]. Admitindo-se um nível de significância de $\alpha = 0.001$, tal que $P(F_0 > F_{1-\alpha}) = 0.001$, o valor experimental calculado de F_0 deve ser maior que $F_{1-\alpha}$ para que um determinado parâmetro tenha efeito em uma determinada resposta. O valor de $F_{1-\alpha}$ é tabelado, sendo determinado pelo nível de significância escolhido e pelos graus de liberdade do numerador e do denominador de F_0 . Para a análise realizada neste trabalho, o valor de F_0 calculado deve ser maior que $F_{1-\alpha} = 10,83$.

O procedimento adotado para o cálculo de F_0 para um fator pode ser replicado para dois ou mais fatores, de forma que a Soma dos Quadrados total é calculada e decomposta na Soma dos Quadrados para cada fator, para o erro e para as interações entre fatores. Assim, o valor de F_0 é calculado para cada parâmetro e para a interação entre os parâmetros, pois um fator que aparentemente não tem efeito significativo pode depender fortemente da variação de outro fator.

Conforme discutido anteriormente, a borda de cada eNB não compartilha banda com outras regiões, logo, o efeito do *offset* de potência das sub-bandas privadas não precisa ser analisado, e pode ser mantido em seu valor máximo (3dB). Em contrapartida, o *offset* de potência da sub-banda comum deve ser avaliado, pois essa sub-banda é compartilhada e pode interferir no resultado. Este *offset* é configurado pelo parâmetro apresentado na Seção anterior, o *CenterPowerOffset*, que assume valores pré-definidos no ns-3. Para a análise 2k fatorial, serão utilizados seus valores mínimo e máximo.

Como apresentado na Seção II, o critério de RSRQ (*RsrqThreshold*) assumirá os valores 4 e 29, cerca de 10% e 90% de seu valor máximo. Para a distribuição de banda, foram adotadas duas configurações. A primeira consiste em alocar 6 RBs para a sub-banda comum e 6 RBs para cada sub-banda privada. A segunda aloca 18 RBs para a sub-banda comum e 2 RBs para cada sub-banda privada. Os parâmetros descritos acima e seus respectivos valores são apresentados na TABELA III.

TABELA III: Parâmetros da análise 2k fatorial.

Parâmetro	Valor baixo	Valor alto
<i>CenterPowerOffset</i> (dB)	-6	3
Critério de RSRQ	4	29
Banda Comum/Privada (RBs)	6 / 18	18 / 6

A. Resultados

A análise 2k fatorial foi realizada tendo como alvo o *throughput* médio do usuário e seu décimo percentil, de forma que se pudesse analisar tanto os usuários como um todo, quanto os piores usuários (os mais distantes da eNB).

As TABELAS IV e V apresentam os valores calculados de F_0 para cada parâmetro e para as interações entre eles, sendo que $x * y$ representa a interação entre os parâmetros x e y . Assim, o valor de F_0 é menor que $F = 10,83$ apenas para o *CenterPowerOffset* e para todas as interações que envolvem esse parâmetro. Logo, está claro que este é o único fator que

não tem influência significativa no *throughput* médio ou no *throughput* dos piores usuários.

Isso acontece pois, para o cenário com o SFR, apenas as regiões centrais compartilham banda e como os usuários dessas regiões estão mais distantes geograficamente, não há interferência significativa. Por conseguinte, os parâmetros que mais influenciam são o critério de RSRQ e a relação de banda alocada entre as regiões, como ficou evidente após a análise realizada nesta Seção.

Nota-se que os dois parâmetros que apresentam efeito significativo são os mesmos para o *throughput* médio (TABELA IV) e seu décimo percentil (TABELA V). No entanto, para o *throughput* médio, o efeito com maior significância é o Critério de RSRQ e no décimo percentil é a Distribuição de Banda. Isso acontece porque a alocação de banda é mais crítica para os usuários da borda, visto que estes já tem o pior desempenho. Como os usuários do centro estão próximos da eNB e seu desempenho é melhor, a distribuição da banda não é tão prejudicial quanto a sua sobrecarga.

Adicionalmente, é possível notar que a interação entre o critério de RSRQ e a distribuição de banda também é significativa, reforçando a importância desses fatores.

TABELA IV: Valores de F0 para *throughput* médio.

Parâmetro (<i>throughput</i> médio)	F0
<i>CenterPowerOffset</i>	0.084
Critério de RSRQ	39040.4
Distribuição de Banda	4301.4
Distribuição de Banda * <i>CenterPowerOffset</i>	0.0015
Distribuição de Banda * RSRQ	6264.7
RSRQ * <i>CenterPowerOffset</i>	0.0012
RSRQ * <i>CenterPowerOffset</i> * Distribuição de Banda	0.00032

TABELA V: Valores de F0 para o décimo percentil.

Parâmetro (décimo percentil)	F0
<i>CenterPowerOffset</i>	0.00059
Critério de RSRQ	2688.37
Distribuição de Banda	6359.40
Distribuição de Banda * <i>CenterPowerOffset</i>	0.035
Distribuição de Banda * RSRQ	695.91
RSRQ * <i>CenterPowerOffset</i>	0.0033
RSRQ * <i>CenterPowerOffset</i> * Distribuição de Banda	0.00034

IV. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Com base nos resultados encontrados com a análise 2k fatorial, é possível executar o planejamento fatorial completo, no qual o experimento será replicado cem vezes, variando apenas os fatores que foram considerados relevantes na seção anterior. Portanto, dado que o *CenterPowerOffset* não possui efeito significativo, podemos fixá-lo em seu valor mínimo, a fim de evitar desperdício de recursos.

Devido à limitação do tamanho do RBG, apresentado na Seção II, a distribuição de banda é avaliada em apenas 3 configurações distintas. Adicionalmente, observou-se que o critério de RSRQ (*RsrqThreshold*) não produz efeito significativo para valores menores que 23, pois este é o parâmetro responsável por definir se um usuário será alocado para o centro ou para a borda. Isto é, caso o seu valor seja muito baixo, nenhum usuário apresentará um valor de RSRQ abaixo desse critério, resultando na alocação de todos os usuários para a sub-banda comum. Assim, as simulações foram realizadas para *RsrqThreshold* maiores que 23.

TABELA VI: Níveis dos fatores para a análise paramétrica.

Parâmetro	Níveis
Critério de RSRQ	24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34
Banda Comum/Privada (RBs)	1: 6 / 18 2: 12 / 12 3: 18 / 6

A. Resultados

A análise foi conduzida de acordo com os resultados encontrados para o *throughput* médio de todos os usuários e seu décimo percentil, que representa os usuários das bordas. Os gráficos discutidos a seguir possuem intervalo de confiança de 95%.

Observa-se na Fig. 3 e na Fig. 4 que, para os menores valores de *RsrqThreshold*, o *throughput* é maior para os casos em que há maior banda alocada para a região central, como esperado. Dessarte, no cenário em que são alocados 6 RBs para a sub-banda comum e 18 para a sub-banda privada (Distribuição 1: 6/18) possivelmente haverá 18 RBs ociosos, levando essa configuração a um pior desempenho.

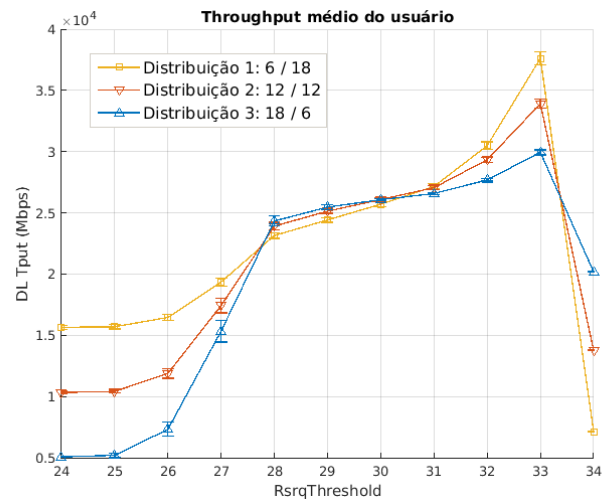
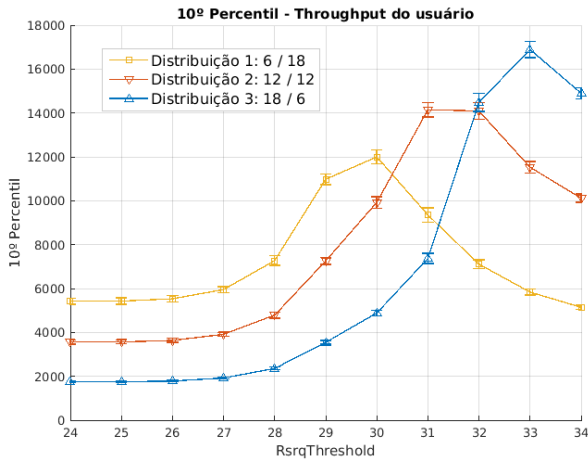


Fig. 3: *Throughput* médio dos usuários.

Com relação ao *throughput* médio dos usuários (Fig. 3), o aumento do critério de RSRQ resulta no aumento do desempenho de todos os cenários, atingindo o maior valor de *throughput* para *RsrqThreshold* = 33. Nesse ponto da curva, observa-se que o cenário com a maior banda alocada para o centro (Distribuição 3) permanece com o melhor desempenho. No entanto, para *RsrqThreshold* = 34, o desempenho de todas as Distribuições decai e quanto menor a banda alocada para a borda, mais severa é a queda do *throughput*. Há também uma faixa de *RsrqThreshold* (entre 28 e 31) para a qual a variação de *throughput* é menor. Observa-se que no início desse intervalo, o cenário mais crítico de sobrecarga já foi superado, ou seja, os piores usuários foram alocados para a borda, que estava sendo sub-utilizada. No entanto, a sub-banda comum ainda está em sobrecarga, visto que o valor máximo de *throughput* acontece apenas para *RsrqThreshold* = 33.

Na Fig. 4, observa-se que, com o aumento do *RsrqThreshold*, o comportamento é similar ao da Fig. 3, isto é, todas as distribuições apresentam melhora de *throughput*. Todavia, cada distribuição atinge seu valor máximo em pontos diferentes da curva, sendo que, quanto menor a banda alocada para a borda, menor é o valor de *RsrqThreshold* correspondente ao máximo de *throughput* e

Fig. 4: Décimo percentil do *Throughput*.

menor é esse valor máximo. Assim, após atingir o valor máximo, o desempenho das curvas decai para todos os valores seguintes de *RsrqThreshold*.

Adicionalmente, percebe-se que, para *RsrqThreshold* = 33, na Fig. 3, o *throughput* é maior para as distribuições com maior banda alocada para o centro, enquanto que na Fig. 4 as distribuições com maior banda para as bordas possui melhor desempenho. Nesse ponto da curva, a Distribuição 3 tem o melhor desempenho na Fig. 3 e o pior desempenho na Fig. 4.

Quando comparado com a Distribuição 3, a Distribuição 2 apresenta menor valor máximo para o *throughput* médio, mas seu desempenho no décimo percentil é muito superior. Seguindo o mesmo comportamento, a Distribuição 1 possui o menor valor máximo para o *throughput* médio, no entanto, apresenta o melhor desempenho para o décimo percentil.

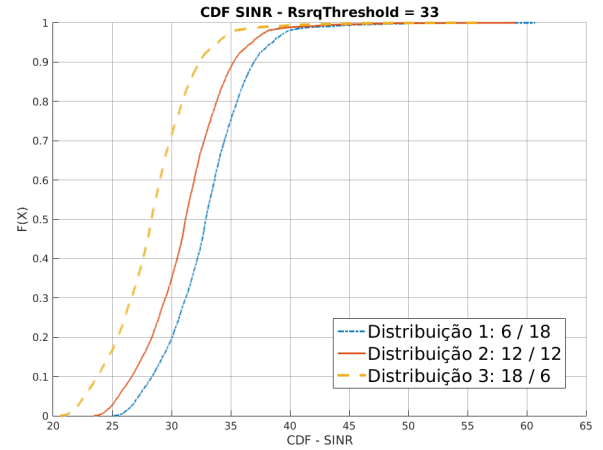
Ainda comparando as Figs. 3 e 4, observa-se grande diferença de *throughput* entre as curvas para todos os valores de *RsrqThreshold* na Fig. 4. Em contrapartida, para o *throughput* médio (Fig. 3), essa diferença é menor e, de forma geral, a variação do *RsrqThreshold* provoca mudanças menores no décimo percentil. Esse resultado valida os dados das TABELAS IV e V, dado que, para o *throughput* médio, o efeito do *RsrqThreshold* é mais significativo do que o efeito da distribuição de banda, e para o décimo percentil a importância dos efeitos é invertida.

Esses resultados demonstram claramente que existe um compromisso a ser atingido quando se deseja o melhor ponto de operação considerando o desempenho médio e do décimo percentil. Os resultados evidenciam também que a análise 2k fatorial pode identificar com precisão a influência dos parâmetros do ICIC no desempenho de *throughput* do sistema.

Por fim, ainda para *RsrqThreshold* = 33, pode-se comparar o desempenho das distribuições com relação à SINR na Fig. 5. É possível constatar que a SINR é maior para as distribuições que possuem maior banda alocada para a borda. Embora o décimo percentil da SINR reflita o que acontece com o décimo percentil do *throughput*, o mesmo não é observado na média, pois, como dito anteriormente, a alocação de mais banda para o centro (Distribuição 3) reflete maior *throughput* médio, ao passo que a alocação de menos banda para a borda reflete em maior interferência e, portanto, menor SINR.

V. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Por meio de uma análise paramétrica, foi evidenciado que, para o algoritmo SFR, os níveis de *throughput* dependem

Fig. 5: CDF da SINR para *RsrqThreshold* = 33.

fortemente da distribuição das sub-bandas, de forma que os parâmetros devem ser cuidadosamente escolhidos para que não haja sobrecarga de uma região.

Embora as três distribuições de banda apresentem desempenho similar para o *throughput* médio dos usuários, há uma grande diferença entre as curvas para o décimo percentil. Assim, é importante considerar os dois resultados no momento da escolha dos parâmetros. A Distribuição 3, por exemplo, apresenta o melhor desempenho para o *throughput* médio, mas para os usuários da borda o *throughput* cai substancialmente.

Além disso, ainda que o critério de RSRQ seja baixo, resultando em mais usuários na sub-banda comum, alocar pouca banda para a borda não conduz a resultados satisfatórios.

Com exceção da Distribuição 3, que prejudicou excessivamente o décimo percentil, as Distribuições 1 e 2 podem resultar em bom desempenho, a depender do *RsrqThreshold*. Assim, a escolha desses parâmetros deve ser feita de acordo com os critérios desejados para a rede.

Para estudos futuros, recomenda-se combinar a análise feita neste artigo com variações no número de usuários, em sua distribuição e mobilidade. Há também uma boa perspectiva para o desenvolvimento de sistemas que se adaptem às necessidades da rede usando aprendizado de máquina, pois existe um compromisso claro entre os parâmetros do ICIC e o desempenho médio e dos piores usuários.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Gawłowicz, N. Baldo, and M. Miozzo, "An extension of the ns-3 LTE module to simulate fractional frequency reuse algorithms," *IEEE Communications Magazine*, 2015.
- [2] H. E. E. O. M. Elfadil, M. A. I. Ali, and M. Abas, "Fractional frequency reuse in LTE networks," *IEEE Communications Magazine*, 2015.
- [3] G. Giambene and V. A. Le, "Performance evaluation of different fractional frequency reuse schemes for LTE," *IEEE Communications Magazine*, 2014.
- [4] F. M. A. Jr., V. A. de Sousa Jr., A. B. Fernandes, A. G. D'Assunção, N. S. Bezerra, G. Lozada, and P. Orava, "Evaluation of joint sleep and idle mode in IEEE 802.16e WIMAX," *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2012.
- [5] ns-3. (2016) Página principal do projeto ns-3 (<https://www.nsnam.org/>). [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>
- [6] 3GPP, "TS 36.213: Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures (Release 8)," 2009.
- [7] —, "TS 36.133: Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); requirements for support of radio resource management (Release 8)," 2010.
- [8] D. C. Montgomery, "Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros," *Ed. LTC*, Quarta Edição.