

UM NOVO ALGORITMO DE ESCALONAMENTO DOWNLINK PARA REDES LTE

Pablo Fernández Rodríguez, Paulo Roberto Guardieiro

pablofdezrguez@gmail.com, prguardieiro@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia - MG

Resumo – O presente artigo apresenta um novo sistema de escalonamento de recursos com foco na otimização no uso de recursos do downlink nas redes *Long Term Evolution* (LTE). O principal objetivo é a eficiência global do sistema, através da redução da taxa de erros de bloco (BLER), mantendo uma alta vazão agregada, e sem renunciar a um bom índice de justiça global no escalonamento. Modelagem e simulação de camada de enlace realizadas, mostraram que o algoritmo consegue atingir os objetivos procurados quando comparado com os principais algoritmos disponíveis na literatura, com foco na máxima vazão agregada do sistema no downlink, especialmente em cenários onde predomina uma baixa relação sinal/ruído (SNR).

Palavras-Chave – LTE; LTE Advanced; OFDMA; Escalonamento downlink; Algoritmo de Escalonamento.

A NEW DOWNLINK SCHEDULING ALGORITHM FOR THE LTE NETWORKS

Abstract - In this article a new scheduling algorithm is presented aiming to optimize the use of downlink resources in Long Term Evolution (LTE) mobile networks. Its main target is to increase the global system efficiency, by reducing the block error rate (BLER) figure, keeping a high aggregate throughput, and a good global fairness index in the scheduling process. Link-Level modeling and simulation was carried out showing that the algorithm presented achieves those goals when compared to the best available algorithms seeking the same objectives of global aggregate throughput, and especially in scenarios where the signal to noise ratio (SNR) is weak.

Keywords - LTE; LTE Advanced; OFDMA; Multiuser Scheduling; Scheduling Algorithm.

I. INTRODUÇÃO

O escalonamento de recursos numa rede LTE apresenta um problema de grande complexidade, no qual, a obtenção

da solução ótima na maioria das vezes é impossível, devido a restrições no tempo de escalonamento e capacidade de processamento disponíveis. Embora alguns algoritmos tenham conseguido bons resultados utilizando a *Channel State Information* (CSI), e dentro desta informação, especialmente o *Channel Quality Indicator* (CQI), nem mesmo os melhores algoritmos disponíveis na literatura conseguem a melhor eficiência em situações onde predomina uma baixa SNR. O objetivo do presente trabalho é conseguir a maior vazão agregada possível com a melhor eficiência no uso dos recursos disponíveis, nessas situações adversas onde os algoritmos atuais não conseguem, e assim, atender a um maior número de UEs em condições adversas de SNR.

Um novo algoritmo de escalonamento é apresentado, o qual, utilizando a eficiência no uso dos recursos disponíveis no espectro eletromagnético como métrica de escalonamento no downlink, consegue melhorar a BLER nas comunicações entre o *Evolved NodeB* (eNodeB) e os dispositivos móveis (UEs), conseguindo uma alta vazão agregada do sistema.

A principais contribuições do algoritmo apresentado são: melhorar as comunicações com UEs que se encontram na borda da célula, ou em condições adversas de ruído, otimizar a eficiência energética no eNodeB, já que consegue atingir mais UEs e reduzir a BLER, diminuindo o número de retransmissões, e por último, uma maior justiça no escalonamento quando comparado com outros sistemas focados na máxima vazão agregada do sistema.

Este artigo encontra-se estruturado da seguinte forma: A Seção II apresenta uma visão geral das redes LTE e seu sistema de escalonamento de recursos no downlink. A Seção III mostrará todos os detalhes do algoritmo de escalonamento proposto. Em seguida, na Seção IV serão apresentados os resultados da modelagem e simulação do sistema. E por último, na Seção V, serão apresentadas as conclusões do trabalho.

II. VISÃO GERAL DAS REDES LTE

LTE ou *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), foi introduzido pelo 3GPP [1] na Release 8 como a infraestrutura de acesso rádio [2] ao novo sistema *Evolved Packet System* (EPS), para substituir as redes TDMA e CDMA existentes (GSM, UMTS, ...). Os principais objetivos do sistema LTE são uma alta eficiência espectral, alta vazão agregada e menor latência na interface aérea, junto com a flexibilidade na atribuição de frequências e largura de banda.

O novo sistema EPS introduzido na *Release 8* unifica os sistemas de voz e dados em um sistema plano, baseado em protocolo IP, onde cada UE tem um endereço IP na rede, e



XIII CEEL - ISSN 2178-8308

12 a 16 de Outubro de 2015

Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

todos os serviços para essa UE são fornecidos nesse endereço IP.

A interface aérea é baseada no sistema *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) no downlink e *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) no uplink.

O uso de *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) divide o espectro disponível em múltiplas subportadoras mutuamente ortogonais utilizando o sistema *Discrete Fourier Transform* (DFT) para conseguir um sistema mais reforçado e capaz de atingir alta vazão e eficiência espectral.

No caso do downlink, múltiplas subportadoras são agrupadas em blocos de recurso (RBs) que podem ser atribuídos a diferentes usuários.

Cada RB contém 12 subportadoras espaçadas 15 kHz no domínio da frequência, e está limitado no domínio do tempo com a duração de meio sub-quadro (0,5 ms), denominado “slot”, compondo dois slots um sub-quadro LTE de 1 ms de duração. O conjunto de RBs disponíveis para escalonamento a cada sub-quadro é o que se denomina a “Matriz de Recursos”.

A. Escalonamento de recursos nas redes LTE

Uma vantagem do sistema LTE, que é composto por uma rede de eNodeBs interconectados por interfaces X2, e com o restante da rede através de interfaces S1, é que compõem um sistema distribuído no qual o protocolo *Medium Access Control* (MAC) reside unicamente nas UEs e nos eNodeBs [2][3], e essa é a parte encarregada do escalonamento de recursos para cada UE. Essa característica das redes LTE lhes dá uma maior flexibilidade e rapidez no escalonamento.

O escalonamento de recursos é feito em cada eNodeB para todas as UEs conectadas a esse eNodeB, em intervalos de tempo igualmente espaçados denominados *Transmission Time Interval* (TTI), sendo esse intervalo de tempo o mesmo de um sub-quadro com duração de 1 ms.

O sistema de escalonamento não foi definido no padrão LTE, de forma que cada fabricante e operadora da rede pudessem concorrer e se diferenciar utilizando diferentes estratégias de atribuição de recursos, com diferentes métricas e critérios.

Existem atualmente diferentes tipos de escalonadores disponíveis na literatura, alguns deles como *Kwan* [9] e *Best-CQI* estão focados na máxima vazão agregada do sistema, outros baseados na maior justiça ou proporcionalidade no escalonamento de recursos [10][11], e outros com objetivos de priorizar ou favorecer algum tipo de tráfego específico.

Qualquer escalonador com foco na máxima vazão agregada do sistema deverá fazer um uso correto da CSI fornecida pelas UEs.

No caso em estudo, considera-se que as UEs fornecem CSI seletivo em frequência. Isso quer dizer que, para cada RB disponível, o eNodeB poderá ter a CSI nos canais PUCCH no caso de informe periódico, ou PUSCH no caso de informe não periódico.

A CSI reportada por cada UE poderá ser composta por diferentes indicadores como o *Precoding Matrix Indicator* (PMI), o *Precoding Type Indicator* (PTI), o *Rank Indicator* (RI), e o *Channel Quality Indicator* (CQI), não sendo

considerados os indicadores PMI e PTI na fase de escalonamento.

Cada UE reportará um valor CQI para cada RB disponível no sistema, e esse CQI deverá ser considerado pelo eNodeB como um seletor de *Modulation and Coding Scheme* (MCS) que indica que, se o eNodeB utilizar um MCS baseado nesse CQI ou inferior, poderá conseguir uma taxa BLER igual ou inferior a 0,1

O padrão LTE em [4] obriga a que todos os RBs escalonados para uma mesma UE sejam transmitidos com o mesmo MCS, introduzindo portanto, uma limitação na eficiência no momento da transmissão. Essa mesma limitação que prejudica a eficiência dos escalonadores com foco na máxima vazão agregada do sistema, é também a base do presente trabalho.

A mínima unidade de escalonamento considerada será um *Resource Block Pair* (RBP), composto por dois RBs contíguos no domínio do tempo (1° e 2° slot).

Como todas as unidades de escalonamento atribuídas a uma UE são transmitidas com o mesmo MCS, calculando a eficiência para o primeiro símbolo OFDM ou elemento de recurso (RE) na primeira subportadora de cada RB do primeiro slot, consegue-se uma medida exata da eficiência do escalonamento em bits por unidade de canal (bits/uc) sem necessidade de calcular o número total de bits transmitidos nesse TTI.

III. SISTEMA DE ESCALONAMENTO PROPOSTO

O objetivo principal do escalonador proposto é conseguir que os conjuntos de unidades de escalonamento atribuídas a cada UE tenham a melhor combinação possível, de forma que, no momento de serem transmitidas com um único MCS se consiga a menor taxa BLER e, consequentemente, a máxima eficiência no uso dos recursos disponíveis.

O padrão LTE define em [5], na tabela 7.2.3-1, os valores de eficiência em bits/uc para cada CQI reportado pela UE, de forma que o eNodeB escolha o MCS apropriado e o tamanho em bits do bloco de dados a ser utilizado para a transmissão.

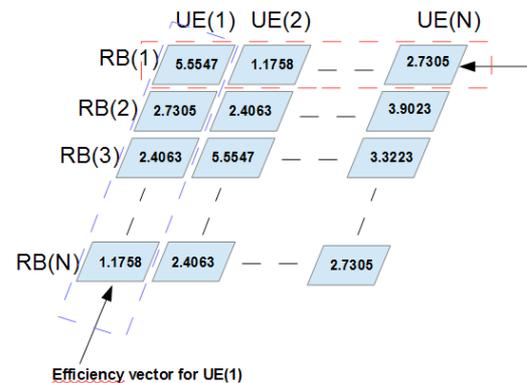


Fig. 1: Matriz de Eficiências para sistema LTE com N RBs x N UEs

Para fazer o escalonamento baseado na eficiência, utilizam-se duas matrizes, uma delas com os CQIs reportados por cada UE para cada RB disponível no sistema, e outra (Fig. 1) com as eficiências (bits/uc) desses CQIs, e que será a principal referência para tomada de decisão do escalonador.

O cálculo da eficiência é simplificado de forma que somente é considerado o primeiro slot, já que a unidade mínima de escalonamento é um RBP.

O escalonador faz o processamento como se indica nas seções seguintes:

A. Cálculo do melhor WB-CQI para um grupo de RBs

O *Wide-Band CQI* (WB-CQI) é o CQI equivalente de um conjunto de RBs calculado a partir de seus CQIs individuais.

Após o escalonamento, a eficiência vai depender do MCS selecionado para transmitir os RBs, e diretamente, isso depende do valor de WB-CQI do conjunto de RBs, o qual é tomado como valor de referência para calcular o MCS no momento da transmissão. O escalonador tentará agrupar RBs para uma UEx considerando que esse conjunto de RBs consiga gerar o melhor WB-CQI após o escalonamento.

Para calcular o valor de WB-CQI ótimo, é executado um processo iterativo sobre os valores de CQI entre os valores de CQI máximo e mínimo reportados para os RBs selecionados, conforme a equação (1).

$$nMinCQI(ue_x) \leq nWBCQI(ue_x) \leq nMaxCQI(ue_x) \quad (1)$$

O WB-CQI selecionado será aquele que contribua com a maior quantidade de bits transmitidos na mesma unidade de canal em bits/uc.

A cada passo iterativo indicado na equação (2), considera-se que, valores de WB-CQI superiores ao CQI do RB em mais de um nível terão probabilidade de sucesso 0 e BLER=1 e, por outro lado, valores de WB-CQI inferiores ao CQI do RB podem ser considerados com probabilidade de sucesso 1 ou BLER=0. Caso o WB-CQI seja igual ao CQI do RB, se utilizará a situação mais desfavorável, considerando BLER=0,1 (limiar superior do padrão LTE) e probabilidade de sucesso 0,9.

$$eficWBCQI(cqi_k, ue_n) = eff(cqi_k) \cdot \sum_{rb_x=1oRB(ue_n)}^{ultRB(ue_n)} K(cqi_k, rb_x)$$

Onde:

$$\begin{aligned} K(cqi_k, rb_x) &= 0,9; \quad \forall cqi_k = cqi(rb_x) \\ K(cqi_k, rb_x) &= 1; \quad \forall cqi_k < cqi(rb_x) \\ K(cqi_k, rb_x) &= vCQIP_{Prob}(cqi(rb_x)); \quad \forall cqi_k = cqi(rb_x) + 1 \\ K(cqi_k, rb_x) &= 0; \quad \forall cqi_k \geq cqi(rb_x) + 2 \end{aligned} \quad (2)$$

Caso o WB-CQI considerado esteja apenas um nível acima do CQI reportado para o RB, se aplicará um vetor de probabilidades apresentado na equação (3) como modulador da possível eficiência para os 14 possíveis valores de CQI acima do valor reportado. O vetor $vCQIP_{Prob}$ é obtido ao extrapolar os dados de simulações de BLER para os diferentes valores de CQI sobre um canal equivalente gaussiano.

Deste modo, para todos os valores possíveis de WB-CQI

$$vCQIP_{Prob} = [0,38 \ 0,18 \ 0,08 \ 0,02 \ 0,01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (3)$$

se obterá a eficiência resultante da utilização desse WB-CQI para o grupo de RBs selecionados para ue_x , obtendo o vetor de eficiências $vEffWBCQIs$. A melhor eficiência possível para um grupo de RBs, conforme a equação (4), será o valor máximo contido nesse vetor, e o melhor WB-CQI será aquele valor de WB-CQI associado a essa eficiência máxima.

$$\begin{aligned} bestEffWBCQI(ue_n) &= \max(vEffWBCQIs(ue_n)) \\ \forall nWBCQI &\in \{cqi_k(ue_n), cqi_{k+1}(ue_n)+1, \dots, cqi_{k+i}(ue_n)\} \\ bestWBCQI(ue_n) &= cqi \mid eff(cqi) = bestEffWBCQI(ue_n) \end{aligned} \quad (4)$$

B. Escalonamento baseado na máxima eficiência

Sabendo qual é o melhor WB-CQI para cada possível grupo de RBs atribuídos a uma UE e a eficiência resultante desse escalonamento, o escalonador proposto, somente terá que processar fila a fila (rb_x) e coluna a coluna (ue_n), avaliar cada rb_x sendo atribuído a essa UE, e escolher a opção que oferece a maior eficiência em bits/uc.

Como cada vez que um rb_x é adicionado à ue_n o WB-CQI resultante para essa ue_n pode mudar, o que realmente é feito é comparar a eficiência do escalonamento para a ue_n antes de adicionar esse rb_x , e depois de ser adicionado. Para isso, é criado um vetor de diferenças (5) para rb_x que, posteriormente processado, servirá para resolver a qual ue_n beneficia mais (6) associar rb_x .

$$\begin{aligned} vDiferencs(rb_x) &= vEficDep(rb_x) - vEficAnt(rb_{x-1}) \\ vDiferencs &= [difEfic(ue_1), difEfic(ue_2), \dots, difEfic(ue_{nNUES})] \\ nUESelec = nUE \mid difEfic(nUE) &= \max(vDiferencs) \end{aligned} \quad (5)$$

As eficiências para cada combinação são calculadas tendo em conta que o melhor WB-CQI é utilizado para o grupo de RBs no momento da transmissão.

C. Algoritmo de Escalonamento BEFF

```

nNRBs = Número de RBs na matriz de recursos
nNUES = Número de usuários ativos no downlink
vEficAnt = zeros(1, nNUES);
mEficEscal = mCQIEscal = zero matrix(nNRBs, nNUES);
PARA nRB = 1 ATÉ nNRBs
    nUEx = 0 // nUEx é a UE escalonada
    vEficDep = zeros(1, nNUES);
    PARA nUE = 1 ATÉ nNUES
        vRBSEf = mEficEscal(1:nRB, nUE);
        vEficDep(nUE) = bestEffWBCQI(vRBSEf);
    FIM PARA // nNUES
    vDiferencs = diff(vEficAnt, vEficDep);
    nMaxDiferenca = max(vDiferencs);
    nUEx = find(vDiferencs, nMaxDiferenca);
    mEficEscal(nRB, nUEx) = efic(cqi(nRB, nUEx));
    mCQIEscal(nRB, nUEx) = cqi(nRB, nUEx);
    vEficAnt(nUEx) = vEficDep(nUEx);
FIM PARA // nNRBs
/* mCQIEscal e mEficEscal são as matrizes com os CQIs e
as eficiências resultantes do escalonamento */

```

IV. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Para modelar e simular o escalonador proposto é utilizado o simulador de camada de enlace da *Technical University of Viena* [6] descrito em [7] e [8].

Simplificando o sistema para avaliar a estratégia de atribuição de recursos, o efeito das retransmissões HARQ é desconsiderado, e portanto, no sistema simulado não existem os efeitos prejudiciais inseridos pelas retransmissões de blocos de dados com erros.

Foi escolhido um sistema LTE com largura de banda de 1,4 MHz evitando assim, a grande quantidade de tempo de simulação de camada de enlace que requeriria um sistema com largura de banda de 20 Mhz e uma grande quantidade de usuários.

Nas aproximações contempladas considera-se que, um sistema com 6 RBs na matriz de recursos e 24 usuários ativos se comportaria igual a outro sistema com 110 RBs e 440 usuários ativos, e mais ainda, a situação com 6 RBs poderia ser até pior, uma vez que a baixa quantidade de combinações de escalonamento possíveis para cada usuário, reduziria as possibilidades de otimização durante o processo de escalonamento.

Os parâmetros utilizados para as simulações são:

Tabela I – Parâmetros de simulação

Parâmetro	Valores utilizados
Número de UEs	2 – 6 – 12 – 24
Valores de SNR	-10 dB a 30 dB em escala de 2dB
Frequência Portadora LTE	2,1 GHz
Largura de Banda	1,4 MHz
Matriz de Recursos	6 RBs x 2 slots
RBs por Sub-quadro	12
Subportadoras por RB	12
Espaçamento de subportadoras	15 kHz
Configuração Antenas	SISO
Atraso de Feedback	0 TTI
Modelos de Canal	ITU-T PedA
Filtro do Modelo de Canal	Block Fading
Estimação do Canal	PERFECT
Tipo de Receptor	Zero Forcing ZF
Aprox. Media SINR	MIESM
Tipo de Escalonamento	Dinâmico
Escalonadores Comparados	BEFF – BCQI – KWAN – PF – RR
Número de Sub-quadros	1000 – 2000

A. Vazão Agregada do Sistema

A vazão agregada total é um dos indicadores mais importantes que mostram como é o desempenho do sistema LTE. A figura mostrada para a vazão agregada é similar à gerada para a eficiência espectral (Bits/Hz/s), dado que a relação entre vazão e eficiência espectral é a largura em Hz de uma uc, e o número de unidades de canal disponíveis dentro da largura de banda do sistema, sendo ambos constantes.

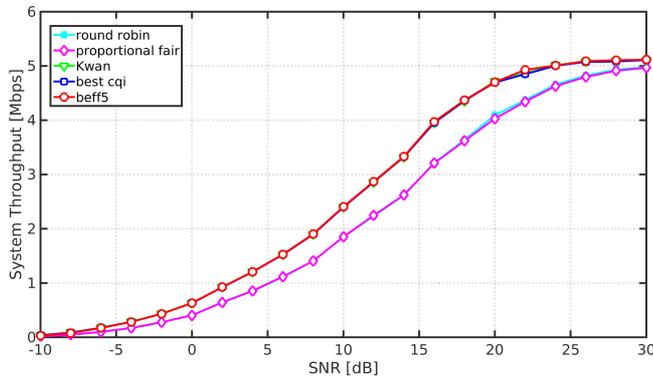


Fig. 2: Vazão Agregada para 1,4 MHz, 2 usuários, ITU-T PedA

O cenário apresentado na figura 2, com 2 usuários, mostra um sistema ideal, onde o número de usuários ativos no downlink é igual ou inferior a 50% da capacidade em

unidades de escalonamento da matriz de recursos, com uma relação de 2/6 (1 usuário ativo para cada 3 unidades de escalonamento).

Uma situação oposta é a mostrada na figura 3, onde o número de usuários ativos no sistema está bem acima do número de unidades de escalonamento disponíveis, com uma relação de 24/6 (4 usuários para cada unidade de escalonamento).

Como pode ser observado nas figuras 3 e 4, o escalonador BEFF proposto tem um desempenho em termos de vazão agregada equivalente à dos melhores escalonadores disponíveis atualmente com foco na vazão agregada, neste caso concreto, quando comparado com os escalonadores Best-CQI e Kwan, e portanto, podemos considerar este algoritmo também como um algoritmo focado na máxima vazão agregada do sistema. Isto é devido a que, como os outros algoritmos, utiliza a eficiência de cada RB como métrica no escalonamento, porém, o algoritmo BEFF considera também a eficiência do WB-CQI resultante de cada escalonamento, conseguindo menor BLER.

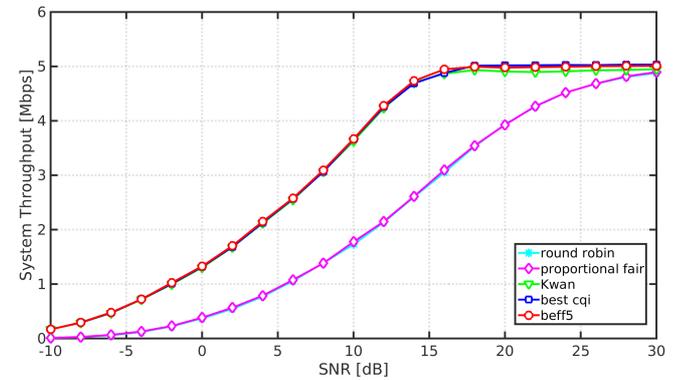


Fig. 3: Vazão Agregada para 1,4 MHz, 24 usuários, ITU-T PedA

B. Eficiência Global do Sistema

Para calcular a eficiência global do sistema LTE, usa-se a relação entre o número total de bits corretamente recebidos por todas as UEs durante o período de simulação e o número total de bits transmitidos, incluídos os que não foram recebidos ou foram recebidos com erro pelas UEs. Quanto maior for a relação, maior será a eficiência global do sistema e menores as taxas de erros BER e BLER. Isso permite saber o nível de eficiência de um sistema LTE quando comparado com outros sistemas LTE, excluindo os efeitos de overhead (símbolos de referência, canais de controle, ...). O cálculo da eficiência do sistema é realizado utilizando (7).

$$\eta = \frac{\sum_{n=1}^{nNUEs} BCRS(ue_n)}{\sum_{n=1}^{nNUEs} BCE(ue_n)} = \frac{\sum_{n=1}^{nNUEs} BCRS(ue_n)}{\sum_{n=1}^{nNUEs} [BCRS(ue_n) + BCRE(ue_n)]} \quad (7)$$

Onde:

- η → Eficiência do Sistema. $[0 \leq \eta \leq 1]$
- $nNUEs$ → Número de UEs no sistema analisado
- $BCE(ue_n)$ → Bits Codificados Enviados para ue_n
- $BCRS(ue_n)$ → Bits Codificados Recebidos Ok pela ue_n

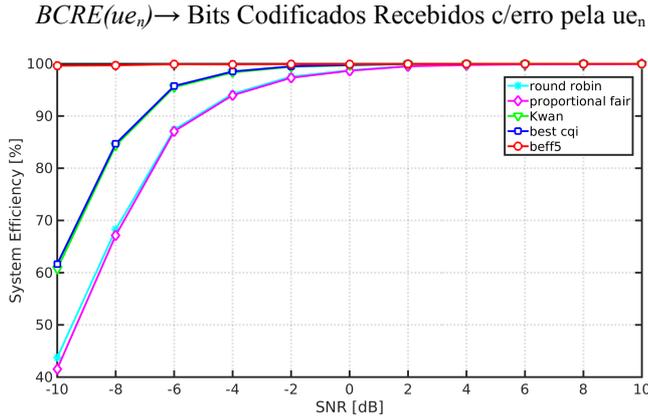


Fig. 4: Eficiência para 1,4 MHz, 2 usuários, ITU-T PedA

Na figura 4, a eficiência do sistema é claramente superior para o escalonador BEFF, já que sendo o número de usuários menor, consegue gerar um WB-CQI mais eficiente para escalonamentos com mais de um RB por UE.

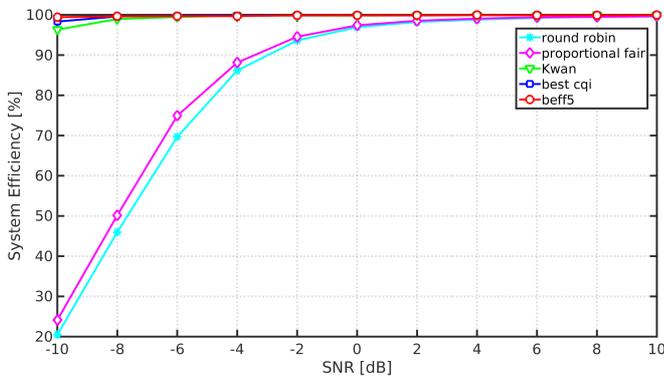


Fig. 5: Eficiência para 1,4 MHz, 24 usuários, ITU-T PedA

Como pode ser observado nas figuras 4 e 5, o escalonador proposto supera todos os outros escalonadores quando a relação SNR está abaixo de 0 dB e para qualquer número de usuários ativos no sistema, devido a que é com baixas SNR que o escalonador BEFF consegue menores taxas BLER, e portanto, maior eficiência global do sistema.

C. Taxa de Erros de Bloco (BLER)

A BLER é um dos parâmetros que mais afeta a eficiência global de um sistema. Quanto maior for a taxa BLER, maior será o número de recursos perdidos do sistema ou utilizados com retransmissões. A maior parte da taxa BLER é devido à diferença entre a qualidade do canal reportada pelas UEs para alguns RBs e o MCS efetivamente utilizado pelo eNodeB para transmitir esses RBs após serem escalonados.

Como pode ser visto na figura 6, quando o sistema está bem dimensionado e o número de usuários ativos é inferior a 50% da capacidade do sistema em número de unidades de escalonamento, o escalonador BEFF supera qualquer outro algoritmo de escalonamento e consegue selecionar a melhor combinação sub-ótima de RBs a serem escalonados para cada UE.

Por outro lado, quando o número de usuários é suficientemente elevado, e tendendo à sobrecarga do sistema (Fig. 7), as vantagens do algoritmo BEFF desaparecem, já que a probabilidade de que uma UE tenha mais de uma

unidade de escalonamento atribuída no mesmo TTI cai bruscamente.

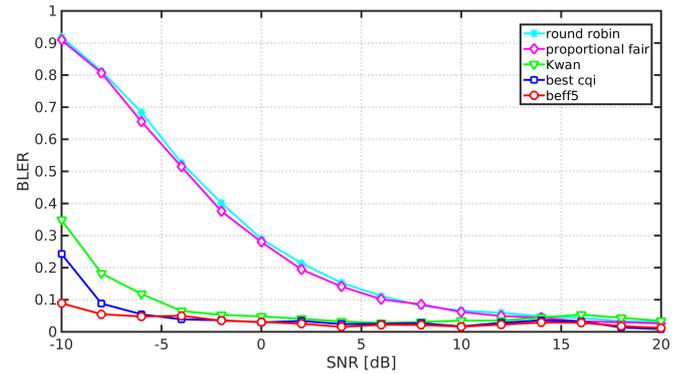


Fig. 6: Taxa BLER para 1,4 MHz, 24 usuários, ITU-T PedA

D. Índice de Justiça Global

Para obter uma medida da justiça do escalonamento no sistema LTE foi selecionado o índice de Justiça de Jain [12], e esse índice foi obtido através de simulações com um número de usuários suficientemente elevado e espaçados

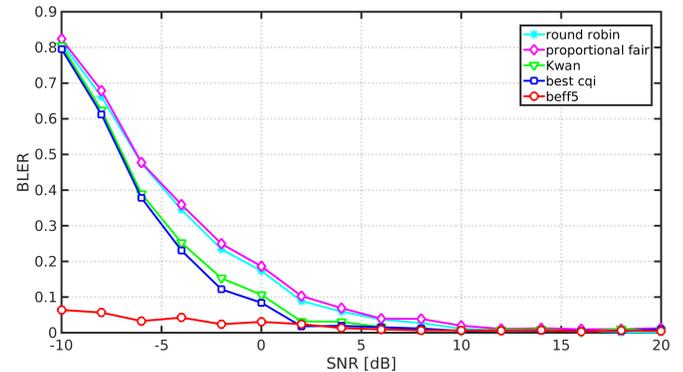


Fig. 7: Taxa BLER para 1,4 MHz, 2 usuários, ITU-T PedA

igualmente em todo o conjunto de valores de SNR estudados. A fórmula para o cálculo do índice é a que se mostra em (8).

$$J = \frac{\left[\sum_{n=1}^{nNUEs} VAZ(ue_n) \right]^2}{nNUEs \cdot \sum_{n=1}^{nNUEs} VAZ(ue_n)^2} \quad (8)$$

Onde:

- J → Índice de Justiça de Jain [$0 \leq J \leq 1$]
- $nNUEs$ → Número de UEs no sistema analisado
- $VAZ(ue_n)$ → Vazão registrada para a unidade ue_n

Dois conjuntos de simulações diferentes foram preparados para analisar a justiça global do escalonador. No primeiro grupo de simulações, todos os usuários tem um valor mínimo de relação SNR que lhes permite ter uma probabilidade mínima de receber dados no downlink, enquanto no segundo grupo de simulações, alguns usuários terão uma qualidade de sinal tão ruim que não serão escalonados para receber dados no downlink pelo eNodeB.

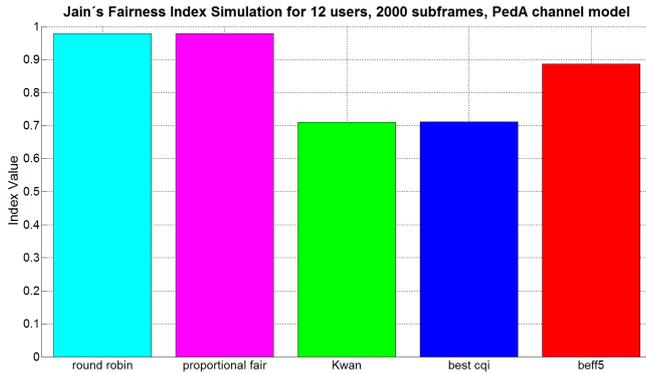


Fig. 8: Índice de Justiça Jain 1,4 MHz; SNR=[15 dB – 22 dB]

A figura 8, mostra os resultados de simulação obtidos para um sistema com 12 usuários recebendo dados no downlink com uma matriz de recursos de 6 RBs, todos eles com diferentes relações SNR, espaçados 1 dB entre 15 e 22 dB. Tendo todos os usuários avaliados uma SNR compreendida entre 15 e 22 dB, pode-se assegurar que todos os usuários terão oportunidade de receber dados no downlink em algum momento da simulação.

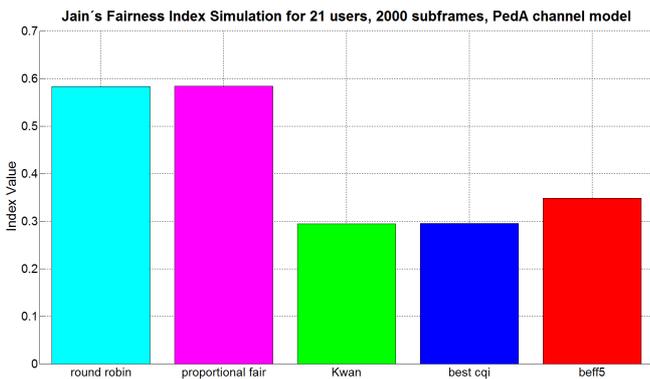


Fig. 9: Índice de Justiça Jain; 1,4 MHz; SNR=[-10 dB – 30 dB]

A figura 9, mostra os resultados de simulação de um sistema com 21 usuários com diferentes valores de SNR igualmente espaçados 2 dB entre -10 dB e 30 dB. Nessa situação, usuários com SNR menor do que -5 dB reportarão CQI 0 (sem cobertura) e não terão possibilidade alguma de receber dados no downlink, prejudicando o índice de justiça global do escalonador.

Comparativamente, o escalonador BEFF tem um desempenho melhor que os escalonadores *Best-CQI* ou *Kwan* que tem os mesmos objetivos de máxima vazão agregada do sistema.

V. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta um novo sistema de escalonamento downlink de recursos das redes LTE que maximiza a eficiência global do sistema no eNodeB, conseguindo uma alta vazão enquanto mantém uma BLER reduzida, requerendo assim menos recursos e energia.

Como pode ser observado nas simulações, o algoritmo proposto consegue maior eficiência global do sistema quando comparado com outros escalonadores focados na máxima vazão agregada.

Os resultados obtidos mostram que o escalonador BEFF pode ser adequado para melhorar cenários de baixa SNR, expandindo a borda da célula e conseguindo atingir mais usuários nessas condições.

Por outro lado, reduzindo a BLER do sistema, o algoritmo BEFF consegue melhorar a eficiência energética no eNodeB, já que menos blocos transmitidos são perdidos, requerendo menos retransmissões.

Priorizando na métrica aqueles usuários com menos dados transmitidos em caso de igualdade entre várias UEs, se consegue que o escalonador BEFF seja em qualquer circunstância mais justo que qualquer outro escalonador apenas focado na máxima vazão agregada.

Um possível trabalho futuro seria a implementação para um sistema MIMO multiusuário.

REFERÊNCIAS

- [1] The 3rd Generation Partnership Project (3GPP)
Disponível em: <http://www.3gpp.org/>
- [2] 3GPP, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN: Overall description; Stage 2; (3GPP TS 36.300 version 11.11.0 Release 11)", Technical Specification, Setembro 2014.
- [3] 3GPP, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 11.5.0 Release 11)", Technical Specification, Janeiro 2014.
- [4] 3GPP, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (3GPP TS 36.212 version 11.5.0 Release 11)", Technical Specification, Julho 2014.
- [5] 3GPP, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 11.7.0 Release 11)", Technical Specification, Julho 2014.
- [6] Vienna LTE-A Link-Level Simulator. Disponível em: <http://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vienna-lte-a-simulators/>
- [7] Mehlführer, J. Colom Ikuno, M. Simko, S. Schwarz, M. Wrulich, M. Rupp; "The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2011, pp. 1-13, 2011.
- [8] Schwarz, S. and Ikuno, J.C. and Simko, M. and Tarantetz, M. and Qi Wang and Rupp, M., "Pushing the Limits of LTE: A Survey on Research Enhancing the Standard", in IEEE Access, vol. 1, pp. 51-62, 2013
- [9] R. Kwan, C. Leung, and J. Zhang, "Multiuser Scheduling on the Downlink of an LTE Cellular System", Research Letters in Communications, Hindawi Publishing Corporation., 2008.
- [10] H. Kim and Y. Han, "A Proportional Fair Scheduling for Multicarrier Transmission Systems," IEEE Communications Letters, vol. 9, Issue. 3, pp. 210-212, 2005.
- [11] Z. Sun, C. Yin, and G. Yue, "Reduced-Complexity Proportional Fair Scheduling for OFDMA Systems", in Proc. IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems, . Vol. 2.8, 2006
- [12] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems", Tech. Rep. TR-301, DEC, September 1984
- [13] R Sandanalakshmi, T. G. Palanivelu, K. Manivannan, "Effective SNR Mapping for Link Error Prediction in OFDM Based Systems", IET-UK International Conference on Information and Communication Technology in Electrical Sciences, pp. 684-687, December 2007