

Estudo do Compromisso entre Eficiência Espectral e Justiça na Alocação de Recursos de Rádio

Thiago Duarte de Paula, Diego Aguiar Sousa, Tarcisio Ferreira Maciel

Resumo— Este trabalho estuda o compromisso entre eficiência espectral e justiça para a alocação de recursos de rádio em um sistema multiusuário, considerando restrições de qualidade de experiência para cada usuário e serviço. O foco é reduzir a não uniformidade das taxas atingidas pelos usuários, as quais advêm da distribuição oportunista de recursos realizada pelos algoritmos de alocação de recursos. Assim, propõe-se aqui a introdução de uma penalidade na função objetivo original do problema de alocação de recursos a fim de proporcionar um compromisso entre a justiça (em termos de taxa) no meio dos usuários e a capacidade total do sistema. Os resultados obtidos foram analisados através do índice de justiça de Jain, em que foram avaliadas diferentes variações de múltiplos parâmetros que impactam a satisfação dos usuários. Os resultados mostraram que a abordagem proposta proporcionou um melhor compromisso entre justiça e capacidade atingindo até 0,9 no índice de Jain, com taxas bem próximas daquelas obtidas no caso da função objetivo sem penalização.

Palavras-Chave— Alocação de recursos de rádio, compromisso capacidade-justiça, sistemas sem fio, otimização.

Abstract— This work studies the trade-off between spectral efficiency and fairness considering the allocation of radio resources in a multi-user system which considers quality of experience constraints for each user and service. The focus herein is to reduce the non-uniformity among the throughput values achieved by the users, which originate from the opportunistic resource distribution performed by the resource allocation algorithms. Thus, it is proposed herein the introduction of a penalty term in the objective function of the resource allocation optimization problem as to provide a better trade-off between fairness (in terms of users' throughput) and the total system capacity. The obtained results were analyzed in terms of Jain's index of fairness, where different variations of several relevant parameters which impact the users' satisfaction have been evaluated. The results have shown that the proposed approach provided a better trade-off between fairness and capacity reaching Jain's index of fairness values of up to 0.9 with rates close to those obtained in the case without the penalty in the objective function.

Keywords— Radio resource allocation, capacity-fairness trade-off, wireless systems, optimization.

I. INTRODUÇÃO

As redes de telecomunicações móveis estão em constante evolução, visando atender a demandas cada vez mais desafiadoras, ampliando seu leque de possibilidades. Atualmente, novos estudos, algoritmos e normas estão sendo estudados e discutidos pela academia e indústria na 5ª Geração (5G) de redes móveis [1]. Os estudos e a infraestrutura das redes

Os autores são vinculados ao Grupo de Pesquisa em Telecomunicações Sem Fio (GTEL), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE. Diego Aguiar Sousa é vinculado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Acaraú-CE. E-mails: {thiago, diego, maciel}@gtel.ufc.br

de 5G propõem suprir as novas tendências da tecnologia, que tendem a ficar mais sobrecarregadas de usuários, e os recursos, mais escassos. De acordo com a Ericsson [2], o número de assinaturas móveis será de 9,3 bilhões até o final de 2018, com um volume de dados trafegados nas redes sem fio superior a 190 exabytes, podendo ultrapassar 500 exabytes em 2020 [3]. Esse aumento no tráfego móvel é impulsionado pelo crescimento do número de dispositivos móveis e pela crescente demanda por aplicativos multimídia. Diante dessas exigências da evolução tecnológica e centenas de dispositivos conectados, manter a eficiência e a justiça entre diferentes dispositivos de usuários e taxas de dados é um problema desafiador para redes celulares de 5G.

Na literatura alguns trabalhos propuseram diferentes abordagens. Em [4], abordaram o problema da maximização da taxa total do sistema considerando um cenário multisserviço, onde cada serviço deve ter, pelo menos, um certo número de usuários com o requisito de qualidade de serviço (QoS) satisfeito. Já, em [1], propôs-se um novo algoritmo para resolver o problema de alocação proposto em [4], contudo generalizando a limitação de QoS para uma restrição de qualidade de experiência (QoE). Em ambos os algoritmos, os dispositivos de usuários (UEs) que possuem a melhor relação sinal-ruído (SNR) são beneficiados com mais recursos, o que, em geral, resulta em maiores taxas para o sistema. Por outro lado, os UEs com as piores SNRs (por exemplo, aqueles posicionados nos limites da área de cobertura da célula ou sujeitos a uma maior atenuação de canal) tendem a obter apenas o mínimo de recursos necessários para suprir seus requerimentos de satisfação, caso sejam escolhidos para serem satisfeitos pelo algoritmo. Caso contrário, tais usuários não receberão recursos e permanecerão insatisfeitos. Essa característica oportunista faz com que os algoritmos propostos em [4] e [1] tendam a ser injustos.

Outros trabalhos estudaram formas de balanceamentos justo para os usuários individualmente ou para o sistema, conhecidos como algoritmos justos. Por exemplo, em [5], foi apresentado e comparado três algoritmos distintos com diferentes requisitos de QoS para os dispositivos de usuários. Utilizou-se o índice de Jain para avaliar a justiça total sistema. Em [6], o algoritmo proposto no enlace direto, visa maximizar a taxa mínima priorizando os usuários com baixa taxa de dados e assim suprir o problema de inanição dos usuários por falta de recursos. Já, em [7], propôs-se um algoritmo que maximiza o escore médio de opinião (MOS) mínimo do sistema, considerando uma restrição de que um número mínimo de usuários deva ter seus requerimentos de QoE satisfeitos, similar a [1]. Contudo, nesses algoritmos, a eficiência espectral

do sistema tende a ser prejudicada devido à característica de justiça contida nesses algoritmos, visto que usuários com piores SNRs tenderão a receber mais recursos do que os com melhores SNR.

Neste artigo, formulou-se um problema de alocação de recursos similar a [1], em que os usuários estão divididos em planos de serviço com um fator de satisfação mínimo a ser atendido, ou seja, que pelo menos uma fração dos usuários de cada plano atinja um valor mínimo de satisfação. Contudo, o objetivo do nosso problema é maximizar um compromisso entre a eficiência espectral e a justiça do sistema. Para isso, será adaptado o problema de otimização formulado em [1] adicionando uma penalidade na função objetivo.

A estrutura desse artigo está organizada da seguinte forma: a Seção II descreve o problema de maximização e detalha a função utilizada, a Seção III expõe o modelo de cenário adotado, a Seção IV apresenta os resultados do estudo proposto em comparação ao problema de maximização de taxa e a Seção V conclui este trabalho.

II. MODELAGEM DO SISTEMA

O modelo de sistema a ser considerado neste trabalho é baseado no que foi discutido em [1]. Primeiramente, considerou-se uma transmissão no enlace direto de um sistema de comunicação sem fio que utiliza o padrão evolução em longo prazo (LTE) e a estação rádio-base (eNB) encontra-se no centro da célula. As células empregam esquemas de acesso múltiplo por divisão de frequências ortogonais (OFDMA) e de tempo (TDMA), alocando um conjunto de $\kappa = \{1, 2, \dots, K\}$ de bloco de recursos (RBs) para um conjunto $u = \{1, 2, \dots, U\}$ de UEs distribuídos na área de cobertura da célula. Devido às restrições de sinalização, um RB é o recurso mínimo alocável. Cada RB consiste de Q subportadoras adjacentes espaçadas de Δf Hz no domínio da frequência e um conjunto de T símbolos consecutivos no domínio do tempo, cuja duração total corresponde a um intervalo temporal de transmissão (TTI). No problema, aloca-se cada RB para um UE por TTI. A resposta do canal de um RB k deve permanecer aproximadamente constante ao longo das Q subportadoras durante o período de um TTI. Os RBs são ortogonais entre si no tempo e na frequência e não há reuso de frequência dentro do setor, então não se considera interferência intracelular entre os UEs. No entanto, na modelagem, as UEs experimentam a interferência cocanal proveniente entre células de cada setor que compartilham os mesmos recursos [11]. Devido ao comportamento estocástico do tráfego de dados, considerou-se um cenário com um único setor de célula com a interferência intercelular incorporada como parte do ruído gaussiano aditivo branco (AWGN).

Assume-se que tanto a eNB como UE estão equipados com uma única antena. Supõe-se também que o sinal de transmissão da eNB para UE experimenta um desvanecimento em larga escala, em termos de perda de percurso médio, somreamento e desvanecimento em pequena escala. Por simplificação de notação, sem perda de generalidade, foi omitido qualquer índice de TTI.

Considerou-se que a eNB tem uma potência total disponível P_t , sendo esta alocada para as RBs durante a transmissão.

Assim, assumindo uma alocação igualitária de potência (EPA), temos que a potência p_k alocada para o k -ésimo RB é dada por $p_k = \frac{P_t}{K}$, onde K é o número total de RB.

Já a SNR do UE u no RB k é expressa por:

$$\gamma_{u,k} = \frac{p_k |h_{u,k}|^2}{\sigma^2} \quad (1)$$

onde o σ^2 denota a potência média de banda de frequência ocupada por um RB e $h_{u,k}$, o ganho de canal para cada usuário u em cada RB k .

Outra consideração do modelo é que a eNB emprega uma função de adaptação de enlace $f(\cdot)$ que consiste em ajustar dinamicamente os parâmetros de transmissão, tais como os esquemas de modulação e codificação (MCSs). Os UEs transmitem o indicador de qualidade de canal (CQI) para o eNB no enlace reverso. O eNB, em resposta, seleciona o MCS mais adequado para usar na transmissão considerando o estado do enlace. Desse modo, a taxa de dados alocada pela eNB para o UE u no RB k é $r_{u,k} = f(\gamma_{u,k})$, onde $f(\cdot)$ representa a função de adaptação de enlace que mapeia valores de SNR para valores de taxa.

A taxa total de dados alocada para o UE u é representada por:

$$R_u = \sum_{k \in K_u} r_{u,k} \quad , \quad (2)$$

onde K_u é um subconjunto de RBs alocados para o UE.

As medições de QoE dos UEs são dadas em termo de MOS, que depende da aplicação multimídia do UE. Considerou-se que o MOS de cada UE u pode ser convertido para taxa de dados, ou seja:

$$MOS_u = \phi_u(R_u) \quad , \quad (3)$$

onde $\phi_u(\cdot)$ é uma função crescente que mapeia a taxa obtida de um UE u em valores de MOS.

O trabalho considerou que os usuários assinam planos de serviço com requerimentos de satisfação diferentes. Definiu-se $\mathcal{S} = \{1, 2, \dots, S\}$ como um conjunto de planos de assinatura e U_s como um conjunto de assinantes do plano de serviço $s \in \mathcal{S}$. Além disso, foi considerado que $\bigcup_{s \in \mathcal{S}} U_s = U$ e $\bigcup_{s \in \mathcal{S}} U_s = \emptyset$, ou seja, que cada usuário inscrito está em único plano de serviço.

A. Problema de Maximização da Eficiência Espectral Sujeito a Requerimentos de QoE

Para dar uma maior completude ao trabalho, nesta seção será descrito o problema de otimização apresentado em [1], que possui como objetivo maximizar a taxa total do sistema sujeito a que um número mínimo, m_s , de UEs tenham seus requerimentos de QoE satisfeitos, para cada plano s . A descrição matemática do problema é dada por:

$$\text{maximizar } \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{k \in \mathcal{K}} r_{u,k} x_{u,k} \quad (4a)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{u \in \mathcal{U}} x_{u,k} = 1, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4b)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}_s} H\left(\phi_u\left(\sum_{k \in \mathcal{K}} r_{u,k} x_{u,k}\right), \varphi_s\right) \geq m_s \quad (4c)$$

$$x_{u,k} \in \{0, 1\}, \quad \forall u \in \mathcal{U} \text{ e } \forall k \in \mathcal{K} \quad , \quad (4d)$$

onde $x_{u,k}$ é uma variável binária que indica se o PRB k será alocado para o UE u ($x_{u,k} = 1$). O objetivo descrito em (4a) indica que se deseja maximizar o somatório da taxa total do sistema. A restrição (4b) estipula que um RB k só poderá ser alocado para um UE. Em (4c), $H(a,b)$ é a função degrau que assume o valor 1 quando $a \geq b$ e 0, caso contrário. Na qual, $a = \phi_u \left(\sum_{k \in \mathcal{K}} r_{u,k} x_{u,k} \right)$ é a taxa alocada para o usuário mapeada em MOS. O $b = \varphi_s$ é o mínimo valor de MOS necessário para um UE u do serviço s ser satisfeito. Deste modo, a restrição (4c) indica que a quantidade de UEs a serem satisfeitos por plano deve ser no mínimo m_s . Por fim, (4d) define cada $x_{u,k}$ como uma variável binária.

B. Maximização do Compromisso entre Eficiência Espectral e Justiça

Nesta seção, será descrito o problema investigado. A fim de adaptar o problema descrito em (4) para maximizar o compromisso entre taxa total e justiça do sistema, formulou-se uma penalidade a ser aplicada a cada usuário, dada por:

$$p_u = w \cdot r_{u,k}^* \log \left| \varphi_s - \phi_u \left(\sum_{k \in \mathcal{K}} r_{u,k} \right) \right|, \quad (5)$$

em que $r_{u,k}^* = \max(r_{u,k})$ para todo $u \in \mathcal{U}$ e $k \in \mathcal{K}$. O parâmetro $w \geq 0$ é um fator multiplicativo que pondera a penalidade p_u .

Adicionando (5) em (4), obtemos:

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar} && \sum_{u \in \mathcal{U}} \sum_{k \in \mathcal{K}} (r_{u,k} - p_u) x_{u,k} && (6) \\ & \text{Sujeito a} && (4b), (4c), (4d). \end{aligned}$$

A penalidade p_u foi projetada com intuito de penalizar usuários que tenham maiores taxas, de modo que a solução do problema de otimização distribua os recursos também para usuários com menores taxas. O parâmetro $w \geq 0$ determina como será a relação entre a taxa total e a justiça do sistema. Quando $w = 0$, a função é ignorada e o problema se reduz ao problema original (4). Quando $w \rightarrow \infty$, a função tende a reduzir a função original com uma penalidade maior.

III. MODELAGEM DO CENÁRIO

O modelo de cenário adotado nas simulações está alinhado com os padrões da LTE do 3GPP ([9] e [8]). Considerou-se uma célula hexagonal de raio R com três setores, estando o eNB localizado no centro da célula. O sistema opera no enlace direto com a frequência central de 2 GHz e com um total de $K = 50$ RBs disponíveis para alocação. Cada RB é composto por $Q = 12$ subportadoras adjacentes espaçadas de $\Delta f = 15$ kHz e de $T = 14$ símbolos OFDM consecutivos. Na modelagem do canal $h_{u,k}$ entre o eNB e o UE u no RB k , consideraram-se os principais efeitos de propagação, isto é, a perda de percurso média, o sombreamento e o desvanecimento de pequena escala conforme os modelos indicados na Tabela I. Em particular, considerou-se que o desvanecimento de pequena escala é do tipo idênticamente e independentemente distribuído, seguindo uma distribuição de Rayleigh. A fim de reduzir a interferência entre células, também considerou-se

uma antena inclinada para baixo (ou seja, em uso *downtilt*) que fornece ganho horizontal e vertical, segundo o modelo descrito em [13]. Inicialmente, considerou-se que o raio da célula é fixo, $R = 1,5$ km, com 30 usuários distribuídos uniformemente em sua área. Posteriormente, alguns parâmetros foram variados para a análise de sua influência sobre o desempenho dos métodos estudados neste trabalho.

Os resultados a seguir foram obtidos através da aplicação do método de Monte Carlo com um total de 1000 experimentos realizados para cada configuração. Em cada realização, os usuários foram distribuídos na célula e todos os cálculos de enlace e as métricas de desempenho necessários foram realizados. Os resultados finais correspondem à média (máxima ou mínima) das métricas de desempenho utilizadas calculadas sobre o número de amostras simuladas.

Na Tabela I, apresentaram-se os principais parâmetros adotados na modelagem do sistema.

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
Pot. Máx. Transmitida pela eNB (P_t)	43 dBm [8]
Padrão de Radiação da Antena da eNB	3 setores [8]
Raio da Célula	1,5 km
Velocidade UE	3 km/h [9]
Frequência Portadora	2 GHz [9]
Largura de Banda do Sistema	10 MHz [8]
Largura da Subportadora (Δf)	15 kHz
Número de RBs (K)	50
Nº de Subportadora por RB (Q)	12
Nº de Símbolos por RB (T)	14
Perda de Percurso	$34.5 + 35 \log_{10}(d)$ [10]
Ganho da Antena	$G_h(\theta_h) + G_v(\theta_v)$ [13]
Ângulo de Inclinação da Antena	8 graus
Desvio Padrão de Somb. Log-Normal	8 dB
Desvanecimento em Pequena Escala	IID
Potência AWGN por Subportadora	-123.24 dBm
Figura de Ruído	9 dB
Adaptação do Enlace	Curvas de [12]
TTI	1 ms
Número de Amostras	1000

Em todas as simulações, considerou-se que os serviços foram de navegação na *web* com base em [15] e [16], sendo MOS dado por:

$$\phi_u(R_u) = 5 - \frac{578}{1 + \left(\frac{R_u + 541.1}{45.98} \right)}. \quad (7)$$

IV. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Inicialmente, analisou-se a variação do valor do parâmetro w da função proposta. Na função proposta, à medida que o parâmetro aumenta, o valor assumido pelo índice de Jain torna-se maior. Contudo, as taxas de dados totais do sistema caem proporcionalmente. Isso porque a função proposta funciona como um atenuador na função objetivo. Deste modo, quanto maior w for, maior será a penalização dada à função objetivo, o que, por sua vez, desacoroça a escolha de soluções que apresentem uma distribuição injusta da taxa entre os vários usuários. Na Figura 1, mostra-se a taxa do problema de

maximização e o problema proposto em relação à variação de w . Nota-se que, quando w é 0,2, as taxas de ambos são próximas, isso mostra que w quase não interfere no problema de otimização original. Já, na variação de 0,2 para 0,4, existe um pequeno decaimento na taxa do problema proposto, mas, em compensação, um pequeno acréscimo no índice de Jain, como mostrado na Figura 2. Variações mais bruscas, em torno de 40 %, ocorre entre 0,4 e 0,6 para taxa e justiça, contudo, para valores acima de 0,6, a taxa continua a decair, mas justiça mantém-se constante.

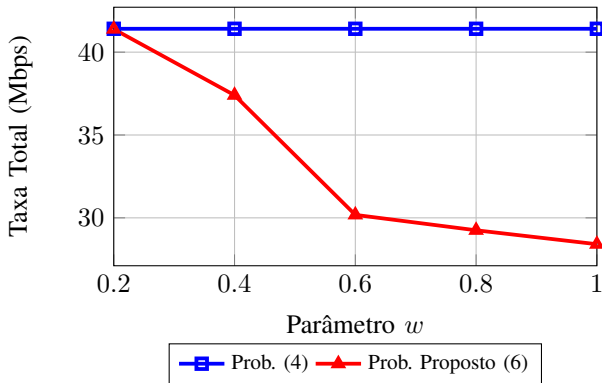


Fig. 1. Variação do w em relação a taxa

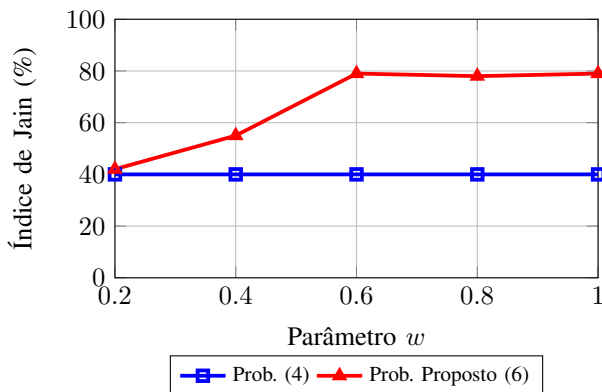


Fig. 2. Comportamento do índice de Jain para variação do w

A partir da relação entre o índice de Jain e a taxa de dados, foi escolhido um valor empírico para o parâmetro w objetivando analisar, em diferentes cenários, o balanço entre justiça e eficiência. O valor de w foi escolhido para $w = 0,6$.

A. Variação do raio

Avaliou-se o impacto da variação do raio da célula sobre a justiça na distribuição dos recursos do sistema para as diferentes formulações do problema de otimização apresentado anteriormente. As Figuras 3 e 4 mostram que para variação do raio, os recursos estão melhor distribuídos entre os UEs, considerando a função proposta. Isso porque, à medida que o raio aumenta, há uma maior probabilidade de ter usuários distantes do centro da célula ou uma baixa SNR, o que precisaria de mais recursos para que os usuários satisfeitos. Como a alocação justa busca balancear a distribuição das taxas

entre os usuários, o resultado final é que todos os usuários sofram uma redução de taxa, o que eleva o índice de Jain, mas reduz, significativamente, a taxa total do sistema para função proposta. Já na função de maximização, à medida que o raio aumenta, teve-se uma queda mais acentuada no índice de Jain, devido aos acréscimos de usuários, com piores SNRs, que foram minimamente satisfeitos, e, com isso, também, a queda na taxa máxima de dados. Nota-se que quando o raio é pequeno, as taxas e as justiça são próximas e um pouco elevadas, principalmente para o problema de maximização de taxa. Isto se explica porque como todos UE que estão perto da eNB todos são candidatos a receberem altas taxas.

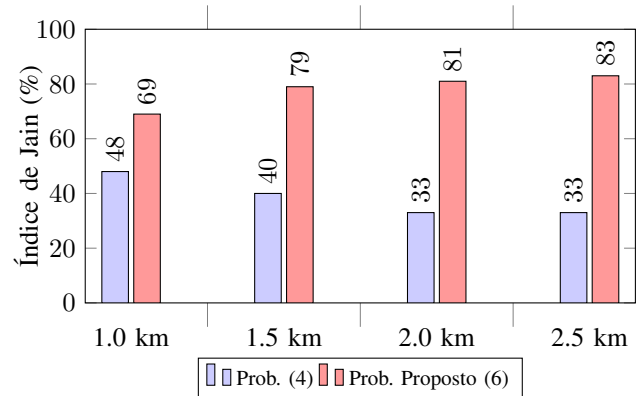


Fig. 3. Índice de Jain \times Variação do raio

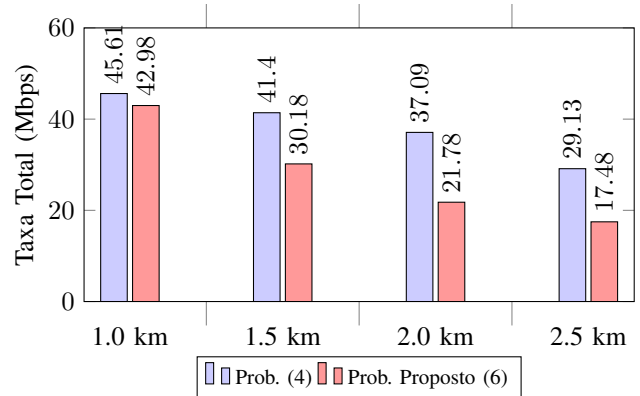


Fig. 4. Taxa de dados \times Variação do raio

B. Variação da quantidade de UEs

Em segunda análise, avaliou-se o comportamento da solução em relação à modificação da quantidade de dispositivos sendo servidos pela eNB.

Nesse contexto, a função proposta iniciou com uma taxa mais baixa de dados, pois a função propõe manter uma justiça alta mesmo com poucos usuários no sistema. À medida que aumentou-se a quantidade de usuários, a função apresentou uma progressão na taxa e no índice de Jain, e a taxa total do sistema próxima da função de maximização.

Na função de maximização, ao satisfazer o acréscimo de usuários, houve um decaimento da taxa. No ponto em que

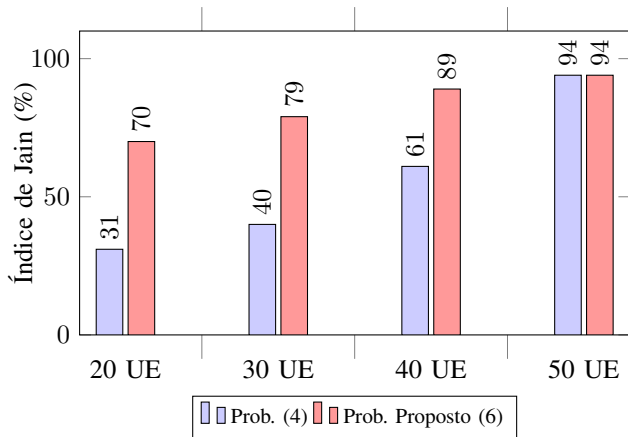


Fig. 5. Índice de Jain × Variação do UE

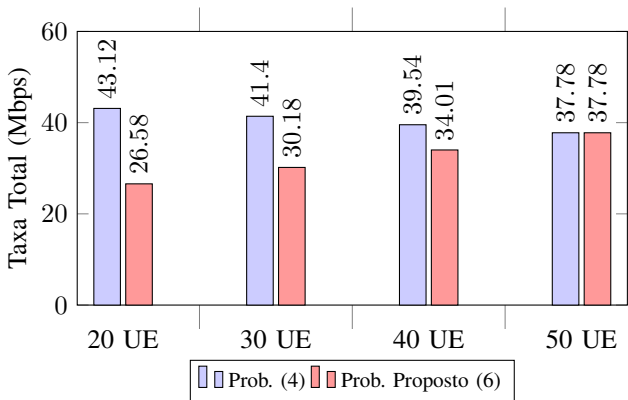


Fig. 6. Taxa de dados × Variação do UE

o número de usuários é igual ao de RB, praticamente cada usuário recebe uma RB e, conseqüentemente, a justiça é alta para ambos os casos. Contudo, como mencionado anteriormente, ocasiona o decaimento da taxa.

O problema proposto 6 manteve um melhor balanço de taxa e, portanto, melhor equidade na alocação de recursos do que a função de maximização, como pode ser visto nas Figuras 5 e 6.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, mostrou-se que aplicações de funções na função objetivo em um problema de otimização podem auxiliar a resolver balanceamento em alocação de recursos em redes celulares de forma mais justa para os usuários, sem prejudicar a eficiência para o sistema. Avaliou-se a eficiência por meio da análise e comparação das taxas de dados e justiça entre, o algoritmo em que se maximiza a taxa total do sistema e com o limiar mínimo de satisfação, mas onde a distribuição justa dos recursos não é fator preponderante e com adição de uma penalização na função objetivo. Dos casos analisados, conseguiu-se atingir taxas próximas às daquelas de referência, apesar do desafio de alocar de forma mais justa. Ao mesmo tempo em que se manteve uma boa eficiência para o sistema, enfatizou-se o equilíbrio na distribuição dos recursos, foco maior deste trabalho, comprometendo-se com a satisfação dos usuários. A equidade na alocação de recursos foi mensurada

através do índice de Jain, que ficou entre 69% e 94%, sempre acima do índice de Jain referente à função que apenas se preocupa em maximizar a taxa total do sistema. Além de todos os usuários terem sido servidos, houve a preocupação de atender a satisfação mínima de MOS. Em trabalhos futuros, será estudada a função utilizada como uma barreira aproximando o ponto ótimo para o interior da região factível.

REFERÊNCIAS

- [1] Diego A. Sousa and Victor F. Monteiro and Tarcisio F. Maciel and Francisco R. M. Lima and F. R. P. Cavalcanti, *Resource Management for Rate Maximization with QoE Provisioning in Wireless Networks..* Journal of Communication and Information Systems, Belo Horizonte, v. 31, n. 21, pp. 290-303, 2016.
- [2] Francisco R. M. Lima, Emanuel B. Rodrigues, Tarcisio F. Maciel and Mats Nordberg, *Resource Allocation for Improved User Satisfaction with Applications to LTE*. Resource Allocation and MIMO for 4G and Beyond, v. 1, n. 1, pp. 63-104, 2014.
- [3] Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen V. Hanly, Angel Lozano, Anthony C. K. Soong and Jianzhong Charlie Zhang, *What Will 5G Be?..* IEEE JOURNAL, ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, v. 32, n. 06, pp. 1065-1082, 2014.
- [4] Francisco R. M. Lima, T. F. Maciel, W. C. Freitas, and F. R. P. Cavalcanti, *Resource Assignment for Rate Maximization with QoS Guarantees in Multiservice Wireless Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 3, pp. 1318-1332, 2012.
- [5] Ismael I. Al-Shiab, Rana E. Ahmed. *On Fairness in LTE Downlink MAC Scheduling Algorithms*. International Conference on Information and Communication Technology Research (ICTRC2015), pp. 171-174, 2015.
- [6] W. Rhee and J. M. Cioffi, *Increase in Capacity of Multiuser OFDM System Using Dynamic Subchannel Allocation*. in Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 2, May 2000, pp. 1085-1089.
- [7] Victor Farias Monteiro, Diego Aguiar Sousa, Tarcisio F. Maciel, Francisco Rafael M. Lima, Emanuel B. Rodrigues, Francisco Rodrigo P. Cavalcanti *Radio Resource Allocation Framework for Quality of Experience Optimization in Wireless Networks*. IEEE Network, vol. 29, number 6, pp 33-39, 2015.
- [8] 3GPP, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects*. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/dynareport/36814.htm>>. Acesso em: 22 mar. 2017.
- [9] 3GPP, *Physical Layer Aspects for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)*. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/DynaReport/25814.htm>>. Acesso em: 22 mar. 2017.
- [10] 3GPP, *Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations*. Third Generation Partnership Project, TR 25.99, 2007
- [11] Christopher Cox. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. 1. ed. Wiley, 2012.
- [12] C. Mehlhruher, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska and M. Rupp, *Simulating the long term evolution physical layer..* Proceedings of the European Signal Processing Conference, pp 1471-1478, 2009.
- [13] F. Gunnarsson, M. Johansson, A. Furuskar, M. Lundevall, A. Simonsson, C. Tidestav and M. Blomgren, *Downtilted base station antennas - a simulation model proposal and impact on HSPA and LTE performance..* Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), pp. 1-5, 2008.
- [14] Huaizhou Shi, R. V. Prasad, Vijay S. Rao, I. G. Niemegeers. *A Fairness Model for Resource Allocation in Wireless Networks*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-9. 2012.
- [15] J. Poncela, G. Gomez, A. Hierrezuelo, F. Lopez-Martinez and M. Aamir, *Quality Assessment in 3G/4G Wireless Networks..* Wireless Personal Communications, pp 363-377, 2014.
- [16] J. Navarro-Ortiz, J. M. Lopez-Soler and G. Stea, *Quality of Experience Based Resource Sharing in IEEE 802.11e HCCA..* European Wireless Conference (EW), pp 454-461, 2010