

Alocação de Recursos em Redes Sem Fio Baseada na Qualidade de Experiência do Usuário

Victor F. Monteiro, Diego A. Sousa, Tarcisio F. Maciel, F. Rafael M. Lima e F. Rodrigo P. Cavalcanti

Resumo— Este artigo apresenta uma solução para o problema de alocação de recursos em um sistema de telecomunicações sem fio objetivando maximizar o mínimo *Mean Opinion Score* (MOS) e considerando restrições relativas à qualidade de experiência dos usuários. Os clientes de uma operadora são divididos em planos, em que cada plano tem um fator mínimo de satisfação, isto é, quantidade mínima de usuários a serem satisfeitos. Esta restrição é importante do ponto de vista das operadoras e ainda não foi considerada neste contexto. Os resultados de simulações apontam que em alguns casos o desempenho da solução proposta é próximo ao da ótima.

Palavras-Chave— Qualidade de Experiência, Maximização da Mínima MOS, Alocação de Recursos de Rádio.

Abstract— This article presents a Quality of Experience (QoE)-aware resource allocation framework aiming at maximizing the minimum Mean Opinion Score (MOS) of the users in a wireless network. The subscribers of a network are divided into service plans, where each one has a satisfaction factor to achieve, i.e., a minimum number of users to satisfy. This is an important requirement from the operators' point of view and was not studied yet, as far as we know. We evaluate the proposed method by means of simulations and the obtained results show that, for some cases, it performs close to the optimal solution.

Keywords— Quality of Experience, Minimum Mean Opinion Score Maximization, Radio Resource Allocation.

I. INTRODUÇÃO

Uma nova geração de sistemas de comunicações sem fio, 5^a geração (5G), é prevista para 2020. É esperado um aumento de 10 a 100 vezes na taxa de dados por usuário, assim como o surgimento de diversos serviços baseados em comunicações máquina à máquina em diferentes áreas, como assistência médica, segurança e redes de medição inteligente [1].

Neste contexto, as operadoras terão que focar em entregar serviços com alta qualidade de experiência, do inglês *Quality of Experience* (QoE), independentemente dos requisitos técnicos, como taxa de transmissão e atraso, que poderão variar entre dispositivos e aplicações. QoE é definido em [2] como a avaliação subjetiva de um serviço ou aplicação por parte do usuário final. Ela é normalmente avaliada com uma nota entre 1 e 5, chamada em inglês de *Mean Opinion Score* (MOS).

Alguns autores já abordaram aspectos de QoE em problemas de Alocação de Recursos de Rádio (RRA). Em [3], uma heurística foi proposta explorando uma técnica de relaxamento e objetivando maximizar a satisfação total dos usuários em um sistema. A desvantagem é que soluções típicas deste problema

podem penalizar usuários com condições ruins de canal. Em [4], um problema similar foi estudado a fim de maximizar o nível de QoE do sistema e considerando uma função de penalização a fim de garantir a justiça entre os usuários.

Outra maneira de garantir a justiça no sistema é maximizando a menor MOS. Alguns trabalhos [5], [6] já estudaram este problema. Em [5], foi proposta uma alocação de frequência baseada em teoria dos jogos juntamente com alocação de potência baseada no *water filling*. Em [6], o algoritmo Húngaro [7] foi usado para assinalar frequência e a solução ótima do problema de Tchebycheff foi usada para alocar potência. Ambos os trabalhos consideram que todos os usuários possuem o mesmo requisito de MOS.

Diferente de [5], [6], este trabalho aborda o problema de maximizar a menor MOS do sistema considerando múltiplos planos de serviço, em que cada plano visa satisfazer uma fração mínima de seus assinantes, provendo-os com um valor de MOS pré-estabelecido. Esta restrição é um importante requisito do ponto de vista da operadora e já foi considerada em outros contextos [8]–[10].

Em resumo, as principais contribuições deste trabalho são:

- Formulação do problema: formulamos um problema de max-min MOS em que os usuários estão divididos em planos de serviço com um fator de satisfação mínimo a ser atendido. Este fator é um requisito da operadora ainda não explorado por trabalhos anteriores, isto é, precisamos garantir que pelo menos uma fração dos usuários de cada plano atinja um valor mínimo de MOS.
- Caracterização da solução ótima: o problema original possui restrições não lineares e pode requerer esforço computacional proibitivo. Nós o remodelamos como um *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) que pode ser resolvido por algoritmos clássicos da literatura.
- Proposição de solução heurística: propomos uma heurística que requer menor esforço computacional que a ótima e que possui desempenho satisfatório.

O restante deste trabalho é organizado como segue. A Seção II apresenta o modelo do sistema considerado. As Seções III e IV introduzem a formulação do problema e sua solução ótima como um MILP, respectivamente. Nas Seções V e VI, há a proposição de uma solução heurística para o problema e a avaliação de seu desempenho, respectivamente. Finalmente, na Seção VII, apresentamos as principais conclusões do trabalho.

II. MODELO DO SISTEMA

Neste artigo, consideramos o enlace direto de um sistema baseado no *Long Term Evolution* (LTE). Ele é composto por uma única célula na qual uma estação rádio base (do inglês

Os autores são vinculados ao Grupo de Pesquisas em Telecomunicações Sem Fio (GTFL), 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. Tarcisio Ferreira Maciel é vinculado ao Centro de Tecnologia, UFC, Fortaleza-CE. Francisco Rafael Marques Lima é vinculado ao Curso de Engenharia da Computação, UFC, Sobral-CE.

Evolved Node B (eNB)) serve um conjunto \mathcal{U} de dispositivos (em inglês *User Equipments* (UEs)) distribuídos dentro da área de cobertura. Tanto a eNB quanto os UEs são equipados com uma única antena.

O sistema considerado emprega múltiplo acesso por divisão em frequências ortogonais e múltiplo acesso por divisão no tempo como técnicas de acesso ao meio. Devido a restrições de sinalização, os recursos de rádio são alocados em blocos, denominados *Resource Blocks* (RBs), compostos por s sub-portadoras no domínio da frequência e t símbolos no domínio do tempo. O sistema dispõe de K RBs organizados em um conjunto \mathcal{K} . O tempo correspondente ao período no qual um recurso é alocado a um determinado usuário chama-se Intervalo de Tempo de Transmissão (TTI) e é igual ao tempo de duração de um RB. Consideramos que um RB pode ser alocado para apenas um UE a cada TTI.

O coeficiente complexo do canal, $h_{u,k}$, entre a eNB e o UE $u \in \mathcal{U}$ com relação ao RB $k \in \mathcal{K}$ em um dado TTI engloba os principais efeitos de propagação no canal sem fio, como perda de percurso, sombreamento e desvanecimento de pequena escala, assim como, os ganhos nas antenas de transmissão e recepção. Além disso, a banda de coerência do canal é considerada mais larga do que a banda de um RB, resultando em um canal com desvanecimento plano em cada RB. A resposta do canal para cada RB é representada pelo coeficiente complexo do canal associado ao primeiro símbolo da portadora central.

Consideramos uma distribuição igualitária de potência, do inglês *Equal Power Allocation* (EPA), isto é, a potência de transmissão em cada RB é igual a $p = P_t/K$, em que P_t denota a potência total disponível. Além disso, consideramos que a eNB tem conhecimento perfeito do canal $h_{u,k}$ e da potência média do ruído gaussiano aditivo e branco, σ^2 . Assim o valor instantâneo da relação sinal-ruído é $\gamma_{u,k} = p|h_{u,k}|^2/\sigma^2$.

Considera-se que a eNB emprega um esquema de adaptação de enlace que a permite transmitir com diferentes taxas de transmissão dependendo do valor de $\gamma_{u,k}$. Assim, a taxa de transmissão da eNB para o UE u no RB k é dada por $r_{u,k} = f(\gamma_{u,k})$, em que $f(\cdot)$ é a função de adaptação de enlace.

Logo, a taxa total de transmissão R_u do UE u é dada por

$$R_u = \sum_{k=1}^{K=|\mathcal{K}|} r_{u,k} x_{u,k}, \quad (1)$$

onde $x_{u,k}$ é o índice de assinalamento, indicando se o RB k está alocado para o UE u , e $|\cdot|$ aplicado a um conjunto simboliza a sua cardinalidade.

Finalmente, a QoE τ_u do UE u pode ser obtida da taxa R_u usando a função $\phi(\cdot)$, que mapeia a taxa de u em MOS,

$$\tau_u = \phi(R_u). \quad (2)$$

Neste trabalho consideramos que o sistema dispõe de um conjunto $\mathcal{S} = \{1, 2, \dots, S\}$ de planos de serviço e que \mathcal{U}_s corresponde ao conjunto de UEs associados ao plano $s \in \mathcal{S}$. Considera-se que cada UE assina apenas um serviço.

III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Como já mencionado, as operadoras estão mudando o foco para oferecer serviços com alta QoE, independente dos requi-

sitos técnicos, e estão medindo a sua performance baseada na porcentagem de usuários satisfeitos do sistema.

Neste contexto, deseja-se assinalar RBs aos UEs do sistema de tal forma a maximizar a mínima MOS t do sistema. Além disso, a fim de garantir uma qualidade mínima no fornecimento de cada plano s , deseja-se que pelo menos φ_s dos $U_s = |\mathcal{U}_s|$ usuários de s estejam satisfeitos, isto é, tenham MOS igual ou superior a um valor alvo n_s . Define-se a razão $\alpha_s = \varphi_s/U_s$ como o fator de satisfação do plano s .

Desta forma, considerando as definições da Seção II, o problema estudado pode ser formulado como

$$\text{maximizar } t, \quad (3a)$$

$$\text{sujeito a } \tau_u \geq t, \forall u \in \mathcal{U}, \quad (3b)$$

$$\sum_{u=1}^{U_s} u(\tau_u, n_s) \geq \varphi_s, \forall s \in \mathcal{S}, \quad (3c)$$

$$\sum_{u=1}^U x_{u,k} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (3d)$$

$$x_{u,k} \in \{0, 1\}, \forall u \in \mathcal{U}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (3e)$$

onde $u(a, b)$ representa a função degrau, retornando valor 1, se $a \geq b$ ou 0, caso contrário.

A função objetivo t que é maximizada em (3a) representa a mínima MOS do sistema, o que é garantido pela restrição (3b). A desigualdade (3c) impõe que para cada plano s , pelo menos φ_s de U_s UEs tenham MOS igual ou superior a n_s . Finalmente, as duas últimas restrições, (3d) and (3e), asseguram que um RB será alocado para apenas um UE por vez.

O problema descrito em (3) é não linear devido à restrição (3c), inteiro e misto visto que $x_{u,k}$ é uma variável binária e t contínua. A solução ótima de problemas desta natureza consiste em uma busca exaustiva. Com intuito de encontrarmos a solução ótima através de algoritmos mais eficientes, na seção a seguir remodelaremos (3) como um MILP.

IV. SOLUÇÃO ÓTIMA

O principal objetivo desta seção é reformular o problema (3) como um MILP de menor complexidade do que a formulação apresentada na Seção III e que possa ser resolvido por algoritmos clássicos, como o método *Branch and Bound* (BB) [11].

Considerando $\phi(\cdot)$ como uma função contínua estritamente crescente, então existe uma função inversa $\phi^{-1}(\cdot)$ que mapeia possíveis valores de MOS em valores de taxa de transmissão [12]. Substituindo (1) e (2) em (3b) e (3c), obtemos

$$\sum_{k=1}^K r_{u,k} x_{u,k} \geq \phi^{-1}(t), \forall u \in \mathcal{U}. \quad (4a)$$

$$\sum_{u=1}^{U_s} u \left(\sum_{k=1}^K r_{u,k} x_{u,k}, \psi_u \right) \geq \varphi_s, \forall s \in \mathcal{S}, \quad (4b)$$

em que $\psi_u = \phi^{-1}(n_s), \forall u \in \mathcal{U}_s$ e $\forall s \in \mathcal{S}$ denota a taxa de transmissão para que o UE u esteja satisfeito.

A função $u(a, b)$ em (4b) pode ser reescrita em forma de duas novas restrições lineares através da adição de variáveis de folga binárias $\rho_u, \forall u \in \mathcal{U}$, ao problema de otimização, em que ρ_u assume o valor 1 se o usuário u estiver satisfeito e

zero, caso contrário. Assim, podemos reescrever (3) como:

$$\text{maximizar } \phi^{-1}(t), \quad (5a)$$

$$\text{sujeito a } \phi^{-1}(t) - \sum_{k=1}^K r_{u,k} x_{u,k} \leq 0, \forall u \in \mathcal{U}, \quad (5b)$$

$$\sum_{k=1}^K r_{u,k} x_{u,k} \geq \psi_u \cdot \rho_u, \forall u \in \mathcal{U}, \quad (5c)$$

$$\sum_{u=1}^U q_{u,s} \rho_u \geq \varphi_s, \forall s \in \mathcal{S}, \quad (5d)$$

$$\sum_{u=1}^U x_{u,k} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (5e)$$

$$x_{u,k}, \rho_u \in \{0, 1\}, \forall u \in \mathcal{U}, k \in \mathcal{K}, \quad (5f)$$

em que $q_{u,s}$ é igual a 1 se o UE u estiver associado ao plano s e zero, caso contrário.

Vamos agora reformular (5) em um formato matricial. Para isso, precisamos introduzir alguns conceitos relacionados a tensores. Dadas duas matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} , $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$ representa o produto de Kronecker, $\mathbf{A} * \mathbf{B}$ representa o produto de Khatri-Rao e $\mathbf{A} \odot \mathbf{B}$ representa o produto de Hadamard.

Definimos também a operação $\text{vec}\{\cdot\}$ como $\text{vec}\{\mathbf{Z}\} = [\mathbf{z}_1^T \ \mathbf{z}_2^T \ \cdots \ \mathbf{z}_n^T]^T$, onde \mathbf{z}_i é a i -ésima coluna da matriz \mathbf{Z} .

Os elementos $r_{u,k}$, $x_{u,k}$ e $q_{u,s}$ podem ser organizados nas matrizes \mathbf{R} , \mathbf{X} e \mathbf{Q} , respectivamente. Analogamente, os elementos ψ_u , ρ_u e φ_s podem ser organizados nos vetores $\boldsymbol{\psi}$, $\boldsymbol{\rho}$ e $\boldsymbol{\varphi}$, respectivamente.

Podemos então reescrever (5) como:

$$\text{maximizar } \phi^{-1}(t), \quad (6a)$$

$$\text{sujeito a } \phi^{-1}(t) \cdot \mathbf{1}_U - (\mathbf{R}^T * \mathbf{I}_U)^T \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{0}_U, \quad (6b)$$

$$[(\boldsymbol{\psi} \otimes \mathbf{1}_U^T) \odot \mathbf{I}_U] \boldsymbol{\rho} - (\mathbf{R}^T * \mathbf{I}_U)^T \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{0}_U, \quad (6c)$$

$$-\mathbf{Q}^T \boldsymbol{\rho} \leq -\boldsymbol{\varphi}, \quad (6d)$$

$$[\mathbf{I}_K \otimes \mathbf{1}_U^T] \mathbf{x} \leq \mathbf{1}_K, \quad (6e)$$

$$\mathbf{x} \text{ e } \boldsymbol{\rho} \text{ são vetores binários}, \quad (6f)$$

onde $\mathbf{x} = \text{vec}\{\mathbf{X}\}$, $\mathbf{0}_U$ e $\mathbf{1}_U$ são vetores colunas com U zeros e U uns, respectivamente, e \mathbf{I}_U representa a matriz identidade de dimensão U .

Organizando as variáveis de otimização em um único vetor,

$$\mathbf{w} = [\phi^{-1}(t) \ | \ \mathbf{x}^T \ | \ \boldsymbol{\rho}^T]^T. \quad (7)$$

Definindo $\mathbf{a} = [1 \ \mathbf{0}_{(UK+U)}^T]^T$, $\mathbf{B} = [\mathbf{0}_{UK} \ \mathbf{I}_{UK} \ \mathbf{0}_{UK \times U}]$ e $\mathbf{C} = [\mathbf{0}_{U \times (1+UK)} \ \mathbf{I}_U]$, podemos reescrever o problema de otimização como:

$$\text{maximizar } \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{w} \quad (8a)$$

$$\text{sujeito a } \mathbf{D} \cdot \mathbf{w} \leq \mathbf{e}, \quad (8b)$$

em que

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_U \mathbf{a}^T - (\mathbf{R}^T * \mathbf{I}_U)^T \mathbf{B} \\ ((\boldsymbol{\psi} \otimes \mathbf{1}_U^T) \odot \mathbf{I}_U) \cdot \mathbf{C} - (\mathbf{R}^T * \mathbf{I}_U)^T \mathbf{B} \\ -\mathbf{Q}^T \mathbf{C} \\ [\mathbf{I}_K \otimes \mathbf{1}_U^T] \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (9)$$

e,

$$\mathbf{e} = [\mathbf{0}_U^T \ | \ \mathbf{0}_U^T \ | \ -\boldsymbol{\varphi}^T \ | \ \mathbf{1}_K^T]^T. \quad (10)$$

Observe que o MILP (8) é equivalente ao problema (3) e pode ser resolvido através de algoritmos clássicos. Contudo, a

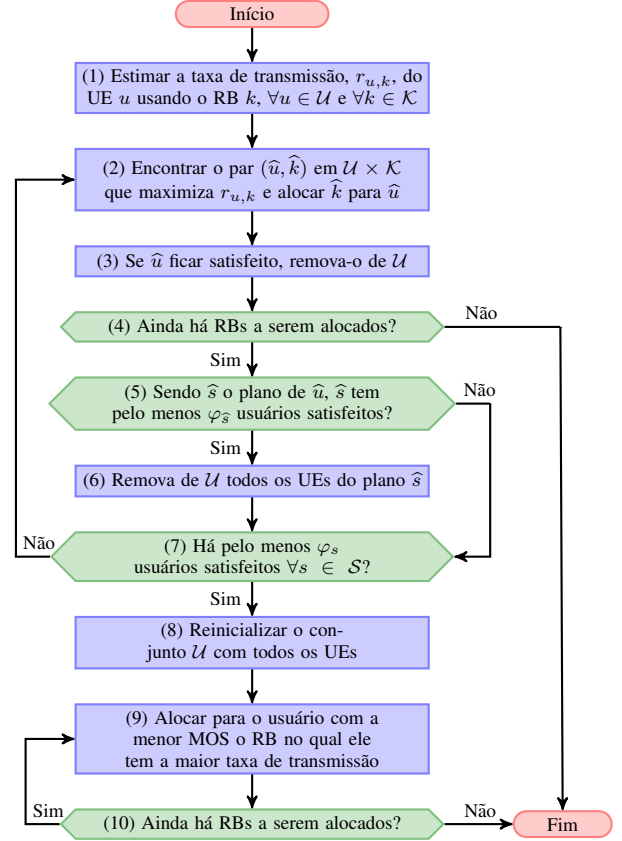


Fig. 1: Fluxograma do algoritmo proposto.

solução de (8) pode requerer esforço computacional proibitivo para sistemas de tempo real. Por conta disso, na próxima seção apresentamos uma solução heurística subótima de menor complexidade.

V. SOLUÇÃO SUBÓTIMA

O fluxograma da solução proposta é apresentado na Fig. 1, sendo dividido em duas partes. Na primeira parte, tentamos satisfazer pelo menos φ_s usuários por plano, blocos (1)–(7). Isto é feito em ciclos, onde a cada repetição um RB é alocado ao UE que possa atingir a maior taxa de transmissão neste RB. Se o usuário atingir a MOS alvo de seu plano, ele é removido do conjunto \mathcal{U} , bloco (3). Além disso, se o seu plano tiver atingido a quantidade mínima de usuários satisfeitos, os demais UEs do mesmo plano também são removidos de \mathcal{U} , blocos (5)–(6). Este processo continua até que cada plano s tenha pelo menos φ_s usuários satisfeitos, bloco (7), ou até que todos os RBs tenham sido alocados, bloco (4). Na segunda parte, blocos (8)–(10), maximizamos a mínima MOS alocando os recursos ainda disponíveis aos UEs com menor MOS.

O Algoritmo 1 apresenta a descrição detalhada do fluxograma da Fig. 1. No início, nenhum RB foi ainda alocado e todos os usuários estão insatisfeitos. Assim, inicializamos a matriz de alocação \mathbf{X} e o vetor quantidade de usuários satisfeitos por plano, \mathbf{u}_{sat} , com zeros (linhas 1–2) e o número de RBs não-allocados com o número total de RBs (linha 3). Em seguida, alocamos os RBs até que todos os recursos tenham sido alocados ou que o mínimo número de usuários satisfeitos, φ_s , tenha sido atingido para todos os planos (linhas 4–16).

Na linha 5, selecionamos o UE \hat{u} e o recurso \hat{k} associados à maior taxa de transmissão em \mathbf{R} e então alocamos \hat{k} a \hat{u} (linha 6). Na sequência, removemos \hat{k} do conjunto de recursos, \mathcal{K} , e atualizamos o número de RBs disponíveis (linhas 7–8). Se o UE \hat{u} ficar satisfeito, ele é removido do conjunto de UEs, \mathcal{U} , e o número de usuários satisfeitos do plano do UE \hat{u} é atualizado (linhas 9–11). De forma equivalente, se este plano tiver atingido a quantidade mínima de usuários satisfeitos, os demais UEs deste plano também são removidos de \mathcal{U} (linha 13). Na linha 17, temos 3 possibilidades: o número mínimo de usuários já foi satisfeito em todos os serviços, ou todos os recursos já foram alocados, ou ambos. Caso ainda haja recursos disponíveis eles serão alocados objetivando maximizar a mínima MOS (linhas 17–26). Primeiramente identificamos o usuário com a menor MOS (linha 20), e em seguida, alocamos a ele o RB ainda disponível que maximiza sua taxa de transmissão (linha 21). O algoritmo termina quando o último RB for alocado.

Algorithm 1 Alocação de Recursos.

```

1:  $\mathbf{X} \leftarrow \mathbf{0}_{U \times K}$   $\triangleright$  Inicialização da matriz de alocação
2:  $\mathbf{u}_{\text{sat}} \leftarrow \mathbf{0}_S$   $\triangleright$  Inic. do vetor qntd. de usuários satisfeitos por plano
3:  $RB_{\text{livre}} \leftarrow K$   $\triangleright$  Inicialização do número de RBs disponíveis
4: while ( $RB_{\text{livre}} > 0$  e  $\mathbf{u}_{\text{sat}} < \varphi$ ) do
5:    $(\hat{u}, \hat{k}) \leftarrow \arg \max_{u \in \mathcal{U}, k \in \mathcal{K}} r_{u,k}$ 
6:    $x_{\hat{u}, \hat{k}} \leftarrow 1$   $\triangleright$  Alocar o RB  $\hat{k}$  ao UE  $\hat{u}$ 
7:    $\mathcal{K} \leftarrow \mathcal{K} \setminus \{\hat{k}\}$   $\triangleright$  Remover o RB  $\hat{k}$  de  $\mathcal{K}$ 
8:    $RB_{\text{livre}} \leftarrow RB_{\text{livre}} - 1$   $\triangleright$  Atualizar número de RBs disponíveis
9:   if  $\tau_{\hat{u}} \geq \phi(\psi_{\hat{u}})$  then  $\triangleright$  Testar se  $\hat{u}$  está satisfeito
10:     $\mathcal{U} \leftarrow \mathcal{U} \setminus \{\hat{u}\}$   $\triangleright$  Remover  $\hat{u}$  de  $\mathcal{U}$ 
11:     $\mathbf{u}_{\text{sat}}(\hat{s}) \leftarrow \mathbf{u}_{\text{sat}}(\hat{s}) + 1$   $\triangleright$  Atualizar  $\mathbf{u}_{\text{sat}}(\hat{s})$ , onde  $\hat{u} \in \mathcal{U}_{\hat{s}}$ 
12:    if  $\mathbf{u}_{\text{sat}}(\hat{s}) \geq \varphi_{\hat{s}}$  then
13:       $\mathcal{U} \leftarrow \mathcal{U} \setminus \mathcal{U}_{\hat{s}}$   $\triangleright$  Remover de  $\mathcal{U}$  os UEs associados a  $\hat{s}$ 
14:    end if
15:  end if
16: end while
17: if  $RB_{\text{livre}} > 0$  then
18:   Reinicializar  $\mathcal{U}$  com todos os usuários
19:   while ( $RB_{\text{livre}} > 0$ ) do
20:      $\hat{u} \leftarrow \arg \min_{u \in \mathcal{U}} \tau_u$   $\triangleright$  Encontrar UE com a menor MOS
21:      $\hat{k} \leftarrow \arg \max_{k \in \mathcal{K}} r_{\hat{u}, k}$ 
22:      $x_{\hat{u}, \hat{k}} \leftarrow 1$   $\triangleright$  Alocar RB  $\hat{k}$  a  $\hat{u}$ 
23:      $\mathcal{K} \leftarrow \mathcal{K} \setminus \{\hat{k}\}$   $\triangleright$  Remover RB  $\hat{k}$  de  $\mathcal{K}$ 
24:      $RB_{\text{livre}} \leftarrow RB_{\text{livre}} - 1$   $\triangleright$  Atualizar  $RB_{\text{livre}}$ 
25:   end while
26: end if
    
```

VI. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O modelo de sistema apresentado na Seção II foi adotado para todas as simulações. Os parâmetros estão alinhados com a arquitetura do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) LTE [13], [14]. Considera-se uma célula hexagonal de 1 km de raio com uma antena tri-setorizada. O sistema dispõe de 50 RBs, consistindo de 12 subportadoras cada. A frequência central de 2 GHz e uma largura de banda de 10 MHz são adotadas. Os efeitos de propagação do canal incluem sombreamento log-normal e perda de percurso média variante com a distância. Adota-se um modelo de antena 3D, [15], com um ângulo de inclinação de 8° a fim de mitigar a interferência inter-celular. A Tabela I apresenta os principais parâmetros adotados.

A função de MOS, $\phi(\cdot)$, adotada para as simulações é apresentada em (11) e está proposta em [17].

TABELA I: Parâmetros de Simulação.

| Parâmetro | Valor |
|--|--------------------------------------|
| Potência de transmissão da eNB (P_t) | 43 dBm [14] |
| Padrão de radiação da antena | Tri-setorizada [14] |
| Raio da célula | 1 km |
| Velocidade do UE | 3 km/h [13] |
| Frequência da portadora | 2 GHz [13] |
| Largura de banda | 10 MHz [14] |
| Largura da subportadora | 15 kHz |
| Número de RBs (K) | 50 |
| Número de subportadoras por RB | 12 |
| Perda de percurso ^a | $128.1 + 37.6 \log_{10}(d)$ [13] |
| Ganho da antena ^b | $G_h(\theta_h) + G_v(\theta_v)$ [15] |
| Ângulo de inclinação | 8 graus |
| Desvio padrão do sombreamento log-normal | 8 dB [13] |
| Desvanecimento de pequena escala | IID |
| Potência do ruído por subportadora | -123.24 dBm |
| Figura de ruído | 9 dB |
| Adaptação de enlace | Curvas de enlace [16] |
| Modelo de tráfego | Full buffer |
| Intervalo de Tempo de Transmissão (TTI) | 1 ms |
| Número de realizações | 1000 |

^a d é a distância entre a eNB e o UE em km.

^b θ_h e θ_v são os ângulos horizontal e vertical relativos à eNB.

$$\phi(R_u) = 5 - \frac{578}{1 + \left(\frac{R_u + 541.1}{45.98}\right)^2} \quad (11)$$

em que R_u é a taxa total de transmissão UE u .

As simulações foram divididas em dois casos. No primeiro, 30 UEs pertenciam ao mesmo plano, enquanto no segundo, os 30 UEs foram divididos em dois planos (A e B), onde o plano A possuía 10 UEs e o B, 20 UEs. Para ambos, analisou-se o impacto da variação da MOS alvo e do fator de satisfação α .

No primeiro caso, inicialmente fixou-se $\alpha = 1$ e fez-se variar o valor da MOS alvo. Em seguida, fixou-se a MOS alvo em 4.3 e variou-se o valor de α .

Analogamente, no segundo caso, variou-se a MOS alvo fixando-se $\alpha = 1$ para o plano A e $\alpha = 0.9$ para B. Em seguida, variou-se α , com o mesmo valor para A e B, e fixando MOS alvo igual a 4.3 para A e 4 para B. O plano A consiste, por exemplo, em um plano prioritário formado por usuários que pagam mais pelo uso do sistema.

Adotou-se o percentual de falha como métrica de avaliação. Ele é definido como o percentual de vezes em que o sistema não conseguiu satisfazer a quantidade mínima de usuários satisfeitos requerida por pelo menos um dos planos. Em todos os casos comparou-se o desempenho da solução proposta com o da ótima, Seção IV, obtida com o *ILOG CPLEX solver*.

O estudo do impacto da MOS alvo no percentual de falha é ilustrado na Fig. 2. Ela apresenta os resultados para os dois casos analisados: curvas com losangos representam o caso em que todos os usuários pertencem ao mesmo plano, e curvas com asteriscos representam o caso em que os usuários estão divididos em dois planos. As curvas tracejadas representam os resultados obtidos pela solução proposta na Seção V, enquanto as curvas sólidas representam os resultados obtidos pela solução ótima, Seção IV.

Analisando inicialmente o caso em que todos os usuários pertencem ao mesmo plano, tem-se que para valores maiores de MOS alvo tanto a solução proposta quanto a solução ótima possuem percentuais de falha considerados altos. Isso

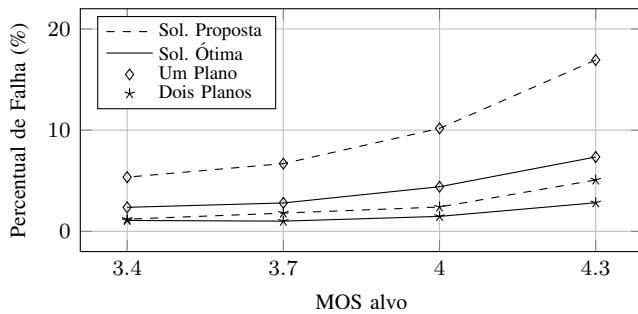


Fig. 2: Impacto da MOS alvo no percentual de falha.

ocorre porque para obter valores altos de MOS, os usuários precisam de mais RBs sendo alocados para eles, porém, sendo os recursos limitados, é mais difícil que todos obtenham a quantidade necessária para ficarem satisfeitos. Uma primeira solução para esta situação é reduzir a MOS alvo. Repare que no caso de um único plano, a redução da MOS alvo implica considerável redução do percentual de falha. Outra solução é a divisão dos usuários em planos com fator de satisfação diferentes. Para o caso de dois planos, tem-se resultados ainda menores do percentual de falha, e neste caso a heurística proposta apresenta performance próxima à da solução ótima.

Realizou-se também o estudo do impacto do fator de satisfação no percentual de falha, Fig. 3. Assim como na Fig. 2, as curvas tracejadas e sólidas representam os resultados das soluções proposta e ótima, respectivamente. As curvas com losangos representam o caso de um único plano e as curvas com asteriscos, o de dois planos.

Como já visto na Fig. 2, satisfazer 100% dos usuários com MOS 4.3 no cenário em estudo é difícil devido à quantidade limitada de recursos. A variação do fator de satisfação apresenta-se como outra opção para contornar este problema. Na Fig. 3, observa-se que a redução do fator de satisfação de 100% para 90%, implica a redução do percentual de falhas para valores próximos a 0%. Constata-se que neste caso, a divisão dos UEs em planos mostra-se útil apenas para o caso em que o fator de satisfação é igual a 100%, nos demais, os resultados obtidos com um ou dois planos são parecidos.

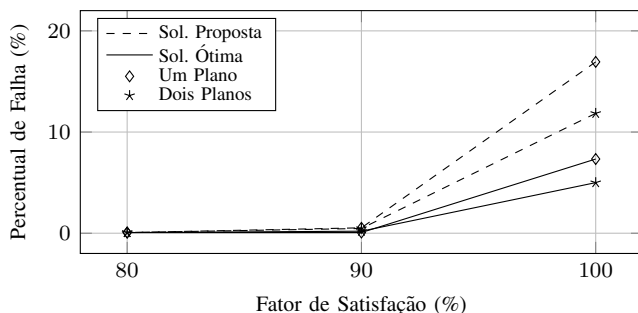


Fig. 3: Impacto do fator de satisfação no percentual de falha.

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposto um método de alocação de recursos para maximizar a mínima MOS de um sistema de telecomunicações sem fio. Considerou-se que os usuários são divididos em planos de serviços e cada plano tem uma MOS alvo e uma porcentagem mínima de usuários a serem satisfeitos, chamada fator de satisfação.

Os resultados apresentados mostraram que para sistemas com um único serviço, a redução da MOS alvo ou do fator de satisfação são alternativas para a redução na porcentagem de falhas em sistemas restritos em recursos. Outra alternativa constatada é a divisão dos usuários em planos com fator de satisfação diferente. Neste caso a solução proposta obteve desempenho próximo ao da ótima.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio técnico-financeiro da *Ericsson Research, Wireless Access Network Department*, Suécia e do *Ericsson Innovation Center*, Brasil, com relação ao Contrato de Coperação Técnica EDB/UFC.40. Victor F. Monteiro agradece à FUNCAP pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, May 2014.
- [2] ITU, "Vocabulary for performance and quality of service. Amendment 2: New definitions for inclusion in Recommendation ITU-T P.10/G.100," International Telecommunication Union, Tech. Rep. ITU-T P.10/G.100, July 2008.
- [3] F. Chen, X. Qin, and G. Wei, "QoE Optimized Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems," *Przeglad Elektrochniczny (Electrical Review)*, vol. 2012, no. 7b, pp. 328–331, July 2012.
- [4] P. Tang, P. Wang, N. Wang, and V. N. Ngoc, "QoE-Based Resource Allocation Algorithm for Multi-Applications in Downlink LTE Systems," *2014 International Conference on Computer, Communications and Information Technology (CCIT 2014)*, pp. 88–93, January 2014.
- [5] C. Sacchi, F. Granelli, and C. Schlegel, "A QoE-Oriented Strategy for OFDMA Radio Resource Allocation Based on Min-MOS Maximization," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 5, pp. 494–496, May 2011.
- [6] Z. Fei, C. Xing, and N. Li, "QoE-driven resource allocation for mobile IP services in wireless network," *Science China Information Sciences*, pp. 1–10, May 2014.
- [7] H. W. Kuhn, "The hungarian method for the assignment problem," *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 2, pp. 83–97, 1955.
- [8] A. Furuskär, "Radio Resource Sharing and Bearer Service Allocation for Multi-Bearer Service, Multi-Access Wireless Networks," Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Radio Communication Systems, Apr. 2003.
- [9] F. 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 Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 3, pp. 1318–1332, Mar. 2012.
- [10] F. R. M. Lima, T. F. Maciel, W. da Cruz Freitas Jr, and F. R. P. Cavalcanti, "Improved Spectral Efficiency with Acceptable Service Provision in Multi-User MIMO Scenarios," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 6, pp. 2697–2711, Jul. 2014.
- [11] G. Nemhauser and L. Wolsey, *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley & Sons, 1999.
- [12] T. M. Apostol, *One-Variable Calculus with an Introduction to Linear Algebra*, 2nd ed. Wiley, 1991.
- [13] 3GPP, "Physical layer aspects for evolved universal terrestrial radio access (UTRA)," Third Generation Partnership Project, TR 25.814 V7.1.0, Sep. 2006.
- [14] —, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); further advancements for E-UTRA physical layer aspects," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TR 36.814, Mar. 2010.
- [15] F. Gunnarsson, M. Johansson, A. Furuskär, M. Lundevall, A. Simonsson, C. Tildestav, and M. Blomgren, "Downtilted Base Station Antennas - A Simulation Model Proposal and Impact on HSPA and LTE Performance," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, September 2008, pp. 1–5.
- [16] C. Mehlhüner, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating the long term evolution physical layer," in *Proc. of the European Signal Processing Conf.*, Glasgow, Scotland, Aug. 2009.
- [17] J. Poncela, G. Gomez, A. Hierrezuelo, F. Lopez-Martinez, and M. Aamir, "Quality Assessment in 3G/4G Wireless Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 76, no. 3, pp. 363–377, 2014.