

Solução de Baixa Complexidade para Otimização de Recursos Energéticos em Sistemas SC-FDMA

Iran M. B. Junior*, Leonardo Paiva*, F. Rafael M. Lima*[†], Tarcisio F. Maciel[†] e F. Rodrigo P. Cavalcanti[†]

Resumo—Neste trabalho estudamos o problema de minimização da potência total transmitida de um sistema celular multisserviços sujeito a restrições que assegurem um percentual mínimo de usuários satisfeitos em sistemas SC-FDMA (do inglês, *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) tal qual empregado pelo sistema LTE (do inglês, *Long Term Evolution*). Motivado pela alta complexidade computacional para obter a solução ótima deste problema, apresentamos uma solução subótima de baixa complexidade computacional. Os resultados obtidos através de simulações computacionais mostram que a solução proposta apresenta resultados satisfatórios tanto quanto a taxa de *outage* como em eficiência energética.

Palavras-Chave—Alocação de Recursos de Rádio, Eficiência Energética e Qualidade de Serviço.

Abstract—In this work we study the problem of total transmit data rate minimization in a multiservice cellular system subject to constraints on the minimum number of satisfied users per service in SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) such as in LTE (Long Term Evolution) system. Motivated by the high computational complexity to obtain the optimal solution, we propose a low computational complexity suboptimal solution. The results obtained through computational simulations show that the proposed solution presents satisfactory results regarding both outage rate and energy efficiency.

Keywords—Radio Resource Allocation, Energy Efficiency and Quality of Service.

I. INTRODUÇÃO

Com a adoção em massa de dispositivos de comunicação cada vez mais rápidos e menores, a demanda pelo uso dos recursos espectrais e energéticos em sistemas de comunicações sem fio tem se tornado cada vez mais importante. Nesse sentido, destacamos o RRA (do inglês, *Radio Resource Allocation*) como fundamental para enfrentar tal demanda, visto que os algoritmos de RRA são responsáveis por gerenciar os recursos do sistema, tais como a potência de transmissão e o espectro de frequência, que em geral são limitados.

No SC-FDMA (do inglês, *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*), tal qual empregado no enlace reverso do sistema LTE (do inglês, *Long Term Evolution*), os blocos de recurso alocados na frequência à um dado terminal devem ser contíguos (restrição de adjacência), além disso, a potência de transmissão são as mesmas nestes blocos de forma a usufruir de uma baixa PAPR (do inglês, *Peak-to-Average Power ratio*). Especificamente, essa restrição de adjacência torna os problemas de RRA NP-difíceis [1].

RRA para sistemas SC-FDMA têm sido bastante estudado nos últimos anos. Em [2] e [3], a maximização da taxa de

dados é estudada com restrições de QoS sem considerar porém um uso mais eficiente dos recursos energéticos. Estudos envolvendo eficiência energética em sistemas SC-FDMA foram realizados por outros trabalhos [4][5]. Em [4] um problema de otimização binária inteiro é apresentado com o objetivo de minimizar a potência total transmitida em sistemas SC-FDMA, apesar de considerar a restrição de adjacência, os autores desconsideraram os requisitos de QoS (do inglês, *Quality of Service*). Em [5] os autores consideraram os efeitos de QoS sobre a eficiência energética com o objetivo de minimizar o consumo de energia por bit transmitido em sistemas SC-FDMA. Embora as restrições de adjacência e os aspectos de QoS tenham sido considerados no trabalho, seus autores não utilizaram alocação de potência adaptativa e ignoraram as restrições de satisfação mínima de QoS por serviço.

Em [6] é proposto um problema que tem por objetivo minimizar a potência total transmitida utilizando alocação de potência adaptativa em um sistema SC-FDMA sujeito aos requisitos de satisfação mínima em um cenário multisserviço. Neste mesmo artigo, os autores propõem uma solução ótima obtida através da resolução de um problema de otimização do tipo ILP (do inglês, *Integer Linear Programming*) que, apesar de ser mais eficiente que a enumeração completa ou força bruta, apresenta uma complexidade computacional de pior caso exponencial em termos das variáveis do problema.

Diante do que foi exposto, este artigo tem como principais contribuições (1) a proposta de uma solução subótima de baixa complexidade para o problema de otimização formulado em [6] e (2) análise de desempenho da solução aqui proposta com a solução apresentada em [6], considerando como cenário de estudo de caso o enlace reverso do sistema LTE (do inglês, *Long Term Evolution*).

II. MODELAGEM DO SISTEMA

Assumimos que a alocação de recursos ocorre em um setor da célula de um sistema celular, onde há uma ERB (Estação Rádio Base) servindo os TMs (Terminais Móveis) conectados. Consideramos o uso da tecnologia SC-FDMA e definimos um RB (do inglês, *Resource Block*) como o mínimo recurso a ser alocado, o qual é composto por uma ou mais subportadoras OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) adjacentes e um número de símbolos OFDM consecutivos, que representam um intervalo de tempo de transmissão ou TTI (do inglês, *Transmission Time Interval*).

Consideramos que a interferência causada pelo reuso da mesma banda de frequência em outros setores, denominada interferência intercelular, é modelada por uma variável Gaussiana e que a mesma está contida no ruído térmico da expressão da SNR [2]. Assumimos que existem J TMs candidatos a receberem recursos do sistema em termos de RBs.

*Engenharia de Computação, Universidade Federal do Ceará (UFC), Sobral-CE, Brasil. [†]Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem fio (GTTEL), Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Fortaleza-CE, Brasil. Emails: {iranjunior,leopaiva.ec}@alu.ufc.br, {rafaelm,maciel,rodrigo}@gtel.ufc.br

Consideram que há um total de N RBs e que \mathcal{J} e \mathcal{N} consistem no conjunto de TMs e RBs, respectivamente.

Assumimos que diferentes serviços são ofertados aos TMs, tais como *web browsing*, *download/upload* de arquivos ou VoIP (do inglês, *Voice over Internet Protocol*). Consideramos que existe um total de S serviços no sistema e S representa o conjunto de todos os serviços disponibilizados pela operadora móvel. Consideramos que existem J_s TMs utilizando o serviço $s \in \mathcal{S}$, sendo \mathcal{J}_s o conjunto de TMs que utilizam o serviço s .

Consideramos que os coeficientes do canal de rádio móvel se mantêm praticamente constantes durante um TTI e, que no TTI atual, o TM j possui um requisito de taxa igual a t_j . O parâmetro k_s representa o número mínimo de TMs que devem ser satisfeitos com seu QoS para cada serviço, ou seja, que devem obter uma taxa maior ou igual a t_j . Esse é um parâmetro comum estabelecido por operadoras a fim de priorizar os diferentes serviços oferecidos, principalmente em situações de alta carga [2].

Com relação ao assinalamento de RBs o sistema SC-FDMA impõe duas restrições. A primeira, denominada por restrição de exclusividade, garante que um mesmo RB não pode ser reutilizado dentro de uma célula. A segunda consiste na restrição de adjacência, a qual determina que os RBs atribuídos a um dado TM devem ser adjacentes no domínio da frequência. Diante disso, denominamos padrão de assinalamento como um conjunto de RBs contíguos. Pode ser mostrado que o total de padrões de assinalamento para N RBs é dado por $P = N^2/2 + N/2 + 1$ [7]. Como exemplo, considerando $N = 4$, temos $P = 11$ e os possíveis grupos de RBs ou padrões de assinalamentos são $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$, $\{4\}$, $\{1, 2\}$, $\{2, 3\}$, $\{3, 4\}$, $\{1, 2, 3\}$, $\{2, 3, 4\}$, $\{1, 2, 3, 4\}$ e $\{\emptyset\}$. Assumimos \mathcal{P} como o conjunto com todos os índices de todos os padrões de assinalamentos de recursos possíveis. Dessa forma, ao invés de modelarmos a atribuição de um RB específico a um TM, consideramos neste trabalho o assinalamento de um padrão de recursos a um TM. Assim, podemos modelar a restrição de adjacência por uma matriz binária \mathbf{A} com elementos $a_{n,p}$, para $n \in \mathcal{N}$ e $p \in \mathcal{P}$, que assume 1 se o RB n pertence ao padrão de assinalamento p e 0 caso contrário.

Assumimos neste artigo o uso de níveis discretos de taxas de transmissão ou MCS (do inglês, *Modulation and Coding Scheme*). Portanto, consideramos a existência de M níveis de MCSs contidos no conjunto $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$. Para que um determinado TM utilize o nível de MCS m , e portanto transmita com taxa de dados r_m , é necessário que a SNR experimentada seja igual a γ^m em que $\gamma^m < \gamma^{m+1}$ e $r_m < r_{m+1}$. Assumimos que a máxima potência disponível no TM j para transmissão é P_{T_j} .

A SNR experimentada na ERB quando o TM j transmite na z -ésima subportadora do RB n , $\gamma_{j,z,n}$, é dada por

$$\gamma_{j,z,n} = ((p_{j,p,m}/(c \cdot N_p)) \cdot \alpha_j \cdot \|h_{j,z,n}\|^2) / \sigma^2 = p_{j,p,m} \cdot \bar{g}_{j,z,n}, \quad (1)$$

em que $p_{j,p,m}$ é a potência necessária para o TM j utilizando o padrão de assinalamento p atingir o nível de MCS m , c é o número de subportadoras em um RB, N_p é o número de RBs do padrão de assinalamento p , α_j representa o efeito conjunto da perda de percurso e sombreamento do enlace entre o TM

j e a ERB, σ^2 é a potência do ruído no receptor na largura de banda de uma subportadora, $h_{j,z,n}$ é a resposta complexa em frequência do canal entre a ERB e o TM j sobre a z -ésima subportadora do RB n e, finalmente, $\bar{g}_{j,z,n}$ é o ganho de canal total do enlace entre a ERB e o TM j na z -ésima subportadora do RB n normalizado pela potência do ruído térmico. Definimos $\|\cdot\|$ como o operador que retorna o valor absoluto do seu argumento.

Apesar dos ganhos relacionados a PAPR, sinais SC-FDMA apresentam valores consideráveis de interferência intersimbólica nas ERB. Assim, o sistema SC-FDMA necessita de equalizador no domínio da frequência na ERB para combatê-la. Para este trabalho, utilizamos o equalizador MMSE (do inglês, *Minimum Mean Square Error*), e de acordo com [8], a SNR efetiva experimentada pelo receptor quando os dados são transmitidos pelo TM j utilizando o padrão de assinalamento p , $\gamma_{j,p}^{\text{MMSE}}$, é dada por

$$\gamma_{j,p}^{\text{MMSE}} = \left(\left(\frac{1}{c \cdot |\mathcal{N}_p|} \sum_{n \in \mathcal{N}_p} \sum_{z=1}^c \frac{\gamma_{j,z,n}}{\gamma_{j,z,n} + 1} \right)^{-1} - 1 \right)^{-1}, \quad (2)$$

em que \mathcal{N}_p é o conjunto de RBs que compõem o padrão de assinalamento p e $|\cdot|$ denota a cardinalidade de um conjunto.

Assuma $f(\cdot)$ como a função responsável pelo mapeamento discreto entre SNR e taxa de dados regido pelos esquemas de MCS. A taxa transmitida quando o TM j utilizando o padrão de assinalamento p atinge o nível de MCS m , é dada por $r_{j,p,m} = f(\gamma_{j,p}^{\text{MMSE}})$. Substituindo a equação (1) em (2), podemos obter os valores de $p_{j,p,m}$ através da solução numérica da equação resultante de $\gamma_{j,p}^{\text{MMSE}} = \gamma^m$.

III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste artigo revisitamos o problema proposto em [6], cujo o objetivo consiste em minimizar a potência total transmitida no enlace reverso de um sistema utilizando SC-FDMA, empregando as restrições de satisfação mínima de usuários por serviço em um dado TTI.

Assim, assumindo \mathbf{X} como uma matriz binária com elementos $x_{j,p,m}$ que assume 1 se o p -ésimo padrão de assinalamento é atribuído ao TM j e este transmite com o m -ésimo nível de MCS e 0 caso contrário, o problema é apresentado a seguir

$$\min_{\mathbf{X}} \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{j,p,m} \cdot p_{j,p,m} \right), \quad (3a)$$

sujeito a

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} a_{n,p} \cdot x_{j,p,m} = 1, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (3b)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{j,p,m} = 1, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (3c)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} p_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m} \leq P_{T_j}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (3d)$$

$$x_{j,p,m} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad \forall p \in \mathcal{P} \text{ e } \forall m \in \mathcal{M}, \quad (3e)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_s} u \left(\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{m \in \mathcal{M}} r_{j,p,m} \cdot x_{j,p,m}, t_j \right) \geq k_s, \quad \forall s \in \mathcal{S}, \quad (3f)$$

em que $u(x, b)$ é a função degrau em b que assume o valor 1 se $x \geq b$ e 0 caso contrário. A função objetivo em (3a) consiste na potência total transmitida pelos TMs. As restrições (3b) e (3e) asseguram que os RBs não serão reutilizados dentro da célula. As restrições (3c) e (3e) garantem que apenas um padrão de assinalamento seja adotado por cada TM. Além disso, a restrição (3d) assegura que a potência usada por cada TM j não exceda a máxima disponível. Por fim, a restrição (3f) estabelece que um número mínimo de TMs, k_s , deve ser satisfeito para cada serviço.

De acordo com o trabalho [6] o problema (3) pode ser convertido em um problema ILP através da adição de novas variáveis de otimização e restrições. Problemas ILP podem ser resolvidos por algoritmos baseados no método BB (do inglês, *Branch and Bound*) [9]. Todavia, a complexidades desses métodos aumentam exponencialmente com o números de restrições e variáveis.

IV. SOLUÇÃO DE BAIXA COMPLEXIDADE

Motivados pela alta complexidade computacional para obter a solução ótima do problema 3, apresentamos nesta seção uma solução de baixa complexidade para o mesmo. A solução é dividida em duas partes: **Assinalamento de RBs** e **Alocação de Potência**. Na parte de assinalamento, a principal ideia é atribuir os RBs aos terminais com melhores canais de forma a atender o número mínimo de TMs por serviço e a restrição de adjacência. Após o assinalamento ser feito, a parte de alocação de potência consiste basicamente em encontrar a menor potência necessária para o TM atender os requisitos de taxas do sistema. O fluxograma da solução proposta é apresentado na Figura 1 e descrita detalhadamente a seguir.

Como a ideia principal do problema é minimizar a potência total transmitida, partimos do princípio que quanto menor o número de usuários transmitido menor será a potência total. Portanto, no passo (1), selecionamos para cada serviço s os k_s usuários com melhores ganhos de canal médio. No passo (2) definimos os conjuntos auxiliares de usuários e RBs representados por \mathcal{J}^A e \mathcal{N}^A , respectivamente. O conjunto \mathcal{J}^A é inicializado com os TMs selecionados no passo (1) enquanto que \mathcal{N}^A corresponde ao conjunto de todos RBs.

No passo (3) encontramos o par (TM, RB) com maior ganho de canal considerando os conjuntos do passo (2). Verificamos então se o RB foi pré-alocado a algum TM (passo (4)). Em caso negativo (passo (7)), assinalamos o RB ao TM encontrado no passo (3), removemos o TM do conjunto de TM disponíveis e por fim tornamos o RB indisponível para o TM (passo (8)). Já em caso positivo no passo (4), verificamos se o canal do TM assinalado no RB é maior que o do TM encontrado no passo (3). Se isso for verdade, no passo (6) substituímos o TM pré-alocado pelo TM encontrado no passo (3) e executamos o passo (7) e (8) descritos anteriormente. Essa substituição é importante, pois garante preferência aos TMs de pior ganho médio na escolha de seus melhores RBs permitindo uma distribuição de recursos mais equilibrada. Por fim, verificamos se ainda existem TMs disponíveis. Em caso positivo retornamos ao passo (3) e realizamos todo o processo descrito novamente. Ao final desse processo todos os TMs disponíveis no passo (2) receberão um único RB.

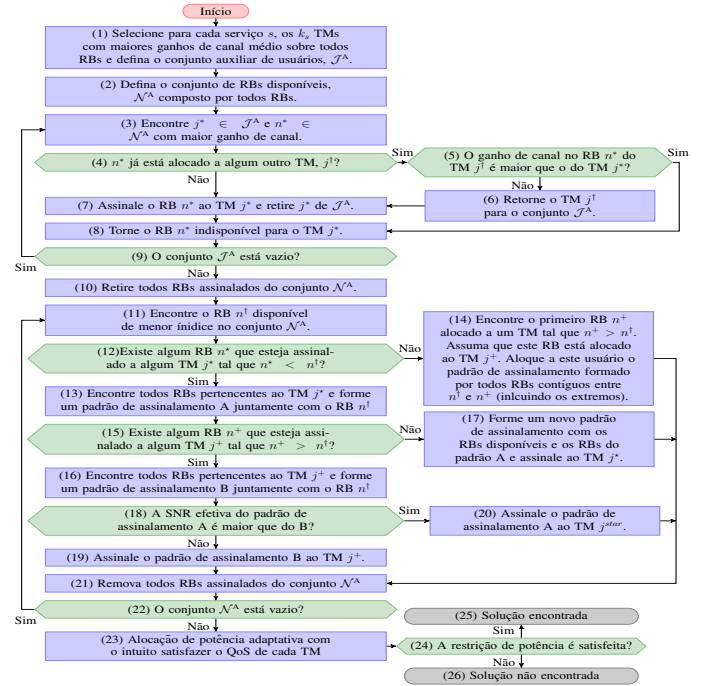


Fig. 1. Fluxograma da solução proposta.

No passo (10) removemos todos os RBs assinalados até o momento do conjunto de RBs disponíveis. Depois disso, considerando que os RBs estejam ordenados, no passo (11) encontramos o primeiro RB disponível no conjunto \mathcal{N}^A . No passo (12) verificamos se existe RB à esquerda do RB atual (denominamos como RB atual o RB encontrado no passo (11)). Em caso negativo, encontramos o RB alocado à direita mais próximo, verificamos qual TM está utilizando o RB encontrado e assinalamos o padrão de assinalamento com os RBs contidos entre o RB atual e o RB assinalado (passo (14)) e removemos os RBs assinalados de \mathcal{N}^A no passo (21). Já em caso positivo no passo (12), encontramos os RBs associados ao TM do RB à esquerda e formamos um padrão de assinalamento A com o RB atual. Verificamos então se existe algum RB alocado à direita do RB atual. Em caso negativo, formamos um novo padrão de assinalamento com os RBs do padrão A e os RBs disponíveis, assinalamos o padrão A ao seu respectivo TM no passo (20), caso contrário, os RBs do padrão B são assinalados ao TM deste padrão no passo (19) e o passo (21) é executado. Por fim, no passo (22) verificamos se ainda existem RBs disponíveis, se a resposta for sim, retornamos ao passo (11) e realizamos todo o processo novamente, caso contrário, terminamos a parte de assinalamento.

A parte de alocação de potência consiste em encontrar a menor potência necessária para atingir o nível de MCS que

satisfaça a taxa requisitada de cada TM (passo (23)) e verificar se a restrição de potência é satisfeita (passo (24)). Em caso positivo, o algoritmo encontra uma solução para o problema (passo (25)), caso contrário, não é possível encontrar uma solução (passo (26)).

Conforme foi visto anteriormente, o algoritmo proposto pode apresentar eventos de *outage*, o que significa que não foi encontrada uma solução que satisfaça as restrições do problema. A razão para isso pode ser (1) o fato da solução proposta ser subótima ou (2) a inviabilidade do problema em si, ou seja, não há solução viável. No último caso, mesmo a solução ótima obtida pelo método descrito na seção III não é capaz de encontrar uma solução viável. Tratar estes casos de *outage* são perspectivas deste estudo.

V. ESTUDO DE CASO - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PARA O ENLACE REVERSO DO SISTEMA LTE

Esta seção é dedicada a análise de desempenho através de simulações computacionais da solução proposta para o problema apresentado neste artigo. Na Seção V-A apresentamos em detalhes as principais hipóteses, modelos e parâmetros usados nas simulações. Na Seção V-B apresentamos e discutimos os resultados obtidos.

A. Considerações para Simulação

Os principais aspectos de um sistema SC-FDMA apresentados na Seção II foram considerados no simulador computacional. Assume-se que um RB consiste de 12 subportadoras adjacentes no domínio da frequência e tem 1 ms de comprimento no domínio do tempo. O estado do canal é modelado pelos mecanismos de propagação mais importantes: modelo de perda de percurso dependente da distância dado por $P_L(dB) = 35.3 + 36.7 \cdot \log_{10}(d)$, componente de sombreamento log-normal com desvio padrão de 8 dB e componente de desvanecimento rápido com distribuição *Rayleigh* [10]. Assumimos que a adaptação de enlace é realizada com base no relatório de 15 indicadores de qualidade de canal discretos ou CQIs (do inglês, *Channel Quality Indicators*) utilizados pelo sistema LTE [11]. Os limiares de SNRs para a comutação dos níveis de MCS foram obtidos por simulações de nível de enlace de [12]. A potência total disponível nos terminais é de 24 dBm. A metodologia de simulação consiste em aplicar a solução proposta em diferentes realizações estatísticas (ou *snapshots*), tomando amostras diferentes das variáveis aleatórias que modelam o posicionamento dos TMs e o estado do canal.

Para avaliar o desempenho da solução proposta para o problema aqui estudado consideramos um cenário em que o sistema disponibiliza dois serviços, ou seja $S = 2$, o qual tem um total de oito TMs ativos, $J = 8$, distribuídos igualmente entre os serviços, $J_1 = 4$ e $J_2 = 4$. Assumimos que quatro TMs devem ser satisfeitos para o serviço 1, $k_1 = 4$, e três TMs satisfeitos para o serviço 2, $k_2 = 3$. Consideramos que todos os usuários possuem o mesmo requisito de taxa, t_j . A carga no sistema é emulada através da variação de t_j de 40 kbps a 200 kbps. Além disso, consideramos um total de quinze RBs a serem assinalados aos TMs, $N = 15$.

Os algoritmos simulados nesse trabalho são a solução proposta por este trabalho na Seção IV, a solução ótima do problema apresentado na seção III proposto em [6] e a solução do problema CRM (do inglês, *Constrained Rate Maximization*) apresentado em [2] que consiste no problema de maximização da taxa de dados com a restrição de QoS presente em (3f), não utilizando, porém, alocação de potência adaptativa. Estas três soluções estão identificadas nas figuras a seguir por “proposta”, “PM OPT” e “CRM OPT”, respectivamente.

Utilizamos o *IBM ILOG CPLEX Optimizer* [13] para resolver os problemas de otimização linear inteiro. A escolha dos valores para J , P , M e S é limitada pela complexidade computacional para obter as soluções ótimas.

Neste trabalho as principais métricas de desempenho utilizadas para avaliar os algoritmos são o percentual de potência utilizada que consiste na razão entre a soma das potências utilizadas por todos terminais móveis e a soma das potências máximas disponíveis ($J \cdot P_{T_j}$); a taxa de *outage* definida como a relação entre o número de *snapshots* com eventos de *outage* e o número total de *snapshots*. Um *outage* acontece quando uma solução específica não consegue encontrar uma solução viável que cumpra as restrições do problema (3); e finalmente a taxa de dados média que é a média ao longo de vários *snapshots* da taxa total transmitida por todos TMs.

B. Resultados

Na Figura 2(a) temos a taxa total de dados média versus a taxa de dados requisitada por cada terminal para as soluções PM OPT, CRM OPT e para a solução proposta. Inicialmente, podemos ver que a taxa total de dados da solução PM OPT e da solução proposta aumentam à medida que a taxa de dados requisitada é incrementada, visto que ambas soluções buscam apenas satisfazer exatamente a taxa requisitada de cada usuário de forma a economizar a potência total transmitida. Ainda de acordo com a Figura 2(a), pode-se observar que a solução CRM OPT apresenta as maiores taxas de dados. Este resultado deve-se ao fato desse algoritmo ter por objetivo a maximização da taxa total transmitida no sistema.

Na Figura 2(b) temos a taxa de *outage* versus a taxa de dados requisitada por todos os usuários para as mesmas soluções presentes na Figura 2(a). Primeiramente, podemos observar que a taxa de *outage* aumenta à medida que a taxa de dados requisitada é incrementada, uma vez que o aumento da taxa requisitada torna a satisfação dos usuários mais difícil. Note que a taxa de *outage* das soluções CRM OPT e PM OPT são iguais para todas as taxas de dados requisitadas, uma vez que ambas são obtidas através da resolução de problemas ILPs com as mesmas restrições. Por fim, podemos observar que a solução proposta consegue manter uma diferença de taxa de *outage* relativamente pequena comparada as demais soluções para cargas moderadas. A taxa de *outage* da solução proposta quando as soluções CRM OPT e PM OPT apresentam uma taxa de *outage* de 10% é de 14%, resultando em uma diferença em taxa de *outage* de apenas 4%.

Na Figura 2(c) apresentamos o percentual de potência utilizada versus a taxa de dados requisitada por cada TM das soluções PM OPT, CRM OPT e da solução proposta.

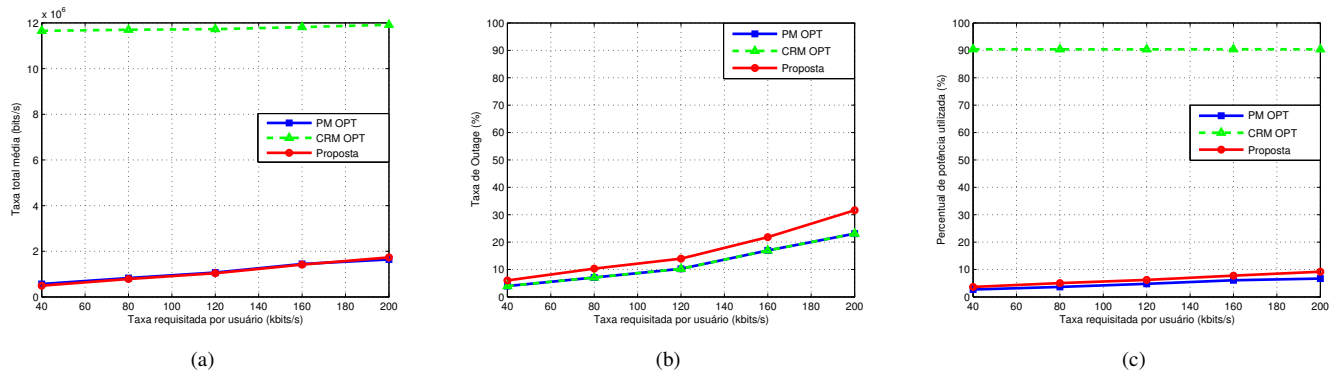


Fig. 2. (a) Taxa de dados média para as soluções PM OPT, CRM OPT e proposta. (b) Taxa de *outage* para as soluções PM OPT, CRM OPT e proposta. (c) Percentual de potência utilizada pelas soluções PM OPT, CRM OPT e proposta.

Primeiramente, observamos que o percentual de potência utilizada aumenta conforme incrementamos a taxa de dados requisitadas pelas mesmas razões apresentadas anteriormente. A solução CRM OPT em geral permite que seus terminais utilizem a máxima potência de transmissão, P_{T_s} , além disso, comparando o desempenho relativo dos algoritmos na Figura 2(c), destacamos a grande economia em termos de potência alcançada pela solução proposta e PM OPT comparada a solução CRM OPT. Considerando uma taxa de dados requisitada de 40 kbps, verificamos que a solução CRM OPT apresenta um consumo de aproximadamente 90% da potência total disponível, enquanto que a solução proposta e a solução PM OPT apresentam um consumo de aproximadamente 4% e 3%, respectivamente.

Por fim, analisando conjuntamente as Figuras 2(a), 2(b) e 2(c), podemos concluir que a solução proposta neste artigo, assim como a solução PM OPT, apresenta ganhos em termos energéticos em relação a solução CRM OPT satisfazendo aproximadamente o mesmo requisito de QoS, além disso, quando comparada a solução PM OPT, é possível concluir que a solução proposta apresenta uma perda de desempenho bastante reduzida. Sabendo que as soluções PM OPT e CRM OPT são obtidas através de algoritmos de complexidade computacional exponencial e que a solução proposta possui uma complexidade computacional polinomial¹, $\mathcal{O}(N^2 + \sum_{s \in \mathcal{S}} (k_s)^2)$, podemos concluir que a solução proposta possui um bom compromisso entre complexidade e desempenho.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, estudamos o problema de minimização da potência total transmitida sujeito as restrições de satisfação de QoS com alocação de potência adaptativa no enlace reverso do sistema LTE empregando SC-FDMA. O sistema SC-FDMA exige que os RBs atribuídos a um dado usuário sejam adjacentes uns aos outros a fim de assegurar uma baixa PAPR. Como contribuição deste trabalho, tivemos a proposta de uma solução subótima de baixa complexidade. Através de simulações computacionais, vimos que a solução proposta apresenta resultados expressivos em termos de taxa de *outage* e eficiência energética quando comparada a solução ótima do

problema. Além disso, ressaltamos a baixa complexidade apresentada pela solução proposta comparada às demais soluções.

AGRADECIMENTOS

O estudante Iran M. B. Júnior agradece a Coordenação de Acompanhamento de Discente (CAD) da UFC pelo suporte financeiro concedido por meio do Programa de Educação Tutorial (PET) e F. Rafael M. Lima agradece a Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa (FUNCAP) pelo apoio financeiro em forma de bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Yang, F. Ren, C. Lin, and J. Zhang, "Frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE uplink," in *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pp. 1–9, IEEE, 2010.
- [2] F. R. M. Lima, T. F. Maciel, and F. R. P. Cavalcanti, "Radio resource allocation in SC-FDMA uplink with resource adjacency constraints," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 31, no. 1, 2016.
- [3] A. B. Rodrigues, F. R. M. Lima, T. F. Maciel, and F. R. P. Cavalcanti, "Alocação de recursos para sistemas SC-FDMA baseado em relaxamento e programação linear." *Simpósio brasileiro de telecomunicações*, 2016.
- [4] A. Ahmad and M. Assaad, "Power efficient resource allocation in uplink SC-FDMA systems," in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*, pp. 1351–1355, IEEE, 2011.
- [5] D. Triantafyllou, K. Kollias, and K. Moessner, "QoS and energy efficient resource allocation in uplink SC-FDMA systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 6, pp. 3033–3045, 2015.
- [6] I. M. B. Junior, F. R. M. Lima, T. F. Maciel, and F. R. P. Cavalcanti, "Otimização de recursos energéticos em sistemas SC-FDMA com garantias de QoS e satisfação." *Simpósio Brasileiro de Rede de Computadores*, 2017.
- [7] I. C. Wong, O. Oteri, and W. McCoy, "Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 5, pp. 2161–2165, 2009.
- [8] 3GPP, "Simulation methodology for EUTRA UL: IFDMA and DFTSpread- OFDMA." *Third Generation Partnership Project*, Tech. Rep. R1 050718, August 2005.
- [9] G. L. Nemhauser and L. A. Wolsey, "Integer programming and combinatorial optimization." *Wiley & Sons*, 1999.
- [10] F. R. P. Cavalcanti, *Resource Allocation and MIMO for 4G and Beyond*. Springer, 2014.
- [11] 3GPP, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures," 2009. *Third Generation Partnership Project*, Tech. Rep. TR 36.213 V8.6.0, Mar. 2009.
- [12] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating the long term evolution physical layer," in *Signal Processing Conference, 2009 17th European*, pp. 1471–1478, IEEE, 2009.
- [13] I. ILOG, "Cplex optimization studio," *URL: http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer*, 2014.

¹Não foi possível colocar a demonstração em virtude da limitação de páginas.