

Alocação de Recursos de Rádio Baseado na Seleção de Padrões de Assinalamento em Sistemas SC-FDMA

Joab Costa R. Lima, Anderson B. Rodrigues, F. Rafael M. Lima, F. Rodrigo P. Cavalcanti e Jéssica P. Rodrigues

Resumo—Dois avanços importantes para as redes de acesso de rádio foram o uso de múltiplo acesso por divisão de frequências com portadora única ou, do inglês, *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) no enlace reverso do sistema *Long Term Evolution* (LTE) e a utilização de Alocação de Recursos de Rádio ou, do inglês, *Radio Resource Allocation* (RRA) para gerenciamento de recursos de rádio. Nesse contexto, este artigo estuda o uso de algoritmos de RRAs em redes celulares de forma a melhorar a eficiência no uso dos recursos de rádio. Estudamos o problema de maximização do somatório das taxas de dados no enlace reverso de um sistema sem fio que emprega SC-FDMA. Sistemas SC-FDMA impõem uma restrição importante na ótica de alocação de recurso: adjacência de blocos de recursos na frequência. Esta restrição torna as soluções complexas do ponto de vista matemático e computacional. Dessa forma, incentivados pela alta complexidade da solução ótima deste problema, que é obtida através de programação inteira, propomos uma redução na complexidade computacional selecionando apenas uma porcentagem do espaço de busca no processo de alocação de recursos, utilizando como base a proposta de [9] que utiliza uma solução alternativa baseada no relaxamento do problema inteiro e aplicação de programação linear (contínua). Através de simulações computacionais, demonstramos que o esquema proposto é satisfatório e possui ganho de complexidade computacional com pouca ou quase nenhuma perda de desempenho.

Palavras-Chave—Alocação de Recursos de Rádio, Otimização, SC-FDMA, LTE.

Abstract—Two important advances in radio access networks were the use of SC-FDMA in the uplink in LTE systems and the use of RRA for radio resource management. In this context, this article studies the use of RRA algorithms in cellular networks. We study the data rate maximization problem in the uplink of SC-FDMA systems. SC-FDMA systems impose an important constraint on the resource allocation process: adjacency of resource blocks in the frequency. This restriction makes the obtention of solutions to this problem a hard task from computational point of view. Motivated by the high computational complexity of the optimal solution of this problem, we propose a reduction in computational complexity by selecting only a percentage of the search space in the process of resource allocation, based on the proposal of [9] that used an alternative solution based on variable

relaxation and use of continuous linear programming. The simulation results show that the proposed scheme is satisfactory and has a computational complexity gain with little or no loss of performance.

Keywords—Radio Resource Allocation, Optimization, SCFDMA, LTE.

I. INTRODUÇÃO

As comunicações móveis vêm exigindo cada vez mais eficiência energética e espectral, além de uma maior capacidade do sistema e novos requisitos de qualidade de serviço, do inglês, *Quality of Service* (QoS) [1]. Com a evolução desses sistemas, novos esforços envolvendo pesquisas de protocolos de comunicação, processamento de sinais, otimização, entre outros, vêm avançando consideravelmente nos últimos anos. Como avanço considerável nas redes de acesso de rádio temos a adoção de sistemas de múltiplo acesso por divisão ortogonal de frequência, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), no enlace direto e múltiplo acesso por divisão na frequência com portadora única, SC-FDMA, no enlace reverso de sistemas LTE.

Alocação de Recursos de Rádio (RRA), destaca-se como outra funcionalidade relevante para melhorar o desempenho das próximas gerações de redes celulares. Algoritmos de RRA são responsáveis pelo gerenciamento de recursos de rádio, tais como intervalos de tempo, canais espaciais e faixas de frequências [2].

Grande parte dos trabalhos da literatura consideram sistemas de comunicações móveis com esquema SC-FDMA para o enlace reverso, devido à diminuição da PAPR, facilitando consequentemente o projeto de amplificadores de potência para os usuários móveis. Em sistemas SC-FDMA, existe uma restrição chamada de contiguidade ou adjacência de recursos, em que os blocos de recursos alocados para cada usuário devem ser contíguos na frequência. Esse requisito torna a solução de problemas de RRA mais difíceis de serem obtidos.

A análise de problemas de RRA no enlace reverso com SC-FDMA é um tema recente. Em [3] os autores realizam um estudo considerando o problema de maximização de taxa no cenário SC-FDMA, contudo, ignoram a existência da restrição de contiguidade de recursos comentada anteriormente. Em [4], os autores consideram o mesmo problema de [3] e assumem a existência da restrição de adjacência de recursos. Além disso, eles assumem que os terminais móveis devem receber o mesmo número de recursos na frequência, o que na prática não ocorre. Em [5], os autores formulam o problema de

Joab Costa Rodrigues Lima - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Sobral-CE, Brasil. Anderson B. Rodrigues, F. Rafael M. Lima e Jéssica P. Rodrigues - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará (UFC), Sobral-CE, Brasil. Anderson B. Rodrigues, F. Rafael M. Lima, e F. Rodrigo P. Cavalcanti - Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem fio (GTEL), Universidade Federal do Ceará, *Campus* do Pici, Fortaleza-CE, Brasil. E-mails: joab.lima@ifce.edu.br, anderson@gtel.ufc.br, rafaelm@gtel.ufc.br, rodrigo@gtel.ufc.br e jessicaprodriues@gmail.com. Francisco Rafael Marques Lima gostaria de agradecer pelo apoio financeiro da FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por meio de bolsa de produtividade em pesquisa.

maximização da soma das taxas ponderadas dos usuários através de um problema binário-inteiro. Diante da complexidade deste problema, os autores de [5] propõem um algoritmo subótimo de menor complexidade computacional. Outros artigos tais como [6], [7] e [8] exploraram o problema de maximização da taxa total em sistemas SC-FDMA e fizeram propostas subótimas, todas baseadas em heurísticas a fim de obter soluções com melhor compromisso entre desempenho e complexidade computacional.

Uma modelagem mais precisa de sistemas SC-FDMA é realizada em [9], em que é abordado o problema da maximização da soma das taxas dos usuários ponderadas por pesos para o enlace reverso que empregam SC-FDMA. Nesse trabalho, uma versão do problema de otimização inteiro é explorada e através de simulações computacionais é possível perceber que a solução proposta fornece a solução ótima do problema original em um grande número de realizações. Para as realizações em que a solução do problema relaxado não é binária, uma solução de arredondamento alternativa é proposta.

Neste trabalho, com o intuito de reduzir a complexidade computacional da solução apresentada por [9], propomos uma estratégia de redução do espaço de soluções do problema através da seleção dos padrões de assinalamento mais promissores dos usuários. Para seleção dos padrões, propomos o uso da razão sinal-ruído efetiva ou, do inglês, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Mostramos através de simulações numéricas que a ideia proposta se aproxima da original, com uma menor complexidade computacional.

II. MODELAGEM DO SISTEMA

Considere o enlace reverso para um sistema de comunicação sem fio multiusuário empregando SC-FDMA. Nesta situação, denominamos como um Bloco de Recurso (BR) um conjunto de subportadoras que compõe o mínimo recurso de rádio a ser alocado. O esquema SC-FDMA impõe duas restrições relacionadas a alocação de BRs no sistema: **exclusividade**, em que no máximo um terminal móvel pode utilizar os mesmos BRs associados a mesma estação rádio base; e a **adjacência**, em que cada terminal móvel pode ter múltiplos BRs, desde que eles sejam adjacentes no domínio da frequência.

Definimos um padrão de assinalamento SC-FDMA como um conjunto de BRs contíguos que podem ser alocados a um dado usuário. Sendo N o número de BRs disponíveis no sistema, o número de possíveis padrões de assinalamento, P , depende de N e é dado por [5] $P = \frac{1}{2}N^2 + \frac{1}{2}N + 1$. Assumimos que o conjunto com os índices de todos os possíveis padrões de assinalamento são dados por $\mathcal{P} = \{1, \dots, P\}$. Definimos $\mathcal{J} = \{1, \dots, J\}$ como o conjunto de terminais móveis servidos por uma dada estação rádio base e $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ como o conjunto de BRs disponíveis. A restrição de adjacência pode ser modelada utilizando uma matriz binária $N \times P$, \mathbf{A} , composta pelos elementos $a_{n,p}$ com $n \in \mathcal{N}$ e $p \in \mathcal{P}$, assumindo valor 1 se o BR n pertencer ao padrão de assinalamento p , e 0 caso contrário. Como um pequeno exemplo, quando $N = 4$ teremos $P = 11$ e a matriz de padrões de alocação de BRs será formada como ilustrada a

seguir:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Seja \mathbf{X} uma matriz de dimensão $J \times P$ definida como a matriz de assinalamento entre os terminais móveis e os padrões de assinalamento. O elemento $x_{j,p}$ consiste em uma variável binária que assume o valor 1 se o padrão de assinalamento $p \in \mathcal{P}$ é assinalado ao terminal $j \in \mathcal{J}$, e 0 caso contrário. Algumas condições devem ser impostas à matriz \mathbf{X} a fim de garantir a exclusividade e adjacência de BRs conforme veremos na seção III a seguir.

Consideramos o modelo de canal no domínio da frequência, em que a variável $h_{j,z,n}$ representa a função de transferência do canal relativo ao enlace entre o terminal j e a estação rádio base servidora, para a z -ésima subportadora do BR n . A SNR experimentada pelo terminal j usando a subportadora z do BR n é dada por $\gamma_{j,z,n} = \frac{(P/(c \cdot N)) \cdot \alpha_j \cdot |h_{j,z,n}|^2}{(\sigma^{sub})^2}$, em que α_j representa a junção dos efeitos de perda de percurso e sombreamento no enlace entre o terminal j e a estação rádio base servidora, $(\sigma^{sub})^2$ representa a potência do ruído no receptor na largura de banda ocupada por uma subportadora e c é o número de subportadoras que compõe o BR. Assumimos que a potência total disponível no terminal móvel, P , é igualmente distribuída entre as subportadoras.

A fim de mitigar a interferência intersimbólica, um equalizador no domínio da frequência deve ser utilizado na estação rádio base quando SC-FDMA é utilizado no enlace reverso. Neste trabalho, assumimos um equalizador do tipo Mínimo Erro Quadrático Médio (MEQM). Dessa forma, utilizando as definições de [10], a SNR dos dados recebidos por um conjunto de BRs utilizando esse tipo de equalizador pode ser escrita como:

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

em que $\gamma_{j,p}^{MEQM}$ é a SNR efetivamente experimentada pelos dados transmitidos pelo terminal j com os BRs contidos no padrão de assinalamento p e \mathcal{N}_p é o conjunto de BRs que compõe o padrão assinalado p .

Através do uso de adaptação de enlace, um terminal pode transmitir em diferentes taxas de dados de acordo com a qualidade do canal, potência alocada e ruído/interferência percebida. Definimos uma função de adaptação de *link* $f(\cdot)$ que mapeia a SNR a uma determinada taxa de transmissão. Diante disso, modelamos a taxa de transmissão do terminal j usando o padrão de assinalamento p como $r_{j,p} = f\left(\gamma_{j,p}^{MEQM}\right)$.

III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO ÓTIMA

Nesta seção apresentamos o problema a ser estudado, bem como sua solução ótima.

A. Formulação do Problema

O problema de maximização da soma das taxas ponderadas dos usuários que deve ser resolvido em cada intervalo de tempo de transmissão, do inglês, *Transmission Time Interval* (TTI), é formulado como:

$$\max_{\mathbf{X}} \left(\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} w_j \cdot r_{j,p} \cdot x_{j,p} \right), \quad (3)$$

sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{p \in \mathcal{P}} a_{n,p} \cdot x_{j,p} = 1, \forall n \in \mathcal{N}, \quad (4)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} x_{j,p} = 1, \forall j \in \mathcal{J}, \quad (5)$$

$$x_{j,p} \in \{0, 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \text{ e } \forall p \in \mathcal{P}. \quad (6)$$

A função objetivo (3) define a taxa total transmitida no enlace reverso pelos usuários, ponderadas por pesos ou prioridades, em que w_j representa a prioridade ou o peso do terminal móvel j . As restrições (4) e (6) asseguram que os BRs não serão reutilizados dentro da mesma célula, enquanto que a restrição (5) garante que apenas um padrão de assinalamento será atribuído a cada terminal. Os pesos w_j podem ser ajustados para projetar diferentes regras de escalonamento tais como citados em [11].

B. Caracterização da Solução Ótima

As equações (3) a (6) formulam um problema de programação linear inteiro ou do inglês, *Integer Linear Program* (ILP), que não pode ser resolvido de forma ótima com complexidade de tempo polinomial. Segundo [12], a restrição de adjacência de recursos é suficiente para tornar o problema NP-Difícil. A solução ótima para esse tipo de problema pode ser obtida por métodos numéricos tal como o algoritmo *Branch-and-Bound* (BB) [13]. Este algoritmo é apto a reduzir o tempo para obtenção da solução ótima porque é capaz de diminuir o espaço de procura de soluções. Contudo, a complexidade computacional de pior caso do método BB cresce exponencialmente com o número de restrições e variáveis que são, em nosso problema, $J + N$ e $J \cdot P$, respectivamente, e podem assumir altos valores, mesmo para pequenos números de usuários e BRs.

IV. SOLUÇÃO PROPOSTA: RELAXAMENTO DO PROBLEMA INTEIRO

Conforme comentado na seção anterior, a complexidade computacional do problema de alocação de padrões torna-se difícil de resolver à medida que a dimensão das variáveis de entrada aumentam, mesmo com o uso de técnicas padrão para problemas ILP. Dessa forma, em cenários práticos, onde o tempo de decisão para alocação de recursos é um fator importante, a resolução direta dos problemas ILP torna-se inviável.

A classe de problemas de otimização chamada de programação linear ou do inglês, *Linear Programming* (LP)

podem ser utilizadas para aproximar problemas ILP, que muitas vezes são NP-Difíceis. É possível relaxar os problemas ILPs trocando o caráter inteiro das variáveis de otimização desses problemas para números reais com limites inferiores e superiores, dando origem a uma nova classe de problemas LP [14]. Segundo [9], podemos fazer a substituição da restrição (6) pela restrição a seguir:

$$0 \leq x_{j,p} \leq 1, \forall j \in \mathcal{J} \text{ e } \forall p \in \mathcal{P}. \quad (7)$$

Matematicamente, é conhecido que todas as soluções do problema relaxado correspondem à solução do problema inteiro sempre que a matriz de restrição do problema relaxado é totalmente unimodular ou, do inglês, *Totally Unimodular Matrix* (TUM). Infelizmente, as restrições do problema apresentado nas equações (3), (4), (5) e (7) não são TUM. Como mostrado em [9], certas soluções básicas viáveis são soluções inteiras, e dessa forma, o problema original ILP pode ser resolvido de forma ótima para determinados casos através da solução do problema LP. Para os casos em que a solução do problema relaxado não é inteira, um algoritmo de arredondamento foi descrito em [9], o qual recebe como entrada a solução do problema LP fracionada e retorna uma solução inteira viável para o problema estudado. Essa proposta de algoritmo é descrita de forma sucinta a seguir.

A. Proposta de arredondamento

Como apresentado em [9], o algoritmo de arredondamento é descrito a seguir. A matriz \mathbf{X} é passada como entrada para o algoritmo que representa a solução do problema ILP relaxado (passo 1). No passo 2 essa matriz é verificada e caso seja binária o algoritmo ILP relaxado resolveu o problema de forma ótima (passo 3). Contudo, se a matriz solução não for binária, o algoritmo realiza os assinalamentos de padrões a usuários em que as entradas são 1 (passo 4). No passo 5, o algoritmo seleciona a linha j^* e a coluna p^* da matriz \mathbf{X} correspondente ao maior valor diferente de 1. O passo 6 associa o assinalamento p^* ao usuário j^* atribuindo 1 na matriz \mathbf{X} e 0 para as demais colunas da linha j^* . As entradas da matriz \mathbf{X} que estejam violando as restrições de exclusividade também deverão receber o valor 0. O último passo 7 verifica se há valores de assinalamentos diferentes de 1 e 0. Caso ainda existam, o processo de arredondamento retorna ao passo 5.

B. Proposta de redução da quantidade de padrões de assinalamento

Em [9], em mais de 70% das realizações foi possível resolver um problema ILP, reconhecidamente complexo, de forma ótima por sua forma relaxada, aplicando técnicas de programação linear eficientes computacionalmente. Esse percentual diminui à medida que o número de terminais aumenta, porém ainda apresenta um comportamento satisfatório, ficando em torno de 55%.

Devido ao bom desempenho do algoritmo proposto em [9], propomos uma nova métrica que tem como base este algoritmo, mas que é capaz de reduzir substancialmente a complexidade computacional, mantendo um desempenho aceitável.

Tomando como exemplo, se considerarmos $N = 24$ BRs teremos um número total de padrões de assinalamentos $P = 301$, que pode ser considerado um espaço de amostras grande. Diante disso, podemos utilizar apenas parte desses padrões de assinalamento na solução do nosso problema. Dessa forma, podemos selecionar apenas um determinado percentual de todos os padrões de assinalamento para cada usuário, antes de servir como entrada para o algoritmo proposto em [9]. Os padrões de assinalamento são escolhidos de acordo com os maiores valores da equação (2) para cada usuário e um percentual pré-estabelecido. O desempenho dessa nova proposta será avaliado nas próximas seções desse trabalho. O passo-a-passo da nossa proposta é descrito a seguir:

- 1) Inicialização da matriz binária $N \times P$, \mathbf{A} ;
- 2) Inicialização do percentual β para cada usuário;
- 3) Cálculo da SNR para cada padrão de assinalamento por usuário, conforme a equação (2);
- 4) Escolha dos β melhores padrões assinalamento de \mathbf{A} para cada usuário, com base nos maiores valores de SNR, calculados no passo 3;
- 5) Obtenção da matriz de assinalamento \mathbf{X} , $J \times P$, com os padrões de assinalamento de maior SNR;
- 6) Utilização da matriz \mathbf{X} como entrada no algoritmo proposto em [9].

V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Esta seção é dedicada à avaliação de desempenho da solução proposta apresentada na Seção IV-B. Na Seção V-A apresentamos o cenário utilizado, mostrando os principais parâmetros de simulação e métricas de desempenho utilizadas, enquanto que na Seção V-B apresentamos os resultados de simulação obtidos, assim como suas respectivas análises.

A. Parâmetros de Simulação

O modelo de sistema descrito neste artigo foi implementado em um simulador computacional. Analisamos a alocação de recursos do enlace reverso para um sistema celular setorizado empregando SC-FDMA. Para as nossas simulações, consideramos um sistema SC-FDMA com um grupo de 12 subportadoras no domínio da frequência para cada BR e com 1 ms de dimensão temporal (duração de um TTI).

Os resultados foram analisados para um número fixo de BRs igual a 24, e variando-se a quantidade de usuários presentes no sistema. Nós consideramos uma potência de transmissão de 0.1 W por BR. Nosso modelo considera a perda de percurso dependente da distância, com sombreamento log-normal e uma componente de desvanecimento rápido baseado no modelo *Typical Urban* do 3GPP. Os pesos w_j foram definidos de forma que todos os usuários tivessem peso igual a 1. E, como já mencionado, a fim de reduzir a complexidade computacional, utilizamos apenas uma porcentagem dos padrões de assinalamento do total de padrões disponíveis para cada usuário. Os principais parâmetros de simulação são resumidos na TABELA I.

A fim de realizar comparações qualitativas, além do algoritmo proposto na Seção IV-B (Proposto Subótimo - $\beta\%$),

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio da célula	334	m
Potência transmitida por BR	0.1	W
Número de subportadoras por BR	12	-
Número de BRs	24	-
Desvio padrão do sombreamento	8	dB
Perda de percurso	$35.3 + 37.6 \cdot \log_{10}(d)$	dB
Densidade espectral do ruído	$3.16 \cdot 10^{-20}$	W/Hz
Número de <i>snapshots</i>	3000	-
Número de terminais	6, 8, 10 e 12	-
Desvanecimento rápido	<i>Typical Urban</i>	-
Porcentagem de utilização de padrões	$\beta = 50, 80, 90$ e 100	-

simulamos a solução original proposta por [9] (Proposta de arredondamento subótima), descrita na Seção IV-A, além da resolução ótima proposta na Seção III(Ótimo); solução subótima baseada em um algoritmo guloso proposto por Wong em [5] (Subótimo Wong) e solução heurística proposta pelo artigo [8] (Subótimo Zhang) que leva em conta a banda de coerência do canal. Para resolver os problemas de otimização inteiro (ILP) e sua versão relaxada (LP) utilizamos a biblioteca de otimização numérica IBM ILOG CPLEX [15]. A escolha da quantidade de terminais móveis e BRs é limitada pela complexidade computacional para obter a solução ótima do problema ILP.

B. Resultados

Na Figura 1 apresentamos o somatório das taxas dos usuários ponderadas *versus* o número de usuários no sistema para todos os algoritmos citados anteriormente. Para o algoritmo subótimo proposto neste artigo, variamos a porcentagem de padrões de assinalamento utilizados para cada usuário em: 50%, 80% e 90% do total de padrões disponíveis, com base nos maiores valores de SNR descritos pela equação (2).

Podemos verificar que os algoritmos Subótimo Wong e Subótimo Zhang ofereceram os piores desempenhos respectivamente, por não trabalharem com heurísticas boas o suficiente para busca pelas melhores soluções em casos mais genéricos. Como já verificado por [9], a solução do problema relaxado é a que mais se aproxima da solução ótima em um grande percentual de realizações. Para os casos em que a solução do problema relaxado não fornece a solução ótima inteira, o algoritmo de arredondamento é capaz de atingir bons resultados, como exposto por [9]. Neste trabalho, utilizando apenas 50% dos padrões de assinalamento foi possível obter resultados muito próximos à solução inicial de [9], com uma redução significativa na complexidade computacional do problema em análise. O ganho de complexidade computacional é um fator relevante, visto que decisões em sistemas de redes celulares devem ser tomadas na ordem de milissegundos e por dispositivos com uma capacidade de processamento reduzida. À medida que aumentamos a porcentagem de padrões utilizados de 50% para 80% e 90%, o desempenho do sistema se aproxima da solução original, ainda com ganho de complexidade significativo.

Com o intuito de demonstrar o ganho de complexidade de tempo de execução do modelo proposto nesse trabalho em relação aos demais citados anteriormente, a Figura 2 traz o

tempo de execução de cada algoritmo *versus* o número de usuários presentes no sistema. É possível verificar que com a redução da quantidade de padrões de assinalamento há um ganho em desempenho em relação ao tempo de execução quando comparado ao original [9] e à solução ótima, com desempenho de taxa de dados próximo.

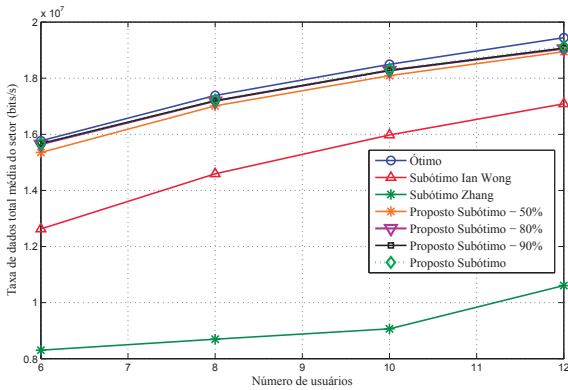


Fig. 1. Somatório das taxas dos usuários ponderadas versus o número de usuários no sistema para os algoritmos estudados.

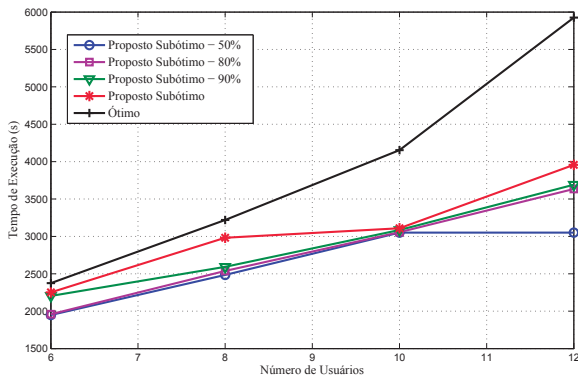


Fig. 2. Tempo de execução versus número de usuários no sistema.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, estudamos o problema de maximização do somatório das taxas ponderadas dos usuários para o enlace reverso de sistemas que empregam SC-FDMA, tal como o LTE. Diferentemente de outros cenários, a solução ótima para esse problema não pode ser facilmente obtida, tornando o problema computacionalmente difícil, devido a restrição de adjacência de recursos na frequência.

Nosso trabalho começa apresentando a solução ótima do problema, formulado como um problema linear inteiro ou do inglês, ILP, que não é uma solução computacionalmente viável para o caso estudado, já que as decisões em redes celulares devem ser tomadas na ordem de milissegundos. Partimos então para a ideia de relaxamento do problema ILP chegando a um problema de otimização linear ou do inglês, LP, que admite soluções bastante eficientes com complexidade computacional polinomial, que foi proposto por [9]. Finalmente, propomos

um novo esquema para a solução do nosso problema, visando diminuir a complexidade computacional, em que tomamos como base a solução proposta por [9], mas, diferente da ideia original, não utilizamos todos os padrões de assinalamentos disponíveis. Em nossa proposta, selecionamos um percentual dos padrões de assinalamentos disponíveis para cada usuário em que os padrões com maiores valores de SNR são considerados. Avaliamos o desempenho em taxa de dados e o tempo de execução total em comparação a outros algoritmos propostos na literatura.

Através de simulações computacionais, mostramos que a nossa métrica proposta se aproxima da solução original de [9] que possui desempenho satisfatório (em torno de 55%) em relação à solução ótima. Os resultados de simulação mostram a superioridade da métrica proposta neste artigo em relação a alguns algoritmos subótimos selecionados na literatura e que também, para maiores percentuais de utilização de padrões de assinalamento, temos um desempenho quase ótimo com uma menor complexidade computacional.

REFERÊNCIAS

- [1] ITU. Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s). [S.l.], 2008.
- [2] Lima, F. R. M. Maximizing spectral efficiency under minimum satisfaction Constraints on multiservice wireless networks Tese de Doutorado em Engenharia de Teleinformática. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Teleinformática, da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- [3] Lim, J., Myung, H., Oh, K., e Goodman, D. Channel-dependent scheduling of uplink single carrier fdma systems. In *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*, pages 1–5.
- [4] Nwamadi, O., Zhu, X., and Nandi, A. Dynamic subcarrier allocation for single carrier-fdma systems. In *Signal Processing Conference, 2008 16th European*, pages 1–5. IEEE. 2008.
- [5] Wong, I., Oteri, O., and McCoy, W. Optimal resource allocation in uplink sc-fdma systems. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 8(5):2161–2165. 2009.
- [6] Pao, W.-C. and Chen, Y.-F. Chunk allocation schemes for sc-fdma systems. In *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st*, pages 1–5.
- [7] Calabrese, F., Rosa, C., Anas, M., Michaelsen, P., Pedersen, K., and Mogensen, P. Adaptive transmission bandwidth based packet scheduling for lte uplink. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, pages 1–5.
- [8] M. Zhang and Y. Zhu, An Enhanced Greedy Resource Allocation Algorithm for Localized SC-FDMA Systems. in *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 1479-1482, 2013.
- [9] A. B. Rodrigues, F. R. M. Lima, T. F. Maciel, F. R. P. Cavalcanti. *Alocação de Recursos para Sistemas SC-FDMA baseada e Relaxamento e Programação Linear*. XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações. SBt 2016, 30 de agosto a 2 de setembro, Santarém, PA.
- [10] Shi, T., Zhou, S., and Yao, Y. Capacity of single carrier systems with frequency-domain equalization. In *Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication, 2004. Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on*, volume 2, pages 429–432 Vol.2.
- [11] Femenias, G., Danobeitia, B., and Riera-Palou, F. Unified approach to cross-layer scheduling and resource allocation in ofdma wireless networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012.
- [12] Lee, S.-B., Pefkianakis, I., Meyerson, A., Xu, S., and Lu, S. Proportional fair frequency-domain packet scheduling for 3gpp lte uplink. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 2611–2615. 2009.
- [13] Nemhauser, G. and Wolsey, L. *Integer and Combinatorial Optimization*. John Wiley Sons. 2009.
- [14] Mokhtar S. Bazaraa, J. J. J. and Sherali, H. D. *A Multicarrier Primer*. Amati Communication Corporation and Stanford University. 1991.
- [15] IBM. IBM ILOG CPLEX Optimizer. <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>. Acessado em 14 de dezembro de 2015.