

Seleção de *Relays* para o Enlace Reverso de Redes Cooperativas Utilizando SC-FDMA com Restrições de Adjacência

Leonardo Paiva, Iran M. B. Júnior, F. Rafael M. Lima, Tarcísio F. Maciel e F. Rodrigo P. Cavalcanti

Resumo— Neste artigo estudamos a seleção de *relays* e alocação de recursos em uma rede cooperativa que emprega o esquema de múltiplo acesso SC-FDMA (do inglês, *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) no enlace reverso tal qual utilizado no sistema LTE (do inglês, *Long Term Evolution*). Neste tipo de múltiplo acesso, os recursos alocados a um transmissor devem ser adjacentes na frequência (restrição de adjacência). Formulamos o problema de maximização da taxa total transmitida como um problema de otimização combinatorial não-linear. Através de manipulações algébricas, convertimos esse problema para o tipo MILP (do inglês, *Mixed Integer Linear Problem*) que pode ser resolvido de forma ótima através de bibliotecas computacionais. Por fim, realizamos uma avaliação de desempenho do sistema descrito de forma a melhor entender os efeitos das variáveis presentes no modelo no desempenho do sistema.

Palavras-Chave— Redes Cooperativas, SC-FDMA, Alocação de Recursos de Rádio, LTE, MILP.

Abstract— In this article we study relay selection and resource allocation in a cooperative network that employs SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) in the uplink direction such as in LTE (Long Term Evolution) system. With SC-FDMA, the frequency resources assigned to a transmitter should be adjacent in the frequency domain (adjacency constraint). We formulate the total data rate maximization problem as a non-linear combinatorial optimization problem. Through algebraic manipulations we managed to convert the original problem in a MILP (Mixed Integer Linear Problem) that can be optimally solved by standard computational solvers. Finally, we present a performance evaluation in order to better understand the impact of the main variables of the presented model on the system performance.

Keywords— Cooperative Networks, SC-FDMA, Radio Resource Allocation, LTE, MILP .

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações móveis estão continuamente evoluindo impulsionados principalmente pela forte demanda por novos serviços multimídia, maiores taxas de dados e maior capacidade do sistema em termos de número de assinantes. O sistema 4G (Quarta Geração) LTE-A (do inglês, *Long Term Evolution Advanced*) provê uma série de tecnologias a fim de atender a essas demandas [1].

Particularmente, o sistema LTE-A utiliza no enlace direto o esquema de múltiplo acesso OFDMA (do inglês, *Orthogonal*

Frequency Division Multiple Access) enquanto que no enlace reverso usa-se SC-FDMA (do inglês, *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*). A razão principal da escolha do SC-FDMA no enlace reverso consiste na redução da PAPR (do inglês, *Peak-to-Average Power Ratio*). Um sinal temporal com baixa PAPR requer amplificadores de potência com uma região linear menor o que facilita o projeto e diminui os custos dos terminais móveis [2]. Apesar disso, o esquema SC-FDMA impõe a restrição da adjacência na alocação de recursos que requer que os blocos de subportadoras alocados a um transmissor devem ser adjacentes ou contíguos na frequência. Essa restrição torna o processo de alocação de recursos bem mais desafiador que em sistemas OFDMA [3].

Outra tecnologia padronizada em sistemas LTE-A é a possibilidade de cooperação entre nós. Em particular, a comunicação entre um nó fonte e um nó destino pode ser auxiliado por um nó intermediário chamado de repetidor ou *relay*. Nesse contexto, surge a seleção de *relays* em que a comunicação entre um nó fonte e nó destino pode ser otimizada através da escolha do *relay* mais adequado [4].

O problema de maximização da taxa total para o enlace reverso de sistemas empregando SC-FDMA foi estudado por alguns artigos para redes convencionais (não cooperativas). Em [5] os autores consideraram o problema de maximização da taxa total, porém sem assumir a restrição de adjacência entre recursos na frequência. Conforme explicado antes, essa é uma condição importante para assegurar baixa PAPR. Em [6] os autores formularam o mesmo problema como um problema de otimização inteiro chamado *set partitioning*, em que a solução ótima pode ser obtida sem recorrer a busca exaustiva. Mais recentemente, os autores em [7] estudaram o problema de maximização da taxa de dados em sistemas SC-FDMA convencionais explorando a versão relaxada do problema de otimização inteiro. Os autores mostram que para um grande número de realizações estatísticas, as matrizes de restrição do problema de otimização, possuem a propriedade TUM (do inglês, *Totally Unimodular Matrix*) que permite resolver problemas combinatoriais utilizando sua versão relaxada, que por sua vez, admite soluções menos complexas computacionalmente.

Seleção de *relays* em redes cooperativas utilizando OFDMA foi estudado por diversos trabalhos dentre os quais destacamos [8] e [9]. Em [8] os autores estudaram o problema de maximização da taxa de dados e assumem que os *relays* empregam o protocolo AF (do inglês, *Amplify and Forward*). Os autores propõem duas soluções de baixo custo computacional.

Leonardo Paiva e Iran M. B. Júnior - Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, Brasil. F. Rafael M. Lima - Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem fio (GTEL) - Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, Brasil. Tarcísio F. Maciel e F. Rodrigo P. Cavalcanti - Grupo de Pesquisa em Telecomunicações Sem Fio (GTEL) - Universidade Federal do Ceará - Campus do Pici. E-mails: {leopaiva.ec, iranjunior}@alu.ufc.br, {rafaelm, maciel, rodrigo}@gtel.ufc.br.

Mais recentemente, os autores em [9] abordaram o mesmo problema envolvendo as funcionalidades de pareamento de subportadoras, seleção de *relays* e alocação de potência. A principal diferença entre [8] e [9] é que o último trabalho considera o protocolo DF (do inglês, *Decode and Forward*) nos *relays* e assume a hipótese mais realista que a transmissão ocorre em níveis discretos de taxa devido ao uso de MCSs (do inglês, *Modulation and Coding Schemes*). Poucos trabalhos abordaram seleção de *relays* em redes cooperativas em sistemas SC-FDMA. Até onde vai nosso conhecimento, os únicos trabalhos abordando o problema de seleção de *relays* e assinalamento de recursos na frequência em redes SC-FDMA são os trabalhos [10] e [11]. Contudo, estes trabalhos realizam a seleção de *relays* baseado somente na perda de percurso desprezando outras informações envolvendo qualidade de canal. Além disso, estes trabalhos não fornecem soluções para o partilhamento de recursos na frequência, que conforme explicamos antes, devem obedecer a restrição de adjacência.

As principais contribuições deste presente trabalho são:

- Formulação do problema de maximização da taxa total no enlace reverso de um sistema empregando SC-FDMA tal qual LTE-A. Até nosso conhecimento, a formulação deste problema é inédito. Esse problema envolve a seleção de *relays* e atribuição de blocos de recursos na frequência obedecendo a restrição de adjacência.
- Proposta de resolução ótima do problema formulado sem recorrer a busca exaustiva. O problema formulado é originalmente não linear e combinatorial mas, através de manipulações algébricas, o convertimos em MILP (do inglês, *Mixed Integer Linear Problem*) que pode ser resolvido por bibliotecas computacionais.
- Apresentação de uma avaliação de desempenho da solução apresentada em função das principais variáveis do modelo apresentado. Esta análise fornece importante conclusões sobre a otimização destes sistemas.

O restante deste artigo está organizado conforme apresentamos a seguir. Na seção II apresentamos a modelagem do sistema descrevendo as principais características do mesmo. Nas seções III e IV mostramos a formulação do problema estudado e propomos uma solução ótima, respectivamente. A avaliação de desempenho através de simulações computacionais é apresentada na seção V enquanto que o artigo é finalizado com as principais conclusões na seção VI.

II. MODELAGEM DO SISTEMA

Consideramos um sistema de comunicação sem fio cooperativo utilizando SC-FDMA no enlace reverso, no qual existem J terminais móveis atuando como fonte, R *relays* que empregam o protocolo de encaminhamento DF e uma ERB (Estação Rádio Base) como destino. Assumimos $\mathcal{J} = \{1, \dots, J\}$ como o conjunto de terminais móveis disponíveis para comunicar-se com a ERB. Definimos $\mathcal{R} = \{1, \dots, R\}$ como o conjunto de *relays* disponíveis para encaminhar a mensagem até o destino. Definimos como BR (Bloco de Recurso), um conjunto de c subportadoras adjacentes que representam o mínimo recurso disponível a ser alocado em uma comunicação. Dessa forma, definimos $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$

como o conjunto de BRs disponíveis no sistema. Assumimos que a comunicação direta entre os usuários e a ERB é inviável devido a distância entre estes nós e, portanto, necessita-se de *relays* para encaminhar a informação até o destino. SC-FDMA impõe ao sistema duas restrições para alocação de BRs, a saber: **Exclusividade**, em que um BR não pode ser compartilhado entre usuários da mesma célula; e **Adjacência**, em que os BRs atribuídos a cada usuário devem ser adjacentes no domínio da frequência [2].

A transmissão no sistema ocorre em duas fases correspondendo a dois intervalos de transmissão ou *slots* utilizando o método *half duplex*. Na primeira fase ocorre a transmissão dos terminais (fonte) para os *relays* (salto 1). Na segunda fase, os *relays* encaminham as informações recebidas dos terminais à ERB. Em ambas as fases, utiliza-se o esquema SC-FDMA e o mesmo conjunto de BRs, \mathcal{N} , são reutilizados.

Definimos como padrão de assinalamento em sistemas SC-FDMA o conjunto de todos os possíveis BRs contíguos que podem ser atribuídos a determinado usuário. O número de possíveis padrões de assinalamento é dado por $P = \frac{1}{2}N^2 + \frac{1}{2}N + 1$, em que N é o número de BRs disponíveis no sistema [6]. Assumimos que $\mathcal{P} = \{1, \dots, P\}$ é o conjunto dos índices de todos os possíveis padrões de assinalamento e $\mathcal{N}_p = \{1, \dots, N_p\}$ o conjunto de todos os BRs disponíveis no padrão de assinalamento p . Modelamos a restrição de adjacência através da matriz binária, \mathbf{A} , com dimensões $N \times P$ composta pelos elementos $a_{n,p}$, com $n \in \mathcal{N}$ e $p \in \mathcal{P}$, que assumem valor 1 se o BR n pertencer ao padrão de assinalamento p , e 0 caso contrário. Um exemplo da matriz \mathbf{A} para $N = 4$ e conseqüentemente $P = 11$, é mostrado a seguir

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

Nós definimos a matriz binária de assinalamento no primeiro salto (usuário \rightarrow *relay*), \mathbf{X}^f , com dimensões $J \times P \times R$, composta pelos elementos $x_{j,p,r}^f$ que assumem valor 1 se o terminal j estiver transmitindo no padrão p para o *relay* r , e 0 caso contrário. Da mesma forma, no segundo salto (*relay* \rightarrow ERB), definimos a matriz de assinalamento \mathbf{X}^r com dimensões $R \times P$, composta pelos elementos $x_{r,p}^r$ que assumem valor 1 se o *relay* r estiver transmitindo no padrão p , e 0 caso contrário. Conforme veremos adiante, algumas restrições devem ser impostas a essas matrizes objetivando exclusividade e adjacência.

Consideramos o canal modelado no domínio da frequência e que todas as subportadoras no mesmo BR experimentam o mesmo ganho de canal. Além disso, para assegurar uma baixa PAPR, a potência disponível no transmissor é igualmente dividida entre todas as subportadoras do padrão de assinalamento adotado. Define-se a variável $h_{j,r,n,p}^f$ como a função de transferência do canal que representa os efeitos de pequena escala experimentado pelo terminal j para o *relay* r que utiliza o BR n presente no padrão p , para transmitir no primeiro salto. Da mesma forma, no segundo salto temos, $h_{r,n,p}^r$ que representa a função de transferência do canal representando

os efeitos de pequena escala experimentado pelo *relay* r que transmite no BR n presente no padrão p para a ERB. Definimos $\gamma_{j,r,n,p}^f$ como a SNR (do inglês, *Signal to Noise Ratio*) correspondente ao enlace entre o terminal j e o *relay* r na subportadora central do BR n que pertence ao padrão de assinalamento p ¹. Vale ressaltar que, conforme é mostrado na matriz (1), nem todo BR n está presente em algum padrão p . Sendo assim, nestes casos a SNR é zero, pois o enlace não existe para este tipo de configuração. A SNR é dada por

$$\gamma_{j,r,n,p}^f = (P^f / (c \cdot |\mathcal{N}_p|)) \cdot \alpha_{j,r}^f \cdot |h_{j,r,n,p}^f|^2 / \sigma^2, \quad (2)$$

em que P^f é a potência total disponível na fonte e é distribuída de acordo com a quantidade de BRs (e por consequência, subportadoras) utilizados. $|\mathcal{N}_p|$ é a cardinalidade do conjunto de BRs disponíveis no padrão p , $\alpha_{j,r}^f$ representa o efeito conjunto da perda de percurso e sombreamento do canal sem fio entre o terminal j e o *relay* r , σ^2 é a potência de ruído no receptor na largura de banda de uma subportadora. Definimos $\gamma_{r,n,p}^r$ como sendo a SNR da subportadora central do BR n quando presente no padrão p no enlace entre o *relay* r e a ERB no salto 2. Essa SNR é dada por

$$\gamma_{r,n,p}^r = (P^r / (c \cdot |\mathcal{N}_p|)) \cdot \alpha_r^r \cdot |h_{r,n,p}^r|^2 / \sigma^2, \quad (3)$$

em que P^r é a potência disponível no *relay* e também é distribuída de acordo com a quantidade de BRs utilizados, α_r^r representa o efeito conjunto da perda de percurso e sombreamento do canal sem fio entre o *relay* e a ERB.

Um equalizador no domínio da frequência deve ser utilizado nos receptores quando emprega-se SC-FDMA a fim de mitigar a interferência intersimbólica. Neste trabalho, assumimos que um equalizador do tipo MEQM (Mínimo Erro Quadrático Médio) é utilizado. De [12], a SNR efetiva no salto 1 após o processo de equalização, $\gamma_{j,p,r}^{f,MEQM}$, é dada por

$$\gamma_{j,p,r}^{f,MEQM} = \left(\frac{1}{\frac{1}{c \cdot |\mathcal{N}_p|} c \sum_{n \in \mathcal{N}_p} \frac{\gamma_{j,r,n,p}^f}{\gamma_{j,r,n,p}^f + 1}} - 1 \right)^{-1}, \quad (4)$$

da mesma forma, a SNR efetiva no salto 2, $\gamma_{r,p}^{r,MEQM}$, é obtida substituindo-se $\gamma_{r,n,p}^r$ no lugar de $\gamma_{j,r,n,p}^f$ na equação (4).

Com o uso de adaptação de enlace, o terminal pode transmitir em diferentes taxas de dados de acordo com as condições do canal, potência alocada e ruído/interferência percebida [13]. Assumimos a função de mapeamento, $f(\cdot)$, que modela o uso de diferentes esquemas de modulação e codificação ou MCS (do inglês, *Modulation and Coding Schemes*). Portanto, essa função faz o mapeamento entre diferentes valores de SNR efetiva conforme calculado nas equações das SNRs efetivas em valores discretos de taxas de dados. Assumimos neste estudo M possíveis níveis de MCSs contidos no conjunto $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$. Definimos como r_m a taxa de dados quando o m -ésimo nível de MCS é utilizado em uma dada subportadora. Para que haja uma transmissão no m -ésimo nível de MCS é necessário que a SNR da subportadora em

questão esteja contida no intervalo de SNRs $[\gamma^m, \gamma^{m+1})$ em que $\gamma^{m+1} > \gamma^m$. De acordo com esse modelo, note que para atingir o nível de MCS m é suficiente garantir a menor SNR dentro da região de SNR correspondente, ou seja γ^m . As taxas, $r_{j,p,r}^f$ e $r_{r,p}^r$, atingidas no primeiro e segundo saltos, respectivamente, são dadas por

$$r_{j,p,r}^f = f(\gamma_{j,p,r}^{f,MEQM}) \text{ e } r_{r,p}^r = f(\gamma_{r,p}^{r,MEQM}). \quad (5)$$

Por fim, observe que cada *relay* r , por estar empregando o protocolo DF, permite a passagem de tráfego de dados limitado pelo mínimo entre a taxa de dados potenciais nos saltos 1 e 2, ou seja [9]

$$\min \left\{ \sum_j \sum_p x_{j,p,r}^f \cdot r_{j,p,r}^f; \sum_p x_{r,p}^r \cdot r_{r,p}^r \right\}. \quad (6)$$

III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Formulamos o problema de maximização da taxa de dados total do sistema cooperativo empregando SC-FDMA como

$$\max_{\{x_{j,p,r}^f, x_{r,p}^r\}} \sum_r \min \left\{ \sum_j \sum_p x_{j,p,r}^f \cdot r_{j,p,r}^f; \sum_p x_{r,p}^r \cdot r_{r,p}^r \right\}, \quad (7)$$

sujeito a:

$$\sum_p \sum_r x_{j,p,r}^f = 1, \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (8)$$

$$\sum_j \sum_p \sum_r x_{j,p,r}^f \cdot a_{n,p} = 1 \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (9)$$

$$\sum_p x_{r,p}^r = 1 \quad \forall r \in \mathcal{R}, \quad (10)$$

$$\sum_r \sum_p x_{r,p}^r \cdot a_{n,p} = 1 \quad \forall n \in \mathcal{N}. \quad (11)$$

A função objetivo (7) consiste na taxa total do sistema que corresponde a soma das taxas de dados encaminhadas pelos R relays. A restrição (8) assegura que cada terminal móvel no salto 1 deve utilizar apenas um padrão de assinalamento², p , e conectar-se a um único *relay* r . Na restrição (9), temos a condição de que um mesmo BR não pode ser compartilhado entre os terminais no salto 1. Em (10), temos a restrição que, no salto 2, cada *relay* r deve transmitir em apenas um único padrão de assinalamento p . Da mesma forma de (9), a equação (11) garante que um mesmo BR não pode ser compartilhado entre os relays no salto 2.

IV. SOLUÇÃO ÓTIMA

O problema proposto possui restrições lineares mas um objetivo não linear devido ao emprego da função $\min\{\cdot\}$ na função objetivo. Problemas combinatoriais desta natureza devem ser resolvidos através da enumeração completa ou força bruta, em que todas as possíveis combinações de associação entre terminais e relays (seleção de relays) e associação entre

¹Conforme assumimos antes, todas as subportadoras de um dado BR experimentam aproximadamente as mesmas manifestações de canal. Portanto, assumimos que a SNR do RB é a mesma de sua subportadora central.

²Observe que a primeira coluna da matriz em (1) corresponde a um padrão de assinalamento sem nenhum BR. Portanto, a decisão se um terminal deve ou não transmitir depende apenas se isso trará benefícios em termos do objetivo do problema de otimização.

terminais e padrões de assinalamento (salto 1) e entre *relays* e padrões de assinalamento (salto 2) devem ser elencadas e avaliadas na busca da melhor solução.

Felizmente, a função objetivo pode ser linearizada sob o custo de novas variáveis de otimização e restrições no problema. Faz-se o uso da seguinte técnica para tornar (7) linear: $\max (\sum_{\forall i} \min \{A_i, B_i\})$ é equivalente a $\max (\sum_{\forall i} z_i)$ sujeito a $z_i \leq A_i$ e $z_i \leq B_i$ em que z_i é uma variável auxiliar. Tendo esta ferramenta em mãos, reformulamos o problema da seguinte forma:

$$\max_{\{x_{j,p,r}^f, x_{r,p}^f, z_r\}} \sum_{\forall r} z_r, \quad (12)$$

sujeito a:

$$z_r \leq \sum_{\forall j} \sum_{\forall p} x_{j,p,r}^f \cdot r_{j,p,r}^f \quad \forall r \in \mathcal{R}, \quad (13)$$

$$z_r \leq \sum_{\forall p} x_{r,p}^f \cdot r_{r,p}^f \quad \forall r \in \mathcal{R}, \quad (14)$$

Além de (8), (9), (10) e (11), em que z_r consiste em uma variável real que significa a taxa encaminhada pelo r -ésimo *relay*. O novo problema reformulado agora pertence a classe MILP que por serem lineares, podem ser resolvidas de forma ótima por bibliotecas computacionais baseadas no algoritmo BB (do inglês, *Branch and Bound*) [14].

V. RESULTADOS

Nesta seção faremos uma análise de desempenho do sistema apresentado na seção II e estudaremos o efeito das variáveis apresentadas no desempenho do sistema.

A. Parâmetros de Simulação

O sistema modelado da seção II foi implementado em um simulador computacional. De forma a obter resultados válidos estatisticamente, foi realizada diferentes repetições de Monte Carlo. Em cada repetição, assumimos que a ERB está localizada no centro dos eixos coordenados e que os R *relays* estão igualmente espaçados por ângulos $2\pi/R$ distantes 450 m da ERB. Assumimos que os terminais móveis estão uniformemente distribuídos na região delimitada por duas circunferências que podem ter os seguintes raios: 500 - 600 m, 600 - 700 m e 700 - 800 m. Note que assumimos que não há comunicação direta entre a ERB e os terminais móveis. Definimos que cada BR é composto por 12 subportadoras adjacentes no domínio da frequência e um intervalo temporal de 1 ms. Assim, a transmissão completa *half duplex* ocorre em dois *slots* de duração temporal de 1 ms cada. Os efeitos de propagação foram modelados por modelo de perda de percurso, uma componente de sombreamento log-normal e uma componente de desvanecimento rápido seguindo distribuição *Rayleigh*. Além disso, assumimos que adaptação de enlace baseia-se em 15 indicadores de qualidade de canal ou CQIs (do inglês, *Channel Quality Indicators*) utilizados nos sistemas LTE, bem como os limiares de chaveamento ou troca de MCSs foram obtidos através de simulações de nível de enlace conforme utilizado em [7]. Outros detalhes relevantes

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Parâmetros	Valor	Unidade
Distância dos <i>relays</i> para a ERB	450	m
Raios das circunferências que delimitam o posicionamento dos terminais	500-600, 600-700 e 700-800	m
Potência no terminal	24	dBm
Potência no <i>relay</i>	24	dBm
Número de BRs	4, 8, 12, 16 e 20	-
Número de subportadoras por BR	12	-
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 repetições de Monte Carlo	1000	-
Número de <i>relays</i>	2, 3 e 4	-
Número de terminais	5, 10 e 15	-

em relação a modelagem do canal de comunicações podem ser conferidos na TABELA I.

Na próxima subseção iremos avaliar a solução ótima proposta na seção IV obtida através da biblioteca computacional IBM ILOG CPLEX [15] e denominada nos gráficos a seguir por Com Seleção (CS), e um algoritmo que escolhe um único *relay* aleatoriamente para encaminhar as informações no salto 2 denominado nos gráficos a seguir como Sem Seleção (SS).

B. Avaliação de Resultados

Na Fig. 1 apresentamos a taxa de dados total média versus o número de BRs para o caso sem seleção de *relays* e com seleção de *relays* para diferentes valores de R . Podemos observar que a taxa total aumenta com o número de BRs para os dois casos, o que já é esperado visto que estamos aumentando a quantidade de BRs e subportadoras que cada terminal ou *relay* podem utilizar na transmissão. Também podemos observar para o caso em que há seleção de *relays*, que a taxa total é superior ao caso em que não há seleção para os diferentes números de *relays*. Como exemplo, para 20 BRs os ganhos da seleção de *relays* em relação ao caso sem seleção de *relays* são de 44,3%, 62,2% e 82,4% para os casos com 2, 3 e 4 *relays*, respectivamente. Com isso, podemos perceber a importância da implementação da seleção de *relays* neste tipo de cenário. O aumento da taxa de dados e consequentemente da eficiência espectral para um número de BRs fixo deve-se a diversidade espacial e cooperativa resultante do aumento do número de *relays*. Com o aumento do número de *relays*, a probabilidade de selecionar subportadoras nos dois saltos em boas condições de canal aumenta.

Na Fig. 2 apresentamos a taxa de dados total média versus o número de BRs para $R = 3$ e diferentes valores de J . Podemos observar que a taxa de dados apresenta um aumento também com o número de terminais móveis no sistema para um número de BR fixo. Esse aumento também deve-se à diversidade espacial/cooperativa. Contudo, esse aumento é menos expressivo que os apresentados na Fig. 1 visto que o enlace fim a fim é limitado pelo segundo salto por ter uma quantidade menor de nós.

Na Fig. 3 temos a taxa de dados total média versus o número de BRs em que assumimos $J = 10$ e $R = 3$ para os casos com seleção e sem seleção de *relays* utilizando diferentes raios das circunferências que delimitam a área que os terminais

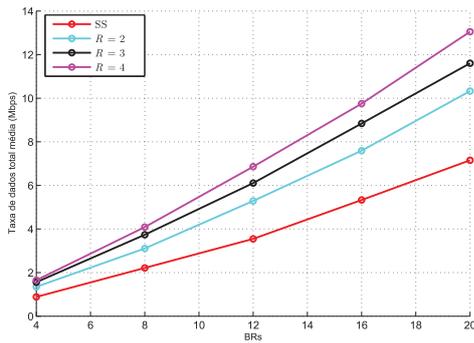


Fig. 1. Taxa de dados total média versus o número de BRs para o caso com e sem seleção (SS) de relays considerando 2, 3, 4 relays e $J = 10$.

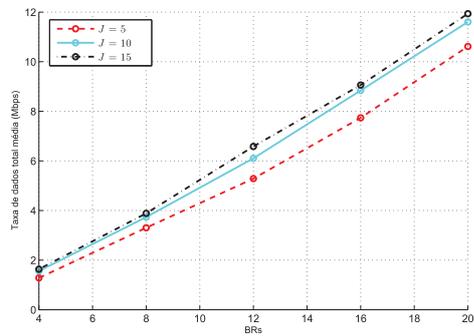


Fig. 2. Taxa de dados total média versus o número de BRs assumindo 3 relays e número de terminais iguais a 5, 10 e 15.

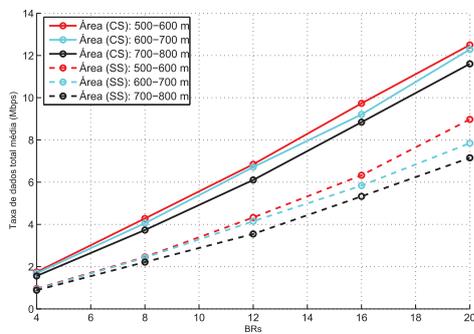


Fig. 3. Taxa de dados total média versus o número de RBs assumindo $J = 10$, $R = 3$ para diferentes raios das circunferências que delimitam a região dos terminais, com seleção (CS) e sem seleção (SS) de relays.

estão inclusos. Podemos observar que em geral, quanto mais distantes estão os terminais dos relays e da ERB, pior é a taxa total atingida tanto para o caso com ou sem seleção de relays. Isso deve-se a piora no salto 1 e o uso do protocolo DF que limita a taxa fim-a-fim pelo pior salto (vide equação (6)).

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo estudamos o problema de seleção de relays e alocação de recursos em uma rede cooperativa que emprega SC-FDMA no enlace reverso com o objetivo de obter uma maximização da taxa de dados total transmitida. O

problema de otimização supracitado foi formulado inicialmente como sendo combinatorial não-linear e posteriormente reformulado para ser linear e misto com variáveis inteiras e reais. Desta forma, a solução ótima deste problema pode ser obtida utilizando-se uma vasta gama de biblioteca computacionais disponíveis sem recorrer a soluções de busca exaustiva. Através de simulações computacionais mostramos a importância da seleção de relays para este cenário e vimos a dependência do desempenho do sistema diante do aumento da quantidade de BRs, usuários e relays.

REFERÊNCIAS

- [1] H. R. Wang, W. T. Liu, C. Y. Hsu, C. H. Peng, e T. S. Kuo, "The Study of Enhance the 4G LTE-A Mobile Network Deployment Efficiency," Networking and Network Applications (NaNA), International Conference IEEE, pp. 222-226, 2016.
- [2] H. G. Myung, J. Lim, e D. J. Goodman, "Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 1, no. 3, pp. 30-38, Setembro 2006, doi: 10.1109/MVT.2006.307304.
- [3] E. E. Tsiropoulou, A. Kapoukakis e S. Papavassiliou, "Uplink Resource Allocation in SC-FDMA Wireless Networks: A Survey and Taxonomy," Computer Networks, vol. 96, pp. 1-28, 2016.
- [4] A. Nosratinia, T. E. Hunter, e A. Hedayat, "Cooperative Communication in Wireless Networks," IEEE Commun. Mag., vol. 42, no. 10, pp. 74-80, Outubro 2004.
- [5] J. Lim, H. G. Myung, K. Oh, e D. J. Goodman, "Channel-Dependent Scheduling of Uplink Single Carrier FDMA Systems," IEEE 64th Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, Setembro 2006, doi: 10.1109/VTTCF.2006.246.
- [6] I. C. Wong, O. Oteri, e W. McCoy, "Optimal Resource Allocation in Uplink SC-FDMA Systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, no. 5, pp. 2161-2165, Maio 2009, doi: 10.1109/TWC.2009.061038.
- [7] A. B. Rodrigues, F. R. M. Lima, T. F. Maciel e F. R. P. Cavalcanti, "Alocação de Recursos para Sistemas SC-FDMA Baseado em Relaxamento de Programação Linear," XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrt, Setembro 2016.
- [8] W. Dang, M. Tao, H. Mu, e J. Huang, "Subcarrier-Pair Based Resource Allocation for Cooperative Multi-Relay OFDM Systems," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 9, no. 5, Maio 2010.
- [9] J. V. Saraiva, C. A. A. Lima, F. R. M. Lima, T. F. Maciel e F. R. P. Cavalcanti, "Seleção de Relays, Pareamento de Subportadoras, e Alocação de Potência para Sistemas Cooperativos," XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrt, Setembro, 2016.
- [10] H. Xin, S. Enchang e Z. Yanhua, "A Method for Cooperative Relay Selection in SC-FDMA Uplink," 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, pp. 1-5, 2011, doi: 10.1109/WCSP.2011.6096678.
- [11] R. Cai, E. Sun and Y. Zhang, "An Efficient Cooperative Relay Selection Scheme for SC-FDMA Systems," 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012), Yantai, pp. 1422-1425, 2012, doi: 10.1109/ICSAI.2012.6223302.
- [12] T. Shi, S. Zhou, e Y. Yao, "Capacity of Single Carrier Systems with Frequency-Domain Equalization," Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless, vol. 2, pp. 429-432, Junho 2004.
- [13] F. R. M. Lima, T. F. Maciel, 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, pp. 6, 2016.
- [14] G. Nemhauser e L. Wolsey, "Integer and Combinatorial Optimization," John Wiley & Sons, 1999.
- [15] IBM, "IBM, ILOG CPLEX Optimizer," [Online]. Disponível em: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>.

³Agradecimentos: Leonardo Paiva e Francisco Rafael Marques Lima gostariam de agradecer pelo apoio financeiro da FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por meio de bolsa de produtividade em pesquisa.