

Seleção de *Relays*, Pareamento de Subportadoras e Alocação de Potência para Sistemas Cooperativos

Juno V. Saraiva, Cibelly A. de A. Lima, F. Rafael M. Lima, Tarcísio F. Maciel e F. Rodrigo P. Cavalcanti

Resumo—Neste artigo estudamos alocação de recursos de rádio para redes cooperativas com a presença de múltiplos *relays* em que a adaptação da taxa de transmissão em relação a qualidade de canal dar-se por um mapeamento discreto. Em especial, realizamos a otimização da taxa de transmissão em um sistema cooperativo através da seleção de *relays*, pareamento de subportadoras e alocação de potência de transmissão. O problema estudado é formulado como um problema de programação linear inteira cuja solução ótima pode ser obtida através de algoritmos conhecidos sob o custo de uma alta complexidade computacional. Motivados por tal fato, propomos uma solução alternativa de baixo custo computacional que apresenta-se como um bom compromisso entre desempenho e complexidade computacional.

Palavras-Chave—seleção de *relays*, pareamento de subportadora, alocação de potência, programação linear inteira.

Abstract—In this paper we study radio resource allocation for cooperative networks with the presence of multiple relays in which the adaptation of the transmitted data rate relative to the channel quality state is given by a discrete mapping. In particular, the optimization of the cooperative system is done through relay selection, subcarrier pairing and transmit power allocation. The studied problem is formulated as an integer linear problem whose optimal solution can be achieved at the cost of high computational complexity. Motivated by this, we propose an alternative and low-complexity solution that achieves a good performance/complexity trade-off.

Keywords—relay selection, subcarrier pairing, power allocation, integer linear program.

I. INTRODUÇÃO

A popularização dos sistemas de comunicações móveis resultou em um aumento na demanda por novos serviços e necessidade de maiores taxas de transmissão de dados. De forma que essa crescente demanda seja atendida, sistemas de comunicação sem fio modernos utilizam, entre outras técnicas, duas importantes tecnologias: multiplexação por divisão de frequências ortogonais ou do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) e a diversidade cooperativa. Tais tecnologias quando combinadas a um gerenciamento de recursos de rádio competente, oferecem um combate eficaz ao desvanecimento de canal, ampliam a área de cobertura

Juno V. Saraiva - Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará (UFC), Sobral-CE, Brasil. Cibelly A. de A. Lima - Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Sobral-CE, Brasil. F. Rafael M. Lima - Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem fio (GTEL) - Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará (UFC), Sobral-CE, Brasil. Tarcísio Ferreira Maciel e Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti - Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem fio (GTEL), Universidade Federal do Ceará, *Campus* do Pici, Fortaleza-CE, Brasil. E-mails: juno_vs@hotmail.com, rafaelm@gtel.ufc.br, maciel@gtel.ufc.br e rodrigo@gtel.ufc.br.

da célula, e provêem ganhos em termos de eficiência espectral/energética [1], [2].

Neste artigo estudamos alocação de recursos de rádio ou do inglês, *Radio Resource Allocation* (RRA) sob a forma de seleção de *relays*, pareamento de subportadoras e alocação de potência para sistemas cooperativos de dois saltos com múltiplos *relays*. O objetivo principal é maximizar a taxa transmitida no enlace entre um nó fonte e um destino. O artigo está organizado conforme explicado a seguir. Na seção II apresentamos uma revisão bibliográfica e as principais contribuições deste artigo. Na seção III mostramos a modelagem do sistema enquanto que na seção IV formulamos o problema estudado neste artigo e discutimos sobre a solução ótima. Na seção V apresentamos um algoritmo sub-ótimo de baixo custo computacional e na seção VI discutimos os resultados obtidos. Finalmente, na seção VII apresentamos as principais conclusões deste estudo.

II. ESTADO DA ARTE E CONTRIBUIÇÕES

Em [3], [4] os autores consideram um sistema cooperativo de dois saltos com um único *relay* e investigam o pareamento de subportadoras e alocação de potência. Em [3] é provado que se for considerado alocação igualitária de potência em ambos os saltos, o pareamento ordenado maximiza a taxa total de dados fonte-destino. O pareamento ordenado consiste em parear a subportadora de maior ganho do primeiro salto com a subportadora de maior ganho do segundo salto e assim por diante. No trabalho [4] os autores provam que o mesmo problema pode ser desacoplado, fazendo com que o pareamento de subportadoras e alocação de potência possam ser estudados separadamente. Outra contribuição de [4] é a proposta de heurísticas para solução do problema de alocação de potência baseadas no algoritmo *Water Filling* que é obtido através de técnicas de otimização convexa [5].

Outros trabalhos generalizaram o cenário cooperativo de dois saltos assumindo a existência de mais de um *relay*. Em [6] os autores consideram que os *relays* empregam o protocolo de encaminhamento amplifica e encaminha ou do inglês, *Amplify and Forward* (AF). O objetivo do estudo consiste em maximizar a taxa total de dados que chega ao destino. São propostos dois algoritmos sub-ótimos de baixo custo computacional. Em [7] os autores estudam conjuntamente alocação de potência e seleção de *relays* mas desprezam o pareamento de subportadoras.

Um ponto comum aos trabalhos apresentados aqui e a grande maioria presente na literatura consiste no uso de um mapeamento contínuo entre a taxa de transmissão e a razão

sinal ruído ou do inglês, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Essa adaptação de taxa em geral segue a curva da capacidade de Shannon que é contínua e logarítmica. Essa consideração facilita o desenvolvimento de soluções para tais problemas pois habilita o uso de toda teoria que trata de otimização de funções contínuas e convexas. Contudo, o mapeamento contínuo não representa a realidade dos sistemas de comunicação móveis. Em sistemas práticos, a adaptação da taxa de transmissão é regida por esquemas finitos e discretos de modulação e codificação ou do inglês, *Modulation and Coding Schemes* (MCSs). Assim, na prática, a função responsável por mapear a SNR em taxa de transmissão é discreta.

A adoção de um mapeamento discreto transforma os problemas de RRA em combinatoriais o que, obviamente, impede o uso de ferramentas matemáticas citadas anteriormente. Uma maneira de tratar problemas inteiros é através da “força bruta” que testa todas as possíveis soluções até encontrar a solução ótima. É claro que dependendo das entradas do problema pode-se ter um excepcional aumento no espaço de busca o que torna essa solução demasiadamente complexa do ponto de vista computacional. Diante do que foi exposto, as principais contribuições do presente artigo são:

- Formulação do problema de alocação de potência, pareamento de subportadoras e seleção de *relays* assumindo mapeamento discreto entre SNR e taxa de dados. O problema original é inteiro e não linear;
- Obtenção da solução ótima do problema através de uma reformulação do problema original para linear e inteiro;
- Proposta de uma solução sub-ótima de baixo custo computacional;
- Análise de desempenho do uso de alocação de potência, pareamento de subportadoras e seleção de *relays* de modo conjunto ou individualizado.

III. MODELAGEM DO PROBLEMA

Consideramos um sistema de comunicação com uma fonte transmissora, K *relays* e um único destino utilizando OFDM. Assumimos que a fonte e o destino estão impossibilitados de comunicar-se diretamente, e portanto precisam de *relays* que encaminhem a informação. Admitimos no total N subportadoras OFDM que podem ser comumente usadas no salto fonte-*relay* (salto 1) e no salto *relay*-destino (salto 2). Assumimos $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ como o conjunto de todas as subportadoras e $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ o conjunto de todos os *relays*. O encaminhamento da informação pelos *relays* ocorre através do protocolo decodifica e encaminha ou do inglês, *Decode and Forward* (DF). Assim, os *relays* primeiramente recebem o sinal de informação, realizam a decodificação e detecção, e finalmente o recodificam para transmissão. A Fig. 1 ilustra o cenário de comunicação cooperativa aqui descrito.

Definimos como pareamento de subportadoras o processo de definir para cada subportadora do salto 1, qual será a subportadora do salto 2 que encaminhará a informação no segundo salto. A fim de evitar possíveis interferências entre os *relays*, cada par de subportadoras pareadas só pode ser assinalado por um único *relay*. Cada *relay*, por outro lado, pode fazer vários pareamentos. Ao processo de definir que *relay* irá realizar o

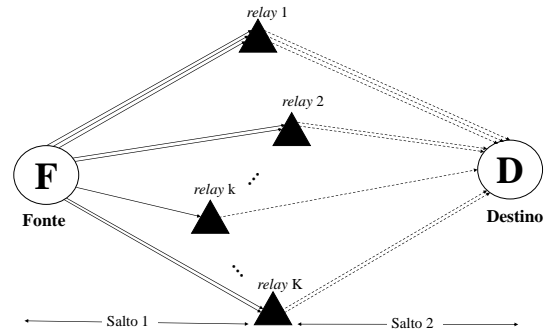


Fig. 1. Cenário de um sistema cooperativo OFDM-DF de dois saltos com múltiplos *relays*.

pareamento de um certo par de subportadoras denominamos seleção de *relays*.

A SNR de uma subportadora n no salto 1 que esteja associada a um *relay* k , $\gamma_{n,k}^s$, e a SNR de uma subportadora q do segundo salto que esteja associada a um *relay* k , $\gamma_{q,k}^r$, são dadas por

$$\gamma_{n,k}^s = \frac{p_n^s \cdot \alpha_{n,k}^s \cdot |h_{n,k}^s|^2}{\sigma^2} \text{ e } \gamma_{q,k}^r = \frac{p_q^r \cdot \alpha_{q,k}^r \cdot |h_{q,k}^r|^2}{\sigma^2}, \quad (1)$$

em que $|h_{n,k}^s|^2$ e $|h_{q,k}^r|^2$ constituem a resposta em frequência da subportadora n do salto 1 e q do salto 2 associada ao *relay* k , respectivamente. p_n^s e p_q^r são as potências alocadas pela fonte na subportadora n do salto 1 e pelos *relays* na subportadora q do salto 2, respectivamente. σ^2 é a potência média do ruído térmico e, por fim, $\alpha_{n,k}^s$ e $\alpha_{q,k}^r$ modelam o efeito da perda de percurso e desvanecimento de longo prazo para subportadora n associada ao *relay* k no salto 1 e para subportadora q associada ao *relay* k no salto 2, respectivamente. Assumimos que P_{total}^s é a potência total disponível na fonte e que P_{total}^k é a potência total disponível no *relay* k .

Seja $f(\cdot)$ a função de adaptação de enlace responsável por mapear a SNR em taxa de dados transmitida em cada subportadora. Essa é uma função discreta que modela os níveis de MCS em uma rede sem fio prática conforme motivado na seção II. Assim, a taxa de dados transmitida em uma subportadora n do salto 1 associada ao *relay* k e uma subportadora q do salto 2 associada ao *relay* k são dadas por $f(\gamma_{n,k}^s)$ e $f(\gamma_{q,k}^r)$, respectivamente.

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 atingido 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 $\gamma^{m+1} > \gamma^m$. Os valores de γ^m e γ^{m+1} são obtidos em geral através de simulações de nível de enlace. 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 . Com isso, definimos $p_{n,m,k}^s$ e $p_{q,m,k}^r$ como a mínima potência da subportadora n do salto 1 e da subportadora q do salto 2 associada ao *relay* k de modo a transmitir no m -ésimo nível de MCS, respectivamente:

$$p_{n,m,k}^s = \frac{\gamma^m \cdot \sigma^2}{\alpha_{n,k}^s \cdot |h_{n,k}^s|^2} \text{ e } p_{q,m,k}^r = \frac{\gamma^m \cdot \sigma^2}{\alpha_{q,k}^r \cdot |h_{q,k}^r|^2}. \quad (2)$$

Definimos as variáveis binárias de otimização como $y_{n,m,k}^s$ e $y_{n,q,m,k}^r$. Assim, $y_{n,m,k}^s$ assume valor 1 quando a n -ésima subportadora do salto 1 transmite no m -ésimo nível de MCS associada ao *relay* k e 0 caso contrário. De modo semelhante, $y_{n,q,m,k}^r$ assume 1 quando a q -ésima subportadora do salto 2 transmite no m -ésimo nível de MCS e está pareada com n -ésima subportadora do salto 1 pelo *relay* k , e 0 caso contrário. Note que quando $y_{n,m,k}^s = 1$ a potência alocada a subportadora n é dada pela equação (2). Um raciocínio análogo vale para quando $y_{n,q,m,k}^r = 1$.

Definimos como r_n^s a taxa transmitida na n -ésima subportadora do salto 1 e $r_{n,q}^r$ como a taxa de dados transmitida na q -ésima subportadora do salto 2 que esteja pareada com a n -ésima subportadora do salto 1. Por fim, consideramos $r_n^{s,q}$ como taxa de dados transmitida sobre o n -ésimo *link*. Assumimos como *link* qualquer par de subportadoras pareadas. Assim, a taxa de dados que chega ao destino por meio de qualquer *link* é dado por $\min(r_n^s, r_{n,q}^r)$ devido ao emprego do protocolo DF [4].

IV. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema estudado neste artigo consiste em maximizar a taxa de dados total da fonte ao destino. A seguir formulamos o problema como um problema de otimização apresentando primeiramente as restrições do problema.

Qualquer subportadora n do salto 1 só pode transmitir em um único nível de MCS e só pode estar associada a um único *relay*:

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,m,k}^s = 1, \quad \forall n \in \mathcal{N}. \quad (3)$$

Qualquer subportadora q do salto 2 só pode transmitir em um único nível de MCS e só pode ser pareada com uma única subportadora do salto 1 por um único *relay*:

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,q,m,k}^r = 1, \quad \forall q \in \mathcal{N}. \quad (4)$$

Qualquer subportadora n do salto 1 só pode ser pareada com uma única subportadora do salto 2, que só pode transmitir em um único nível de MCS e esse pareamento só pode ser feito por um único *relay*:

$$\sum_{q \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,q,m,k}^r = 1, \quad \forall n \in \mathcal{N}. \quad (5)$$

Se uma subportadora n do salto 1 estiver associada a um dado *relay* k , o pareamento dessa subportadora n com alguma subportadora genérica q do salto 2 só pode ser feito por esse mesmo *relay* k :

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} y_{n,m,k}^s - \sum_{q \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} y_{n,q,m,k}^r = 0, \quad \forall n \in \mathcal{N}, \forall k \in \mathcal{K}. \quad (6)$$

O somatório das potências de todas as subportadoras do salto 1 e salto 2 não podem exceder a potência total da fonte e *relays*, respectivamente:

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,m,k}^s \cdot p_{n,m,k}^s &\leq P_{\text{total}}^s, \\ \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{q \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} y_{n,q,m,k}^r \cdot p_{q,m,k}^r &\leq P_{\text{total}}^k \quad \forall k \in \mathcal{K}. \end{aligned} \quad (7)$$

As taxas de dados da n -ésima subportadora do salto 1 e da q -ésima subportadora do salto 2 que esteja pareada com a subportadora n do salto 1 são dadas por:

$$\begin{aligned} r_n^s &= \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,m,k}^s \cdot r_m \quad \forall n \in \mathcal{N}, \\ r_{n,q}^r &= \sum_{q \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,q,m,k}^r \cdot r_m \quad \forall n \in \mathcal{N}. \end{aligned} \quad (8)$$

Portanto, a taxa total de dados que chega ao destino através dos N *links* é dada por:

$$\max_{\{y_{n,m,k}^s, y_{n,q,m,k}^r\}} \left(\sum_{n \in \mathcal{N}} \min\{r_n^s, r_{n,q}^r\} \right). \quad (9)$$

A fim de facilitar a obtenção da solução ótima, devemos linearizar a função objetivo do problema tornando-a linear e habilitando assim, o uso de algoritmos mais eficientes. Para tornar (9) linear, pode-se fazer uso da seguinte técnica: $\max \left(\sum_{\forall i} \min\{A_i, B_i\} \right) \rightarrow \max \left(\sum_{\forall i} \{x_i\} \right)$ sujeito a $x_i \leq A_i$, $x_i \leq B_i \forall i$, onde x_i é uma variável auxiliar usada apenas com o intuito de linearizar o problema. Assim, o problema de otimização a ser resolvido consiste em:

$$\max_{\{y_{n,m,k}^s, y_{n,q,m,k}^r, x_{n,m}\}} \left(\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{n,m} \cdot r_m \right), \quad (10)$$

sujeito a

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{n,m} \cdot r_m \leq \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,m,k}^s \cdot r_m \quad \forall n, \quad (11)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{n,m} \cdot r_m \leq \sum_{q \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,q,m,k}^r \cdot r_m \quad \forall n, \quad (12)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{n,m} = 1 \quad \forall n, \quad (13)$$

além de (3), (4), (5), (6) e (7).

V. SOLUÇÃO SUB-ÓTIMA

A conversão do problema original (não linear) em um problema *Integer Linear Program* (ILP) habilita o uso de algoritmos mais eficientes que o método de força bruta tais como o método *Branch-and-Bound* (BB). Apesar disso, o algoritmo BB possui uma complexidade computacional de pior caso exponencial em termos do número de variáveis e restrições. Portanto, nesta seção propomos uma solução alternativa de complexidade computacional polinomial e, portanto, mais adequada a ser aplicada em aplicações de tempo real.

O algoritmo é ilustrado na Fig. 2. No passo 1, atribuímos 0 ao contador i que tem a função de quantificar o total de pareamentos efetuados. Além disso, os conjuntos \mathcal{S}^s e \mathcal{S}^r que armazenam as subportadoras dos saltos 1 e 2 que ainda podem ser escolhidas para pareamento, respectivamente, são inicializados com o conjunto \mathcal{N} . No passo 2, para cada *relay* k , procura-se a melhor subportadora (maior ganho de

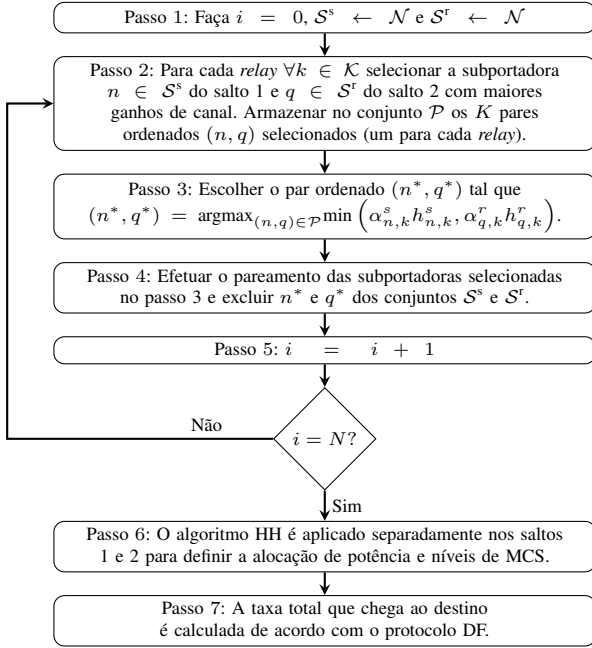


Fig. 2. Fluxograma da solução sub-ótima.

canal) dos saltos 1 e 2 associada a esse *relay*. Os melhores pares de subportadoras para cada *relay* são armazenados no conjunto \mathcal{P} . No passo 3, o melhor pareamento presente no conjunto \mathcal{P} é selecionado a fim de que ele seja estabelecido. O critério para definir-se o melhor pareamento é dado por $\min(\alpha_{n,k}^s h_{n,k}^s, \alpha_{q,k}^r h_{q,k}^r)$ que consiste no ganho de canal equivalente para o protocolo DF. No passo 4 excluímos as subportadoras dos saltos 1 e 2 envolvidas no pareamento escolhido dos conjuntos \mathcal{S}^s e \mathcal{S}^r . Após isso, o contador i é atualizado no passo 5 e o processo repete-se até que todos N pares de subportadoras sejam definidos.

No passo 6, uma vez que temos conhecimento da potência total disponível em cada nó transmissor (fonte e *relays*) bem como os ganhos das subportadoras pareadas, aplicamos o clássico algoritmo de alocação de potência Hughes Hartogs (HH) para definir as potências e os níveis de MCS de todas as subportadoras dos saltos 1 e 2 [8]. A ideia do algoritmo HH é de aumentar o nível de MCS das subportadoras que precisam de menos potência para alcançar o próximo nível de MCS. Este procedimento repete-se de forma iterativa enquanto haja potência de transmissão não alocada e nem todas as subportadoras tenham atingido o nível máximo de MCS. Esse algoritmo primeiramente é aplicado em todas as subportadoras transmitidas pela fonte. Após isso, ele é aplicado no salto 2 nas subportadoras transmitidas por cada *relay*. Por fim, no passo 7, calculamos a taxa total entre a fonte e o destino conforme explicado na seção IV.

VI. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A. Parâmetros de simulação

Assumimos que a potência total disponível em cada *relay* é a fração $1/K$ da potência total disponível na fonte. Isto deve-se ao fato de que em geral os *relays* transmitem em menos

subportadoras que a fonte. Os *relays* são uniformemente distribuídos em uma área quadrada de 0.25 km^2 . No cenário 1 consideramos que essa área está no ponto médio entre a fonte e o destino. No cenário 2 assumimos que o centro dessa área foi deslocado 200 m em direção ao destino. A distância entre fonte e destino é de 1 km. Consideramos 12 subportadoras, 4 *relays* e densidade espectral do ruído de -174 dBm/Hz .

Consideramos $M = 11$ e sem perda de generalidade, assumimos que as taxas de dados de transmissão possíveis em kbps são $r_m \in \{0, 20, 40, \dots, 200\}$, $\forall m \in \mathcal{M}$. Os intervalos de SNR para transmissão de cada MCS foram extraídos através da discretização da curva de Shannon com $\gamma_m = 2^{r_m/B} - 1$ em que $B = 15 \text{ kHz}$ é a banda ocupada por uma subportadora.

Os efeitos de propagação modelados neste artigo são a perda de percurso média [9], o sombreamento log-normal (desvio padrão igual a 8 dB) e o desvanecimento rápido seguindo uma distribuição de Rayleigh. Além disso, assumimos que todos os nós do sistema têm perfeito conhecimento do estado do canal.

A métrica de avaliação considerada é a taxa total de dados dada pela equação (9). Além da solução ótima do problema formulado na seção IV e da proposta sub-ótima ou Proposta Alternativa (PA) presente na seção V, estudamos o desempenho de algumas estratégias particulares originadas do problema principal. Estas estratégias são listadas a seguir:

- 1) Potência igualitária para toda subportadora ou do inglês, *Equal Power Allocation* (EPA): Consiste em fixar a potência de transmissão das subportadoras em P_{total}^s/N . Assim, o problema fica limitado a busca da solução ótima do pareamento e seleção de *relays*.
- 2) Pareamento Fixo (PF): Consideramos que uma subportadora i do salto 1 está, necessariamente, pareada com a subportadora i do salto 2 $\forall i \in \mathcal{N}$. Assim, o problema fica limitado a busca da solução ótima para a alocação de potência e seleção de *relays*.
- 3) Seleção Fixa de *Relays* (SFR): O *relay* 1 recebe as (N/K) primeiras subportadoras, o segundo *relay* recebe da subportadora $(N/K) + 1$ até $2(N/K)$ e assim por diante de tal forma que todos os *relays* recebam a mesma quantidade de subportadoras. Desta forma, o problema limita-se a busca pela alocação de potência e pareamento de subportadoras.¹

Para obter as soluções Ótima, EPA, PF e SFR usamos a biblioteca de resolução de problemas de otimização ILOG CPLEX [10].

B. Avaliação de Resultados

Na Fig. 3 apresentamos a taxa total de dados obtida entre a fonte e o destino versus a potência total disponível na fonte para os algoritmos Ótimo, PA, PF, EPA e SFR no cenário 1. Primeiro podemos observar que a taxa total transmitida aumenta com a potência de transmissão para todos os algoritmos, o que já é esperado, visto que o aumento de potência disponível na fonte e *relays* resulta em um aumento da SNR média do sistema.

Outra observação importante consiste no comportamento das soluções EPA, PF e SFR. A estratégia SFR mostra-se como

¹No cenário de simulação foi considerado que (N/K) seja inteiro.

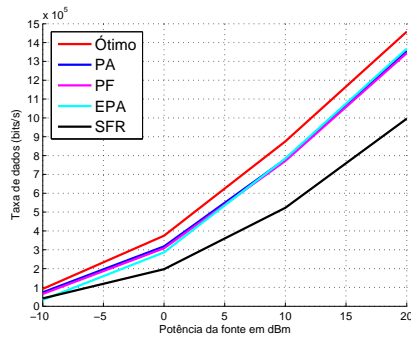


Fig. 3. Taxa total de dados versus a potência disponível na fonte para os algoritmos Ótimo, PA, EPA, PF e SFR no cenário 1.

a pior solução dentre as consideradas enquanto que as soluções PF e EPA possuem um desempenho intermediário em relação à ótima conjunta. Este resultado nos mostra a relevância que a seleção de *relays* possui no cenário cooperativo. A escolha de que *relay* será assinalado a uma dada subportadora influencia diretamente o ganho de canal que essa subportadora irá experimentar. Nas soluções EPA e PF há total liberdade na seleção de *relays* apesar da alocação de potência e pareamento estarem fixos, respectivamente.

Uma última observação a respeito da Fig. 3 consiste no desempenho da solução PA. Podemos observar que esta solução apresenta um desempenho semelhante as estratégias PF e EPA com uma perda de desempenho para solução ótima de aproximadamente 6% para potência de transmissão na fonte de 20 dBm. Se confrontarmos essa perda de desempenho com a complexidade computacional dos algoritmos Ótimo, PA, PF, EPA e SFR, podemos chegar a importantes conclusões. Basicamente, essas soluções são obtidas através do algoritmo BB que soluciona problemas ILP. Portanto, a complexidade computacional destes algoritmos é muito alta (exponencial) para o curto prazo em que alocação de recursos deve ser executada em sistemas práticos (na ordem de milissegundos). No entanto, a solução PA consiste em uma sequência de passos simples que possuem uma complexidade de pior caso polinomial. Portanto, vemos que o algoritmo PA apresenta-se como um bom compromisso entre desempenho e complexidade computacional.

Na Fig. 4 apresentamos a taxa total de dados para os mesmos algoritmos da Fig. 3 no cenário 2 em que os *relays* estão localizados mais próximos do destino. O efeito de deslocar a área na qual os *relays* estão distribuídos em direção ao destino consiste em melhorar artificialmente as SNRs do salto 2. A principal diferença neste cenário consiste em uma melhor distinção entre as soluções PA, EPA e PF. Neste caso a solução PA apresenta uma menor perda de desempenho em relação ao ótimo seguida pela solução PF. Com a melhoria geral das SNRs das subportadoras do salto 2, as funcionalidades adaptativas de pareamento de subportadoras, seleção de *relays* e alocação de potência perdem um pouco de sua relevância e portanto a solução ótima não possui tantos graus de liberdade para apresentar os mesmos ganhos de desempenho sobre a proposta PA como no cenário 1.

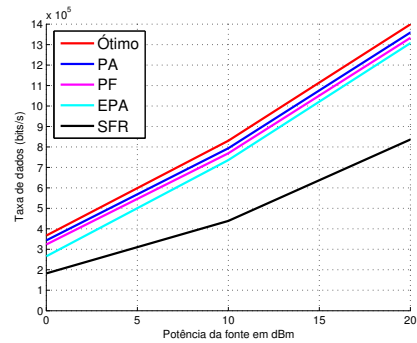


Fig. 4. Taxa total de dados versus a potência disponível na fonte para os algoritmos Ótimo, PA, EPA, PF e SFR no cenário 2.

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo estudamos o problema da maximização da taxa total de dados em um sistema cooperativo com múltiplos *relays*. O referido problema foi formulado como um problema de otimização combinatorial não linear e reformulado para um problema inteiro e linear. Além disso, motivados pela complexidade da solução ótima do problema, propomos uma solução alternativa bem como estratégias baseada na fixação de uma dentre as três estratégias: seleção de *relays*, pareamento de subportadoras e alocação de potência. Através de simulações computacionais, mostramos como as propostas apresentadas se comportam diante da solução ótima. Os resultados mostram primeiramente a relevância que a estratégia de seleção de *relays* possui neste cenário. Outra conclusão importante consiste no bom desempenho apresentado pela solução alternativa proposta neste artigo (especialmente quando os saltos estão desbalanceados) que apresenta-se como um bom compromisso entre desempenho e complexidade.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Nosratinia, T. E. Hunter, e A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 10, pp. 74-80, Out. 2004.
- [2] R. Pabst *et al.*, "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 9, pp. 80-89, Set. 2004.
- [3] M. Herdin, "A Chunk Based OFDM Amplify-and-Forward Relaying Scheme for 4G Mobile Radio Systems". In Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Commun. (ICC), vol. 10, pp. 4507-4512, Jun. 2006.
- [4] J. M. B. Silva Jr *et al.*, "Power Allocation Schemes for Multichannel Two-hop Relaying Systems". Internat. Symp. on Wireless Comm. Syst. (ISWCS), p.356-360, Dez. 2012.
- [5] A. Jeffrey. *Mathematics for Engineers and Scientists*. 5 ed. Boca Raton: Chapman Hall, 928 p., 1996.
- [6] 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.
- [7] T. C. Ng and W. Yu, "Joint optimization of relay strategies and resource allocations in cooperative cellular networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 328-339, Fev. 2007.
- [8] H. Hartogs. "Ensemble Modem Structure for Imperfect Transmission Media". Patent US 4833706, Maio, 1987.
- [9] W. Sun, L. Li, W. Yang e L. Song, "Joint subcarrier pairing, relay selection, and power allocation in OFDM relay systems," *IEEE ICC*, 2011.
- [10] IBM, "IBM ILOG CPLEX Optimizer." [Online]. Available: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>