

Alocação de Recursos em Sistemas Cooperativos para Maximização da Eficiência Energética Sujeita a Restrições de QoS

Juno V. Saraiva, Jair A. de Carvalho, 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 presença de múltiplos repetidores e múltiplos usuários. A alocação de recursos em nosso cenário consiste na seleção de repetidores, pareamento e assinalamento de subportadoras e alocação de potência de transmissão. Em especial, motivados pela demanda por maior eficiência no uso dos recursos energéticos em redes móveis, realizamos a otimização da eficiência energética em um cenário cooperativo sujeito a restrições de qualidade de serviço. Apesar do problema formulado ser inteiro e não linear, aplicamos um método iterativo que retorna a solução ótima. Através de simulações computacionais, apresentamos a eficiência do método apresentado, bem como o impacto de otimizar eficiência energética em redes cooperativas.

Palavras-Chave—alocação de recursos, redes cooperativas, eficiência energética, qualidade de serviço.

Abstract—In this article we study radio resource allocation for cooperative networks with multiple relay nodes and users. Resource allocation in our scenario is composed of relay selection, subcarrier pairing and assignment as well as transmit power allocation. Motivated by the increased concern about energy resource efficiency, we propose the energy efficiency optimization in a cooperative scenario subject to quality of service constraints. Although the formulated problem is integer and non linear, we managed to optimally solve the problem by applying an iterative algorithm. Through computational simulations, we show the efficiency of the presented method, as well as the impact of optimizing energy efficiency on cooperative networks.

Keywords—resource allocation, cooperative networks, energy efficiency, quality of service.

I. INTRODUÇÃO

O conceito de redes cooperativas baseia-se na cooperação entre os nós das redes de comunicação a fim de que a informação seja transmitida para o destino com uma maior confiabilidade. Este tipo de tecnologia rompe com o antigo paradigma das redes móveis em que a transmissão ocorre de um nó fonte para um nó destino. Em redes cooperativas, a comunicação entre um nó fonte transmissor e um nó destino receptor pode ser auxiliada por um ou mais nós repetidores. Diversos benefícios podem ser obtidos quando se usa

Juno V. Saraiva e Jair A. de Carvalho - Engenharia de Computação, Universidade Federal do Ceará (UFC), Sobral-CE, Brasil. F. Rafael M. Lima - Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem fio (GTEL) - Engenharia de 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, jair.alves.carvalho@gmail.com, {rafaelm, maciel, rodrigo}@gtel.ufc.br.

comunicação cooperativa em redes móveis, entre eles ganhos em termos de Eficiência Energética (EE) [1].

Apesar da importância da obtenção de altas taxas de transmissão buscadas incessantemente pelas diversas gerações das comunicações móveis, atualmente, observa-se uma crescente demanda também pelo uso mais eficiente dos recursos energéticos. Recentemente, o custo de energia e sua contribuição na emissão global de dióxido de carbono estão surgindo como grandes preocupações em diversas indústrias, incluindo a de telecomunicações. Não coincidentemente, EE consiste em um dos principais pilares da Quinta Geração (5G) das comunicações móveis prevista para ser implantada em 2020. Contudo, a necessidade por maiores taxas de dados em geral requer um maior consumo de potência ou energia. Consequentemente, a maior preocupação da atual e próximas gerações de comunicação sem fio é reduzir o uso de energia, mas sem comprometer a qualidade de serviço, ou do inglês, *Quality of Service* (QoS) [2].

A estrutura deste artigo é apresentada 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 não linear estudado neste artigo e mostramos como encontrar sua solução ótima. Na seção V discutimos os resultados obtidos. Finalmente, na seção VI apresentamos as principais conclusões deste estudo.

II. ESTADO DA ARTE E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Embora o uso eficiente de energia seja considerado bastante conveniente nos padrões de comunicações atuais, é comum na literatura estudos em redes sem fio que desconsideram EE. Em sistemas OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) cooperativos, por exemplo, esquemas de alocação de recursos para puramente maximizar a eficiência espectral têm sido intensamente estudados na literatura como em [3] e [4]. Um esquema para maximizar a taxa total de dados em uma rede LTE-A cooperativa é mostrado em [3], porém os autores consideram fixo o pareamento de subportadoras e a seleção de repetidores. A maximização da taxa de dados assumindo pareamento de subportadoras e seleção de repetidores é estudada em um cenário OFDMA cooperativo com protocolo decodificação e encaminha ou do inglês, DF (*Decode-and-Forward*) em [4].

Um dos primeiros esforços em direção ao uso mais eficiente da energia em sistemas sem fio consistiu na formulação do problema de minimização da potência total transmitida

sujeita a restrições de QoS em [5]. Há várias métricas de EE que dependem, principalmente, do sistema empregado e suas características. Em cenários urbanos, em que o tráfego de dados é considerável, a métrica mais adequada de EE consiste na razão entre a taxa de dados oferecida em *bits* por segundo pela potência média consumida [6]. Esta será a métrica considerada neste trabalho. Independente das métricas utilizadas para contabilizar EE, restrições de QoS também devem ser consideradas.

Em uma rede não cooperativa a EE é estudada em [7] e [8]. Em [7] é estudado o impacto de diferentes métricas de EE em um problema de satisfação enquanto que em [8] é apresentada uma abordagem mais simples de como obter a maximização da EE em um cenário OFDMA multi usuário. Um método que pode ser usado para melhorar a EE de uma rede de repetidores foi proposto em [9]. O método descrito no artigo visa otimizar a localização dos repetidores em prol de melhores resultados de EE. Em [10], a EE é estudada em um sistema cooperativo OFDMA com múltiplos repetidores e usuários. No artigo é estudado principalmente o compromisso entre eficiência espectral e EE. Esse compromisso é estudado em relação ao aumento do número de repetidores e em relação ao aumento da potência do circuito.

Em geral, adaptação de enlace pode ser representada por curvas da taxa de dados de transmissão em função da razão sinal ruído ou do inglês, SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Considerar contínua a curva de adaptação da taxa de dados em função da SNR é algo bastante comum na literatura. Contudo, em redes práticas, o conjunto de taxas de transmissão possíveis são discretas e portanto, ao considerar uma curva de adaptação de taxa contínua perde-se o apelo prático. Neste artigo, assumimos que a adaptação da taxa de transmissão é regida por esquemas finitos e discretos de modulação e codificação, ou do inglês MCS (*Modulation and Coding Scheme*). No entanto, adotar um mapeamento discreto pode deixar o problema mais complexo. Exceto em [4] e [7], todos os outros trabalhos aqui citados consideram um mapeamento contínuo entre taxas de dados e SNR. Porém, esses dois trabalhos ou não abordam EE [4], ou não consideram o cenário cooperativo [7].

Neste artigo, estudamos alocação de recursos de rádio ou do inglês, RRA (*Radio Resource Allocation*) sob a forma de seleção de repetidores, pareamento e assinalamento de subportadoras e alocação de potência para sistemas cooperativos de dois saltos com múltiplos repetidores e usuários. O objetivo principal é maximizar a EE da rede sujeita a restrições de satisfação de QoS assumindo MCSs discretas. Propomos a solução ótima para o problema estudado e realizamos uma análise de desempenho de forma a identificar importantes propriedades e compromissos dentro do contexto de EE.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

Consideramos um sistema de comunicação com uma fonte transmissora, K repetidores e J UEs, do inglês, *User Equipments*, utilizando OFDMA. Assumimos que a fonte e os UEs estão impossibilitados de comunicar-se diretamente, e portanto precisam de repetidores que encaminhem a informação. Uma vez que um dado repetidor recebe a informação do nó fonte,

ele a encaminha diretamente para o UE. Além disso, os repetidores operam como estações móveis e, por isso, a economia de energia nesses terminais é essencial. Admitimos no total N subportadoras OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que podem ser comumente usadas no salto fonte-repetidor (salto 1) e no salto repetidor-UE (salto 2). Os repetidores operam no modo *half-duplex* e o processo de transmissão de informação ocorre em dois *slots* de tempo, em que no primeiro ocorre a transmissão do nó fonte para os repetidores usando N subportadoras e depois, no segundo *slot* de tempo, ocorre o encaminhamento da informação para os UEs usando as mesmas N subportadoras. Assumimos $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ como o conjunto de todas as subportadoras, $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ o conjunto de todos os repetidores e $\mathcal{J} = \{1, \dots, J\}$ o conjunto de todos os UEs. O encaminhamento da informação pelos repetidores ocorre através do protocolo DF. Assim, os repetidores primeiramente recebem o sinal de informação, realizam a decodificação e detecção, e finalmente o recodificam para transmissão.

Assumimos como *pareamento de subportadoras* o processo de definir para cada subportadora do salto 1, a subportadora do salto 2 correspondente que encaminhará a informação no segundo salto. O *assinalamento de subportadoras* consiste em atribuir uma subportadora q do salto 2 a um UE j . A fim de evitar possíveis interferências entre os repetidores, cada subportadora dos saltos 1 e 2 somente podem estar associadas a um único repetidor ao mesmo tempo. Cada repetidor, por outro lado, pode fazer vários pareamentos simultâneos. Ao processo de definir que repetidor irá realizar o pareamento de um certo par de subportadoras denominamos *seleção de repetidores*.

A SNR de uma subportadora n no salto 1 que esteja associada a um repetidor k , $\gamma_{n,k}^s$, e a SNR de uma subportadora q do salto 2 que esteja associada a um repetidor k e assinalada a um UE j , $\gamma_{q,k,j}^r$, são dadas por

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

em que $|h_{n,k}^s|^2$ e $|h_{q,k,j}^r|^2$ representam o quadrado da magnitude da resposta complexa em frequência da subportadora n do salto 1 que está associada ao repetidor k e da subportadora q do salto 2 que está associada ao repetidor k e atribuída ao UE j , respectivamente. p_n^s e p_q^r são as potências alocadas pela fonte na subportadora n do salto 1 e pelo repetidor k associado a subportadora q do salto 2, respectivamente. σ^2 é a potência média do ruído térmico e, por fim, $\alpha_{n,k}^s$ e $\alpha_{q,k,j}^r$ modelam o efeito da perda de percurso e desvanecimento de longo prazo para subportadora n associada ao repetidor k no salto 1 e para subportadora q associada ao repetidor k e assinalada ao UE j 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 repetidor 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 repetidor k e uma subportadora q do salto 2 associada ao repetidor k e assinalada ao UE j são dadas por $f(\gamma_{n,k}^s)$ e $f(\gamma_{q,k,j}^r)$, 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 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, 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 $p_{q,m,k,j}^r$ como a mínima potência da subportadora n do salto 1 associada ao repetidor k , e da subportadora q do salto 2 associada ao repetidor k e assinalada ao UE j de modo a transmitir no m -ésimo nível de MCS, respectivamente:

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

Definimos as variáveis binárias de otimização como $y_{n,m,k}^s$ e $y_{q,m,k,j}^r$. 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 repetidor k , e 0 caso contrário. De modo semelhante, $y_{q,m,k,j}^r$ assume 1 quando a q -ésima subportadora do salto 2 assinalada ao UE j transmite no m -ésimo nível de MCS e está pareada com n -ésima subportadora do salto 1 pelo repetidor 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 $y_{q,m,k,j}^r = 1$.

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. Assumimos como *link* qualquer par de subportadoras pareadas. Assim, a taxa de dados que chega ao UE por meio de qualquer *link* é dado por $\min\{r_n^s, r_{n,q}^r\}$ devido ao emprego do protocolo DF [10].

IV. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO ÓTIMA

Nesta seção apresentaremos o Problema de Maximização da Eficiência Energética (PMAEE) que será estudado no cenário que foi descrito. Inicialmente, formulamos o PMAEE como um problema de otimização apresentando as restrições necessárias ao problema.

Como primeira restrição, temos que uma subportadora n do salto 1 só transmite em um único nível de MCS e só pode se associar a um único repetidor:

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

Além disso, a subportadora q do salto 2 só pode ser assinalada a um único UE j , transmitir em um único nível de MCS e também só pode ser pareada com uma única subportadora do salto 1 por um único repetidor. Uma subportadora n do salto 1 também só pode ser pareada a uma única subportadora q do salto 2 por um único repetidor. Essas restrições são mostradas em (4).

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

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

$$\begin{aligned} \sum_{m \in \mathcal{M}} y_{n,m,k}^s - \sum_{q \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}} y_{n,q,m,k,j}^r &= 0, \\ \forall n \in \mathcal{N}, \forall k \in \mathcal{K}. \end{aligned} \quad (5)$$

Quanto aos recursos energéticos do sistema, temos que o somatório das potências de transmissão de todas as subportadoras do salto 1 não pode exceder a potência total disponível na fonte, P_{total}^s e, analogamente, o somatório das potências de transmissão de todas as subportadoras q do salto 2 que estejam associadas a um dado repetidor k não pode exceder a potência disponível nesse repetidor k , P_{total}^k . Essas restrições são mostradas em (6). A potência total consumida pelo sistema cooperativo na transmissão, P_{total} , é mostrada em (7).

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,m,k}^s \cdot p_{n,m,k}^s &\leq P_{\text{total}}^s, \\ \sum_{n,q \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}} y_{n,q,m,k,j}^r \cdot p_{q,m,k,j}^r &\leq P_{\text{total}}^k \quad \forall k \in \mathcal{K}. \end{aligned} \quad (6)$$

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

As taxas de dados da n -ésima subportadora do salto 1, r_n^s , e da q -ésima subportadora do salto 2 que esteja pareada com a subportadora n do salto 1, $r_{n,q}^r$, são mostradas em (8). Com isso, apresentamos em (9) a taxa total de dados que, de fato, chega aos UEs através dos N links.

$$r_n^s = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} y_{n,m,k}^s \cdot r_m \quad \forall n \in \mathcal{N}, \quad (8)$$

$$r_{n,q}^r = \sum_{q \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{J}} y_{n,q,m,k,j}^r \cdot r_m \quad \forall n \in \mathcal{N}.$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} \min\{r_n^s, r_{n,q}^r\}. \quad (9)$$

Podemos reescrever (9) através da seguinte técnica: $\sum_{\forall i} \min\{A_i, B_i\} \rightarrow \sum_{\forall i} \{x_i\}$ sujeito a $x_i \leq A_i$, $x_i \leq B_i$ $\forall i$, em que x_i é uma variável auxiliar usada apenas para linearizar (9). Dessa forma, a taxa total de dados é $\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_{n,m,j} \cdot r_m$, desde que:

$$\begin{aligned} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_{n,m,j} \cdot r_m &\leq r_n^s \quad \forall n \in \mathcal{N}, \\ \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_{n,m,j} \cdot r_m &\leq r_{n,q}^r \quad \forall n \in \mathcal{N}, \\ \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_{n,m,j} &= 1 \quad \forall n \in \mathcal{N}. \end{aligned} \quad (10)$$

Conforme já comentado, a EE pode ser definida como o número de *bits* por segundo transmitidos do nó fonte para os UEs por unidade de potência utilizada, que é igual a soma total das taxas obtidas em cada *link* por unidade de potência total consumida. A potência total consumida não inclui somente a potência total de transmissão, mas também a potência consumida no circuito da fonte e repetidores. Sem perda de generalidade, assumimos que a potência total consumida no circuito da fonte e dos repetidores é p_c . Podemos assumir o valor de p_c constante independentemente das variáveis do problema [8], [10]. Assim, temos o problema de maximização da EE no sistema cooperativo como:

$$\max_{\substack{y_{n,m,k}^s, y_{n,q,m,k,j}^r \\ x_{n,m,j}}} \left\{ \frac{\sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}} x_{n,m,j} \cdot r_m}{p_c + P_{\text{total}}} \right\}, \quad (11a)$$

sujeito a

$$y_{n,m,k}^s, y_{n,q,m,k,j}^r \text{ e } x_{n,m,j} \in \{0, 1\}, \quad (11b)$$

$$\forall n, q \in \mathcal{N}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall j \in \mathcal{J}, \quad (11c)$$

além de (3), (4), (5), (6) e (10),

em que a restrição (11c) consiste em uma restrição de QoS que garante uma taxa mínima, ξ_j , exigida pelo UE j .

Problemas do tipo (11) pertencem a classe de problemas inteiros não lineares. De fato, problemas não lineares são em geral mais difíceis de resolver do que os problemas lineares. Isso, sem dúvida, justifica a escassez de bons métodos para resolver problemas na forma de (11). Dessa forma, apresentamos o método descrito no Algoritmo 1 que pode ser usado para resolver de forma ótima problemas do tipo (11) sem a necessidade de inserir variáveis auxiliares. Para isso, primeiramente, podemos observar que o problema (11) pode ser escrito da seguinte forma:

$$\max_v \frac{\mathbf{p}^T v}{\mathbf{q}^T v}, \quad (12a)$$

sujeito a

$$v \in \mathbf{V} = \{v \mid \mathbf{A}v \leq \mathbf{b} \text{ e } \mathbf{\Lambda}v = \mathbf{d}, v \in \{0, 1\}\}, \quad (12b)$$

em que v engloba todas as variáveis de otimização do problema, enquanto que \mathbf{V} abrange todas soluções viáveis do problema que são definidas pelas restrições do problema. As matrizes \mathbf{p} , \mathbf{q} , \mathbf{A} , \mathbf{b} , $\mathbf{\Lambda}$ e \mathbf{d} são modeladas em prol de representar as componentes lineares do problema na forma matricial. $(\cdot)^T$ é operador matricial de transposição.

O Algoritmo 1 foi proposto em [11] fora do contexto de telecomunicações. Esse método encontra a solução ótima de (12) através da resolução de uma sequência de subproblemas inteiros e lineares. Isso, de fato, reduz o custo em encontrar a solução ótima para problemas na forma de (12). Além disso, a convergência para solução ótima final é garantida, caso o espaço de busca seja limitado [11]; algo que ocorre naturalmente no problema (11).

De acordo com o método descrito no Algoritmo 1, primeiramente temos a inicialização da variável π na linha 2 que recebe

Algoritmo 1: Método para solução de problemas na forma de (12)

```

1 início
2    $\pi = \mu$ 
3    $v^* = \max_v \{ \mathbf{p}^T v - \pi \cdot \mathbf{q}^T v \}$ , sujeito a  $v \in \mathbf{V}$ .
4   repita
5      $\pi = \frac{\mathbf{p}^T v^*}{\mathbf{q}^T v^*}$ 
6      $v^* = \max_v \{ \mathbf{p}^T v - \pi \cdot \mathbf{q}^T v \}$ , sujeito a  $v \in \mathbf{V}$ .
7   até  $|\mathbf{p}^T v^* - \pi \cdot \mathbf{q}^T v^*| \leq \epsilon$ ;
8   retorna  $v^*$ 
9 fim
    
```

um valor inicial μ . Esse valor é utilizado no subproblema inteiro e linear presente na linha 3 cuja solução ótima é v^* . Logo após, o valor de π é substituído na linha 5 e uma nova solução ótima, v^* , é encontrada até que $|\mathbf{p}^T v^* - \pi \cdot \mathbf{q}^T v^*| \leq \epsilon$, em que ϵ tende a zero. No fim, é retornado a solução ótima v^* .

V. RESULTADOS

A fim de entender o impacto da otimização da EE em redes cooperativas, apresentamos nesta seção uma análise através de simulações computacionais no cenário descrito. Para resolução numérica dos problemas estudados e obtenção das soluções ótimas fazemos uso da biblioteca IBM ILOG CPLEX [12].

A. Parâmetros e Características de Simulação

Assumimos que a potência total disponível em cada repetidor é igual a potência total disponível na fonte. Cada nó (repetidores e fonte) tem uma potência individual de 30 dBm. Os repetidores são uniformemente distribuídos em uma área quadrada de 0.25 km² situada no ponto médio entre a fonte e os UEs. A distância entre fonte e o centro da área em que estão os UEs é de 1.5 km. Consideramos 64 subportadoras, 3 repetidores, 5 UEs e densidade espectral do ruído de -174 dBm/Hz.

Consideramos 11 níveis de MCSs 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 $B = 15$ kHz é a banda ocupada por uma subportadora [10]. Os efeitos de propagação modelados neste artigo são a perda de percurso média [13], o sombreamento log-normal (desvio padrão igual a 8 dB) e o desvanecimento rápido seguindo uma distribuição Rayleigh. Além disso, assumimos que todos os nós do sistema têm perfeito conhecimento do estado do canal.

Como algoritmo de comparação consideraremos a solução do problema de minimização da potência cuja função objetivo é apresentada na equação (7) sujeito às mesmas restrições assumidas em nosso problema, isto é, (3)-(6), (10), (11b) e (11c). Denominaremos PMiP como a solução ótima deste problema nos gráficos a seguir.

B. Avaliação de Resultados

Na Fig. 1 temos a EE em função do número de iterações até a convergência para solução ótima do problema (11) para

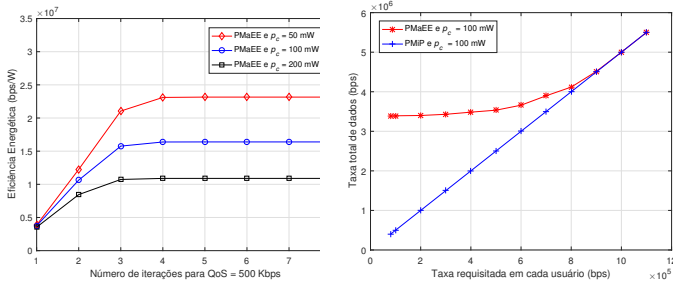


Fig. 1. Eficiência energética de PMAEE versus o número de iterações. Fig. 2. Taxa total de dados de PMAEE e PMiP versus QoS dos usuários.

um valor fixo de QoS. Primeiramente, podemos observar que a convergência do Algoritmo 1 é atingida para diferentes valores de p_c . Além disso, pouquíssimas iterações foram, de fato, necessárias até a convergência para solução ótima o que mostra a eficácia do Algoritmo 1 para problemas na forma de (11). Outra observação que podemos retirar dessa figura é a sensibilidade da EE em relação a potência do circuito, p_c , visto que à medida que aumentamos os valores de p_c ocorre um significativo prejuízo em termos EE para o sistema. Isso mostra que a EE é uma função decrescente em relação a variável p_c .

Nas Figs. 2, 3 e 4 podemos observar as vantagens no uso de métricas de EE em problemas de RRA. Na Fig. 2, vemos que o problema PMAEE tende a entregar taxas de dados maiores que o QoS requisitado pelos UEs o que não ocorre no problema PMiP que simplesmente satisfaz o QoS exigido por cada UE. Podemos notar que essas taxas maiores atingidas pelo problema PMAEE custaram um leve aumento de potência transmitida de acordo com a Fig. 3. De fato, o comportamento das Figs. 2 e 3 reflete na Fig. 4 que mostra que o aumento de potência na solução PMAEE é compensado pelo aumento da taxa total de dados entregue aos UEs, revelando que a relação custo-benefício entre taxa e energia é vantajosa para pequenos e médios níveis de QoS. Porém, observe que o problema PMAEE converge para o problema PMiP à medida que se tem altos níveis de QoS exigidos pelos UEs. Nesses níveis, aumentar a potência transmitida em prol de maiores taxas de dados é uma desvantagem do ponto de vista energético do sistema. Portanto, para altos níveis de QoS a EE é atingida basicamente minimizando a potência transmitida. Sendo assim, apenas para baixos e médios níveis de QoS há vantagem em considerar métricas de EE.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo estudamos o problema da maximização da eficiência energética em um cenário cooperativo com múltiplos repetidores e usuários com restrições de QoS. O referido problema foi formulado como um problema inteiro não linear. A solução desse problema foi obtida através de um método que garante encontrar a solução ótima resolvendo uma sequência de subproblemas inteiros e lineares. Os problemas inteiros e lineares obtidos foram resolvidos pelo método BB (Branch and Bound). Através de simulações computacionais, mostramos a aplicabilidade do método apresentado. Além disso, mostramos que o problema PMAEE se mostrou vantajoso para pequenos

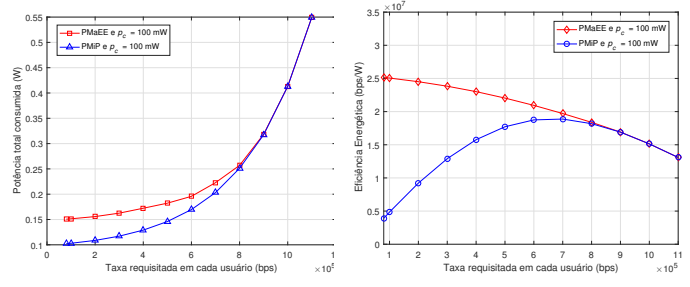


Fig. 3. Potência total consumida por PMAEE e PMiP versus QoS dos usuários. Fig. 4. Eficiência energética de PMAEE e PMiP versus QoS dos usuários.

e médios níveis de QoS, porém para altos níveis os problemas PMAEE e PMiP tornam-se semelhantes e, portanto, a EE do sistema pode ser obtida mais facilmente através do problema linear PMiP consideravelmente menos complexo que o problema não linear PMAEE.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FUNCAP e ao Governo do Estado do Ceará pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Erol-Kantarci e H. T. Mouftah, "Energy-efficient information and communication infrastructures in the smart grid: A survey on interactions and open issues," IEEE Communications Surveys v. 17, pp. 179–197, 2015.
- [2] A. Abrol e R. K. Jha, "Power Optimization in 5G Networks: A Step Towards GrEEen Communication," IEEE Access, 2016.
- [3] X. Zhang, X. S. Shen e L-L. Xie, "Joint subcarrier and power allocation for cooperative communications in LTE-Advanced networks," IEEE Transactions on Wireless Communications v. 13, pp. 658–668, 2014.
- [4] 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 e Processamento de Sinais, 2016.
- [5] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Lataief e R. D. Murch, "Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation," IEEE Journal on selected areas in communications v. 17, pp. 1747–1758, 1999.
- [6] G. Wu, C. Yang, S. Li e G. Y. Li, "Recent advances in energy-efficient networks and their application in 5G systems," IEEE Wireless Communications v. 22, pp. 145–151, 2015.
- [7] W. V. F. Maurício, F. R. M. Lima, T. F. Maciel e F. R. P. Cavalcanti, "Alocação de Recursos para Maximização da EE Sujeita a Restrições de Satisfação," XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2016.
- [8] C. Zarakovitis e Q. Ni, "Maximising energy efficiency in multi-user multi-carrier broadband wireless systems: convex relaxation and global optimisation techniques," IEEE Transactions on Vehicular Technology v. 65, 2016.
- [9] M. I. Khalil, S. M. Berber e K. W. Sowerby, "Energy efficiency and spectrum efficiency balance of wireless relay networks," IEEE (ICCSN), pp. 397–401, 2016.
- [10] Z. Song, Q. Ni, K. Navaie, S. Hou, S. Wu e X. Sun, "On the spectral-energy efficiency and rate fairness tradeoff in relay-aided cooperative OFDMA systems," IEEE Transactions on Wireless Communications v. 15, pp. 6342–6355, 2016.
- [11] Y. Anzai, "On integer fractional programming," Journal of the Operations Research Society of Japan, 1974.
- [12] IBM, "IBM ILOG CPLEX Optimizer. <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>," 2009.
- [13] W. Sun, L. Li, W. Yang e L. Song, "Joint subcarrier pairing, relay selection and power allocation in OFDM relay systems," IEEE International Conference on Communications, pp. 1–5, 2011.