Maximização da Satisfação em Sistemas Cooperativos com Restrições de QoS

Alexandre M. Pessoa*, Cibelly A. A. Lima†, F. Rafael M. Lima*

***Resumo*— Comunicação cooperativa é uma tecnologia fundamental para redes modernas. Essa tecnologia associada a algoritmos de alocação de recursos têm potencial de fornecer elevados ganhos de desempenho em termos de cobertura, eficiência espectral e satisfação. Trabalhos anteriores na literatura estudaram problemas de maximização da eficiência espectral sem considerar restrições de satisfação para redes cooperativas. Restrições de satisfação de usuários foram consideradas, entretanto, para redes de topologias convencionais. Neste trabalho, propomos um novo problema que consiste em maximizar a quantidade de usuários satisfeitos com restrições de QoS (*Quality of Service*) em redes cooperativas. Este problema é resolvido de forma ótima com alta complexidade computacional e de forma subótima com ganhos em complexidade computacional e de eficiência energética.**

***Palavras-Chave*— Pareamento de subportadoras, alocação de potência, comunicações cooperativas, qualidade de serviço.**

***Abstract*— Cooperative communications is a relevant technology for modern networks. The association of this technology together with efficient resource allocation have the potential to achieve performance gains in terms of coverage, spectral efficiency and satisfaction. Previous works have studied the maximization of spectral efficiency without satisfaction constraints for cooperative networks. On the other hand, maximization of user satisfaction have been studied for non cooperative networks. In this work we propose a new resource allocation problem for maximizing the number of satisfied users in a cooperative system. This problem is optimally solved at the cost of a high computational complexity, and suboptimally solved with reduced complexity and energy efficiency gains.**

***Keywords*— Subcarrier matching, power allocation, cooperative communications, quality of service.**

I. Introdução

O conceito de comunicações cooperativas consiste em um importante componente das redes heterogêneas que fazem parte do padrão 4G (4^{th} *Generation*) e estima-se que esta tecnologia irá compor o padrão 5G (5^{th} *Generation*). Redes cooperativas são capazes de proporcionar ganhos de diversidade espacial e aumento na área de cobertura, reduzindo a interferência e melhorando a eficiência espectral [1].

O potencial de cooperação entre os nós da rede permite novos graus de liberdade na alocação de recursos, especialmente quando a técnica OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) é empregada. Portanto, os ganhos provenientes das comunicações cooperativas são melhores explorados se eficientes técnicas de RRA (*Radio Resource Allocation*) forem implementadas [2].

*Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará, Sobral, Brasil. †Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Sobral, Brasil. Emails: {alexandremtspss,cibellyazevedo,frmlrafael}@gmail.com.

Alocação de potência e assinalamento de subportadoras compreendem os dois principais recursos otimizados por RRA em redes cooperativas. Devido a crescente melhora nos sistemas de comunicações modernos também passa-se a considerar restrições QoS (*Quality of Service*) nos problemas envolvendo RRA. Estas restrições geralmente são referentes a um valor mínimo atingido pela taxa de dados em cada usuário do sistema e tornam os problemas de RRA relativamente mais complexos.

Alocação de potência e atribuição de subportadoras foram estudadas em [3] no contexto de redes cooperativas. Nesse artigo, os autores apresentam o conceito de *subcarrier pairing/matching* que consiste em associar as subportadoras do primeiro salto com as do salto seguinte. Neste caso, os dados devem ser transmitidos ao longo de cada salto através dos pares de subportadoras que foram emparelhadas (*matching*). Os autores mostram que a alocação de potência e o emparelhamento de subportadoras possibilitam ganhos de desempenho elevados ao sistema.

O trabalho [4] aborda o problema de maximização da taxa total em sistemas cooperativos sem alocação de potência adaptativa e mostra que o emparelhamento ordenado de acordo com os ganhos de canal de cada salto é ótimo. A alocação de potência e emparelhamento de subportadoras conjuntamente foi primeiramente resolvido por [5] em que foi considerada uma restrição global de potência para a fonte e para o repetidor. Os autores demostram que os problemas de alocação de potência e emparelhamento de subportadoras podem ser resolvidos separadamente sem perda de otimalidade. Os autores demonstram que o emparelhamento ordenado de subportadoras é ótimo enquanto que o esquema de alocação de potência é resolvido pelo algoritmo *water filling*. O artigo [6] considera o mesmo problema que [5] mas com uma abordagem mais realista ao empregar restrições individuais de potência em cada nó do sistema.

Uma constante preocupação de operadoras de sistemas celulares consiste em manter a base de usuários satisfeitos com o QoS provido diminuindo assim a migração de seus usuários para outras operadoras ou do inglês, *churn*. A maximização da satisfação já foi estudada para redes com topologia convencional (sem cooperação). Os trabalhos [7], [8], [9] são exemplos de artigos que proporam soluções para esse tipo de problema. Contudo, os algoritmos apresentados nestes artigos são incompatíveis com o cenário cooperativo.

Motivado por tal fato, estudamos neste artigo o problema de maximização do número de usuários satisfeitos em sistemas cooperativos OFDMA de dois saltos. O restante do artigo está organizado da seguinte forma: na seção II nós apresentamos o

modelo do sistema em estudo. Na seção III nós formulamos o problema de otimização não-linear e apresentamos a solução ótima. Na seção IV nós propomos um algoritmo de baixa complexidade computacional. Na seção V nós mostramos os resultados e, finalmente, na seção VI apresentamos as principais conclusões.

II. Modelagem do Sistema

O cenário considerado é mostrado na Fig. 1 e consiste em um sistema cooperativo de dois saltos contendo uma fonte com potência de transmissão $P^{\mathrm{s}}_{\mathrm{tot}}$, um repetidor com potência de transmissão $P^{\mathrm{r}}_{\mathrm{tot}}$ e um conjunto $\mathcal{J} = \{1, 2, \ldots, J\}$ de usuários ou nós destino. Além disso, o sistema possui um conjunto $\mathcal{N} = \{1, 2, \ldots, N\}$ de subportadoras OFDMA que serão utilizadas para transmitir dados da fonte para os J usuários por meio do repetidor. A transmissão de dados ocorre em dois *slots* de tempo distintos de modo que no primeiro *slot* de tempo as N subportadoras são utilizadas para transmitir dados da fonte para o repetidor e no *slot* de tempo seguinte as N subportadoras serão reutilizadas para transmitir dados do repetidor para os J usuários. As variáveis $\mathcal{P}^{\mathrm{s}}_n$ e $\mathcal{P}^{\mathrm{r}}_q$, $\forall (n, q) \in \mathcal{N}$, denotam as potências alocadas para as subportadoras n e q nos saltos 1 (fonte-repetidor) e 2 (repetidor-destinos), respectivamente. Nós assumimos que todas as subportadoras do sistema experimentam desvanecimento *Rayleigh* e que a fonte e o repetidor tem perfeito conhecimento de estado do canal ou CSI (*Channel State Information*).

Definimos o ganho de canal normalizado pela potência média do ruído na subportadora $n \in \mathcal{N}$ do salto 1 e na subportadora $q \in \mathcal{N}$ do salto 2 associada ao usuário $j \in \mathcal{J}$ como $g^{\mathrm{s}}_n \equiv \frac{|h^{\mathrm{s}}_n|^2}{\sigma^2}$ e $g^{\mathrm{r}}_{q,j} \equiv \frac{|h^{\mathrm{r}}_{q,j}|^2}{\sigma^2}$, respectivamente. h^{s}_n e $h^{\mathrm{r}}_{q,j}$ representam a resposta em frequência da subportadora $n \in \mathcal{N}$ do primeiro salto, e da subportadora $q \in \mathcal{N}$ do segundo salto com relação ao usuário $j \in \mathcal{J}$. Por fim, σ^2 representa a potência média do ruído.

Os bits transmitidos em cada subportadora do primeiro salto devem ser retransmitidos em correspondência (emparelhadas) com as subportadoras do segundo salto em uma relação biunívoca (um para um). Dessa forma, definimos o ES (Emparelhamento de Subportadora) como a associação de cada subportadora do salto 1 com uma única subportadora do salto 2. Como exemplo, vemos na Fig. 1 que as subportadoras 1, 2, $N-1$ e N do primeiro salto foram emparelhadas com as subportadoras 2, 1, N e $N-1$ do segundo salto, respectivamente. Além disso, consideramos que o repetidor faz uso do protocolo DF (*Decode and Forward*) com a finalidade de retransmitir os dados para os usuários nos nós destino.

Definimos AS (Assinalamento de Subportadora) como a associação de cada subportadora $q \in \mathcal{N}$ do segundo salto com um único usuário $j \in \mathcal{J}$ no destino. Como exemplo, vemos na Fig. 1 que as subportadoras 1, 2, $N-1$ e N no segundo salto foram assinaladas para os usuários 2, 1, J e J, respectivamente. Finalmente, AP (Alocação de Potência) é responsável por determinar a potência $\mathcal{P}^{\mathrm{s}}_n$ e $\mathcal{P}^{\mathrm{r}}_q$ que deve ser fornecida para as subportadoras $n \in \mathcal{N}$ e $q \in \mathcal{N}$ dos saltos 1 e 2, respectivamente.

Diferentemente da maioria dos trabalhos na literatura, consideramos um mapeamento discreto entre taxa de dados ou

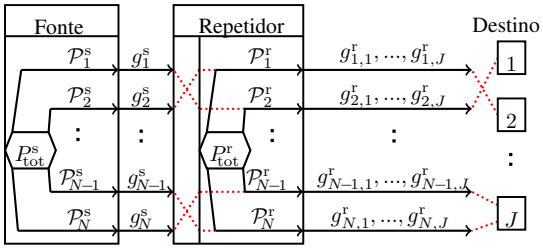


Fig. 1. Sistema de dois saltos com uma fonte, um repetidor e múltiplos destinos

nível de MCS (*Modulation and Coding Scheme*) e a qualidade do canal de comunicação. Nós consideramos uma função genérica monotônica crescente $f(\cdot)$ que mapeia cada SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) atingida para uma específica taxa de dados. Consideramos M distintos níveis de MCSs contidos no conjunto $\mathcal{M} = \{1, 2, \ldots, M\}$, em que o nível de MCS $m \in \mathcal{M}$ corresponde a taxa de dados r_m que é atingida quando a SNR está no intervalo $[SNR_m, SNR_{m+1}]$ em que SNR_i e $r_i, \forall i$, são obtidos a partir da função $f(\cdot)$. Note que $SNR_i < SNR_{i+1}$ e $r_i < r_{i+1}, \forall i \in \mathcal{M}$.

III. Formulação do Problema e Solução Ótima

Nesta seção apresentamos um problema de otimização que objetiva maximizar a quantidade de usuários que atingem uma taxa de dados mínima ou QoS considerando a existência conjunta dos problemas AS, ES e AP.

Antes de apresentarmos o problema de otimização, faremos a descrição de um conjunto de variáveis e constantes numéricas que nos permitem modelar o sistema apresentado na Fig. 1. A seguir faremos a descrição das constantes que ainda não foram definidas: $P^{\mathrm{s}}_{n,m}$ representa a mínima potência necessária para a n-ésima subportadora do primeiro salto atingir o m-ésimo nível de MCS. $P^{\mathrm{r}}_{q,j,m}$ representa a mínima potência necessária para a q-ésima subportadora do segundo salto que está assinalada para o j-ésimo receptor atingir o m-ésimo nível de MCS. t_j representa a taxa de dados requisitada pelo j-ésimo usuário. Consideramos três variáveis no nosso modelo: x_j é uma variável binária que assume valor 1 se o j-ésimo usuário atingiu a taxa de dados por ele requisitada, ou 0 caso contrário. $y^{\mathrm{s}}_{n,m}$ é uma variável binária que assume valor 1 se o m-ésimo nível de MCS for empregado na n-ésima subportadora do primeiro salto, e 0 caso contrário. $y^{\mathrm{r}}_{n,q,j,m}$ é uma variável binária que assume valor 1 se a q-ésima subportadora do salto 2 transmite com a m-ésima MCS e for emparelhada com a n-ésima subportadora do salto 1 e, adicionalmente estiver assinalada para o j-ésimo usuário, e 0 caso contrário. Algumas das constantes numéricas do nosso modelo foram apresentadas na seção anterior.

De acordo com o modelo apresentado, formulamos a seguir o problema de otimização que objetiva maximizar a quantidade

de usuários satisfeitos:

$$\max_{\mathbf{y}^{\mathrm{s}},\mathbf{y}^{\mathrm{r}},\mathbf{x}} \sum_{j=1}^{J} x_j \tag{1a}$$

Sujeito a:

$$\sum_{m=1}^{M} y^{\mathrm{s}}_{n,m} \leq 1,\ \forall n \in \mathcal{N}, \tag{1b}$$

$$\sum_{q=1}^{N}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M} y^{\mathrm{r}}_{n,q,j,m} \leq 1,\ \forall n \in \mathcal{N}, \tag{1c}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M} y^{\mathrm{r}}_{n,q,j,m} \leq 1,\ \forall q \in \mathcal{N}, \tag{1d}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} y^{\mathrm{s}}_{n,m}\, P^{\mathrm{s}}_{n,m} \leq P^{\mathrm{s}}_{\mathrm{tot}}, \tag{1e}$$

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{q=1}^{N}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M} y^{\mathrm{r}}_{n,q,j,m}\, P^{\mathrm{r}}_{n,q,j,m} \leq P^{\mathrm{r}}_{\mathrm{tot}}, \tag{1f}$$

$$\sum_{n=1}^{N} \min\left\{\sum_{m=1}^{M} y^{\mathrm{s}}_{n,m}\, r_m, \sum_{q=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} y^{\mathrm{r}}_{n,q,j,m}\, r_m\right\} \geq x_j\, t_j,\ \forall j, \tag{1g}$$

em que $\mathbf{y}^{\mathrm{s}}, \mathbf{y}^{\mathrm{r}}$ e $\mathbf{x}$ são vetores que contêm as variáveis $y^{\mathrm{s}}_{n,m}$, $y^{\mathrm{r}}_{n,q,j,m}$ e x_j, respectivamente. A função objetivo (1a) representa a quantidade de usuários que serão satisfeitos. A restrição (1b) determina que cada subportadora do salto 1 deve atingir um único nível de MCS. As restrições (1c) e (1d) determinam que cada subportadora do salto 2 deve atingir somente um nível de MCS e o ES deve ocorrer em uma relação de um-para-um. As equações (1e) e (1f) determinam que a AP deve obedecer aos limites de potência no nós fonte e repetidor, respectivamente. Por fim, a restrição (1g) assegura que o QoS dos usuários escolhidos para serem satisfeitos seja obedecido. Note que a existência do operador $\min\{\cdot,\cdot\}$ nesta restrição é decorrente do protocolo DF empregado no repetidor.

O problema de otimização apresentado em (1) é combinatorial e não linear. Problemas dessa natureza são recorrentes na literatura e difíceis de serem solucionados de forma ótima por algoritmos eficientes. A abordagem usando força bruta também é inviável devido a escala do problema. Dessa forma, propomos a reformulação do problema (1) com a finalidade de torná-lo linear e então aplicarmos métodos já conhecidos na literatura para resolver o problema de forma exata.

A não linearidade do problema (1) é decorrente da restrição (1g) que possui o operador $\min\{\cdot,\cdot\}$. Dessa forma, a restrição $\min\{A_i, B_i\} \geq C_i$ pode ser reescrita com inserção de uma nova variável z_i da seguinte forma: $z_i \geq C_i$ em que z_i deve satisfazer outras duas restrições simultaneamente, isto é, $z_i \geq A_i$ e $z_i \geq B_i, \forall i$. Utilizando esta ideia podemos obter o problema (1) na forma ILP (*Integer Linear Problem*) e então resolvê-lo através do algoritmo BB (*Branch-and-Bound*). Este algoritmo é capaz de reduzir drasticamente o espaço de busca quando comparado com o método da busca exaustiva porém possui complexidade computacional exponencial em função do número de subportadoras N, da quantidade de níveis de MCS M e da quantidade de usuários J. Dessa forma, o uso desse algoritmo é inviável para cenários de comunicação realistas e nos motiva a desenvolver soluções heurísticas de baixa complexidade computacional.

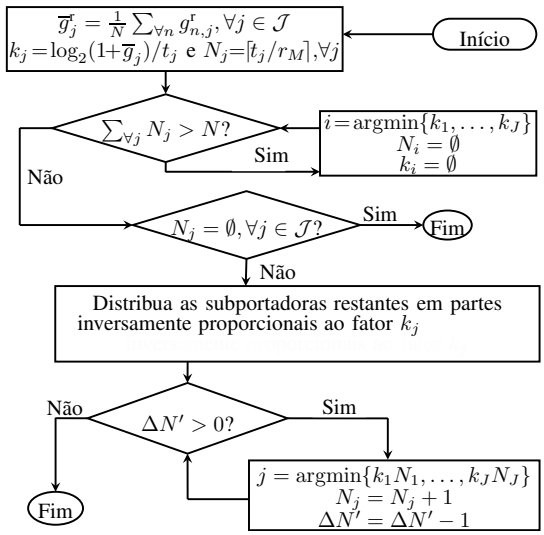


Fig. 2. Algoritmo 1: determina quais usuários podem ser satisfeitos e quantas subportadoras cada usuário irá receber.

IV. HEURÍSTICAS

Nesta seção, apresentaremos um conjunto de 3 algoritmos que compõem uma solução de baixa complexidade computacional para o problema (1). O primeiro algoritmo é mostrado na Fig. 2 e é responsável por fazer a estimativa inicial da quantidade de subportadoras $N_j, \forall j \in \mathcal{J}$, que cada usuário j vai precisar para atingir sua mínima taxa t_j. Inicialmente calculamos a quantidade mínima $N_j = \lceil t_j / r_M \rceil$ de subportadoras requisitadas em cada usuário e então calculamos a quantidade de subportadoras remanescentes ΔN. Estas ΔN subportadoras são distribuídas em partes inversamente proporcionais a k_j que é um fator que quantifica a dificuldade de satisfazer cada usuário e ρ é o fator de proporcionalidade. A divisão em partes proporcionais retorna um número decimal. Para contornar este problema calculamos a diferença entre ΔN e $\sum_{\forall j} \lfloor \rho / k_j \rfloor$ que é a porção inteira de ΔN que foi atribuída a cada usuário e então armazenamos este valor na variável $\Delta N'$. Finalmente, atribuímos as $\Delta N'$ subportadoras, uma de cada vez, ao usuário com menor $k_j\, N_j$ de forma a corrigir o fator de proporcionalidade desse usuário. Note que, no Algoritmo 1 as atribuições ao conjunto vazio ($\emptyset$) devem ser interpretadas como uma remoção e a variável em questão (ou a posição de vetor/matriz) retorna sempre conjunto vazio para as operações aritméticas, exceto para testes lógicos. Esta ideia também se mantém para o Algoritmo 2, apresentado a seguir.

Nosso segundo algoritmo é mostrado na Fig. 3 e é responsável por realizar o AS baseado na variável $N_j, \forall j \in \mathcal{J}$, determinada a partir do Algoritmo 1. O Algoritmo 2 usa a variável s_j que é uma métrica que quantifica a dificuldade de satisfazer cada usuário. Usuários com elevado valor de s_j necessitam de poucas subportadoras e demandam baixo consumo de potência para serem satisfeitos. Baseado nisso, o algoritmo seleciona o melhor usuário através da operação $j^* = \mathrm{argmax}\{\mathrm{s}_1, \ldots, \mathrm{s}_J\}$ e então atribui a este usuário N_j

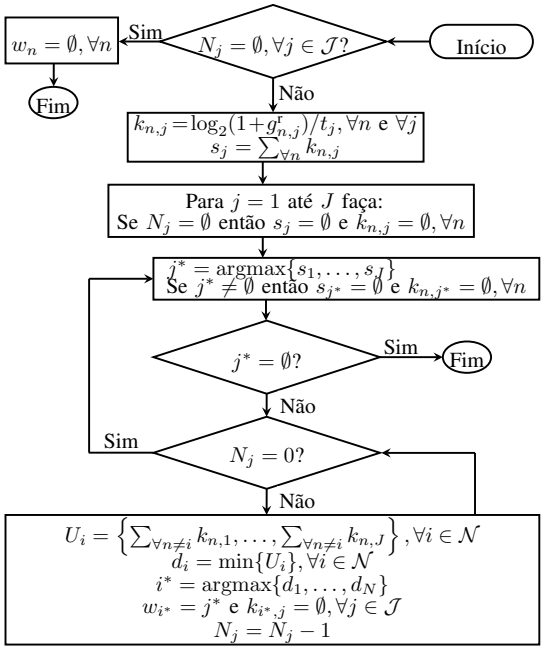


Fig. 3. Algoritmo 02: realiza o AS baseado nos resultados fornecidos pelo Algoritmo 1.

subportadoras no salto 2 de forma iterativa de acordo com a seguinte heurística: ao usuário j^* é atribuída a subportadora i^* que maximiza o cálculo da variável s_j do pior usuário quando a subportadora i^* é suprimida de todos os usuários. Assim, na Fig. 3 a variável U_i é um vetor que contém J elementos em que o elemento $U_i(j), \forall j \in (\mathcal{J} - \{j^*\})$ representa o cálculo da variável s_j quando a i-ésima subportadora é suprimida do j-ésimo usuário. Note que, na linha seguinte ao cálculo de U_i, fazemos o cálculo da variável d_i que contém o menor valor de s_j quando a i-ésima subportadora é suprimida. Finalmente, com a operação $i^* = \mathrm{argmax}\{d_1, \ldots, d_N\}$ selecionamos a subportadora que maximiza o s_j do usuário de pior qualidade e com a operação $w_{i^*} = j^*$ fazemos a atribuição da subportadora i^* ao usuário j^*.

Na Fig. 4 apresentamos o algoritmo responsável por gerenciar os Algoritmos 1 e 2 além de realizar ES e AP. A ideia fundamental desse algoritmo consiste em selecionar um conjunto de usuários ($\mathcal{J}_\mathrm{a}$) para ser satisfeito e em seguida executar sobre $\mathcal{J}_\mathrm{a}$ os Algoritmos 1 e 2 com ES ordenado e AP através do algoritmo HH (Hughes Hartogs) [10]. A cada iteração do algoritmo obtemos uma solução S' para o problema (1) e a comparamos com a solução da iteração anterior S. Se a nova solução for melhor, então inserimos mais um usuário em $\mathcal{J}_\mathrm{a}$ e seguimos para a interação seguinte. Caso contrário o algoritmo termina.

A complexidade computacional do Algoritmo 1 é majorada pelo cálculo do ganho de canal médio $\overline{g}^{\mathrm{r}}_j, \forall j$, e tem ordem de complexidade $\mathcal{O}(NJ)$. A complexidade computacional do algoritmo 2 é majorada pela cálculo da variável $U_i, \forall i \in \mathcal{N}$, e demanda ordem de complexidade $\mathcal{O}((JN)^2)$. Já a complexidade computacional do Algoritmo 3 é majorada pela execução dos Algoritmos 1 e 2, pois a ordem de complexidade do algoritmo HH é dada por $\mathcal{O}(NM\log_2(N))$ [10] que é

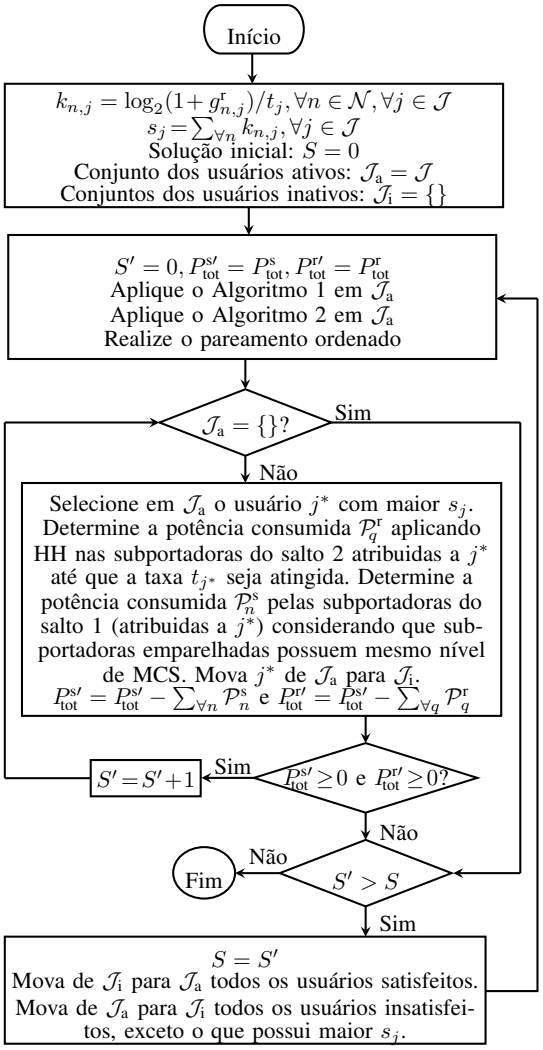


Fig. 4. Algoritmo 03: gerencia os Algoritmos 1 e 2 e realizada alocação de potência com o algoritmo HH.

inferior a $\mathcal{O}((NJ)^2)$. Logo, o Algoritmo 3 demanda ordem de complexidade dada por $\mathcal{O}(N^2J^3)$.

V. Avaliação de Desempenho

A. Parâmetros de Simulação

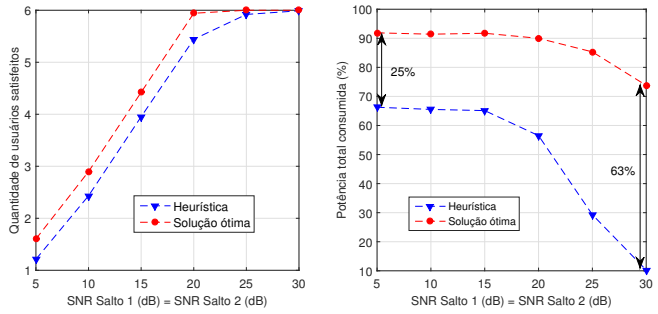
Descrevemos a seguir os principais parâmetros de simulação. Consideramos $N = 15$ subportadoras OFDMA. A fonte e o repetidor possuem uma potência de transmissão $P^s_{\mathrm{tot}} = P^r_{\mathrm{tot}} = 1W$. Assumimos $M = 10$ níveis de MCS e uma taxa de dados atingida em cada nível de MCS dada por $r_m = \{1, 2, ..., 12\}$ bits/s/Hz. Consideramos também que a mínima SNR necessária para transmitir r_m bits é obtida pela discretização da curva de Shannon, isto é, $SNR_m = 2^{r_m} - 1$. A taxa requisitada por usuário é $t_j = 13$ bits/s/Hz, $\forall j \in \mathcal{J}$. Consideramos a existência de $J = 6$ usuários no segundo salto. Vale ressaltar que a escolha da magnitude de N, M e J é fortemente limitada pela alta complexidade da solução ótima. Por fim, de forma a obter confiança estatística, consideramos 4 mil realizações de Monte Carlo por ponto simulado.

B. Resultados

Nas Fig. 5(a) e 5(b) avaliamos o desempenho do Algoritmo 3 quando comparado com a solução ótima em que a SNR média de ambos os saltos foi variada conjuntamente no intervalo 5 dB a 30 dB. Na Fig. 5(a) analisamos o desempenho com relação a quantidade de usuários satisfeitos e na Fig. 5(b) analisamos o desempenho com relação a porcentagem da potência total consumida ($P^{\mathrm{s}}_{\mathrm{tot}} + P^{\mathrm{r}}_{\mathrm{tot}}$).

Na Fig. 5(a) vemos que no intervalo de 5 dB a 20 dB a diferença média entre as duas soluções é inferior a 0,5 usuários satisfeitos. Podemos perceber nesta figura que o gráfico das duas soluções crescente de forma linear no intervalo 5 dB a 25 dB. Isso mostra que não há perda de escalabilidade do algoritmo proposto em relação a variação da SNR nos dois saltos. Portanto, a diferença na quantidade de usuários satisfeitos é mantida constante independente da qualidade de canal. Importante, considerarmos em nossa análise que a complexidade computacional de obtenção da solução ótima é exponencial ao passo que a heurística proposta possui complexidade polinomial conforme mostrado anteriormente.

Na Fig. 5(b) vemos que no intervalo de 5 dB a 15 dB o consumo de potência da heurística permanece aproximadamente constante (67%) e decai rapidamente no intervalo de 15 dB a 30 dB atingindo uma valor mínimo de 10%. A solução ótima tem consumo de potência aproximadamente constante (92%) no intervalo de 5 dB a 20 dB e decai lentamente no intervalo de 20 dB a 30 dB atingindo um valor mínimo 73%. A partir desse resultado, vemos que a heurística tem uma melhora expressiva no consumo de potência quando comparado com a solução ótima. Esta melhora é de no mínimo 25% para baixas SNR (5 dB) e atinge 63% em elevadas SNR (30 dB). Assim, a heurística proposta tem grande potencial de ser empregada em cenários em que haja interesse na redução da interferência e que tenham como objetivo uma maior eficiência dos recursos energéticos.



(a) (b)

Fig. 5. (a) e (b): Quantidade de usuários satisfeitos e porcentagem de potência total ($P^{\mathrm{s}}_{\mathrm{tot}} + P^{\mathrm{r}}_{\mathrm{tot}}$) consumida em função da SNR média de cada salto, respectivamente.

VI. Conclusões

Neste artigo nós analisamos o problema de maximização da quantidade de usuários satisfeitos em um sistema de dois saltos considerando restrições de QoS (*Quality of Service*). O problema apresentado é composto de três subproblemas: Alocação de Potência (AP), Emparelhamento de Subportadoras (ES) e Assinalamento de Subportadoras (AS) que foram resolvidos conjuntamente de forma ótimo e com elevado custo computacional pelo algoritmo BB (*Branch-and-Bound*) após o emprego de uma técnica de linearização. Outra contribuição foi a proposta de uma heurística de baixa complexidade computacional para resolver o problema supracitado. Os resultados mostram que a diferença entre a quantidade de usuários satisfeitos pelos algoritmos propostos e a solução ótima é inferior a 0,5 usuários para o cenário simulado. Outro resultado interessante originou-se da análise do consumo percentual da potência total do sistema. Os resultados mostram que a heurística consome no mínimo 25% menos potência que a solução ótima em baixas SNRs (*Signal-to-Noise Ratio*s) e esta diferença é bem mais significativa, 63%, em altas SNRs. Dessa forma, nossa heurística apresenta uma excelente relação custo-benefício ao balancear a ordem de complexidade computacional e desempenho.

Referências

[1] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, e P. Popovski, "Five Disruptive Technology Directions for 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 74–80, Fev. 2014.

[2] S. Sadr, A. Anpalagan, e K. Raahemifar, "Radio Resource Allocation Algorithms for the Downlink of Multiuser OFDM Communication Systems," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 11, no. 3, pp. 92–106, Abr. 2009.

[3] Y. G. Ding, Z. Z. Yang, C. Yan, C. Shi, e Q. P. Liang, "Power Allocation for Non-Regenerative OFDM Relaying Channels," vol. 1, pp. 185–188, Set. 2005.

[4] A. Hottinen e T. Heikkinen,"Optimal Subchannel Assignment in a Two-Hop OFDM Relay," in *Proc. of the IEEE Workshop on Signal Proc. Adv. in Wireless Commun.* (SPAWC), pp. 1–5, Jun. 2007.

[5] W. Wang, S. Yan, e S. Yang, "Optimally Joint Subcarrier Matching and Power Allocation in OFDM Multihop System,", Fev. 2008.

[6] J. M. B. da Silva, Y. C. B. Silva, T. F. Maciel, F. R. P. Cavalcanti, C. D. Rodrigues, e M. B. C. Neto, "Power Allocation Schemes for Multichannel Two-Hop Relaying Systems," in *Proc. of the IEEE Wireless Commun. System Symposium*, pp. 356–360, Ago. 2012.

[7] R. B. Santos, F. R. M. Lima, W. C. Freitas e F. R. P. Cavalcanti, "QoS based Radio Resource Allocation and Scheduling with Different User Data Rate Requirements for OFDMA Systems," in *Proc. of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1–5, 2007.

[8] F. R. M. Lima, S. W anstedt, F. R. P. Cavalcanti e W. C. Freitas Jr., "Scheduling for Improving System Capacity in Multiservice 3GPP LTE," in *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Article ID 819729, 16 pages, 2010.

[9] E. B. Rodrigues, F. R. M. Lima, T. F. Maciel e F. R. P. Cavalcanti, "Maximization of user satisfaction in OFDMA systems using utility-based resource allocation," in *Wireless Communincation Mobile Computing*, pp. 376?392, 2014.

[10] D. Hughes-Hartogs, "Ensemble Modem Structure for Imperfect Transmission Media", Patent US 4 833 706, Mai., 1989.