

Algoritmos de Alocação de Recursos de Rádio em Sistemas OFDMA

Francisco Rodrigo P. Cavalcanti, Walter C. Freitas Jr., Ricardo B. dos Santos* e Francisco Rafael M. Lima*

Resumo—Neste tutorial uma breve descrição da tecnologia de acesso ao meio OFDMA e as principais possibilidades de alocação de recursos são apresentadas, juntamente com as soluções disponíveis na literatura.

Palavras-Chave—OFDMA, Alocação de Recursos de Rádio.

I. INTRODUÇÃO

As chamadas redes 4G (do inglês, *Fourth Generation*), como LTE (do inglês, *Long Term Evolution*), precisam atender requerimentos de QoS (do inglês, *Quality of Service*), tais como taxa de dados e atraso de pacotes, ainda mais exigentes que os atuais. Para tanto, taxas de dados cada vez maiores devem trafegar pelo canal e com o aumento da taxa do canal a seletividade em frequência do canal surge como um fator limitante [1]. A seletividade em frequência do canal é gerada pelo fenômeno dos múltiplos percursos. Durante a transmissão de rádio as ondas refletem em várias superfícies resultando em múltiplas cópias do sinal que chegam no receptor com atrasos diferentes. A soma construtiva e destrutiva dessas cópias gera um sinal recebido deformado na frequência. Isso cria a necessidade de equalizadores complexos para compensar esse efeito do canal. Devido a capacidade de funcionar bem mesmo em canais altamente seletivos em frequência o OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tem sido considerado na maioria dos sistemas 4G.

Em um sistema com OFDM a banda total do sistema é dividida em múltiplas subportadoras ortogonais entre si e a informação é então distribuída nessas subportadoras. Outra característica interessante do OFDM é o aumento do tempo de símbolo. Como a informação está dividida em várias subportadoras, o tempo de símbolo em cada subportadora será várias vezes maior do que no caso com uma única subportadora. Esse tempo de símbolo maior faz com que a transmissão OFDM sofra menos com a ISI (do inglês, *Inter-Symbol Interference*). Para mitigar totalmente a ISI um prefixo de guarda é adicionado ao começo de cada símbolo OFDM. Esse prefixo de guarda é uma cópia do final do símbolo que é inserida no começo de cada símbolo OFDM para evitar mudanças brusca no sinal que resultam na perda da ortogonalidade entre as subportadoras. Esse intervalo é projetado para que toda a ISI do símbolo

anterior e a interferência das outras subportadoras devida a descontinuidade do sinal aconteça nesse período.

Outra possibilidade interessante com a técnica OFDM é a sua utilização como tecnologia de múltiplo acesso, o OFDMA (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Como o desvanecimento rápido tem efeitos diferentes nas diferentes subportadoras de cada usuário, existe a possibilidade de que subportadoras com alto desvanecimento para um usuário estejam com boas condições de canal para outro. Isso é conhecido como diversidade multiusuário e é um dos pontos fortes da alocação dinâmica de recursos de rádio no contexto OFDMA. E ainda mais, como no OFDMA as subportadoras são canais independentes se pode otimizar a taxa de codificação de canal, a modulação, a potência de transmissão, etc de cada uma das subportadoras de maneira independente. Essa característica fornece grande flexibilidade para a alocação de recursos em OFDM.

Este tutorial é organizado da seguinte forma. Na seção II faz-se uma descrição de um típico sistema de transmissão com modulação OFDM. Nas seções III e IV, descreve-se os problemas de alocação de recursos no contexto OFDMA nos cenários ponto-ponto e ponto-multiponto, respectivamente. A seção V conclui o tutorial e destaca os desafios e áreas de pesquisa no contexto de alocação de recursos de rádio em sistemas baseados em OFDMA.

II. SISTEMA DE TRANSMISSÃO OFDM

Historicamente, a utilização de portadoras ortogonais para comunicação de dados tem origem num pedido de patente por Chang no Bell Labs em 1966 [2]. Entretanto, a proposta original apresentava a limitação de requerimento de uma grande complexidade computacional. Apenas em 1971, no trabalho de Weinstein e Ebert [3], foi sedimentado a base da realizabilidade do OFDM pelo uso de técnicas da transformada discreta de Fourier DFT (do inglês, *Discrete Fourier Transform*) no transmissor e no receptor [4]. Desta maneira, OFDM é uma técnica de modulação por multiportadoras baseada em DFT que é também chamada de DMT (do inglês, *Discrete MultiTone*) quando utilizado no contexto das comunicações móveis com fio, e.g. sistemas ADSL (do inglês, *Asymmetric Digital Subscriber Line*).

De uma forma simplificada, o objetivo principal do Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) é de solucionar o problema de transmissão por um canal seletivo em frequência. Canais altamente seletivos em frequência, que conseqüentemente possuem uma forte dispersão temporal, exigem complexos esquemas de equalização temporal para

* Os autores são financiados por uma bolsa concedida pela FUNCAP. Este trabalho foi financiado por uma parceria com Ericsson Brasil - ramo de pesquisa em ERBB/UFC.18 contrato de cooperação técnica. Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio - GTFL / Departamento de Telemática - DETI / Universidade Federal do Ceará - UFC. E-mails: {rodrigo, walter, brauner, rafaelm}@gtel.ufc.br

equalização de toda a faixa de transmissão do sinal [4]. Técnicas de multiportadora, incluindo o OFDM, buscam gerar canais virtuais (subportadoras) com reduzida faixa de frequência em cada uma das portadoras para que a equalização por portadora se torne apenas uma operação de multiplicação para recuperação da amplitude e fase originais do sinal [5].

De uma maneira geral, para se gerar um símbolo OFDM a partir de uma sequência de dados $s = [s_0, s_1, \dots, s_{N-1}]$, tem-se a seguinte expressão:

$$s'(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \cdot \exp(j2\pi f_n t), \quad (1)$$

em que N é o número de subportadoras. Vale ressaltar que há a necessidade de um banco de osciladores para gerar a forma de onda dada na equação (1).

A implementação deste tipo de transmissor pode ser realizada por meio do uso da IFFT (do inglês, *Inverse Fast Fourier Transform*) que atua como um modulador, desta forma:

$$s'_n = \text{IFFT}_N\{s\}. \quad (2)$$

Para mitigar os efeitos do *delay spread* do canal, um intervalo de guarda formado por um sufixo ou prefixo cíclico é inserido na sequência de dados a ser transmitida. No caso de ser um prefixo cíclico, a sequência transmitida com intervalo de guarda é

$$s'_n = s'_{(n)_N}, \quad n = -G, \dots, -1, 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

em que G é o tamanho do intervalo de guarda em amostras e $(n)_N$ é o resíduo de n módulo N .

Uma vez que, idealmente, cada sinal é degradado apenas por um fator multiplicativo (possivelmente complexo), a tarefa de equalização no receptor é bastante simplificada. Desta forma, apenas a aplicação de um controle automático de ganho por subportadora é requerido para recuperação. Esta é a principal motivação do emprego do OFDM uma vez que a distorção temporal, ou seletividade em frequência é um dos principais limitantes do desempenho de sistemas de transmissão digital.

A seguir, é descrito um cenário ponto-ponto para alocação de recursos de rádio OFDMA.

III. CENÁRIO PONTO-PONTO

Nesta seção é abordado um esquema de alocação de recursos dinâmicos em OFDMA para conexões ponto-ponto, ou seja, conexões em que existe somente um enlace transmissor e receptor.

A. Descrição

Considere que a banda de frequência disponível para o enlace foi dividida em N subportadoras, por meio da tecnologia de múltiplo acesso OFDMA, que estão presentes no conjunto $\mathcal{S} = \{1, \dots, N\}$. Cada subportadora possui um ganho de canal que se mantém constante ao longo do intervalo de transmissão, $h_n[k]$, em que n representa o índice da sub-portadora e k o número do intervalo de transmissão. Cada subportadora n tem alocada uma potência $p_n[k]$ no k -ésimo intervalo de transmissão e experimenta um ruído AWGN (do

inglês, *Additive White Gaussian Noise*) com variância igual a σ^2 . O vetor de potência $\vec{p}[k]$ representa as potências alocadas em todas subportadoras e é formado pelos elementos $p_n[k]$.

Em caso do emprego de adaptação de enlace, o enlace terá M possíveis modos de transmissão que variam a taxa do codificador de canal e a cardinalidade do esquema de modulação, MCSs (do inglês, *Modulation and Coding Schemes*) contidas no conjunto $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$, listadas em ordem crescente de acordo com a taxa de dados obtida em cada modo de transmissão. A função $F(\cdot)$ é responsável por mapear a SNR (do inglês, *Signal-to-Noise Ratio*) em taxa alocável em cada subportadora, e.g. $F(\text{SNR}) = \log_2(1 + \text{SNR})$. Note que no caso de sistemas práticos, em que somente um número finito de MCSs estão disponíveis, essa função será descontínua. Por fim, considere que o enlace tem uma potência máxima disponível, p_{max} . Ao longo desta seção, será omitido o índice temporal, k , sem perda de generalidade.

B. Alocação de recursos

Em cenários ponto-ponto, existem alguns possíveis objetivos a serem buscados em alocação de recursos dinâmicos. A escolha desses objetivos deve ser feita pelos desenvolvedores dos sistemas e tem impacto direto em outros cenários como ponto-multiponto que será visto na seção IV.

Um possível objetivo que pode ser buscado é o de maximização de taxa. Neste tipo de problema de otimização, o objetivo é maximizar o somatório das taxas em todas as subportadoras sujeito a uma restrição de potência disponível para o enlace [1]. A equação (4) apresenta esse problema.

$$\begin{aligned} \max_{\vec{p}} \sum_n F\left(\frac{p_n \cdot h_n}{\sigma^2}\right) \quad \text{sujeito a} \\ \sum_n p_n \leq p_{max}. \end{aligned} \quad (4)$$

Note que nesse problema, é assumido que a adaptação de enlace assegura que uma probabilidade de erro de bit máxima não seja violada em cada subportadora. Este problema vai ao encontro da capacidade do canal definido na teoria da informação [6].

Da teoria da informação, sabemos que a capacidade de um enlace em um canal seletivo em frequência é alcançado aplicando o teorema *water-filling* [6]. De forma geral, esse teorema afirma que mais potência deve ser alocada às regiões de frequência com menor atenuação ou desvanecimento. Contudo, essa solução não pode ser aplicada diretamente em sistemas OFDMA visto que essa solução considera que a potência pode ser alocada na frequência com uma granularidade infinita. Para ser aplicado em OFDMA, seria necessário que a largura de banda das subportadoras fossem infinitesimal. Além disso, o teorema de *water-filling* considera uma adaptação de enlace SNR contínua, o que também não poder ser implementado na prática, devido o conjunto de MCS \mathcal{M} ser finito.

Se é assumido que a função $F(\cdot)$ contínua, o problema na equação (4) se torna não-linear, devido à função de adaptação $F(\cdot)$, e contínuo. Essas considerações habilitam o uso da técnica de multiplicadores de Lagrange para resolvê-lo [7]. A

Algoritmo 1 Alocação de potência - Hughes-Hartogs

```

1:  $S \leftarrow \{1, \dots, N\}$ 
2:  $\mathcal{M} \leftarrow \{0, \dots, M\}$ 
3: Calcular  $pot_{m,n} \forall m \in \mathcal{M} \text{ e } n \in \mathcal{S}$ 
4: Calcular  $\Delta pot_{m,n} = pot_{m,n} - pot_{m-1,n} \forall m \in \mathcal{M} \text{ e } n \in \mathcal{S}$ 
5:  $P_{usada} \leftarrow 0$ 
6:  $MCS_n \leftarrow 0 \forall n \in \mathcal{S}$ 
7:  $p_n \leftarrow 0 \forall n \in \mathcal{S}$ 
8: enquanto  $(P_{usada} < P_{total})$  e  $\left(\sum_{n \in \mathcal{S}} MCS_n \neq N \cdot M\right)$  faça
9:    $n^* \leftarrow \arg \min_{n \in \mathcal{S}} \Delta pot_{1,n}$ 
10:   $MCS_{n^*} \leftarrow MCS_{n^*} + 1$ 
11:   $p_{n^*} \leftarrow pot_{i, MCS_{n^*}}$ 
12:   $P_{usada} \leftarrow P_{usada} + pot_{i, n^*}$ 
13:   $\Delta pot_{m, n^*} \leftarrow \Delta pot_{m+1, n^*} \forall m \in \mathcal{D}$ 
14: fim enquanto

```

solução quando a função $F(\cdot)$ é igual a capacidade de Shannon mostrada a seguir [1],

$$p_n = \frac{1}{N} \cdot \left(\sum_n \frac{\sigma^2}{h_n} + p_{max} \right) - \frac{\sigma^2}{h_n} \quad (5)$$

em que, $F(\text{SNR}) = \log_2(1 + \text{SNR})$.

Porém, se é considerado que a função $F(\cdot)$ é discreta com M esquemas de modulação e codificação, tem-se para cada subportadora $M + 1$ possíveis valores de potência a serem alocados. Portanto, o problema se torna combinacional que são em geral difíceis de resolver. Como forma de ilustração o algoritmo ótimo patenteado por Hughes-Hartogs [8] é mostrado no Algoritmo 1).

No Algoritmo 1, consideramos que o conjunto \mathcal{S} possui os índices de todas as subportadoras, enquanto o conjunto \mathcal{M} possui os índices de todas as MCSs disponíveis no enlace. Na inicialização do algoritmo é necessário estimar a potência necessária em cada subportadora para atingir cada MCS disponível, $pot_{m,n}$, em que m representa a MCS e n é o índice da subportadora. Após isso, se faz necessário o cálculo da diferença de potência para aumentar um nível no conjunto das MCSs (ou seja, aumentar a vazão) para todas as subportadoras como no passo 4 do Algoritmo 1. $\Delta pot_{m,n}$ representa a quantidade de potência necessária para saltar da MCS $m - 1$ para MCS m na subportadora n . A saída do algoritmo são as potências em cada subportadora n , p_n , a MCS utilizada por cada subportadora n , MCS_n , e por fim a potência total utilizada, P_{usada} , que pode não ser sempre igual a disponível, P_{total} , em alguns casos devido aos níveis de MCSs discretos.

A idéia do algoritmo é bem simples, alocar bits, ou seja, aumentar o nível de modulação e codificação (aumentando a vazão) para as subportadoras que requerem o menor aumento de potência nesse salto de MCSs (ver passo 9 do Algoritmo 1). Esse laço é executado enquanto a potência total não é violada, ou todas as subportadoras já estejam no nível de MCS máximo. Apesar do Algoritmo 1 não necessitar de uma enumeração total de todas as combinações de subportadoras e potências possíveis, ele pode se tornar proibitivo com o aumento do número de subportadoras e MCSs disponíveis para o enlace.

Para uma implementação prática de algoritmos de alocação de bit e potência adaptativos, deve-se avaliar se os ganhos

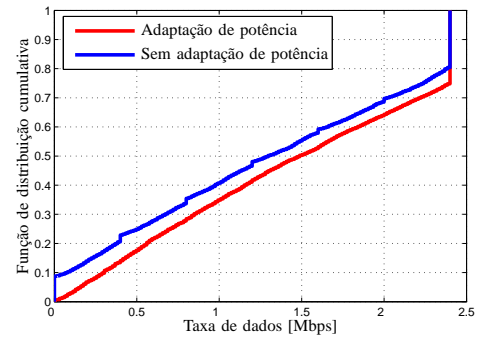


Fig. 1. Função de distribuição cumulativa das taxas obtidas por um usuário com e sem adaptação de potência.

obtidos com esses esquemas justificam a complexidade adicionada devido ao tempo de processamento. Muitos estudos afirmam claramente que o ganho sobre os esquemas fixos (modulação única) é uma certeza [9], [10], [11]. Contudo, esquemas intermediários mais simples como uso de adaptação de enlace com alocação de potência igualitária entre as subportadoras, podem produzir resultados próximos ao de esquemas que incluam também adaptação de potência, dependendo do quão diverso são os estados do canal nas subportadoras [12]. Esquemas com alocação uniforme de potência tendem a aproximar os esquemas com adaptação de potência quando a diversidade do canal diminui.

O fato de utilizar esquemas dinâmicos de alocação de recursos requer a sinalização ao receptor das MCSs utilizadas em cada subportadora. Dessa forma, os ganhos da utilização dos algoritmos adaptativos devem justificar o “desperdício” desses recursos reservados a sinalização que poderiam ser utilizados para transmitir dados úteis.

Por fim, um resultado ilustrativo do desempenho do Algoritmo 1 é apresentado na Fig. 1. Nesse resultado, é mostrada a função de distribuição cumulativa das taxas obtidas por um único usuário para diversas realizações de canal independentes, com adaptação de potência e com potência igualmente distribuída entre as subportadoras. Foram utilizadas 25 subportadoras com uma potência de enlace de 5 W. Os resultados mostram um ganho considerável de 10% de taxa em média quando o algoritmo 1 é utilizado.

A seguir, é descrito um cenário ponto-multiponto para alocação de recursos de rádio OFDMA.

IV. CENÁRIO PONTO-MULTIPONTO

Em um cenário ponto-multiponto pode-se obter ganhos de eficiência espectral ainda maiores comparado ao cenário ponto-ponto, com o compartilhamento da banda entre os múltiplos usuários devido a diversidade multiusuário. Devido a independência dos canais dos diversos usuários, subportadoras que estejam com estado de canal ruim para um usuário não necessariamente estarão neste estado para outro usuário. O ganho de eficiência espectral assim obtido é chamado de ganho de diversidade multiusuário.

A. Descrição

Considere o modelo introduzido na seção III como base. Agora, J terminais estão presentes na célula formando o conjunto \mathcal{D} e como cada usuário j experimenta uma atenuação diferente para cada subportadora n , uma descrição apropriada do canal é agora dada pela matriz de atenuação $\mathbf{H}[k]$, onde cada elemento $h_{j,n}[k]$ representa a atenuação que o usuário j experimenta na subportadora n no tempo k .

Neste cenário, diferentes subportadoras podem estar associadas a diferentes terminais. Denota-se essa associação por meio da matriz binária $\mathbf{X}[k]$ formada por $x_{j,n}[k]$, que assume o valor 1 caso a subportadora n esteja associada ao usuário j no tempo k , e 0 caso contrário.

B. Alocação de recursos

1) *Maximização de Taxa*: Um objetivo bastante direto para a otimização do sistema é o de maximizar a taxa agregada da célula a cada intervalo de transmissão. Este problema é apresentado na equação (6)

$$\max_{\vec{p}, \mathbf{X}} \sum_j \sum_n F\left(\frac{p_n \cdot h_n}{\sigma^2}\right) \cdot x_{j,n} \quad \text{sujeito a} \quad (6)$$

$$\sum_n p_n \leq p_{max} \text{ e } \sum_j x_{j,n} \leq 1 \forall n.$$

Existem duas restrições para esse problema. A primeira limita a potência total de transmissão como no problema (4). A outra é específica para o caso multiusuário. Ela representa que cada subportadora pode estar associada a apenas um usuário por vez. Resultados anteriores [13] demonstram que essa restrição leva a uma melhor performance.

O problema (6) é de fácil solução. Primeiro aloca-se cada subportadora ao usuário com menor atenuação nela. Depois a potência é estipulada usando *water-filling*. Embora essa abordagem seja computacionalmente simples, ela não é apropriada em diversos casos. Essa solução tende a alocar recursos apenas aos usuários com estado de canal muito bom. Como essa abordagem gera problemas de justiça, duas outras abordagens foram propostas na literatura: a RA (do inglês, *Rate Adaptive*) e a MA (do inglês, *Margin Adaptive*) [?].

2) *Margin Adaptive*: Neste caso, o objetivo é minimizar a potência de transmissão da estação base respeitando os requerimentos de taxa de cada usuário. O fato de que uma subportadora não pode estar associada por mais de um usuário no mesmo intervalo de transmissão também é incluído como restrição do problema. A formulação do problema é apresentada na equação (7).

$$\min_{\vec{p}, \mathbf{X}} \sum_j \sum_n p_n \cdot x_{j,n} \quad \text{sujeito a} \quad (7)$$

$$\sum_j x_{j,n} \leq 1, \forall n \text{ e } \sum_n F\left(\frac{p_n \cdot h_{j,n}}{\sigma^2}\right) \cdot x_{j,n} \geq r_j, \forall j.$$

Este é um problema de programação combinacional que são geralmente de difícil solução. No entanto, os ganhos obtidos da solução deste problema são interessantes quando comparados com sistemas OFDM/FDMA estáticos.

Algoritmo 2 Algoritmo de alocação de recursos BABS.

```

1: para todo  $j \in \mathcal{D}$  faça
2:    $n_j \leftarrow \left\lceil \frac{r_j}{R_{max}} \right\rceil$ 
3: fim para
4: enquanto  $\sum_{j \in \mathcal{D}} n_j > N$  faça
5:    $j^* \leftarrow \arg \min_j \{n_j | j \in \mathcal{D}\}$ 
6:    $n_{j^*} \leftarrow 0$ 
7: fim enquanto
8: enquanto  $\sum_{j \in \mathcal{D}} n_j < N$  faça
9:   para todo  $j \in \mathcal{D}$  faça
10:     $\Delta p_j \leftarrow \frac{n_j + 1}{h_j} \cdot F\left(\frac{r_j}{n_j + 1}\right) - \frac{n_j}{h_j} \cdot F\left(\frac{r_j}{n_j}\right)$ 
11:   fim para
12:    $j^* \leftarrow \arg \min_j \{\Delta p_j | j \in \mathcal{D}\}$ 
13:    $n_{j^*} \leftarrow n_{j^*} + 1$ 
14: fim enquanto

```

Para resolver este problema um tempo de processamento considerável é necessário na estação base. Na literatura [14], [15] algumas propostas para resolver este problema por algoritmos subótimos podem ser encontradas.

Kivanc *et al.* [15], utilizaram uma estratégia diferente para resolver o problema MA. Eles dividiram o problema em três partes: alocação de recursos, associação de subportadoras e alocação de potência. Na alocação de recursos, é definido o número total de subportadoras para cada usuário. Já na associação de subportadoras, os resultados do estágio anterior são usados para fazer a associação das subportadoras para os usuários. Finalmente, um algoritmo de alocação de potência é usado para cada usuário. O estágio de alocação de recursos é feito pelo algoritmo BABS (do inglês, *Bandwidth Assignment Based on SNR*) que é apresentado no Algoritmo 2 e o passo de associação de subportadoras é executado pelo algoritmo ACG (do inglês, *Amplitude Craving Greedy*) que pode ser visto no Algoritmo 3.

No algoritmo 2 \mathcal{S}_j é o conjunto das subportadoras associadas ao usuário j , $\mathcal{D} = \{1, \dots, J\}$ é o conjunto dos usuários, $\mathcal{S} = \{1, \dots, N\}$ é o conjunto das subportadoras, $|\mathcal{S}_j|$ é o número de elementos do conjunto \mathcal{S}_j e $\lceil n \rceil$ representa o primeiro inteiro maior ou igual a n .

Primeiramente, o algoritmo BABS estima o número de subportadoras, n_j , necessário para atingir os requerimentos de taxa de cada usuário j . Essa estimativa é baseada no requerimento de taxa, r_j , de cada usuário j e a máxima taxa possível em uma subportadora R_{max} . Note que essa estimativa é otimista já que assume que todas as subportadoras utilizariam o maior nível de MCS. Se o número de subportadora estimado para todos os usuários ultrapassar o número de subportadoras disponíveis no sistema N , os usuários com o menor número de subportadoras tem o serviço negado e o número de subportadoras alocadas para eles é nulo.

Se, caso contrario, restarem subportadoras não utilizadas, elas são alocadas, uma a uma, para o usuário que terá sua potência de transmissão mais reduzida pelo acréscimo de uma subportadora. Veja que, em geral, o usuário com o menor ganho de canal médio \bar{h}_j , tende a obter uma redução da potência de transmissão Δp_j maior quando comparado com usuários com boa condição de canal. Essa abordagem é interessante porque usuários com ganhos de

Algoritmo 3 Algoritmo de associação de subportadoras ACG.

```

1: para todo  $j \in \mathcal{D}$  faça
2:   para todo  $n \in \mathcal{S}$  faça
3:      $h_{j,n}^N \leftarrow \frac{h_{j,n}}{\max_{n \in \mathcal{S}} h_{j,n}}$ 
4:   fim para
5: fim para
6: para todo  $j \in \mathcal{D}$  faça
7:    $S_j \leftarrow \{\}$ 
8: fim para
9: para todo  $n \in \mathcal{S}$  faça
10:   $j^* \leftarrow \arg \max_j \{h_{j,n}^N | j \in \mathcal{D}\}$ 
11:  enquanto  $|S_{j^*}| = m_j^*$  faça
12:     $h_{j^*,n}^N \leftarrow 0$ 
13:     $j^* \leftarrow \arg \max_j \{h_{j,n}^N | j \in \mathcal{D}\}$ 
14:  fim enquanto
15:   $S_{j^*} \leftarrow S_{j^*} \cup \{n\}$ 
16: fim para

```

canal menores tendem a requerer mais potência para alcançar seu requerimentos de taxa e alocar subportadoras para esses usuários resulta em economia de potência.

Uma vez que o número de subportadoras para cada usuário foi determinado, o algoritmo ACG é usado para executar a associação das subportadoras aos usuários. Esse algoritmo associa uma subportadora ao usuário com ganho de canal $h_{j,n}$ mais alto nela com duas restrições. Primeiramente, uma vez que um dado usuário já obteve o número de subportadoras alocado pelo algoritmo BABS, ele deixa de obter subportadoras. Em segundo lugar, os ganhos de canais da subportadoras são normalizados pelo ganho médio de canal de cada usuário resultando no ganho normalizado $h_{j,n}^N$. Esse procedimento é usado para introduzir justiça na associação das subportadoras.

3) *Rate Adaptive*: Na abordagem RA, o objetivo é maximizar a taxa de dados do usuário com a taxa de dados menor enquanto obedece uma restrição de potência de transmissão máxima. A formulação do problema é apresentada na equação (8).

$$\begin{aligned}
 \max_{\mathbf{p}, \mathbf{X}} \quad & \epsilon \quad \text{sujeito a} \\
 & \sum_j x_{j,n} \leq 1 \quad \forall n \text{ e } \sum_n p_n \leq p_{max} \\
 & \sum_n F\left(\frac{p_n \cdot h_{j,n}}{\sigma^2}\right) \cdot x_{j,n} \geq \epsilon \quad \forall j.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Similar ao problema MA, o problema RA pertence ao grupo de problemas de programação combinacional. Os mesmos problemas de tempo de processamento persistem. Na literatura [16], [18], algumas estratégias para resolver esse problema de maneira subótima podem ser encontradas.

Rhee *et al.* propõem uma solução subótima em [18] afirmando que a taxa agregada do sistema é próxima da sua capacidade máxima quando potência igual é alocada para todas as subportadoras contanto que as subportadoras sejam alocadas para usuário com bons ganhos de canal. A potência é atribuída igualmente em todas as subportadoras e o algoritmo heurístico vai alocar as subportadoras com o ganho de canal mais alto a cada usuário. Depois disso, o algoritmo busca o usuário j com

Algoritmo 4 Algoritmo de alocação e associação de subportadoras combinados de Rhee *et al.*

```

1: para todo  $j \in \mathcal{D}$  faça
2:    $\tau_j \leftarrow 0$ 
3: fim para
4: para todo  $j \in \mathcal{D}$  faça
5:    $n^* \leftarrow \arg \max_n \{h_{j,n} | n \in \mathcal{S}\}$ 
6:    $\tau_j \leftarrow F(h_{j,n^*})$ 
7:    $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} - \{n^*\}$ 
8: fim para
9: enquanto  $\mathcal{S} \neq \emptyset$  faça
10:   $j^* \leftarrow \arg \min_j \{\tau_j | j \in \mathcal{D}\}$ 
11:   $n^* \leftarrow \arg \max_n \{h_{j^*,n} | n \in \mathcal{S}\}$ 
12:   $\tau_{j^*} \leftarrow \tau_{j^*} + F(h_{j^*,n^*})$ 
13:   $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} - \{n^*\}$ 
14: fim enquanto

```

a menor taxa alocada atual e aloca a subportadora disponível n com o maior ganho de canal $h_{j,n}$. Esse processo é repetido até que todas as subportadoras sejam alocadas. O algoritmo de alocação e associação combinados de subportadoras de Rhee é apresentado no Algoritmo 4, em que τ_j representa a taxa já alocada ao usuário j .

Embora ganhos de eficiência espectral possam ser obtidos no cenário multiusuário devido à diversidade multiusuário. A sinalização necessária para a alocação dinâmica de recursos no caso OFDMA também aumenta quando comparada a do caso ponto-ponto. Agora além da MCS usada em cada subportadora, as subportadoras alocadas a cada usuário também devem ser sinalizadas. Isso faz com que a quantidade de sinalização seja dependente do número de usuários presentes no sistema e de parâmetros como o número de subportadoras por célula. Além disso, a estimação do canal fica mais complexa já que diversos enlaces diferentes devem ser estimados a cada intervalo de transmissão. Estudos relativos a perda de performance devido a sinalização foram feitos em [1] e os resultados demonstraram perdas de performance de aproximadamente 10% devidas a sinalização.

Uma abordagem direta a este problema está prevista para a maioria dos sistemas OFDMA em desenvolvimento, agrupar as subportadoras em blocos contíguos e assim diminuir a sinalização. Esta abordagem é adequada desde que o bloco de recurso seja menor do que a banda de coerência do canal.

Por fim, na Fig. 2, um resultado ilustrativo do desempenho dos algoritmos BABS-ACG, do algoritmo de RA de Rhee *et al.*, e o algoritmo de maximização de taxa são mostrados. Nesse resultado, foram simulados 6 usuários em um sistema com 30 subportadoras. A realização de canal utilizada foi a mesma para os três algoritmos de forma a manter uma comparação coerente. Devido a característica de minimização de potência do algoritmo BABS-ACG, esse algoritmo foi simulado primeiro, e a potência total usada foi realimentada para os outros algoritmos. Além disso, em todos os casos foi utilizado o algoritmo 1 de alocação de potência descrito na seção III-B.

Como pode ser visualizado na Fig. 2, o algoritmo BABS-ACG alcança os requerimentos dos usuários. Essa é uma característica do problema MA que busca satisfazer os requisitos de taxas dos usuários com uma potência total

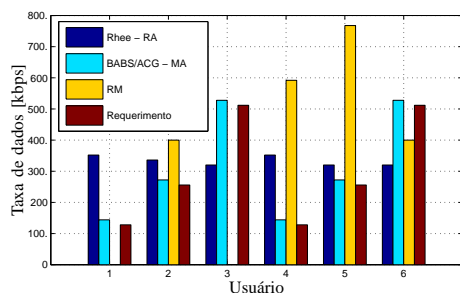


Fig. 2. Desempenho ilustrativo dos algoritmos de alocação de recursos.

mínima. O algoritmo de Rhee *et al.*, com a mesma potência utilizada por BABS-ACG, realizou um balanceamento das taxas alcançadas pelos usuários. Isso é devido ao caráter max-min do problema RA. Por fim, o algoritmo de maximização de taxa forneceu a maior taxa agregada para o sistema. Entretanto, os terminais 1 e 3 não tiveram taxas alocadas por experimentarem um estado de canal ruim, evidenciando o caráter injusto desse algoritmo.

V. CONCLUSÕES, DESAFIOS E ÁREAS DE PESQUISA

Neste tutorial, foram apresentadas as principais soluções para os problemas existentes em alocação de recursos de rádio em OFDMA, tecnologia essa, que promete ser a tecnologia de acesso de rádio dos sistemas 4G.

No cenário ponto-ponto, foi apresentado o problema de maximização de taxa em um enlace. Um algoritmo de alocação de potência e bit ótimo foi abordado, além de considerações práticas sobre a implementação dessa funcionalidade em sistemas reais. No caso multiusuário, além da descrição dos problemas de otimização clássicos existentes nesse cenário, diversos algoritmos subótimos foram apresentados e explicados em detalhes. A seguir, são apresentados alguns aspectos relacionados com alocação de recursos em redes OFDMA que permanecem pouco explorados e que demandam pesquisa.

O cenário multiusuário abordado na seção IV desconsiderou a interferência co-canal. De maneira geral, esse tipo de interferência surge quando parte do espectro de frequência é reutilizado no mesmo sistema, o que é comum em sistemas multicelulares. Portanto, a decisão de alocar uma dada subportadora a um terminal qualquer em uma célula deve levar em consideração o nível de interferência presente nesta subportadora e o impacto que essa alocação terá nos outros enlaces co-canais. Ainda em sistemas multicelulares, é um tópico de pesquisa a melhor localização dos nós ou entidades em que serão implementados os algoritmos de alocação de subportadoras, potência e bit. Isso está fortemente ligado com a arquitetura utilizada no sistema. Os algoritmos de alocação de recursos podem ser organizados de forma centralizada, distribuída ou de forma híbrida de acordo com a localização da informação de todos os enlaces do sistema nas células.

A utilização de OFDMA com outras tecnologias, ou em arquiteturas pouco comuns para redes multiusuários abrem novas perspectivas em alocação de recursos de rádio. O uso

conjunto de múltiplas antenas e OFDMA abre uma nova dimensão para alocação de recursos: a dimensão espacial. Por um lado é oferecido taxas cada vez mais altas, mas por outro lado os problemas se tornam mais complexos. Além disso, arquiteturas *ad-hoc* que antes eram aplicadas a redes de sensores estão sendo estudadas para serem aplicadas em redes de acesso de longo alcance [19].

Por fim, como foi apresentado ao longo desse tutorial, os problemas formulados e soluções disponibilizadas consideram como requerimento dos usuários, somente a taxa a ser alocada. No entanto, essa abordagem pode não ser adequada quando serviços de requerimento de tempo real forem utilizados devido a satisfação em tais serviços estar intrinsecamente acoplada ao atraso de pacotes.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Gross e M. Bohge, "Dynamic Mechanisms in OFDM Wireless Systems: A Survey on Mathematical and System Engineering Contributions", *Tech. Rep. TKN-06-001*, Telecommunication Networks Group, Technische Universität Berlin, May 2006.
- [2] R. W. Chang, "Orthogonal Frequency Division Multiplexing", *U.S. Patent 3 488 455*, filed November 14th, 1966; issued January, 6th, 1970.
- [3] S. B. Weinstein and Paul M. Ebert, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform", *IEEE Transactions on Communications*, COMM-19, p. 628-634, 1971.
- [4] Stefan Müller-Weinfurter, "OFDM for Wireless Communications: Nyquist Windowing, Peak-Power Reduction and Synchronization", *Shaker Verlag*, ISBN: 3-8265-7658-6, 2000.
- [5] Ernesto Leite Pinto e Cláudio Penedo de Albuquerque, "A Técnica de Transmissão OFDM", *Revista do INATEL - Telecomunicações*, v. 5, n. 1, p. 1-10, Junho, 2002.
- [6] T. Cover e J. Thomas, "Elements of Information Theory", *J. Wiley & Sons Inc.*, 1991.
- [7] D. G. Luenberger, *Optimization by Vector Space Methods* Wiley, 1969.
- [8] D. Hughes-Hartogs, "Ensemble Modem Structure for Imperfect Transmission Media", *U.S. Patents* N. 4.679.227 (July 1987), 4.731.816 (March 1988) e 4.833.796 (May 1989).
- [9] T. Willink e P. Wittke, "Optimization and Performance Evaluation of Multicarrier Transmission", *IEEE Trans. on Information Theory*, v. 43, n. 2, p. 426-440, 1997.
- [10] A. Czylik, "OFDM and Related Methods For Broadband Mobile Radio Channels", *Proc. of Broadband Communications*, p. 91-98, 1998.
- [11] H. Rohling e R. Gruenheid, "Performance of an OFDM-TDMA Mobile Communication System", *Proc. of IEEE VTC*, v. 3, p. 1589-1593, May 1996.
- [12] A. Czylik, "Adaptive OFDM for Wideband Radio Channels", *Proc. of the Global Telecommunications Conference*, v. 2, p. 713-718, 1996.
- [13] J. Jang e K. Lee, "Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 21, p. 171-178, February 2003.
- [14] C. Wong, R. Cheng, K. Letaief e R. Murch, "Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation", *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, v. 1, n. 10, p. 1747-1758, October 1999.
- [15] D. Kivanc e H. Liu, "Subcarrier Allocation and Power Control for OFDMA", *Proc. Conference on Signals, Systems and Computers*, v. 21, p. 147-151, October 2000.
- [16] H. Yin e H. Liu, "An Efficient Multiuser Loading Algorithm for OFDM-Based Broadband Wireless Systems", *Global Telecommunications Conference*, v. 1, p. 103-107, November 2000.
- [17] E. D. Nering e A. W. Tucker, *Linear Programs and Related Problems*, 1993.
- [18] W. Rhee e J. Cioffi, "Increase in Capacity of Multiuser OFDM System Using Dynamic Subchannel Allocation", *Vehicular Technology Conference - Spring*, v. 2, p. 1085-1089, May 2000.
- [19] S. H. Ali, Ki-Dong Lee e V. C. M. Leung, "Dynamic Resource Allocation in OFDMA Wireless Metropolitan Area Networks", *IEEE Wireless Communications*, v. 14, p. 6-13, February 2007.