

Análise do desempenho da seleção de antenas na alocação dinâmica de recursos em um sistema OFDMA

Guilherme Silveira Rabelo, Robson Domingos Vieira e Paulo H. Portela de Carvalho

Resumo—Neste artigo, a dimensão espacial é analisada na alocação dinâmica de recursos para um sistema OFDMA. Algoritmos clássicos de alocação de recursos, tais como o maximização da capacidade, *proportional fair* e aleatório foram avaliados em conjunto com a técnica de seleção de antenas. A taxa de transmissão alcançada para diferentes números de antenas de transmissão foi obtida por meio de simulações sistêmicas baseadas na estrutura de quadro da tecnologia banda larga 3G-LTE. Os resultados mostraram que ganhos ainda podem ser obtidos, apesar da simplicidade do algoritmo espacial, quando combinados com os algoritmos de maximização da capacidade e aleatório.

Palavras-Chave—Alocação Dinâmica de Recursos, Seleção de Antenas, MISO, OFDMA, 3G-LTE.

Abstract—In this work, the spatial dimension of the dynamic resource allocation in an OFDMA system is evaluated. Classic resource allocation algorithms, such as throughput maximization, proportional fair and a random one were evaluated in combination with the antenna selection technique. Performance results using different number of transmit antennas were obtained by the use of systemic simulations based on the 3G-LTE physical layer. Results have shown that performance improvements can yet be achieved when using the throughput maximization and the random one, despite the simplicity of the spatial algorithm.

Keywords—Dynamic Resource Allocation, Antenna Selection, MISO, OFDMA, 3G-LTE.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a complexidade dos sistemas de comunicações móveis aumentou de maneira expressiva [1]. Este aumento foi resultado da constante evolução dos sistemas visando suprir a crescente demanda por novos serviços, maiores taxas de transmissão, aumento da capacidade da rede, entre outros. O grande problema é que, com base nos requisitos impostos pelas futuras redes de banda larga e sem fio, esta melhora na qualidade de serviço e na capacidade do sistema não pode ser obtida simplesmente pelo aumento efetivo da potência de transmissão ou da obtenção de uma banda de transmissão adicional. Assim, as novas tecnologias de transmissão nos sistemas de comunicações móveis têm procurado utilizar todos os recursos possíveis para aumentar a capacidade

e a confiabilidade dos enlaces via rádio. Dentre o conjunto de técnicas disponíveis, podemos destacar a multiplexação por divisão em frequências ortogonais (OFDM), a alocação dinâmica de recursos e os sistemas com múltiplas antenas (MIMO), já presentes nas tecnologias de banda larga WiMAX e 3G-LTE [2].

Sistemas com múltiplas antenas têm sido apontados como uma solução para aumentar a capacidade e a confiabilidade dos enlaces sem fio, permitindo aos usuários utilizar aplicações com altas taxas de dados [3], [4]. Por outro lado, a complexidade do *hardware* e o custo de sua implementação são potencialmente proibitivos. Assim, a seleção de antenas aparece como uma solução promissora, em que a transmissão/recepção é realizada por meio de um subconjunto das antenas disponíveis, reduzindo o custo de implementação e mantendo grande parte dos benefícios da tecnologia MIMO [5], [6], [7].

Juntamente com a utilização de múltiplas antenas, a alocação dinâmica de recursos tem se mostrado como uma das técnicas mais importantes em sistemas de comunicação sem fio para atender a demanda explosiva de novos serviços. Um dos seus fundamentos é a exploração da diversidade inerente aos sistemas celulares por meio do gerenciamento inteligente de alocação de banda, múltiplo acesso, escalonamento de usuários e adaptação de enlace e potência [1]. Diversos estudos teóricos têm mostrado os benefícios alcançados por meio de alocação eficiente e dinâmica dos recursos de rede, como por exemplo [8], [9], [10], [11], [12].

Em [9], são mostrados resultados de desempenho de alocação de recursos em sistemas MIMO/OFDM, considerando transmissões perfeitas e falhas do CSI (*Channel State Information* - Informação de condição do canal).

Em [10], são mostrados resultados de desempenho de um sistema MISO utilizando alocação dinâmica de recursos e múltiplas antenas na transmissão. Entretanto, os resultados são fornecidos apenas em nível de enlace, não provendo indicadores de desempenho sistêmicos.

Em [11], são mostrados resultados de desempenho sistêmico de escalonamento de usuários juntamente com MIMO. Entretanto, são considerados apenas canais do tipo Rayleigh e planos em frequência.

Por fim, em [12], são mostrados resultados de desempenho sistêmico de escalonamento de usuários com múltiplas antenas. Entretanto, o foco é apenas o enlace reverso.

Neste contexto, este artigo tem por objetivo avaliar se ganhos adicionais ainda podem ser obtidos quando a dimensão espacial é considerada nos escalonadores. Para isso, os algo-

Guilherme Silveira Rabelo, Wireless Technology Laboratory (WissTek), Departamento de Comunicações, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, Brasil. E-mail: rabelo@wisstek.org. Robson Domingos Vieira, Instituto Nokia de Tecnologia (INdT), Brasília, Brasil. E-mail: robson.domingos@indt.org.br. Paulo H. Portela de Carvalho, Laboratório de Estruturas de Microondas e Ondas Milimétricas (LEMOM), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil. E-mail: paulo@ene.unb.br

ritmos de alocação de recursos de maximização de capacidade, *proportional fair* e aleatório são avaliados em conjunto com a técnica de seleção de antenas. O desempenho dessa combinação é avaliado por meio de simulações sistêmicas com a camada física baseada nas especificações do 3G-LTE [13].

O restante deste trabalho é estruturado como se segue. Na seção II, é apresentada uma descrição geral da tecnologia 3G-LTE. Na seção III, são descritos os algoritmos de alocação de recursos. Na seção IV, são apresentados comparativos de desempenho utilizando os algoritmos de alocação. Por fim, na seção V, são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. DESCRIÇÃO GERAL DO 3G-LTE

O 3G-LTE (*Long Term Evolution* - Evolução a longo prazo) é uma proposta de evolução para o sistema de terceira geração UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System* - Sistema universal de telecomunicações móveis) [2]. Seus primeiros estudos surgiram em 2004, e propunham um sistema que atendesse às demandas de redução de latência de rede, aumento na taxa de transferência de dados para usuários, aumento na capacidade de rede e cobertura, entre outros [14].

Para atender aos requisitos estabelecidos para o sistema, novas tecnologias de transmissão foram propostas, além de alterações na camada física da rede celular. Entre elas, destacam-se [15]:

- Redução do tempo de intervalo de transmissão;
- Adoção do OFDMA como técnica de múltiplo acesso;
- Utilização de múltiplas antenas na transmissão e/ou recepção;
- Alocação de recursos no domínio da frequência;
- Técnicas de supressão e cancelamento de interferência.

A seguir, são descritos alguns aspectos da tecnologia 3G-LTE. A descrição completa pode ser encontrada em [16], [17], [18], [19].

A. Camada Física

O LTE permite a operação nos modos FDD e TDD. Para o modo FDD, utilizado neste trabalho, um quadro de rádio no enlace direto é configurado de acordo com a Figura 1 [16].

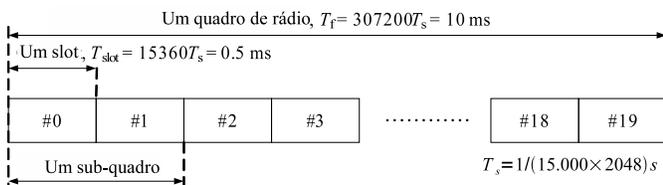


Fig. 1. Estrutura de quadro LTE no modo FDD

Um *slot* é definido tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. No domínio do tempo, corresponde a um conjunto de símbolos OFDM subsequentes. No domínio da frequência, corresponde ao conjunto de subportadoras alocadas para o sistema. A estrutura de um *slot* no enlace direto é ilustrada na Figura 2.

Na Figura 2, são ilustrados o *Elemento de Recurso* e *Bloco de Recurso Físico*. Um *Elemento de Recurso* (ER) é o menor

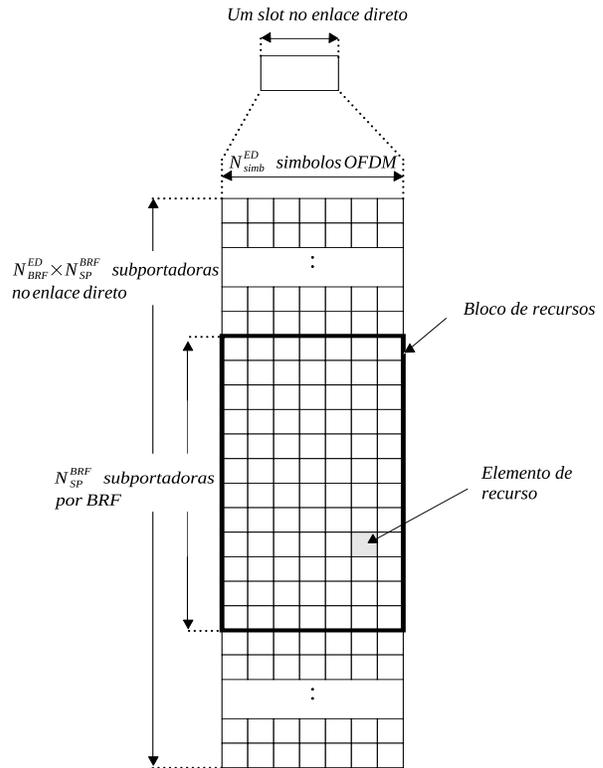


Fig. 2. Estrutura de um slot no enlace direto.

elemento fisicamente capaz de ser transmitido a um usuário [16] e corresponde a um símbolo OFDM em uma subportadora. Um *Bloco de Recurso Físico* (BRF) é o menor recurso efetivamente transmitido a um usuário e corresponde a N_{SP}^{BRF} subportadoras e N_{simb}^{ED} símbolos OFDM por subportadora.

O número de blocos a ser transmitido, N_{BRF}^{ED} , depende da largura de banda do sistema alocada para o enlace direto e deve estar entre 6 e 110 [16]. Em caso de utilização de múltiplas antenas, é definido um conjunto de $N_{BRF}^{ED} \times N_{SP}^{BRF}$ subportadoras para cada antena.

B. Modulações e codificações

Os possíveis esquemas de modulação propostas para os canais de tráfego de interesse são o QPSK, 16QAM e 64QAM. As codificações utilizadas para os canais de dados são a codificação convolucional e codificação *turbo* [17]. Para ambos casos, a taxa de codificação é de 1/3.

C. Escalonamento

O escalonador presente na estação de rádio base (ERB) aloca dinamicamente os recursos tempo-frequência-espaço aos usuários na rede. A sinalização de controle informa aos terminais móveis que recursos e formatos de transmissão foram utilizados [20].

É de responsabilidade do escalonador a escolha da estratégia de multiplexação a ser utilizada. A flexibilidade na escolha dos recursos e na multiplexação de usuários irá influenciar o desempenho do escalonador. O processo de escalonamento

é estritamente ligado à adaptação de enlace e pode ser feito baseado nas seguintes informações [20]:

- Medições de QoS;
- Transmissões pendentes na estação de rádio base;
- Informações de qualidade de enlace reportados pelos terminais móveis;
- Recursos do terminal móvel;
- Períodos de inativação do terminal móvel e intervalos entre medições;
- Parâmetros sistêmicos como largura de banda ou nível de interferência.

Neste trabalho, o escalonamento é feito com base nas informações de canal CQI (*Channel Quality Indicator* - Indicador de qualidade do canal) transmitidos pelo usuário para à ERB. Foi utilizado como indicador de qualidade do enlace a *Relação Sinal Ruído mais Interferência* (RSRI). Para modelar imperfeições ou falhas nas transmissões, somou-se ao RSRI (em decibéis) uma variável aleatória gaussiana, como feito em [21], [22], [23].

D. Adaptação de enlace - modulação e codificação adaptativas

A adaptação de enlace é aplicada para o canal de dados compartilhado entre os usuários. Isto significa que, para instantes de tempo diferentes, pode-se transmitir para o mesmo usuário informações utilizando esquemas de modulação e codificação (EMC) diferentes. A escolha do esquema é feita com base nas informações de qualidade de canal informados pelo terminal móvel à ERB.

III. ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DINÂMICA DE RECURSOS UTILIZANDO SELEÇÃO DE ANTENAS

A alocação de recursos é feita por meio do escalonamento de usuários nos domínios do tempo, frequência e espaço. O escalonamento segue determinado critério estabelecido para o processo de alocação. Diversos algoritmos de escalonamento são propostos na literatura [12], [15], [24], dentre os quais se destacam:

- 1) Algoritmo de maximização da capacidade (AMC).
- 2) Algoritmo *proportional fair* (APF).
- 3) Algoritmo aleatório (AA).

O algoritmo de maximização da capacidade [15] visa maximizar a vazão total de dados do sistema. Para isso, procura alocar os recursos aos usuários que possibilitem uma transmissão à maior taxa possível. Como a capacidade do enlace aumenta à medida que RSRI aumenta, o recurso é alocado ao usuário com maior valor de RSRI, ou seja, com melhores condições de enlace. Conseqüentemente, mesmo sem a seleção de antenas, o algoritmo implicitamente já leva em conta a dimensão espacial no processo de alocação, uma vez que a condição do enlace está fortemente associada à posição geográfica do usuário. A métrica de alocação do AMC é dada por

$$P_k(a, f, t) = R_k(a, f, t), \quad (1)$$

em que $R_k(a, f, t)$ é a taxa de transmissão possível para o usuário k , utilizando a antena a , na frequência f e no instante t . O cálculo da taxa de transmissão possível é aproximado pelo cálculo de capacidade de Shannon, dado por

$$R_k(a, f, t) = B \times \log_2(1 + RSRI_k(a, f, t)), \quad (2)$$

em que $RSRI$ é a relação sinal-ruído mais interferência e B é a largura de banda ocupada por um BRF. Tal aproximação também é feita em [22].

O algoritmo *proportional fair* (equidade proporcional) [12] visa estabelecer um compromisso entre taxa de transmissão e distribuição de recursos. Para isso, prioriza não apenas usuários com boas condições de enlace, mas também usuários com baixo histórico de taxa de transmissão. Dessa forma, a métrica de alocação é dada por

$$P_k(a, f, t) = \frac{R_k(a, f, t)}{T_k(t)}, \quad (3)$$

em que $T_k(t)$ é a taxa de transmissão média do usuário k no passado até o instante t . Novamente, o valor de $R_k(a, f, t)$ é aproximada pela Equação 2.

Por fim, o algoritmo aleatório [24] é o mais simples dentre os abordados neste trabalho e visa uma distribuição uniforme de recursos. A métrica de alocação de recurso é um número aleatório uniforme entre 0 e 1 ($P_k(a, f, t) \sim U(0, 1)$).

A alocação de recursos combinada com a seleção de antenas é constituída por três fases. Em ordem de acontecimento, são elas:

A. Escalonamento no domínio temporal

Nesta fase, é escolhido um subconjunto de usuários, dentre aqueles conectados à determinada ERB, para os quais os recursos do quadro de rádio em questão serão alocados. Para isso, selecionam-se os usuários que apresentam maiores médias da métrica de alocação quando considerada toda a banda de frequência permitida para a ERB e todas as antenas. Consideração semelhante é feita em [21].

B. Escalonamento no domínio da frequência

Na segunda fase, distribuem-se os recursos disponíveis ao longo das frequências de transmissão para os usuários escolhidos na primeira fase. A distribuição é feita para cada antena de transmissão e utiliza a métrica do algoritmo como base para a alocação do recurso. Assim, para cada BRF e em cada antena, o recurso é reservado para o usuário que apresentar a maior métrica.

C. Seleção de antenas

Por fim, na última fase, escolhe-se uma antena de transmissão para cada recurso físico. Apesar de os mesmos recursos tempo-frequência terem sido distribuídos em todas as antenas de transmissão, apenas uma antena transmitirá em determinado instante de tempo e frequência. Assim, para cada frequência, seleciona-se a antena cujo usuário escalonado na fase anterior apresenta a maior métrica de alocação.

Após a seleção de antenas, os recursos são transmitidos. O processo de alocação pode ser mais facilmente compreendido com o auxílio das Figuras 3, 4 e 5, onde são ilustradas as três fases de alocação. As cores dos blocos possuem fins apenas ilustrativos, não apresentando relação com a métrica do usuário.

O algoritmo de alocação utilizando os domínios do tempo, frequência e espaço é descrito ao lado.

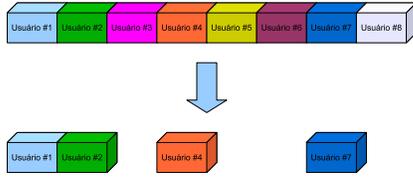


Fig. 3. Escalonamento no domínio temporal

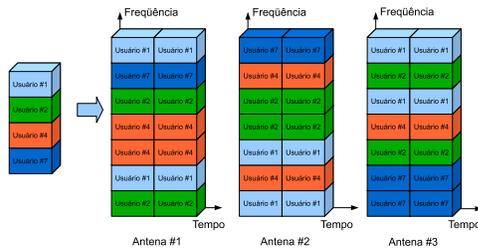


Fig. 4. Escalonamento no domínio da frequência

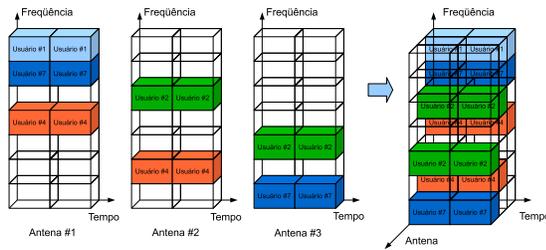


Fig. 5. Seleção de antenas

IV. RESULTADOS

Para a avaliação do desempenho dos algoritmos, foi desenvolvido um simulador sistêmico semi-estático baseado na estrutura de quadro da tecnologia de banda larga 3G-LTE. O simulador foi projetado para ser orientado no tempo, isto é, as ações de rede são realizadas em intervalos regulares de tempo e as estatísticas de simulação são atualizadas após cada intervalo [25]. A duração de um sub-quadro de rádio LTE foi estabelecida como o intervalo de tempo para execução as ações de redes a serem realizadas no simulador. Os principais parâmetros de simulação são listados na tabela I.

Para cada intervalo de um sub-quadro, as seguintes ações são realizadas:

- 1) Atualização do desvanecimento de pequena escala;
- 2) Cálculo de interferência e RSRI;
- 3) Alocação dos recursos disponíveis;
- 4) Transmissão dos recursos;

Algoritmo genérico de alocação

% N : usuários conectados à ERB.

% $N_K < N$: usuários possíveis na alocação no instante.

% N_F : número de blocos disponíveis ao longo do espectro.

% N_A : número de antenas disponíveis na transmissão.

% $P_k(i, j)$: métrica do usuário k calculada para a antena i e frequência j , no instante em questão.

% $\Psi = \{U_1, U_2, \dots, U_N\}$: grupo de N usuários conectados à ERB.

% $\Omega = \{U_1, U_2, \dots, U_{N_K}\}$: grupo de N_K usuários participantes do processo de alocação.

% Fase 1 - Escolha de N_K usuários em dado instante

Para $i = 0, 1, \dots, N_K - 1$:

Escolhe usuário de Ψ que satisfaz

$$\text{argmax}_j \left\{ \frac{1}{N_A \times N_F} \sum_{m=1}^{N_A} \sum_{n=1}^{N_F} P_j(m, n) \right\}, j = 1, 2, \dots, N - i;$$

Retira o usuário escolhido do grupo Ψ e adiciona em Ω ;

Fim de processo quando há N_K usuários em Ω .

% Fase 2 - Escalonamento no domínio da frequência

Para $i = 1, 2, \dots, N_A$:

Para $j = 1, 2, \dots, N_F$:

Escolhe usuário de Ω para cada BRF_{ij} que satisfaz

$$\text{argmax}_k \{P_k(i, j)\}, k = 1, 2, \dots, N_K;$$

Fim de processo até varrer todos os blocos e antenas.

% Fase 3 - Seleção de antenas

Para $i = 1, 2, \dots, N_F$:

Escolhe a antena cujo usuário escolhido na fase anterior satisfaz $\text{argmax}_a \{P_k(a, i)\}$, $a = 1, 2, \dots, N_A$ e k é o usuário escolhido na fase anterior para a antena a ;

Fim de processo até que se defina um usuário e antena para todas as frequências (blocos).

TABELA I

PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
Enlace	Direto
Desvio padrão de sombreamento	8 dB
Velocidade do terminal móvel	3 km/h
Distância entre células	500 m
Esquemas de modulação e codificação (EMC)	3
EMC 0: QPSK e cod. turbo 1/3	
EMC 1: 16QAM e cod. turbo 1/3	
EMC 2: 64QAM e cod. turbo 1/3	
Número de RE por subportadora, N_{sim}^{ED}	7
Número de subportadoras por BRF, N_{SP}^{BRF}	12
Duração de um slot	0,5 ms
Número de slots por subquadro	2
Número de células no grid	19
Número de setores por célula	3
Reuso de frequência	1/1
Largura de banda do sistema	10 MHz
Frequência central de operação	2 GHz
Largura de banda da subportadora	15 kHz
Potência total de transmissão	46 dBm
Figura de ruído	9 dB
Desvio padrão do erro na transmissão do CQI	1 dB

5) Atualização de estatísticas de simulação.

É importante ressaltar que as estatísticas do simulador foram coletadas apenas na célula central. A estatística escolhida a ser analisada foi a taxa de transmissão média por setor, pelo fato de toda a banda do sistema (10 MHz) ser alocada para cada setor. A taxa de transmissão média por setor constitui a razão entre a vazão total de dados do setor e o tempo total estabelecido para a simulação, em *Megabits por segundo*. O número de antenas no transmissor foi variado a fim de avaliar a sua influência no desempenho dos algoritmos de

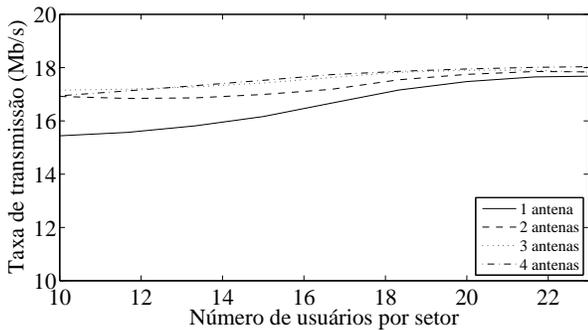


Fig. 6. Taxa de transmissão média por setor - AMC

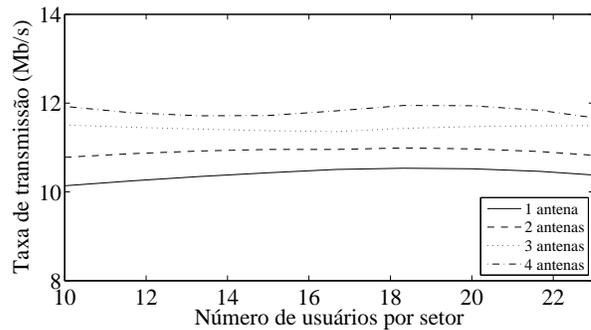


Fig. 8. Taxa de transmissão média por setor - AA

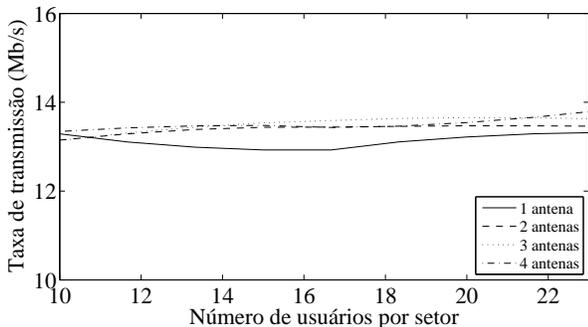


Fig. 7. Taxa de transmissão média por setor - APF

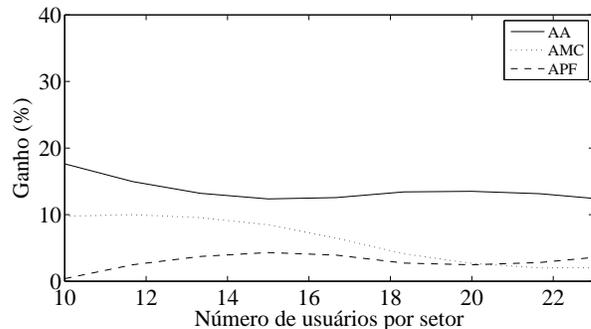


Fig. 9. Ganho percentual de 4 antenas em relação ao caso de 1 antena

alocação de recursos. Apesar da utilização de múltiplas antenas no transmissor, a transmissão dos dados para determinado usuário, em determinado instante e frequência, foi sempre realizada com uma antena.

Na Figura 6, a taxa de transmissão média por setor para o AMC é apresentada para diferentes números de antenas no transmissor. Como apresentado na Seção III, AMC procura alocar os recursos aos usuários com melhores condições de enlace. Assim, a dimensão espacial já está incluída de forma indireta na filosofia do próprio algoritmo. Porém, seu desempenho é degradado para as condições onde o canal varia de forma lenta ou quando a quantidade de usuários na rede é pequena, já que em ambas situações a probabilidade de se alocar um recurso a um determinado usuário cuja condição do enlace possibilite uma transmissão confiável é reduzida.

Pode ser observado que o aumento de usuários na rede é traduzido em um aumento na capacidade da rede, como esperado. Contudo, também é observado que, para situações com baixo número de usuários na rede mas com a seleção de antenas, a taxa de transmissão média por setor é melhorada e aproximada à situação de alta carga na rede. A melhoria no desempenho do sistema já é alcançada com apenas 2 antenas na transmissão, notando-se pouco ganho adicional para mais de 2 antenas. Assim, a diversidade espacial, inicialmente reduzida devido ao número baixo de usuários, é compensada pela seleção de antenas. Porém, com o aumento do número de usuários na rede, os ganhos obtidos com a seleção de antenas são reduzidos e tornam-se próximos de zero, como mostra a Figura 9.

Por outro lado, a taxa de transmissão média por setor para o

APF é pouco influenciada quando combinada com a seleção de antenas, como pode ser observado nas Figuras 7 e 9. O APF procura explorar a diversidade multiusuário, mas ao mesmo tempo tenta prover uma certa "justiça", isto é, prioriza não apenas usuários com boas condições de enlace mas também usuários com baixo histórico de taxa de transmissão. Dessa forma, o ganho de diversidade espacial que poderia ser obtido pela exploração da diversidade de multiusuário e pela seleção de antenas é reduzido quando a priorização de usuários com baixo histórico de taxa de transmissão também é considerada na alocação. Para o algoritmo APF, todos os valores de ganhos observados são menores que 5%.

Por fim, a taxa de transmissão média por setor para o algoritmo aleatório é apresentada na Figura 8. Pode ser visto que a taxa de transmissão média é melhorada com a combinação do algoritmo aleatório e a seleção de antenas. Como as informações do canal não são consideradas durante o processo de alocação de recursos nos domínios do tempo e frequência, as diversidades temporal e espacial observadas por ocasião da diversidade multiusuário não são exploradas no algoritmo aleatório. Porém, com a inclusão da técnica de seleção de antenas, a diversidade espacial agora explorada ocasiona em uma melhora na taxa de transmissão média dados, como mostram as Figuras 8 e 9. Ainda, quando o número de antenas é aumentado, observam-se valores de ganho ainda maiores, o que não ocorre significativamente para os outros dois algoritmos.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado o desempenho da seleção de antenas na transmissão juntamente com três algoritmos de alocação de recursos em um sistema OFDMA.

O algoritmo de maximização de capacidade (AMC) aloca os recursos aos usuários que possibilitam a transmissão a uma maior taxa possível. O algoritmo *proportional fair* (APF) prioriza não apenas usuários que possibilitam transmissões a altas taxas, mas também usuários com baixo histórico de taxa de transmissão. Por último, o algoritmo aleatório (AA) aloca os recursos aleatoriamente aos usuários, visando uma distribuição uniforme dos recursos de rede.

De acordo com os resultados de simulação, a seleção de antenas proporcionou ganhos significativos quando utilizando o AA e AMC, este último na condição de poucos usuários na rede. Atribui-se o reduzido valor de ganho no AMC à carga alta ao fato de a diversidade na transmissão ser extensivamente explorada já nos processos de alocação de recursos nos domínios do tempo e frequência, limitando o ganho proporcionado pela seleção de antenas. No APF, a priorização de usuários com baixo histórico de taxa de transmissão restringe a exploração da diversidade multiusuário. Por outro lado, quando utilizado o algoritmo aleatório, a seleção de antenas apresentou um papel relevante no aumento da capacidade de rede. Este fato é justificado pelo processo de escolha da antena, que é feito de acordo com o usuário que possibilite a transmissão com o esquema de modulação e codificação mais eficiente.

Por estas razões, conclui-se que a seleção de antenas pode trazer benefícios significativos a sistemas com processo de alocação de recursos aleatória, desde que se tenham informações de enlace reportados pelos usuários a escolha da antena de transmissão. Ainda, quando utilizado o algoritmo de maximização de capacidade, a seleção de antenas também pode ser benéfica, sendo desnecessário um número maior do que 2 antenas na transmissão para obter os ganhos de capacidade possíveis com tal técnica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Nokia de Tecnologia pelos suporte, experiência e conhecimento compartilhados. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo INdT, através do Projeto WiSiL, e pelo CNPq, através do projeto WiPA, Processo 554047/2006-3,

REFERÊNCIAS

- [1] K. Letaief e Y. J. Zhang, "Dynamic multiuser resource allocation and adaptation for wireless systems," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 13, no. 4, pp. 38–47, 2006.
- [2] 3GPP, "Requirements for evolved utra (e-utra) and evolved utran (e-utran)(release 8)," Disponível em <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25913.htm>, Tech. Rep., 2008.
- [3] G. J. Foschini e M. J. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 06, no. 03, 1998.
- [4] G. J. Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas," *Bell Labs Tech. J.*, no. 2, 1996.
- [5] D. Gore e A.J.Paulraj, "MIMO Antenna sub-set Selection for Space-Time Coding," *IEEE Transactions on Signal Processing*, no. 50, 2002.
- [6] R. Heath e A.J.Paulraj, "Antenna Selection for Spatial-Multiplexing System based on Minimum Error Rate," em *IEEE International Conference on Communications*, vol. 7, 2001.
- [7] M. A.F. Molisch e J.Winters, "Reduced-complexity transmit/receive-diversity System," *IEEE Transactions on Signal Processing*, no. 51, 2003.
- [8] T. Kolding, F. Frederiksen e A. Pokhariyal, "Low-Bandwidth channel quality indication for OFDMA frequency domain packet scheduling," em *Wireless Communication Systems, 2006. ISWCS '06. 3rd International Symposium on*, 2006, pp. 282–286.
- [9] Y. Pan e S. Aissa, "Dynamic resource allocation with beamforming for MIMO OFDM systems: performance and effects of imperfect CSI," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 12, pp. 4249–4255, 2007.
- [10] I. Berenguer, I. Wassell e X. Wang, "Opportunistic user scheduling and antenna selection in the downlink of multiuser MISO systems," em *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*, vol. 2, 2005, pp. 1138–1142 Vol. 2.
- [11] Z. Pan e L. Chen, "Antenna selection based user scheduling for downlink of multiuser MIMO systems," in *Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005 International Conference on*, vol. 1, 2005, pp. 716–721 vol.1.
- [12] V. Lau, "Proportional fair Space-Time scheduling for wireless communications," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 8, pp. 1353–1360, 2005.
- [13] 3GPP, "Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); lte physical layer - general description," Disponível em <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm>, Tech. Rep., 2009.
- [14] H. Lei, L. Zhang, X. Zhang e D. Yang, "System level evaluation of 3G long term evolution," em *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*, 2007, pp. 1–5.
- [15] J. J. Sánchez, D. Morales-Jiménez, G. Gómez e J. T. Enbrambasaguas, "Physical layer performance of long term evolution cellular technology," em *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd*, 2006, pp. 137–141.
- [16] 3GPP, "Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical channels and modulation(release 8)," Disponível em <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm>, Tech. Rep., 2009.
- [17] —, "Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); multiplexing and channel coding(release 8)," Disponível em <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36212.htm>, Tech. Rep., 2009.
- [18] —, "Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical layer procedures(release 8)," Disponível em <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36213.htm>, Tech. Rep., 2009.
- [19] —, "Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical layer - measurements(release 8)," Disponível em <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36214.htm>, Tech. Rep., 2009.
- [20] —, "Physical layer aspects for evolved universal terrestrial radio access (utra)(release 7)," Disponível em <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25814.htm>, Tech. Rep., 2006.
- [21] A. Pokhariyal, K. Pedersen, G. Monghal, I. Kovacs, C. Rosa, T. Kolding e P. Mogensen, "HARQ aware frequency domain packet scheduler with different degrees of fairness for the UTRAN long term evolution," em *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, 2007, pp. 2761–2765.
- [22] A. Pokhariyal, T. Kolding e P. Mogensen, "Performance of downlink frequency domain packet scheduling for the UTRAN long term evolution," em *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on*, 2006, pp. 1–5.
- [23] N. Wei, A. Pokhariyal, T. Sorensen, T. Kolding e P. Mogensen, "Performance of MIMO with frequency domain packet scheduling in UTRAN LTE downlink," em *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, 2007, pp. 1177–1181.
- [24] L. Jorgueski e R. Prasad, "Downlink resource allocation in beyond 3G OFDMA cellular systems," em *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*, 2007, pp. 1–5.
- [25] M. C. Jeruchim, P. Balaban e K. S. Shanmugan, *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques*. Springer, 2000.