

Pareamento de subportadoras, alocação de potência e seleção de modo em redes cooperativas OFDM

Eloise de Carvalho Rodrigues¹, Alexandre Matos Pessoa², Francisco Rafael M. Lima^{1,2}, Tarcísio F. Maciel² e Francisco Rodrigo P. Cavalcanti².

Resumo— A quarta geração das comunicações móveis proporciona benefícios como maiores taxas de dados, menor consumo de potência e menor latência. Comunicação cooperativa consiste em um conceito chave para estes sistemas que permite obter ganhos em taxa de dados e confiabilidade. O potencial das comunicações cooperativas pode ser melhor explorado quando essa tecnologia é utilizada em conjunto com estratégias de alocação de recursos de rádio. Neste trabalho, formulamos um problema de maximização da taxa de dados que leva em consideração o pareamento de subportadoras OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), alocação de potência de transmissão e seleção de modo (com ou sem diversidade no receptor). Além disso, consideramos uma adaptação realista entre SNR (do inglês, *Signal-to-Noise Ratio*) e taxa de transmissão.

Palavras-Chave— Pareamento de subportadoras, alocação de potência, seleção de modo, sistemas cooperativos.

Abstract— The fourth generation of mobile communications provides many benefits such as high transmit data rates, low transmit power consumption and reduced latency. Cooperative communication consists in a key concept to those systems that allows the achievement of gains in transmit data rates and reliability. The potential of cooperative communications can be better exploited when this technology is used jointly with radio resource allocation strategies. In this work we formulate the data rate maximization problem that takes into account subcarrier pairing of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) subcarriers, transmit power allocation and transmit mode selection (with or without diversity in the receiver). Besides, we also consider a realistic link adaptation model that maps SNR (Signal-to-Noise Ratio) in transmit data rate.

Keywords— Subcarrier pairing, power allocation, mode selection, cooperative systems.

I. INTRODUÇÃO

A atual geração de redes de comunicações sem fio, 4G (do inglês, *4th Generation*), apresenta uma série de avanços tecnológicos que, de forma conjunta, permitem a transmissão de altas taxas de dados, baixas latências, garantia de QoS (do inglês, *Quality of Service*) e satisfação para diferentes serviços multimídia [1].

A tecnologia de modulação OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) surgiu como uma ferramenta importante para combater a seletividade em frequência do canal móvel que causa interferência intersimbólica. Por esta e

outras razões, OFDM foi escolhida como técnica de transmissão básica em sistemas 4G tal qual LTE-A (do inglês, *Long-Term Evolution-Advanced*) [2]. Além dessa tecnologia, o paradigma de comunicações cooperativas traz um modelo onde caminhos independentes entre fonte e destino são gerados através da introdução de *relays* entre os mesmos e, ao passo que o coeficiente de correlação entre esses caminhos diminui, as diferentes atenuações experimentadas pelos canais podem propiciar uma recuperação mais fiel da informação inicialmente transmitida. Esse modelo de comunicação permite que a natureza *broadcast* de canais sem fio seja melhor explorada e, ao utilizar-se dessa característica, permite a inserção do conceito de diversidade espacial, que também contribui para melhor performance do sistema.

Mesmo com o advento de tais tecnologias, prover altas taxas de dados, que são cada vez mais requisitadas por aplicações que utilizam redes sem fio, continua sendo um grande desafio. Técnicas de alocação de recursos de rádio ou RRA (do inglês, *Radio Resource Allocation*) são de grande importância para um melhor aproveitamento dos benefícios trazidos pelo modelo de comunicações cooperativas.

Problemas envolvendo alocação de recursos em sistemas OFDM cooperativos, tais como pareamento de subportadoras, alocação de potência e seleção de modo, vêm sendo amplamente estudados. Na técnica de pareamento de subportadoras, a mensagem transmitida pela fonte em uma subportadora no primeiro salto (*fonte-relay*) é encaminhada pelo *relay* ao destino em uma subportadora, não necessariamente a mesma usada antes, no segundo salto (*relay-destino*). A abordagem de alocação de potência visa distribuir de forma ótima os recursos de potência disponíveis entre os nós da rede, enquanto a seleção de modo permite ao sistema configurar de forma automática e oportunista o uso ou não da diversidade cooperativa no receptor destino.

A alocação de potência e o pareamento de subportadoras são tratados em [3] com o objetivo de maximizar a taxa de transmissão fim-a-fim em um sistema OFDM cooperativo multi-*relay* de dois saltos que utiliza o protocolo AF (do inglês, *Amplify and Forward*), porém sem uso de seleção de modo. Um problema semelhante foi estudado em [4], em que foi considerado um sistema cognitivo com uma fonte, um *relay* e um destino, utilizando o protocolo DF (do inglês, *Decode and Forward*) sem uso de diversidade no receptor, cujo objetivo era maximizar a taxa de transferência. Os pares de subportadoras e as potências foram otimizadas conjuntamente de forma a maximizar o rendimento total do sistema sem causar interferência excessiva no sistema primário. Os

¹Departamento de Engenharia de Computação, Universidade Federal do Ceará, Sobral, Brasil. ²Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio (GTEL), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil. E-mails: eloise@alu.ufc.br, {alexandrematos, rafaelm, maciel, rodrigo}@gtel.ufc.br. Francisco Rafael Marques Lima gostaria de agradecer pelo apoio financeiro da FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por meio de bolsa de produtividade em pesquisa.

autores desse trabalho propõem um algoritmo subótimo em que o pareamento de subportadoras é realizado considerando a qualidade do canal e a interferência introduzida ao sistema.

Em [5] os autores estudaram a alocação de potência e o pareamento de subportadoras ótimos em uma rede de *relays* AF de duas vias com multi-portadoras, tendo como objetivo maximizar a eficiência energética e manter as restrições de QoS requisitadas, sem considerar diversidade no receptor. Foi proposto um algoritmo subótimo que diminui a complexidade do pareamento de subportadoras. Em outro trabalho [6], os autores investigam a maximização da taxa de dados em um cenário OFDM cooperativo de dois saltos. Nesse trabalho, os autores assumiram um mapeamento discreto entre SNR e taxa ou MCS (do inglês, *Modulation and Coding Schemes*) e realizam o pareamento de subportadoras e a alocação de potência ótimos, porém sem considerar diversidade no receptor e seleção de modo.

Um estudo de seleção de modo, atribuição de grupo de recursos e alocação de potência em sistemas de comunicação celular D2D (do inglês, *Device to Device*) foi realizado em [7]. O problema tratado visa maximizar a taxa total do sistema de todos os *links* D2D e celulares, garantindo ao mesmo tempo as taxas mínimas requisitadas de *links* celulares e D2D. Para resolver este problema, foi caracterizada a alocação de potência ideal quando um *link* D2D opera no modo direto ou no modo *relay*. Em seguida, usando esses resultados de alocação de potência, a seleção do modo e a atribuição de grupos de recursos puderam ser formuladas como um problema de atribuição de tarefas cuja solução ótima pode ser obtida em tempo polinomial. Operando em modo *relay*, utiliza-se o protocolo DF, mas também não considera-se diversidade na recepção.

O objetivo do trabalho [8] é maximizar a soma ponderada da taxa em um sistema OFDM contendo uma fonte, um *relay* e um destino em que o protocolo DF é aplicado; isso foi feito através da otimização conjunta do pareamento de subportadoras e alocação de potência. Para evitar interferência, cada nó transmite em um *time slot* e, além disso, o destinatário combina os sinais recebidos da fonte e do *relay* através do método MRC (do inglês, *Maximal Ratio Combining*).

No trabalho [9] são estudados os impactos do modo de transmissão, potência de transmissão e posicionamento do *relay* na capacidade e no consumo de potência, tendo como objetivo melhorar a eficiência energética. Os modos de transmissão considerados são: direto, através do *relay* ou cooperativo com diversidade, utilizando MRC para combinar os sinais. A seleção de modo é feita baseada ou na taxa de transferência ou na intensidade do sinal, aferindo-se que a seleção orientada a taxa de transferência obteve melhores resultados. O estudo não considera o pareamento de subportadoras e, além disso, a seleção de modo é feita de forma heurística e não de forma ótima.

Em [10] é considerado um problema cujo objetivo é minimizar a energia total gasta na fonte e no *relay*, considerando um sistema cooperativo OFDM de dois saltos. A transmissão pode ser feita no modo direto ou cooperativo, tendo-se total conhecimento sobre as condições do canal para escolha do modo. O destino faz, então, a seleção de modo (que não

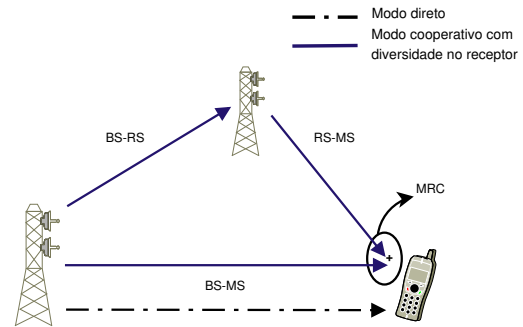


Fig. 1. Modelo de sistema cooperativo adotado.

é realizada de forma otimizada juntamente com os demais recursos), o pareamento de subportadoras e a alocação de potência. Adota-se o protocolo DF e assume-se, de forma irrealista, que a adaptação entre SNR (do inglês, *Signal-to-Noise Ratio*) e taxa é regida por uma função log convexa (a equação da capacidade de Shannon).

Com exceção de [9] e [6], os trabalhos supracitados consideram que a relação entre SNR e taxa é uma função contínua e logarítmica. Embora essas funções ofereçam maiores facilidades na análise matemática, sistemas reais dispõem de um conjunto de taxas de transmissão de dados realizáveis discreto e finito. Apesar de mais aderente à realidade, a modelagem da adaptação de enlace através de funções discretas que emulam MCSs oferecem maiores desafios, pois tornam os problemas de otimização totalmente combinatoriais, que são mais complexos [11]. Somente em [8], [9] e [10] foi considerada diversidade e seleção de modo no receptor, porém esses trabalhos propuseram heurísticas para seleção de modo, não o resolvendo de forma ótima e integrada às outras funcionalidades de pareamento de subportadoras e alocação de potência.

A principal contribuição deste trabalho é a formulação do problema integrado de pareamento de subportadoras, alocação de potência e seleção de modo em redes cooperativas considerando um mapeamento discreto entre SNR e taxa. Além disso, propomos a solução ótima deste problema através do uso de bibliotecas computacionais baseadas em otimização inteira. Por fim, realizamos uma análise de desempenho em que os ganhos da solução proposta são demonstrados em relação a soluções de referência.

O restante do artigo está organizado tendo na seção II uma descrição da modelagem do sistema; na seção III a formulação do problema e a solução ótima obtida; na seção IV uma análise de desempenho da solução proposta e, na seção V, as conclusões gerais sobre o trabalho.

II. MODELAGEM DO SISTEMA

O cenário adotado neste trabalho é mostrado na figura 1 e consiste em um sistema cooperativo de dois saltos contendo uma estação base ou BS (do inglês, *Base Station*), um *relay* ou RS (do inglês, *Relay Station*) e um terminal móvel de destino ou MS (do inglês, *Mobile Station*). Assume-se que o sistema possui um total de N subportadoras OFDM, que são utilizadas para transmissão tanto no enlace fonte-*relay* (BS-RS) quanto no enlace *relay*-destino (RS-MS) e no enlace

direto entre fonte e destino (BS-MS). Tais subportadoras experimentam desvanecimento *Rayleigh* e considera-se que todas as informações sobre o canal são conhecidas. De forma a evitar interferência devido ao reuso das subportadoras, assume-se que o sistema opera no modo *half-duplex* em dois diferentes *slots*. No primeiro *slot* ocorre a transmissão da fonte utilizando possivelmente as N subportadoras. No segundo *slot*, ocorre a transmissão do *relay* utilizando potencialmente todas as mesmas N subportadoras.

No modelo proposto, a transmissão pode ser feita de dois modos, $\forall s \in \{1, 2\}$:

- Modo direto ($s = 1$): os dados são transmitidos diretamente da fonte através das N subportadoras do enlace BS-MS, sem o uso do *relay*.
- Modo cooperativo com diversidade ($s = 2$): os dados são igualmente transmitidos através das N subportadoras dos *links* BS-MS e BS-RS-MS. Nesse modo, os dois sinais que chegam no destino são combinados pelo algoritmo MRC de modo melhorar a qualidade da SNR experimentada pelo receptor.

Uma das considerações feitas nesse trabalho, como dito na seção anterior, foi que a taxa de transmissão e a relação sinal-ruído, SNR, estão relacionadas por um mapeamento discreto, representado por um esquema de modulação e codificação (MCS). Portanto, adotamos uma função monotônica crescente $f(\cdot)$ para representar tal mapeamento. Essa função admite que a taxa r_m será atingida se uma dada SNR estiver dentro de um certo limiar, ou seja, $\gamma_m \leq \text{SNR} < \gamma_{m+1}$. De um total de M níveis de MCS, cada subportadora deve atingir uma taxa r_m , $\forall m \in \{1, 2, \dots, M\}$.

Assume-se que o *relay* emprega o protocolo DF, que consiste em decodificar o sinal recebido da fonte, recodificá-lo e retransmiti-lo ao destino. Assim, a SNR final (ou equivalente) $\gamma^{\text{eq}} \in \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_M\}$ do sinal recebido no destino pode ter duas expressões distintas e depende do modo de transmissão empregado, conforme mostrado a seguir [14]:

$$\gamma^{\text{eq}} = \begin{cases} \gamma_n^{\text{SD}}, & \text{se } s = 1, \\ \min\{\gamma_n^{\text{SR}}, \gamma_n^{\text{SD}} + \gamma_q^{\text{RD}}\}, & \text{se } s = 2, \end{cases} \quad (1)$$

em que γ_n^{SD} , γ_n^{SR} e γ_q^{RD} representam, respectivamente, a SNR atingida na subportadora n do enlace BS-MS, a SNR atingida na subportadora n do enlace BS-RS e a SNR atingida na subportadora q do enlace RS-MS. Além disso, quando o sistema opera no modo cooperativo ($s = 2$), o uso do MRC no receptor requer que os sinais combinados na MS possuam mesma modulação e codificação, isto é, os dois fatores dentro do operador $\min\{\cdot\}$ da equação (1) devem ser iguais.

A potência total disponível na fonte, $P_{\text{tot}}^{\text{S}}$, e a potência total disponível no *relay*, $P_{\text{tot}}^{\text{R}}$, devem ser distribuídas entre as subportadoras OFDM de cada salto. Define-se $P_{n,s,m}^{\text{S}}$ como sendo a potência mínima necessária para a subportadora n dos enlaces BS-RS e BS-MS transmitir no nível de MCS m ao operar nos modos $s = 2$ e $s = 1$, respectivamente. Também define-se $P_{n,q,s,m}^{\text{R}}$ como sendo a potência mínima necessária para que a subportadora q do enlace RS-MS que foi pareada com a subportadora n do enlace BS-RS transmita no nível de MCS m quando opera no modo $s = 2$. Em

conclusão, define-se $g_n^{\text{SD}} = \frac{|h_n^{\text{SD}}|^2}{\sigma^2}$, $g_n^{\text{SR}} = \frac{|h_n^{\text{SR}}|^2}{\sigma^2}$ e $g_q^{\text{RD}} = \frac{|h_q^{\text{RD}}|^2}{\sigma^2}$ como sendo os ganhos de canal normalizados pela potência do ruído térmico σ^2 , respectivamente, de cada subportadora $n, q \in \{1, 2, \dots, N\}$ dos enlaces BS-MS, BS-RS e RS-MS, sendo h_n^{SD} , h_n^{SR} e h_q^{RD} as respostas em frequência dos canais. Por fim, substituindo $P_{n,s,m}^{\text{S}}$, $P_{n,q,s,m}^{\text{R}}$, g_n^{SR} , g_n^{SD} e g_q^{RD} , $\forall (n, q) \in \{1, 2, \dots, N\}$, na equação (1) podemos obter os possíveis valores de potência que podem ser alocados para as subportadoras de cada salto de modo que os respectivos níveis de MCS sejam atingidos, conforme mostrado nas equações (2) e (3).

$$P_{n,s,m}^{\text{S}} = \begin{cases} \frac{\gamma_m}{g_n^{\text{SD}}}, & \text{se } s = 1 \quad (\text{n\~ao cooperativo}), \\ \frac{\gamma_m}{g_n^{\text{SR}}}, & \text{se } s = 2 \quad (\text{cooperativo}). \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{n,q,s,m}^{\text{R}} = \begin{cases} 0, & \text{se } s = 1 \text{ ou } g_n^{\text{SR}} < g_n^{\text{SD}}, \\ \frac{\gamma_m}{g_q^{\text{RD}}} \left(1 - \frac{g_n^{\text{SD}}}{g_n^{\text{SR}}}\right), & \text{se } s = 2 \text{ e } g_n^{\text{SR}} \geq g_n^{\text{SD}}. \end{cases} \quad (3)$$

Note que nas equações (2) e (3) podemos de fato obter os valores $P_{n,s,m}^{\text{S}}$ e $P_{n,q,s,m}^{\text{R}}$ para cada um dos possíveis valores de γ_m . Por fim, quanto ao pareamento de subportadoras, para o caso de transmissão no modo 2 (modo cooperativo com diversidade) cada subportadora do salto BS-RS deve estar pareada a uma, e somente uma, subportadora do salto RS-MS.

III. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO ÓTIMA

O objetivo do problema aqui tratado é maximizar a taxa total de um sistema OFDM cooperativo com uma fonte, um *relay* e um receptor sujeito às restrições de potência disponíveis na fonte e no *relay*. O problema é formulado a seguir:

$$\max_{\{x_{n,q,s,m}\}} \sum_{\forall n} \sum_{\forall q} \sum_{\forall s} \sum_{\forall m} r_m x_{n,q,s,m}, \quad (4a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\forall n} \sum_{\forall q} \sum_{\forall s} \sum_{\forall m} P_{n,s,m}^{\text{S}} x_{n,q,s,m} \leq P_{\text{tot}}^{\text{S}}, \quad (4b)$$

$$\sum_{\forall n} \sum_{\forall q} \sum_{\forall s} \sum_{\forall m} P_{n,q,s,m}^{\text{R}} x_{n,q,s,m} \leq P_{\text{tot}}^{\text{R}}, \quad (4c)$$

$$\sum_{\forall q} \sum_{\forall s} \sum_{\forall m} x_{n,q,s,m} \leq 1, \forall n, \quad (4d)$$

$$\sum_{\forall n} \sum_{\forall s} \sum_{\forall m} x_{n,q,s,m} \leq 1, \forall q. \quad (4e)$$

A variável binária $x_{n,q,s,m}$ é a variável de otimização deste problema. Essa assume o valor 1 caso a n -ésima subportadora do primeiro salto estiver pareada com a q -ésima subportadora do segundo salto e atingir o nível de MCS m transmitindo no modo s , $\forall s \in \{1, 2\}$. Caso contrário, essa variável assume o valor 0.

As restrições (4b) e (4c) asseguram que a fonte e o *relay* não ultrapassem o limite de potência de transmissão disponível em cada nó, respectivamente. Para $s = 1$, a restrição (4d) assegura que cada subportadora do salto 1 esteja utilizando apenas um nível de MCS. Para $s = 2$ essa mesma restrição garante que

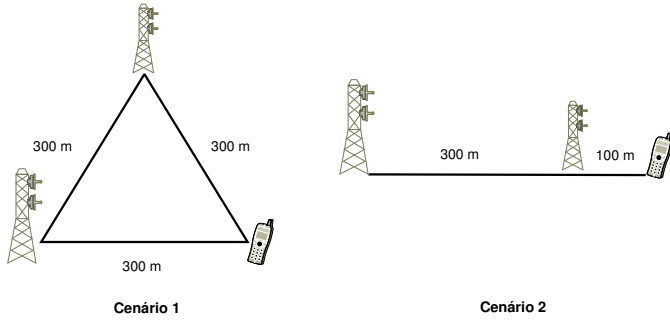


Fig. 2. Cenários simulados.

cada subportadora n do primeiro salto esteja pareada com apenas uma subportadora q do segundo salto e transmita em um único nível de MCS. Já a restrição (4e) assegura que cada subportadora q do segundo salto deve estar pareada com apenas uma subportadora n do salto 1 e utilizar somente um nível de MCS para o modo $s = 2$.

Com o problema equacionado na forma de um ILP (do inglês, *Integer Linear Problem*), a solução ótima desse pode ser obtida utilizando um algoritmo do tipo *Branch and Bound*, que é capaz de reduzir drasticamente o espaço de busca quando comparado com o método da busca exaustiva [12].

IV. ANÁLISE DE DESEMPENHO

Nesta seção serão analisados os impactos da seleção de modo, do pareamento de subportadoras e da alocação de potência em diferentes cenários cooperativos, comparando a solução ótima modelada neste trabalho com duas outras soluções e destacando as principais contribuições aqui obtidas.

A. Parâmetros de simulação

A fim de validar as contribuições do presente trabalho, foram utilizadas duas outras soluções que não utilizam seleção de modo. A primeira delas é a solução ótima proposta em [6] para o problema de alocação de potência e pareamento de subportadoras em um sistema cooperativo sem seleção de relays. Em [6], assume-se que o enlace entre fonte e destino não é utilizado e, portanto, não há combinação por diversidade. A segunda solução consiste de uma solução não cooperativa convencional, sem a utilização do relay. Portanto, esta solução equivale à maximização da taxa de dados entre fonte e relay utilizando-se o algoritmo HH (Hughes Hartogs) para alocação de potência [13]. A primeira solução é identificada nos gráficos como “Otim. coop. s/ comb. no RX” enquanto que a segunda é identificada como “Otim. direta BS-MS”. Por fim, a solução proposta neste artigo está identificada nos gráficos como “Otim. coop. c/ seleção de modo”.

As principais considerações do modelo apresentado neste artigo foram modeladas em um simulador computacional. Na TABELA I, apresentamos os principais parâmetros do modelo considerado. Em resumo, o sistema considerado adota 32 subportadoras OFDM em cada salto (BS-MS, BS-RS e RS-MS), cada uma com largura de banda de 15 kHz, potência de 8 W para fonte e relay e 12 níveis de MCS. Consideramos

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.

Parâmetros de simulação	
Banda por subportadora (B)	15 kHz
Níveis de MCS (M)	12
Subportadoras por salto (N)	32
Potência total da fonte (P_{tot}^S)	8 W
Potência total do relay (P_{tot}^R)	8 W
Potência do ruído térmico na banda de uma subportadora (σ^2)	$5,9716 \times 10^{-17}$ W
Perda de percurso ($L = 10n \log_{10}(d)$, sendo d a distância em metros)	3,75
Número de multipercursos por salto	5

que o canal foi modelado através dos principais mecanismos de propagação: perda de percurso, desvanecimento de larga (Lognormal) e pequena (Rayleigh) escalas. Considerou-se, também, que a SNR mínima para transmitir r_m bits é dada pela discretização da curva de Shannon, isto é, $SNR_m = 2^{r_m} - 1$, tal qual usado em [11]. Finalmente, considerou-se 500 amostras de Monte Carlo para cada ponto simulado, de forma a assegurar uma boa confiabilidade estatística.

A figura 2 mostra dois cenários adotados para a obtenção dos resultados aqui apresentados. No primeiro cenário, considerou-se que os nós fonte, relay e destino estão dispostos em um triângulo equilátero, com distância de 300 metros entre eles. Já o segundo cenário trata-se de um sistema onde fonte, relay e destino estão dispostos em linha reta, com o relay mais próximo ao destino. A principal ideia desses dois cenários é emular a dinâmica de um sistema cooperativo em que a distância entre os nós podem mudar dependendo do movimento do terminal móvel ao longo da área de cobertura.

B. Resultados

Nas Figuras 3 e 4 estão os gráficos da Função de Distribuição Acumulada ou CDF (do inglês, *Cumulative Distribution Function*) da eficiência espectral obtida (taxa de dados total dividida pela largura de banda ocupada por todas as subportadoras) quando empregados os cenários 1 e 2 apresentados na Figura 2, respectivamente. Para cada cenário, apresentamos a solução proposta neste artigo juntamente com as outras duas soluções apresentadas na seção IV.

Ao analisar a Figura 3, que representa o cenário em que fonte, relay e destino estão dispostos nos vértices de um triângulo equilátero cujo lado mede 300 metros, pode-se perceber que a solução que considera apenas o modo direto e a solução aqui proposta, que considera diversidade, apresentaram os melhores resultados. A solução aqui proposta obtém um ganho no 50º percentil de aproximadamente 13,5% em relação à solução com cooperação, mas sem combinação no RX e de 9% em relação à solução que utiliza apenas o modo direto. Isso se deve ao fato de que, com os nós dispostos dessa forma, o modo de transmissão direto entre fonte e destino torna-se uma boa opção, pois o destino está tão próximo da fonte quanto do relay. A solução cooperativa sem diversidade, porém, ignora a opção de transmitir diretamente e, como pode-se observar, obtém o pior resultado.

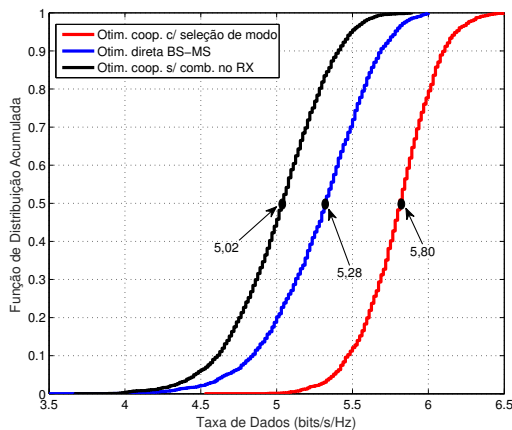


Fig. 3. CDF da eficiência espectral total para a solução proposta e as outras duas soluções de referência no cenário 1.

A Figura 4 mostra os resultados obtidos através de simulações no segundo cenário, conforme mostrado na Figura 2. Na Figura 4, vemos que a solução que emprega apenas o modo direto apresenta um desempenho inferior à solução que emprega modo cooperativo sem diversidade. Esse comportamento é justificado pela grande distância entre fonte e destino, algo que leva a uma atenuação significativa do sinal recebido no modo direto. Esse mesmo problema tem efeitos menos significativos na solução que emprega sempre o modo cooperativo sem diversidade, pois a presença do repetidor reduz os efeitos da atenuação do canal entre fonte e destino. Por fim, vemos que a solução proposta nesse artigo obtém um ganho no 50º percentil de aproximadamente 4,5% em relação à solução com cooperação, mas sem combinação no RX e de 17,8% em relação à solução que utiliza apenas o modo direto.

Nos dois cenários discutidos, vimos que a solução proposta apresenta o melhor desempenho. Nestes dois casos, a solução ótima encontrada para o problema proposto nesse artigo comportou-se de forma a obter as melhores taxas de dados devido à sua característica de adaptar-se ao sistema, selecionando o modo de transmissão que melhor atenderá aos requisitos de qualidade. Enquanto no cenário 1 o modo de transmissão direto (sem cooperação) foi usado de forma oportunista em algumas subportadoras pelo seletor de modo a fim de reduzir a potência transmitida na fonte, o modo com cooperação e diversidade no receptor foi escolhido com frequência nas subportadoras no cenário 2 com o objetivo de compensar a maior distância entre fonte e destino.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, analisou-se o problema de maximização da taxa de dados em um sistema OFDM cooperativo. Esse problema leva em consideração a alocação de potência, o pareamento de subportadoras e a seleção de modo, que foram otimizados conjuntamente por meio de algoritmos de resolução de problemas de otimização linear a inteira. Os resultados mostram que a solução comportou-se melhor que algumas soluções de referências colhidas a literatura que não consideram seleção de modo e diversidade. De fato, a solução

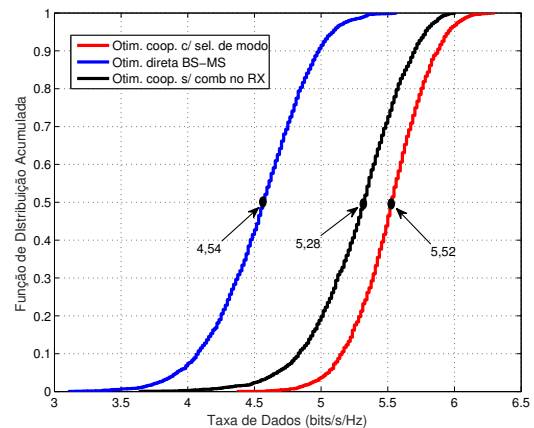


Fig. 4. CDF da eficiência espectral total para a solução proposta e as outras duas soluções de referência no cenário 2.

proposta consegue atingir taxas bem mais elevadas devido ao fato de considerar todos os modos de transmissão possíveis e, com isso, conseguir melhor adaptar-se às mudanças na disposição dos nós do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall e J. Skold, "4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband". *Academic press*, 2013.
- [2] K.J. R. Liu, "Cooperative communications and networking". *Cambridge university press*, 2009.
- [3] W. Dang et al, "Subcarrier-pair based resource allocation for cooperative multi-relay OFDM systems." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 9.5, 2010.
- [4] M. Shaat e F. Bader. "Joint subcarrier pairing and power allocation for DF-relayed OFDM cognitive systems." *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011 IEEE, pp. 1-6. IEEE, 2011.
- [5] K. Singh, A. Gupta, M.L. Ku, e T. Ratnarajah, "Joint Subcarrier Pairing and Power Allocation for Two-Way Energy-Efficient Relay Networks." *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2016 IEEE, pp. 1-6. IEEE, 2016.
- [6] A. M. Pessoa, "Alocação de Recursos com Uso de Repetidores para Otimização em Redes Móveis de Última Geração". *Trabalho de conclusão de curso*, Universidade Federal do Ceará, 2015.
- [7] T. D. Hoang, L. B. Le e T. Le-Ngoc, "Joint Mode Selection and Resource Allocation for Relay-Based D2D Communications." *IEEE Communications Letters* 21, no. 2 (2017): 398-401, 2017.
- [8] C. N. Hsu, H. J. Su, e P. H. Lin, "Joint subcarrier pairing and power allocation for OFDM transmission with decode-and-forward relaying." *IEEE Transactions on Signal Processing* 59.1: 399-414, 2011.
- [9] J. H. Huang e S. Y. Hsu, "Joint power assignment and relay location design for cooperative power-efficient networks with adaptive transmission mode selection." *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2015 IEEE, pp. 1141-1146. 2015.
- [10] Chaoping, Guo, Yang Jungang, Bai Cheng, Gao Mei, and Chen Liju. "An Energy Pricing-Based Subcarrier Pairing and Power Allocation for Cooperation OFDM System." *Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA)*, 2015 Sixth International Conference on, pp. 112-115. IEEE, 2015.
- [11] A. M. Pessoa, F. R. M. Lima, T. F. Maciel e F. R. P. Cavalcanti, *Joint Bit Loading and Subcarrier Matching in Two-Hop Cooperative Systems*, XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2016.
- [12] IBM, "IBM ILOG CPLEX Optimizer." [Online]. Disponível em: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>
- [13] M. Bohge, J. Gross, A. Wolisz e M. Meyer, "Dynamic resource allocation in OFDM systems: an overview of cross-layer optimization principles and techniques," in *IEEE Network*, vol. 21, no. 1, pp. 53-59, Jan.-Fev. 2007.
- [14] Y-W. P. Hong, W.-J. Huang e C.-C. Jay Kuo. "Cooperative communications and networking: technologies and system design". *Springer Science & Business Media*, 2010.