

Estimação de Canal em Sistemas Sem Células Sujeitos ao Descasamento RF

Rafael Moura Duarte, Marcelo Sampaio Alencar, Waslon Terllizzie Araújo Lopes, Fabrício Braga Soares
Carvalho e Danilo Brito Almeida

Resumo— Nos últimos anos, estudos de desempenho têm sido propostas de soluções colocadas para problemas típicos de sistemas de comunicações sem células, isto é, em que não há estações radiobase responsáveis por uma região, mas os pontos de acesso atendem a todos os usuários com os quais elas consigam se comunicar. Neste trabalho apresenta-se a análise de desempenho desse tipo de sistema no enlace de descida, considerando o efeito de interferência-piloto e o descasamento de radiofrequência. A análise é feita com base nas taxas médias. O método de estimação de canal por minimização do erro quadrático médio foi adaptado para o caso em que há a presença do descasamento de radiofrequência de variação lenta, e as variâncias do erro de estimação e da estimativa de canal desse cenário foram obtidos. Essas equações foram usadas para analisar o desempenho do sistema contaminado por esse efeito.

Palavras-Chave— Descasamento RF, Estimação de canal, Interferência-piloto, Sistemas sem célula, Taxas alcançáveis.

Abstract— In recent years, performance studies have been carried out and solutions have been proposed for typical problems of cell-free communications systems, in which there are no radio base stations responsible for a region, but access points serve all users with whom they can communicate. This paper presents a performance analysis of this type of system in the downlink, considering the effect of pilot interference and RF mismatch. The analysis is based on the average transmission rates. The mean squared error based channel estimation equation, the estimated channel and estimation error variances in the presence of radiofrequency mismatch were obtained, and these equations were used to analyze the performance of the system contaminated by this effect.

Keywords— RF mismatch, Channel Estimation, Pilot Interference, Cell-free systems, Achievable Rates.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de comunicações podem ser classificados quanto à forma e à localização das suas estações radiobase. Sistemas multicelulares concentrados são aqueles em que todas as antenas da estação radiobase encontram-se co-localizadas em um ponto da célula. Nos sistemas distribuídos, as antenas da estação radiobase estão espalhadas pela célula, em pontos de acesso (PA) ou unidades radiobase (RAU – *Remote Antenna Unity*) compostos por arranjos pequenos [1,2]. Recentemente, têm sido estudados os sistemas sem células (*cell-free*) [3], os

Rafael Moura Duarte, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG): rafael.duarte@ee.ufcg.edu.br; Marcelo Sampaio Alencar, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG): malencar@dee.ufcg.edu.br; Waslon Terllizzie Araújo Lopes, Fabrício Braga Soares Carvalho, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Universidade Federal da Paraíba (UFPB): fabricio@cear.ufpb.br; Danilo Brito de Almeida, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Universidade Federal da Paraíba (UFPB): danilo.almeida@ee.ufcg.edu.br. Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES)

quais não possuem estações radiobase responsáveis por regiões geográficas específicas. Neles, como nos sistemas distribuídos, os pontos de acesso estão distribuídos ao longo do espaço.

Com a diminuição na dimensão das células, e com a popularização do conceito de sistemas sem células, há a necessidade de se comparar o desempenho desse novo tipo de sistema com sistemas compostos por células pequenas, como foi feito por Ngo *et al* [4]. Considerando um modelo de canal composto por desvanecimentos de pequena e de grande escala, ficou demonstrado que sistemas sem células possibilitam a elevação das taxas de transmissão nos enlaces de subida e de descida. Em especial, quando os coeficientes de sombreamento se encontram correlacionados espacialmente, o desempenho de ambos os sistemas piora. No entanto, os sistemas sem células se mostraram mais robustos.

Nos modelos sem células, por definição, todos os pontos de acesso atendem a todos os usuários do sistema. Na prática, os sinais transmitidos por alguns pontos de acesso não são recebidos com intensidade suficiente para serem usados de forma construtiva. Por esse motivo, alguns trabalhos têm sugerido o uso de um método de seleção de pontos de acesso baseado no usuário (*user centric*) [5]. Nesse método, apenas um terminal móvel é atendido pelos pontos de acesso cujos coeficientes de canal são mais fortes. Os resultados revelaram um ganho nas taxas de transmissão do sistema, com o uso de três métodos de estimação de canal.

Um dos tópicos estudados nesse novo sistema é o critério de controle de potência no enlace de descida. A fim de tornar as taxas de transmissão dos usuários mais uniformes, Ngo *et al* [6] obtiveram uma expressão fechada para a taxa alcançável de *downlink*, e a usaram em conjunto com o critério de controle de potência chamado max-min. O desempenho desse sistema foi comparado com aqueles compostos por células pequenas, e os resultados mostraram taxas muito mais concentradas em torno de valores específicos. Adicionalmente, os autores demonstraram que o uso de critérios especiais para a distribuição de sequências-piloto são vantajosas quando há seu reúso.

A otimização dos coeficientes de controle de potência no enlace de descida ainda foi objeto de estudo no trabalho de Bashar *et al* [7]. Nesse caso, a otimização se dá nas transmissões do enlace de subida (*uplink*), mas esse aprimoramento leva ao aumento da complexidade dos métodos. A fim de resolver esse problema, os autores obtiveram uma expressão fechada para a taxa de subida, e desenvolveram um algoritmo iterativo para a otimização. Com esse método, projetam-se os coeficientes de recepção e a alocação de potência.

Neste trabalho, o desempenho de sistemas sem células com

CSI (*Channel State Information*) imperfeito e interferência-piloto é estudado. Em especial, obtém-se as variâncias das distribuições que caracterizam a estimativa de canal com descasamento de radiofrequência, usando um método de estimação baseado em minimização de erro quadrático médio. Na Seção II, encontra-se descrito o modelo de simulação do sistema sem células. Na Seção III, discute-se brevemente sobre o efeito denominado descasamento de radiofrequência. Na Seção IV, apresentam-se os detalhes da estimação de canal. Na Seção V, são apresentados os resultados. As conclusões são apresentadas na Seção VI.

II. MODELO DE SIMULAÇÃO

No modelo considerado para o sistema sem células, há K terminais móveis (TM) e M pontos de acesso distribuídos em uma região com área $d \times d$. Nesse modelo, cada ponto de acesso possui uma única antena, e todos eles estão ligados, por meio do *backhaul*, a uma mesma CPU. Como o nome indica, a área de cobertura não está dividida em células, e isso é o que o diferencia dos sistemas distribuídos convencionais. Um sistema sem células típico se encontra ilustrado na Fig. 1.

Neste trabalho, o canal entre o terminal móvel k e o m -ésimo ponto de acesso foi modelado usando os desvanecimentos de pequena escala e de grande escala. O coeficiente de desvanecimento de pequena escala h_{mk} foi modelado com uma variável aleatória gaussiana complexa com média zero e variância unitária. O coeficiente de desvanecimento de grande escala β_{mk} foi modelado usando dois fatores: as perdas geométricas e o sombreamento. As perdas geométricas foram modeladas usando o modelo HATA-COST231 [4]. Nesse modelo, a curva de perdas geométricas é dividida por dois pontos de quebra: b_0 , b_1 , em que o primeiro ocorre em aproximadamente 10 m, enquanto o segundo ocorre em 50 m.

Sendo f a frequência da portadora, dada em MHz, e h_t e h_r , respectivamente, as alturas do transmissor e do receptor, em metros, o fator de perdas que independem da distância é dado por $L = 46,3 + 33,9 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_t) - 0,8 - [1,11 \log_{10}(f) - 0,7]h_r + 1,56 \log_{10}(f)$. Neste trabalho, considerou-se $f = 1,9$ GHz, $h_t = 15$ m e $h_r = 1,65$ m. Incluindo o efeito da distância, as perdas geométricas, em dB, são dadas por [4]

$$PL = \begin{cases} -L - 15 \log_{10}(d_1) - 20 \log_{10}(d), & \text{se } d_0 < d \leq d_1 \\ -L - 35 \log_{10}(d), & \text{se } d > d_1 \\ -L - 15 \log_{10}(d_1) - 20 \log_{10}(d_0), & \text{se } d \leq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

O coeficiente de sombreamento z_{mk} , em dB, é uma variável aleatória do tipo log-normal. Em dB, ela corresponde a uma v.a. normal com desvio-padrão unitário e média zero [5]. Sendo σ_{sh} o desvio-padrão do sombreamento, o coeficiente de grande escala é $\beta_{mk} = 10^{PL/10} 10^{\sigma_{sh} z_{mk}/10}$.

No *downlink*, aplicando-se a transmissão por razão máxima (MRT – *Maximum-Ratio Transmission*), o sinal destinado ao

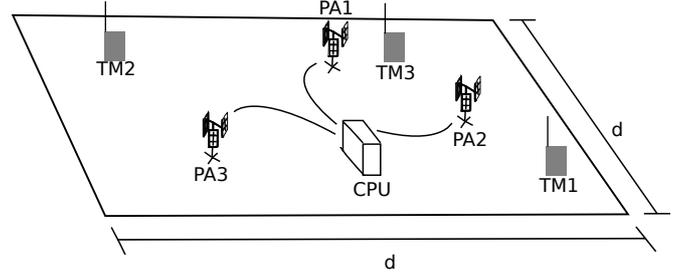


Fig. 1. Sistema sem células.

k -ésimo terminal é dado por [6]

$$r_{d,k} = \sqrt{P_d} \sum_{m=1}^M \eta_{mk}^{1/2} g_{mk} \hat{g}_{mk}^* q_k + \sqrt{P_d} \sum_{m=1}^M \sum_{k' \neq k}^K \eta_{mk'}^{1/2} g_{mk'} \hat{g}_{mk'}^* q_{k'} + w_{d,k}, \quad (2)$$

em que P_d é a potência de transmissão de descida normalizada, $w_{d,k}$ é o ruído do k -ésimo terminal no enlace de descida. Essa potência é obtida fazendo P_d^{cf}/P_n , em que $P_n = BW F k_B T_0$ é a potência do ruído em Watts. Nessa equação, BW é a largura de banda, F é o fator de ruído, T_0 é a temperatura em Kelvin, e k_B é a constante de Boltzmann. Neste trabalho, adotaram-se como parâmetros $k_B = 1,381 \times 10^{-23}$ J/K, $T_0 = 290$ K, figura de ruído ($NF = 10 \log_{10}(F/10)$) de 9 dB e largura de banda de 20 MHz [4]. η_{mk} é o coeficiente de controle de potência calculado para o enlace de descida entre o ponto de acesso m e o terminal k . Quando se utiliza um esquema de distribuição uniforme de potência [3],

$$\eta_{mk} = \frac{1}{\sum_{i=1}^K \gamma_{mi}}. \quad (3)$$

III. DESCASAMENTO DE RADIOFREQUÊNCIA

O efeito de descasamento de radiofrequência (RF *mismatch*), consiste em assimetrias de canal introduzidas pelos circuitos do transceptor [8], operando nos modos de transmissão e de recepção. Uma forma de modelar esse efeito consiste em utilizar variáveis aleatórias normais truncadas [9] para modelar a fase e a amplitude dos coeficientes de descasamento. Geralmente, as distribuições normais truncadas são definidas pela média (a_0) e pelo desvio-padrão (σ_a^2) da normal associada e pelos limites de truncamento (a_a e a_b). Tais parâmetros podem ser sintetizados usando uma notação quádrupla ($a_0, \sigma_a^2, [a_a; a_b]$). Neste trabalho, considerando um nível alto de descasamento de radiofrequência, os parâmetros da fase (em graus) e da amplitude (em dB) são, respectivamente, $(0, 1, [-4; 4])$ e $(0, 1, [-50; +50])$.

Quando a ocorrência de descasamento apenas nos pontos de acesso, na transmissão ($h_{bt,m}$) e na recepção ($h_{br,m}$), as distorções de canal se acumulam entre os dois enlaces. No enlace de subida, o canal é $g_{mk}^{UL} = h_{br,m} g_{mk}$; no de descida, ele é dado por $g_{mk}^{DL} = h_{bt,m} g_{mk}$. Neste trabalho, assumindo que, por variarem lentamente, os coeficientes de descasamento são conhecidos, o uso da estimativa de canal se dá mediante

a divisão dessa estimativa pelo coeficiente de descasamento dos pontos de acesso na recepção. Assim, o sinal de *downlink* passa a ser dado por

$$r_{d,k} = \sqrt{P_d} \sum_{m=1}^M \eta_{mk,RF}^{1/2} h_{bt,m} g_{mk} \left(\frac{\hat{g}_{mk}^{UL}}{h_{br,m}} \right)^* q_k + w_{d,k} + \sqrt{P_d} \sum_{m=1}^M \sum_{k' \neq k}^K h_{bt,m} \eta_{mk',RF}^{1/2} g_{mk'} \left(\frac{\hat{g}_{mk'}^{UL}}{h_{br,m}} \right)^* q_{k'}, \quad (4)$$

em que η_{mk}^{RF} é o coeficiente de controle de potência obtido a partir dos coeficientes de canal corrigidos a partir das estimativas contaminadas com descasamento RF.

Com base no sinal recebido em modo de descida na presença do descasamento RF, a relação SINR (*Signal-to-Noise-plus-Interference Rate*) é dada por

$$\rho_k = \frac{P_d \left| \sum_{m=1}^M \eta_{mk}^{1/2} |h_{bt,m}|^2 g_{mk} \left(\frac{\hat{g}_{mk}^{UL}}{h_{br,m}} \right)^* \right|^2}{P_d \sum_{k' \neq k}^K \left| \sum_{m=1}^M \eta_{mk'}^{1/2} |h_{bt,m}|^2 g_{mk'} \left(\frac{\hat{g}_{mk'}^{UL}}{h_{br,m}} \right)^* \right|^2}. \quad (5)$$

IV. ESTIMAÇÃO DO CANAL

A estimação do canal foi feita no enlace de subida, uma vez que se considera a reciprocidade do canal ao longo do intervalo de coerência. Dessa forma, os coeficientes de canal na subida se mantêm inalterados na descida. No entanto, essa reciprocidade é quebrada quando há descasamento de radiofrequência.

Para a estimação, utilizou-se um conjunto de sequências de Hadamard, Φ , em que cada coluna, ϕ_k corresponde a uma sequência. Nessa matriz, as colunas têm comprimento τ e são ortogonais entre si, de modo que $\phi_1^H \phi_2 = 0$. Nos sistemas *cell-free*, a estimação se dá de forma descentralizada, o que significa que cada PA realiza uma estimação de canal independentemente dos demais [5]. O vetor de sinais recebidos pelo m -ésimo PA ao longo dos τ períodos de estimação é dado por [10]

$$\mathbf{y}_{P,m} = \sqrt{\tau P_p} \sum_{k'=1}^K g_{mk'} \phi_{k'} + \mathbf{w}_{P,m}, \quad (6)$$

em que $\mathbf{w}_{P,m}$ é o vetor de ruído na recepção ao longo dos τ períodos.

A estimação é feita usando os métodos *pilot-matched* e de minimização de erro quadrático médio (MMSE – *Minimum Mean Square Error*) [5]. O primeiro método consiste em projetar o sinal recebido sobre a sequência-piloto, ou seja, $\phi_k^H \tilde{\mathbf{y}}_{P,m}$. Assim, no cenário em que não há descasamento RF, obtém-se [6]

$$\tilde{\mathbf{y}}_{P,m} = \sqrt{\tau P_p} g_{mk} + \sqrt{\tau P_p} \sum_{k'=1}^K g_{mk'} \phi_k^H \phi_{k'} + \phi_k^H \mathbf{w}_{P,m}. \quad (7)$$

Esse método normalmente é o suficiente para se obter estimativas satisfatórias quando não há problemas de ortogonalidade de sequências. Quando esses problemas existem, o uso do segundo método, o MMSE, torna-se necessário. Nesse caso, a estimativa de canal é dada por [3]

$$\hat{g}_{mk} = c_{mk} \tilde{\mathbf{y}}_{P,m}, \quad (8)$$

em que

$$c_{mk} = \frac{\sqrt{\tau P_p} \beta_{mk}}{\tau P_p \sum_{k'=1}^K \beta_{mk'} |\phi_k^H \phi_{k'}|^2 + 1}. \quad (9)$$

Sabe-se que a aplicação do método de estimação MMSE implica estimativas de canal, \hat{g}_{mk} distribuídas de forma gaussiana complexa, com média zero e variância γ_{mk} dada por [3]

$$E\{|\hat{g}_{mk}|^2\} = \frac{\tau P_p \beta_{mk}^2}{\tau P_p \sum_{k'=1}^K \beta_{mk'} |\phi_k^H \phi_{k'}|^2 + 1}. \quad (10)$$

A fim de se obter a estimativa do canal de subida por MMSE com descasamento de radiofrequência, faz-se

$$c_{mk}^{rf} = \frac{E\{g_{mk}^{UL} \tilde{\mathbf{y}}_{P,m}\}}{E\{\tilde{\mathbf{y}}_{P,m} \tilde{\mathbf{y}}_{P,m}^H\}}, \quad (11)$$

o que leva a

$$c_{mk}^{rf} = \frac{\sqrt{\tau P_p} |h_{br,m}|^2 \beta_{mk}}{\tau P_p \sum_{k'=1}^K \beta_{mk'} |h_{br,m}|^2 |\phi_k^H \phi_{k'}|^2 + 1}. \quad (12)$$

Nesse caso, ao multiplicar c_{mk}^{RF} pelo sinal recebido durante a estimação, obtém-se $\hat{g}_{mk}^{UL} = h_{br,m} g_{mk} + \tilde{g}_{mk}^{UL}$. A estimação por MMSE requer que os coeficientes de desvanecimento de grande escala e de descasamento de radiofrequência sejam conhecidos previamente. Nesse caso, a variância da estimativa do canal de subida é dada por $\gamma_{mk}^{rf} = E\{|\hat{g}_{mk}^{UL}|^2\}$. Logo,

$$\gamma_{mk}^{rf} = \frac{\tau P_p \beta_{mk}^2 |h_{br,m}|^4}{\tau P_p \sum_{k'=1}^K |h_{br,m}|^2 \beta_{mk'} |\phi_k^H \phi_{k'}|^2 + 1}. \quad (13)$$

Sendo $\tilde{g}_{mk}^{UL} = g_{mk}^{UL} - \hat{g}_{mk}^{UL}$, a variância de \tilde{g}_{mk}^{UL} é dada por

$$\alpha_{mk}^{UL} = E\{|\tilde{g}_{mk}^{UL}|^2\} = \beta_{mk} |h_{br,m}|^2 - \gamma_{mk}^{rf}. \quad (14)$$

Na prática, deseja-se extrair g_{mk} de \hat{g}_{mk}^{UL} , por meio da divisão do segundo por $h_{br,m}$, pois o descasamento distorce a reciprocidade do canal.

V. RESULTADOS

Nas simulações deste trabalho, foi considerada uma região com área de $500 \times 500 \text{ m}^2$. Os M pontos de acesso e os K terminais móveis foram distribuídos de forma aleatória, a cada 40 intervalos de coerência do desvanecimento de pequena escala, e essa redistribuição foi feita 10.000 vezes. Como potências de transmissão de *downlink* e de estimação, considerou-se, respectivamente, $p_d^{cf} = 200 \text{ mW}$ e $p_p^{cf} = 100 \text{ mW}$. Na estimação, utilizou-se $\tau = 20$. Os gráficos mostram as curvas de distribuição cumulativa de probabilidade (DCP) das taxas de transmissão médias do sistema.

As curvas de distribuição cumulativa de probabilidade das taxas de descida, com e sem interferência-piloto, e considerando $M = 100$ e $K = 15$ ou $K = 30$, encontram-se ilustradas na Fig. 2. Nesse caso, os coeficientes de controle de potência foram atribuídos de modo uniforme. Observa-se que a interferência das sequências de estimação provoca a redução das taxas de transmissão médias do sistema. Com base nessas curvas, as taxas médias sob essas condições podem ser quantificadas. Se o modelo apresentado neste trabalho tiver os

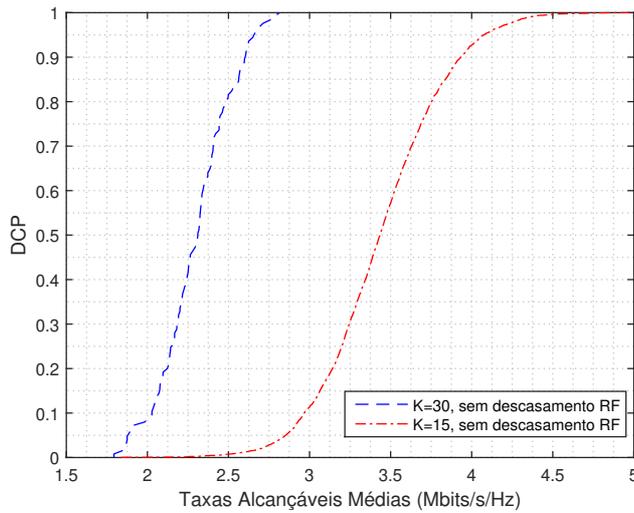


Fig. 2. Curvas de distribuição cumulativa de probabilidade das médias das taxas de transmissão dos K usuários do sistema em modo de descida, com e sem interferência-piloto.

seus parâmetros alterados, pode-se fazer a mesma avaliação de desempenho em outros cenários.

Os resultados fornecidos pela equação de estimação obtida para o cenário em que há descasamento de radiofrequência estão dispostos na Tabela 1. Nesse caso, cálculos e simulações coincidiram, mostrando que as equações são válidas e que o baixo erro de estimação revela a eficácia da adaptação ao cenário em que há descasamento RF.

TABELA I
COMPARAÇÃO ENTRE γ_{mk}^{UL} E α_{mk}^{UL} TEÓRICOS E SIMULADOS, NA PRESENÇA DE DESCASAMENTO DE RADIOFREQUÊNCIA.

		$g_{1,1}^{UL}$	$g_{2,1}^{UL}$	$g_{3,1}^{UL}$
γ_{mk}^{RF} Simulado		$2.6568 \cdot 10^{-8}$	$3.0314 \cdot 10^{-9}$	$4.2661 \cdot 10^{-9}$
α_{mk}^{RF} Simulado		$3.1462 \cdot 10^{-13}$	$3.1776 \cdot 10^{-13}$	$3.1698 \cdot 10^{-13}$
γ_{mk}^{RF} Calculado		$2.6315 \cdot 10^{-8}$	$3.1828 \cdot 10^{-9}$	$4.38 \cdot 10^{-9}$
α_{mk}^{RF} Calculado		$3.1789 \cdot 10^{-13}$	$3.1463 \cdot 10^{-13}$	$3.1787 \cdot 10^{-13}$

As curvas de distribuição cumulativa de probabilidade das taxas de transmissão médias com e sem descasamento de radiofrequência estão ilustradas na Fig. 3. Observa-se que o descasamento dos pontos de acesso na transmissão reduz as taxas alcançáveis médias do sistema por aproximadamente 0,37 Mbits/s/Hz. Isso ocorre porque o descasamento reduz ainda mais a SINR na recepção.

VI. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho mostram a influência do descasamento RF sobre os sistemas sem células no modo de descida. O estimador MMSE foi adaptado para o cenário em que existe esse efeito, e a comparação entre cálculos e simulações revelaram que as equações de estimação de canal por MMSE e as estatísticas do canal estimado, para o caso em que há descasamento, coincidiram. As curvas de

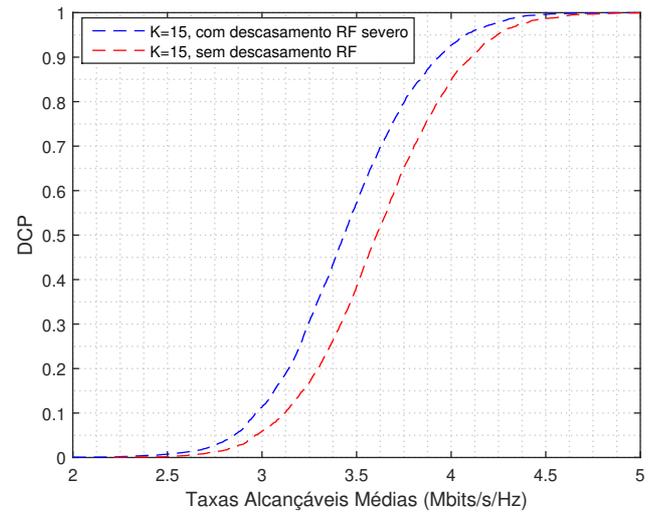


Fig. 3. Curvas de distribuição cumulativa de probabilidade das médias das taxas alcançáveis dos K usuários do sistema em modo de descida, com e sem descasamento RF.

distribuição cumulativa de probabilidade mostram que as taxas alcançáveis médias do sistema são reduzidas por aproximadamente 0,37 Mbits/s/Hz quando há o descasamento RF nos pontos de acesso. Os resultados também revelaram que mesmo o descasamento RF de nível severo pouco significativo, quando comparado à interferência-piloto.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e ao Instituto de Estudos Avançados em Telecomunicações (Iecom), por financiarem e por proverem os meios para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Li, D. Wang, P. Zhu, J. Wang, e X. You, "Downlink Spectral Efficiency of Distributed Massive MIMO Systems with Linear Beamforming Under Pilot Contamination", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 67, no. 2, pp. 1130 – 1145, Fevereiro 2017.
- [2] D. Wang, J. Wang, X. You, Y. Wang, M. Chen e X. Hou, "Spectral Efficiency of Distributed MIMO Systems" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 31, no. 10, pp. 2112 – 2127, Outubro 2013.
- [3] E. Nayebi, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta e H. Yang, "Cell-Free Massive MIMO Systems" *2015 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, v. 5, pp. 695 – 699, Pacific Grove, California, EUA, Maio 2015.
- [4] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson e T. L. Marzetta, "Cell-Free Massive MIMO vs Small Cells", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 16, no. 3, pp. 1834 – 1850, 2017.
- [5] S. Buzzi e C. D'Andrea, "Cell-Free Massive MIMO: User-Centric Approach", *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 6, no. 6, pp. 706 – 709, Dezembro 2017.
- [6] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson e T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO: Uniformly great service for everyone", *Proceedings of the SPAWC 2015. The 16th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, pp. 201 – 205, Estocolmo, Suécia, Junho 2015.

- [7] M. Bashar and K. Cumanan, A. G. Burr, M. Debbah e H. Q. Ngo, "Enhanced Max-Min SINR for Uplink Cell-Free Massive MIMO Systems", *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, EUA, Maio 2018.
- [8] H. Wei, D. Wang, H. Zhu, J. Wang, S. Sun e X. You, "Mutual Coupling Calibration for Multiuser Massive MIMO Systems". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 15, no. 1, pp. 606–619, 2016.
- [9] De Mi, M. Dianati, L. Zhang, S. Muhaidat e R. Tafazolli, "Massive MIMO Performance With Imperfect Channel Reciprocity and Channel Estimation Error", *IEEE Transactions on Communications*, v. 65, no. 9, pp. 3734 – 3748, Estocolmo, Suécia, Setembro 2017.
- [10] O. Ozdogan, E. Bjornson e J. Zhang, "Cell-Free Massive MIMO with Rician Fading: Estimation Schemes and Spectral Efficiency", *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, Califórnia, Outubro 2018.