

Análise Comparativa de Sistemas Móveis Baseados em Pontos Distribuídos

Rafael Duarte, Danilo Almeida, Marcelo Alencar, Waslon Lopes Fabrício Carvalho e Wamberto Queiroz

Resumo—O estudo de sistemas móveis sem células, em que não há divisão espacial e todas as unidades radiobase atendem a todos os usuários simultaneamente, se popularizou na última década. Neste trabalho, o desempenho do sistema sem células é comparado ao de sistemas baseados em células virtuais e em células pequenas. Tais comparações foram realizadas considerando diferentes modelos de perdas de percurso em larga escala, a fim de determinar sob quais condições de canal qual arquitetura apresenta melhor desempenho. Com base nos resultados de simulação, as células virtuais, em que os pontos de acesso escolhem quais usuários eles atenderão, atigem as taxas mais elevadas em todos os cenários, revelando que esta é a melhor arquitetura para os dois modelos de canal considerados.

Palavras-Chave—Células pequenas, células virtuais, comunicações móveis, sistema sem células.

Resumo—The study of cell-free mobile systems, in which there is no spatial division and all base units serve all users simultaneously, has become popular in the last decade. In this work, the performance of the cell-free system is compared to those based on virtual cells and on small cells. The comparison was performed considering different large-scale path loss models, in order to determine the channel conditions in which each architecture has better performance. Based on the results, the virtual cells, where the access points select which users they will serve, provide the highest rates in all scenarios, revealing that this is the best architecture for the two channel models considered.

Palavras-Chave—Small cell, virtual cell, mobile communications, cell-free.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas convencionais de comunicações móveis são baseados na divisão do espaço em células. Nesses sistemas, os equipamentos de usuário (EU), ou terminais móveis, localizados em uma determinada célula são atendidos pela estação radiobase dessa célula. Nos sistemas distribuídos, as antenas da radiobase estão equipadas em unidades de radiobase espalhadas pela célula, o que reduz as perdas devido ao desvanecimento de larga escala e, por consequência, melhora as taxas de transmissão [1].

Em sistemas multiusuário, além das perdas introduzidas pelo desvanecimento, os sinais intererentes também prejudicam o desempenho dos sistemas móveis, pois elevam a relação entre sinal e interferência mais ruído (SINR – *Signal-to-Noise plus Interference*) [2]. Isso é observado mesmo em sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) massivos [2]. Nos

sistemas distribuídos sem células [3], todas as unidades radiobase, conhecidas como pontos de acesso (PA), atendem a todos os usuários simultaneamente, o que é o pior cenário em termos de interferência multiusuário. Além disso, o fraco endurecimento do canal faz com que surja uma auto-interferência do sinal sobre si mesmo [4], o que limita os ganhos proporcionados por essa arquitetura. No entanto, os ganhos sobre os sistemas co-localizados ainda justificam o seu uso [5].

Desde a publicação dos primeiros trabalhos sobre sistemas móveis sem células [3], [6], diversos trabalhos sobre otimização do controle de potência nesses sistemas foram publicados, de modo a melhorar as taxas de transmissão por meio da redução da interferência multiusuário [7]. Mais recentemente, o uso do processamento MMSE (*Minimum Mean Square Error*) no lugar do processamento por razão máxima tem mostrado resultados positivos, com a elevação das taxas de transmissão [5].

A modelagem de sistemas sem células e de células virtuais com frequência de portadora de 73 GHz e 200 MHz de banda foi realizada por Alonzo e Buzzi [8]. Eles observaram que em um cenário com conhecimento imperfeito do estado e canal, o sistema baseado em células virtuais definidas com metodologia centrada no usuário (UC – *user-centric*) tende a se sair melhor que o sem células, pois a estimativa de canal dos EU mais distantes tendem a ser ruins, deteriorando as taxas do sistema. Pouco tempo depois, Buzzi *et al* [9], demonstraram que o efeito dos erros de estimação de canal nesses sistemas também depende da quantidade de usuários. Essa modelagem foi feita com modelos complexos e de banda larga, considerando inclusive alguns aspectos de *hardware* e arranjos com múltiplas antenas, o que dificulta a comparação do desempenho com os resultados obtidos por Buzzi, D’Andrea e Elia [10].

Neste trabalho, os sistemas sem células, de células virtuais e de células pequenas, conforme descrito por Ngo *et al* [7], foram comparados usando modelos dois modelos de propagação, com banda estreita, com o objetivo de averiguar quais arquiteturas se saem melhor sob cada condição. Os modelos de propagação e as arquiteturas são apresentados respectivamente, nas Seções II e III. Na Seção IV, a equação usada para calcular a SINR é apresentada. Finalmente, os resultados são apresentados na Seção V.

II. MODELO DE CANAL

Os enlaces sem linha de visada direta foram modelados com o uso de coeficientes de canal globais ($g_{mk} = \sqrt{\beta_{mk}}h_{mk}$) entre o m -ésimo PA e o k -ésimo EU, em que β_{mk} e h_{mk} são os coeficientes de desvanecimento de larga e de pequena escala, respectivamente [6]. O coeficiente de pequena escala

Rafael Duarte, Danilo Almeida, Marcelo Alencar e Wamberto Queiroz, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB, e-mails: {rafael.duarte,danilo.almeida}@ee.ufcg.edu.br e {malencar,wamberto}@dee.ufcg.edu.br; Fabrício Braga e Waslon Lopes, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, e-mails: {fabricio,waslon}@cear.ufpb.br. Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro a este trabalho.

é modelado como uma variável aleatória gaussiana complexa com média zero e variância unitária. Quanto ao coeficiente de larga escala entre o m -ésimo PA e o k -ésimo EU, dado por [10]

$$\beta_{mk} = 10^{-PL_{mk}z_s}, \quad (1)$$

em que o a variável PL_{mk} representa as perdas geométricas (*path-loss*) em decibéis (dB), que podem ser calculadas de acordo com uma infinidade de modelos [11]. Neste trabalho, foram usados os modelos COST231 Walfish-Ikegami [12] e o Close-in (no cenário com ondas milimétricas) [13]. Outro efeito de larga escala, denominado sombreamento, normalmente é modelado como uma variável aleatória log-normal [2]. Em decibéis, essa variável aleatória gaussiana, z_s com desvio-padrão σ_s [2].

Em sistemas sem células, o aumento das chances de haver uma ou mais unidades de radiobase próximas aos usuários permite que existam enlaces com e sem linha de visada no cenário. Um modelo de perdas geométricas capaz de inclui os dois tipos de enlace é o modelo COST231 Walfish-Ikegami, usado para modelar as perdas em um cenário de microcélula. Nele, determinadas características do sistema, como, por exemplo, a altura de das antenas de radiobase são predefinidos e as perdas geométricas nos enlaces com e sem linha de visada são descritas por duas equações diferentes. Com frequência de portadora de 1900 MHz e, na ausência de linha de visada direta, as perdas, em dB, são dadas por [12]

$$PL = 34,53 + 38 \cdot \log_{10}(d). \quad (2)$$

Sem linha de visada nos enlaces, as perdas são dadas por

$$PL = 30,18 + 26 \cdot \log_{10}(d). \quad (3)$$

Assumindo novamente o modelo log-normal para o sombreamento, o desvio padrão de sombreamento é de 10 dB, quando não há linha de visada, e 4 dB no outro caso.

No modelo COST231 com linha de visada, cada coeficiente de canal v_{mk} é composto composto pela soma da componente especular $\tilde{h}_{mk}e^{j\varphi}$ com o coeficiente de desvanecimento global g_{mk} , em que φ é uma variável aleatória uniformemente distribuída entre π e $-\pi$ [14]. Nesse modelo, a componente especular e o coeficiente de larga escala são $\sqrt{\frac{\kappa_{mk}PL_{mk}}{1 + \kappa_{mk}}}$ e $\frac{PL_{mk}}{1 + \kappa_{mk}}$, em que κ_{mk} é o fator riciano. Quando há linha de visada direta, $\kappa_{mk} = 13 - 0.03d_{mk}$; do contrário, é zero [12].

Diversas características do ambiente de comunicação influenciam a probabilidade de haver ou não linha de visada. Um modelo simplificado para ela é uma função linear por partes em que a probabilidade é linear para distâncias inferiores a $d_{max} = 300$ m e zero acima dessa distância [12], ou seja,

$$P(d) = \begin{cases} (d_{max} - d)/d_{max}, & \text{se } 0 < d < d_{max} \\ 0, & \text{se } d > d_{max}. \end{cases} \quad (4)$$

Neste trabalho, essa função linear por partes também foi aplicada aos cenários com frequências mais elevadas.

No modelo *Close-In*, as perdas geométricas, em dB, são dadas por [13]

$$PL(f_c, d) = -PL^{fs}(f_c, 1 \text{ m}) - 10v \log_{10}(d), \quad (5)$$

em que

$$PL^{fs}(f_c, 1 \text{ m}) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f_c}{c} \right) \quad (6)$$

é a perda no espaço livre a 1 m. Os parâmetros de d_{max} dos cenários de microcélula do tipo *open square* (UMi OS) e *street canyon* (UMi SC) [13] estão dispostos na Tabela 1.

TABELA I
PARÂMETROS DO MODELO CLOSE-IN EM UMi SC E UMi OS

Parâmetros	UMi SC		UMi OS	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
Freq. (GHz)	2-73,5	2-73,5	2-60	2-60
Dist. (m)	5-121	19-272	5-121	19-272
v	2	3,1	1,9	2,8
σ_s	2,9	8,1	4,7	8,3

III. ARQUITETURA DO SISTEMA

Neste trabalho, a modelagem dos sistemas distribuídos foi feita considerando a existência de M pontos de acesso e de K usuários distribuídos espacialmente de forma aleatória e uniforme em uma região de área $D \times D$, sem divisão do espaço em células [3]. Todos os M pontos de acesso atendem a todos os K usuários simultaneamente e cada PA possui apenas uma antena.

Nos sistemas baseado em células virtuais, cada usuário é servido apenas pelo PA que proporciona a maior energia útil do sinal. Caso esse PA já tenha sido escalado para atender a outro usuário, ele estará indisponível e outro ponto de acesso, com as melhores condições de propagação possíveis, será selecionado. A atribuição dos PA a cada usuário ocorrem de forma aleatória e com base nos usuários; nessa arquitetura, os pontos de acesso atendem apenas a um usuário por vez.

Na definição das células virtuais, dois tipos de configurações são possíveis [9]. Na célula virtual do tipo 2, os pontos de acesso se comunicam apenas com os equipamentos de usuário com os quais formam canais mais fortes. Em outras palavras, o m -ésimo ponto de acesso serve apenas aos M_k equipamentos com os quais forma os melhores canais (conjunto Δ_m). Nesse caso, outros pontos de acesso poderiam se comunicar com os EU pertencentes ao conjunto Δ_m , não havendo exclusividade na comunicação com qualquer um. Outra forma de implementar tais células virtuais (tipo 1) é aquela em que cada EU seleciona os K_m PA com os quais existem os melhores canais (conjunto Υ_k).

Na implementação das células virtuais dos tipos 1 e 2, o coeficiente de canal v_{mk} e o coeficiente de desvanecimento de larga escala foram usados como critérios. Os algoritmos nos quais os EU selecionam os PA que os atenderão, com base no módulo do coeficiente de canal e no coeficiente de desvanecimento de larga escala, são, respectivamente, os Algoritmos 1 e 3. Os Algoritmos 2 e 4 são aqueles em que os PA selecionam quais EU serão atendidos, usando como critérios o coeficiente de canal e o coeficiente de desvanecimento de larga escala, respectivamente.

Nas células pequenas, o algoritmo de escolha das células pequenas é semelhante ao Algoritmo 1 de células virtuais. A diferença é que pontos de acesso escolhidos para atender a um usuário não são reutilizados.

Algoritmo 1 Algoritmo para selecionar o conjunto de PA para cada EU usando $|\hat{v}_{mk}|$ como base.

```

Definir  $M_k$ 
for  $k = 1$  to  $K$  do
  for  $m = 1$  to  $M$  do
    Calcular  $|\hat{v}_{mk}|$ 
  end for
  ordenar os valores absolutos em ordem decrescente
  selecionar os  $M_k$  primeiros
  realizar o processamento apenas dos sinais recebidos
  pelos PA pertencentes ao conjunto  $\Upsilon_k$ 
end for
    
```

Algoritmo 2 Algoritmo para selecionar o conjunto de EU atendidos por cada PA usando $|\hat{v}_{mk}|$ como base.

```

Definir  $K_m$ 
for  $m = 1$  to  $M$  do
  for  $k = 1$  to  $K$  do
    Calcular  $|\hat{v}_{mk}|$ 
  end for
  ordenar os valores absolutos em ordem decrescente
  selecionar os  $K_m$  primeiros
  cada PA processa os sinais recebidos pelos EU do conjunto  $\Delta_m$ 
end for
    
```

Algoritmo 3 Algoritmo para selecionar o conjunto de PA para cada EU usando o β_{mk} como base.

```

Definir  $M_k$ 
for  $k = 1$  to  $K$  do
  for  $m = 1$  to  $M$  do
    Estimar todos os valores de  $\beta_{mk}$ 
  end for
  ordenar os valores absolutos em ordem decrescente
  selecionar os  $M_k$  primeiros
  realizar o processamento apenas dos sinais recebidos
  pelos PA pertencentes ao conjunto  $\Upsilon_k$ 
end for
    
```

Algoritmo 4 Algoritmo para selecionar o conjunto de EU atendidos por cada PA usando o β_{mk} como critério.

```

Definir  $K_m$ 
for  $m = 1$  to  $M$  do
  for  $k = 1$  to  $K$  do
    Estimar todos os valores de  $\beta_{mk}$ 
  end for
  ordenar os coeficientes  $\beta_{mk}$  em ordem decrescente
  selecionar os  $K_m$  primeiros
  cada PA processa os sinais recebidos pelos EU do conjunto  $\Delta_m$ 
end for
    
```

IV. RECEPÇÃO E EQUALIZAÇÃO

Em todas as simulações, apenas a transmissão no enlace de subida em que todos os equipamentos de usuário transmitem para todos os pontos de acesso foi considerada. Nesse caso, a matriz de sinais recebidos pelos M pontos de acesso é dada por

$$\mathbf{Y}_u = \sqrt{P_u} \mathbf{V} \mathbf{q} + \mathbf{N}_u, \quad (7)$$

em que P_u é conhecida como SNR de transmissão no enlace de subida, quando o ruído é normalizado. A SNR de transmissão é obtida fazendo P_u^{cf}/P_n , em que P_u^{cf} é a potência de transmissão do enlace de subida e P_n é a potência do ruído no receptor, dada por $k_B B T_0 F$. Nessa expressão, F é o fator de ruído, T_0 é a temperatura absoluta, B é a largura de banda e k_B é a constante de Boltzmann. Neste artigo, foram escolhidas como temperatura ambiente e figura de ruído (NF), respectivamente, 290 K e 9 dB [6]. A figura de ruído é o fator de ruído em decibéis. O vetor $\mathbf{q} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ é o de sinais transmitidos pelos K EUs do sistema e $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ é o vetor de ruído gaussiano complexo, com média zero e variância unitária, nos M pontos de acesso. $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ é a matriz de coeficientes de canal com desvanecimento global entre os K equipamentos de usuário e os M pontos de acesso.

No enlace de subida de uma arquitetura sem células com combinação por razão máxima, a SINR de recepção do sinal do k -ésimo EU é dada por [15]

$$\rho_k^{UL} = \frac{P_u |\sum_{m=1}^M v_{mk}^* v_{mk}|^2}{P_u \sum_{i \neq k}^K |\sum_{m=1}^M v_{mk}^* v_{mi}|^2 + \sum_{m=1}^M |v_{mk}|^2}. \quad (8)$$

Nas arquiteturas baseadas em para células pequenas e em células virtuais, o somatório em m leva em conta apenas os PA que atendem ao k -ésimo EU.

V. RESULTADOS

Usando simulações em Matlab®, foram realizadas análises de desempenho de sistemas sem células, de células virtuais baseadas em *user-centric* e de células pequenas, a fim de comparar as taxas alcançadas por essas configurações de sistema e verificar qual se sai melhor. Em todos os casos, assumiu-se conhecimento perfeito do estado do canal. Quanto à potência de transmissão no enlace de subida, adotou-se $P_u^{cf} = 100$ mW em todos os casos. Todas as K amostras de taxa obtidas em 1000 realizações do desvanecimento de grande escala. Essas amostras foram usadas para traçar as curvas de função de distribuição empírica (ECDF – *Empirical Cumulative Distribution Function*).

Considerando canais operando em frequências de 28 GHz, os primeiros testes foram realizados em um cenário de micro-célula do tipo *open square* e com canal misto. As simulações foram feitas com $M = 25$ e $K = 10$. Na Figura 1, ilustram-se as curvas ECDF das taxas alcançáveis obtidas com células pequenas, sistemas sem células e sistemas com células virtuais baseadas nas metodologias *user-centric* baseadas nos Algoritmos 1 e 3. Nessa situação, o sistema sem células apresentou o melhor desempenho. Quando foi usado o coeficiente de desvanecimento de grande escala como critério de definição de células virtuais por *user-centric* (Algoritmo 3), o desempenho foi pior que o do sistema sem células para qualquer valor de

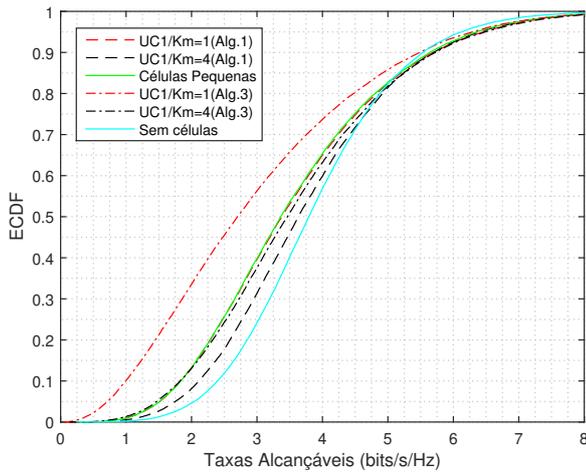


Fig. 1. Curvas ECDF das taxas alcançáveis obtidas em um ambiente UMi OS, com perdas calculadas com o modelo *Close-in*, usando a célula virtual do tipo 1.

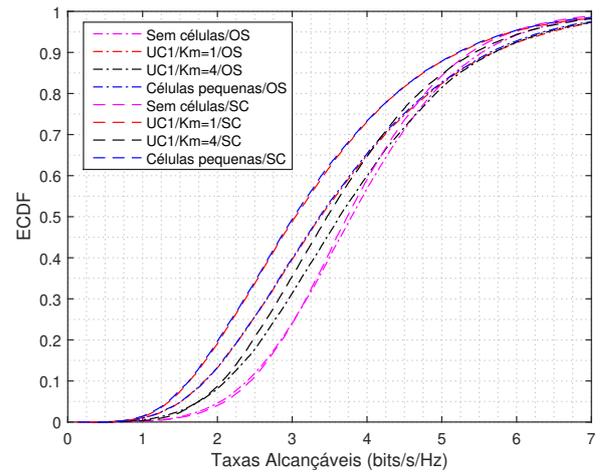


Fig. 3. Curvas ECDF das taxas alcançáveis obtidas nos cenários UMi OS e UMi SC, com perdas calculadas com o modelo *Close-in*, usando o UC do tipo 1.

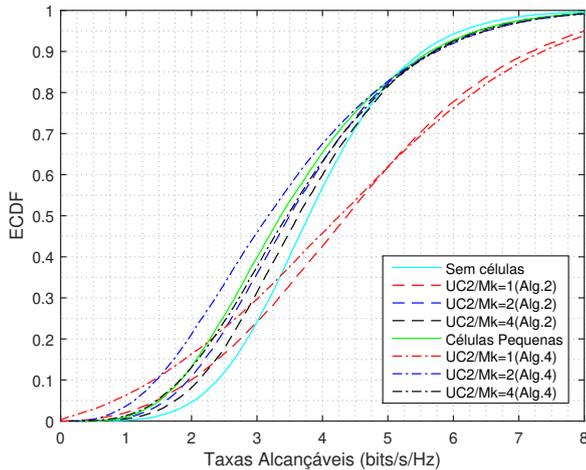


Fig. 2. Curvas ECDF das taxas alcançáveis obtidas em um ambiente UMi OS, com perdas calculadas com o modelo *Close-in*, usando a célula virtual do tipo 2.

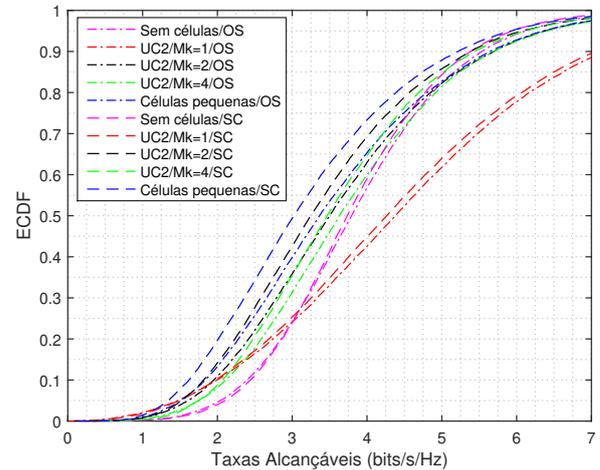


Fig. 4. Curvas ECDF das taxas alcançáveis obtidas nos cenários UMi OS e UMi SC, com perdas calculadas com o modelo *Close-in*, usando o UC do tipo 2.

K_m e melhor que o de sistemas de células pequenas apenas para $K_m = 4$.

O uso do segundo critério (coeficiente de desvanecimento de larga escala) do *user-centric*, de acordo com os Algoritmos 2 e 4, também foi testado e os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 2. Considerando $M_k = 1, 2$ e 4 , apenas a célula virtual em que um EU é atendido por cada PA apresentou desempenho superior ao do sistema sem células. Novamente, o uso do módulo do coeficiente canal global proporcionou as maiores taxas alcançáveis. Nesse caso, o sistema baseado em células pequenas apresentou curvas de taxas muito próximas às curvas obtidas com as células virtuais. É importante ressaltar que o uso do coeficiente de desvanecimento de grande escala na célula virtual com $M_k = 1$ produz uma curva ECDF mais ampla, indicando a existência de taxas mais baixas e mais altas que aquelas obtidas com o uso do módulo do coeficiente de canal. No entanto, ambas as curvas estão muito próximas entre si.

O desempenho das arquiteturas sem células, de células pequenas e de células virtuais com o uso dos modelos de perdas para UMi OS e UMi SC também foi comparado. A existência de condições mistas de visibilidade novamente foi considerada. Como resultado das simulações foram obtidas as curvas ECDF das taxas alcançáveis ilustradas nas Figuras 3 e 4; na primeira, as células virtuais são do tipo 1 e, na segunda, as células virtuais são do tipo 2. Em ambos os cenários, os sistemas baseados em células virtuais e pequenas são mais afetados pelo tipo de microcélula, sendo as taxas obtidas no *open square* mais altas. Isso se deve à densidade de PA, que é um pouco menor no cenário UMi SC, pois, apesar de ter sido usado um D maior, os valores de M e K são os mesmos das simulações anteriores. Portanto, o desempenho pode ser considerado semelhante. O mais afetado pela mudança foi o sistema baseado em células pequenas, com $0,4$ *bits/s/Hz* de diferença no limiar de 50%.

Com o uso das três arquiteturas de sistema em um ambiente

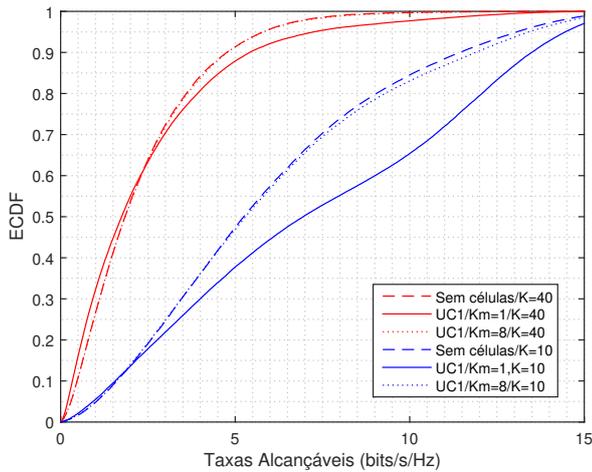


Fig. 5. Curvas de ECDF das taxas alcançáveis de sistemas operando em um cenário de microcélula, com perdas dadas pelo modelo COST231 Walfish-Ikegami, considerando $|\hat{g}_{m,k}|$ como critério de seleção e células virtuais tipo 1.

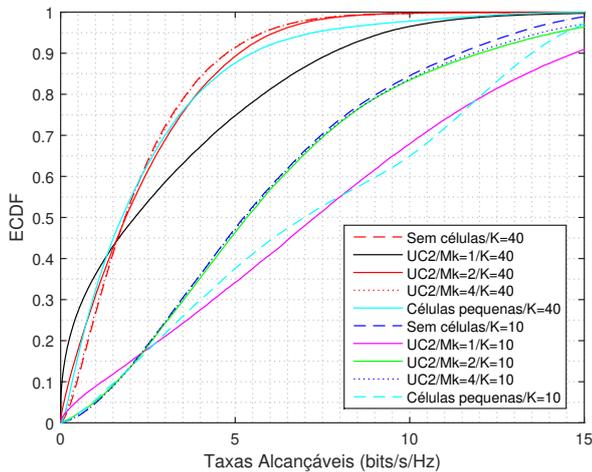


Fig. 6. Curvas de ECDF das taxas alcançáveis de sistemas operando em um cenário de microcélula, com perdas dadas pelo modelo COST231 Walfish-Ikegami, considerando $|\hat{g}_{m,k}|$ como critério de seleção e células virtuais tipo 2.

de microcélula com enlaces mistos baseados no modelo de perdas COST231 Walfish-Ikegami, obtém-se as curvas ilustradas nas Figuras 5 e 6. Na primeira, o uso de células virtuais em que os EU escolhem por quais pontos de acesso serão atendidos proporcionou taxas mais altas que aquelas observadas com a arquitetura sem células. Quanto maior for o número de PA a atender cada EU, mais o desempenho da arquitetura baseada em células virtuais se assemelhará à sem células. Quanto à arquitetura baseada em células pequenas, novamente o seu desempenho é parecido com o de células virtuais do tipo 1 com $K_m = 1$.

VI. CONCLUSÕES

Com base nos resultados, conclui-se que a escolha do modelo de perdas influencia significativamente a escolha da arquitetura de sistema. Quando o modelo *Close-in* é utilizado

considerando a existência de enlaces com e sem linha de visada, as células virtuais nas quais os equipamentos de usuário escolhem por quais pontos de acesso (tipo 1) serão atendidos proporciona taxas alcançáveis inferior às proporcionadas pela arquitetura sem células. Por outro lado, quando o modelo COST231 Walfish-Ikegami é utilizado, o desempenho da arquitetura baseada em células virtuais com esse critério é superior ao de sistemas sem células. A arquitetura baseada em células virtuais definidas pelos pontos de acesso (tipo 2) se mostrou superior em todos os cenários. Um resultado que chamou a atenção foi o desempenho da arquitetura de células pequenas comparável ao de células virtuais do tipo 2 com $M_k = 2$ no ambiente de microcélula modelado com o COST231 Walfish-Ikegami. Com exceção desse resultado, as células pequenas não se mostraram mais vantajosas que as células virtuais.

REFERÊNCIAS

- [1] K. T. Truong and R. W. H. Jr., “The viability of distributed antennas for massive MIMO systems,” in *2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, Califórnia, Novembro 2013.
- [2] T. L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Novembro 2010.
- [3] E. Nayebi, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and H. Yang, “Cell-free massive MIMO systems,” in *2015 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, EUA, Maio 2015, pp. 695–699.
- [4] M. Attarifar, A. Abbasfar, and A. Lozano, “Modified conjugate beamforming for cell-free massive MIMO,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 616–619, Janeiro 2019.
- [5] E. Bjornson and L. Sanguinetti, “Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 1, pp. 77–90, Janeiro 2020.
- [6] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Cell-free massive MIMO: Uniformly great service for everyone,” in *2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Estocolmo, Suécia, Junho 2015.
- [7] —, “Cell-free massive MIMO versus small cells,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850, Março 2017.
- [8] M. Alonzo and S. Buzzi, “Cell-free and user-centric massive MIMO at millimeter wave frequencies,” in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, Canadá, Outubro 2017.
- [9] S. Buzzi, C. D’Andrea, A. Zappone, and C. D’Elia, “User-centric 5G cellular networks: Resource allocation and comparison with the cell-free massive MIMO approach,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 2, pp. 1250–1264, Fevereiro 2020.
- [10] S. Buzzi, C. D’Andrea, and C. D’Elia, “User-centric cell-free massive-MIMO with interference cancellation and local ZF downlink precoding,” in *2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Lisboa, Portugal, Agosto 2018.
- [11] P. Kyosti, V. Hovinen, J. Meinila, and J. Ylitalo, *METIS Channel Models (Technical Report)*, ser. Deliverable D1.4, Julho 2015.
- [12] G. O. Partners, *Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations*, ser. Tech. Rep. TR 25.996 (Release 15). 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Junho 2003.
- [13] S. Sun, T. A. Thomas, T. S. Rappaport, H. Nguyen, I. Z. Kovács, and I. Rodriguez, “Path loss, shadow fading, and line-of-sight probability models for 5G urban macro-cellular scenarios,” in *2015 IEEE Globecom Workshops*, San Diego, EUA, Dezembro 2015.
- [14] O. Ozdogan, E. Bjornson, and J. Zhang, “Cell-free massive MIMO with rician fading: Estimation schemes and spectral efficiency,” in *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, EUA, Outubro 2018.
- [15] S. Buzzi and C. D’Andrea, “Cell-free massive MIMO: User-centric approach,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 706–709, Dezembro 2017.