Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Elétrica
Comunicações Móveis (PPGEE3622)

Relatório 03:

Modelagem, Estimativa e Desempenho de Sistemas Cell-Free em MATLAB

Discente:
Aureliano Magalhães de Sousa Neto

Docente:
Prof. Dr. Higo Thaian Pereira da Silva

Conteúdo

1 Resumo **2**

2 Objetivo **3**

3 Introdução **4**

4 Desenvolvimento **5**
4.1 Parte I — Geração das CDFs de SINR e Taxa Alcançável 5
4.2 Parte II — Avaliação de Desempenho 6
4.2.1 (a) Variação do Número de APs 6
4.2.2 (b) Variação do Número de Usuários 6

5 Resultados e Análise **10**

6 Conclusão **11**

1 Resumo

Este relatório apresenta uma simulação, em MATLAB, de um sistema Cell-Free Massive MIMO, incorporando desvanecimento em larga e pequena escala, estimação de canal baseada em sequências piloto e alocação de potência no enlace *downlink*. Avaliam-se métricas de desempenho como a razão sinal-interferência-ruído (SINR) e a taxa alcançável dos usuários, considerando os cenários de conhecimento perfeito e estatístico do canal. Por meio de simulações Monte Carlo, são obtidas curvas de distribuição acumulada (CDF) da SINR e da taxa para diferentes quantidades de *Access Points* (APs) e *User Equipments* (UEs), permitindo analisar como a densidade da infraestrutura e da carga de usuários influenciam o desempenho global da rede Cell-Free.
Palavras-chave: Cell-Free Massive MIMO; SINR; taxa alcançável; simulação Monte Carlo; estimação de canal.

2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é simular, utilizando MATLAB, o desempenho de redes Cell-Free Massive MIMO por meio de um modelo completo que abrange a geração aleatória de topologias, o desvanecimento em larga e pequena escala, a estimação dos coeficientes de canal e o cálculo das potências de precodificação e da SINR dos usuários.

Pretende-se comparar o desempenho obtido com conhecimento perfeito do canal com aquele baseado apenas em estatísticas dos canais, analisando como essas condições influenciam a taxa alcançável em bits por segundo. Além disso, investiga-se o impacto da variação do número de APs e do número de usuários, conforme solicitado no projeto, por meio das curvas de distribuição acumulada empírica (CDF) da SINR e da taxa.

3 Introdução

A avaliação de desempenho de sistemas de comunicação sem fio exige a caracterização estatística da relação sinal-ruído (SNR) sob os efeitos do desvanecimento multipercurso, especialmente em cenários de canal plano não seletivo em frequência. Modelos clássicos como Rayleigh, característico de enlaces sem linha de visada (NLoS), e Rice, associado à presença de um componente dominante em linha de visada (LoS), descrevem adequadamente o comportamento estatístico da envoltória do canal e permitem analisar métricas de desempenho essenciais, como a probabilidade de interrupção e a probabilidade de erro de símbolo.

A importância da modelagem estatística precisa do canal torna-se ainda mais evidente em arquiteturas modernas como Cell-Free Massive MIMO, nas quais o desempenho depende fortemente da variação espacial e temporal das condições de propagação. Segundo [1], "o aprimoramento de desempenho no Cell-Free deriva diretamente do aproveitamento conjunto da diversidade distribuída e da aleatoriedade do desvanecimento", reforçando que a modelagem acurada do canal é fundamental para a análise de sistemas avançados de múltiplas antenas.

Neste relatório, são apresentadas simulações numéricas baseadas no método de Monte Carlo para obtenção de curvas de probabilidade de interrupção em modelos Rayleigh e Rice, considerando diferentes valores médios de SNR e variando o limiar de interrupção. Além disso, avalia-se a probabilidade de erro de símbolo para modulações M-QAM em canais Rayleigh, contrastando as curvas simuladas com as expressões analíticas conhecidas e com o caso de referência em canal AWGN. Esses resultados permitem quantificar os impactos do desvanecimento multipercurso sobre o desempenho do sistema e validam o alinhamento entre teoria e simulação.

4 Desenvolvimento

Este projeto consiste na simulação computacional do desempenho de redes *Cell-Free Massive MIMO*, seguindo o modelo teórico discutido em sala de aula. Todas as etapas foram implementadas em MATLAB, de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 1, e com as instruções do enunciado do projeto.

Parâmetro	**Valor**
Número de blocos de coerência por rede - N_{bc}	100
Número total de redes avaliadas - N_{cf}	300
Frequência da portadora - f_{c}	3 GHz
Largura de banda - B_{w}	20 MHz
Figura de ruído - F_{n}	9 dB
Altura dos APs - h_{AP}	15 m
Altura dos UEs - h_{UE}	1.65 m
Temperatura - T_0	296.15 K
Tamanho da área coberta - $L_{\mathrm{x}}, L_{\mathrm{y}}$	1000 m, 1000 m
Potência das sequências piloto - P_{p}	200 mW
Potência de transmissão em *downlink* - P_{dl}	200 mW
Comprimento das sequências piloto - τ_{p}	50

Tabela 1: Parâmetros de projeto.

4.1 Parte I — Geração das CDFs de SINR e Taxa Alcançável

Nesta primeira etapa, devem ser simuladas redes Cell-Free considerando os parâmetros presentes no roteiro. Para cada realização de rede, é necessário:

1. Gerar posições aleatórias para os APs e UEs na área de 1000×1000 m.
2. Calcular as distâncias AP–UE e o desvanecimento em larga escala.
3. Gerar o desvanecimento em pequena escala (canal complexo) para cada enlace.
4. Estimar o canal utilizando sequências piloto de comprimento $\tau_p = 50$.
5. Calcular:
   - a SINR com conhecimento perfeito do canal;
   - a SINR com conhecimento estatístico do canal.
6. Repetir todo o processo para $N_{\mathrm{cf}} = 300$ redes, e para $N_{\mathrm{bc}} = 100$ blocos de coerência.
7. A partir das amostras obtidas, construir:
   - a ECDF da SINR (em dB);
   - a ECDF da taxa alcançável (em bits/s).

Os resultados devem ser apresentados para ambos os casos de conhecimento de canal: perfeito e estatístico.

Resposta da parte 1:
A simulação considera uma arquitetura Cell-Free Massive MIMO composta por múltiplos Access Points distribuídos espacialmente, que cooperam para atender simultaneamente todos os usuários da rede. Para cada realização de Monte Carlo, os APs e UEs são posicionados aleatoriamente em uma área bidimensional, garantindo diversidade espacial entre os enlaces.

O coeficiente de canal entre cada par AP–UE é modelado como o produto entre o desvanecimento em larga escala, que inclui perdas de percurso e sombreamento log-normal, e o desvanecimento em pequena escala, representado por uma variável gaussiana circularmente simétrica complexa, caracterizando um canal Rayleigh.

A estimação de canal é realizada durante a fase de treinamento, na qual cada UE transmite uma sequência piloto de comprimento τ_p. O sinal recebido em cada AP é projetado sobre o piloto correspondente, resultando em um sinal corrompido por ruído térmico. A partir dessa projeção, aplica-se o estimador MMSE, obtendo-se a estimativa do coeficiente de canal $\widehat{g}_{mk}$, bem como seus parâmetros estatísticos associados.

Com base nas estimativas de canal, são calculados os coeficientes de normalização de potência utilizados na precodificação em downlink. Em seguida, a SINR é calculada considerando dois cenários distintos: conhecimento perfeito do canal, no qual os coeficientes instantâneos são conhecidos, e conhecimento estatístico do canal, no qual apenas os valores médios dos ganhos são utilizados.

A taxa alcançável de cada usuário é obtida a partir da expressão de Shannon, $R = B\log_2(1+\text{SINR})$. Repetindo-se esse procedimento para múltiplas realizações independentes da rede e para vários blocos de coerência, obtêm-se amostras suficientes para a construção das distribuições empíricas acumuladas (ECDFs) da SINR e da taxa alcançável, permitindo uma análise estatística robusta do desempenho do sistema Cell-Free.

4.2 Parte II — Avaliação de Desempenho

Após a geração das métricas principais, devem ser realizadas duas análises comparativas:

4.2.1 (a) Variação do Número de APs

Nesta etapa, fixa-se $K = 20$ usuários, e o número de APs é variado em:

$$M \in \{100, 150, 200\}.$$

Para cada valor de M, deve-se:

- gerar as CDFs da SINR com conhecimento perfeito e estatístico;
- gerar as CDFs da taxa alcançável,

permitindo avaliar a influência da densidade de infraestrutura no desempenho da rede Cell-Free.

4.2.2 (b) Variação do Número de Usuários

Nesta etapa, fixa-se $M = 100$ APs, e o número de usuários é variado em:

$$K \in \{10, 20, 30\}.$$

Para cada valor de K, devem ser geradas novamente:

- as CDFs da SINR (perfeita e estatística);
- as CDFs da taxa alcançável.

Esse procedimento permite avaliar o impacto do aumento da demanda na rede, mostrando como o crescimento no número de UEs afeta interferência, SINR e taxa.

Resposta da parte 2.

A análise de desempenho do sistema Cell-Free Massive MIMO evidencia o impacto direto da densidade de APs e da quantidade de usuários sobre as métricas de SINR e taxa alcançável. No primeiro cenário, com $K = 20$ usuários fixos, observa-se que o aumento do número de APs resulta em uma melhoria consistente da SINR para a maioria dos usuários. Esse comportamento pode ser observado na Figura 1, na qual as ECDFs da SINR se deslocam progressivamente para a direita à medida que M aumenta, indicando ganhos de desempenho em praticamente toda a população de usuários.

Esse ganho decorre do aumento da diversidade macroespacial proporcionada pela densificação da infraestrutura, que reforça a soma coerente do sinal desejado e reduz a sensibilidade ao desvanecimento. Além disso, nota-se que a diferença entre os casos de conhecimento perfeito do canal (PCSI) e conhecimento estatístico do canal (ECSI) diminui com o aumento do número de APs, sugerindo maior robustez da arquitetura Cell-Free à incerteza de canal em cenários mais densos.

A Figura 2 apresenta as ECDFs da taxa alcançável para os mesmos valores de M. Observa-se um comportamento coerente com os resultados de SINR, com deslocamento das curvas para maiores taxas à medida que o número de APs aumenta. Esse resultado confirma que os ganhos obtidos na SINR se traduzem diretamente em aumentos de taxa, conforme previsto pela expressão de Shannon.

No segundo cenário, com $M = 100$ APs fixos, analisa-se o impacto do aumento do número de usuários na rede. A Figura 3 mostra que o aumento de K provoca uma degradação progressiva da SINR, evidenciada pelo deslocamento das ECDFs para a esquerda. Esse efeito está associado ao crescimento da interferência interusuários e à maior competição pelos recursos de potência disponíveis nos APs.

Esse comportamento também se reflete na taxa alcançável, conforme ilustrado na Figura 4. Observa-se que, à medida que o número de usuários aumenta, as curvas de ECDF da taxa se deslocam para valores menores, indicando redução do desempenho médio da rede. Nota-se ainda que os usuários localizados na cauda inferior da distribuição são os mais impactados, enquanto os usuários com melhores condições de canal mantêm desempenho relativamente superior.

De forma geral, os resultados confirmam o compromisso fundamental entre densidade de infraestrutura e carga de usuários em redes Cell-Free Massive MIMO. A densificação dos APs se mostra uma estratégia eficaz para elevar a SINR e a taxa alcançável e para reduzir a variabilidade de desempenho entre os usuários, ao passo que o aumento excessivo do número de UEs impõe limitações associadas à interferência e à alocação de potência, ressaltando a importância de um planejamento adequado da rede.

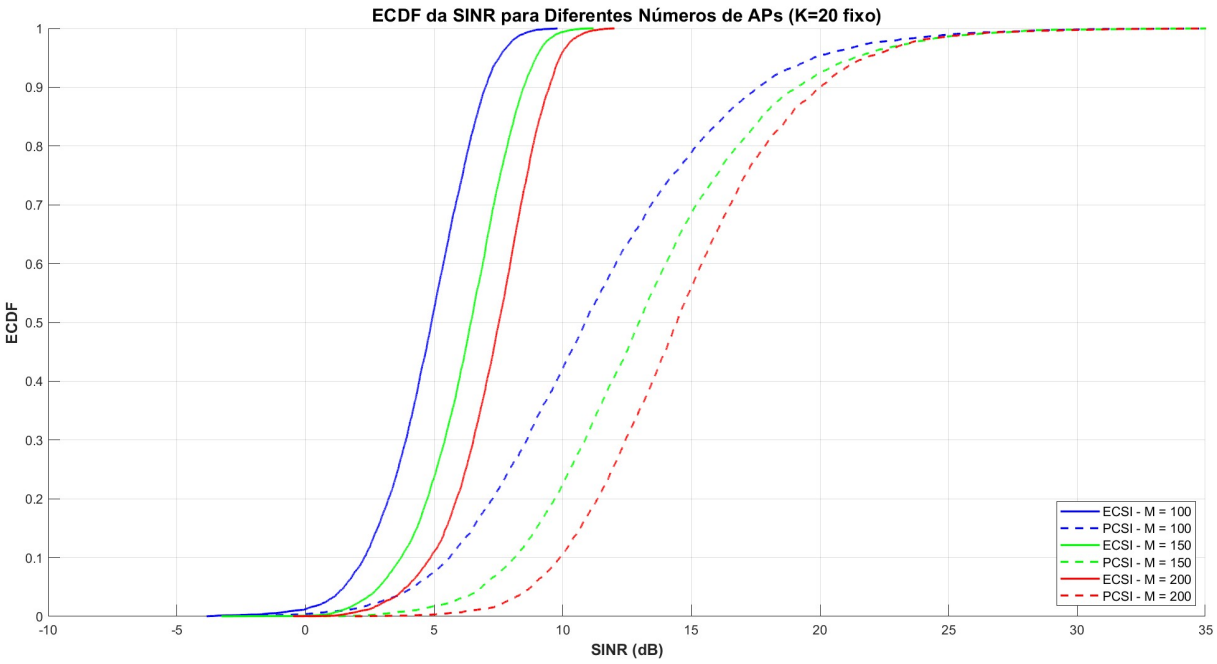

Figura 1: ECDF da SINR para diferentes números de APs, mantendo k = 20.

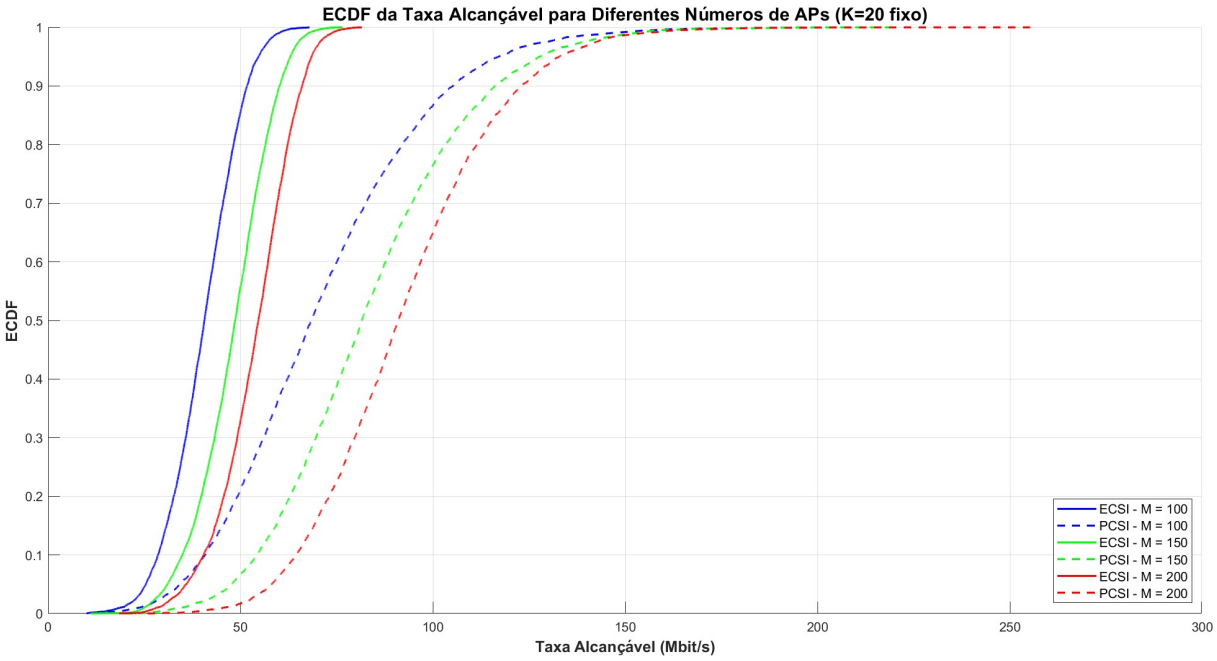

Figura 2: ECDF da taxa alcançável para diferentes números de APs, mantendo k = 20.

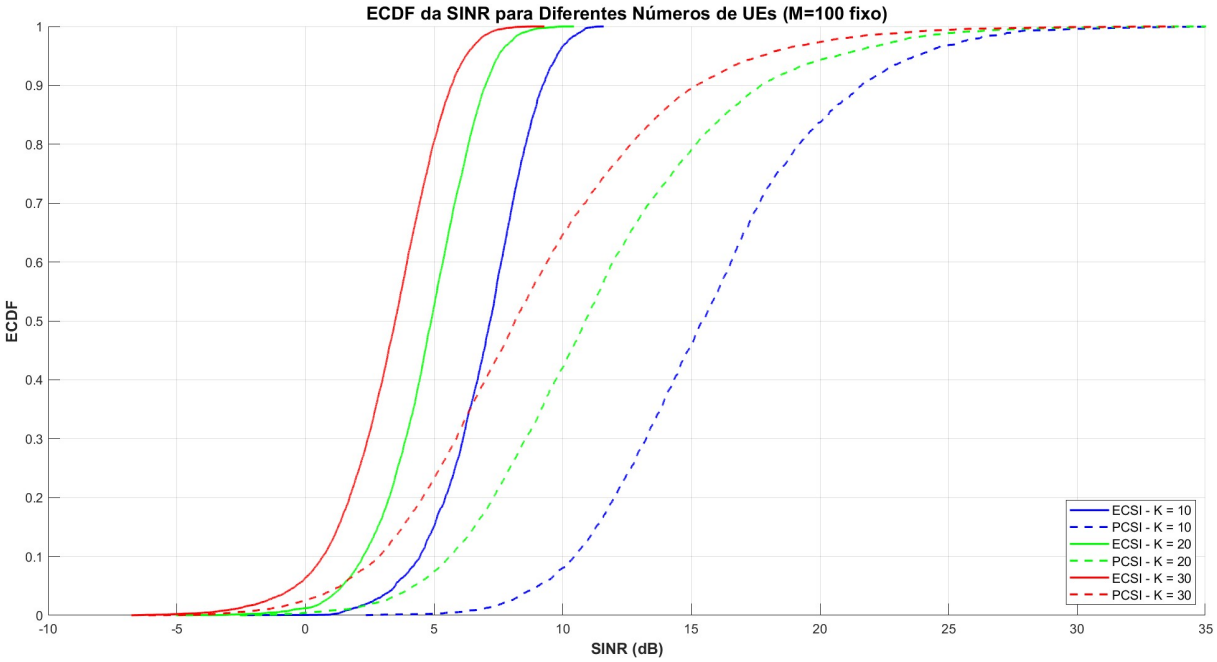

Figura 3: ECDF da SINR para diferentes números usuários k, mantendo fixa a quantidade de APs.

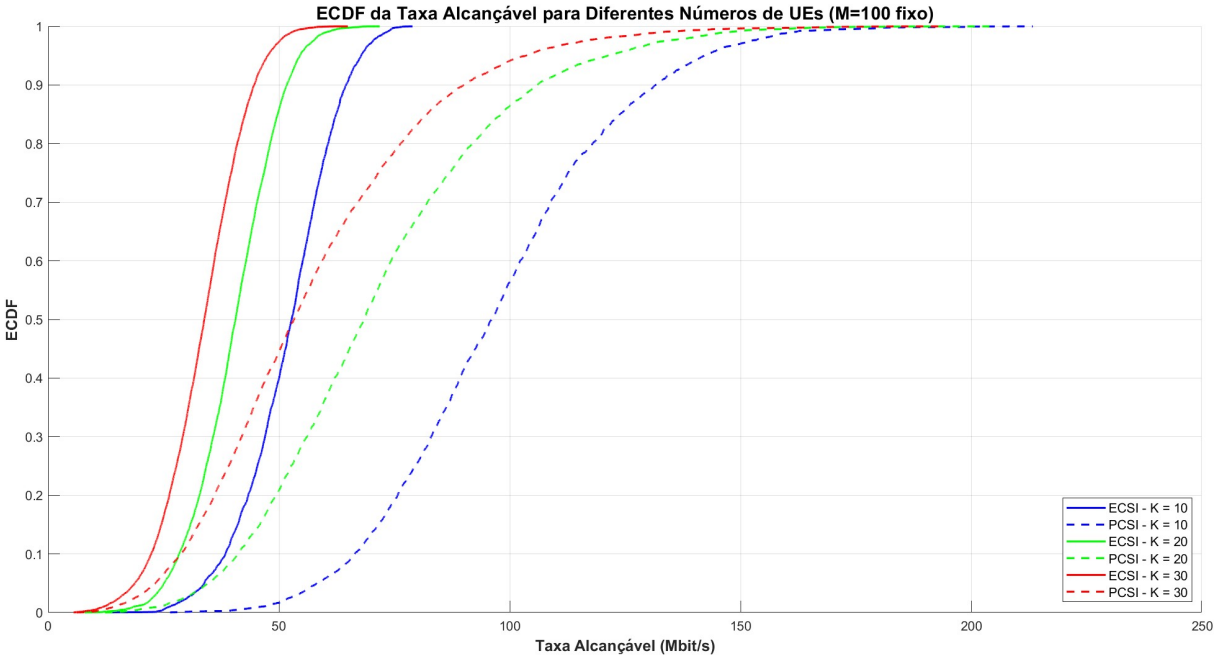

Figura 4: ECDF da taxa alcançável para diferentes números de usuários, mantendo fixa a quantidade de APs.

5 Resultados e Análise

Os resultados obtidos demonstram de forma clara os principais benefícios da arquitetura Cell-Free Massive MIMO. A análise das ECDFs da SINR e da taxa alcançável mostra que a densificação da infraestrutura, por meio do aumento do número de APs, leva a ganhos substanciais de desempenho em toda a rede, reduzindo a disparidade entre usuários com condições de canal favoráveis e desfavoráveis.

Por outro lado, o aumento do número de usuários impõe um desafio natural ao sistema, uma vez que intensifica a interferência interusuários e limita a potência disponível por usuário. Ainda assim, os resultados indicam que o Cell-Free Massive MIMO consegue manter níveis aceitáveis de SINR e taxa mesmo em cenários de maior carga, especialmente quando há conhecimento perfeito do canal.

A comparação entre os casos de conhecimento perfeito e estatístico do canal revela o impacto direto da qualidade da informação de canal no desempenho do sistema. O caso PCSI representa um limite superior teórico, enquanto o caso ECSI fornece uma estimativa mais conservadora e realista, especialmente relevante em cenários práticos com restrições de sinalização e estimação imperfeita.

6 Conclusão

Neste trabalho, foi realizada a simulação e análise do desempenho de um sistema Cell-Free Massive MIMO por meio de um modelo completo que inclui geração de topologia, desvanecimento em larga e pequena escala, estimação de canal baseada em pilotos e cálculo da SINR e da taxa alcançável no downlink.

Os resultados obtidos por simulação Monte Carlo confirmam os benefícios esperados da arquitetura Cell-Free, destacando-se a significativa melhoria de desempenho com o aumento do número de APs e a maior uniformidade da qualidade de serviço entre os usuários. Verificou-se também que o aumento do número de UEs degrada o desempenho, principalmente devido ao crescimento da interferência, embora o sistema mantenha robustez quando comparado a arquiteturas celulares tradicionais.

Além disso, a comparação entre conhecimento perfeito e estatístico do canal evidenciou a importância da estimação de canal na determinação do desempenho do sistema. Enquanto o conhecimento perfeito fornece um limite superior teórico, o conhecimento estatístico representa um cenário mais realista e ainda assim capaz de oferecer ganhos relevantes.

Em síntese, os resultados reforçam o potencial do Cell-Free Massive MIMO como uma arquitetura promissora para sistemas de comunicações móveis de próxima geração, capaz de atender altas densidades de usuários com desempenho elevado e distribuição mais uniforme de recursos.

Referências

[1] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO versus small cells," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850, 2017, disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7833040.