

# Análise de Tamanho de Clusters em Sistemas Cell-Free usando Receptores MMSE e Zero-Forcing

Vitória Hellen F. Coelho, Sezanildo da S.P Filho e Walter da Cruz Freitas Jr

**Resumo**—No cenário de arquiteturas de sexta geração (6G), redes *cell-free* representam o futuro das comunicações móveis. Neste estudo, investigamos o impacto do tamanho de *clusters cell-free* comparando dois receptores no cenário com interferência: MMSE e ZF. Os resultados indicam que o receptor MMSE supera o ZF na métrica de SINR. Além disso, a redução dos *clusters* impacta significativamente os usuários mais distantes dos PAs.

**Palavras-Chave**—Cell-free, mMIMO, MMSE, Zero-forcing.

**Abstract**—In the context of sixth-generation (6G) architectures, cell-free networks represent the future of mobile communications. In this study, we investigated the impact of cell-free cluster sizes by comparing two receivers in an interference scenario: MMSE and ZF. The results indicate that the MMSE receiver outperforms the ZF in the SINR metric. Additionally, the reduction of clusters significantly impacts users who are farther from the APs.

**Keywords**—Cell-free, mMIMO, MMSE, Zero-forcing

## I. INTRODUÇÃO

A arquitetura de redes móveis sem célula (do inglês, *cell-free* – CF) é uma nova proposta de rede que tem como objetivo o aumento de capacidade e uniformização da qualidade do sinal em toda área de cobertura. Nessa nova abordagem, os contornos celulares fixos são eliminados, ao contrário das redes convencionais que organizam em células bem definidas em torno das Estações Rádio Base (ERBs). Em um caso particular da arquitetura CF, chamado de *user-centric clustering* (do inglês, agrupamento centrado no usuário) os usuários são agrupados em *clusters* baseados em características e necessidades similares [1].

Na arquitetura CF, diversos pontos de acesso (PAs) distribuídos geograficamente atuam como elementos de rede, com cada antena recebendo e transmitindo sinais para dispositivos móveis. Esses PAs estão conectados a uma Unidade Central de Processamento (UCP) através de *links de fronthaul* e, por sua vez, a UCP conecta-se ao núcleo da rede via *links de backhaul* [1].

A escalabilidade dessa arquitetura é possível graças a tecnologia de múltiplas entradas e múltiplas saídas, que nesse contexto podemos chamar de *cell-free Massive MIMO*, (CF mMIMO), que são consideradas como uma ferramenta em potencial para a próxima geração das redes sem fio [2].

O objetivo principal deste trabalho é analisar o impacto do tamanho de um *cluster* CF mMIMO na distribuição da relação sinal-ruído-interferência (do inglês, SINR). Além de

comparar as técnicas de processamento de sinais MMSE e ZF para mitigar a interferência, visando encontrar um *threshold* que economize o *fronthaul* da rede.

Este artigo de iniciação científica está organizado da seguinte forma. Na segunda sessão são apresentadas as fundamentações teóricas. Na terceira sessão é apresentado o modelo sistêmico, na quarta os resultados e por fim, na última sessão, a conclusão do artigo.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Algoritmo de cancelamento de interferência

Em sistemas de comunicação sem fio, a interferência causa uma limitação na capacidade do sistema. Desta forma, algum processamento de sinal para o cancelamento de interferência é necessário no receptor. A seguir, são descritos os dois algoritmos considerados nesse trabalho.

1) *Minimum Mean Square Error (MMSE)*: O MMSE é uma técnica linear [3] que tem como finalidade de reduzir a interferência e o ruído. Este algoritmo assume que o sinal recebido pode ser expresso como uma combinação linear dos sinais transmitidos, que são afetados pelo ruído como também pelos efeitos dos canais de comunicação, encontrando assim, um vetor de pesos para essa mesma combinação que, facilita a detecção dos sinais desejados. O vetor de pesos pode ser definido da seguinte forma:

$$\mathbf{v}_k^{\text{MMSE}} = \mathbf{h}_k^H (\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1}, \quad (1)$$

em que  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{L \times 1}$  representa o vetor de canal,  $\sigma^2$  é a variância do ruído branco aditivo gaussiano, e  $\mathbf{I}_L$  é a matriz identidade, com  $L$  sendo o número de PAs.

2) *Zero-forcing (ZF)*: A técnica *Zero-Forcing* é semelhante a anterior, no entanto, ela anula as interferências não levando em conta a presença do ruído. O seu vetor de pesos é dado por:

$$\mathbf{v}_k^{\text{ZF}} = (\mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_k)^{-1} \mathbf{h}_k^H. \quad (2)$$

## III. MODELO SISTÊMICO

### A. Modelo de propagação

Nesse trabalho, o modelo de perda de percurso é descrito por [1]:

$$\beta_{dB}(d) = -30.5 - 36.7 \log_{10} \left( \frac{d}{1m} \right). \quad (3)$$

Já o efeito do desvanecimento de pequena escala no canal gerado pode ser escrito como [1]:

$$C = \sqrt{\beta(d)} e^{j\phi}, \quad (4)$$

em que  $\beta$  é o modelo de perda de percurso,  $d$  é a distância de propagação e  $\phi$  é uma variável aleatória independente, uniformemente distribuída entre 0 e  $2\pi$ .

### B. Modelo de sinal

Neste artigo, propomos um modelo de sinal recebido baseado em [1], descrevendo um cenário CF com  $L$  PAs, e cada PA possui  $N = 1$  antena. Os PAs estão distribuídos num *grid* quadrado. Assume-se que há  $K$  usuários, cada um com 1 antena. Nessa configuração, os PAs cooperam para atender ao usuário. O sinal recebido no cenário de *uplink* é descrito conforme [1]:

$$\mathbf{y}_k^{\text{CF}} = \underbrace{\mathbf{h}_k s_k}_{\text{sinal desejado}} + \underbrace{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{h}_i s_i}_{\text{interferência}} + \mathbf{n}, \quad (5)$$

em que  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{L \times 1}$  é o vetor de canal entre o  $k$ -ésimo usuário e o  $l$ -ésimo PA,  $s_k \in \mathbb{C}$  é a informação do sinal transmitido pelo  $k$ -usuário e  $\mathbf{n}^{L \times 1}$  o ruído. Um vetor de combinação  $\mathbf{v}_k \in \mathbb{C}^{1 \times L}$  (MMSE ou ZF) é aplicado no receptor. Dessa forma, a estimativa de  $s_k$  fica [1]:

$$\hat{s}_k^{\text{CF}} = \mathbf{v}_k \mathbf{y}_k^{\text{CF}} = \sum_{i=1}^K \mathbf{v}_k \mathbf{h}_i s_i + \mathbf{v}_k \mathbf{n}, \quad (6)$$

assim, a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR) pode ser escrita como: [1]:

$$\gamma^{\text{CF}} = \frac{|\mathbf{v}_k \mathbf{h}_k|^2 p}{\mathbf{v}_k (p \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + \sigma^2 \mathbf{I}_L) \mathbf{v}_k^H}, \quad (7)$$

em que  $p$  é a potência de transmissão e  $\sigma^2$  a variância do ruído.

### C. Parâmetros da simulação

Neste estudo, foram realizadas simulações de Monte Carlo utilizando o *software Matlab*, com os parâmetros especificados na Tabela 1. Os usuários foram distribuídos em  $10^5$  posições diferentes no *grid* e as métricas de SINR foram coletadas e medidas entre todas as realizações.

TABELA I  
PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

| Parâmetro                   | Valor            |
|-----------------------------|------------------|
| Potência de transmissão $p$ | 10 dBm           |
| Potência do ruído           | -96 dBm          |
| Altura do ponto de acesso   | 10 m             |
| Número de simulações        | $10^5$           |
| Tamanho do <i>grid</i>      | $400 \times 400$ |

## IV. RESULTADOS

Na configuração proposta em [1], um *grid* com 64 PAs e  $K = 8$  usuários foi avaliado. A redução para 50 PAs apresentou desempenho semelhante ao de 64 PAs nos percentis 50 e 90, conforme mostrado na curva da função de distribuição acumulada (do inglês, CDF) na Figura 1 e no gráfico da Figura 2. No entanto, a métrica de SINR indicou que o receptor ZF, tanto com 50 quanto com 64 PAs, teve desempenho inferior ao receptor MMSE, como evidenciado nas mesmas figuras.

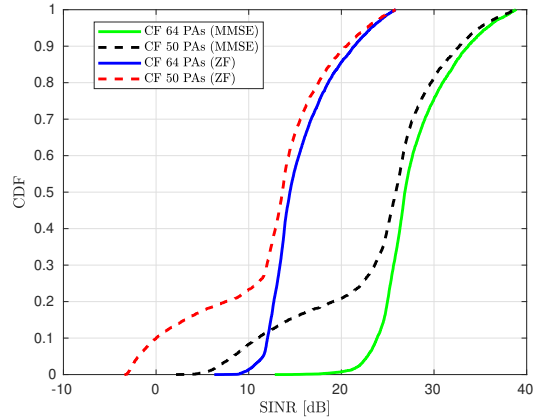


Fig. 1. CDF da SINR do desempenho do cluster com o vetor MMSE e ZF.

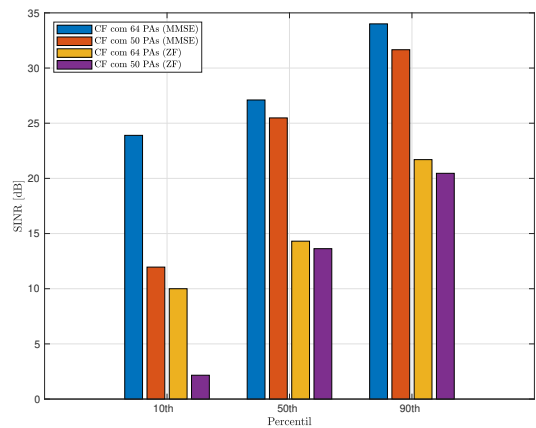


Fig. 2. Percentil dos clusters CF.

## V. CONCLUSÕES

Neste estudo, ao reduzir o tamanho do *cluster* de 64 para 50 PAs, observou-se que os receptores MMSE e ZF apresentaram desempenhos similares nos percentis 50 e 90 de SINR, indicando que os usuários mais próximos das PAs foram menos afetados por essa redução. No entanto, a degradação do desempenho foi mais acentuada no percentil 10, característico dos usuários mais distantes. Embora um menor número de PAs ajude no processamento de dados da UCP, esse *trade-off* também envolve a qualidade do serviço (QoS). A degradação no percentil 10 indica que houve uma penalização na QoS desses usuários em favor da economia de *fronthall*.

Quanto à comparação entre os receptores, os resultados evidenciam a superioridade do MMSE em relação ao ZF, que pode ser atribuída à maior robustez e eficiência do MMSE em mitigar a interferência entre os usuários.

## REFERÊNCIAS

- [1] Özlem Tuğçe Demir, Emil Björnson and Luca Sanguinetti (2021), Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO”, *Foundations and Trends® in Signal Processing*: Vol. 14, No. 3-4, pp 162–472
- [2] SARKER, Manobendu; FAPOJUWO, Abraham O. *Uplink power allocation for RSMA-aided user-centric cell-free massive MIMO systems*. In: 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). IEEE, 2023. p. 1-5.
- [3] Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., & Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. John Wiley & Sons.