

# Análise de Controle de Potência em Arquiteturas Cell-Free e Small-Cell com UD-DPC

Sezanildo P. Filho, Vitória Hellen F. Coelho e Walter C. Freitas Jr.

**Resumo**—Este estudo realiza uma análise comparativa de desempenho entre duas arquiteturas de redes sem fio: *cell-free* massive MIMO (CF-mMIMO) e *small-cell*. Para a rede *small-cell*, é aplicado o algoritmo de controle de potência *Up-down Distributed Power Control* (UD-DPC), com o objetivo de mitigar as limitações enfrentadas por usuários em condições de canal desfavoráveis. Os resultados das simulações indicam que o UD-DPC proporciona melhorias significativas na SINR dos usuários localizados na borda da célula, alcançando níveis de desempenho comparáveis aos obtidos pela arquitetura *cell-free*. Esses achados ressaltam o compromisso entre a otimização local por meio de controle de potência e os benefícios estruturais proporcionados pela ampla distribuição de antenas na arquitetura *cell-free*.

**Palavras-Chave**—UD-DPC, Cell-free, Small-cell.

**Abstract**—This study presents a comparative performance analysis between two wireless network architectures: Cell-free massive MIMO (CF-mMIMO) and small-cell. The power control algorithm called Up-down Distributed Power Control (UD-DPC) is applied to the small-cell network with the objective of improving the performance of users in unfavorable channel conditions. The simulation results demonstrate that the UD-DPC algorithm provides significant gains in the SINR of users at the cell edges, matching the performance of the cell-free network configuration. These results highlight the trade-offs between local optimization by power control and the intrinsic advantages of massive antenna distribution.

**Keywords**—UD-DPC, cell-free, small-cell

## I. INTRODUÇÃO

O aumento no tráfego de dados móveis e a necessidade por cobertura mais uniforme têm impulsionado o desenvolvimento de arquiteturas de rede que conciliem eficiência espectral, robustez à interferência e viabilidade de implementação. Nesse cenário, os sistemas *cell-free massive MIMO* (CF-mMIMO) surgem como uma proposta promissora, ao eliminar fronteiras de célula e permitir que múltiplos pontos de acessos (PAs) distribuídos cooperem simultaneamente no atendimento aos usuários. Essa estrutura proporciona uma distribuição mais homogênea dos recursos da rede e melhora a qualidade de serviço (do inglês, *Quality of Service*- QoS) em ambientes com muita interferência [1].

Em contraste, a arquitetura *small-cell* mantém a segmentação do espaço em células fixas, cada uma atendida por um único PA. Embora essa abordagem reduza a distância média entre usuário e transmissor, permitindo maior reutilização espectral, ela está sujeita a variações acentuadas de desempenho

entre os usuários, sobretudo nos limites entre as células. Além disso, a ausência de cooperação entre as células dificulta o controle eficiente da interferência.

Para mitigar essas limitações, diversas estratégias de controle de potência têm sido amplamente investigadas na literatura. Em [2] e [3], os autores estudam o problema de alocação de potência em redes MIMO massivas e CF-mMIMO, empregando abordagens baseadas em algoritmos de otimização do tipo max-min. Já em [4], foram desenvolvidos algoritmos de controle de potência também baseados na formulação max-min, com uma análise comparativa entre o desempenho de redes CF-mMIMO e *small-cell*, considerando cenários com desvanecimento tanto correlacionado quanto não correlacionado.

Neste trabalho, realiza-se uma comparação entre duas arquiteturas de redes sem fio: uma configuração CF-mMIMO com potência de transmissão fixa e uma rede *small-cell* equipada com um controle de potência descentralizado, implementado por meio do algoritmo *Up-down Distributed Power Control* (UD-DPC). A análise é conduzida por simulações de Monte Carlo, com o objetivo de avaliar em que medida o controle de potência via UD-DPC pode aprimorar o desempenho da rede *small-cell* em termos de SINR.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Sistemas MIMO

De forma geral, sistemas MIMO são compostos por  $D_t$  antenas transmissoras e  $D_r$  antenas receptoras. O sinal recebido pode ser descrito como [5]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

em que  $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{D_r \times 1}$  é o vetor do sinal recebido no receptor,  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{D_r \times D_t}$  é a matriz de canal MIMO, que representa os canais entre as antenas de transmissão e recepção,  $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{D_t \times 1}$  é o vetor de sinal transmitido e  $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{D_r \times 1}$  é o vetor de ruído aditivo Gaussiano branco de variância  $\sigma^2$ .

### B. Sistemas Cell-free

Sistemas CF-mMIMO visam melhorar a eficiência espectral, aumentar a capacidade e diminuir a latência na rede. A nova arquitetura proposta tem sido apontada como uma alternativa às redes móveis convencionais que trabalham com a estrutura de células. Nessa nova modelagem, PAs equipados com várias antenas são espalhados numa área de cobertura. Uma das principais vantagens das redes CF-mMIMO é que elas permitem que os usuários sejam atendidos por vários PAs ao mesmo tempo, o que proporciona um aumento de eficiência e a capacidade da rede se apresenta mais uniforme.

Sezanildo P. Filho, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, e-mail: seza@gtel.ufc.br; Vitória Coelho, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, e-mail: vitoriafeitos@alu.ufc.br; Walter Freitas, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, e-mail: walter@gtel.ufc.br. Este trabalho foi financiado em parte pelo CNPq, em parte pela FUNCAP/Universal Grant UNI-0210-00043.01.00/23.

### C. Sistemas Small-Cell

A arquitetura *small-cell* caracteriza-se pela implantação densa de PA, cada um responsável por cobrir uma área geográfica reduzida. Nesse modelo, o atendimento ao usuário é feito de forma exclusiva por um único PA, escolhido com base no maior ganho médio de canal entre as opções disponíveis. Essa abordagem reduz a distância média de comunicação, favorecendo a reutilização espectral e aumentando a capacidade local da rede.

Entretanto, a ausência de cooperação entre os PAs impõe limitações significativas. Em particular, a interferência intercelular torna-se um fator crítico, sobretudo em cenários densamente povoados, onde múltiplos usuários operam simultaneamente em áreas de sobreposição de cobertura. Isso resulta em variações acentuadas de desempenho, principalmente nas regiões de fronteira entre células, afetando diretamente a relação sinal-interferência-mais-ruído (do inglês, SINR) e a qualidade de serviço QoS.

### D. Controle de Potência com UD-DPC

Para lidar com os efeitos adversos da interferência em redes *small-cell*, técnicas de controle de potência desempenham um papel fundamental. Neste contexto, o algoritmo UD-DPC surge como uma alternativa eficiente, por ser uma técnica descentralizada, iterativa e de baixa complexidade computacional. Seu objetivo é ajustar a potência de transmissão de cada usuário de forma autônoma, com base exclusivamente na SINR medida localmente.

A lógica do UD-DPC consiste em promover aumentos ou reduções graduais na potência transmitida, conforme a diferença entre a SINR atual e um valor alvo definido pelo sistema. Como não há necessidade de troca de informações entre usuários e/ou com um nó central, o algoritmo se adapta bem a arquiteturas distribuídas, oferecendo uma solução prática e escalável para ambientes sujeitos a altos níveis de interferência. Além de mitigar a degradação de desempenho causada por enlaces desfavoráveis, o UD-DPC contribui para o equilíbrio da rede em termos de eficiência energética e equidade entre os usuários.

## III. MODELO SISTÊMICO

### A. Modelo de Propagação

Neste trabalho, adota-se o modelo de propagação descrito em [1]. A perda de percurso em dB é dada por:

$$\beta_{\text{dB}}(d) = -30,5 - 36,7 \log_{10} \left( \frac{d}{1 \text{ m}} \right), \quad (2)$$

O desvanecimento de pequena escala é modelado por uma componente complexa:

$$C = \sqrt{\beta(d)} e^{j\phi}, \quad (3)$$

em que  $\beta$  representa o ganho médio de canal,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor e  $\phi$  é uma variável aleatória independente, uniformemente distribuída no intervalo  $[0, 2\pi]$ .

### B. Modelo de Sinal

Considera-se um sistema com  $K$  usuários e  $L$  PAs, todos equipados com uma antena. Os PAs estão distribuídos uniformemente em uma área bidimensional.

1) *Arquitetura Cell-Free com Potência Fixa*: Todos os PAs cooperam simultaneamente e o sinal recebido no uplink (UL) é dado por:

$$\mathbf{y}_k^{\text{CF}} = \underbrace{\mathbf{h}_k s_k}_{\text{sinal desejado}} + \underbrace{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{h}_i s_i}_{\text{interferência}} + \mathbf{n}, \quad (4)$$

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. O vetor de combinação  $\mathbf{v}_k \in \mathbb{C}^{1 \times L}$  (minimum mean square error (MMSE)) é aplicado no receptor.

$$\mathbf{v}_k^{\text{MMSE}} = \mathbf{h}_k^H (\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H + \sigma^2 \mathbf{I}_L)^{-1}, \quad (5)$$

em que  $\mathbf{I}_L$  é a matriz identidade e  $\sigma^2$  é a variância do ruído branco aditivo gaussiano, e a SINR pode ser escrita como:

$$\gamma_k^{\text{CF}} = \frac{|\mathbf{v}_k \mathbf{h}_k|^2 p}{\mathbf{v}_k (p \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H + \sigma^2 \mathbf{I}_L) \mathbf{v}_k^H}, \quad (6)$$

em que  $p$  é a potência de transmissão.

2) *Arquitetura Small-Cell com Controle de Potência UD-DPC*: Neste cenário, cada usuário  $k$  transmite seu sinal a múltiplos pontos de acesso (PAs), mas é atendido exclusivamente por aquele que proporciona a melhor qualidade de enlace. O sinal recebido no  $l$ -ésimo PA é dado por:

$$y_l^{\text{small-cell}} = \sum_{i=1}^K h_{il} s_i + n_l, \quad (7)$$

em que  $h_{il} \in \mathbb{C}$  representa a resposta de canal entre o  $i$ -ésimo usuário e o  $l$ -ésimo PA,  $s_i$  é o sinal transmitido com  $\mathbb{E}[|s_i|^2] = p$ , e  $n_l \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  é o ruído de recepção. A SINR no  $l$ -ésimo PA com respeito ao sinal do  $k$ -ésimo usuário é:

$$\gamma_{kl}^{\text{small-cell}} = \frac{p |h_{kl}|^2}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K |h_{il}|^2 + \sigma^2}. \quad (8)$$

Esse modelo assume potência fixa  $p$  para todos os usuários, no entanto, com o objetivo de atingir um nível alvo de SINR de forma descentralizada, aplica-se o algoritmo de controle de potência UD-DPC. Para isso, define-se a SINR no  $l$ -ésimo AP com respeito ao sinal do  $k$ -ésimo usuário na iteração  $t$  como:

$$\gamma_{kl}^{(t)} = \frac{p_k^{(t)} |h_{kl}|^2}{p_k \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K |h_{il}|^2 + \sigma^2}, \quad (9)$$

em que  $\gamma_{kl}^{(t)}$  e  $p_k^{(t)}$  são a SINR e a potência de transmissão na iteração  $t$  respectivamente. Definimos o vetor de potências de transmissão na iteração  $t$  como:

$$\mathbf{p}(t) = [p_1(t) \dots p_K(t)]^T, \quad (10)$$

em que  $p_k(t)$  representa a potência de transmissão do  $k$ -ésimo usuário na interação  $t$ . De forma análoga, o vetor contendo os valores de SINR é dado por:

$$\gamma_{kl}(t) = [\gamma_1(t) \cdots \gamma_{KL}(t)]^T, \quad (11)$$

em que  $\gamma_{kl}(t)$  denota o valor de SINR no  $l$ -ésimo AP em relação ao  $k$ -ésimo usuário, também na interação  $t$ . A atualização de potência segue a regra do algoritmo UD-DPC:

$$\mathbf{p}(t+1) = \mathbf{p}(t) + \mu \cdot \text{sign}(\gamma_{\text{alvo}} - \gamma(t)), \quad (12)$$

em que  $\mu > 0$  representa o passo de atualização, e  $\gamma_{\text{alvo}}$  corresponde ao valor alvo de SINR. A função  $\text{sign}$  é uma função escalar que recebe um número real como argumento e retorna  $+1$  se o argumento for positivo,  $0$  se for igual a zero, e  $-1$  se for negativo.

Após cada iteração do algoritmo, as potências de transmissão são limitadas aos valores dentro dos intervalos permitidos, de acordo com as restrições do sistema:

$$p_k(t+1) = \min \{p_{\max}, \max(p_{\min}, p_k(t+1))\}, \quad \forall k. \quad (13)$$

em que o processo iterativo se repete até que a convergência seja alcançada, ou até que o número máximo de iterações seja atingido.

#### IV. RESULTADOS

As simulações deste estudo foram realizadas por meio de métodos de Monte Carlo, com diferentes posicionamentos aleatórios dos usuários em um ambiente de  $400 \times 400$  m. Foram considerados 20 usuários e 36 PAs, com potência de transmissão variando entre 0 dBm e 30 dBm. O controle de potência foi realizado com um passo de atualização  $\mu$  de 2 dBm e um alvo de SINR ( $\gamma_{\text{alvo}}$ ) de 30 dB. A potência do ruído foi fixada em  $-96$  dBm.

A Figura 1 apresenta a função de distribuição acumulada (CDF) da SINR para os três cenários simulados. O modelo *small-cell* sem controle de potência exibe o pior desempenho, com grande parte dos usuários operando abaixo de 0 dB, evidenciando elevada interferência e significativa desigualdade entre os enlaces. A introdução do UD-DPC mitiga essas limitações, reduzindo a ocorrência de enlaces em condições críticas, elevando os percentis inferiores da distribuição e promovendo uma maior equidade no desempenho. Como resultado, o cenário *small-cell* com UD-DPC passa a se aproximar da configuração CF em termos de robustez e eficiência.

A Figura 2 ilustra a convergência da potência de transmissão para alguns usuários selecionados, com o objetivo de facilitar a interpretação visual do gráfico. Nota-se que, ao longo das 500 iterações, os valores de potência convergem para níveis em torno de 25 dBm e 30 dBm, evidenciando a estabilidade do processo de ajuste de potência.

#### V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi avaliado o impacto da aplicação do algoritmo de controle de potência descentralizado UD-DPC no desempenho de redes *small-cell*, com posterior comparação à arquitetura CF-mMIMO. Os resultados demonstraram que o

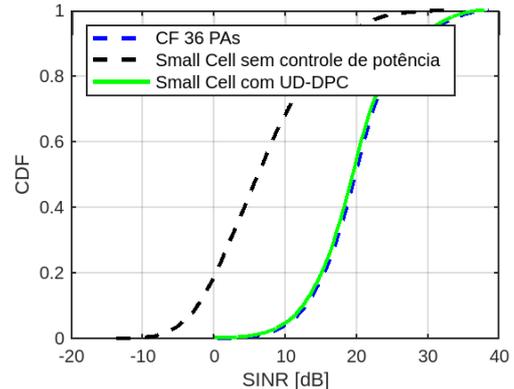


Fig. 1: CDF da SINR do desempenho da rede nos cenários CF, Small-Cell sem controle de potência e Small-Cell com UD-DPC.

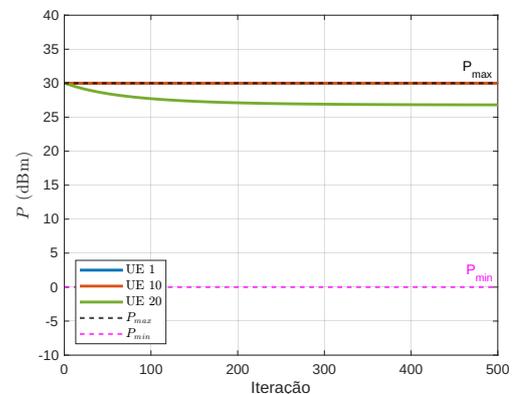


Fig. 2: Convergência da potência ao longo das iterações

uso do UD-DPC melhora significativamente a qualidade do sinal para usuários em condições desfavoráveis, reduzindo a desigualdade de desempenho típica do modelo *small-cell* sem controle de potência.

A análise evidenciou que, o UD-DPC representa uma alternativa viável e eficiente para mitigar as limitações das redes *small-cell*, especialmente em cenários densos e desbalanceados. Dessa forma, os resultados apresentados contribuem para uma melhor compreensão do comportamento dessas arquiteturas e indicam que soluções distribuídas simples, podem representar um passo intermediário promissor rumo a sistemas mais justos e eficazes.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Özlem Tuğfe Demir, E. Björnson, and L. Sanguinetti, “Foundations of User-Centric Cell-Free Massive MIMO,” *Foundations and Trends® in Signal Processing*, vol. 14, no. 3–4, pp. 162–472, 2021.
- [2] R. S. Chaves, E. Cetin, M. V. Lima, and W. A. Martins, “On the convergence of max-min fairness power allocation in massive mimo systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 12, pp. 2873–2877, 2020.
- [3] H. Yang and T. L. Marzetta, “Massive mimo with max-min power control in line-of-sight propagation environment,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 11, pp. 4685–4693, 2017.
- [4] 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.
- [5] F. R. P. Cavalcanti, T. F. Maciel, W. C. F. Jr., and Y. C. B. Silva, *Comunicação Móvel Celular*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2018.