



Análise do Desempenho de Esquemas MR/ZF em UL/DL de Sistemas MIMO Massivo com RP/RF

Performance Evaluation of MR/ZF Schemes in the UL/DL of Massive MIMO Systems with PR/FR

Luiz Alberto Oliveira Mimim ^{*}, José Carlos Marinello Filho [†]

RESUMO

Sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, do inglês *Multiple-Inputs Multiple-Outputs*) são vistos como a tecnologia chave que possibilitará alcançar os requisitos de desempenho de sistemas de comunicação de quinta geração (5G). O grande número de antenas instaladas na estação base (BS, do inglês *base station*) traz elevada resolução espacial aos usuários, permitindo notáveis ganhos de *array* e formas de mitigar interferência sem a necessidade de dividir recursos de tempo ou frequência. Neste trabalho, é realizada uma extensa análise do desempenho de sistemas MIMO massivo e comparações com diferentes cenários de simulação: empregando os esquemas *maximum ratio combiner* (MRC) e *zero-forcing* (ZF) tanto em *uplink* (UL) quanto em *downlink* (DL), assim como os esquemas de reuso de pilotos (RP) or reuso de frequência (RF). A comparação de desempenhos aponta que a combinação entre RP e MRC/T, com um fator de reuso igual a 3, atinge o melhor desempenho de capacidade, chegando em média a 8,9835 Mb/s/terminal em condições realistas de canal, potência de transmissão de reduzida e um número não tão grande de antenas.

Palavras-chave: MIMO Massivo. MRC. ZF. reuso de pilotos. reuso de frequência.

ABSTRACT

Massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems are seen as a key enabler technology for achieving the stringent performance requirements of fifth generation (5G) and beyond wireless communication systems. The large number of antennas employed at the base station (BS) provides enhanced spatial resolution for the users, allowing appreciable array gains and interference mitigation capabilities without the need of splitting time/frequency resources. In this paper, we provide an extensive massive MIMO system performance evaluation and comparison under different system conditions: employing maximum ratio combiner (MRC) and zero-forcing (ZF) schemes in both uplink (UL) and downlink (DL), as well as employing pilot reuse (PR) or frequency reuse (FR) schemes. Our conducted performance comparison points out that the MRC/T scheme with PR, with a reuse factor of 3, as being able to achieve the best mean capacity performance of 8,9835 Mb/s/terminal, under realistic channel conditions, reduced transmit power, and not so large number of antennas.

Keywords: Massive MIMO. MRC. ZF. pilot reuse. frequency reuse.

1 INTRODUÇÃO

Ingrediente chave da tecnologia 5G, o MIMO massivo (MIMO, do inglês *Multiple-Inputs Multiple-Outputs*) baseia-se em utilizar um alto número de antenas na estação base (BS, do inglês *base station*), que pode, simultaneamente, atender a vários terminais por meio da multiplexação espacial, como cita (MARZETTA, T. et al., 2016). Com com infinitas antenas na BS em cenário multicelular, o único efeito que limita o desempenho é a

* DAELE, Engenharia Elétrica; omluizalberto@gmail.com.

† DAELE, Engenharia Elétrica; jcmarinello@utfpr.edu.br.



contaminação de pilotos (MARZETTA, T., 2010), prejudicando a qualidade das estimativas de canal e resultando em interferência intercelular coerente, que pode comprometer a transmissão (YANG; MARZETTA, T. L., 2015).

O reuso de frequência é descrito em (GOLDSMITH, 2005) como o ato de designar diferentes conjuntos de canais a diferentes células dentro de um *cluster* (agrupamento de células), reutilizados em diferentes *clusters* espacialmente separados. Células com o mesmo conjunto de canais apresentam forte interferência entre seus usuários, impactando altamente seu desempenho. Como descrito em (GOLDSMITH, 2005), para células hexagonais, a largura de banda total do sistema é dividida entre ζ_f sub-bandas, igual ao número de células por *cluster*, e é conhecido como o fator RF.

É explicado em (MARZETTA, T. et al., 2016) que a contaminação de pilotos pode ser mitigada ao empregar um fator RP maior que um, de forma que todos os pilotos em grupos de ζ_p células adjacentes são ortogonais. Entretanto, este método resulta em um maior *overhead* (cabecçalho da transmissão), já que o uso de RP necessita de uma maior sequência de pilotos devido ao grande número de pilotos ortogonais necessários, cuja transmissão consome uma fração maior do intervalo de coerência disponível.

Como o RP causa o aumento das sequências de pilotos, e o aumento do *overhead*, a eficiência espectral líquida de um terminal diminui com o aumento do fator RP. Em (MARZETTA, T. et al., 2016) é estabelecido que a taxa de transferência líquida de um terminal é obtida multiplicando sua eficiência espectral líquida por sua largura de banda, logo, quanto maior o fator FR, mais a largura de banda do sistema é dividida, e a taxa de transferência diminui proporcionalmente.

O MIMO massivo utiliza processamento *zero-forcing* (ZF) e de máxima razão (MARZETTA, T., 2010), sendo transmissão de máxima razão (MRT, do inglês *maximum ratio transmission*) e combinação de máxima razão (MRC, do inglês *maximum ratio combiner*) para precodificação e detecção, respectivamente. Em (MI et al., 2017) foi concluído que o MRT apresenta um desempenho menor que ZF em termos de relação sinal-interferência-ruído (SINR, do inglês *signal-to-interference-plus-noise ratio*), mas sua robustez a erros de reciprocidade e estimação de canal o torna mais eficiente em certos casos. Este trabalho busca, também, expandir os resultados de desempenho em MIMO massivo empregando as técnicas MRC/T e ZF.

O fator de reuso ideal depende, também, do ambiente de propagação, já que maiores expoentes de decaimento aumentam a perda de percurso, e reduzem a interferência intracelular. Neste trabalho, a comparação entre RP e RF será feita em um ambiente densamente urbanizado, em um sistema MIMO massivo multicelular com 100 antenas instaladas na BS, medindo em termos de taxa de transmissão média e de percentil 95.

2 MODELO DE SISTEMA

Considera-se neste trabalho um sistema banda larga MIMO massivo multicelular, no qual, em cada uma das L diferentes células hexagonais, K usuários de antena única são servidos por uma BS com M antenas. Assume-se multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM, do inglês *orthogonal-frequency-division multiplexing*), com o modelo de sistema em uso sendo válido para uma subportadora n na qual o desvanecimento plano exerce influência. Mas, sem perda de generalidade, deixamos a dependência em n e assume-se o seguinte.

O canal possui desvanecimento do tipo Rayleigh. Considere $\mathbf{h}_{ikj} \in \mathbb{C}^M$, tal que $\mathbf{h}_{ikj} \sim CN(\mathbf{0}, \beta_{ikj} \mathbf{I}_M)$, $\forall k, i, j$ é o vetor de canal entre a BS da i -ésima célula e o k -ésimo usuário da j -ésima célula, sendo β_{ikj} o coeficiente de desvanecimento em larga escala, e \mathbf{I}_M a matriz identidade de tamanho M . Como em (MARZETTA, T., 2010), calcula-se o coeficiente de desvanecimento em larga escala β_{ikj} dividindo o sombreamento z_{ikj} , uma variável aleatória log-normal de média zero e desvio padrão σ_{sd} , pela distância entre o k -ésimo terminal da j -ésima célula e a BS da i -ésima célula, denotado por r_{ikj} , elevado ao expoente de decaimento γ , ou seja, $\beta_{ikj} = \frac{z_{ikj}}{r_{ikj}^\gamma}$.

Assume-se também reciprocidade entre canais de UL e DL, então, β_{ikj} e \mathbf{h}_{ikj} são iguais em ambas as direções (FERNANDES; ASHIKHMIN; MARZETTA, T., 2013). Como em (FERNANDES; ASHIKHMIN; MARZETTA, T., 2013), assume-se um modelo de desvanecimento em bloco tempo-frequência, no qual os vetores de canal \mathbf{h}_{ikj} mantêm-se constante durante os blocos de coerência de S símbolos OFDM, divididos no tempo em T períodos de símbolo OFDM, e em frequência em N_{smooth} subportadoras, tal que $S = N_{\text{smooth}} \cdot T$ é válido. Já o coeficiente de desvanecimento em larga escala β_{ikj} é constante para todas as subportadoras e todas as antenas na mesma BS, variando independentemente em diferentes iterações Monte-Carlo.

Durante o UL, os usuários da j -ésima célula transmitem um vetor $\mathbf{x}_j = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}]^T$ composto por seus símbolos de dados, sendo $\{\cdot\}^T$ o operador de transposição. Também, cada antena na i -ésima BS está sujeita a ruído de potência σ^2 , representado no vetor \mathbf{n}_i . Logo, o sinal de UL recebido na i -ésima BS é calculado por

$$\mathbf{y}_i = \sqrt{\rho} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{ikj} x_{kj} + \mathbf{n}_i = \sqrt{\rho} \sum_{j=1}^L \mathbf{H}_{ij} \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i, \quad \text{sendo } \mathbf{H}_{ij} = [\mathbf{h}_{i1j}, \mathbf{h}_{i2j}, \dots, \mathbf{h}_{iKj}], \quad (1)$$

e ρ é a potência de transmissão por símbolo do usuário. A i -ésima BS, neste caso, pode obter uma estimativa para o vetor de símbolos de seus usuários a partir de \mathbf{y}_i empregando um detector linear genérico, multiplicando o vetor do sinal recebido \mathbf{y}_i pela matriz de detecção $\mathbf{W}_i \in \mathbb{C}^{K \times M}$, computada a partir de estratégias MRC ou ZF.

Tal como em (FERNANDES; ASHIKHMIN; MARZETTA, T., 2013), mas assumindo uma potência de transmissão do usuário ρ constante, o sinal de *downlink* recebido pelo k -ésimo usuário da j -ésima célula é

$$r_{kj} = \sqrt{\rho} \left(\mathbf{h}_{jkj}^T \mathbf{f}_{kj} s_{kj} + \sum_{u=1, u \neq k}^K \mathbf{h}_{jkj}^T \mathbf{f}_{uj} s_{uj} + \sum_{i=1, i \neq j}^L \sum_{u=1}^K \mathbf{h}_{ikj}^T \mathbf{f}_{ui} s_{ui} \right) + n_{kj}, \quad (2)$$

onde \mathbf{f}_{kj} representa o vetor de precodificação e s_{kj} representa o sinal de informação destinado ao k -ésimo usuário da j -ésima célula. Similarmente ao UL, \mathbf{f}_{kj} pode ser computado a partir de estratégias MRT ou ZF.

Por conta do reuso de pilotos, o sinal resultante é uma combinação linear das matrizes de canal de todas as células que utilizam as mesmas sequências de pilotos. Define-se o sinal resultante na l -ésima célula em termos dos (m, k) -ésimos componentes de antena e terminal como $[\mathbf{Y}'_{pl}]_{mk}$, composto pelo ganho de canal entre o k -ésimo terminal da l' -ésima célula e a m -ésima antena da l -ésima célula somado a uma componente de ruído.

Para precodificação e decodificação, segundo (MARZETTA, T. et al., 2016), a *home cell* só precisa de uma estimativa da própria matriz de canal, \mathbf{H}_{ll} , e cálculos de desempenho dependem da estimativa de mínimo erro quadrático médio (MMSE, do inglês *minimum mean square error*) do canal de todas as células, calculada por

$$\hat{h}_{lkl'}^m = \frac{\sqrt{\rho_{ul}} \beta_{lkl'}}{1 + \rho_{ul} \sum_{l'' \in \mathcal{P}_l} \beta_{lkl''}} [\mathbf{Y}'_{pl}]_{mk}, \quad \gamma_{lkl'} = \mathbb{E} [|\hat{h}_{lkl'}^m|^2] = \frac{\rho_{ul} (\beta_{lkl'})^2}{1 + \rho_{ul} \sum_{l'' \in \mathcal{P}_l} \beta_{lkl''}}, \quad l' \in \mathcal{P}_l. \quad (3)$$

sendo $\gamma_{lkl'}$ a potência média da estimativa de canal MMSE, $\mathbb{E}[\cdot]$ o operador de expectativa e \mathcal{P}_l o conjunto de células contaminantes, incluindo a *home cell*, no qual o k -ésimo terminal da l' -ésima recebe a mesma sequência de pilotos para cada $l' \in \mathcal{P}_l$ (MARZETTA, T. et al., 2016).

2.1 Estratégias MRC/T e ZF

Na recepção, em UL, o processo que reverte a interferência causada na transmissão de dados é a detecção, e duas são as principais estratégias de detecção: MRC e ZF. A ideia deste processo consiste em multiplicar os dados recebidos na i -ésima BS por uma matriz de detecção \mathbf{W}_i , assim mitigando a interferência e estimando os

dados recebidos. Sendo $\{\cdot\}^H$ o operador hermitiano, para calcular as matrizes \mathbf{W}_i , a i -ésima BS computa

$$\mathbf{W}_i = \begin{cases} \hat{\mathbf{H}}_i^H, & \text{MRC,} \\ \left(\hat{\mathbf{H}}_i^H \hat{\mathbf{H}}_i\right)^{-1} \hat{\mathbf{H}}_i^H, & \text{ZF.} \end{cases} \quad (4)$$

Em (MARZETTA, T. et al., 2016) é explicado que, ao analisar o sinal estimado após detecção e a variância de seus termos de interferência e ruído, pode-se obter a SINR efetiva para o sinal enviado pelo k -ésimo usuário da l -ésima célula, válido tanto para MRC quanto para ZF. Assim, a SINR efetiva em UL do k -ésimo usuário da l -ésima célula empregando ZF é mostrada em (5), e empregando MRC é mostrada em (6).

$$SINR_{lk}^{ZF,UL} = \frac{(M-K)\rho\gamma_{lkl}}{1 + \rho \sum_{l' \in \mathcal{P}_l} \sum_{k'=1}^K (\beta_{lk'l'} - \gamma_{lk'l'}) + \rho \sum_{l' \notin \mathcal{P}_l} \sum_{k'=1}^K \beta_{lk'l'} + (M-K)\rho \sum_{l' \in \mathcal{P}_l \setminus \{l\}} \gamma_{lk'l'}}. \quad (5)$$

$$SINR_{lk}^{MRC,UL} = \frac{M\rho\gamma_{lkl}}{1 + \rho \sum_{l' \in \mathcal{P}_l} \sum_{k'=1}^K \beta_{lk'l'} + \rho \sum_{l' \notin \mathcal{P}_l} \sum_{k'=1}^K \beta_{lk'l'} + M\rho \sum_{l' \in \mathcal{P}_l \setminus \{l\}} \gamma_{lk'l'}}. \quad (6)$$

Em DL, é utilizada a técnica de precodificação para a transmissão de sinais de uma BS l à um usuário k , codificando o sinal de forma que ele seja recebido e estimado corretamente no terminal ao qual foi destinado, mitigando interferências. As matrizes de precodificação $\mathbf{F}_l = \{\mathbf{f}_{1l}, \mathbf{f}_{2l}, \dots, \mathbf{f}_{Kl}\}$ são calculadas por

$$\mathbf{F}_l = \begin{cases} \zeta \hat{\mathbf{H}}_l^* & , \text{MRT,} \\ \zeta \hat{\mathbf{H}}_l^* \left(\hat{\mathbf{H}}_l^T \hat{\mathbf{H}}_l^*\right)^{-1} & , \text{ZF,} \end{cases} \quad \zeta = \begin{cases} \sqrt{\frac{\rho}{\text{trace}(\hat{\mathbf{H}}_l^T \hat{\mathbf{H}}_l^*)}} & , \text{MRT,} \\ \sqrt{\frac{\rho}{\text{trace}((\hat{\mathbf{H}}_l^T \hat{\mathbf{H}}_l^*)^{-1})}} & , \text{ZF.} \end{cases} \quad (7)$$

onde ζ é uma constante de forma a atender à restrição de potência de transmissão.

Segundo (MARZETTA, T. et al., 2016), ao analisar o sinal recebido pelo k -ésimo terminal da l -ésima célula, a matriz de precodificação aplicada e a variância efetiva do ruído na transmissão, obtém-se a SINR efetiva de DL deste terminal, calculada em (8) para ZF, e em (9) para MRT.

$$SINR_{lk}^{ZF,DL} = \frac{(M-K)\rho\gamma_{lkl}}{1 + \rho \sum_{l' \in \mathcal{P}_l} (\beta_{l'kl} - \gamma_{l'kl}) \left(\sum_{k'=1}^K\right) + \rho \sum_{l' \notin \mathcal{P}_l} \beta_{l'kl} \left(\sum_{k'=1}^K\right) + (M-K)\rho \sum_{l' \in \mathcal{P}_l \setminus \{l\}} \gamma_{l'kl}}. \quad (8)$$

$$SINR_{lk}^{MRT,DL} = \frac{M\rho\gamma_{lkl}}{1 + \rho \sum_{l' \in \mathcal{P}_l} \beta_{l'kl} \left(\sum_{k'=1}^K\right) + \rho \sum_{l' \notin \mathcal{P}_l} \beta_{l'kl} \left(\sum_{k'=1}^K\right) + M\rho \sum_{l' \in \mathcal{P}_l \setminus \{l\}} \gamma_{l'kl}}. \quad (9)$$

A capacidade líquida por terminal é calculada, segundo (MARZETTA, T., 2010), levando em conta a largura de banda total, o fator de reuso de frequência, o *overhead* de pilotos e o *overhead* do prefixo cíclico, e é calculado da seguinte forma para o k -ésimo terminal da l -ésima célula

$$C_{lk} = \left(\frac{B}{\alpha}\right) \left(\frac{S - \tau_p}{S}\right) \left(\frac{T_u}{T_s}\right) \log_2(1 + SINR_{lk}), \quad (10)$$

sendo B a largura de banda total em Hz, α o fator RF, S o tamanho total do bloco de coerência, τ_p o tamanho das sequências pilotos, T_u a duração útil do símbolo e T_s o intervalo de símbolo OFDM, com os tempos medidos em segundos. Ao usarmos RF, tomamos $\tau_p = K$ e $\alpha = 1, 3, 7$ neste trabalho. Por outro lado, ao usar RP, tomamos $\alpha = 1$ e $\tau_p = \iota K$, sendo ι o fator RP.

3 RESULTADOS

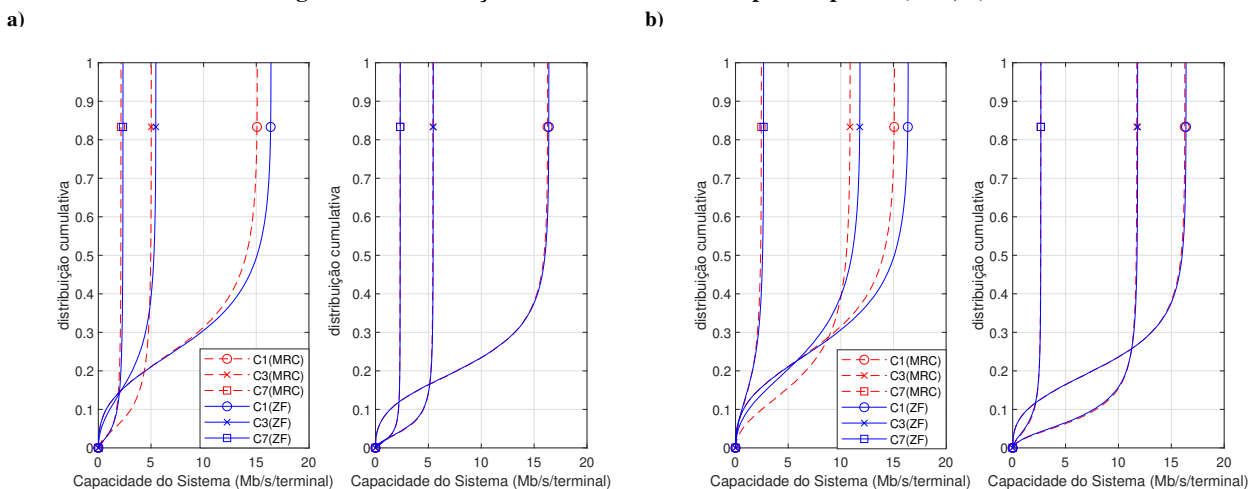
Assim como em (MARZETTA, T., 2010), assume-se os parâmetros OFDM: um intervalo de símbolo T_s igual a $71,4\mu s$, uma duração útil de símbolo T_u igual a $66,7\mu s$, e um bloco de coerência S de tamanho igual a 98, com $N_{smooth} = 14$ subportadoras e $T = 7$ períodos de símbolo. O sistema possui $L = 7$ células contaminantes, de raio $R_c = 1600$ m e com $K = 12$ usuários por célula, e a BS de cada célula é equipada com $M = 100$ antenas.

A largura de banda total utilizada é $B = 20$ MHz, com fator de reuso de frequência α e de reuso de pilotos ι variando entre 1, 3 e 7. O ambiente de propagação é densamente urbanizado, com expoente de decaimento γ igual a 3,8 e desvio padrão do sombreamento σ_{sd} igual a 8 dB. É assumida na simulação, também, uma potência de transmissão uniforme e igual em UL e DL, de valor igual à potência necessária para um usuário localizado na borda da *home cell* ter uma SNR na recepção igual a 0dB, *i.e.*, $\rho = R_c^\gamma$.

Como citado em (YANG; MARZETTA, T. L., 2015), um fator de reuso igual a 7 dita que não há reuso nos dois primeiros anéis de células em torno da *home cell*, um fator de reuso igual 3 não permite reuso no primeiro anel, e um fator de reuso igual a 1 não possui restrições. Assim, as células que reusam os mesmos recursos são células contaminantes, e as células que não reusam os mesmos recursos são células não contaminantes.

A Fig. 1 mostra a distribuição cumulativa dos desempenhos para UL (à direita) e DL (à esquerda) do sistema empregando RF e RP, retratando cada fator de reuso em curvas diferentes.

Figura 1 – Distribuição Cumulativa dos Desempenhos para: a) RF; b) RP



Fonte: Autoria própria (2021).

O Quadro 1 indica os valores médios e de percentil 95 (p95) da capacidade simulada para o sistema em questão empregando MRC e ZF. Inicialmente são apresentados os valores obtidos empregando RF, seguido dos valores obtidos com RP. É também destacado os melhores valores de capacidade média e p95, para DL e UL. Pode-se observar que os melhores desempenhos garantidos com 95% de probabilidade são alcançados, tanto para UL como para DL, pela combinação RP e MRC/T com fator de reuso igual a 3. Para UL, é obtida uma capacidade p95 de 4,3517 Mb/s/terminal, e para DL uma capacidade p95 de 0,8442 Mb/s/terminal. Embora não seja também o melhor esquema em termos de capacidade média, a combinação MRC/T com RP e fator de reuso 3 alcança desempenhos médios próximos dos máximos: 10,7361 Mb/s/terminal contra 12,9580 Mb/s/terminal de ZF com $\alpha = 1$; e 8,9141 Mb/s/terminal contra 11,8923 de ZF com $\iota = 1$. Diante disto, e pelo fato do desempenho p95 ser uma importante métrica de qualidade de serviço uma vez que avalia a situação de usuários em situações mais críticas, pode-se apontar a combinação MRC/T com RP e fator de reuso 3 como esquema mais indicado



para implementação em sistemas MIMO massivo multicelulares em ambiente urbano densamente urbanizado.

Quadro 1 – Capacidades do Sistema (Mb/s/terminal)

Fator de Reuso	MRC				ZF			
	UL Média	UL p95	DL Média	DL p95	UL Média	UL p95	DL Média	DL p95
$\alpha = 1$	12,8936	0,2965	11,0599	0,1551	12,9580	0,2947	11,8667	0,1573
$\alpha = 3$	5,1220	3,2963	4,5343	1,7557	5,1466	3,2173	4,4156	0,3231
$\alpha = 7$	2,2455	1,9072	2,0165	1,3126	2,2563	1,8763	2,1720	1,3073
$\iota = 1$	12,8566	0,2722	11,0834	0,1525	12,9206	0,2704	11,8923	0,1538
$\iota = 3$	10,7361	4,3517	8,9141	0,8442	10,7671	4,1017	8,9835	0,3576
$\iota = 7$	2,4613	1,2623	2,0357	0,2344	2,4677	1,1849	2,1747	0,2102

Fonte: Autoria própria (2021).

Conclusão: Enfim, pode-se concluir que a combinação entre RP e MRC com um fator de reuso igual a 3 apresenta, no geral, um desempenho melhor tanto em UL quanto em DL em ambientes densamente urbanizados. É visível também, através dos resultados obtidos, que tanto para RP quanto para RF a capacidade média do sistema tende a diminuir com o aumento do fator de reuso, e a capacidade p95 tende a aumentar, apresentando seu pico com um fator de reuso igual a 3. Por fim, pode-se ver que, embora ZF com fator de reuso igual a 1 para RF (UL) e RP (DL) apresente um melhor desempenho médio, a vantagem de desempenho p95 obtida com MRC/T e RP com fator de reuso 3 torna este último uma escolha mais vantajosa ao beneficiar mais usuários em regiões de desempenho mais críticas.

Agradecimentos: Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento através da bolsa PIBIC, à UTFPR, e ao Prof. Dr. José Carlos Marinello Filho, por sua orientação, conhecimento e suporte.

REFERÊNCIAS

- FERNANDES, F.; ASHIKHMIN, A.; MARZETTA, T.L. Inter-Cell Interference in Noncooperative TDD Large Scale Antenna Systems. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 31, n. 2, p. 192–201, fev. 2013. ISSN 0733-8716. DOI: [10.1109/JSAC.2013.130208](https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.130208).
- GOLDSMITH, Andrea. **Wireless Communications**. USA: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521837162.
- MARZETTA, T.L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 9, n. 11, p. 3590–3600, 2010. ISSN 1536-1276. DOI: [10.1109/TWC.2010.092810.091092](https://doi.org/10.1109/TWC.2010.092810.091092).
- MARZETTA, T.L. et al. **Fundamentals of Massive MIMO**. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2016. ISBN 9781316799895.
- MI, De et al. Massive MIMO Performance With Imperfect Channel Reciprocity and Channel Estimation Error. **IEEE Transactions on Communications**, v. 65, n. 9, p. 3734–3749, 2017. DOI: [10.1109/TCOMM.2017.2676088](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2676088).
- YANG, Hong; MARZETTA, Thomas L. Performance of pilot reuse in multi-cell Massive MIMO. In: 2015 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). [S.l.: s.n.], 2015. P. 157–161. DOI: [10.1109/BlackSeaCom.2015.7185106](https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom.2015.7185106).