

# Relatório Técnico: Análise de Simulação de Sistema ISAC Cell-Free Massive MIMO

Gabriel Werneck de Oliveira Linhares

12 de dezembro de 2025

## 1 Modelo de Sistema e Geometria

O sistema simula um ambiente tridimensional (3D) onde Múltiplos Pontos de Acesso (APs - *Access Points*) servem simultaneamente Usuários (UEs - *User Equipments*) e realizam sensoriamento de Alvos (*Targets*).

### 1.1 Configuração do Cenário

- **APs** ( $M = 16$ ): Distribuídos em uma grade quadrada  $4 \times 4$  numa área de  $100 \times 100 \text{ m}^2$ , com altura  $H_{AP} = 11.5 \text{ m}$ .
- **UEs** ( $K = 3$ ): Distribuídos aleatoriamente (processo de Monte Carlo), com altura  $H_{UE} = 1.5 \text{ m}$ .
- **Alvo** ( $L = 1$ ): Posição aleatória, com altura  $H_{TGT} = 0.0 \text{ m}$ .
- **Antenas**:  $N_{rx} = 8$  por AP e  $N_{tx} = 4$  por UE.

### 1.2 Clustering de Sensoriamento

O código implementa uma arquitetura centrada no alvo/usuário. Um subconjunto de APs ( $M_{SENSING} = 4$ ), correspondendo aos mais próximos do alvo, é selecionado para realizar o sensoriamento. O restante dos APs ( $M - M_{SENSING}$ ) foca nas tarefas de comunicação.

## 2 Modelagem do Canal (Física da Propagação)

O código modela dois tipos distintos de canais: o canal de comunicação direto e o canal de sensoriamento (eco do radar).

### 2.1 Perda de Percurso e Sombreamento (Large-Scale Fading)

*Função associada:* `get_path_loss_shadowing`

A perda de percurso (*Path Loss*) em dB segue o modelo Log-Distância com sombreamento Log-Normal:

$$PL(d)_{dB} = \alpha + 10\gamma \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f_c) + X_\sigma \quad (1)$$

Onde:

- $\alpha = 28.0$ : Perda de referência.
- $\gamma = 2.2$ : Expoente de perda de percurso.
- $X_\sigma \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{sh}^2)$ : Variável aleatória de sombreamento com  $\sigma_{sh} = 12$  dB.
- $\beta = 10^{-PL/10}$ : Ganho de canal em escala linear.

### 2.2 Canal de Comunicação (Small-Scale Fading - Rician)

*Função associada:* `create_rician_channel`

O canal entre o UE  $k$  e o AP  $m$  é modelado como Rician, ideal para cenários com forte componente de visada direta (LoS - *Line of Sight*):

$$\mathbf{H}_{k,m} = \sqrt{\beta_{k,m}} \left( \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}} \mathbf{H}_{LoS} + \sqrt{\frac{1}{\kappa + 1}} \mathbf{H}_{NLoS} \right) \quad (2)$$

- **Componente LoS ( $\mathbf{H}_{LoS}$ ):** Calculada pelo produto externo dos vetores de resposta do array (*Steering Vectors*) baseados nos ângulos físicos de saída (AoD) e chegada (AoA).

$$\mathbf{H}_{LoS} = \mathbf{a}_{rx}(\theta_{AoA}, \phi_{AoA}) \mathbf{a}_{tx}^H(\theta_{AoD}, \phi_{AoD}) \quad (3)$$

- **Componente NLoS ( $\mathbf{H}_{NLoS}$ ):** Rayleigh puro, modelado como  $\mathcal{CN}(0, 1)$ .
- **Fator K ( $\kappa$ ):** Definido como 3.0 dB, determinando a predominância do componente LoS.

### 2.3 Canal de Sensoriamento (Modelo Bi-estático)

O sensoriamento é modelado como um canal de "eco" que percorre o trajeto: Transmissor (UE)  $\rightarrow$  Alvo  $\rightarrow$  Receptor (AP).

$$\mathbf{H}_{sens} = \alpha_{RCS} \sqrt{\beta_{UE \rightarrow Alvo} \cdot \beta_{Alvo \rightarrow AP}} \cdot G_{RCS} \cdot (\mathbf{a}_{rx} \mathbf{a}_{tx}^H) \quad (4)$$

- **RCS (*Radar Cross Section*):** Modelado pela variável complexa  $\alpha_l$  (modelo Swerling I), representando a flutuação lenta da seção reta do radar.

- **Perda de Percurso Dupla:** O produto dos ganhos de canal  $\beta_1 \cdot \beta_2$ .
- **RCS Gain:** Um ganho linear de 92.0 dB é aplicado para compensar a perda severa de propagação dupla e viabilizar o sensoriamento na simulação.

### 3 Estratégias de Beamforming

O código compara duas estratégias de precodificação (formação de feixe):

#### 3.1 SVD (Singular Value Decomposition)

*Função associada:* `get_svd_beamforming`

- Supõe conhecimento perfeito do estado do canal (CSI).
- Realiza a decomposição  $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H$ .
- O vetor de beamforming  $\mathbf{w}$  é a primeira coluna de  $\mathbf{V}$  (maior valor singular).
- **Matematicamente:** Maximiza o ganho do array na direção do auto-espaço dominante do canal efetivo.

#### 3.2 Angular (Line-of-Sight) - Baseado em Posição

*Função associada:* `get_angular_beamforming`

- Baseia-se apenas na geometria (posições conhecidas de UE e AP).
- Aponta o feixe fisicamente para a direção do receptor ou alvo:

$$\mathbf{w} = \mathbf{a}_{tx}(\theta_{geom}, \phi_{geom}) \quad (5)$$

- **Análise:** É subótimo em canais com muito multipath (NLoS), mas robusto se o CSI instantâneo for desconhecido.

## 4 Cálculo de SINR e Alocação de Potência

A parte crítica da simulação ISAC é o compromisso (*trade-off*) de potência entre as funcionalidades.

### 4.1 Divisão de Potência (Power Splitting)

A potência total  $P_{total}$  é dividida entre Comunicação ( $P_c$ ) e Sensoriamento ( $P_s$ ):

$$P_c = \eta P_{total}, \quad P_s = (1 - \eta) P_{total} \quad (6)$$

Onde o parâmetro  $\eta$  assume valores no conjunto  $\{0.9, 0.5, 0.1\}$ .

### 4.2 Equação de SINR

*Função associada:* `calculate_sinr`

A relação Sinal-Ruído-Interferência (SINR) para o usuário  $k$  é dada por:

$$\text{SINR}_k = \frac{P_{\text{signal}} |\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k} P_{\text{interf}} |\mathbf{H}_k \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_n^2} \quad (7)$$

- **Interferência Cruzada:** O modelo considera que a potência dedicada ao sensoriamento age como interferência para a comunicação (escala com  $p_c$ ) e vice-versa (escala com  $1 - p_c$ ).
- **Ruído ( $\sigma_n^2$ ):** Ruído térmico calculado para uma largura de banda de 20 MHz e figura de ruído de 5 dB.

## 5 Análise dos Resultados

Os resultados são apresentados via CDF Empírica (eCDF) da SINR. A análise dos cenários revela:

**Cenário (a) 90% Com. / 10% Sens.**

- **Comunicação (Azul):** Desempenho excelente e consistente (8-10 dB).
- **Sensoriamento (Verde):** Desempenho pobre ( $\approx -15$  dB) devido à baixa potência.
- **Beamforming:** O SVD supera ligeiramente o Angular, extraindo mais energia do canal.

**Cenário (b) 50% Com. / 50% Sens.**

- **Ponto de Equilíbrio:** Curvas convergem para o centro ( $\approx 0$  dB).
- A comunicação sofre degradação drástica comparada ao cenário (a) devido à redução de potência útil e aumento da interferência do sinal de sensoriamento.

**Cenário (c) 10% Com. / 90% Sens.**

- **Inversão:** O sensoriamento atinge alto desempenho ( $\approx 6$  dB), enquanto a comunicação cai para níveis inutilizáveis ( $< -10$  dB).
- **Variância:** O sensoriamento apresenta maior variância (curva menos íngreme) devido à natureza estocástica dupla do canal de radar (RCS + sombreamento duplo).