



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

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

Discente: Aureliano Magalhães de Sousa Neto

Docente: Prof. Dr. Higo Thaian Pereira da Silva

OBJETIVO

Simular, por meio do MATLAB, o desempenho de redes Cell-Free 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.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

2. METODOLOGIA

3. RESULTADOS

4. CONCLUSÃO

5. REFERÊNCIAS

1. INTRODUÇÃO

Evolução dos sistemas celulares tradicionais e o conceito de Cell-free

- Grandes quantidades de APs distribuídos para servir todos os usuários;
- Ausência de células e de bordas (*handover*);
- Desempenho mais homogêneo entre usuários;
- Na prática, pode ser compreendido como uma evolução natural do conceito de Coordinated Multi-Point (CoMP).



“O CoMP busca melhorar o desempenho por meio da coordenação entre múltiplos pontos de transmissão”.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada baseou-se no roteiro disponibilizado pelo docente e nas notas de aula da disciplina Comunicações Móveis (PPGEE3622), com o intuito de realizar as seguintes simulações:

- Avaliação do desempenho de uma em downlink;
- Modelagem do canal considerando desvanecimento de larga escala e desvanecimento de pequena escala Rayleigh;
- Estimação do canal a partir de sequências piloto dentro de cada bloco de coerência;
- Cálculo da SINR e da taxa alcançável para cenários PCSI e ECSI;
- Análise do impacto da variação do número de pontos de acesso mantendo o número de usuários fixo;
- Análise do impacto da variação do número de usuários mantendo o número de pontos de acesso fixo; e
- Avaliação estatística dos resultados por meio de curvas ECDF da SINR e da taxa de transmissão.

2. METODOLOGIA

```
clear; clc;

Nbc      = 100;           % número de blocos de coerência por rede
Ncf      = 300;           % número total de redes avaliadas
fc       = 3 * 10^9;      % freq da portadora [Hz]
Bw       = 20 * 10^6;     % largura de banda [Hz]
Fn_dB    = 9;             % figura de ruído [dB]
Fn_linear = 10^(Fn_dB/10); % figura de ruído [linear]
h_ap     = 15;            % altura dos APs [m]
h_ue     = 1.65;          % altura dos UEs [m]
T0       = 296.15;       % temperatura local [K]
L_x      = 1000;          % dimensão X da área [m]
L_y      = 1000;          % dimensão Y da área [m]
Pp       = 0.2;           % potência das sequências piloto
Pdl      = 0.2;           % potência de transmissão em downlink
tau_p    = 50;            % comprimento das sequências piloto
k0       = 1.381 * 10^-23; % constante de Boltzmann [J/K]
M_values = [100, 150, 200]; % valores de APs possíveis
K_values = [10, 20, 30];   % valores de UEs possíveis

pl_fs    = 32.44 + 20*log10(fc/10^6) + 20*log10(0.001); % atenuação no espaço livre para 1m
sigma_2_w = k0 * T0 * Bw * Fn_linear;                  % potência de ruído
```

Dados fornecidos no roteiro

$PL_{fs} = 32.44 + 20 \log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 20 \log_{10}(d_{\text{km}})$

```
% Estruturas para armazenar resultados
sinr_estatistica_M = cell(length(M_values), 1); % SINR com conhecimento estatístico para diferentes M. K=20 fixo.
sinr_instantanea_M = cell(length(M_values), 1); % SINR com conhecimento perfeito para diferentes M.
taxa_estatistica_M = cell(length(M_values), 1); % Taxas com conhecimento estatístico para diferentes M (em bits/s).
taxa_instantanea_M = cell(length(M_values), 1); % Taxas com conhecimento perfeito para diferentes M (em bits/s).

sinr_estatistica_K = cell(length(K_values), 1); % SINR com conhecimento estatístico para diferentes K. M=100 fixo.
sinr_instantanea_K = cell(length(K_values), 1); % SINR com conhecimento perfeito para diferentes K.
taxa_estatistica_K = cell(length(K_values), 1); % Taxas com conhecimento estatístico para diferentes K.
taxa_instantanea_K = cell(length(K_values), 1); % Taxas com conhecimento perfeito para diferentes K.
```

Figura 1 – Implementação dos parâmetros fornecidos no roteiro do projeto (o autor).

2. METODOLOGIA

%% SIMULAÇÃO 1: Variação de APs (M) sendo mantida a mesma quantidade de UEs (k= 20)

```
for m_idx = 1:length(M_values)
    m = M_values(m_idx);
    k = 20; % Número de usuários

    sinr_estatistica_completa = zeros(Ncf, k);
    sinr_instantanea_media    = zeros(Ncf, k);
    taxa_estatistica_completa = zeros(Ncf, k);
    taxa_instantanea_completa = zeros(Ncf, k);

    pos_ap      = zeros(3, m); % geração da matriz para posições dos APs
    pos_ue      = zeros(3, k); % geração da matriz para posições dos UEs
    dist_ap_ue  = zeros(m, k); % geração da matriz para distâncias entre APs e UEs
    omega_dB    = zeros(m, k); % geração da matriz para desvanecimento em larga escala
    sinal_de_projecao = zeros(m, k);
    coeficientes_de_canal_g = zeros(m, k);
    canal_estimado_gmk      = zeros(m, k);
    v_mk = zeros(m, k); % geração da matriz para ruído equivalente
    x_sf = zeros(m, k); % geração da matriz para V.A de média zero e desvio padrão 8 dB
    h_i  = zeros(m, k); % geração da matriz para parte real do desvanecimento em pequena escala
    h_q  = zeros(m, k); % geração da matriz para parte complexa do desvanecimento em pequena escala
    h    = zeros(m, k); % geração da matriz para desvanecimento em pequena escala
```

%% SIMULAÇÃO 2: Variação de K (UEs) com M=100 fixo

```
for k_idx = 1:length(K_values)
    m = 100;
    k = K_values(k_idx);

    sinr_estatistica_completa = zeros(Ncf, k);
    sinr_instantanea_media    = zeros(Ncf, k);
    taxa_estatistica_completa = zeros(Ncf, k);
    taxa_instantanea_completa = zeros(Ncf, k);

    % Arrays temporários
    pos_ap = zeros(3, m);
    pos_ue = zeros(3, k);
    dist_ap_ue = zeros(m, k);
    omega_dB = zeros(m, k);
    sinal_de_projecao = zeros(m, k);
    v_mk = zeros(m, k);
    x_sf = zeros(m, k);
    h_i = zeros(m, k);
    h_q = zeros(m, k);
    h = zeros(m, k);
    coeficientes_de_canal_g = zeros(m, k);
    canal_estimado_gmk = zeros(m, k);
```

Figura 2 – Inicialização de algumas variáveis para armazenar parâmetros de projeto (o autor).

2. METODOLOGIA

Fluxograma em alto nível da simulação

Geração dos parâmetros iniciais

Loop externo (rede)

Loop interno (bloco de coerência)

Fim Loop interno (bloco de coerência)

Fim Loop externo (rede)

Apresentação dos resultados

- Desvanecimento de pequena escala
- Recepção dos sinais piloto
- Estimação do canal
- Transmissão em downlink
- Cálculo da SINR instantânea
- Cálculo da taxa alcançável instantânea

- Captura a variabilidade espacial dos APs
- Captura a variabilidade espacial dos UEs
- Distância entre APs e UEs
- Desvanecimento de larga escala
- Cálculo da SINR média
- Cálculo da taxa alcançável média

2. METODOLOGIA

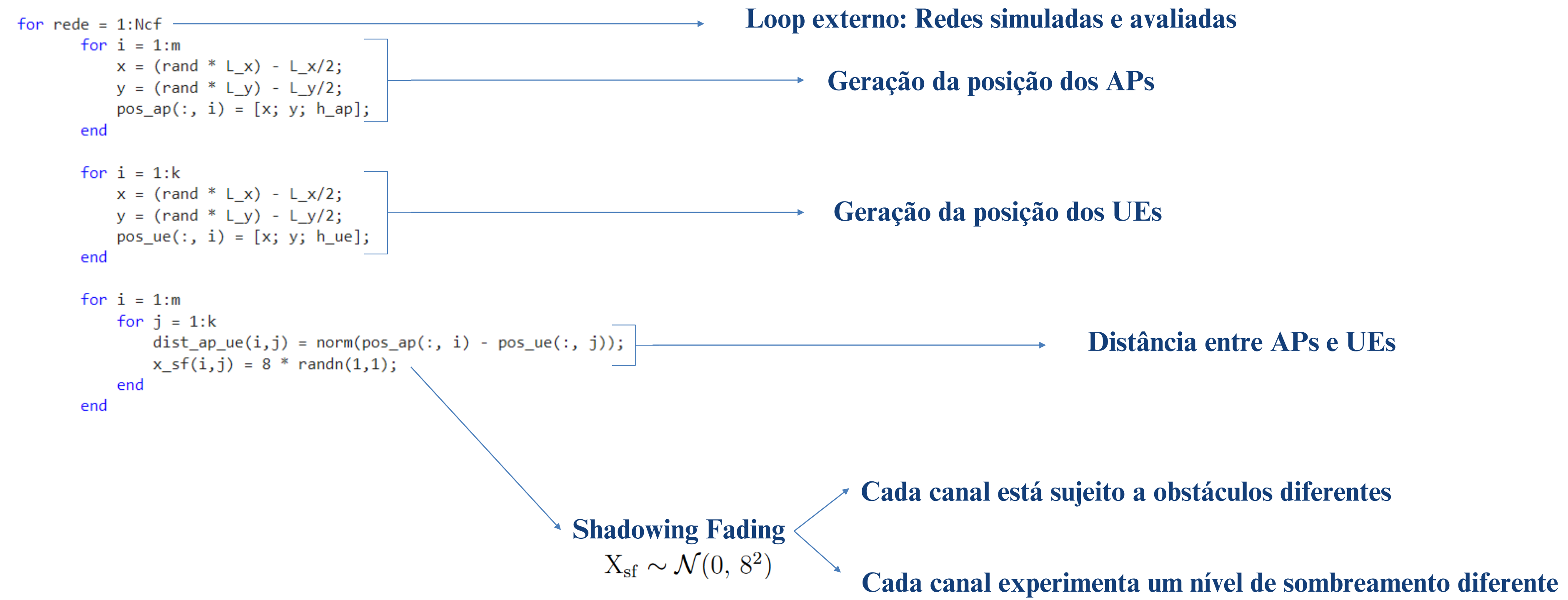


Figura 3 – Geração aleatória das posições dos APs, UEs e cálculo de shadowing fading (o autor).

2. METODOLOGIA

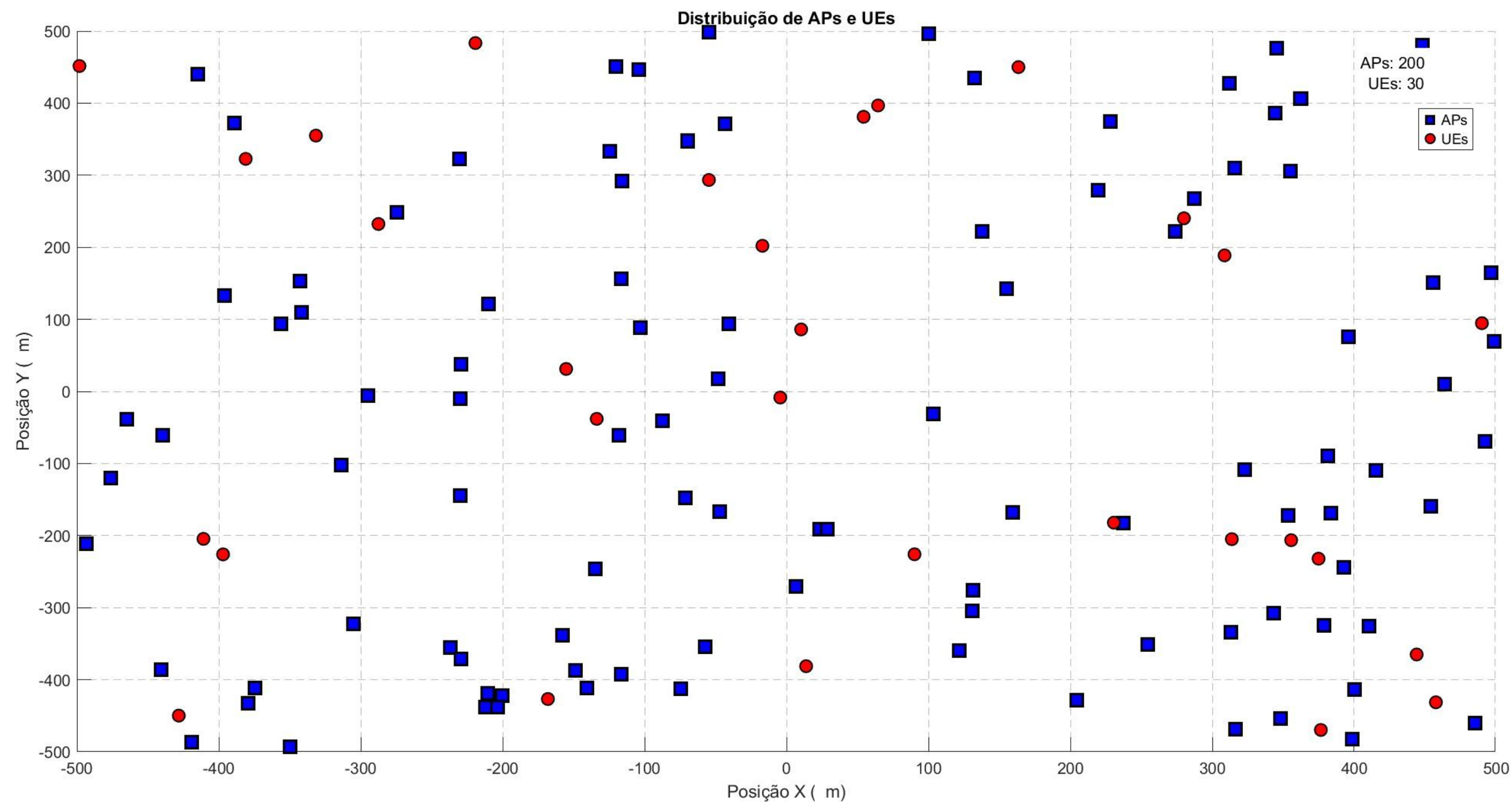


Figura 4 – Distribuição de pontos de acesso e de usuários ao longo de uma área de 1.000 km² (o autor).

2. METODOLOGIA

```
for i = 1:m
    for j = 1:k
        omega_dB(i,j) = pl_fs + 28 * log10(dist_ap_ue(i,j)) + x_sf(i,j);
    end
end
```

Ausência de visada direta (desvanecimento Rayleigh)

Desvanecimento de Larga Escala

`omega_linear = 10.^(-omega_dB/10); % conversão do desvanecimento em larga escala para escala linear`

```
for bloco = 1:Nbc % Loop interno: blocos de coerência
    for i = 1:m
        for j = 1:k
            h_i(i,j) = randn / sqrt(2);
            h_q(i,j) = randn / sqrt(2);
            h(i,j) = h_i(i,j) + 1j * h_q(i,j);
            coeficientes_de_canal_g(i,j) = sqrt(omega_linear(i,j)) .* h(i,j); % coeficientes de canal em todos os enlaces
        end
    end
end
```

Desvanecimento de Pequena Escala

$$g_{m,k} = \sqrt{\Omega_{m,k}} h_{m,k} \longrightarrow h_{m,k} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$$

Figura 5 – Algoritmo para geração do desvanecimento de larga escala, desvanecimento de pequena escala e coeficientes de canal (o autor).

2. METODOLOGIA

Ruído equivalente: Ruído térmico
presente nos receptores dos APs

$$v_{mk} = \sqrt{\sigma_w^2/2} * (\text{randn}(m, k) + 1j * \text{randn}(m, k)); \longrightarrow v_{m,k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_w^2)$$

```
for i = 1:m
    for j = 1:k
        sinal_de_projecao(i,j) = sqrt(tau_p * Pp) * coeficientes_de_canal_g(i,j) + v_mk(i,j);
    end
end
```

$$y_{mk} = \sqrt{\tau_p P_p} g_{mk} + v_{mk}$$

Sinal piloto recebido

$$c_{mk} = \frac{\sqrt{\tau_p P_p} \Omega_{mk}}{\tau_p P_p \Omega_{mk} + \sigma_w^2}$$

Ganho do estimador MMSE:
usado para estimar o canal a
partir do sinal piloto recebido

```
c_mk = (sqrt(tau_p * Pp) .* omega_linear) ./ (tau_p * Pp .* omega_linear + sigma_2_w);
canal_estimado_gmk = c_mk .* sinal_de_projecao;
gamma_mk = sqrt(Pp * tau_p) .* omega_linear .* c_mk;
eta_m = 1 ./ sum(gamma_mk, 2);
eta_mk = repmat(eta_m, 1, k);
```

$$\hat{g}_{mk} = c_{mk} y_{mk}$$

representa a variância da estimativa do canal entre o AP e o usuário.

coeficiente de alocação de potência de cada AP para cada usuário.

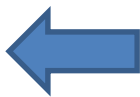
2. METODOLOGIA

```
% Calcular SINR para conhecimento instantâneo
for user = 1:k
    sinal_desejado = 0;
    for ap = 1:m
        sinal_desejado = sinal_desejado + sqrt(eta_mk(ap, user)) * coeficientes_de_canal_g(ap, user) * ...
        conj(canal_estimado_gmk(ap, user));
    end
    sinal_desejado = Pdl * abs(sinal_desejado)^2;

    interferencia = 0;
    for outro_user = 1:k
        if outro_user ~= user
            soma_interf = 0;
            for ap = 1:m
                soma_interf = soma_interf + sqrt(eta_mk(ap, outro_user)) * ...
                coeficientes_de_canal_g(ap, user) * conj(canal_estimado_gmk(ap, outro_user));
            end
            interferencia = interferencia + Pdl * abs(soma_interf)^2;
        end
    end
end
```

SINR instantânea (PCSI):

- Utiliza os coeficientes instantâneos do canal coeficientes_de_canal_g e o canal estimado canal_estimado_gmk
- Cálculo feito para cada bloco de coerência. Ao final, é obtida a média ao longo dos blocos de coerência



SINR estatística (ECSI)

- Utiliza apenas informações estatísticas do canal (gamma_mk e omega_linear)
- Cômputo feito fora do laço dos blocos de coerência, mas dentro do loop externo



```
% Calcular SINR para conhecimento estatístico
for user = 1:k
    numerador = 0;
    for ap = 1:m
        numerador = numerador + sqrt(eta_mk(ap, user)) * gamma_mk(ap, user);
    end
    numerador = Pdl * numerador^2;

    denominador = 0;
    for outro_user = 1:k
        for ap = 1:m
            denominador = denominador + eta_mk(ap, outro_user) * gamma_mk(ap, outro_user) * omega_linear(ap, user);
        end
    end
    denominador = Pdl * denominador + sigma_2_w;

    sinr_estatistica_completa(rede, user) = numerador / denominador;
end

% Calcular médias
sinr_instantanea_media(rede, :) = mean(sinr_instantanea_rede, 1);
```

Figura 7 – Cálculo da SINR instantânea e média (o autor).

2. METODOLOGIA

```
% Calcular taxas
for user = 1:k
    taxa_estatistica_completa(rede, user) = log2(1 + sinr_estatistica_completa(rede, user));

    taxas_instantaneas = zeros(Nbc, 1);
    for bloco = 1:Nbc
        taxas_instantaneas(bloco) = log2(1 + sinr_instantanea_rede(bloco, user));
    end
    taxa_instantanea_completa(rede, user) = mean(taxas_instantaneas);
```

```
taxa_estatistica_M{m_idx} = taxa_estatistica_completa(:) * Bw;
taxa_instantanea_M{m_idx} = taxa_instantanea_completa(:) * Bw;
```

A taxa de transmissão é inicialmente calculada na forma de eficiência espectral (bit/s/Hz), sendo posteriormente convertida para taxa absoluta (bit/s) por meio da multiplicação pela largura de banda do sistema.

O desempenho analisado refere-se à taxa alcançável, e **não à capacidade teórica do canal**, uma vez que o sistema está sujeito a diversas restrições práticas, como estimação imperfeita de canal, interferência multiusuário e potência limitada. O conceito de capacidade do canal está associado a condições ideais estabelecidas por Shannon, as quais não são plenamente atendidas em sistemas reais.

3. RESULTADOS

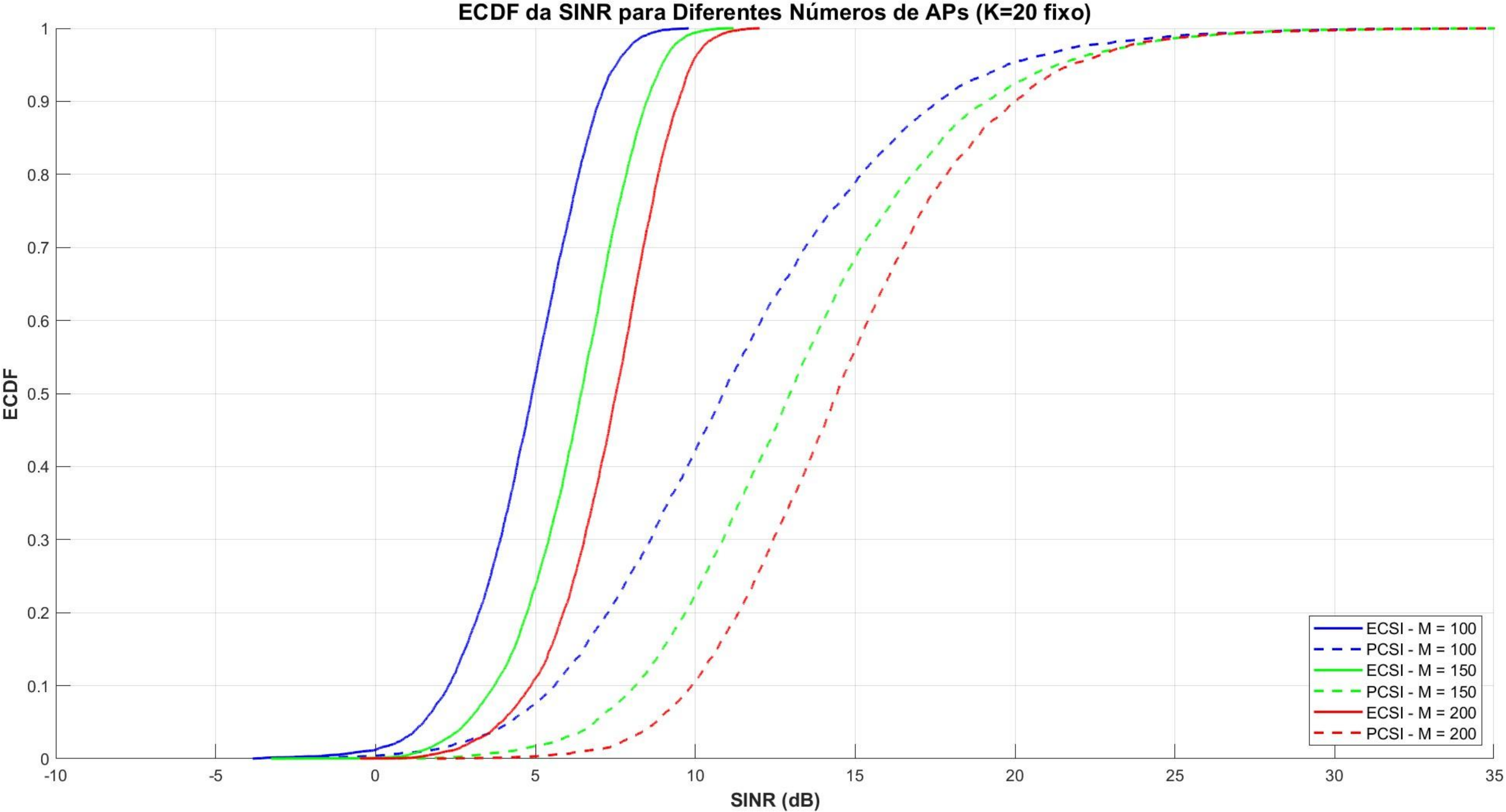


Figura 9 – ECDF da SINR para diferentes números de APs (o autor).

3. RESULTADOS

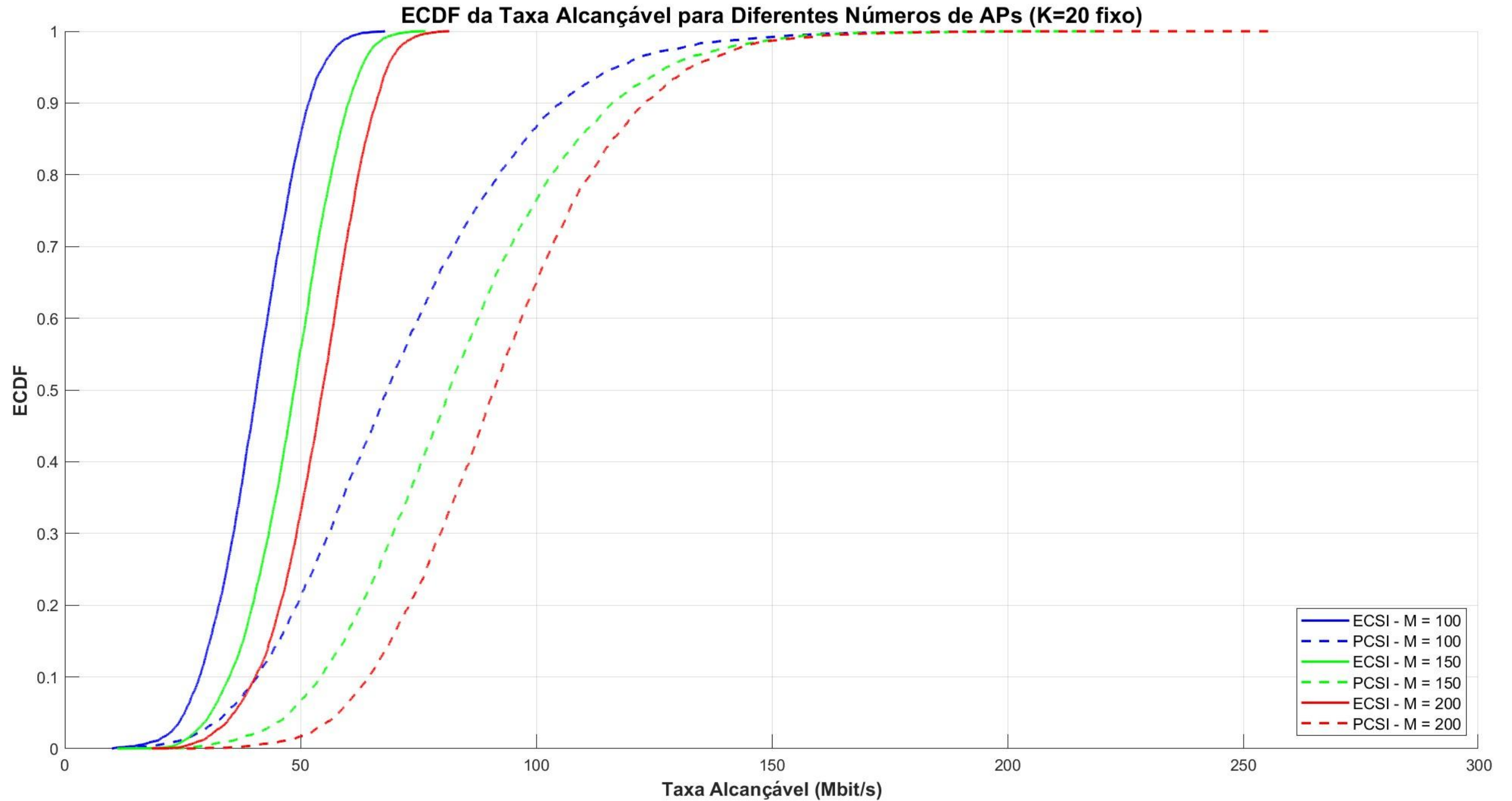


Figura 10 – ECDF da taxa alcançável para diferentes números de APs (o autor).

3. RESULTADOS

- Situação 1 ($k = 20$ fixo)
 - Curvas PCSI apresentaram melhor desempenho em comparação com as curvas ECSI.
 - A quantidade maior de APs proporcionou melhor desempenho do sistema (PCSI $M = 200$).
 - Maiores taxas (Mbits/s) alcançadas (~ 260 Mbits/s)
 - Maiores relações SINR alcançadas (~ 35 dB)

3. RESULTADOS

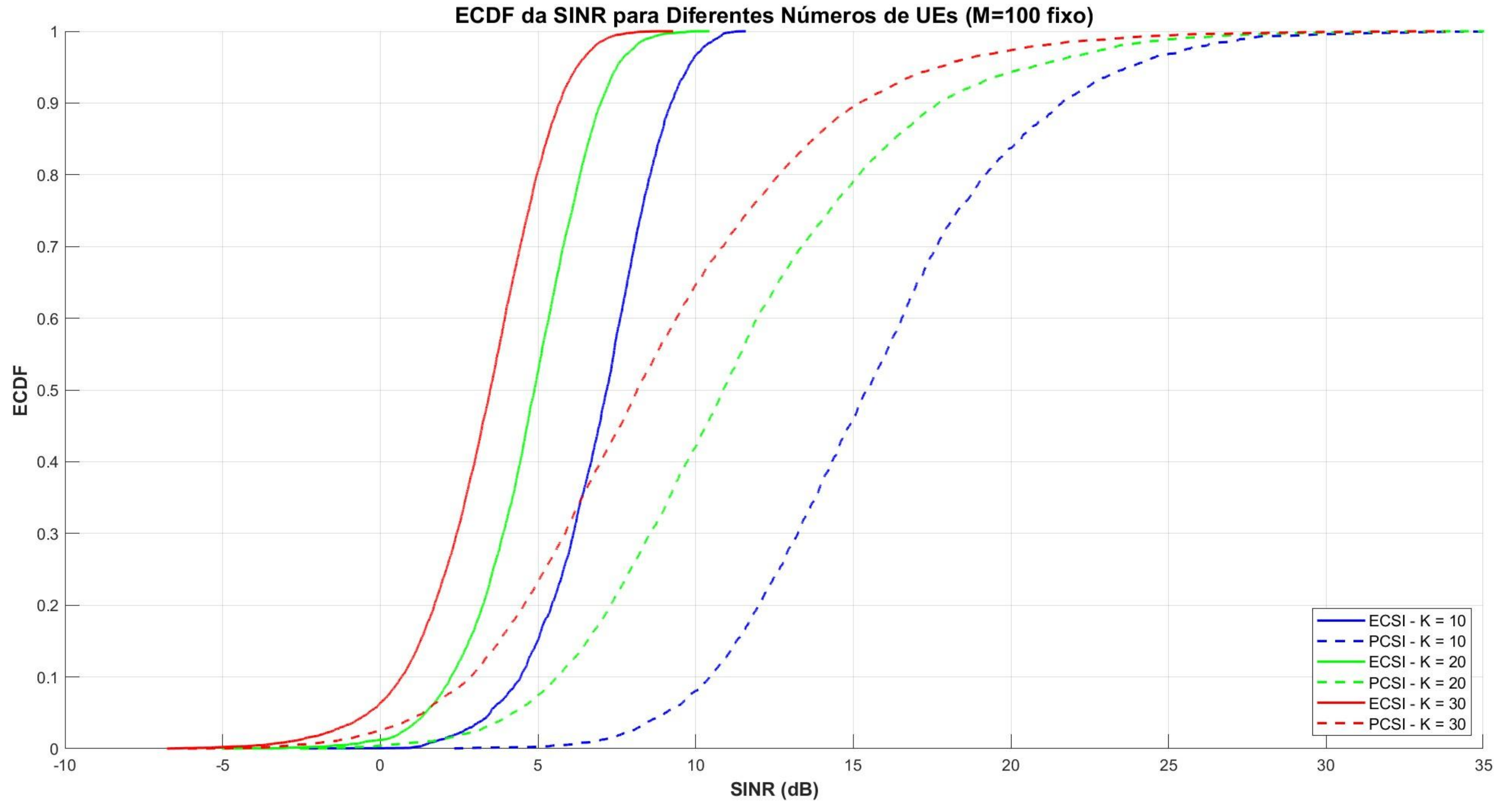


Figura 11 – ECDF da SINR para diferentes números de UEs (o autor).

3. RESULTADOS

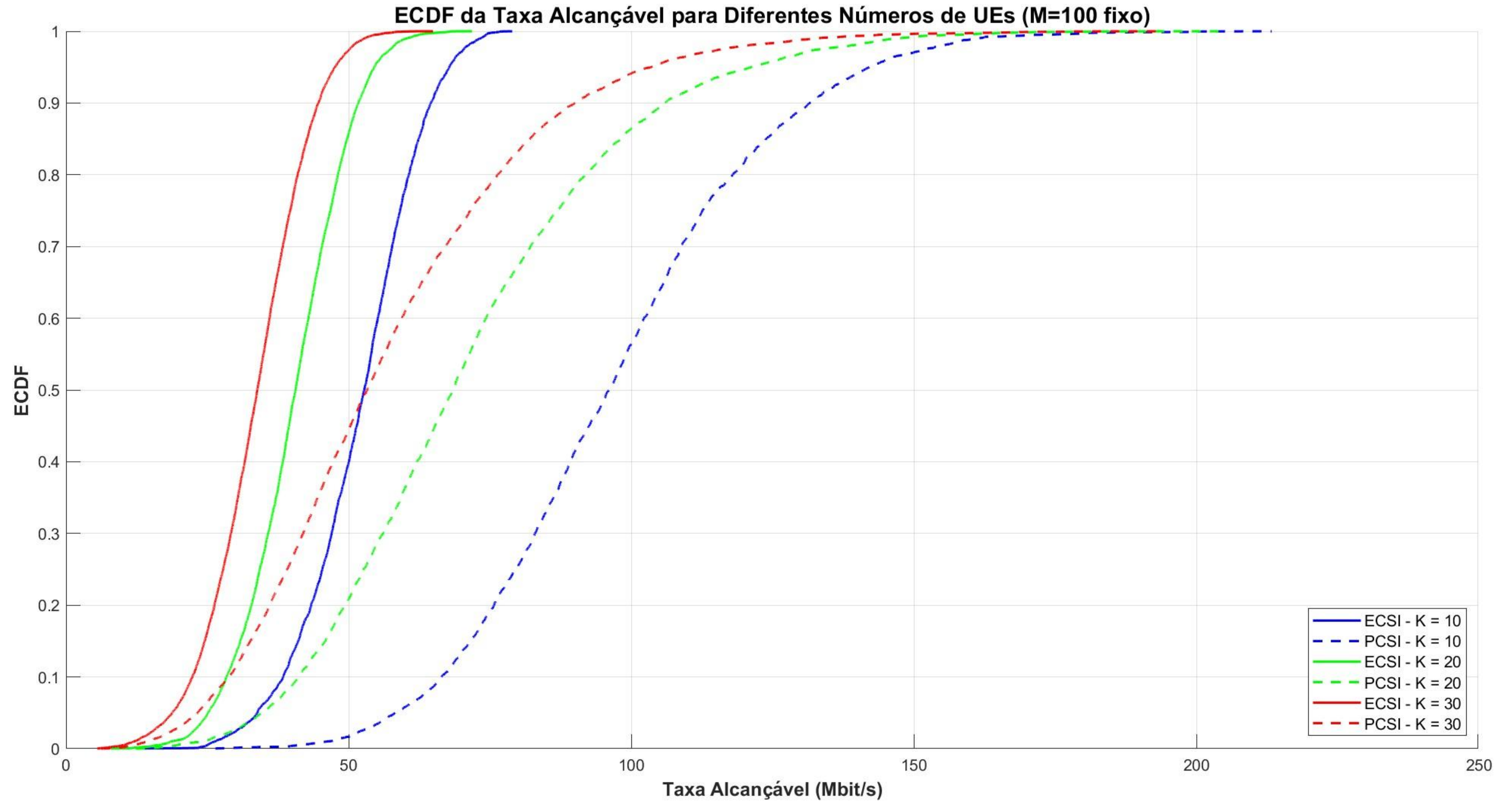


Figura 12 – ECDF da taxa alcançável para diferentes números de UEs (o autor).

3. RESULTADOS

- Situação 2 ($M = 100$ fixo)
 - Curvas PCSI apresentaram melhor desempenho em comparação com as curvas ECSI.
 - Menor quantidade de usuários melhora o desempenho do sistema
 - Maiores taxas (Mbits/s) alcançadas (~ 220 Mbits/s)
 - Maiores relações SINR alcançadas (~ 35 dB)

4. CONCLUSÃO

- O aumento do número de APs melhora significativamente a SINR e a taxa alcançável;
- O caso com conhecimento perfeito do canal (PCSI) representa um limite superior de desempenho, enquanto o conhecimento estatístico (ECSI) reflete um cenário mais realista;
- Os resultados mostraram que o sistema Cell-free apresenta desempenho mais homogêneo entre usuários;

5. REFERÊNCIAS

NGO, Hien Quoc; ASHIKHMIN, Alexei; YANG, Hong; LARSSON, Erik G.; MARZETTA, Thomas L. **Cell-Free Massive MIMO versus small cells**. IEEE Transactions on Wireless Communications, New York, v. 16, n. 3, p. 1834–1850, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7833040>. Acesso em 26 nov. 2025.

SILVA, Higo Thaian Pereira da. **Tópicos em Engenharia**. [slides]. Universidade de Brasília, 01 dez. 2025.