



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

Relatório 02:

Análise da Probabilidade de Interrupção e Erro de Símbolo em Canais
Rayleigh e Rice

Discente:
Aureliano Magalhães de Sousa Neto

Docente:
Prof. Dr. Higo Thaian Pereira da Silva

Conteúdo

1 Resumo	2
2 Objetivo	3
3 Introdução	4
4 Desenvolvimento	5
4.1 Simulação da probabilidade de interrupção com envoltória Rayleigh	5
4.2 Simulação da probabilidade de interrupção com envoltória Rice .	7
4.3 Simulação da probabilidade de erro de símbolo sob efeito do desvanecimento Rayleigh	10
5 Resultados e Análise	14
6 Conclusão	15

1 Resumo

Este relatório apresenta a simulação da probabilidade de interrupção e da probabilidade de erro de símbolo em canais sem fio submetidos a desvanecimento Rayleigh e Rice. São geradas curvas numéricas para diferentes valores de SNR média, limiar de SNR e ordens de modulação M-QAM, as quais são comparadas com as expressões analíticas correspondentes. Os resultados permitem avaliar o impacto das condições do canal e da modulação no desempenho do sistema, evidenciando a coerência entre teoria e simulação.

Palavras-chave: probabilidade de interrupção; probabilidade de erro de símbolo; desvanecimento Rayleigh; desvanecimento Rice.

2 Objetivo

Simular, por meio do MATLAB, o desempenho de sistemas de comunicação sem fio submetidos a desvanecimento plano Rayleigh e Rice, reproduzindo o comportamento estatístico da relação sinal-ruído (SNR) nesses modelos clássicos de canal.

O objetivo é analisar a probabilidade de interrupção e a probabilidade de erro de símbolo em diferentes condições de SNR média, limiar de SNR e ordem de modulação M-QAM, comparando os resultados de Monte Carlo com as expressões analíticas correspondentes.

Essa abordagem permite compreender de forma detalhada os efeitos do desvanecimento multipercorso não seletivo em frequência sobre o desempenho do sistema, evidenciando as propriedades físicas e estatísticas dos canais considerados.

3 Introdução

A análise de desempenho de sistemas de comunicações sem fio exige a caracterização estatística da relação sinal-ruído (SNR) sob efeitos de desvanecimento multipercorso. Em cenários não seletivos em frequência, modelos clássicos como Rayleigh (NLoS) e Rice (LoS) descrevem adequadamente a distribuição da SNR instantânea e permitem avaliar métricas importantes, como a probabilidade de interrupção e a probabilidade de erro de símbolo.

Neste relatório, são realizadas simulações de Monte Carlo para obter curvas de probabilidade de interrupção em canais Rayleigh e Rice, variando o limiar de SNR e considerando diferentes valores de SNR média. As curvas simuladas são comparadas com as expressões analíticas conhecidas para ambos os modelos. Além disso, é simulada a probabilidade de erro de símbolo para constelações M-QAM em canal Rayleigh, também contrastando os resultados com as curvas teóricas e com o caso de referência em canal AWGN. Essas análises permitem validar os modelos estatísticos e observar como a severidade do desvanecimento afeta o desempenho do sistema.

4 Desenvolvimento

4.1 Simulação da probabilidade de interrupção com envoltória Rayleigh

O objetivo é apresentar curvas de simulação da probabilidade de interrupção do sistema sob o efeito da envoltória Rayleigh, em função do limiar de SNR γ_{th} . Os resultados devem ser sobrepostos e comparados com a expressão analítica, descrita por

$$P_{out}(\gamma_{th}) = 1 - e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_s}$$

em que $\bar{\gamma}_s$ representa a SNR média por símbolo do sistema. O limiar de SNR γ_{th} deve ser variado no intervalo de -30 dB a 30 dB. Além disso, devem ser considerados três casos particulares de SNR média: $\bar{\gamma}_s \in \{-20 \text{ dB}, 0 \text{ dB}, 20 \text{ dB}\}$

A simulação foi implementada no MATLAB com o objetivo de estimar a probabilidade de interrupção (*outage*) em um canal sujeito ao desvanecimento Rayleigh. Segundo [1], esse modelo é apropriado para ambientes sem linha de visada (NLOS), nos quais o sinal recebido resulta da soma de múltiplos percursos independentes, de modo que a envoltória pode ser descrita por uma variável Rayleigh obtida a partir de duas componentes gaussianas ortogonais.

Inicialmente, definiu-se o número de amostras da simulação de Monte Carlo, valor suficientemente elevado para assegurar boa precisão estatística conforme a lei dos grandes números (posteriormente foram feitas novas simulações com diferentes quantidades de amostras para fins de comparação). O limiar de SNR foi configurado no intervalo de -30 dB a 30 dB, sendo posteriormente convertido para escala linear, já que as formulações matemáticas da probabilidade de *outage* utilizam grandezas lineares. Também foram estabelecidos três valores médios de SNR para análise comparativa (-20 dB, 0 dB e 20 dB), igualmente convertidos para escala linear.

As matrizes de armazenamento da probabilidade de *outage* foram inicializadas para acomodar tanto os resultados simulados quanto os analíticos. A parte principal da simulação consiste na geração da envoltória Rayleigh. Conforme descrito em [1], a envoltória Rayleigh pode ser modelada como:

$$\alpha = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad X, Y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2),$$

o que corresponde exatamente ao método usado no código: duas variáveis gaussianas independentes são geradas, produzindo uma envoltória Rayleigh normalizada.

Com a envoltória gerada, calculou-se a SNR instantânea multiplicando-se a SNR média pelo quadrado da envoltória, conforme o modelo clássico de desvanecimento Rayleigh.

A probabilidade de *outage* foi obtida de duas formas. Na simulação de Monte Carlo, a probabilidade é dada pela fração de amostras cuja SNR instantânea ficou abaixo do limiar especificado. Em paralelo, foi calculada a probabilidade analítica, baseada na expressão fechada para canais Rayleigh, que também é apresentada em [1] como a forma exata da probabilidade de interrupção para canais com distribuição exponencial de SNR:

$$P_{out}(\gamma_{th}) = 1 - e^{-\gamma_{th}/\bar{\gamma}_s}$$

O cálculo analítico serve como referência para validar os resultados da simulação. Ambos os resultados foram registrados para todas as combinações de SNR média e limiar. Por fim, os resultados são apresentados na Figura 1.

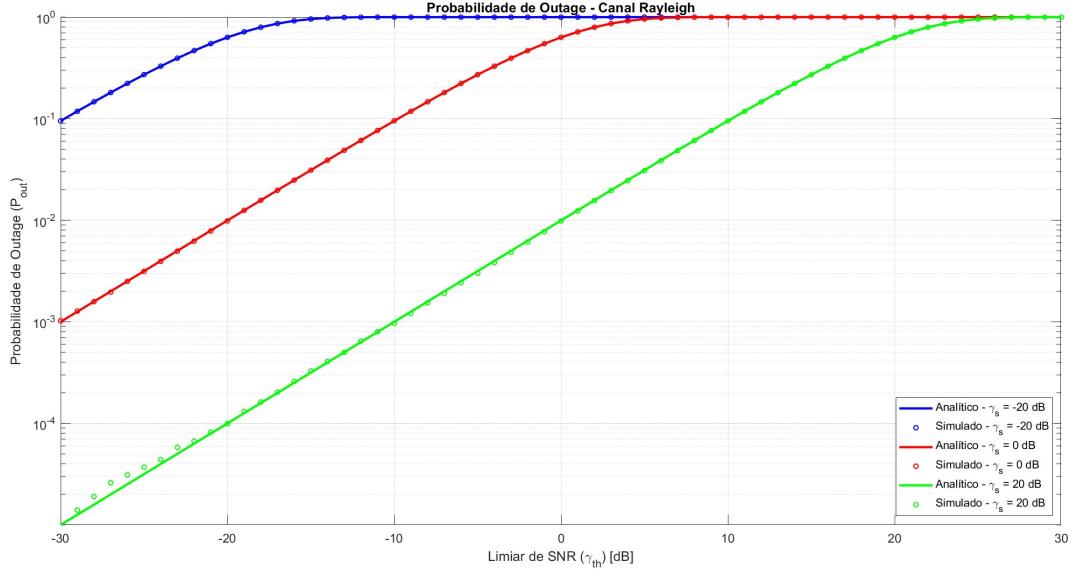


Figura 1: Probabilidade de Interrupção do Sistema sob Envoltória Rayleigh vs. Limiar de SNR γ_{th} .

A Figura 2 apresenta o código implementado em MATLAB para esta primeira parte do projeto.

```
% Universidade de Brasília (UnB)
% Projeto 2 - Comunicações móveis
% Discente: Aureliano Magalhães de Sousa Neto
% Data: 17/11/2025

% -----
% Parte 1: Simulação da Probabilidade de Interrupção - Envoltória Rayleigh
% -----
```

```
amostras = 1e8; % número de amostras (Monte Carlo)
gamma_th_dB = -30:1:30; % limiar de SNR em dB (eixo X)
gamma_th = 10.^(gamma_th_dB/10); % conversão p/ escala linear
gamma_bar_dB = [-20, 0, 20]; % valores médios de SNR (em dB)
gamma_bar = 10.^(gamma_bar_dB/10); % valores médios de SNR em escala linear

Pout_simulado = zeros(length(gamma_bar), length(gamma_th));
Pout_analitico = zeros(length(gamma_bar), length(gamma_th));

for i = 1:length(gamma_bar)

    x1 = randn(1, amostras) * sqrt(0.5); % Primeira VA Gaussiana ~N(0,1/2)
    x2 = randn(1, amostras) * sqrt(0.5); % Segunda VA Gaussiana ~N(0,1/2)
    beta = sqrt(x1.^2 + x2.^2); % Envoltória Rayleigh
    gamma_s = gamma_bar(i) * (beta.^2); % SNR instantânea: y = y^-* β^2

    for j = 1:length(gamma_th)
        Pout_simulado(i,j) = mean(gamma_s < gamma_th(j)); % Simulação
        Pout_analitico(i,j) = 1 - exp(-gamma_th(j)/gamma_bar(i)); % Analítico
    end
end
```

Figura 2: Algoritmo implementado em MATLAB.

4.2 Simulação da probabilidade de interrupção com envoltória Rice

O objetivo é apresentar curvas de simulação da probabilidade de interrupção do sistema sob o efeito da envoltória Rice, em função do limiar de SNR γ_{th} . Os resultados devem ser sobrepostos e comparados com a expressão analítica, descrita por:

$$P_{\text{out}}(\gamma_{th}) = 1 - Q_1 \left(\sqrt{2K_R}, \sqrt{\frac{2(K_R + 1)\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_s}} \right)$$

Em que $Q_1(\cdot, \cdot)$ é a função Marcum Q , γ_{th} representa a SNR média por símbolo do sistema, e K_R é o fator de Rice.

O limiar de SNR γ_{th} deve ser variado no intervalo de -30 dB a 30 dB. Além disso, devem ser considerados três casos particulares de SNR média: $\bar{\gamma}_s \in \{-20$ dB, 0 dB, 20 dB $\}$. Neste caso de simulação, devem ser geradas três figuras, correspondentes a diferentes valores do fator de Rice: $K_R \in \{0.1, 1, 10\}$.

A Figura 3, Figura 4 e Figura 5 apresentam os resultados para $K_R = 0.1$, $K_R = 1$ e $K_R = 10$, respectivamente. A implementação no MATLAB seguiu a mesma estrutura da Parte 1, utilizando o método de Monte Carlo com $N_t = 10^6$ amostras. A envoltória Rice foi gerada a partir de variáveis Gaussianas não centrais, garantindo potência unitária conforme a relação $\mu_I^2 + \mu_Q^2 + 2\sigma^2 = 1$.

Em todos os casos, observa-se excelente concordância entre os resultados simulados e analíticos, validando a implementação. Para o cálculo da expressão analítica, utilizou-se a função `marcumq` do MATLAB para computar a função Marcum Q.

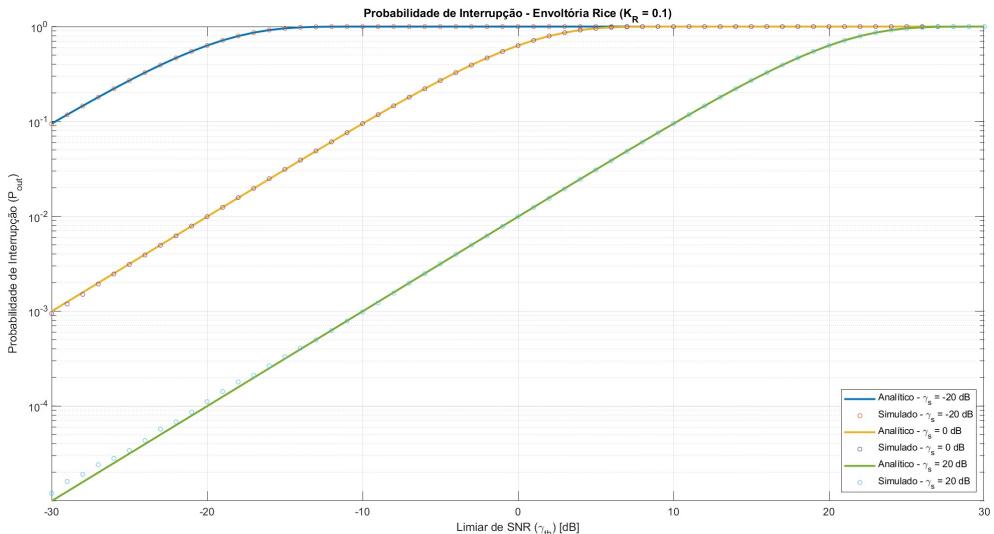


Figura 3: Probabilidade de interrupção para canal com desvanecimento Rice ($K_R = 0.1$). Observa-se o comportamento intermediário entre Rayleigh e Rice com componente LOS mais forte.

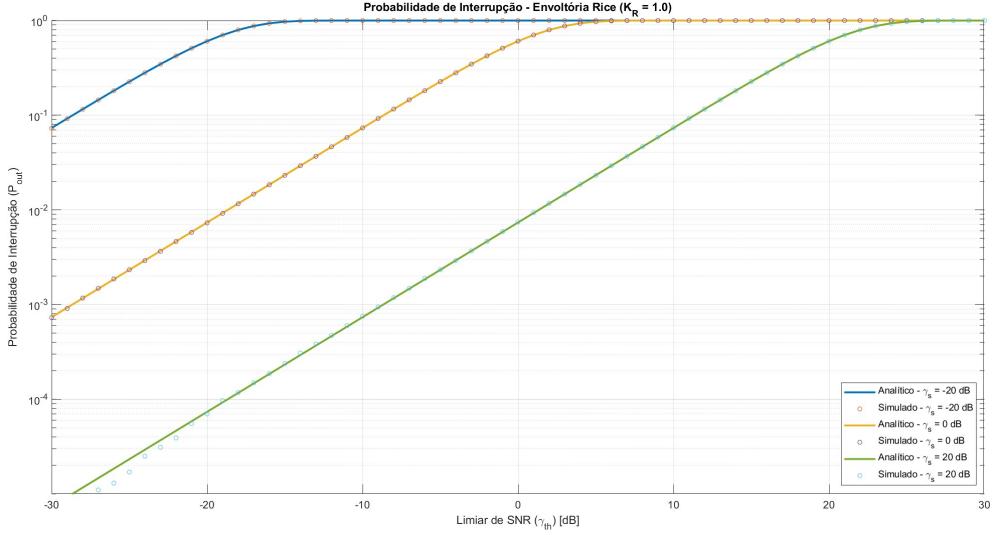


Figura 4: Probabilidade de interrupção para canal com desvanecimento Rice ($K_R = 1$). Caracteriza ambiente com componente LOS moderada e transição balanceada entre regimes de SNR.

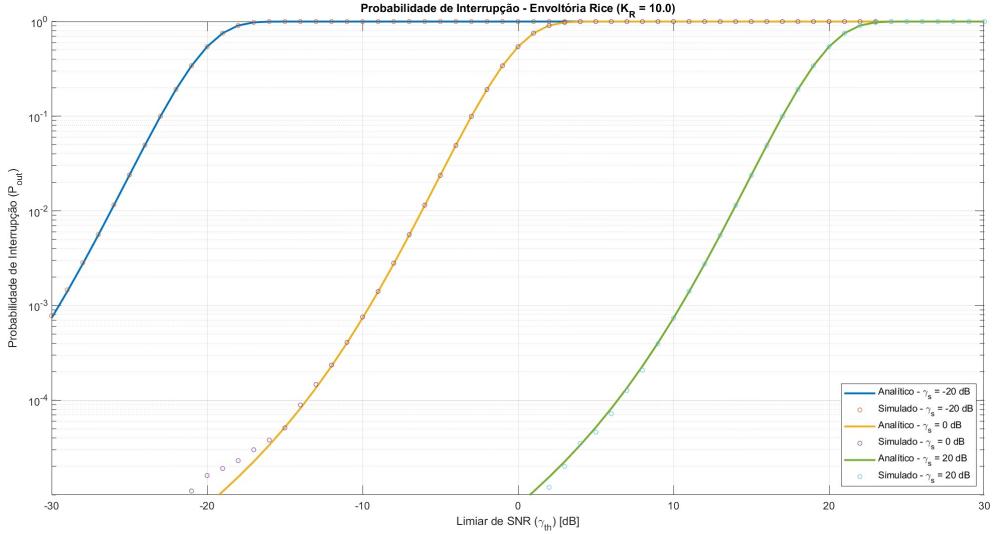


Figura 5: Probabilidade de interrupção para canal com desvanecimento Rice ($K_R = 10$). Ambiente com forte componente LOS, apresentando decaimento mais rápido da probabilidade de interrupção.

Caso $K_R = 0, 1$: Representa um ambiente com fraca componente LOS, onde o comportamento se aproxima do cenário Rayleigh, mas com leve melhoria no desempenho.

Caso $K_R = 1$: Caracteriza um ambiente com componente LOS moderada, apresentando uma transição balanceada entre os regimes de alta e baixa SNR.

Caso $K_R = 10$: Representa um ambiente com forte componente LOS, onde a probabilidade de interrupção decai mais rapidamente com o aumento do limiar, refletindo a menor variabilidade do canal.

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam o código implementado em MATLAB para esta segunda parte do projeto.

```

% -----
% Parte 2: Simulação da Probabilidade de Interrupção - Envoltória Rice
% ----

K_R = [0.1, 1, 10]; % fatores de Rice

for indice_fator_K = 1:length(K_R)

    K = K_R(indice_fator_K);

    % Parâmetros da distribuição Rice (potência unitária)
    A = sqrt(K / (K + 1));
    sigma = 1 / sqrt(2 * (K + 1));

    Pout_sim = zeros(length(gamma_bar), length(gamma_th)); % Probabilidade de interrupção (simulado)
    Pout_ana = zeros(length(gamma_bar), length(gamma_th)); % Probabilidade de interrupção (analítico)

    for i = 1:length(gamma_bar)

        x = A + sigma * randn(1, amostras);
        y = sigma * randn(1, amostras);
        rice_env = sqrt(x.^2 + y.^2); % Geração da envoltória Rice

        % SNR instantânea
        gamma_inst = gamma_bar(i) * (rice_env.^2);

        for j = 1:length(gamma_th)
            Pout_sim(i,j) = mean(gamma_inst < gamma_th(j));

            a = sqrt(2*K);
            b = sqrt(2*(K+1)*gamma_th(j)/gamma_bar(i));
            Pout_ana(i,j) = 1 - marcum_q_custom(a, b);
        end
    end
end

```

Figura 6: Algoritmo implementado em MATLAB parte 1.

```

function Q = marcum_q_custom(a, b)
    % Q1(a,b) = ∫_b^∞ x * exp(-(x^2 + a^2)/2) * I0(a*x) dx

    if b > 50
        Q = 0; % Para "b" muito grande, a integral é praticamente zero.
        return;
    end

    if a < 1e-10
        Q = exp(-b^2/2); % Para "a" muito pequeno, há aproximação analítica.
        return;
    end

    N = 2000; % número de pontos na integração
    x_max = b + 10 * sqrt(a^2 + b^2);
    if x_max <= b
        Q = 0;
        return;
    end

    x = linspace(b, x_max, N);
    dx = x(2) - x(1);

    integrando = x .* exp(-(x.^2 + a.^2)/2) .* besseli(0, a.*x);

    % Regra de Simpson
    Q = (dx/3) * (integrando(1) + integrando(end) + 4*sum(integrando(2:2:end-1)) + 2*sum(integrando(3:2:end-2)));
    Q = max(0, Q);
end

```

Figura 7: Algoritmo implementado em MATLAB parte 2.

4.3 Simulação da probabilidade de erro de símbolo sob efeito do desvanecimento Rayleigh

O objetivo é apresentar curvas de simulação da probabilidade de erro de símbolo sob o efeito do desvanecimento Rayleigh, considerando a constelação M-QAM. A SNR média do sistema deve ser variada no intervalo de -30 dB a $+30$ dB. Devem ser apresentadas três curvas, correspondentes a diferentes ordens de modulação, com $M \in \{4, 16, 64\}$. Os pontos de simulação devem sobrepor as curvas teóricas da probabilidade de erro de símbolo, genericamente descritas como função do limiar de SNR γ_{th} . Os resultados devem ser comparados com a expressão analítica do erro de símbolo para canais Rayleigh, descrita por

$$\bar{P} = 2 \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} [1 - C_M(\bar{\gamma}_s)] - \left(\frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} \right)^2 \left[1 - \frac{4}{\pi} C_M(\bar{\gamma}_s) \arctan \left(\frac{1}{C_M(\bar{\gamma}_s)} \right) \right].$$

em que

$$C_M(\bar{\gamma}_s) = \sqrt{\frac{1.5 \bar{\gamma}_s}{M - 1 + 1.5 \bar{\gamma}_s}}.$$

Além disso, as curvas da probabilidade de erro de símbolo para o canal AWGN devem ser incluídas para efeito de comparação.

A terceira parte do trabalho avalia o desempenho da modulação M-QAM em termos da probabilidade de erro de símbolo em diferentes condições de canal. O código implementa uma estrutura baseada em simulação de Monte Carlo, permitindo comparar o comportamento do sistema em canais Rayleigh com desvanecimento lento e em canal puramente AWGN.

Inicialmente, são definidas três ordens de modulação quadrada ($M = 4, 16, 64$). Para cada valor de M , é gerada uma constelação M-QAM manualmente, por meio da função de modulação (Figura 8), que constrói explicitamente a grade bidimensional da constelação e aplica normalização para garantir potência média unitária. Essa padronização assegura que a relação sinal-ruído seja aplicada de forma consistente em todas as ordens de modulação.

```

function simbolos = modulacao_MQAM_manual(dados, M, varargin)
% Entrada: dados = vetor de inteiros entre 0 e M-1, M = ordem da modulação (4, 16, 64, ...), varargin = parâmetros opcionais: 'UnitAveragePower', true/false
% Saída: simbolos = vetor complexo com símbolos M-QAM
    UnitAveragePower = true;

    for i = 1:2:length(varargin)
        if strcmpi(varargin{i}, 'UnitAveragePower')
            UnitAveragePower = varargin{i+1};
        end
    end

    raiz_M = sqrt(M);

    constelacao = zeros(1, M); % Cria constelação M-QAM
    indice = 1;

    for i = 1:raiz_M
        for j = 1:raiz_M
            I = (2*i - 1 - raiz_M); % Coordenadas da constelação
            Q = (2*j - 1 - raiz_M); % Coordenadas da constelação

            constelacao(indice) = I + 1j*Q;
            indice = indice + 1;
        end
    end

    % Normalização para potência unitária
    if UnitAveragePower
        potencia_media = mean(abs(constelacao).^2);
        constelacao = constelacao / sqrt(potencia_media);
    end

    simbolos = constelacao(dados + 1);
end

```

Figura 8: Algoritmo da função de modulação.

A cada iteração de SNR, o sistema transmite símbolos aleatórios através de dois modelos de canal: AWGN e Rayleigh plano. No caso Rayleigh, o canal é modelado por uma variável aleatória complexa gaussiana circularmente simétrica, assegurando ganho aleatório com potência unitária. O ruído é gerado conforme a SNR especificada e adicionado ao sinal modulado. Para compensar o desvanecimento do canal Rayleigh, é realizada equalização *zero-forcing* antes da demodulação. A Figura 9 e a Figura 10 apresentam o algoritmo principal.

```
% Simulação do canal Rayleigh
dados = randi([0 M-1], 1, amostras); % Geração de símbolos aleatórios
símbolos_transmitidos = modulação_MQAM_manual(dados, M, 'UnitAveragePower', true);
canal = (randn(1, amostras) + 1j*randn(1, amostras)) / sqrt(2); % Geração do canal Rayleigh (potência unitária)
potencia_ruído = 1 / SNR_media; % Potência do sinal é 1 (UnitAveragePower)
ruído = sqrt(potencia_ruído/2) * (randn(1, amostras) + 1j*randn(1, amostras)); % Ruído AWGN
símbolos_recebidos_rayleigh = canal .* símbolos_transmitidos + ruído; % Sinal recebido (canal Rayleigh)
símbolos_equalizados = símbolos_recebidos_rayleigh ./ canal; % Equalização ZF

% Demodulação
dados_recebidos_rayleigh = demodulação_MQAM_manual(símbolos_equalizados, M, 'UnitAveragePower', true);
erros_rayleigh = sum(dados ~= dados_recebidos_rayleigh);
Pe_simulado_rayleigh(indice_SNR) = erros_rayleigh / amostras; % Cálculo da probabilidade de erro

% Probabilidade de erro teórica para Rayleigh (fórmula fornecida no roteiro)
Termo_C = sqrt(1.5 * SNR_media / (M - 1 + 1.5 * SNR_media));
termo1 = 2 * (raiz_M-1)/raiz_M * (1 - Termo_C);
termo2 = ((raiz_M-1)/raiz_M)^2 * (1 - (4/pi) * Termo_C * atan(1/Termo_C));
Pe_teórico_rayleigh(indice_SNR) = termo1 - termo2;
Pe_teórico_awgn(indice_SNR) = 4 * (1 - 1/raiz_M) * qfunc(sqrt(3 * SNR_media / (M - 1))); % Probabilidade de erro teórica para AWGN
end
```

Figura 9: Algoritmo implementado em MATLAB parte 1.

```
for indice_M = 1:length(Valores_M)
    M = Valores_M(indice_M);

    Pe_teórico_rayleigh_combinado = zeros(size(gamma_th_dB));
    Pe_teórico_awgn_combinado = zeros(size(gamma_th_dB));

    for indice_SNR = 1:length(gamma_th_dB)
        SNR_media = gamma_th(indice_SNR);

        % Cálculo teórico Rayleigh
        Termo_C = sqrt(1.5 * SNR_media / (M - 1 + 1.5 * SNR_media));
        termo1 = 2 * (sqrt(M)-1)/sqrt(M) * (1 - Termo_C);
        termo2 = ((sqrt(M)-1)/sqrt(M))^2 * (1 - (4/pi) * Termo_C * atan(1/Termo_C));
        Pe_teórico_rayleigh_combinado(indice_SNR) = termo1 - termo2;

        % Cálculo teórico AWGN
        Pe_teórico_awgn_combinado(indice_SNR) = 4 * (1 - 1/sqrt(M)) * qfunc(sqrt(3 * SNR_media / (M - 1)));
    end

    % Plot Rayleigh
    semilogy(gamma_th_dB, Pe_teórico_rayleigh_combinado, '--', 'Color', Cores(indice_M), 'LineWidth', 2, 'DisplayName', sprintf('Rayleigh M=%d', M));
    hold on;

    % Plot AWGN
    semilogy(gamma_th_dB, Pe_teórico_awgn_combinado, '--', 'Color', Cores(indice_M), 'LineWidth', 2, 'DisplayName', sprintf('AWGN M=%d', M));
end
```

Figura 10: Algoritmo implementado em MATLAB parte 2.

A demodulação é feita pela função de demodulação (Figura 11), que aplica decisão por distância mínima ao reconstruir a constelação e determinar o ponto mais próximo para cada símbolo recebido. A partir disso, calcula-se a probabilidade de erro experimental como a razão entre símbolos incorretos e o total transmitido.

```

function dados_demod = demodulacao_MQAM_manual(simbolos, M, varargin)
% Entrada: simbolos = vetor complexo com símbolos recebidos / M = ordem da modulação / varargin = opcionais: 'UnitAveragePower', true/false
% Saída: dados_demod = vetor de inteiros entre 0 e M-1

UnitAveragePower = true;
for i = 1:length(varargin)
    if strcmpi(varargin{i}, 'UnitAveragePower')
        UnitAveragePower = varargin{i+1};
    end
end

raiz_M = sqrt(M);
constelacao = zeros(1, M); % Cria a mesma constelação usada na função de modulação
indice = 1;
for i = 1:raiz_M
    for j = 1:raiz_M
        I = (2*i - 1 - raiz_M);
        Q = (2*j - 1 - raiz_M);
        constelacao(indice) = I + 1j*Q;
        indice = indice + 1;
    end
end

if UnitAveragePower
    potencia_media = mean(abs(constelacao).^2);
    constelacao = constelacao / sqrt(potencia_media);
end

dados_demod = zeros(1, length(simbolos));

for k = 1:length(simbolos)
    distancias = abs(simbolos(k) - constelacao).^2; % Calcula distâncias para todos os pontos da constelação
    [~, indice_min] = min(distancias); % Encontra ponto mais próximo
    dados_demod(k) = indice_min - 1;
end

```

Figura 11: Algoritmo da função de demodulação.

Além dos resultados obtidos via simulação, o código calcula também as curvas teóricas de P_e para os canais Rayleigh e AWGN, utilizando expressões analíticas padrão para modulações M-QAM. Os resultados simulados e teóricos são apresentados em gráficos específicos, permitindo visualizar o impacto da ordem de modulação e das condições de canal no desempenho do sistema. A Figura 12, Figura 13 e Figura 14 representam os resultados obtidos com a simulação.

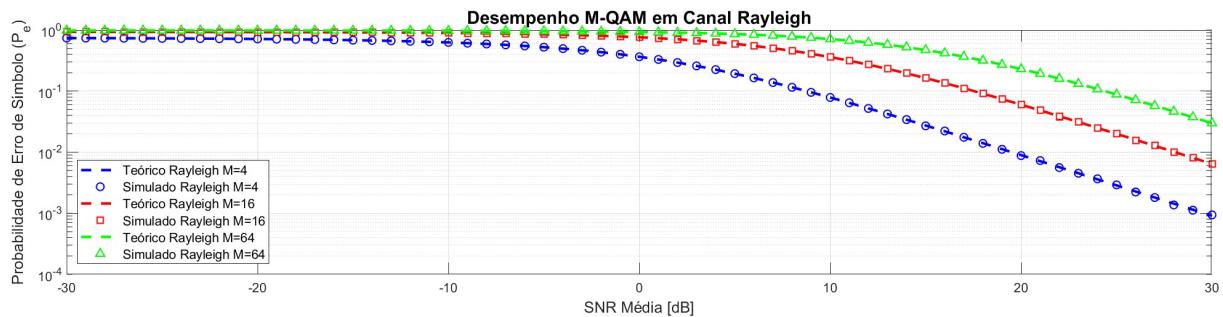


Figura 12: Desempenho M-QAM em Canal Rayleigh

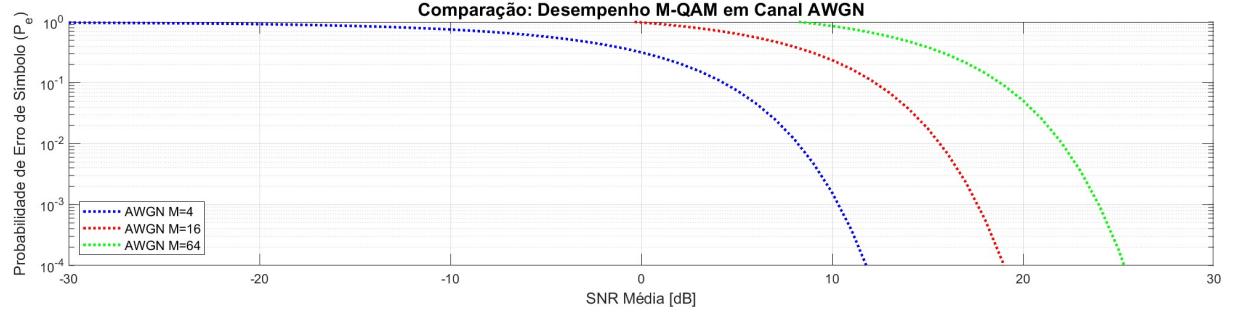


Figura 13: Comparação de desempenho: M-QAM em canal AWGN.

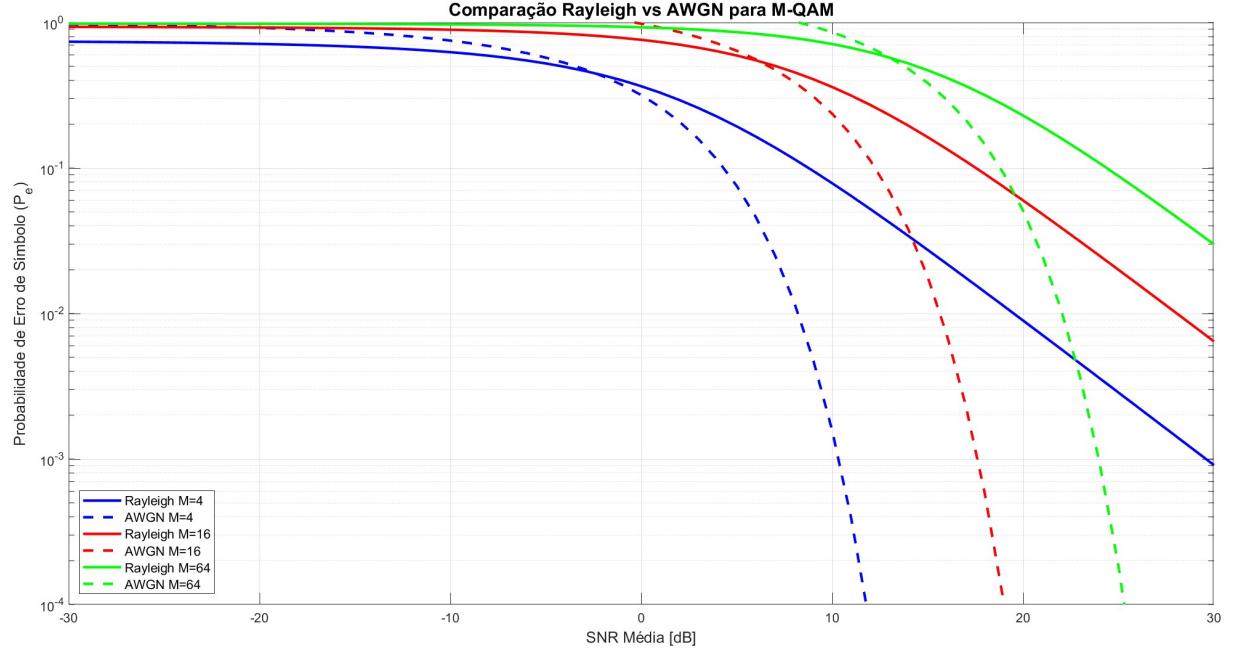


Figura 14: Comparação Rayleigh vs AWGN para M-QAM.

Posteriormente, é apresentado um detalhamento mais aprofundado dos resultados observados.

5 Resultados e Análise

Na Parte 1 do projeto, observou-se que, para um mesmo valor de SNR média, a probabilidade de *outage* aumenta conforme o limiar de SNR cresce [2]. Também foi verificado que a probabilidade de interrupção igual a 100% ocorre para limiares menores quando a SNR média do sistema é baixa.

Especificamente, para uma SNR média de -20 dB, o sistema atinge $P_{\text{out}} = 1$ a partir de um limiar de aproximadamente -18 dB. Para SNR média igual a 0 dB, a interrupção total ocorre em torno de 5 dB, enquanto que, para uma SNR média de 20 dB, o valor correspondente é próximo de 25 dB. Esses resultados refletem o fato de que, quanto menor a SNR média disponível, mais rapidamente o sistema entra em regime de interrupção completa.

No caso da envoltória Rice, verificou-se que, para valores muito baixos do fator de Rice ($K_R = 0,1$), o canal apresenta comportamento muito semelhante ao modelo Rayleigh, pois a componente de linha de visada (LOS) é praticamente desprezível. À medida que K_R aumenta, a componente LOS passa a dominar a propagação, reduzindo a variabilidade do canal e melhorando o desempenho, o que se reflete em menores probabilidades de *outage*. Entretanto, em regiões de SNR muito baixas, todas as curvas tendem a $P_{\text{out}} \approx 1$, independentemente de K_R , pois nenhuma realização da SNR instantânea é capaz de superar o limiar.

Em relação aos resultados obtidos para a probabilidade de erro de símbolo, observa-se que o desempenho do sistema é significativamente superior quando o sinal está sujeito apenas ao ruído AWGN. Para uma mesma probabilidade de erro de símbolo, o canal Rayleigh exige níveis mais elevados de SNR média, refletindo a degradação causada pelo desvanecimento aleatório. Enquanto o ruído AWGN afeta apenas a componente aditiva do sinal, o canal Rayleigh introduz variações profundas de amplitude (*fading*), reduzindo momentaneamente a SNR instantânea e aumentando a probabilidade de decisão incorreta na demodulação.

Os resultados baseiam-se no código implementado, que avalia o desempenho de modulações M-QAM para $M \in \{4, 16, 64\}$. Para cada ordem de modulação, símbolos aleatórios são gerados e mapeados na constelação M-QAM manualmente construída com potência normalizada. Em seguida, os símbolos são transmitidos através de um canal Rayleigh complexo, modelado pela soma de duas variáveis Gaussianas independentes, garantindo potência unitária. Após a passagem pelo canal, adiciona-se ruído AWGN de acordo com a SNR média desejada. O receptor realiza equalização do tipo ZF, dividindo a amostra recebida pelo ganho instantâneo do canal, e a demodulação é efetuada por decisão de menor distância Euclidiana.

A probabilidade de erro simulada é obtida pela razão entre o número de símbolos erroneamente detectados e o total transmitido. Paralelamente, são computadas as expressões teóricas tanto para o canal Rayleigh quanto para o cenário AWGN. Os gráficos gerados permitem comparar o desempenho entre os diferentes ambientes de propagação e entre diferentes ordens de modulação, evidenciando que o desvanecimento Rayleigh introduz perdas significativas em relação ao canal puramente ruidoso, especialmente em baixas SNR e para modulações de ordem mais elevada.

6 Conclusão

Os resultados obtidos ao longo deste relatório demonstram a consistência entre as simulações de Monte Carlo e as expressões analíticas clássicas para modelagem de canais sem fio submetidos a desvanecimento Rayleigh e Rice. Para ambos os modelos, observou-se excelente concordância entre os valores simulados e teóricos, confirmando a correta implementação dos algoritmos e a validade estatística das amostras utilizadas. A análise da probabilidade de interrupção evidenciou claramente o impacto da SNR média e do limiar de SNR no desempenho do sistema, bem como a transição entre regimes de severidade do canal à medida que o fator de Rice aumenta. Esses resultados reforçam o papel fundamental do desvanecimento multipercorso na deterioração do enlace e mostram como a presença de uma componente LOS, representada por K_R , pode melhorar significativamente a robustez da comunicação.

Na análise da probabilidade de erro de símbolo para modulações M-QAM, verificou-se que ordens mais altas de modulação apresentam desempenho inferior, especialmente em cenários de desvanecimento severo. A comparação entre os canais AWGN e Rayleigh ressaltou a sensível diferença entre operar em ambiente ideal e em um cenário realista sujeito à variação aleatória da envoltória do canal. A equalização empregada e a normalização da constelação garantiram resultados coerentes com a teoria, comprovando que o erro médio de símbolo depende fortemente tanto da modulação quanto das características estatísticas do canal. Dessa forma, o relatório cumpre seu objetivo de validar modelos de canal, investigar o impacto da modulação no desempenho e consolidar o uso de técnicas de simulação e análise para o estudo de sistemas de comunicação sem fio.

Referências

- [1] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*. John Wiley & Sons, 2000.
- [2] H. T. P. d. Silva, *Tópicos em Engenharia: Notas de Aula*. Universidade de Brasília, 2025, [slides], 07 abr. 2025.