



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

Relatório 01:
Simulação do Canal de Comunicações Sem Fio

Discente:
Aureliano Magalhães de Sousa Neto

Docente:
Prof. Dr. Higo Thaian Pereira da Silva

1 Resumo

A compreensão das propriedades de um canal de comunicação é essencial no contexto das telecomunicações, pois possibilita o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e resilientes a variações ambientais. Nas comunicações móveis, onde as características do canal variam continuamente, a modelagem e a simulação tornam-se ferramentas indispensáveis para prever o comportamento do canal e otimizar o desempenho do sistema. Neste trabalho, realiza-se a modelagem e simulação de canais de comunicações sem fio com base no modelo 3GPP TR 38.901. São analisados parâmetros como o espalhamento temporal e a seletividade em frequência, bem como métricas derivadas, como o tempo de coerência e largura de banda de coerência, fundamentais para o dimensionamento e a avaliação de sistemas modernos de comunicação.

Palavras-chave: modelagem de canal; simulação de comunicações sem fio; 3GPP TR 38.901.

2 Objetivo

Simular, por meio do MATLAB, o comportamento de um canal seletivo em frequência baseado no modelo estocástico não geométrico 3GPP TR 38.901, reproduzindo as principais características de um ambiente *Urban Macrocell* (UMa) em condição de não visada direta (*Non-Line of Sight*, NLoS).

O objetivo é compreender os efeitos do espalhamento temporal, do sombreamento, dos desvios Doppler e dos espalhamentos angulares na resposta temporal do canal, permitindo uma análise detalhada de suas propriedades físicas e estatísticas.

3 Introdução

Os sistemas de comunicações móveis de quinta geração (5G) e além exigem modelagens de canal cada vez mais realistas, capazes de representar ambientes complexos e dinâmicos. Conforme destacado por Wang et al. (2018), os modelos de canal podem ser classificados em duas categorias principais: determinísticos e estocásticos. Os primeiros se baseiam em descrições geométricas detalhadas do ambiente físico, oferecendo alta precisão em detrimento de maior complexidade computacional; já os modelos estocásticos utilizam variáveis aleatórias e processos estatísticos para descrever os parâmetros do canal de forma eficiente e generalizável.

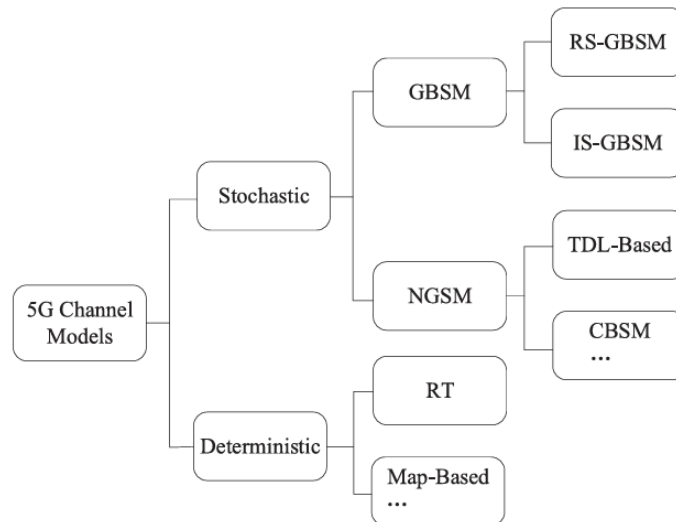


Figura 1: Classificação dos modelos de canal (Wang et al., 2018).

Entre os modelos estocásticos amplamente adotados, destaca-se o 3GPP TR 38.901, que for-

nece um conjunto padronizado de parâmetros para simulações de canais sem fio em frequências entre 0,5 e 100 GHz. Este modelo é aplicável a diferentes cenários, incluindo microcélula urbana (*Urban Microcell*, UMi), macrocélula urbana (*Urban Macrocell*, UMa), ambiente de escritório (*Indoor Office*) e ambiente fabril (*Indoor Factory*) (3GPP, 2020).

A modelagem de canais é essencial para prever o desempenho de sistemas de comunicação em condições realistas, permitindo o projeto de técnicas de mitigação de desvanecimento, otimização de esquemas de modulação e codificação, e avaliação de métricas como tempo e banda de coerência.

Este trabalho aplica os conceitos de modelagem e simulação de canais seletivos em frequência utilizando o MATLAB, de modo a reproduzir e analisar o comportamento do canal em um cenário urbano não visado.

4 Desenvolvimento

O ambiente de simulação adotado neste trabalho corresponde a uma macrocélula urbana (UMa) em condição de não visada direta (NLoS), operando na frequência de 3 GHz. Tal configuração permite estudar o comportamento de um canal seletivo em frequência típico de ambientes urbanos densos.

4.1 Atraso Multipercurso

O atraso multipercurso é um dos parâmetros fundamentais de um canal sem fio, pois está diretamente associado à dispersão temporal do sinal recebido. Ele é influenciado pela geometria do ambiente, pela frequência da portadora e pela condição de visada direta (LoS) ou não visada direta (NLoS).

De acordo com Boban et al. (2023), os parâmetros de um canal de comunicação sem fio podem ser classificados de acordo com a escala em que variam no tempo ou no espaço.

Os parâmetros de larga escala (*Large-Scale Parameters*, LSP) apresentam variações lentas e estão associados a fenômenos como perda de percurso, sombreamento e espalhamento de atraso. Já os parâmetros de pequena escala (*Small-Scale Parameters*, SSP) variam rapidamente, geralmente dentro de alguns comprimentos de onda, e descrevem características de curta duração, como as amplitudes e fases das componentes multipercurso.

Entre os parâmetros de larga escala, o espalhamento de atraso (*delay spread*) desempenha um papel central na caracterização da seletividade temporal do canal, sendo fundamental para compreender como os múltiplos percursos de propagação afetam a forma do sinal recebido.

a) Siga os passos descritos na seção da modelagem do atraso multipercurso apresentados nos slides e gere o espalhamento de atraso do canal σ e os termos de atraso τ_n .

O primeiro passo é a determinação do espalhamento de atraso (σ_t), obtido a partir da geração de uma variável aleatória gaussiana $\sigma_{t\log}$, representando sua forma logarítmica, convertida posteriormente para a escala linear. Esse parâmetro segue estatísticas específicas para cada cenário de propagação, conforme apresentado a seguir.

Ambiente de propagação		Estatísticas de σ_r	
		Média	Des. Padrão
UMi	LoS	$-0.24 \log_{10}(1 + f_c) - 7.14$	0.38
	NLoS	$-0.24 \log_{10}(1 + f_c) - 6.83$	$-0.16 \log_{10}(1 + f_c) + 0.28$
UMa	LoS	$-0.0963 \log_{10}(1 + f_c) - 6.955$	0.66
	NLoS	$-0.204 \log_{10}(1 + f_c) - 6.28$	0.39

Figura 2: Estatísticas de $\sigma_{t\log}$ em unidades logarítmicas para diferentes cenários (Silva, 2025).

A Tabela 1 apresenta o valor eficaz, a média e o desvio padrão obtidos para a variável aleatória gerada por meio da implementação do algoritmo apresentado na Figura 3.

Tabela 1: Valores de Espalhamento de Atraso Eficaz do Canal Simulado.

Valor eficaz (μs)	Média (log)	Desvio padrão (log)
0,6102	-6,4028	0,39

```
%% Atraso multipercurso - espalhamento de atraso eficaz
M = 1; % Quantidade de amostras
fc = 3; % [GHz]

% Cálculo das estatísticas - (passo 2 - 10/55)
media_uma_nlos = -0.204*log10(1+fc) - 6.28; % media do espalhamento [log]
desvio_uma_nlos = 0.39; % desvio padrão do espalhamento [log]

% Geração de uma amostra aleatória - (passo 3 - 10/55)
atraso_multip_log = normrnd (media_uma_nlos, desvio_uma_nlos, [M,1]); % espalhamento de atraso eficaz

% Conversão para linear - (passo 4 - 10/55)
atraso_multip_linear = 10.^atraso_multip_log; % espalhamento de atraso eficaz [seg]
```

Figura 3: Geração do espalhamento de atraso eficaz no MATLAB.

Com base nos valores apresentados anteriormente e segundo Stüber (2002), os espalhamentos de atraso em macrocélulas variam tipicamente entre 1 e 10 μs , enquanto microcélulas apresentam valores menores. O valor obtido de 0,6102 μs está de acordo com o comportamento esperado.

Após a definição de σ_t , os atrasos multipercurso τ_n foram gerados como variáveis exponenciais, normalizadas e ordenadas em ordem crescente. O valor médio μ_t foi obtido como produto entre σ_t e o fator de proporcionalidade r_t , determinado conforme o cenário (Figura 4).

Ambiente de propagação		Fator de proporcionalidade - r_t
UMi	LoS	3
	NLoS	2.1
UMa	LoS	2.5
	NLoS	2.3

Figura 4: Valores de r_t para diferentes cenários de propagação (Silva, 2025).

A Figura 5 demonstra como foram geradas as componentes de atraso multipercurso no MATLAB.

```
%% Atraso multipercurso - componentes de atraso multipercurso
N = 100; % Número de multipercursos
fator_proporcionalidade_rt = 2.3; % Fator de proporcionalidade (slide 12/55)

% Cálculo média ut (mu) - (passo 2 - 15/55)
ut = fator_proporcionalidade_rt * atraso_multip_linear;

% Geração de atrasos exponenciais - (passo 3 - 15/55)
atraso_multipercurso_exponencial = exprnd (ut, [N,1]);

% Normalização do atraso - (passo 4 - 15/55)
atraso_multipercurso_normalizado = atraso_multipercurso_exponencial - min(atraso_multipercurso_exponencial);

% Ordenação - (passo 5 - 15/55)
atraso_multipercurso_ordenado = sort(atraso_multipercurso_normalizado);
```

Figura 5: Geração das componentes de atraso multipercurso no MATLAB.

b) Quais são as distribuições de probabilidade que geralmente se aplicam na caracterização do espalhamento de atraso?

De acordo com Silva (2025) e Stüber (2002), o espalhamento de atraso pode ser modelado de duas formas equivalentes:

- Como uma distribuição normal em escala logarítmica, quando se trabalha com o logaritmo do espalhamento de atraso ($\sigma_{t\log}$);
- Como uma distribuição lognormal em escala linear, quando se trabalha diretamente com σ_t em segundos.

O espalhamento de atraso (*delay spread*) é uma grandeza que representa a dispersão temporal do canal e, por definição, assume apenas valores não negativos. Isso ocorre porque o *RMS delay spread*, conforme definido por Stüber (2002), é calculado como a raiz quadrada de uma variância ponderada, o que garante que $\sigma_t \geq 0$.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\int_0^\infty (\tau - \mu_\tau)^2 \phi_g(\tau) d\tau}{\int_0^\infty \phi_g(\tau) d\tau}}. \quad (2.146)$$

Figura 6: Equação do RMS *delay spread* (Stüber, 2002).

Um valor nulo de σ_t indica que todas as componentes multipercurso chegam simultaneamente ao receptor, correspondendo fisicamente a um canal de linha de visada direta (LoS), sem dispersão temporal. À medida que o canal se torna mais rico em multipercurso, σ_t cresce, refletindo o aumento do espalhamento temporal e do potencial de interferência intersimbólica.

Quando o espalhamento de atraso é representado em escala logarítmica, o valor de $\sigma_{t\log}$ pode assumir valores negativos. Isso ocorre porque $\sigma_{t\log} = \log_{10}(\sigma_t)$, de modo que espalhamentos inferiores a 1 s (ou 1 μ s, conforme a unidade adotada) resultam em valores logarítmicos negativos. Assim, valores negativos de $\sigma_{t\log}$ não representam espalhamentos “abaixo de zero”, mas apenas espalhamentos menores que a unidade de referência na escala linear.

A modelagem lognormal é amplamente utilizada em padrões como o 3GPP TR 38.901, pois garante que os valores de σ_t sejam sempre positivos, condizentes com o significado físico de uma dispersão temporal. Em termos práticos, o logaritmo do espalhamento de atraso segue uma distribuição normal, e ao retornar à escala linear, a distribuição resultante é lognormal.

c) Plote as curvas da média e do desvio padrão do espalhamento de atraso σ_t como funções da frequência (entre 0,5 GHz e 100 GHz). Nesta figura, as estatísticas de σ_t devem ser expressas em μ s e a frequência em GHz.

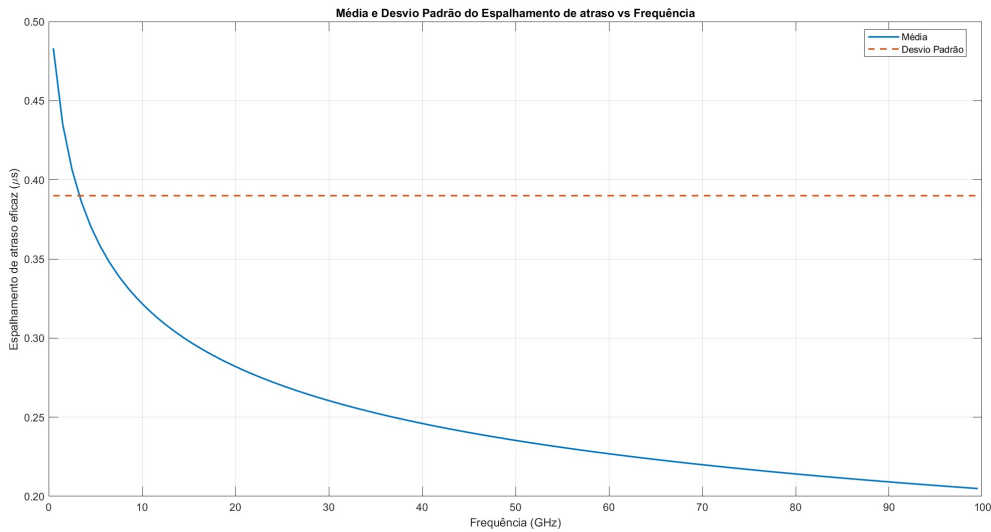


Figura 7: Média e desvio padrão do espalhamento de atraso em função da frequência (escala linear).

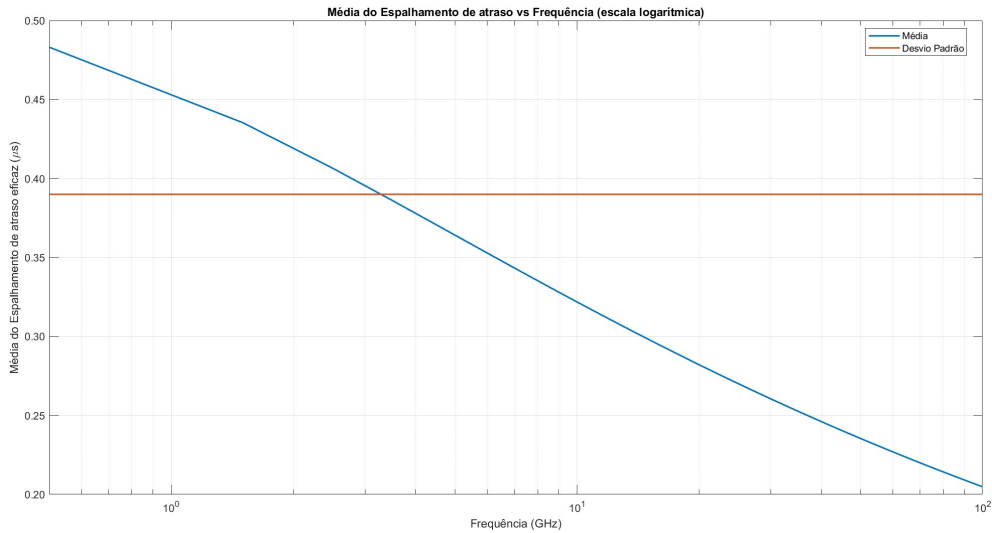


Figura 8: Média e desvio padrão do espalhamento de atraso em função da frequência (escala logarítmica).

d) De acordo com os resultados do item (c), explique o motivo de a média de σ_t diminuir com o aumento da frequência.

Conforme observado na Figura 3, a diminuição da média de σ_t com o aumento da frequência pode ser explicada fisicamente pela maior atenuação que os sinais de alta frequência sofrem ao percorrerem caminhos mais longos. Conforme Rappaport (2010), em frequências elevadas o sinal apresenta menor capacidade de difração e maior absorção por obstáculos, concentrando a energia em trajetórias mais curtas e, conseqüentemente, diminuindo a dispersão temporal.

Esses fenômenos reduzem a intensidade do sinal ao longo de trajetos longos, diminuindo assim a probabilidade de o sinal chegar com atrasos significativos.

De forma sucinta, quanto maior a frequência, maior a atenuação acumulada, o que resulta em uma menor média de σ_t .

e) Explique o significado físico do espalhamento de atraso σ_t .

Quando uma onda de rádio chega ao receptor, ela não percorre apenas o caminho direto (linha de visada), mas também múltiplos percursos refletidos, difratados ou espalhados por obstáculos. Cada um desses caminhos apresenta um atraso distinto, fazendo com que o receptor receba uma soma de réplicas do sinal transmitido, cada uma defasada e com diferentes potências.

Fisicamente, o espalhamento de atraso representa a extensão temporal entre as primeiras e as últimas componentes significativas do sinal recebido. Ele expressa o grau de dispersão temporal introduzido pelo canal e indica o quanto o sinal é “espalhado” no tempo devido à presença de múltiplos caminhos de propagação.

Stüber (2002) define o *RMS delay spread* como a raiz quadrada da variância ponderada dos atrasos, que mede o desvio médio das réplicas do sinal em relação ao atraso médio $\bar{\tau}$. Assim, σ_t fornece uma medida estatística direta da dispersão temporal do canal.

Além disso, algumas relações importantes podem ser observadas a partir dos resultados simulados: quanto maior a frequência do sinal transmitido, menor tende a ser a média de σ_t , pois as componentes multipercurso mais longas sofrem atenuações mais severas. Para enlaces com linha de visada direta (LoS), a componente principal do sinal possui maior peso relativo, resultando em menor dispersão temporal.

Por outro lado e conforme observado em sala de aula, canais com menor espalhamento de atraso apresentam maior banda de coerência, o que indica uma resposta em frequência mais plana. Entretanto, essa condição geralmente vem acompanhada de maior perda de potência total, o que pode degradar a relação sinal-ruído (SNR) e comprometer a recepção confiável dos

sinais.

f) As componentes de atraso são geradas com base em que distribuição de probabilidade?

As componentes de atraso são geradas com base na distribuição exponencial.

4.2 Potência multipercurso

O modelo 3GPP TR 38.901 descreve o comportamento da potência multipercurso com o decaimento exponencial com o atraso e com a variação devido ao sombreamento (Silva, 2025).

Sobre o decaimento, é importante observar que em comunicações móveis, quando uma onda eletromagnética sofre reflexões, difrações e espalhamentos, ela chega ao receptor por diversos caminhos com diferentes atrasos. Assim, para modelar como a potência de cada caminho se distribui, alguns modelos assumem que a potência média dos ecos decai exponencialmente com o atraso.

Quanto maior a frequência, menor será o comprimento de onda e, desta forma, maior será a influência da absorção atmosférica e as perdas por penetração. Em outras palavras, caminhos mais longos tendem a ser menos prováveis e perdem mais energia.

O tipo de ambiente também é um outro fator muito relevante. Em ambientes internos (*indoor*), mesmo em altas frequências, ainda pode haver muitos multipercursos curtos, como reflexos em paredes, teto e no chão. Contudo, em ambientes urbanos (*outdoor*), altas frequências sofrem forte bloqueio, e o aparecimento de caminhos multipercurso fica bem limitado.

a) Siga os passos da seção da modelagem da potência multipercurso apresentada nos slides e gere os termos de sombreamento, de potência e o fator de Rice do canal.

O sombreamento é modelado como uma variável aleatória gaussiana de média nula e desvio padrão dependente do ambiente, sendo mais intenso em condições NLoS. Trata-se de um efeito de larga escala, associado à atenuação provocada por obstáculos grandes e estáticos (como edifícios, colinas e vegetação), que afetam a potência média do sinal em escalas de dezenas a centenas de metros.

O fator de Rice representa a razão entre a potência da componente de linha de visada (LoS) e a soma das potências das componentes difusas (NLoS). No cenário analisado (UMa NLoS), a componente LoS é ausente, resultando em um fator de Rice nulo (em escala linear).

O perfil de potência multipercurso é influenciado pelo sombreamento (*shadowing*), pelos termos de potência das componentes, pelo fator de proporcionalidade e pelo espalhamento de atraso. À medida que o espalhamento aumenta, os componentes tornam-se mais espaçados e com maior atraso médio, implicando menor potência.

Ambiente de propagação		Desvio padrão do sombreamento - σ_ξ (dB)
UMi	LoS	4
	NLoS	7.82
UMa	LoS	4
	NLoS	6

Figura 9: Desvio padrão do sombreamento para diferentes cenários (Silva, 2025).

Com base nos dados da Figura 9 e nos resultados numéricos obtidos, foram gerados os termos de sombreamento, o perfil de potência multipercurso e o fator de Rice, conforme ilustrado na Figura 10.

```

%% Parte: Potência multipercurso - perfil de potência multipercurso

% Geração dos termos de sombreamento - passo 1 (19/55)
desvio_padrao_sombreamento = 6; % dB
sombreamento = normrnd(0, desvio_padrao_sombreamento, [N,1]);

% Cálculo da potência preliminar - passo 2 (19/55)
pot_preliminar = exp(-componente_multipercurso_ordenado*(fator_proporcionalidade_rt - 1)/ut).*10.^(-sombreamento/10);

% Fator de Rice - passo 3 (19/55)
Kr = 0; % NLoS

% Normalização das potências dispersas
ganho_canal = sum(pot_preliminar(2:end)); % Potência total dispersa (sem a componente LoS)

% Normalização das componentes dispersas
pot_dispersa_normalizada = (1/(Kr+1)) * (pot_preliminar / ganho_canal);

% Ajuste da componente LoS (apenas o caminho de menor atraso)
pot_dispersa_normalizada(1) = Kr / (Kr + 1);

% Verificação de ganho total unitário
ganho_total = sum(pot_dispersa_normalizada);

```

Figura 10: Geração dos termos de sombreamento, fator de Rice e potências dispersas no MATLAB.

b) Como o modelo 3GPP TR 38.901 relaciona os termos de potência com os termos de atraso? Existe alguma correspondência física nessa relação?

Os termos de potência multipercurso se relacionam com os termos de atraso através do perfil de atraso de potência (*Power Delay Profile*, PDP).

Conforme apresentado em Silva (2025), o perfil de potência multipercurso é composto por uma parte determinística que indica que a potência multipercurso decai exponencialmente com o atraso multipercurso, e também por uma parte aleatória, na qual a influência do sombreamento, anteriormente modelado como uma variável aleatória gaussiana.

O que se observa do ponto de vista físico é que os sinais que percorrem trajetos mais longos (e obviamente chegam ao receptor com maior atraso) sofrem perdas adicionais em função da atenuação, das múltiplas reflexões e da difração ao longo do caminho. Como consequência, a potência média associada a esses percursos tende a ser menor do que a dos caminhos mais curtos. Esse comportamento foi amplamente observado em campanhas de medição e é refletido no modelo 3GPP TR 38.901.

c) Explique o significado físico do sombreamento multipercurso.

O sombreamento multipercurso (*shadowing*) é um parâmetro de larga escala que introduz variações lentas da potência média do sinal devido à presença de obstáculos macroscópicos. Ele atua sobre todas as componentes multipercurso, modificando o ganho médio do canal sem alterar as flutuações rápidas causadas pelo *fading* (Stüber, 2002)

d) O fator de Rice (K_r) caracteriza qual relação entre grandezas do canal? Além disso, qual distribuição de probabilidade se aplica à modelagem do fator de Rice?

O fator de Rice caracteriza a relação entre a potência da componente de linha de visada (LoS) e a soma das potências das componentes difusas (NLoS) do canal.

De acordo com Silva (2025), o fator de Rice pode ser modelado:

- em escala logarítmica, como uma variável gaussiana; e
- em escala linear, como uma variável lognormal.

Em ambientes NLoS, a ausência da componente LoS implica $K_r = 0$, indicando uma distribuição de Rayleigh para as amplitudes, conforme visto em sala de aula.

e) Considerando os valores gerados para a_1^2 , confira o fator de Rice a partir da

expressão:

$$K_r = \frac{a_1^2}{\sum_{n=2}^N a_n^2}$$

em que a_1^2 deve representar a potência da componente de visada direta. Compare o valor calculado com o valor gerado anteriormente.

Considerando que o ambiente de análise trata-se de um UMa NLoS, a componente a_1^2 continuará sendo nula e, desta forma, o fator de Rice na escala linear também será nulo.

f) A partir dos dados de a_n^2 e τ_n , plote o perfil de atraso de potência do canal.

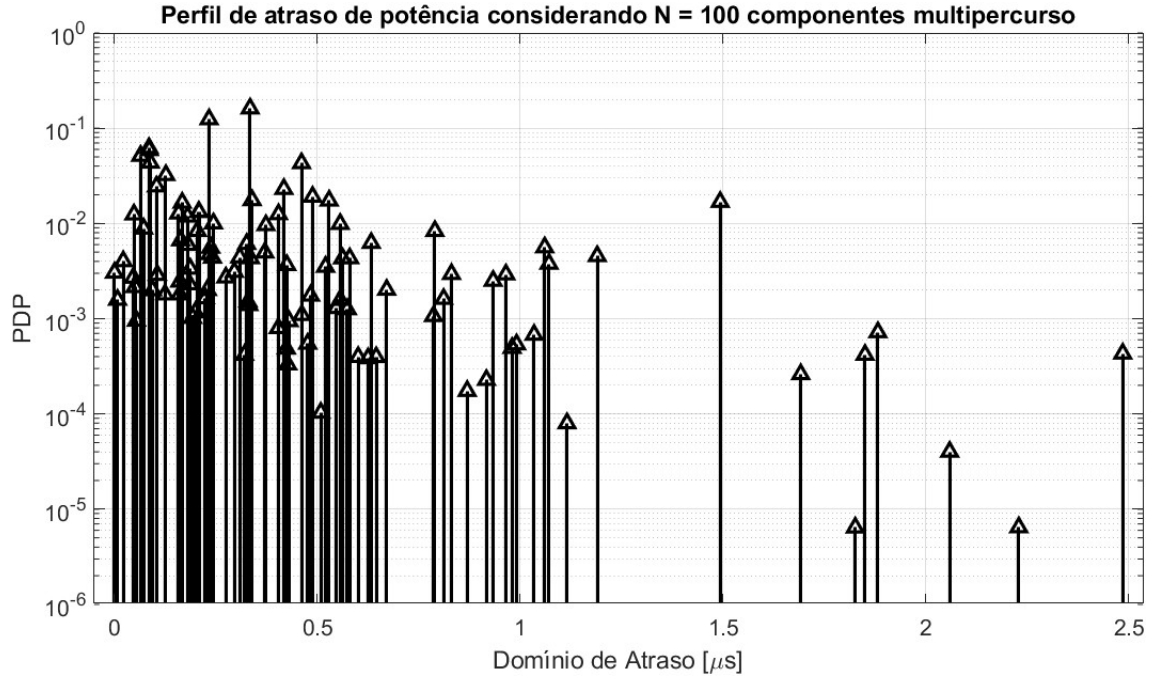


Figura 11: Perfil de atraso de potência para 100 componentes multipercursos.

g) A partir dos dados de a_n^2 e τ_n , recalcule o espalhamento de atraso de acordo com sua definição:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N a_n^2 (\tau_n - \bar{\tau})^2}$$

em que Ω_c é o ganho do canal e $\bar{\tau}$ é o atraso médio, expresso por

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N \tau_n a_n^2$$

O recálculo foi realizado e o resultado obtido se assemelhou bastante com o valor obtido inicialmente.

4.3 Direções de chegada

As direções de chegada (*Angles of Arrival*, AoA) tratam-se dos ângulos nos quais os sinais de rádio chegam ao receptor após terem percorrido todo o ambiente, passando por reflexões, difrações e dispersões.

Segundo Silva (2025), o vetor direção de chegada da n -ésima componente multipercurso, também conhecido como vetor de incidência r_n , é representado através dos ângulos de azimute e elevação conforme apresentado na figura abaixo, onde θ_n e ϕ_n representam, respectivamente, um ângulo em azimute e um ângulo em elevação.

$$\mathbf{r}_n = \begin{bmatrix} \cos(\theta_n) \sin(\phi_n) \\ \sin(\theta_n) \sin(\phi_n) \\ \cos(\phi_n) \end{bmatrix}$$

Figura 12: Composição do vetor de incidência r_n (Silva, 2025).

a) Siga os passos da seção da modelagem das componentes angulares apresentada nos slides e gere os termos ângulo de chegada em azimute (θ_n) e em elevação (ϕ_n).

Em virtude da grande quantidade de linhas de código que foram necessárias para esta implementação, a geração dos termos ângulo de chegada em azimute e em elevação poderá ser constatada por meio do programa que será disponibilizado na plataforma GitHub.

Segundo Silva (2025) e o modelo 3GPP TR 38.901, a geração dos ângulos de chegada é realizada em duas etapas principais: (i) determinação dos parâmetros de larga escala (LSPs) e (ii) geração dos subcaminhos individuais, cada um associado a um par θ_n, ϕ_n .

b) Explique o significado físico dos espalhamentos angulares σ_θ e σ_ϕ . Quais distribuições de probabilidade geralmente se aplicam na modelagem desses parâmetros?

Os espalhamentos angulares σ_θ e σ_ϕ são parâmetros de larga escala que caracterizam a dispersão das direções de chegada das componentes multipercurso em torno de uma direção média de incidência.

Fisicamente, eles representam a “largura angular” efetiva do canal, isto é, o grau de espalhamento espacial do sinal recebido. Ambientes com muitos refletores e obstáculos — como áreas urbanas densas ou ambientes internos — apresentam altos valores de espalhamento, indicando que as ondas chegam ao receptor por várias direções distintas. Em contrapartida, enlaces com linha de visada direta (*LoS*) possuem valores baixos, pois a energia se concentra em torno de uma única direção predominante.

De acordo com Silva (2025), esses parâmetros são modelados estatisticamente como variáveis de larga escala, e sua variabilidade pode ser representada de duas formas complementares:

- Em escala logarítmica é modelado como uma variável aleatória gaussiana normal, refletindo a variação lenta dos parâmetros entre diferentes cenários de propagação.
- Em escala linear segue uma distribuição lognormal.

Rappaport (2002) destaca que o espalhamento angular está diretamente relacionado à densidade e à distribuição dos refletores no ambiente, enquanto Stüber (2002) interpreta esses parâmetros como medidas da largura angular efetiva do canal, influenciando diretamente a coerência espacial.

c) Plote os gráficos da dispersão da potência nos domínios dos ângulos de chegada.

A Figura 14 e a Figura 15 representam a dispersão da potência nos domínios dos ângulos de chegada. Foram utilizadas duas representações: gráfico cartesiano e polar.

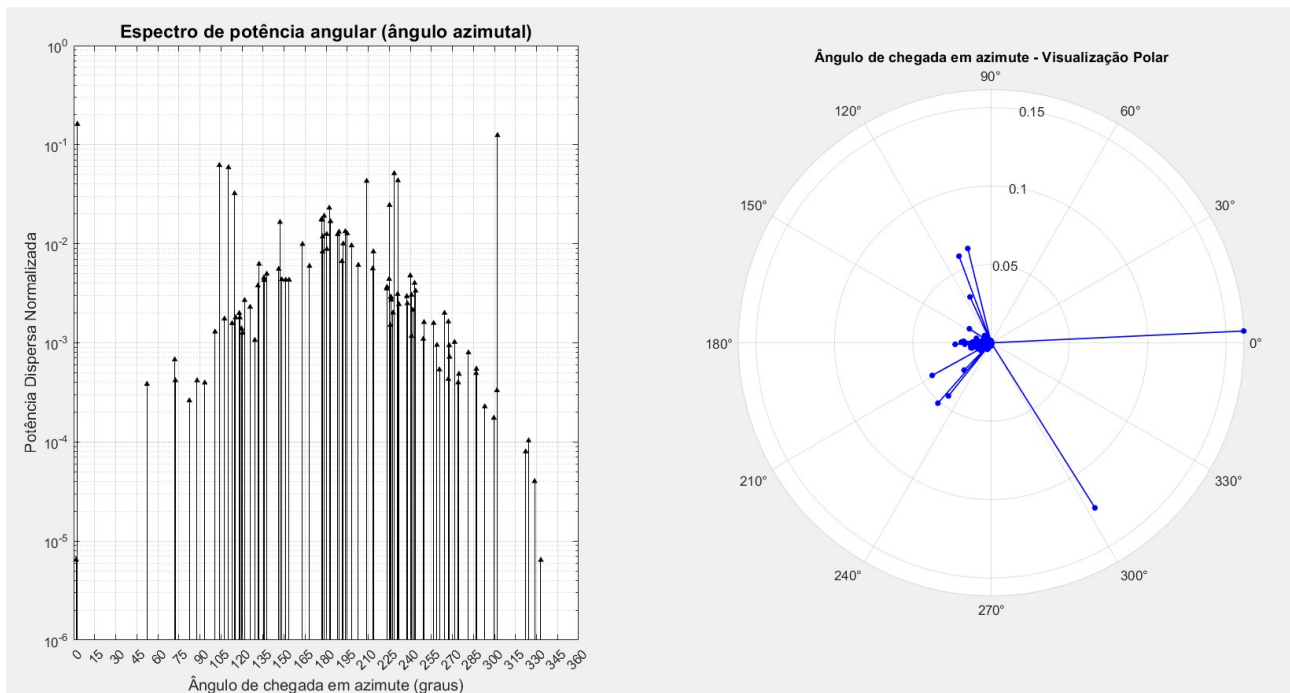


Figura 13: Dispersão da potência nos domínios dos ângulos de chegada em azimute.

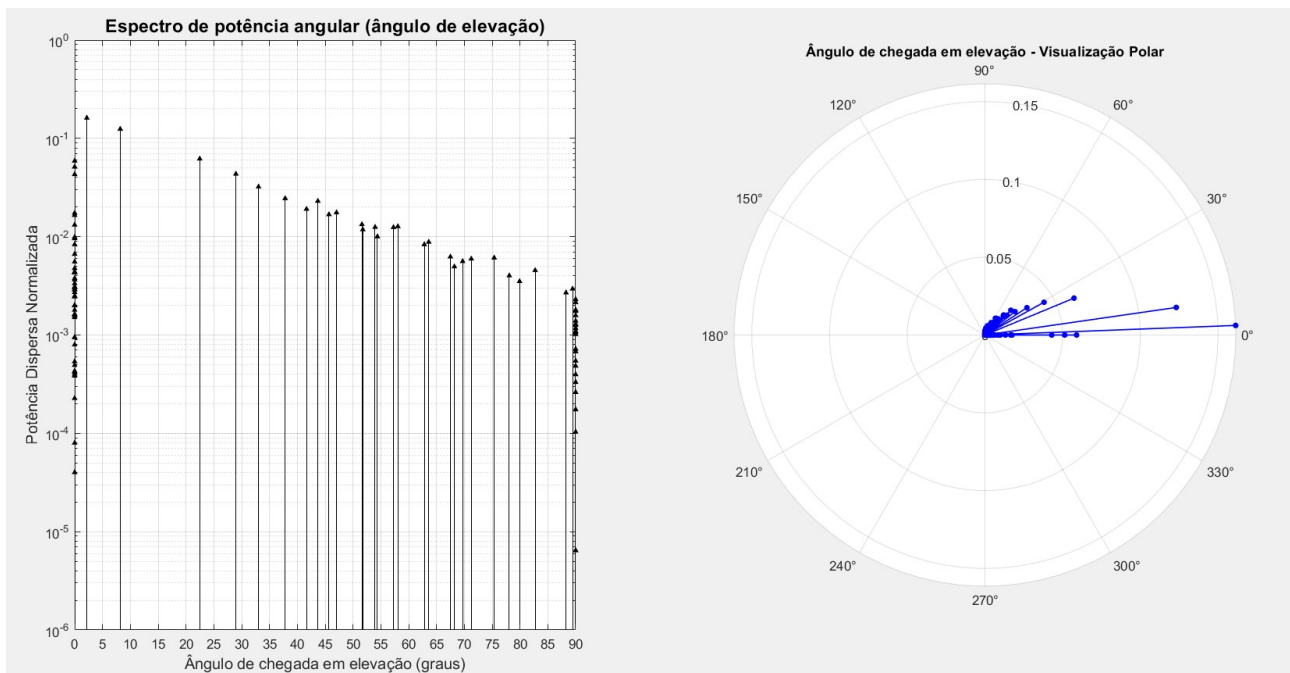


Figura 14: Dispersão da potência nos domínios dos ângulos de chegada em elevação.

d) Com base nos ângulos θ_n e ϕ_n , gere os vetores de direção de chegada (\mathbf{r}_n) das componentes multipercurso. Plote uma visualização desses vetores.

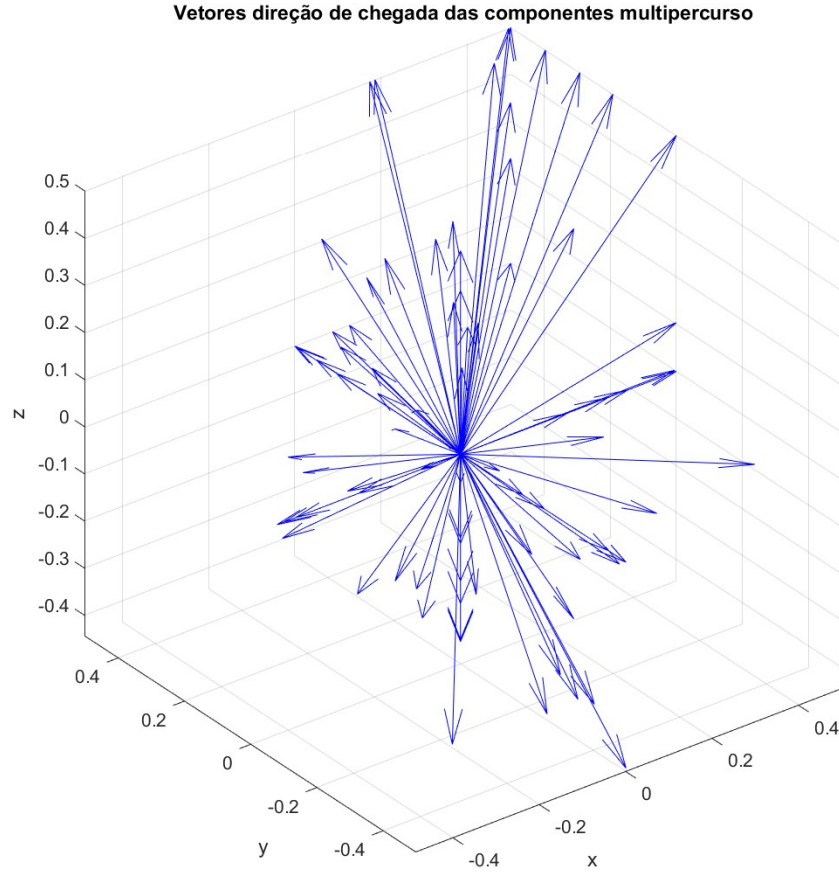


Figura 15: Vetores direção de chegada das componentes multipercurso.

4.4 Desvios Doppler

O desvio Doppler é um fenômeno fundamental em comunicações móveis, caracterizado pela variação da frequência do sinal recebido devido à velocidade relativa entre o transmissor e o receptor, ou entre o receptor e os espalhadores no ambiente.

Em um canal multipercurso, cada componente de sinal que chega ao receptor apresenta um desvio Doppler diferente, que é proporcional à velocidade do terminal e ao ângulo entre o vetor velocidade e a direção de chegada do sinal. O estudo desses desvios é crucial para a caracterização da variação temporal do canal e para a determinação do tempo de coerência.

a) Considerando a metodologia apresentada em sala de aula, defina dois vetores velocidade, com velocidades escalares $v_{rx} = 5$ m/s e $v_{rx} = 50$ m/s para representar a mobilidade do receptor.

Inicialmente, foi calculado o comprimento de onda a partir da frequência central de transmissão, fixada em $f_c = 3$ GHz. Em seguida, definiram-se os ângulos de azimuth e de elevação, escolhidos no intervalo $[0, 2\pi]$ e $[0, \pi]$, respectivamente. Para ambas as situações, adotou-se o valor de $\pi/2$.

Com base nessas informações, foram gerados dois vetores velocidade para representar a mobilidade do receptor, conforme ilustrado na figura abaixo.

```

%% Parte: Desvio Doppler

% Fixe uma velocidade escalar para móvel - (passo 1 38/55)
vr_x_1 = 5;           % [m/s]
vr_x_2 = 50;          % [m/s]

% Calcule o comprimento de onda - (passo 2 38/55)
lambda_fc = 3*10^8/(fc*10^9); % [m]

% Fixe um ângulo azimutal (entre 0 e 2pi) e ângulo de elevação (entre 0 e pi) - (passo 3 38/55)
ang_azim_doppler = pi/2;
ang_elev_doppler = pi/2;

% Cálculo do vetor velocidade do receptor - (passo 4 38/55)
vetor_vel_rx_1 = vr_x_1*[cos(ang_azim_doppler)*sin(ang_elev_doppler); sin(ang_azim_doppler)*sin(ang_elev_doppler); cos(ang_elev_doppler)]; %38/55 (passo 4) - 3x1
vetor_vel_rx_2 = vr_x_2*[cos(ang_azim_doppler)*sin(ang_elev_doppler); sin(ang_azim_doppler)*sin(ang_elev_doppler); cos(ang_elev_doppler)]; %38/55 (passo 4) - 3x1

```

Figura 16: Geração de dois vetores velocidade do receptor no MATLAB.

b) Com base nos vetores \mathbf{r}_n , calcule os termos de desvio Doppler v_n do canal.

A figura a seguir ilustra o procedimento adotado para a geração dos termos de desvio Doppler, calculados a partir de cada vetor de velocidade associado ao deslocamento do receptor.

```

% Cálculo do vetor velocidade do receptor - (passo 4 38/55)
vetor_vel_rx_1 = vr_x_1*[cos(ang_azim_doppler)*sin(ang_elev_doppler); sin(ang_azim_doppler)*sin(ang_elev_doppler); cos(ang_elev_doppler)]; %38/55 (passo 4) - 3x1
vetor_vel_rx_2 = vr_x_2*[cos(ang_azim_doppler)*sin(ang_elev_doppler); sin(ang_azim_doppler)*sin(ang_elev_doppler); cos(ang_elev_doppler)]; %38/55 (passo 4) - 3x1

qtd_blocos = length(r_n)/3;
r_blocos = reshape(r_n, 3, qtd_blocos); % 3 x 100

vel = vetor_vel_rx_1(:); % garante 3x1
desvio_doppler_1 = (1/lambda_fc) * (vel' * r_blocos)'; % 100x1

figure;
subplot(1,2,1)
h = stem(desvio_doppler_1, pot_dispersa_normalizada, 'k', 'filled', 'MarkerSize', 3);
set(h, 'Marker', '^');
xlabel('Desvio Doppler (Hz)', 'FontSize', 12);
ylabel('Potência Dispersa Normalizada', 'FontSize', 12);
title('Dispersão da potência no domínio de desvio Doppler (Vrx = 5m/s)', 'FontSize', 14);
grid on;
set(gca, 'YScale', 'log'); % eixo y em semilog

vel = vetor_vel_rx_2(:); % garante 3x1
desvio_doppler_2 = (1/lambda_fc) * (vel' * r_blocos)'; % 100x1

subplot(1,2,2)
h = stem(desvio_doppler_2, pot_dispersa_normalizada, 'k', 'filled', 'MarkerSize', 3);
set(h, 'Marker', '^');
xlabel('Desvio Doppler (Hz)', 'FontSize', 12);
ylabel('Potência Dispersa Normalizada', 'FontSize', 12);
title('Dispersão da potência no domínio de desvio Doppler (Vrx = 50m/s)', 'FontSize', 14);
grid on;
set(gca, 'YScale', 'log'); % eixo y em semilog

```

Figura 17: Geração dos termos de desvio Doppler.

c) Plote os gráficos da dispersão da potência no domínio de desvio Doppler para os casos com $v_{rx} = 5$ m/s e $v_{rx} = 50$ m/s. Explique as diferenças observadas.

Observou-se que, ao aumentar a velocidade do receptor (v_{rx}) de 5 m/s para 50 m/s (um aumento de 10 vezes), a frequência Doppler máxima e, consequentemente, o espalhamento Doppler também aumentaram por um fator de 10. Isso comprova a relação de proporcionalidade direta $f_D = v_{rx}/\lambda$, onde o comprimento de onda (λ) é mantido constante.

Um espalhamento Doppler 10 vezes maior implica uma variação temporal muito mais rápida do canal (desvanecimento mais acelerado), o que é uma característica de canais mais dinâmicos. Como o tempo de coerência (T_c) é inversamente proporcional ao espalhamento Doppler ($T_c \propto 1/B_D$), o caso com $v_{rx} = 50$ m/s resulta em um tempo de coerência 10 vezes menor do que o caso com $v_{rx} = 5$ m/s. Portanto, o gráfico para $v_{rx} = 50$ m/s apresenta uma largura B_D dez vezes maior, indicando uma perda de coerência temporal muito mais rápida do canal.

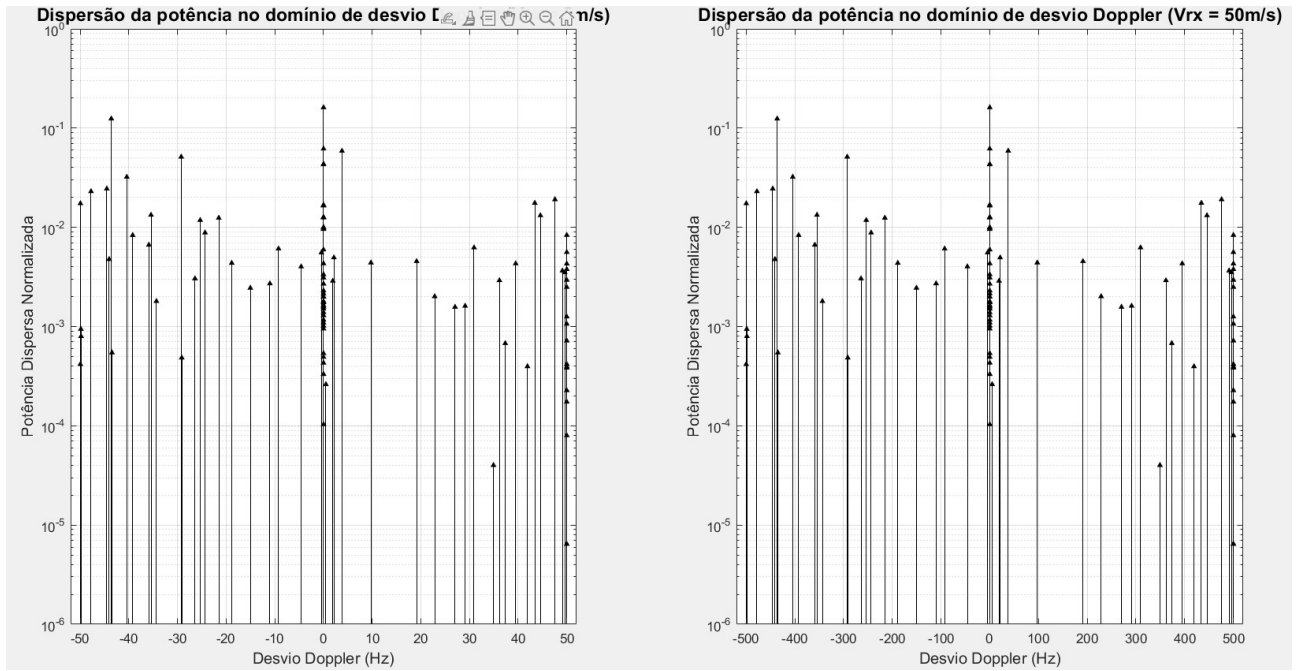


Figura 18: Espectro Doppler.

4.5 Espalhamento Temporal no Sinal Recebido

a) Considerando a metodologia apresentada em sala de aula, gere um pulso retangular de amplitude unitária e largura δt para representar o sinal transmitido. Fixe o domínio do tempo no intervalo $t \in [0, 5 \times \delta t]$. Gere três pulsos diferentes com $\delta t \in \{10^{-7}, 10^{-5}, 10^{-3}\}$ s.

A Figura 19 apresenta o gráfico gerado representando os três pulsos transmitidos, ao passo que a Figura 20 e a Figura 21 representam o algoritmo implementado em MATLAB.

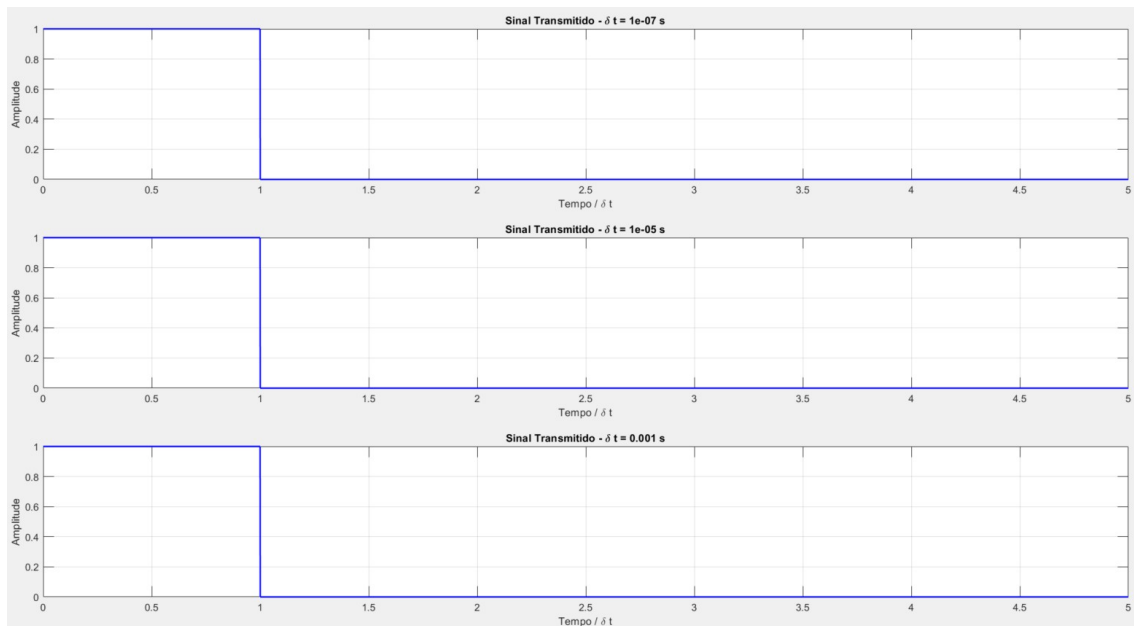


Figura 19: Sinais transmitidos.


```

%% Parte: Determinação do sinal recebido considerando a caracterização multipercurso gerada nos passos anteriores

% Gere três pulsos diferentes com  $\delta t \in \{10^{-7}, 10^{-5}, 10^{-3}\}$  s

deltas = [1e-7, 1e-5, 1e-3]; % três larguras de pulso
Nt = 1e5; % número de amostras
fc = 3; %[GHz]

% Gera e armazena os sinais transmitidos (letra A da parte 5 do projeto)
sinais_tx = cell(length(deltas), 1);
tempos = cell(length(deltas), 1);

for k = 1:length(deltas)
    delta_t = deltas(k);
    [t, s_tx] = gerar_pulso(0, delta_t, Nt); % pulso transmitido
    sinais_tx{k} = s_tx;
    tempos{k} = t;
end

% Exibir os três sinais transmitidos em subplots
figure;
for k = 1:length(deltas)
    subplot(3,1,k);
    plot(tempos{k}/deltas(k), real(sinais_tx{k}), 'b', 'LineWidth', 1.5);
    grid on;
    xlabel('Tempo / \delta t');
    ylabel('Amplitude');
    title(['Sinal Transmitido - \delta t = ', num2str(deltas(k)), ' s']);
end

```

Figura 20: Algoritmo para geração do sinal transmitido.

```

function [t, s] = gerar_pulso(atraso, delta_t, Nt)
% gerar_pulso - Gera um pulso transmitido s(t)
%
% Entradas:
%   atraso - atraso inicial do pulso (s)
%   delta_t - largura do pulso (s)
%   Nt - número de amostras do domínio temporal
%
% Saídas:
%   t - vetor tempo absoluto t  $\in [0, 5 \cdot \delta t]$ 
%   s - vetor do pulso transmitido s(t)

% --- 1) Definir o vetor tempo ---
t = linspace(0, 5*delta_t, Nt); % tempo absoluto

% --- 2) Gerar o pulso ---
% Aqui usamos um pulso retangular centrado no atraso inicial
% O pulso vale 1 durante [atraso, atraso + delta_t] e 0 fora
s = double(t >= atraso & t <= atraso + delta_t);

end

```

Figura 21: Algoritmo para geração do sinal transmitido - Função gerar pulso.

b) Determine o sinal recebido considerando a caracterização multipercurso gerada nos passos anteriores, considerando que o termo de fase é variante no tempo.

O sinal recebido é obtido por meio do algoritmo apresentado na Figura 25

```
% Loop completo de multipercurso
for k = 1:length(deltas)
    delta_t = deltas(k);
    sinal_recebido = zeros(1, Nt);
    [t, s_tx] = gerar_pulso(0, delta_t, Nt);

    % Determinação do sinal recebido (letra B da parte 5 do projeto)
    for n = 1:length(componente_multipercurso_ordenado)
        [t, s] = gerar_pulso(componente_multipercurso_ordenado(n), delta_t, Nt);
        componente = sqrt(pot_dispersa_normalizada(n)) .* ...
            exp(-1j*2*pi*((fc + desvio_doppler_1(n))*componente_multipercurso_ordenado(n) - desvio_doppler_1(n)*t)) .* s;
        sinal_recebido = sinal_recebido + componente;
    end

    % Plot comparativo: sinal tx x sinal rx (letra C da parte 5 do projeto)
    figure;
    plot(t/delta_t, real(s_tx), 'b', 'LineWidth', 1.5); hold on;
    plot(t/delta_t, real(sinal_recebido), 'r--', 'LineWidth', 1.5);
    xlabel('Tempo / \delta t');
    ylabel('Amplitude');
    legend('Sinal Transmitido', 'Sinal Recebido');
    title(['NLoS - \delta t = ', num2str(delta_t), ' s, \sigma_{\tau} = ', num2str(espalhamento_multip_linear*1e9), ' ns']);
    grid on;
end
```

Figura 22: Algoritmo para obtenção do sinal recebido.

c) Plote os gráficos do sinal recebido para os três casos de sinal transmitido (considerando o mesmo canal). Explique as diferenças observadas.

A seguir são apresentados os gráficos dos sinais recebidos para os três casos de sinal transmitido.

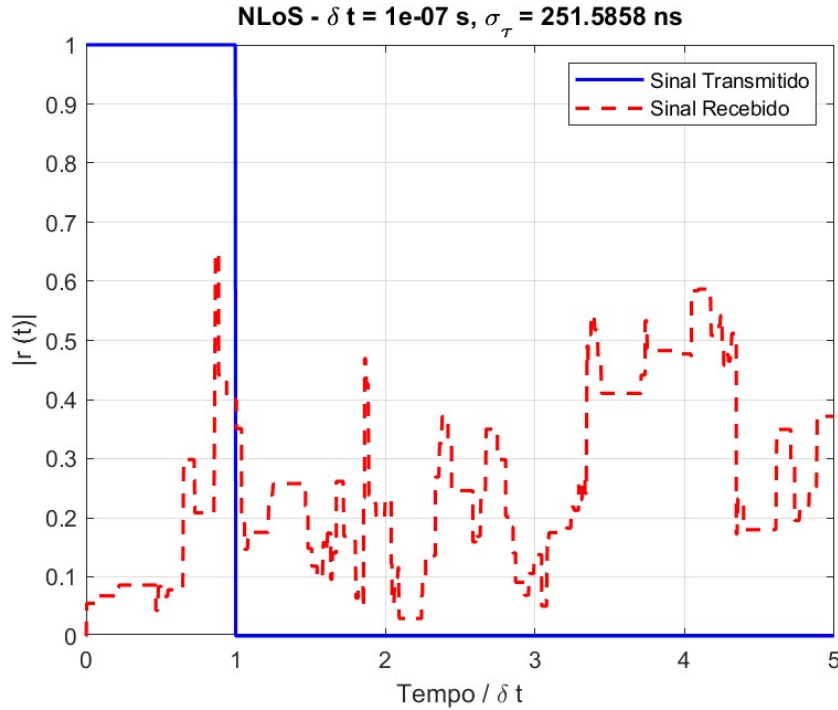


Figura 23: Sinal recebido: $\delta t = 10^{-7}$.

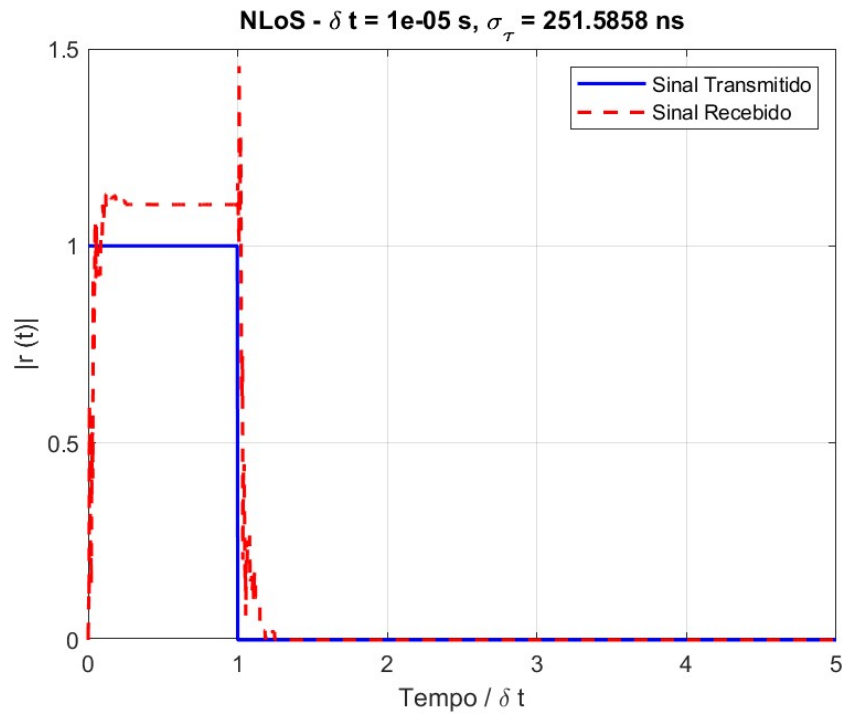


Figura 24: Sinal recebido: $\delta_t = 10^{-5}$.

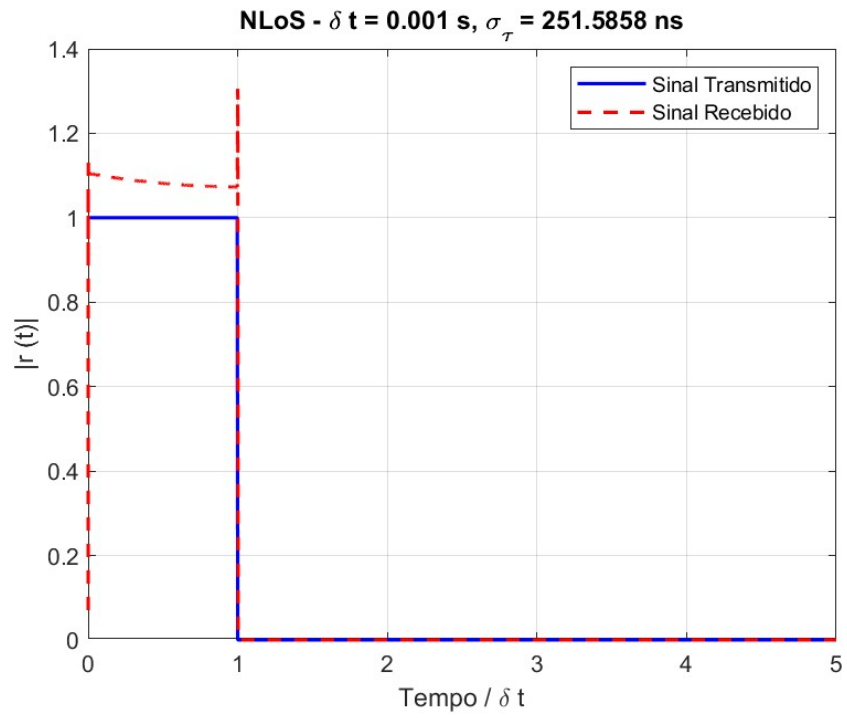


Figura 25: Sinal recebido: $\delta_t = 10^{-3}$.

Quando a largura do pulso transmitido é muito menor que o espalhamento de atraso do canal, os múltiplos percursos com atrasos distintos chegam ao receptor em instantes de tempo significativamente diferentes em relação à duração original do pulso. Isso faz com que a energia do pulso seja "espalhada" ou "espichada" no tempo. Consequentemente, a duração do sinal recebido passa a ser dominada pelo próprio canal (pelos seus atrasos), e não pelo pulso original, resultando em uma propagação várias vezes maior que δt (no caso estudado, aproximadamente $5\delta t$).

Considerando um pulso com $\delta t = 10^{-5}$ s ($10 \mu\text{s}$) e espalhamento de atraso do canal $\sigma_\tau = 0.61 \mu\text{s}$, a duração do pulso já é maior que o espalhamento de atraso. Nesse cenário, o canal se comporta como não seletivo em frequência (ou plano) para este sinal. Os multipercursos ainda causam interferência, mas como todos os atrasos chegam dentro de uma janela de tempo pequena comparada à duração do pulso ($\sigma_\tau \ll \delta t$), o espalhamento relativo é muito menor. O pulso sofre algum alargamento, mas de forma moderada, aproximadamente $1.5\delta t$.

Quando o pulso é muito longo, por exemplo $\delta t = 10^{-3}$ s (1 ms) e $\sigma_\tau = 0.00061$ ms, o espalhamento de atraso do canal é insignificante em relação à duração do pulso. Neste caso, o canal é totalmente não seletivo, e os multipercursos causam apenas desvanecimento, sem alterar perceptivelmente a forma do pulso. O sinal recebido apresenta praticamente a mesma duração do sinal transmitido, pois a dispersão temporal introduzida pelo canal é desprezível em relação à escala de tempo do sinal.

De forma geral, o efeito de alargamento temporal é mais severo quando a "resolução" do sinal (sua duração) é menor que a "resolução" do canal (seu espalhamento de atraso). Quanto mais curto o pulso, mais ele revela a dispersão temporal inerente ao canal.

4.6 Banda de Coerência e Tempo de Coerência

a) Determine a função de autocorrelação $\rho_{tt}(k, \sigma)$ do canal.

Em virtude da grande quantidade de linhas de código que foram necessárias para esta implementação, a função de autocorrelação do canal poderá ser constatada por meio do programa que será disponibilizado na plataforma GitHub.

b) Plote $\rho_{tt}(k, 0)$ em função de K (expresso em MHz) e determine a banda de coerência do canal para $\rho_B = 0.95$ e $\rho_B = 0.90$.

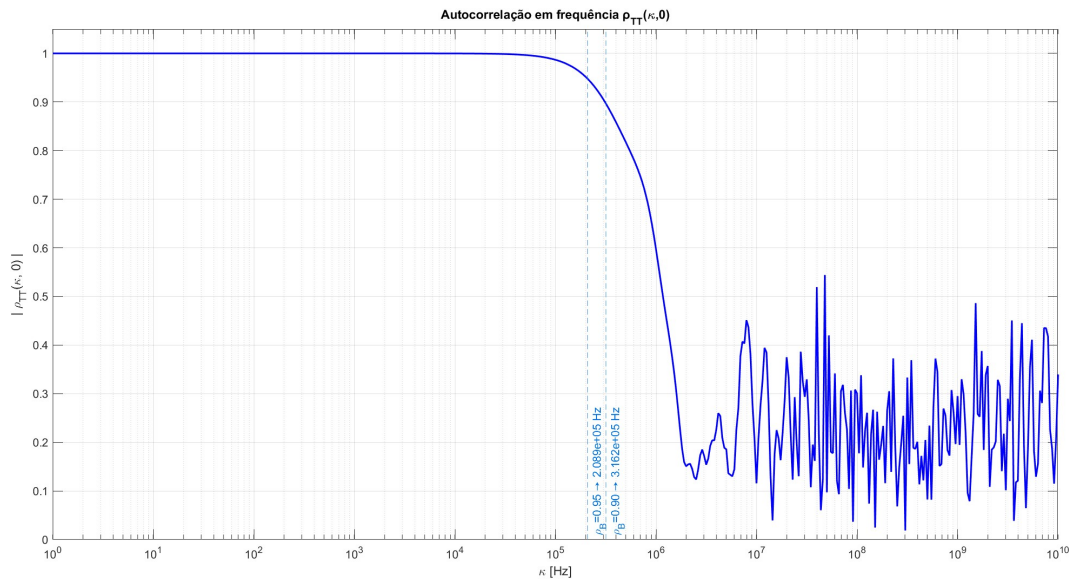


Figura 26: Gráfico de autocorrelação em frequência do canal.

c) Plote $\rho_{tt}(0, \sigma)$ em função de σ (expresso em ms) e determine o tempo de coerência do canal para $\rho_T = 0.95$ e $\rho_T = 0.90$, considerando as velocidades $v_{rx} = 5$ m/s e $v_{rx} = 50$ m/s. Explique as diferenças observadas.

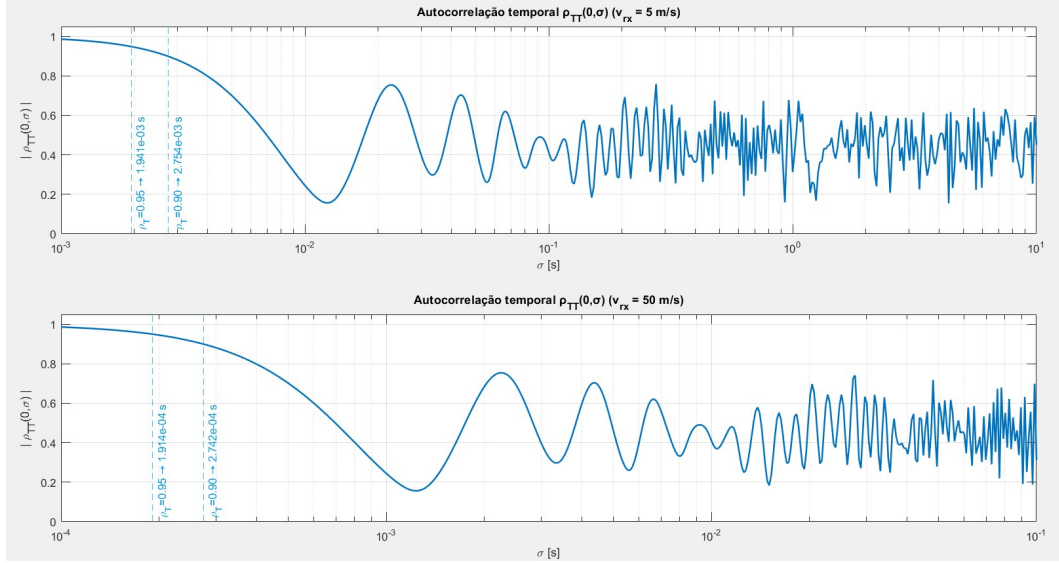


Figura 27: Gráfico de autocorrelação temporal do canal.

Os valores de 0,90 e 0,95 representam níveis de correlação (ou similaridade) comumente utilizados como referências práticas na caracterização de canais de comunicação. Esses limiares indicam até que ponto o canal pode ser considerado “semelhante” em frequência ou em tempo, sendo amplamente adotados em estudos de propagação e modelagem de canais sem fio.

A autocorrelação em frequência caracteriza a seletividade em frequência do canal. A partir dela, é possível determinar a banda de coerência, que representa a faixa de frequências dentro da qual as respostas do canal permanecem altamente correlacionadas. Em outras palavras, dentro da banda de coerência, duas componentes espectrais do sinal sofrem efeitos de canal semelhantes.

No gráfico de autocorrelação em frequência, o eixo vertical (eixo y) representa o limiar de autocorrelação, e valores como 0,90 e 0,95 são utilizados para definir o ponto onde o canal deixa de ser considerado correlacionado em frequência. Esses limiares são padrões convencionais em telecomunicações para indicar a “semelhança” espectral do canal.

A autocorrelação temporal é uma das ferramentas fundamentais na caracterização de canais móveis. A partir dela, obtém-se o tempo de coerência, que indica por quanto tempo o canal pode ser considerado invariante antes de sofrer variações significativas. De forma análoga à banda de coerência no domínio da frequência, o tempo de coerência mede a estabilidade temporal do canal. Assim, quanto mais alta for a autocorrelação temporal, mais lentamente o canal varia no tempo.

5 Resultados e Análise

Os resultados da simulação evidenciaram o comportamento do canal de comunicação sem fio no cenário UMa-NLoS.

O espalhamento de atraso (σ_t) apresentou valor médio de $0,6102 \mu s$, coerente com a faixa típica para macrocélulas urbanas, verificando-se que sua média diminui com o aumento da frequência devido à maior atenuação em trajetórias longas.

A análise das direções de chegada confirmou um significativo espalhamento angular, enquanto os desvios Doppler mostraram proporcionalidade direta com a velocidade do receptor:

ao aumentar de 5 m/s para 50 m/s , o espalhamento Doppler teve seu valor multiplicado por 10, reduzindo o tempo de coerência em uma ordem de grandeza.

Na análise do espalhamento temporal, observou-se que pulsos mais curtos sofrem maior dispersão relativa: para $\delta t = 10^{-7}\text{ s}$ ($\ll \sigma_t$), o pulso se propagou por aproximadamente $5\delta t$; para $\delta t = 10^{-5}\text{ s}$ ($> \sigma_t$), a duração foi de $1,5\delta t$; e para $\delta t = 10^{-3}\text{ s}$ ($\gg \sigma_t$), o pulso manteve sua duração original. Este fenômeno demonstra que a dispersão temporal é mais pronunciada quando a duração do pulso é menor que o espalhamento de atraso do canal, revelando a seletividade em frequência do mesmo.

6 Conclusão

Conclui-se que a modelagem e simulação baseadas no padrão 3GPP TR 38.901 permitiram reproduzir com sucesso as características de um canal seletivo em frequência em condições realistas de propagação.

A abordagem adotada possibilitou a análise detalhada de parâmetros como espalhamento temporal, angular e Doppler, fundamentais para o projeto de sistemas de comunicação robustos e eficientes.

O trabalho reforça a importância da simulação computacional como ferramenta indispensável para a compreensão e otimização de sistemas de comunicações móveis modernos, especialmente em cenários dinâmicos e não visados.

7 Referências

3GPP. **Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16)**. Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2020. Disponível em: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.901/. Acesso em: 17 set. 2025.

BOBAN, M., Degli-Esposti, V., et al. **White Paper on Radio Channel Modeling and Prediction to Support Future Environment-aware Wireless Communication Systems**. arXiv:2309.17088, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2309.17088>. Acesso em: 20 set. 2025.

LIU, Bao; OTIS, Brian; CHALLA, Subhash; AXON, Paul; CHOU, Chun Tung; JHA, Sanjay. **The impact of fading and shadowing on the network performance of wireless sensor networks**. *International Journal of Sensor Networks (IJSNet)*, v. 3, p. 211–223, jan. 2008. DOI: 10.1504/IJSNET.2008.019006. Acesso em: 05 out. 2025.

RAPPAPORT, Theodore S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

SILVA, Higo Thaian Pereira da. **Tópicos em Engenharia. Fundamentos de Modelagem e Simulação do Canal de Comunicações Sem Fio: Geração dos Parâmetros do Canal de Comunicação Sem Fio** [slides]. Universidade de Brasília, 07 abr. 2025.

STÜBER, Gordon L. **Principles of Mobile Communication**. 2. ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

WANG, Cheng-Xiang; BIAN, Ji; SUN, Jian; ZHANG, Wensheng; ZHANG, Minggao. **A survey of 5G channel measurements and models**. *IEEE Communications Surveys and*

Tutorials, v. 20, n. 4, p. 3142-3168, 4th Quarter 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2862141>. Acesso em: 18 set. 2025.