



**UnB**

# Relatório do Projeto I de Comunicações Móveis

## Modelagem de Canal 3GPP TR 38.901 (UMa NLoS @ 3 GHz)

Alcyone César Pereira Silva

6 de outubro de 2025

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Orientações gerais</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Modelo e parâmetros principais</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Respostas aos questionamentos do trabalho</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Resultados e discussões</b>	<b>5</b>
5.1	Atraso multipercurso e PDP . . . . .	5
5.2	Espalhamento de atraso vs. frequência . . . . .	5
5.3	Direções de chegada (DoA) . . . . .	8
5.4	Desvios Doppler . . . . .	8
5.5	Pulsos transmitidos e sinal recebido (canal flat) . . . . .	8
5.6	Autocorrelação temporal e tempo de coerência . . . . .	8
5.7	Correlação em frequência e banda de coerência . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>8</b>

# 1 Introdução

Este relatório sintetiza as simulações do *canal de comunicações sem fio* segundo o modelo 3GPP TR 38.901, cenário UMa NLoS, com frequência da portadora  $f_c = 3$  GHz e  $N = 100$  componentes multipercurso. As simulações foram implementadas em Python (arquivo `modelagem_de_canal_3GPP.py`) e geram automaticamente as figuras na pasta `C:\New_sharc\Graficos_Canal`. O arquivo em Python está disponível no GitHub, no seguinte link:

[https://github.com/AlcyoneCesar/Com\\_Mov.git](https://github.com/AlcyoneCesar/Com_Mov.git).

Observação:

Durante a execução desse trabalho, contei com o auxílio da inteligência artificial (ChatGPT) nos seguintes pontos:

Agilização da programação em Python;

Sugestões de adequação da formatação do relatório e da apresentação de slides; Sugestões de revisão nos textos originais de entrada.

Os resultados apresentados seguem o roteiro do projeto (atraso, potência, direções, Doppler, pulsos e correlações) e são comentados ao longo das seções.

## 2 Orientações gerais

**Como executar.** No VS Code ou terminal:

```
python modelagem_de_canal_3GPP.py
```

**Saída.** As figuras são salvas em `C:\New_sharc\Graficos_Canal`.

**Reprodutibilidade.** O gerador aleatório está fixado com `np.random.default_rng(42)`.

Versão do script: `SCRIPT_VERSION: 6`.

**Convenções.** Neste relatório usamos  $\varphi$  como **elevação** (coerente com a construção dos vetores de direção  $\mathbf{r}_n$  e do vetor de movimento  $\hat{\mathbf{v}}$ ).

## 3 Modelo e parâmetros principais

Modelo 3GPP TR 38.901, cenário urbano macro (UMa), condição NLoS. A modelagem é não-geométrica estocástica. O espalhamento de atraso (RMS,  $\sigma_\tau$ ) foi calculado de acordo com os dados da Tabela 1 dos slides da aula, em escala logarítmica, e posteriormente convertido para linear, seguindo o modelo do 3GPP; os atrasos  $\tau_n$  seguem exponencial, deslocados para iniciar em zero. O sombreamento multipercurso (em dB) é Gaussiano. O perfil de atraso de potência (PDP) é normalizado para soma unitária.

## Definições usadas

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N P_n \tau_n, \quad (1)$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N P_n (\tau_n - \bar{\tau})^2}, \quad (2)$$

$$\rho_T(\sigma) = \frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N P_n e^{j2\pi f_{D,n} \sigma}, \quad \rho_B(\kappa) = \frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N P_n e^{-j2\pi \kappa \tau_n}, \quad (3)$$

onde  $P_n$  é a potência normalizada (soma = 1) e  $f_{D,n}$  os deslocamentos Doppler.

## 4 Respostas aos questionamentos do trabalho

### Q1 — Espalhamento de atraso e estatísticas

**(a) Definição e estimação.** O espalhamento de atraso (RMS), denotado por  $\sigma_\tau$ , mede a *largura efetiva* do perfil de atraso de potência (PDP). Com  $P_n$  normalizado (soma = 1) e atrasos  $\tau_n$ , usamos

$$\bar{\tau} = \sum_n P_n \tau_n, \quad \sigma_\tau = \sqrt{\sum_n P_n (\tau_n - \bar{\tau})^2}.$$

No script,  $\sigma_\tau$  é sorteado a partir de uma regressão do 3GPP (em escala  $\log_{10}$ ) e depois *recalculado* a partir do PDP gerado, conferindo consistência (ver Fig. 1 e mensagem de log impressa no console).

**(b) Distribuições associadas.** Para larga escala,  $\log_{10}(\sigma_\tau)$  segue *Gaussiana*, logo  $\sigma_\tau$  é *lognormal* em escala linear. Para o conjunto de atrasos de *múltiplos caminhos* (curto prazo), é comum modelar  $\tau_n$  com distribuição *exponencial* com média proporcional a  $\sigma_\tau$ , enquanto flutuações de potência por caminho (em dB) seguem *Gaussiana* (sombreamento pequeno-escala).

**(c) Curvas de média e desvio-padrão vs. frequência.** A Fig. 2 mostra a variação da *média* de  $\sigma_\tau$  (em  $\mu\text{s}$ ) entre 0.5 GHz e 100 GHz, obtida da formulação do 3GPP. Observa-se a tendência de redução do espalhamento médio com o aumento de frequência, coerente com o modelo (cenário UMa NLoS).

### Q2 — Geração dos parâmetros multipercurso (PDP)

A sequência seguida foi: (i) cálculo de  $\sigma_\tau$ ; (ii) geração de  $N = 100$  atrasos  $\tau_n$  via exponencial e *deslocamento* para iniciar em 0; (iii) aplicação de sombreamento lognormal em dB; (iv) perfil  $P_n$  com decaimento exponencial e normalização para soma unitária. A Fig. 1 apresenta o *PDP vs. atraso*, com cauda exponencial típica e espalhamento coerente com o valor sorteado. O recálculo de  $\sigma_\tau$  via  $\{\tau_n, P_n\}$  coincide (a pequenas diferenças de amostragem) com o sorteio inicial.

### Q3 — Direções de chegada (DoA)

As direções foram sintetizadas por azimute  $\theta_n$  e elevação  $\varphi_n$ , gerando vetores unitários  $\mathbf{r}_n$ . A Fig. ??A mostra um gráfico tridimensional com as direções de chegada. Fig. 3 detalha: (i) um *leque polar* com as 100 barras de azimute (altura e cor  $\propto P_n$ ), tornando visível a contribuição de cada chegada; (ii) a *elevação por caminho* (gráfico *stem*), onde todos os 100 componentes aparecem, mesmo com sobreposição parcial. O padrão angular é aleatório nesta realização.

### Q4 — Desvios Doppler

Para velocidade  $v_{\text{rx}}$  e comprimento de onda  $\lambda_c$ , o desvio de cada caminho é  $f_{D,n} = (v_{\text{rx}}/\lambda_c) \mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{v}}$ , limitado por  $|f_{D,n}| \leq f_{\text{max}} = v_{\text{rx}}/\lambda_c$ . Com  $v_{\text{rx}} = 10 \text{ m/s}$  e  $f_c = 3 \text{ GHz}$ , temos  $f_{\text{max}} \approx 100 \text{ Hz}$ . A massa de probabilidade concentra-se dentro de  $\pm f_{\text{max}}$ , variando conforme o espalhamento angular desta realização.

### Q5 — Pulsos transmitidos e sinal recebido (canal flat)

No caso *narrowband*, o sinal recebido baseband é  $r(t) = h(t)s(t)$ , onde  $h(t)$  agrega as rotações de fase Doppler ponderadas por  $\sqrt{P_n}$ . As figuras (a), (b) e (c) sobrepõem  $TX$  vs.  $RX$  para pulsos retangulares de larguras  $\delta t \in \{10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-7}\} \text{ s}$  em janelas  $[0, 5\delta t]$  (zoom), além do módulo  $|h(t)|$  de referência. Observa-se que, dentro da janela do pulso, o módulo de  $r(t)$  segue  $|h(t)|$  (comportamento *flat*); fora da janela,  $r(t) = 0$ . Em  $\delta t$  muito pequenos, a janela é estreita, e o zoom adotado torna a comparação legível.

### Q6 — Correlações e métricas de coerência (Bc, Tc)

A ACF temporal teórica do canal é (com  $P_n$  normalizado)

$$\rho_T(\sigma) = \sum_n P_n e^{j2\pi f_{D,n}\sigma},$$

enquanto a correlação em frequência (Fourier do PDP) é

$$\rho_B(\kappa) = \sum_n P_n e^{-j2\pi\kappa\tau_n}.$$

**Banda de coerência.** A Fig. 6 traz  $|\rho_B(\kappa)|$  (eixo em MHz) e marca as bandas de coerência  $B_c$  para  $\rho = \{0.95, 0.90\}$  no *primeiro cruzamento*. Os valores numéricos ficam indicados na legenda. Em termos de ordem de grandeza, regras de bolso como  $B_c \approx 1/(5\sigma_\tau)$  (para correlação alta) ajudam a interpretar o resultado em função do espalhamento de atraso desta realização.

**Tempo de coerência.** A Fig. 5 mostra  $|\rho_T(0; \sigma)|$  para  $v_{\text{rx}} \in \{5, 50\} \text{ m/s}$  (eixo em ms), com as linhas verticais para  $\rho = \{0.95, 0.90\}$ . **Os valores de  $T_c$  (para cada limiar e velocidade) já aparecem no título da figura.** Observa-se que  $T_c$  *diminui* quando a velocidade *aumenta*, pois  $f_{\text{max}} = v_{\text{rx}}/\lambda_c$  cresce e a decorrelação temporal acelera. Para referência, uma aproximação clássica é  $T_c \approx 0.423/f_{\text{max}}$  (ordem de grandeza).

**Síntese.** Os gráficos confirmam o comportamento esperado: (i) PDP com cauda exponencial e  $\sigma_\tau$  consistente; (ii) dispersão angular visível em azimute e elevação; (iii) Doppler

limitado por  $f_{\max}$ ; (iv) no regime *flat*,  $r(t)$  segue  $h(t)$  dentro da janela do pulso; (v)  $B_c$  inversamente relacionado a  $\sigma_\tau$ ; (vi)  $T_c$  inversamente relacionado a  $f_{\max}$  (logo, à velocidade).

## 5 Resultados e discussões

### 5.1 Atraso multipercurso e PDP

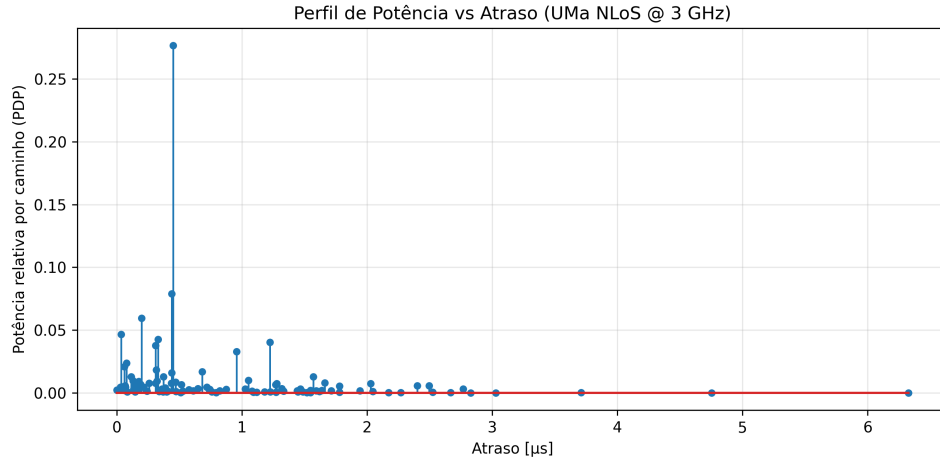


Figura 1: Perfil de potência vs. atraso (PDP).

### 5.2 Espalhamento de atraso vs. frequência

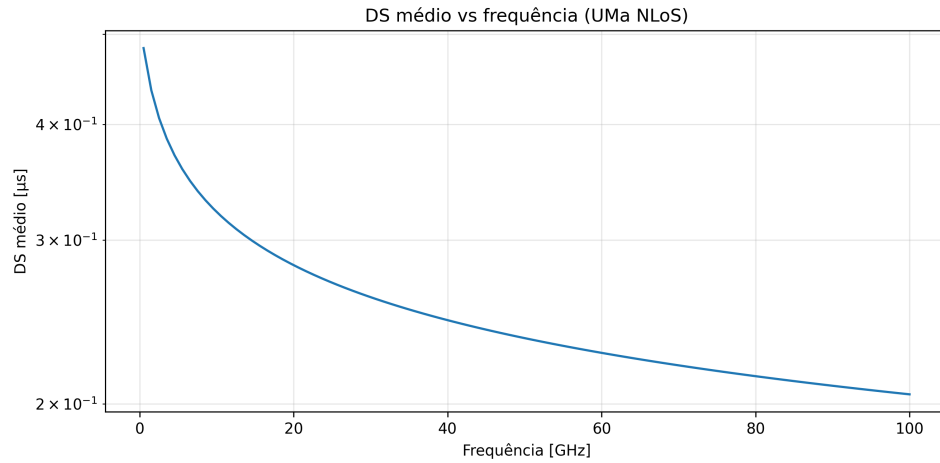
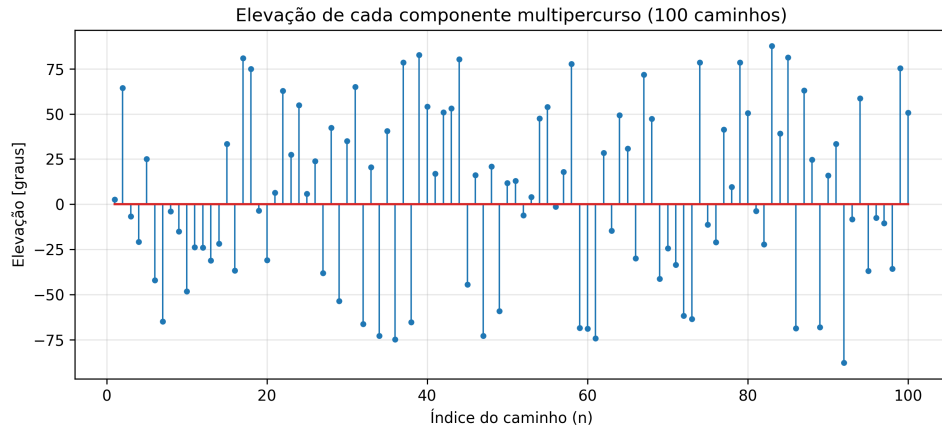
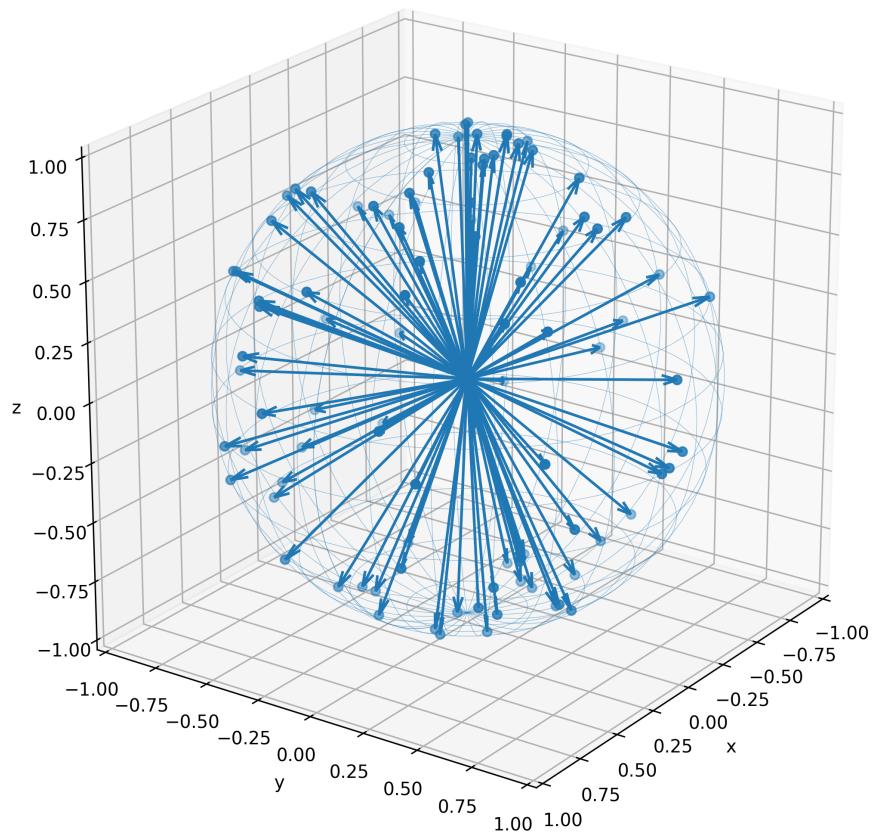


Figura 2: Média de  $\sigma_\tau$  vs. frequência (em  $\mu\text{s}$ ).



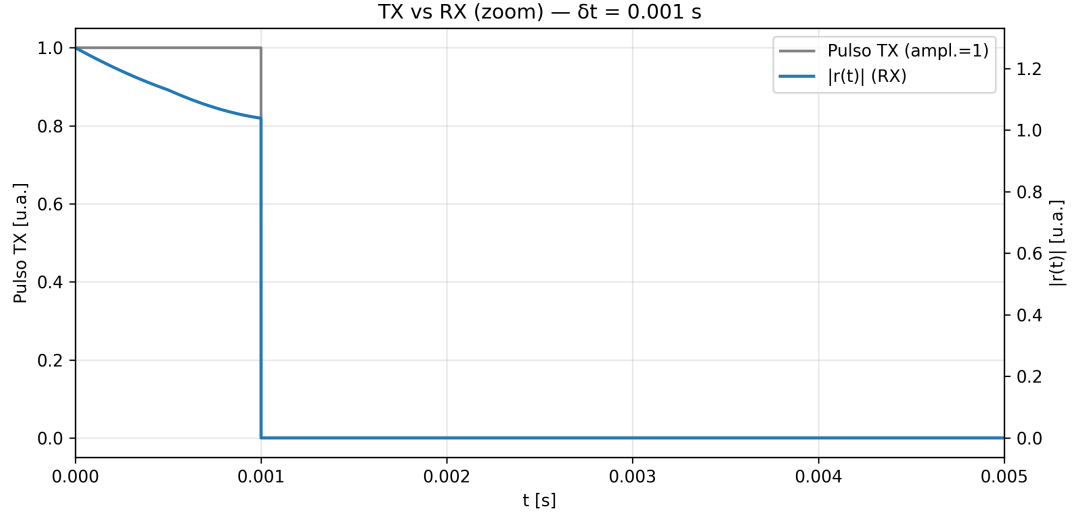
(a) Elevação por caminho (100 componentes).

Direções de Chegada (DoA)

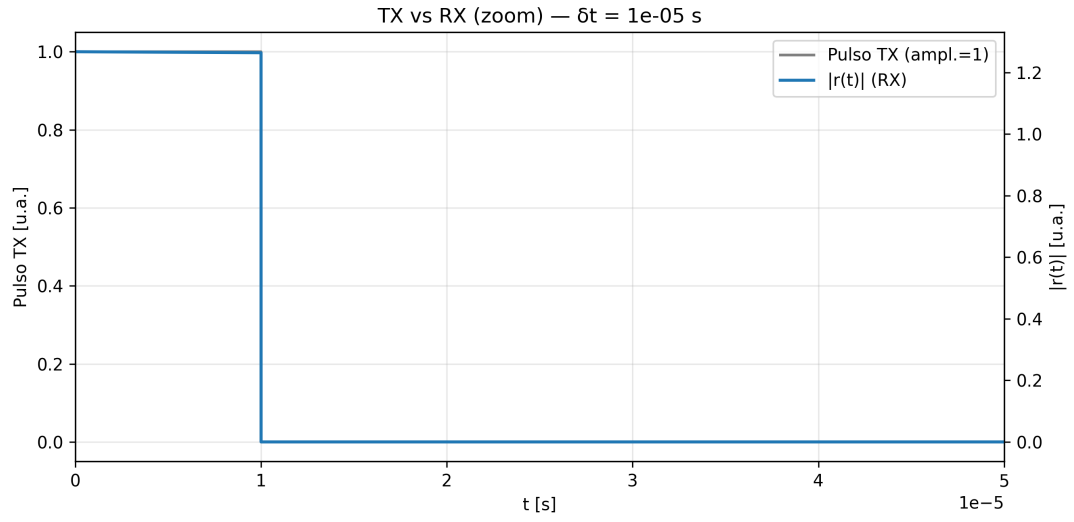


(b) Direções de chegada (DoA)

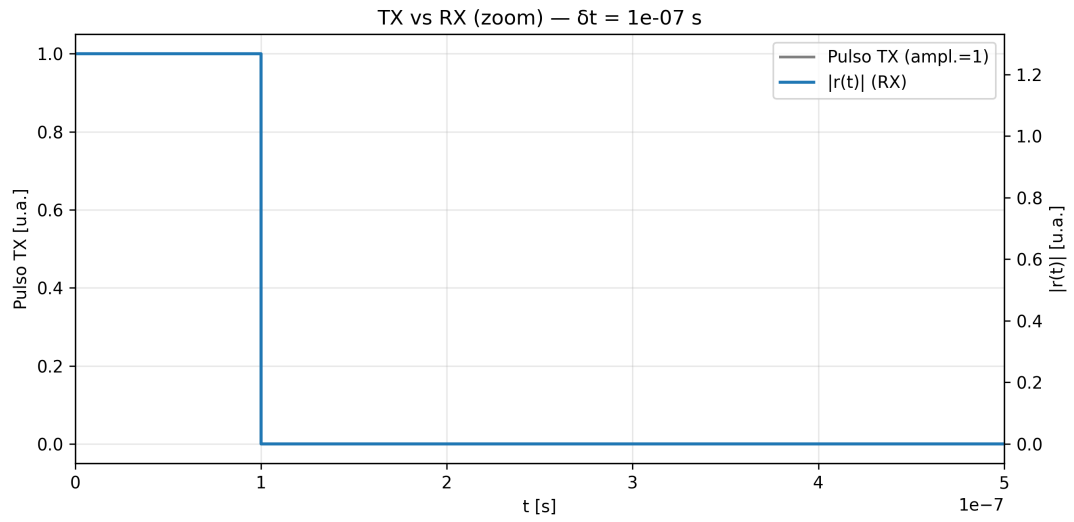
Figura 3: Direções de chegada: azimuth e elevação (3 D).



(a)  $\delta t = 1 \times 10^{-3}$  s (zoom  $[0, 5\delta t]$ ).



(b)  $\delta t = 1 \times 10^{-5}$  s (zoom  $[0, 5\delta t]$ ).



(c)  $\delta t = 1 \times 10^{-7}$  s (zoom  $[0, 5\delta t]$ ).

### 5.3 Direções de chegada (DoA)

### 5.4 Desvios Doppler

### 5.5 Pulsos transmitidos e sinal recebido (canal flat)

### 5.6 Autocorrelação temporal e tempo de coerência

ACF temporal teórica (ponderada por potência):

$$\rho_T(\sigma) = \sum_n P_n e^{j2\pi f_{D,n} \sigma}.$$

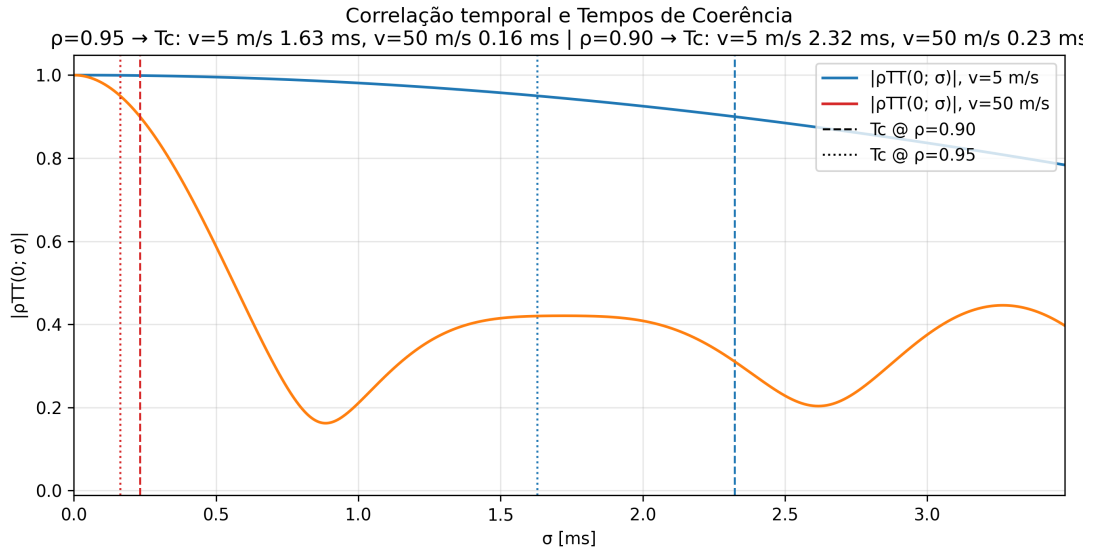


Figura 5: Correlação temporal  $|\rho_T(0; \sigma)|$  e tempos de coerência (rótulo traz os valores de  $T_c$  para  $\rho = \{0.95, 0.90\}$  em  $v = \{5, 50\}$  m/s).

### 5.7 Correlação em frequência e banda de coerência

$$\rho_B(\kappa) = \sum_n P_n e^{-j2\pi\kappa\tau_n}. \quad (4)$$

## 6 Conclusões

A simulação realizada demonstrou uma boa coerência com os resultados esperados, dado o cenário proposto, que foi UMa NLOS. Também como esperado, nenhuma componente multipercurso se destacou exageradamente em relação às outras, visto que não existia componente de visada direta, o que nos fez adotar o fator de Rice diretamente igual a zero. Tivemos um pouco de dificuldade para ajustar o zoom na parte que tratou dos sinais transmitidos e recebidos, pois as janelas de tempo que foram analisadas eram muito pequenas e o período do sinal ainda menor. Num próximo momento, seria interessante adaptar o código para que ele pudesse simular qualquer um dos cenários previstos na regulamentação do Modelo 3GPP TR 38.901. Infelizmente, para esse trabalho, não foi possível alcançar esse ponto.



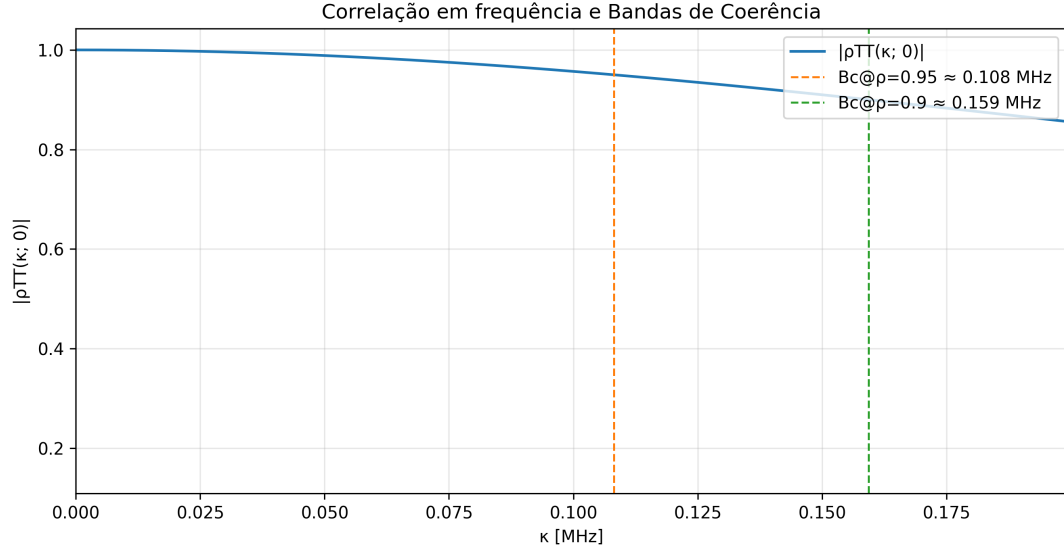


Figura 6: Correlação em frequência  $|\rho_B(\kappa)|$  e bandas de coerência ( $\rho = \{0.95, 0.90\}$ ).

## Apêndice A — Parâmetros e anotações

Tabela 1: Parâmetros usados (exemplo).

Parâmetro	Símbolo	Valor
Portadora	$f_c$	3 GHz
Componentes	$N$	100
Velocidades	$v_{rx}$	5 / 10 / 50 m/s

Modelo 3GPP TR 38.901 Notas de aula. ChatGPT (IA)