



Universidade de Brasília  
Departamento de Engenharia Elétrica  
**Tópicos em Engenharia: Fundamentos de  
Modelagem e Simulação do Canal de  
Comunicações Sem Fio – ENE0332**  
Trabalho 1

Professor: Higo Thaian Pereira da Silva  
Aluno: Artur Padovesi Piratelli  
Matrícula: 211038208  
28 de abril de 2025

## 1 Introdução

O objetivo deste projeto é implementar modelos simplificados, especificados em [3], para simulação dos canais UMi e UMa advindos de [1]. É também utilizar o simulador para analisar o cenário UMi NLoS.

A implementação foi feita em código Python e disponibilizada no link [github.com/artistrea/3gpp-alike-sim](https://github.com/artistrea/3gpp-alike-sim).

## 2 Simulador

O simulador deve permitir obter um sinal recebido a partir de informações sobre o cenário e de um sinal transmitido. Conforme a equação (14) de [2] a envoltória complexa ou representação banda base do sinal recebido pode ser dada em termos da equação

$$\tilde{r}(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-j2\pi[(f_c + \nu_n)\tau_n - \nu_n t]} \cdot \tilde{s}(t - \tau_n), \quad (1)$$

onde:

$N$  é a quantidade de componentes multipercurso

$\tilde{s}(t)$  é a envoltória do sinal transmitido

$\alpha_n$  é a intensidade da componente  $n$

$\nu_n$  é o desvio Doppler da componente  $n$

$\tau_n$  é o atraso temporal da componente  $n$

Portanto, para simular o sinal recebido, é necessário gerar ou calcular os valores de  $\alpha_n$ ,  $\nu_n$  e  $\tau_n$  para cada uma das  $N$  componentes multipercurso. Foi então desenvolvido um simulador com o fluxograma da Figura 1.

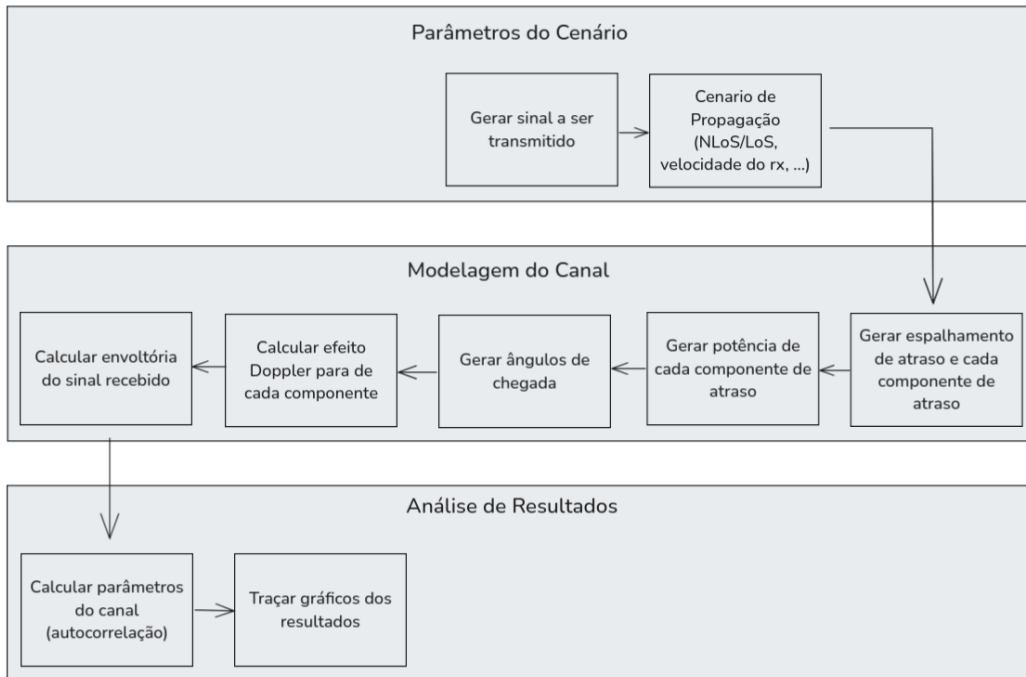


Figura 1: Fluxograma do Simulador

## 2.1 Modelagem do Canal

O canal é modelado usando o seguinte algoritmo:

1. Para gerar os atrasos  $\tau_n$ :
  - (a) Gera-se um espalhamento de atraso aleatório  $\sigma_\tau = 10^{\sigma_{\tau;\log}}$  [s], onde  $\sigma_{\tau;\log} \sim \mathcal{N}(\mu_{\sigma_{\tau;\log}}, \sigma_{\sigma_{\tau;\log}}^2)$ , sendo  $\mu_{\sigma_{\tau;\log}}$  e  $\sigma_{\sigma_{\tau;\log}}$  dependentes do cenário de acordo com a Tabela 1.
  - (b) Gera-se um valor inicial para os atrasos com  $\tau'_n \sim \text{Exp}(r_\tau \sigma_\tau) \mid 1 < n \leq N$ , sendo  $r_\tau$  parâmetro do cenário conforme a Tabela 2;
  - (c) que são normalizados e ordenados com  $\tau = \text{sort}(\{\tau - \min(\tau)\})$ ;
2. Para gerar as potências  $\alpha_n^2$ :
  - (a) Gera-se sombreamentos aleatórios  $\xi_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\xi^2)$ , com  $\sigma_\xi$  dependentes do cenário de acordo com a Tabela 3.
  - (b) A potência inicialmente é calculada por

$$\hat{\alpha}_n^2 = \exp\left(-\tau_n \frac{r_\tau - 1}{r_\tau \sigma_\tau}\right) \cdot 10^{-\xi_n/10}. \quad (2)$$

- (c) No caso LoS, o Fator de Rice  $K_{R;dB} \sim \mathcal{N}(\mu_{K_{R;dB}}, \sigma_{K_{R;dB}})$  deve ser gerado, com desvio padrão e média respeitando a Tabela 4, e depois transformado para linear com  $K_R = 10^{0.1K_{R;dB}}$ . No caso NLoS,  $K_R = 0$ ;
  - (d) Normaliza-se as potências com a componente LoS  $\alpha_1^2 = \frac{K_R}{K_R+1}$  e as outras componentes  $2 < n \leq N$  sendo  $\alpha_n^2 = \frac{1}{K_R+1} \frac{\hat{\alpha}_n^2}{\hat{\Omega}_c}$ , onde  $\hat{\Omega}_c = \sum_{n=2}^N \hat{\alpha}_n^2$  é a potência total dispersa;
3. Para gerar os efeitos Doppler  $\nu_n^2$ :
  - (a) Gera-se os espalhamentos angulares azimutal  $\sigma_{\theta;\log} \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$  considerando a Tabela 5 e em elevação  $\sigma_{\phi;\log} \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$  considerando a Tabela 6. Converte-se log em linear (graus) e graus em radianos com  $\sigma_\phi = 10^{\sigma_{\phi;\log}} \cdot \pi/180$  e  $\sigma_\theta = 10^{\sigma_{\theta;\log}} \cdot \pi/180$ .
  - (b) Obtém-se o ângulo azimutal de chegada  $\theta_n = U_n \theta'_n + Y_n$ , onde  $U_n \sim U-1, 1$ ,  $Y_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\theta/7)$  e  $\theta'_n = 1.42\sigma_\theta \sqrt{-\ln\left(\frac{\alpha_n^2}{\max(\alpha^2)}\right)}$ . Caso haja LoS no cenário, o ajuste  $\theta_n = \theta_n - \theta_1$  é feito;

- (c) Obtém-se o ângulo em elevação de chegada  $\phi_n = U_n \phi'_n + Y_n$ , onde  $U_n \sim U-1, 1$ ,  $Y_n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\phi/7)$  e  $\phi'_n = -\sigma_\phi \ln \left( \frac{\alpha_n^2}{\max(\alpha^2)} \right)$ . Caso haja LoS no cenário, o ajuste  $\phi_n = \phi_n - \phi_1 + \bar{\phi}$  é feito, com  $\bar{\phi}$  um ângulo arbitrário que representa a elevação da antena receptora em relação à transmissora;
- (d) Os vetores  $r_n$  de chegada são construídos:

$$r_n = \begin{bmatrix} \cos(\theta_n) \sin(\phi_n) \\ \sin(\theta_n) \sin(\phi_n) \\ \cos(\phi_n) \end{bmatrix}$$

- (e) Os desvios Doppler podem ser calculados calculados utilizando o produto interno entre a velocidade do receptor e o vetor de chegada ponderados pelo comprimento de onda:  $\nu_n = \frac{1}{\lambda} r_n \cdot v_{rx}$ .

4. Por fim, o envoltório complexo do sinal recebido pode ser calculado substituindo os termos da Equação 1 pelos calculados anteriormente.

Ambiente de Propagação		Estatísticas de $\sigma_{\tau; \log}$	
		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

Tabela 1: Estatísticas de espalhamento de atraso - Retirada da Tabela 1 de [3]

Ambiente de Propagação		Fator de Proporcionalidade $r_\tau$
UMi	LoS	3
	NLoS	2.1
UMa	LoS	2.5
	NLoS	2.3

Tabela 2: Fator de Proporcionalidade - Retirado da Tabela 2 de [3]

Ambiente de Propagação		Desvio Padrão do Sombreamento $\sigma_\xi$ (dB)
UMi	LoS	4
	NLoS	7.82
UMa	LoS	4
	NLoS	6

Tabela 3: Estatísticas do sombreamento - Retirada da Tabela 3 de [3]

Ambiente de Propagação		Estatísticas de $K_R$ (dB)	
		Média	Desv. Padrão
UMi	LoS	9	5
	NLoS	—	—
UMa	LoS	9	3.5
	NLoS	—	—

Tabela 4: Estatísticas do fator de Rice  $K_R$  - Retirada da Tabela 4 de [3]

Ambiente de Propagação		Estatísticas de $\sigma_\phi$	
		Média	Desv. Padrão
UMi	LoS	$-0.1 \log_{10}(1 + f_c) + 0.73$	$-0.04 \log_{10}(1 + f_c) + 0.34$
	NLoS	$-0.04 \log_{10}(1 + f_c) + 0.92$	$-0.07 \log_{10}(1 + f_c) + 0.41$
UMa	LoS	0.95	0.16
	NLoS	$-0.3236 \log_{10}(f_c) + 1.512$	0.16

Tabela 6: Estatísticas do espalhamento angular em elevação  $\sigma_\phi$  - Retirada da Tabela 6 de [3]

Ambiente de Propagação		Estatísticas de $\sigma_\theta$	
		Média	Desv. Padrão
UMi	LoS	$-0.08 \log_{10}(1 + f_c) + 1.73$	$0.014 \log_{10}(1 + f_c) + 0.28$
	NLoS	$-0.08 \log_{10}(1 + f_c) + 1.81$	$0.05 \log_{10}(1 + f_c) + 0.3$
UMa	LoS	1.81	0.2
	NLoS	$-0.27 \log_{10}(f_c) + 2.08$	0.11

Tabela 5: Estatísticas do espalhamento angular azimutal  $\sigma_\theta$  - Retirada da Tabela 5 de [3]

## 2.2 Análise da Modelagem e Implementação

Para ambos modelos (UMi e UMa) o espalhamento de atraso possui distribuição Gaussiana, a distribuição que geralmente se aplica para o espalhamento de atraso. Pode ser observado nas figuras 2 e 3 o comportamento das estatísticas do espalhamento no atraso em função da frequência. Quanto maior a frequência, menor tende a ser o espalhamento de atraso. O espalhamento de atraso é definido pela equação 3

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{1}{\Omega_c} \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 \cdot (\tau_n - \bar{\tau})^2}, \quad (3)$$

onde  $\Omega_c$  é o ganho do canal e  $\bar{\tau}$  é o atraso médio, determinado por

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

Pela definição, é possível observar que o espalhamento de atraso é uma medida de autocorrelação entre os atrasos, ponderada pela potência. Quanto maior a frequência, mais evidente é, geralmente, o efeito de absorções por obstáculos e pela atmosfera. Essa atenuação é suficiente para perceptivelmente diminuir os valores de espalhamento de atraso quanto maior a frequência.

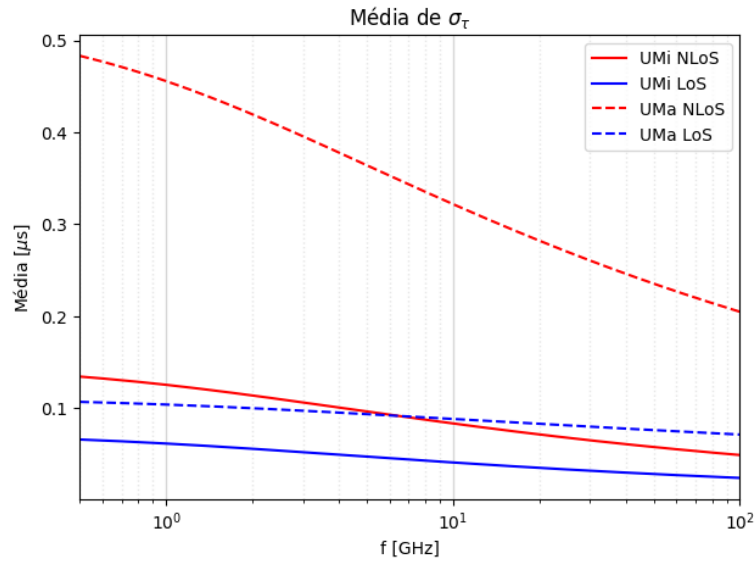


Figura 2: Gráfico da Média de  $\sigma_\tau$  em função da frequência.

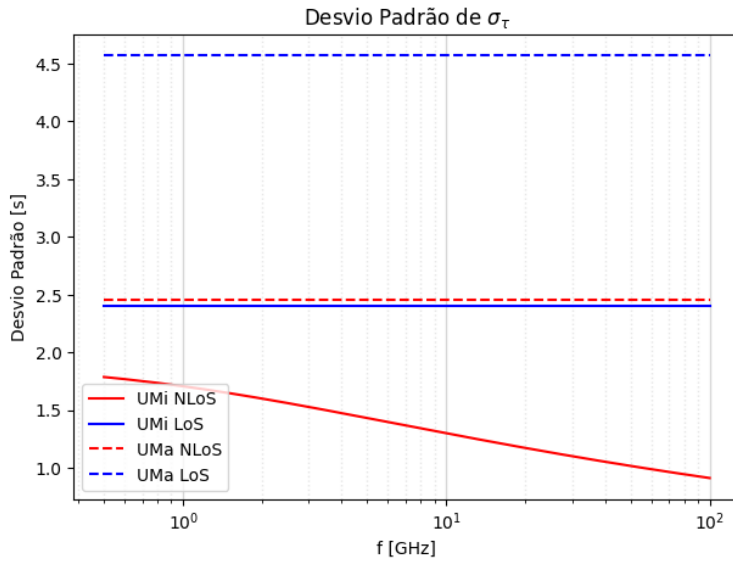


Figura 3: Gráfico do Desvio Padrão de  $\sigma_\tau$  em função da frequência.

Frequentemente as componentes de atraso são geradas com base em uma

distribuição exponencial. No caso dessa modelagem uma exponencial de média  $r_\tau \sigma_\tau$  foi utilizada.

O modelo correlaciona as componentes de potência com seu atraso pela equação 2, que permite visualizar que a potência de uma componente decai exponencialmente com o atraso. A mesma equação, quando observada junto da Tabela 3, permite notar que o sombreamento fornece um termo que escala linearmente o impacto do atraso na potência da componente. Ou seja, ele é um parâmetro que significa como o caminho da componente afetou sua potência. Cenários NLoS tendem a possuir maior sombreamento pois seus caminhos desde o transmissor até o receptor possuem mais obstáculos.

O fator de Rice determina a razão da potência LoS para a potência NLoS de acordo com a equação 4:

$$K_R = \frac{\alpha_1^2}{\sum_{n=2}^N \alpha_n^2}, \quad (4)$$

e portanto estabelece uma relação entre a potência da componente de visada direta e as outras. Na modelagem  $K_R$  é amostrado de uma distribuição Gaussiana em dB (lognormal em linear).

Os espalhamentos angulares  $\sigma_\theta$  e  $\sigma_\phi$  significam o quão próximos em ângulo as componentes multipercurso tendem a chegar de uma componente central. Suas estatísticas em função da frequência podem ser observados nas Figuras 4, 5, 6 e 7.



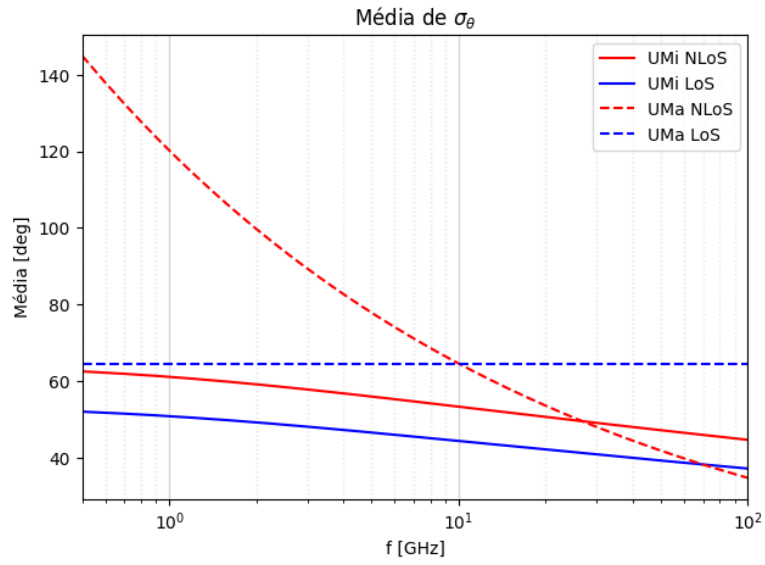


Figura 4: Gráfico da Média de  $\sigma_\theta$

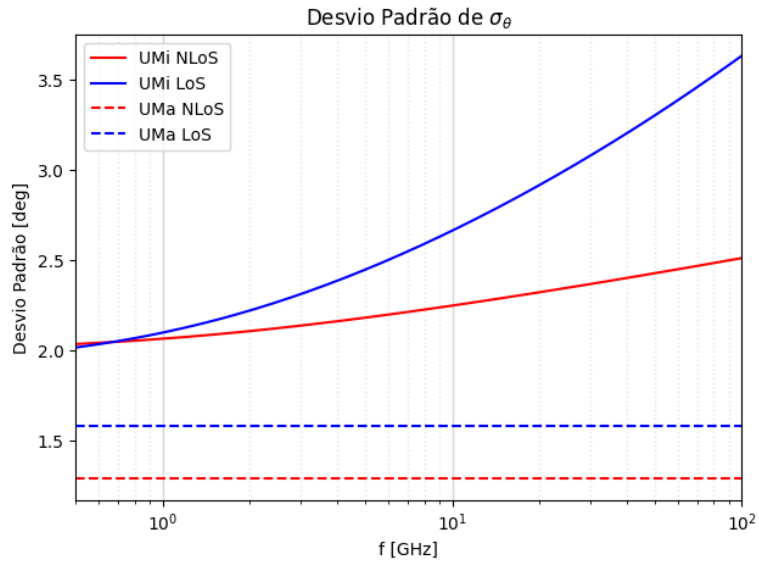


Figura 5: Gráfico do Desvio Padrão de  $\sigma_\theta$

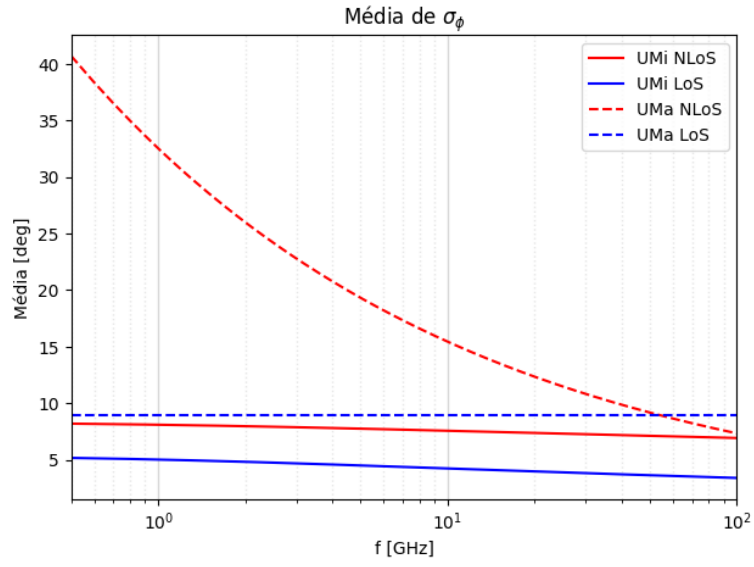


Figura 6: Gráfico da Média de  $\sigma_\phi$

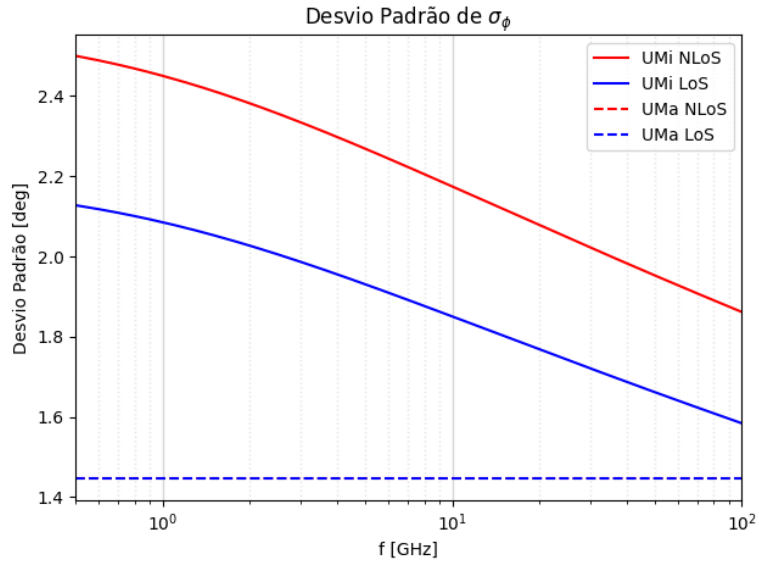


Figura 7: Gráfico do Desvio Padrão de  $\sigma_\phi$

### 3 Resultados

Por brevidade, o cenário simulado foi UMi NLoS, utilizando  $N = 100$  componentes multipercurso e frequência central da portadora  $f_c = 3$  GHz.

O primeiro trecho da modelagem resulta em componentes de potência e de atraso que podem ser visualizadas na forma  $P_{hh}(\tau) = \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 \delta(\tau - \tau_n)$  conforme a Figura 8. O fator de Rice para o caso NLoS é igual a 0, e portanto não existe uma componente com potência muito maior do que as outras. Mais especificamente, a componente  $\alpha_1^2 = 0$ , estando de acordo com a Equação 4.

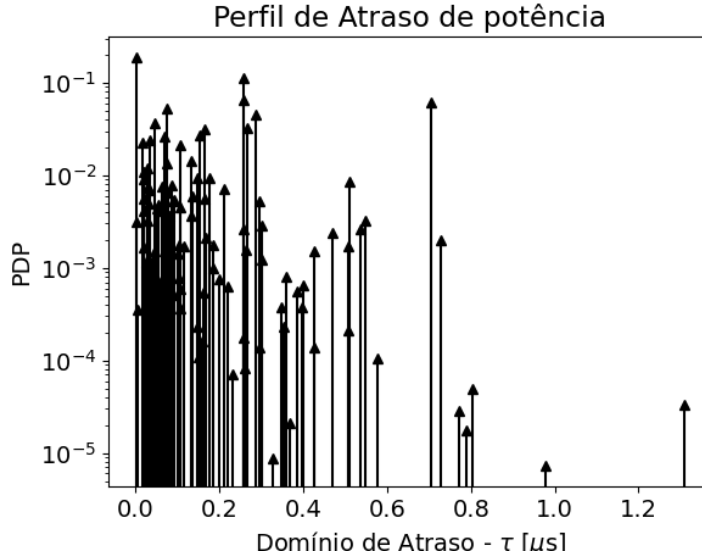


Figura 8: *Power Delay Profile*

Com os atrasos e potências podemos recalculamos o espalhamento de atraso de acordo com a sua definição em 3. Enquanto o valor gerado foi  $1.0909258716469582e-07$  s, o valor recalculado foi  $1.819505532670519e-07$ , apresentando diferença considerável. Isso é uma diferença considerável, mas pode ser explicada pela diferença do modelo simplificado implementado, onde a potência da componente de atraso zero é mantida diferente de zero e  $\Omega_c$  inclui a primeira componente. Uma análise rápida dos casos LoS mostrou que a diferença entre o valor gerado e recalculado para esses cenários aparente ser menor.

O próximo passo da simulação é gerar os ângulos de chegada, gerando as Figuras 9, 10 e 11. As direções de chegada estão bem dispersas pois o cenário é

NLoS.

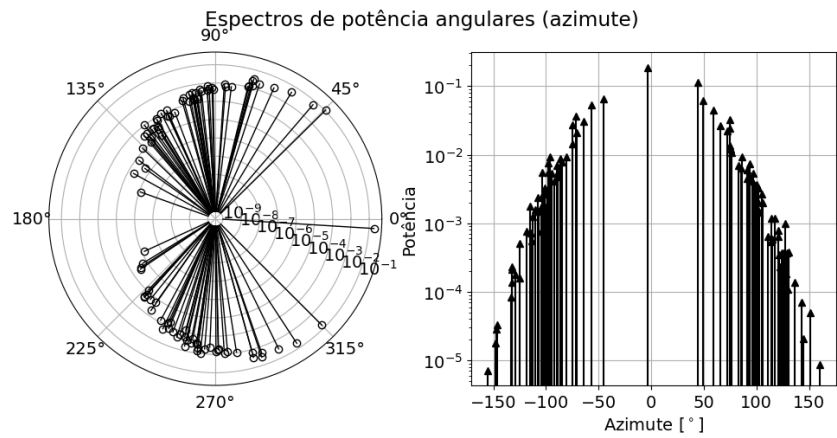


Figura 9: Dispersão de Potência em Azimute

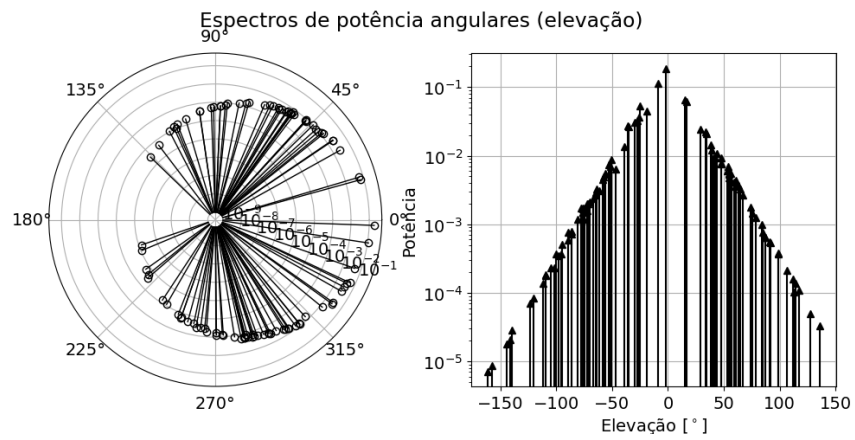


Figura 10: Dispersão de Potência em Azimute

### Vetores direção das componentes multipercurso

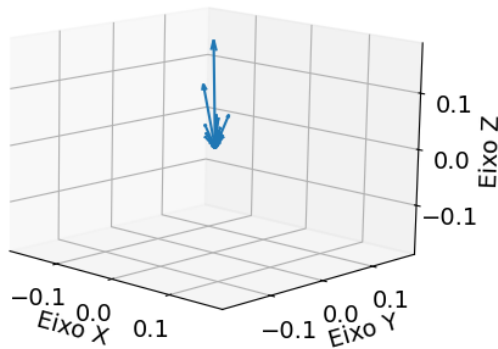


Figura 11: Dispersão da potência nas direções de chegada

Utiliza-se os vetores de chegada com vetores velocidade ao longo do eixo  $x$  e de magnitude  $v = 5$  m/s e  $v = 50$  m/s para chegar aos desvios Doppler. A dispersão de potência no domínio de desvio Doppler pode ser observada na Figura 12. Como o desvio doppler é dado por um produto interno entre vetor velocidade e vetor de chegada, seu valor depende linearmente da magnitude da velocidade. Isso significa que uma velocidade 10 vezes maior causa um desvio Doppler 10 vezes maior, que é o que se observa nas figuras.

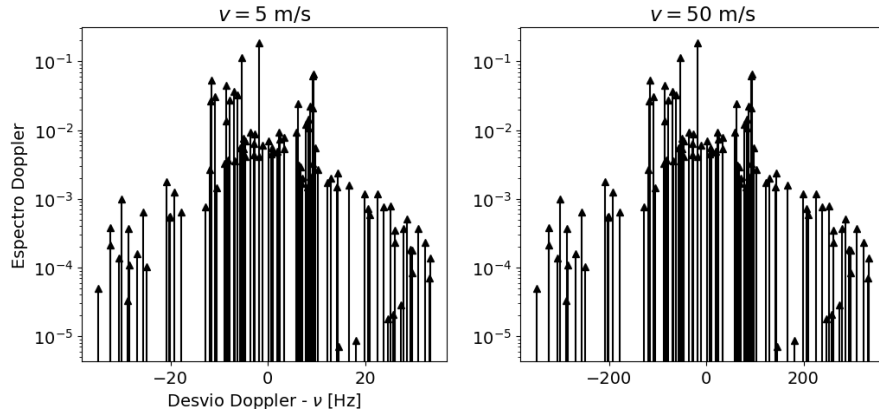


Figura 12: Desvios Doppler

Por fim, foram gerados 3 pulsos unitários de largura  $\sigma t \in \{10^{-7}, 10^{-5}, 10^{-3}\}$  para serem os envoltórios complexos  $\tilde{s}(t)$  de acordo com a equação 1. Então, basta aplicar os outros termos conforme gerados para obter os envoltórios complexos dos sinais recebidos, permitindo criar as figuras 13, 14 e 15. Pelas figuras fica claro o comportamento do canal de filtragem. Para um intervalo de transmissão pequeno o suficiente, o canal espalha o sinal enviado no tempo, como um filtro.

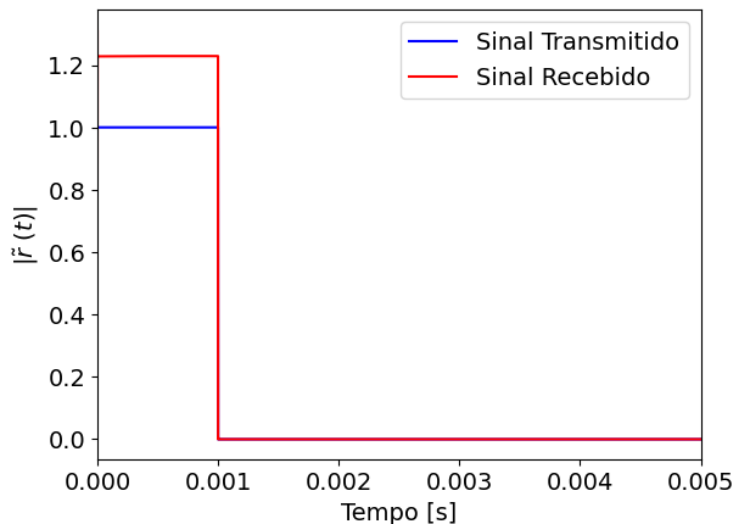


Figura 13: Sinal recebido com  $\delta t = 10^{-3}$

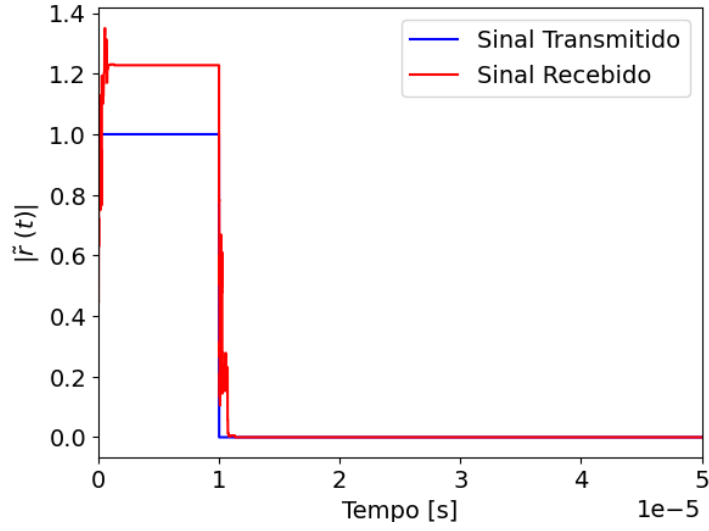


Figura 14: Sinal recebido com  $\delta t = 10^{-5}$

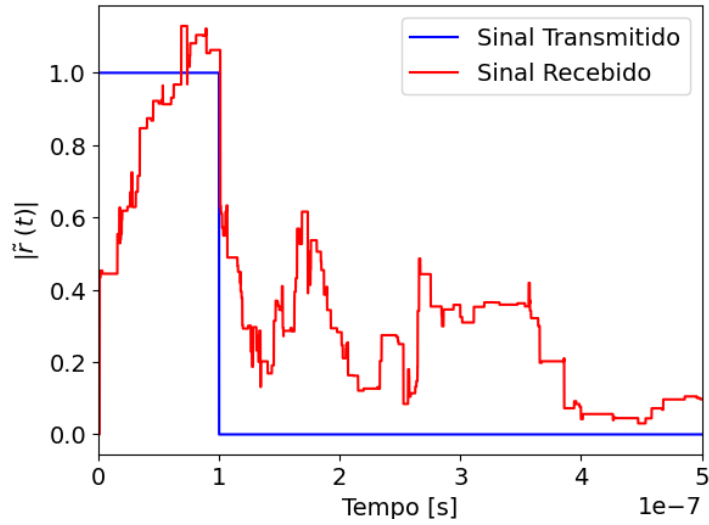


Figura 15: Sinal recebido com  $\delta t = 10^{-7}$

Por fim, podemos analisar a autocorrelação do canal  $\rho_{TT}(\kappa, \sigma)$

$$\rho_{TT}(\kappa, \sigma) = \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 e^{-j2\pi\tau_n\kappa} e^{j2\pi\nu_n\sigma}, \quad (5)$$

sendo  $\kappa$  um desvio no domínio da frequência absoluta e  $\sigma$  um desvio no domínio do tempo absoluto. Aplicando essa equação para os resultados gera as Figuras 16, 17 e 18. Enquanto a banda de coerência é a mesma para o cenário onde  $v = 5$  e  $v = 50$  m/s, o tempo de coerência mostra uma diminuição de 10 vezes ao aumentar a velocidade em 10 vezes. Isso ocorre pois o desvio no tempo multiplica  $\nu_n$ , que é proporcional à magnitude da velocidade. O gráfico de 18 em função de  $\sigma$  se "move" 10 vezes mais rápido quando a velocidade é 10 vezes mais rápida, como o esperado.

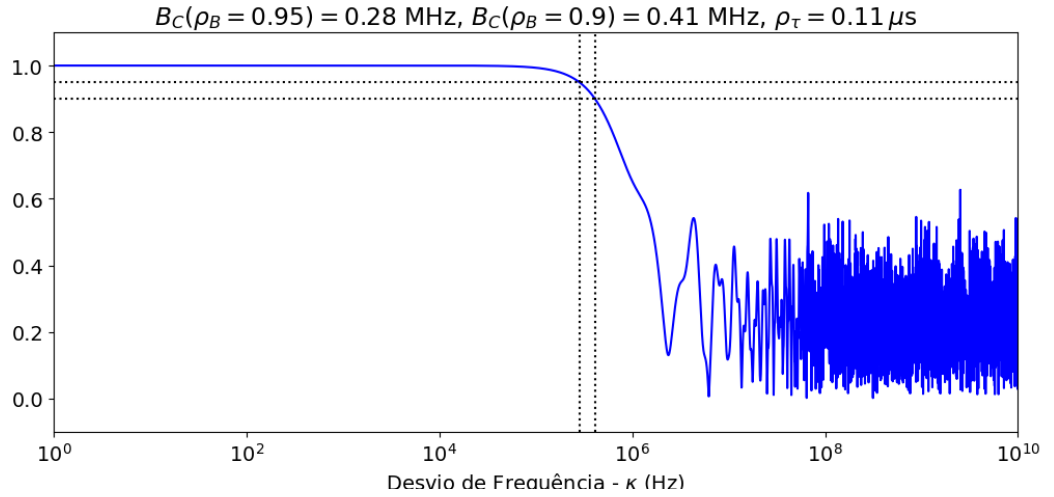


Figura 16: Visualização da banda de coerência do canal



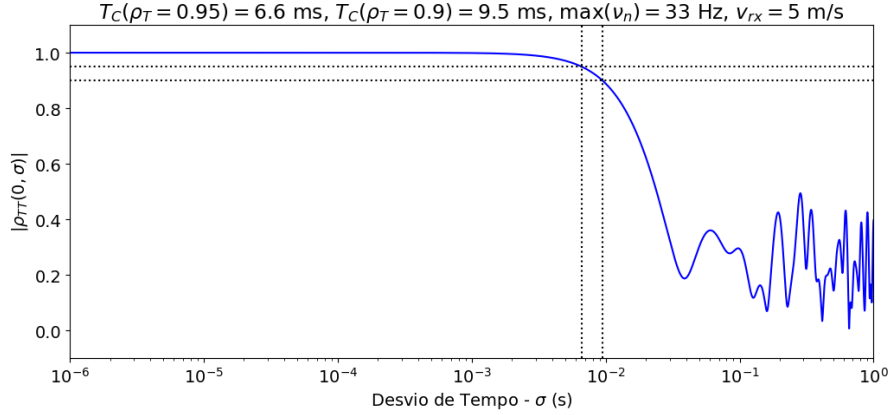


Figura 17: Visualização do tempo de coerência do canal ( $v = 5$  m/s)

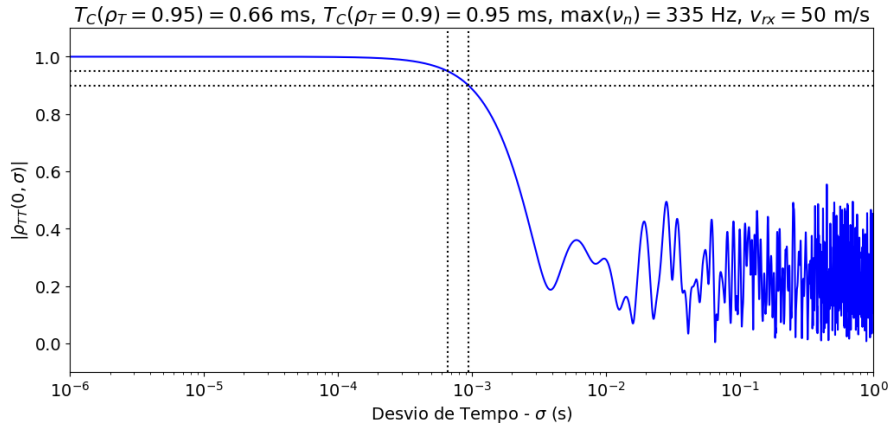


Figura 18: Visualização do tempo de coerência do canal ( $v = 50$  m/s)

## 4 Conclusão

O simulador implementado possibilita simulação de todos os 4 cenários descritos (UMi, UMa x LoS, NLoS). Mais especificamente, foi possível realizar uma análise mais profunda dos resultados do simulador para o cenário UMi NLoS.

Foi notada a diferença entre valores gerados e efetivos ao recalculer o espalhamento de atraso. É incerto se a modelagem original de [1] possui a diferença significativa observada pois o modelo simplificado possui alterações consideráveis

no cálculo de potência de  $\alpha_1^2$ . Todos os outros gráficos e valores obtidos estão de acordo com o esperado.

Sendo assim, os objetivos deste projeto foram concluídos com sucesso, tendo um simulador funcional e uma análise do cenário UMi NLoS como resultados.

## Referências

- [1] 3GPP. *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*. Rel. técn. TR 38.901 V18.0.0. 2024.
- [2] Higo Thaian P. Da Silva. *Tópicos em Engenharia - Notas de Aula 1-8*. 2025.
- [3] Higo Thaian P. Da Silva. *Tópicos em Engenharia - Slides de Simulação do Canal Seletivo em Frequência*. 2025.