



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CASTANHAL
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO**

LUCAS DA SILVA FERREIRA LEAL

COMUNICAÇÕES 5G E 6G PARA TRENS DE ALTA VELOCIDADE

**Castanhal
2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CASTANHAL
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO**

LUCAS DA SILVA FERREIRA LEAL

COMUNICAÇÕES 5G E 6G PARA TRENS DE ALTA VELOCIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Lobato Acatauassú
Nunes.

**Castanhal
2025**

LUCAS DA SILVA FERREIRA LEAL

COMUNICAÇÕES 5G E 6G PARA TRENS DE ALTA VELOCIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Diogo Lobato Acatauassú Nunes.
Faculdade de Computação - UFPA
Orientador

Prof. Dr. José Jailton Junior
Faculdade de Computação - UFPA
Membro da Banca

Prof. Dr. IBruno Souza Lyra Castro
Faculdade de Computação - UFPA
Membro da Banca

Castanhal
2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Diogo, por ter aceitado participar dessa jornada meio doida que eu me meti. Sua grande paciência com os prazos e a capacidade de repetir a mesma coisa várias vezes até eu entender foram fundamentais para que esse projeto fosse finalizado. Fico extremamente grato por todo o apoio e confiança na minha pessoa.

Porém, nada disso seria alcançado sem a minha base familiar.

À minha mãe, dona Sheila, que foi meu alicerce em toda a minha jornada até esse momento, pois sem ela eu não estaria aqui. Mesmo no meio de tanta dificuldade, sendo uma mulher viúva cuidando de 3 crianças, ela sempre se esforçou em dar o melhor para seus filhos, e por isso serei eternamente grato.

À minha avó, dona Lucia, e ao meu avô, seu Jonas, meus grandes suportes. Obrigado pelas palavras de conforto e sabedoria ao longo da minha vida e por sempre acreditarem no meu potencial.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer aos meus pets, meus suportes de 4 patas: Nietzsche, Suga e Hope. Ao longo desses anos, vocês me forçaram a fazer pausas para dar atenção e carinho e sempre me deram mais amor do que eu mereço. Também não podia faltar a minha estrelinha, a Pretinha. Perdi você no início desse ano, a gatinha mais carinhosa e enjoada que eu já conheci. Tenho certeza de que se você estivesse aqui, estaria do lado do meu teclado, como a grande companheira que sempre foi.

*“A vida não é sobre encontrar a si mesmo.
A vida é sobre criar a si mesmo.”
(George Bernard Shaw)*

RESUMO

A comunicação sem fio em trens de alta velocidade impõe desafios singulares decorrentes da mobilidade extrema, como o severo efeito Doppler, a rápida variação do canal e a alta perda de penetração de sinal. Esta monografia tem como objetivo investigar e analisar soluções tecnológicas para mitigar esses problemas no contexto das redes 5G e em perspectiva para o 6G. Para tal, são abordadas tecnologias habilitadoras como arquiteturas de rede Macro-and-Relay, modulação OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) com numerologias adaptativas e o sistema Cell-Free Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). O trabalho inclui duas avaliações de desempenho: a primeira, via simulação em OCTAVE baseada no modelo 3GPP TS 38.101, quantifica o impacto do desvio Doppler em diferentes cenários de velocidade e espaçamento de subportadoras ; a segunda, em ambiente OCTAVE, analisa a eficiência espectral de um sistema Cell-Free Massive MIMO no interior do vagão, sob diferentes densidades de usuários. Os resultados confirmam que um SCS (Subcarrier Spacing) mais largo aumenta a robustez contra o efeito Doppler e que, no cenário interno, a interferência entre usuários é o fator limitante para a performance individual à medida que a rede se aproxima de sua capacidade máxima. Conclui-se que a superação dos desafios atuais exige uma abordagem integrada e que, para o 6G, a exploração de bandas em terahertz (THz) e o uso massivo de inteligência artificial (IA) serão essenciais para gerenciar a mobilidade altíssima, permitindo a implementação de handovers preditivos e alocação de recursos proativa.

Palavras-chave: Cell-Free Massive MIMO. Efeito Doppler. Trens de Alta Velocidade. 5G. 6G.

ABSTRACT

Wireless communication in high-speed trains (HS) imposes unique challenges arising from extreme mobility, such as the severe Doppler effect, rapid channel variation, and high signal penetration loss. This monograph aims to investigate and analyze technological solutions to mitigate these problems within the context of 5G networks and with a perspective towards 6G. To this end, enabling technologies such as Macro-and-Relay network architectures, OFDM modulation with adaptive numerologies, and the Cell-Free Massive MIMO system are addressed. The work includes two performance evaluations: the first, via simulation in OCTAVE based on the 3GPP TS 38.101 model, quantifies the impact of the Doppler shift in different scenarios of speed and Subcarrier Spacing; the second, in an OCTAVE environment, analyzes the spectral efficiency of a Cell-Free Massive MIMO system inside the train car under different user densities. The results confirm that a wider SCS increases robustness against the Doppler effect and that, in the indoor scenario, inter-user interference is the limiting factor for individual performance as the network approaches its maximum capacity. It is concluded that overcoming current challenges requires an integrated approach and that, for 6G, the exploration of terahertz (THz) bands and the massive use of artificial intelligence (AI) will be essential to manage ultra-high mobility, enabling the implementation of predictive handovers and proactive resource allocation.

Keywords: 5G. 6G. High-Speed Trains. Cell-Free Massive MIMO. Doppler Effect.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dispositivo móvel deslocando-se em um ângulo $\varnothing$ em relação à AP com uma dada velocidade v	20
Figura 2 – Com v maior, fm aumenta, deixando o gráfico mais largo, já com v menor o gráfico fica mais estreito.	22
Figura 3 – Opções de layout para o cenário de implantação do trem de alta velocidade: a) layout Macro-only; b) layout com Macro-and-relay Retirado de [(NOH et al., 2019)].	27
Figura 4 – Função quando $t = 0$	36
Figura 5 – Trem após de deslocar t segundos.	37
Figura 6 – Fluxograma da lógica de simulação do Modelo 3GPP (Apêndice A).	39
Figura 7 – HST-750.	44
Figura 8 – HST-972.	45
Figura 9 – HST-1000.	45
Figura 10 – HST-1667.	46
Figura 11 – Ericsson.	47
Figura 12 – Layout do cenário de simulação do vagão com $K=20$ usuários (vermelho) e APs (azul) distribuídos no perímetro.	49
Figura 13 – Análise de potência do sinal para $K=20$ usuários, destacando a dominância do 'Sinal Desejado' (azul) sobre a 'Autointerferência' (vermelho) e a 'IUI' (amarelo)	49
Figura 14 – CDF da Eficiência Espectral (bits/s/Hz) para o cenário de baixa densidade ($K=20$), demonstrando o mais alto desempenho individual.	50
Figura 15 – Layout do cenário de simulação com densidade média ($K=40$ usuários), simulando uma condição de uso moderado.	50
Figura 16 – Análise de potência do sinal para $K=40$ usuários. Nota-se o aumento da Interferência Entre Usuários (IUI, amarelo) em comparação com o cenário de baixa densidade.	51
Figura 17 – CDF da Eficiência Espectral (bits/s/Hz) para $K=40$ usuários, indicando um desempenho robusto, mas com uma mediana inferior (aprox. 2.0 bits/s/Hz) devido à maior interferência.	51
Figura 18 – Layout do cenário de simulação de alta densidade ($K=100$), representando uma condição de vagão densamente populado.	52
Figura 19 – Análise de potência do sinal para $K=100$ usuários. A IUI (amarelo) torna-se um fator dominante, aproximando-se ou superando o 'Sinal Desejado' (azul) para muitos usuários	52

Figura 20 – CDF da Eficiência Espectral (bits/s/Hz) para $K=100$ usuários. O desempenho individual é severamente impactado pela IUI, resultando na menor eficiência espectral mediana (aprox. 0.7 bits/s/Hz). 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre parâmetros de mobilidade	25
Tabela 2 – Comparação do Duplexamento por Divisão de Tempo (TDD) e Duplexamento por Divisão de Frequência (FDD)	30
Tabela 3 – Parâmetros dos cenários de trem de alta velocidade	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	Quinta geração de comunicação sem fio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP	Access Point (Ponto de Acesso)
CDF	Funções de Distribuição Cumulativa
CPU	Central Process Unit (Unidade Central de Processamento)
DL	Downlink
eMBB	Enhanced Mobile Broadband (Banda Larga Móvel Melhorada)
FDD	Frequency Division Duplexing (Duplexação por Divisão de Frequência)
FDM	Frequency Division Multiplexing (Multiplexação por Divisão de Frequência)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
HST	High Speed Train (Trem de Alta Velocidade)
ICI	Intercarrier Interference (Interferência entre Portadoras)
IUI	Inter-User Interference (Interferência entre Usuários)
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
mMTC	Massive Machine Type Communications (Comunicação Massiva entre Máquinas)
mmWave	Millimeter Wave (Ondas Milimétricas)
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal)
RoF	Radio-over-Fiber (Rádio sobre Fibra)
SCS	Subcarrier Spacing (Espaçamento entre Subportadoras)
SE	Spectral Efficiency (Eficiência Espectral)
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (Relação Sinal-Interferência-mais-Ruído)

SNR	Signal-to-Noise Ratio (Relação Sinal-Ruído)
TDD	Time Division Duplexing (Duplexação por Divisão de Tempo)
UE	User Equipment (Equipamento do Usuário)
UIT	União Internacional dos Caminhos de Ferro
UL	Uplink
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication (Comunicação Ultra Confiável de Baixa Latência)

LISTA DE SÍMBOLOS

β_{mk}	coeficiente de larga escala do canal (variância do canal)
c	Velocidade da Luz
$D(f)$	Espalhamento Doppler
D_{min}	Distância mínima entre o trem e uma antena
D_S	Distância entre antenas adjacentes
$\in$	Pertence
η_{mk}	Coeficiente de controle de potência
f	Frequência da onda
F_c	Frequência portadora
F_d	Deslocamento Doppler (Doppler Shift)
f_m	Deslocamento Doppler máximo
F_r	Frequência do sinal recebido
Γ	Variância da estimativa do canal
γ_{mk}	Variância da estimativa do canal
g_{mk}	Ganho de canal entre o m-ésimo AP e o k-ésimo usuário
$\hat{g}_{mk}$	Estimativa MMSE (Minimum Mean Square Error) do canal
H	Função de transferência do canal sem fio
K	Número de usuários (UEs)
λ	Comprimento de onda
Λ	Comprimento de onda
M	Número de Pontos de Acesso (APs)
ϕ	Ângulo entre a direção de movimento do UE e a linha de visada para a AP
ρ_d	Relação Sinal-Ruído (SNR) normalizada do downlink
ρ_u	Relação Sinal-Ruído (SNR) normalizada pelo uplink
s_k	Símbolo destinado ao k-ésimo usuário

T	Tempo de símbolo
τ_c	tamanho do bloco de coerência
τ_p	Símbolos utilizados para pilotos ortogonais
T_c	Tempo de coerência
$\theta(t)$	Ângulo em função do tempo
v	Velocidade do Equipamento do Usuário (UE)
w_m	Vetor de ruído aditivo
ζ	Vetor de ruído aditivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contexto	16
1.2	Problema da Comunicação em Trens de Alta Velocidade	17
1.3	Objetivos	17
1.4	Estrutura do Trabalho	18
2	FUNDAMENTOS E CARACTERÍSTICAS DA COMUNICAÇÃO HST	19
2.1	Fundamentos das Redes 5G e 6G	19
2.2	Efeito Doppler e Seus Impactos em Canais Sem Fio	19
2.2.1	Deslocamento Doppler (Doppler Shift)	20
2.2.2	Impacto do Efeito Doppler em Canais Sem Fio	21
2.2.3	Tempo de coerência e Fading	21
2.2.4	Espalhamento Doppler (Doppler Spread)	22
2.3	Bandas milimétricas e 5G	23
2.4	Características do Cenário HST	24
3	TECNOLOGIAS HABILITADORAS PARA COMUNICAÇÃO HST . .	27
3.1	Arquiteturas de rede para HST	27
3.1.1	Macro-only	27
3.1.2	Macro-and-Relay	28
3.2	Time Division Duplexing (TDD) - Duplexação por Divisão de Tempo . .	29
3.3	OFDM	30
3.4	Cell-Free Massive MIMO	31
3.4.1	Modelo do Sistema	32
3.4.2	Estimação de Canal com MMSE	32
3.4.3	Transmissão Downlink e Precodificação	33
3.4.4	Análise de desempenho do Downlink	33
3.5	Numerologia e Estrutura de Quadro	34
3.5.1	Seleção de subcarrier spacing	35
4	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	36
4.1	Metodologia da Avaliação 1: Enlace Vagão x Access Point	36
4.1.1	Apresentação das fórmulas do modelo	36
4.1.1.1	Quando o trem se aproxima do AP ($0 \leq t \leq \frac{D_s}{v}$)	37
4.1.1.2	Quando o trem passa pela AP e se afasta dela ($\frac{D_s}{v} \leq t \leq \frac{2D_s}{v}$)	37
4.1.1.3	Para tempos posteriores, o padrão repete-se ($t > \frac{2D_s}{v}$)	38
4.1.2	Fluxograma do código	39
4.2	Metodologia da Avaliação 2: Sistema Cell-Free Massive MIMO Indoor .	40
4.2.1	Geração do Cenário Físico	40
4.2.2	Modelagem dos Transreceptores	40

4.2.3	Modelagem de Larga Escala do Canal	40
4.2.4	Definição da Relação Sinal-Ruído Normalizada	41
4.2.5	Alocação de potência	41
5	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO 1: COMUNICAÇÃO VAGÃO X AC-	
	CESS POINT	42
5.1	Cenários de avaliação	42
5.1.1	Resultados e comentários	44
5.1.2	Análise comparativa final	47
6	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO 2: SISTEMA CELL-FREE MASSIVE	
	MIMO	48
6.1	Apresentação e Análise dos Resultados	48
6.1.1	Baixa Densidade ($K = 20$)	49
6.1.2	Média Densidade ($K = 40$)	50
6.1.3	Alta Densidade ($K = 100$)	52
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICE A – CÓDIGO OVTAVE PARA SIMULAÇÃO DO MO-	
	DELO SINGLE TAP (3GPP TS 38.101)	57

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo estabelece as bases da presente monografia. Inicialmente, é apresentado o contexto das comunicações móveis de alta velocidade, seguido pela definição do problema central abordado por este trabalho. Por fim, são detalhados os objetivos da pesquisa e a estrutura completa do documento, guiando o leitor através dos capítulos subsequentes.

1.1 Contexto

A quinta geração de comunicação sem fio, conhecida como 5G ou New Radio (NR), tem como objetivos ambiciosos alcançar velocidades de transferência de dados superiores a gigabits por segundo, latência extremamente baixa, com valores inferiores a um milissegundo, e alta confiabilidade. Esses objetivos estão alinhados com os principais casos de uso do 5G, que incluem Comunicação Ultra Confiável de Baixa Latência (URLLC, do inglês *Ultra-Reliable Low-Latency Communication*), Banda Larga Móvel Melhorada (eMBB, do inglês *Enhanced Mobile Broadband*) e Comunicação Massiva entre Máquinas (mMTC, do inglês *Massive Machine-Type Communications*) (NOH et al., 2019). Todos esses requisitos devem ser atendidos em diversos cenários de implantação, incluindo a comunicação sem fio entre veículos e trens de alta velocidade.

Cenários de comunicação veicular destacam-se devido às altas velocidades envolvidas, como carros que podem ultrapassar 100 quilômetros por hora ou trens que atingem velocidades de até 500 quilômetros por hora. Essa mobilidade extrema impõe uma série de desafios técnicos, como os problemas causados pelo efeito Doppler (Doppler Shift/Spread), a rápida variação do canal de comunicação e a instabilidade durante os procedimentos de handover, uma vez que um trem de alta velocidade passa por várias células de rede ao longo de seu trajeto.

Além disso, o uso de ondas milimétricas (mmWave, do inglês *Milimeter Wave*) é essencial para a implementação do 5G. Para alcançar as altas taxas de transferência de dados exigidas, é necessário operar em frequências superiores a alguns gigahertz. O termo "onda milimétrica" refere-se ao comprimento de onda, que pode ser da ordem de alguns milímetros, o que só é possível em frequências elevadas. No entanto, como o efeito Doppler é proporcional à frequência de operação, os problemas relacionados ao Doppler tornam-se mais severos nesses cenários. Além disso, as ondas milimétricas são mais suscetíveis a perdas por atenuação, incluindo absorção atmosférica, perdas por distância, atenuação causada por chuva e dificuldades de penetração em estruturas metálicas, como as carcaças dos trens.

Nesse contexto, a pesquisa em 6G avança para atender metas ambiciosas: taxas de transferência superiores a 1 Tbps, latências na ordem de microssegundos, posicionamento com precisão abaixo de 10 cm e integração nativa com inteligência artificial distribuída. As faixas de frequência exploradas para o 6G incluem terahertz (100 GHz–10 THz), possibilitando

capacidades de espectro muito maiores que as alcançadas pelo 5G. A combinação dessas tecnologias visa sustentar serviços ultraconectados e resilientes, especialmente em cenários de mobilidade extrema.

1.2 Problema da Comunicação em Trens de Alta Velocidade

A comunicação sem fio em trens de alta velocidade enfrenta desafios singulares, decorrentes da combinação de mobilidade extrema, ambiente metálico e topologia linear. Em velocidades que podem ultrapassar 500 km/h, o deslocamento relativo entre transmissor e receptor gera problemas significativos devido ao efeitos Doppler, com desvios de frequência na ordem de dezenas de kilohertz em bandas mmWave, degradando a ortogonalidade de subportadoras e aumentando a suscetibilidade a interferências entre portadoras (ICI, do inglês *Intercarrier interference*).

Adicionalmente, a carcaça metálica dos vagões cria um efeito de gaiola de Faraday, resultando em atenuações de 20 a 35 dB durante a penetração do sinal no interior dos trens (WU; FAN, 2016). Essa barreira física compromete a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) e diminui a cobertura da estação base, especialmente em faixas de alta frequência. O handover frequente, necessário ao passar por células em intervalos de cerca de 1 km a velocidades elevadas, eleva o risco de interrupções, amplificado pela “*signaling storm*”, causada por centenas de dispositivos tentando simultaneamente trocar de célula.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta monografia é investigar e propor soluções tecnológicas para mitigar os desafios de comunicação em trens de alta velocidade no contexto de redes 5G e perspectivas 6G. Os objetivos específicos incluem:

- Analisar os principais efeitos do movimento em alta velocidade sobre o canal sem fio, como desvio Doppler e variação rápida do perfil de atenuação;
- Avaliar arquiteturas de rede (Macro-and-Relay) e utilizando técnicas modernas de transmissão como o Cell-Free Massive MIMO (do inglês, *Multiple Input, Multiple Output*) para garantir conectividade estável;
- Discutir a integração com futuros padrões 6G, considerando uso de bandas terahertz e inteligência artificial para mobilidade altíssima.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, interligados de forma coesa para abordar os desafios e soluções das comunicações em trens de alta velocidade (HST, do inglês *High Speed Train*) no contexto do 5G e 6G. A estrutura detalhada é a seguinte:

- **Capítulo 1: INTRODUÇÃO:** Apresenta o contexto, a problemática enfrentada pelas comunicações em trens de alta velocidade, os objetivos da pesquisa e esta estrutura geral do documento.
- **Capítulo 2: FUNDAMENTOS E CARACTERÍSTICAS DA COMUNICAÇÃO HST:** Explora os principais efeitos físicos que impactam a comunicação sem fio em alta velocidade, como o efeito Doppler, o espalhamento Doppler, o tempo de coerência do canal e o uso de ondas milimétricas. Também classifica os tipos de ferrovias de acordo com a UIT (União Internacional dos Caminhos de Ferro).
- **Capítulo 3: TECNOLOGIAS HABILITADORAS PARA COMUNICAÇÃO HST:** Detalha as soluções tecnológicas empregadas para contornar os desafios de comunicação, incluindo arquiteturas de rede (Macro-only e Macro-and-Relay), técnicas de duplexamento (TDD), modulação OFDM, numerologias adaptativas e o uso de Cell-Free Massive MIMO.
- **Capítulo 4: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 1 - COMUNICACAO VAGAO X ACCESS POINT:** Apresenta modelos matemáticos baseados nas especificações 3GPP TS 38.101 e realiza simulações em OCTAVE para analisar o comportamento do canal e o impacto do efeito Doppler sob diferentes condições de velocidade e subcarrier spacing.
- **Capítulo 5: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 2 - SISTEMA CELL- FREE MASSIVE MIMO EM CENÁRIO INDOOR:** Analisa a performance do sistema Cell-Free Massive MIMO no ambiente interno do vagão por meio de simulações em OCTAVE. Este capítulo foca em quantificar a capacidade do sistema de oferecer cobertura uniforme e taxas de dados elevadas, avaliando o impacto da interferência gerada por diferentes densidades de usuários na eficiência espectral.
- **Capítulo 6: CONCLUSÃO:** Sintetiza os resultados obtidos nas avaliações de desempenho, reitera os principais desafios da comunicação HST e as soluções 5G analisadas. Por fim, apresenta as perspectivas futuras para o 6G, destacando o papel das bandas terahertz e da inteligência artificial para a gestão da mobilidade altíssima.

2 FUNDAMENTOS E CARACTERÍSTICAS DA COMUNICAÇÃO HST

A comunicação sem fio em cenários de trens de alta velocidade é governada por fenômenos físicos únicos que desafiam as arquiteturas de rede tradicionais. Este capítulo aprofunda os conceitos fundamentais que definem esses desafios. Iniciaremos com uma análise detalhada do Efeito Doppler, o obstáculo mais pronunciado em ambientes de mobilidade extrema, antes de explorar as características das bandas milimétricas e as particularidades do cenário HST.

2.1 Fundamentos das Redes 5G e 6G

A quinta geração de comunicação sem fio, também conhecida como New Radio, foi projetada para uma transformação radical no desempenho da rede, visando atender a três principais casos de uso: Banda Larga Móvel Melhorada, Comunicação Massiva entre Máquinas e Comunicação Ultraconfiável de Baixa Latência (NOH et al., 2019). Para atingir metas ambiciosas, como taxas de dados de gigabits por segundo (Gbps) e latências inferiores a um milissegundo, o 5G introduziu o uso de novas faixas de frequência, nomeadamente as ondas milimétricas (mmWave). Embora estas faixas permitam larguras de banda muito maiores, elas também trazem desafios significativos, como maior suscetibilidade a perdas por atenuação e penetração, e exacerbam problemas físicos como o efeito Doppler, tornando a sua aplicação em cenários de alta mobilidade particularmente complexa.

Enquanto o 5G ainda está em fase de implementação, a pesquisa para a sexta geração (6G) já está a definir metas ainda mais ambiciosas para a próxima década. O 6G visa mover-se para taxas de transferência da ordem de Terabits por segundo (Tbps), latências na casa dos microssegundos e uma precisão de posicionamento sub-centimétrica, além da integração nativa da inteligência artificial distribuída. Para tal, explora faixas de frequência ainda mais altas, como as bandas de Terahertz (THz). Uma mudança de paradigma fundamental no 6G é a integração nativa da IA, o que será essencial para gerir a complexidade de cenários de mobilidade altíssima, como os abordados neste trabalho.

2.2 Efeito Doppler e Seus Impactos em Canais Sem Fio

O Efeito Doppler é um fenômeno crucial na modelagem de canais sem fio, especialmente em cenários onde o equipamento do usuário está em movimento. Ele se manifesta como uma alteração na frequência do sinal recebido devido ao movimento relativo entre o transmissor e o receptor.

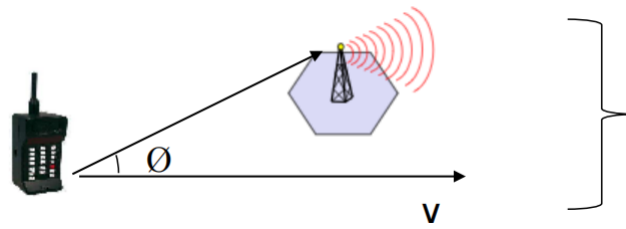


Figura 1 – Dispositivo móvel deslocando-se em um ângulo $\emptyset$ em relação à AP com uma dada velocidade v .

2.2.1 Deslocamento Doppler (Doppler Shift)

O Efeito Doppler leva a um deslocamento na frequência do sinal. O deslocamento Doppler (Fd) é dado pela expressão:

$$Fd = \frac{v \cdot \cos \phi}{c} \cdot Fc \quad (2.1)$$

onde:

- v : Velocidade do UE em metros por segundo
- ϕ : Ângulo entre a direção de movimento do UE e a linha de visada para a AP (do inglês, *Access Point*) em graus.
- c : Velocidade da Luz em metros por segundo.
- Fc : Frequência portadora em Hertz.

A frequência do sinal recebido (Fr) é a soma da frequência da portadora e do deslocamento Doppler: $Fr = Fc + Fd$.

A direção do movimento do UE (do inglês, *User Equipment*) em relação à estação base influencia o deslocamento Doppler e a frequência recebida:

- Se $0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$, então $\cos \phi \geq 0$, resultando em $Fr > Fc$. Isso ocorre quando o UE está se movendo em direção à estação base, e a frequência recebida é maior que a frequência da portadora.
- Se $\frac{\pi}{2} < \phi \leq \pi$, então $\cos \phi < 0$, resultando em $Fr < Fc$. Isso acontece quando o UE está se afastando da estação base, e a frequência recebida é menor que a frequência da portadora.

Um exemplo prático de cálculo do deslocamento Doppler é dado a seguir. Assumindo $Fc = 1,85$ GHz, $v = 26,8$ m/s (60 mph) e $\phi = 30^\circ$, obtemos um Fd de aproximadamente 200 Hz.

$$Fd = \frac{v \cdot \cos \phi}{c} \cdot Fc = \frac{26.8 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{3 \times 10^8} \cdot 1.85 \times 10^9 \approx 200 \text{ Hz} \quad (2.2)$$

Ou seja, o sinal transmitido de um terminal móvel a uma velocidade de 26 m/s e frequência de 1,85 GHz será recebido na antena com uma frequência de aproximadamente 2 GHz.

2.2.2 Impacto do Efeito Doppler em Canais Sem Fio

O efeito Doppler faz com que a função de transferência do canal sem fio (H) varie com o tempo, tornando o canal um canal seletivo no tempo. Isso ocorre porque a distância entre o UE e o AP muda continuamente com o movimento, alterando o atraso em cada caminho de propagação do sinal.

A função de transferência de canal considerando o efeito Doppler pode ser expressa como (TSE; VISWANATH, 2005):

$$H = \sum_{i=0}^{L-1} a_i e^{-j2\pi f_c \tau_i} \quad (2.3)$$

Considerando que o equipamento do usuário está em movimento, a distância entre o UE e o AP está mudando (aumentando se $\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi$ e diminuindo se $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$).

Logo, o delay no i -ésimo está mudando:

$$\tau_i(t) = \tau_i - \frac{v \cdot \cos(\theta)}{c} \quad (2.4)$$

$$H = \sum_{i=0}^{L-1} a_i e^{-j2\pi f_c \left(\tau_i - \frac{v \cdot \cos(\theta)}{c} \right)} \quad (2.5)$$

$$H = \sum_{i=0}^{L-1} a_i e^{-j2\pi f_c \tau_i} \cdot e^{j2\pi f_c \frac{v \cdot \cos(\theta)}{c}} \quad (2.6)$$

$$H = \sum_{i=0}^{L-1} a_i e^{-j2\pi f_c \tau_i} \cdot e^{j2\pi F_d t} \quad (2.7)$$

Onde o termo $e^{j2\pi F_d t}$ representa a dependência temporal devido ao deslocamento Doppler.

2.2.3 Tempo de coerência e Fading

A velocidade com que o canal muda é caracterizada pelo Tempo de coerência (T_c), que é a duração durante na qual a resposta de impulso do canal pode ser considerada aproximadamente constante. O tempo de coerência é inversamente proporcional ao deslocamento Doppler máximo (f_m), ou seja, $T_c \approx \frac{1}{f_m}$. O Doppler Shift é causado pelo movimento relativo entre o transmissor

e o receptor, e seu valor máximo ocorre quando a direção do movimento é totalmente alinhada com a direção de propagação da onda, isto é, quando $\cos\theta = 1$. Nessa condição, a fórmula

$$Fd = \frac{v \cdot \cos\theta}{c} \cdot Fc \quad (2.8)$$

se reduz para

$$fm = \frac{v \cdot fc}{c} \quad (2.9)$$

Por exemplo, se $fm = 143$ Hz, Tc é aproximadamente 6,9 ms, indicando que o canal fica estável 6,9 milissegundos antes de mudar.

Com base na relação entre o tempo de coerência e o tempo de símbolo (T), o fading pode ser classificado em:

- **Fading Rápido (Fast Fading):** Ocorre quando o tempo de coerência do canal é menor que o tempo de símbolo ($Tc < T$). Isso significa que as características do canal podem mudar várias vezes enquanto um símbolo contendo informações está sendo transmitido, levando a distorções como a ISI.
- **Fading Lento (Slow Fading):** Ocorre quando o tempo de coerência do canal é maior que o tempo de símbolo ($Tc > T$). Nesse caso, o canal não muda significativamente durante a transmissão de um símbolo.

2.2.4 Espalhamento Doppler (Doppler Spread)

O espalhamento Doppler é causado pelo deslocamento Doppler máximo e pode ser visto como um filtro no domínio da frequência. Ele indica o quanto uma frequência de portadora é "espalhada" ao longo do espectro. O deslocamento Doppler máximo, também denotado como fm , é proporcional à velocidade do UE (v) e à frequência da portadora, e inversamente proporcional à velocidade da luz (c).

Quanto maior a velocidade (v), maior será o espalhamento Doppler ($D(f)$), resultando em uma maior largura do espectro, como é possível observar abaixo.

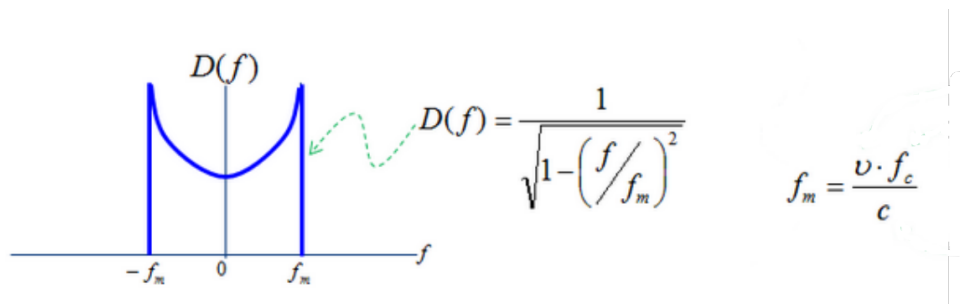


Figura 2 – Com v maior, fm aumenta, deixando o gráfico mais largo, já com v menor o gráfico fica mais estreito.

2.3 Bandas milimétricas e 5G

Prover acesso à banda larga de forma contínua durante o percurso do trem, como descrito no documento do 3GPP TR.913, é um foco no cenário de transmissão 5G para trens em alta velocidade. As exigências de performance para esse cenário estão descritas no TR 22.261, sendo elas:

- Capacidade de tráfego de dados por área: 15 Gbps/trem (Downlink), 7,5 Gbps/trem (Uplink)
- Densidade total de usuários: 1.000 usuários/trem
- Cobertura: Ao longo dos trilhos

Uma das características principais da transmissão 5G, seja em um cenário de alta velocidade ou menos móvel, são as ondas milimétricas. Devido à alta frequência de transmissão, o comprimento de onda fica consideravelmente menor. É possível verificar isso na fórmula do comprimento de onda que é:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.10)$$

Onde λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz e f é a frequência da onda em Hz. Analisando a fórmula $\lambda = \frac{c}{f}$, conclui-se que o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência: quanto maior f , menor λ . Um dos objetivos do 5G para trens de alta velocidade é que os vários usuários no vagão atinjam taxas de dados na casa dos Gbps, e as mmWaves permitem isso devido ao menor λ , que viabiliza maior transmissão de dados em menos tempo.

Entretanto, esse mesmo fator traz desafios. Conforme o artigo *Doppler Shift Estimation for Millimeter-Wave Communication Systems on High-Speed Railways*: “A utilização da tecnologia mmWave gerará um grande Doppler Shift em trens de alta velocidade. Por exemplo, o desvio Doppler pode chegar a 10000 Hz para uma frequência portadora de 30 GHz e velocidade de 360 km/h. ”

Outro desafio para a implementação é o Ruído de Fase (do inglês, *Phase Noise*), um fator que afeta a implementação de ondas milimétricas no contexto do HST. O ruído de fase representa as flutuações aleatórias na fase de uma onda no domínio da frequência. Ele pode ser causado por jitter, baixa potência de injeção, entre outros fatores. O ruído de fase pode provocar variações nos sinais recebidos, ressurgimento do espectro, rotações aleatórias dos sinais recebidos e interferência no canal (HEMEL et al., 2023). Como em mmWave, os osciladores trabalham em altas frequências, estão suscetíveis à instabilidade.

2.4 Características do Cenário HST

Tratando-se de trens de alta velocidade, a União Internacional dos Caminhos-de-Ferro (PYRGIDIS, 2016) tem três categorias para ferrovias de alta velocidade:

- **Categoria 1:** Novas linhas que são especialmente construídas para altas velocidades, e são especialmente equipadas para que velocidades iguais ou superiores a 250 km/h sejam alcançadas.
- **Categoria 2:** Vias já existentes que foram especialmente melhoradas e equipadas para que trens atinjam nela velocidades de 200 km/h.
- **Categoria 3:** Linhas existentes especialmente adaptadas para altas velocidades, permitindo uma velocidade máxima de corrida de pelo menos 200 km/h, mas com algumas seções tendo uma menor velocidade permitida (por exemplo, devido a restrições topográficas ou à passagem por áreas urbanas).

Como verificado, um trem de alta velocidade tem uma velocidade mínima de 200 km/h. Tal velocidade causa um grande impacto na comunicação sem fio, tendo em vista que o sinal que é propagado precisa alcançar o receptor que está em alta velocidade, tornando-se suscetível a interferências ao longo do caminho, atenuação por conta de obstáculos ou pelo próprio clima.

Deve ser notado que a maioria dos sistemas wireless atuais são feitos para uma frequência Doppler na casa das centenas de Hz; um trem a 500 km/h com uma transmissão de 5 GHz, gera uma frequência Doppler (Fd) de 2.314 Hz (WU; FAN, 2016). Uma transmissão 5G com 25 GHz, e a mesma velocidade, o valor de Fd já aumenta para 11,58 kHz (NOH et al., 2019). Nessa situação, a performance do link será degradada por conta da interferência entre portadoras induzida pelo efeito Doppler.

Além disso, a comunicação realizada em altas velocidades também traz outros desafios, sendo eles:

- **Erros de estimação de canal:** A estimativa de canal é fundamental em sistemas de comunicação de alta velocidade. Em virtude do desvanecimento rápido característico desses cenários, torna-se um desafio obter estimativas precisas do canal, o que resulta em impacto significativo no desempenho geral do sistema. Em geral, erros na estimativa são inevitáveis em ambientes de alta mobilidade e tendem a comprometer gravemente a qualidade da conexão, degradando sua eficiência (WU; FAN, 2016)."
- **Interferência entre subportadoras:** Esse problema ocorre quando a duração do símbolo OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é inferior ao tempo de coerência do canal. Por serem originalmente projetados para cenários de baixa mobilidade e canais com estabilidade temporal prolongada (WU; FAN, 2016), os sistemas OFDM,

quando aplicados em contextos de alta mobilidade, como o de um trem em velocidades superiores a 200 km/h, geram símbolos cuja duração excede o tempo de existência do canal em que são propagados. Como consequência, a variação do canal durante o símbolo OFDM quebra a ortogonalidade entre as subportadoras, resultando em interferências entre estas, fenômeno conhecido como ICI .

- **Alta perda de sinal por penetração da carcaça metálica do trem:** Tendo em vista que os vagões são feitos de metal, perdas severas de sinal em torno de 20 até 35 dB são inevitáveis, pois os materiais que são utilizados em sua composição tornam muito difícil a penetração de ondas eletromagnéticas (WU; FAN, 2016). Isso ocorre pois há uma formação de um efeito de gaiola de Faraday, que vai reduzir a potência do sinal tanto em questão de Upload quanto de Download. Além disso, essa perda por penetração interfere diretamente na proporção entre sinal e ruído (SNR), tanto no AP, quanto na UE, o que torna ainda mais difícil alcançar uma comunicação estável e confiável em sistemas de alta velocidade.
- **Frequentes Handovers:** Handover é o processo onde o UE, como um telefone ou uma antena acoplada a um trem, por exemplo, se mantém conectado a uma AP enquanto se move de um ponto de conexão até o outro (WU; FAN, 2016). Um UE muito rápido pode passar por diversos APs em um curto período de tempo. A partir do momento que um UE passa pela "fronteira" de dois APs, o mecanismo de Handover é ativado. É possível concluir baseado no que foi informado que em altas velocidades esse mecanismo será ativado diversas vezes. Ademais, por conta da alta velocidade, o tempo para que o Handover ocorra é muito pequeno e ocorre várias vezes, o que leva a falhas caso esse processo não ocorra a tempo. Outro ponto a ser levado em conta é que devido a alta quantidade de pessoas que podem ser levadas em um trem, ocorre o que é chamado de "*signaling-storm*", que é quando centenas de dispositivos realizam handover ao mesmo tempo, cenário que é bem comum já que trens levam uma alta quantidade de pessoas em suas viagens.

Tabela 1 – Comparação entre parâmetros de mobilidade

Parâmetro	Baixa Mobilidade	Alta Mobilidade	Fonte
SCS típico	15 kHz	60–240 kHz	(NOH; HUI; KIM, 2020)
Máx. Doppler	~1 kHz	~5.5 kHz	(NOH; HUI; KIM, 2020)
Latência Handover	50–100 ms	<5 ms	((HASEGAWA et al., 2018))

A Tabela 1 evidencia as diferenças entre cenários de baixa e alta mobilidade, além dos desafios associados. Primeiro, destaca-se o tamanho da subportadora (SCS, do inglês *Subcarrier Spacing*), que é pelo menos 4 vezes maior, contrastando com o tempo de coerência do canal drasticamente reduzido devido à alta velocidade. Em segundo lugar, a perda de penetração é significativamente maior, uma vez que a alta frequência do sinal emitido (comparada à frequência mais baixa do

LTE) resulta em maior atenuação. O Doppler máximo, por sua vez, chega a ser 5 vezes superior, o que implica um cenário com graves problemas de atenuação e degradação do sinal, demandando soluções para garantir sua qualidade.

Adicionalmente, observa-se que o tempo de handover é consideravelmente menor, tanto pela alta velocidade quanto pelo objetivo do NR de prover conexões URLLC. Por fim, a tabela contrasta as arquiteturas: no LTE (4G), a comunicação ocorre diretamente entre o UE e o AP, enquanto no 5G, um mediador — um relé posicionado sobre o trem ou à sua frente (TAKAHASHI et al., 2019) — recebe o sinal. Esse sinal é então transmitido via RoF (do inglês, *Radio-over-Fiber*) para uma célula interna ao trem, responsável por redistribuí-lo. Essa arquitetura será detalhada adiante, neste mesmo capítulo.

3 TECNOLOGIAS HABILITADORAS PARA COMUNICAÇÃO HST

Visando solucionar os problemas citados anteriormente, faz-se necessária a aplicação de várias soluções tanto em níveis mais baixos no protocolo como na camada física e transmissão, bem como em níveis superiores do protocolo. As mesmas serão explicadas a seguir:

3.1 Arquiteturas de rede para HST

Levando em conta os objetivos e os problemas que precisam ser solucionados, há duas topologias que são sugeridas: Macro-only e Macro-and-relay.

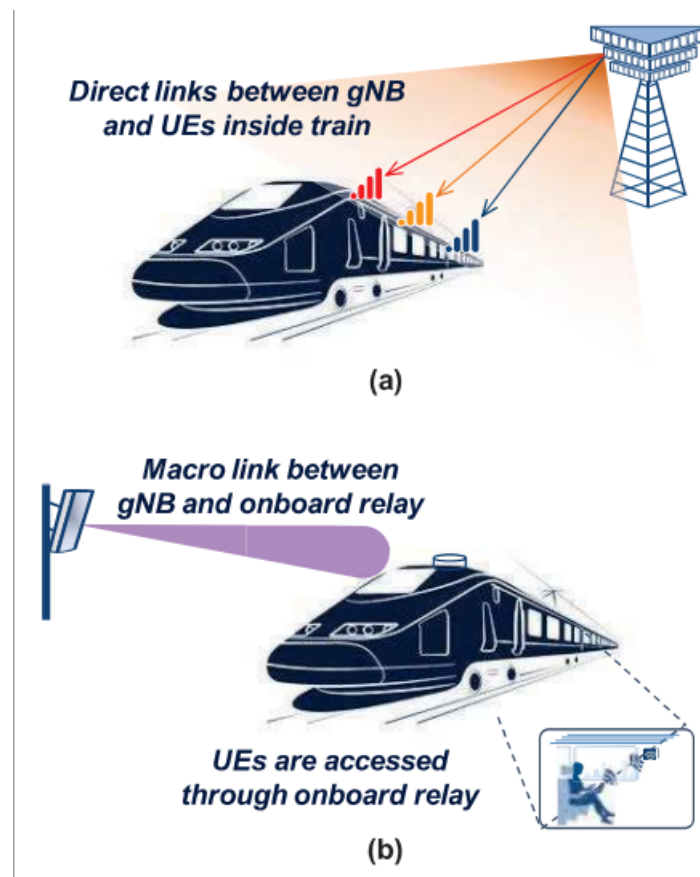


Figura 3 – Opções de layout para o cenário de implantação do trem de alta velocidade: a) layout Macro-only; b) layout com Macro-and-relay Retirado de [(NOH et al., 2019)].

3.1.1 Macro-only

A arquitetura Macro-only é viável para cenários de baixa complexidade, mas enfrenta desafios significativos em ambientes de alta mobilidade e densidade. De forma geral, essa arquitetura consiste em uma comunicação direta entre os APs e os UEs, dispensando infraestrutura

adicional como repetidores de sinal, o que simplifica sua implementação (Figura 3a). Contudo, ela enfrenta vários desafios no cenário de transmissão HST, como:

- **Perda de penetração de sinal:** A topologia Macro-only é indicada para frequências próximas a 4 GHz (NOH; HUI; KIM, 2020), devido à característica da onda em frequências mais baixas, menos suscetíveis a perdas por penetração. No 5G e 6G para alta velocidade, as frequências operam em torno de 30 GHz, podendo chegar a mais de 100 GHz, o que amplifica drasticamente a atenuação do sinal.
- **Signaling Storm:** Em trens, a quantidade de dispositivos a bordo pode chegar a centenas de usuários, gerando a "*Signaling Storm*" – fenômeno caracterizado pelo excesso de dispositivos realizando Handover simultâneo, causando congestionamento na rede e falhas de conexão.
- **Limitação de frequência:** Como mencionado, a redução da atenuação exige frequências abaixo de 6 GHz, o que restringe a capacidade de tráfego dos usuários em comparação com as mmWaves.

3.1.2 Macro-and-Relay

A arquitetura Macro-and-Relay é uma solução avançada para comunicações em trens de alta velocidade, combinando infraestrutura macrocelular externa com retransmissores (*relays*) a bordo do veículo (Figura 3b). Projetada para superar as limitações da abordagem Macro-only, essa arquitetura é especialmente eficaz em cenários de alta mobilidade e demanda por multi-Gbps. Sua estrutura é composta por:

- **Repetidor Onboard:** Dispositivo instalado no exterior do trem, responsável por conectar-se às APs via mmWave. Após estabelecida a conexão, o sinal é distribuído internamente por meio de fibra óptica para uma Femtocell, rede WiFi ou MIMO distribuído, atendendo aos UEs dentro do trem.
- **Backhaul em mmWave:** Opera em altas frequências (25-30 GHz) com beamforming direcional, compensando perdas por propagação e mantendo estabilidade mesmo a 500 km/h. Essa faixa de frequência permite aproveitar larguras de banda amplas para transmissões de alta capacidade.

Essa arquitetura oferece vantagens significativas frente à Macro-only, como:

- **Redução de perda por penetração:** O relay externo evita a atenuação causada pela carcaça metálica do trem, garantindo sinal robusto.
- **Mitigação da Signaling Storm:** Apenas o relé realiza handover (não centenas de dispositivos simultaneamente), reduzindo congestionamento na rede.

- **Taxas multi-Gbps:** O backhaul dedicado em mmWave assegura alta capacidade de transmissão de dados.

3.2 Time Division Duplexing (TDD) - Duplexação por Divisão de Tempo

O Duplexamento por Divisão de Tempo (TDD) emergiu como uma tecnologia fundamental para as redes móveis modernas, incluindo as de 4G e, notavelmente, as de 5G. Sua proeminência deriva da capacidade de otimizar o uso do espectro, permitindo que os sinais de UL (Uplink) e DL (Downlink) operem no mesmo canal de frequência, mas separados por slots de tempo (SOLUTIONS, 2025). Essa abordagem de compartilhamento de tempo é particularmente vantajosa para acomodar as crescentes demandas de tráfego assimétrico, comuns em aplicações intensivas em dados, como streaming de vídeo e jogos online, onde o tráfego de downlink frequentemente supera o de uplink. A flexibilidade inerente do TDD na utilização do espectro é crucial para lidar com os perfis de tráfego de dados diversos e muitas vezes assimétricos das aplicações contemporâneas e futuras. Isso posiciona o TDD não apenas como uma opção, mas como uma tecnologia central para redes móveis.

O TDD é uma técnica de comunicação que permite o fluxo de dados bidirecional em um único canal de frequência, dividindo o tempo em slots alternados para uplink e downlink. O princípio central do TDD é o compartilhamento de tempo: o canal de comunicação é segmentado em slots de tempo discretos, cada um exclusivamente designado para enviar ou receber dados. Essa comutação rápida entre as direções de UL e DL ocorre de forma tão veloz que parece contínua para o usuário (BURRELL, 2024). Uma analogia comum para entender o TDD é a operação de um walkie-talkie, onde um único botão controla se um usuário pode falar (transmitir) ou ouvir (receber) a qualquer momento, mas não ambos simultaneamente, embora compartilhem a mesma frequência. Essa operação de alternância em intervalos de tempo é a base do TDD.

O TDD oferece várias vantagens que o tornam uma escolha atraente para diversas aplicações de comunicação sem fio (BURRELL, 2024):

- **Eficiência Espectral:** Ao utilizar uma única banda de frequência para uplink e downlink, o TDD alcança inerentemente uma maior eficiência espectral em comparação com o FDD (Frequency Division Duplexing), que requer bandas de frequência separadas. Isso otimiza o uso do espectro disponível, um recurso escasso.
- **Alocação Dinâmica UL/DL:** O TDD proporciona uma flexibilidade notável na alocação de largura de banda. A duração e o número de slots de tempo de UL e DL podem ser ajustados dinamicamente com base nas demandas de tráfego em tempo real, tornando-o altamente adequado para ambientes com fluxos de dados assimétricos. Por exemplo, se o download é priorizado, mais slots podem ser reservados para o downlink.

- **Custo-Efetividade:** O TDD reduz a necessidade de bandas de frequência separadas e pode aproveitar o mesmo circuito de rádio para transmissão e recepção, o que leva a projetos de hardware simplificados e de menor custo.
- **Redução da Interferência Intra-Canal:** Ao garantir que a transmissão e a recepção não ocorram simultaneamente na mesma frequência, o TDD minimiza inerentemente a autointerferência dentro do canal.
- **Escalabilidade:** A natureza flexível do TDD permite que ele suporte uma ampla gama de aplicações e tamanhos de rede, adaptando-se a diversos cenários de implantação.

Compreender as diferenças entre TDD e FDD é crucial para otimizar o desempenho da rede e para a concepção de simulações. A Tabela 2 resume as principais distinções entre as duas técnicas.

Tabela 2 – Comparação do Duplexamento por Divisão de Tempo (TDD) e Duplexamento por Divisão de Frequência (FDD)

Característica	Duplexamento por Divisão de Tempo (TDD)	Duplexamento por Divisão de Frequência (FDD)
Uso da Frequência	Banda única para UL/DL	Bandas de frequência separadas para UL/DL
Direção da Transmissão	Alternada (sequencial)	Simultânea
Perfil de Latência	Maior/Variável (devido a slots de tempo)	Menor/Consistente (fluxo contínuo)
Eficiência Espectral	Alta (uso eficiente de banda única)	Baixa (requer espectro pareado)
Complexidade de Hardware	Maior (devido a tempo complexo)	Menor (tempo mais simples)
Requisito de Sincronização	Crítico (alinhamento de tempo preciso)	Mais simples (separação de frequência)
Adequação para Tráfego Assimétrico	Excelente (alocação dinâmica)	Limitada (alocação estática)

3.3 OFDM

O OFDM é uma técnica de modulação digital que codifica dados binários em múltiplas frequências portadoras. Opera como uma forma sofisticada de multiplexação por divisão de frequência (FDM, do inglês *Frequency Division Multiplexing*), onde um fluxo de bits de entrada é demultiplexado em vários fluxos paralelos. Cada um desses fluxos modula, por sua vez, um sinal de subportadora distinto e espaçado de forma estreita (SADJADPOUR, 2004). A característica distintiva do OFDM reside na ortogonalidade destas subportadoras. Esta propriedade permite que os seus espectros se sobreponham sem causar ICI, eliminando a necessidade das tradicionais bandas de guarda de frequência e, conseqüentemente, aumentando a eficiência espectral em comparação com os sistemas FDMA (do inglês *Frequency Division Multiple Access*) convencionais.

A demodulação no receptor baseia-se em algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) para um processamento de sinal eficiente.

A decisão fundamental de permitir a sobreposição de subportadoras ortogonais, facilitada pela Transformada Rápida de Fourier, implica uma compensação direta entre eficiência e robustez. A arquitetura central do OFDM permite que as subportadoras se sobreponham devido à sua ortogonalidade, o que elimina as bandas de guarda e aumenta significativamente a eficiência espectral. No entanto, esta ortogonalidade é extremamente sensível a erros de sincronização de frequência e a deslocamentos Doppler. Quando a ortogonalidade é perdida, ocorre uma ICI severa, onde a potência de uma subportadora se espalha para as outras, degradando a qualidade do sinal. Esta situação revela uma compensação de engenharia fundamental: o OFDM maximiza a utilização da largura de banda ao sobrepor subportadoras, mas esta escolha de projeto introduz uma dependência crítica da sincronização precisa de frequência e tempo. A busca por alta eficiência espectral torna inerentemente o sistema mais vulnerável a deficiências do canal que perturbam a ortogonalidade, especialmente em ambientes dinâmicos. (MARCHETTI et al., 2009)

O 5G NR adota o OFDM como um componente central da sua interface aérea, concebida para suportar uma vasta gama de serviços novos e aprimorados, incluindo hologramas, fábricas automatizadas e carros autônomos. Uma inovação chave é o conceito de "numerologias escaláveis", que definem as características físicas da forma de onda, principalmente o espaçamento das subportadoras e o comprimento do símbolo correspondente no domínio do tempo. Esta flexibilidade é crucial para adaptar o sistema a diversos cenários de implementação, faixas de frequência e casos de uso, desde cobertura de baixa largura de banda e ampla área até aplicações de alta largura de banda e latência ultrabaixa. (RAJAGOPALAN, 2025)

3.4 Cell-Free Massive MIMO

No Cell-Free Massive MIMO, uma grande quantidade de APs distribuídos geograficamente é conectada a uma unidade central de processamento, atendendo simultaneamente a um grande número de usuários com os mesmos recursos de tempo e frequência. Embora o Cell-Free Massive MIMO opere tradicionalmente em frequências celulares, é possível sua combinação com bandas de ondas milimétricas (NGO, 2016). Essa tecnologia integra os princípios do Massive MIMO (múltiplas antenas) e da comunicação cell-free, proporcionando:

- Melhoria na eficiência espectral
- Cobertura mais uniforme
- Redução de interferência

O Cell-Free Massive MIMO representa uma evolução significativa em relação às redes celulares tradicionais, baseando-se em uma arquitetura distribuída onde múltiplos APs de baixa

potência, espalhados por uma área de cobertura, trabalham em conjunto para servir os usuários sem a delimitação rígida de células. Essa abordagem elimina as fronteiras entre células, permitindo uma comunicação mais uniforme e eficiente. O processamento cooperativo é essencial nesse sistema, pois os APs coordenam-se por meio de uma unidade central de processamento (CPU, do inglês *Central Process Unit*) ou localmente, utilizando técnicas avançadas de beam-forming. Além disso, o escalonamento massivo é um princípio fundamental, já que um grande número de APs, muitas vezes superior ao número de usuários ativos, é empregado para garantir alta capacidade, confiabilidade e eficiência energética. Essa combinação de elementos permite que o Cell-Free Massive MIMO ofereça desempenho superior em termos de cobertura, taxa de transmissão e latência, tornando-o uma tecnologia promissora para futuras redes sem fio, como o 6G.

3.4.1 Modelo do Sistema

Considere uma rede composta por M APs de antena única, que servem K UEs distribuídos na área de cobertura. Os APs estão conectados a uma CPU por meio de enlaces de *fronthaul* de capacidade limitada. A CPU é responsável pelo processamento centralizado e possui conhecimento do número de usuários K , do número de APs M , dos coeficientes de canal e de suas estatísticas. O sistema opera sobre um protocolo TDD, com blocos de coerência de τ_c símbolos, dos quais τ_p são utilizados para pilotos ortogonais para estimação de canal.

3.4.2 Estimação de Canal com MMSE

No uplink, os usuários transmitem sequências de pilotos ortogonais. Seja $\sqrt{T_p^{\text{OMA}}} \boldsymbol{\varphi}_k^{\text{OMA}} \in \mathbb{C}^{T_p^{\text{OMA}} \times 1}$ o piloto do k -ésimo usuário OMA, com $\|\boldsymbol{\varphi}_k^{\text{OMA}}\|^2 = 1$. O sinal recebido no m -ésimo TRP é:

$$\mathbf{y}_m^{\text{OMA}} = \sqrt{\tau_p^{\text{OMA}}} \rho_u \sum_{k=1}^{K_{\text{OMA}}} g_{mk} \boldsymbol{\varphi}_k^{\text{OMA}} + \mathbf{w}_m^{\text{OMA}}, \quad (3.1)$$

Onde ρ_u é a SNR normalizada pelo uplink, g_{mk} é o ganho de canal entre o m -ésimo AP e o k -ésimo usuário, e $\mathbf{w}_m^{\text{OMA}}$ é o vetor de ruído aditivo com elementos i.i.d $\sim \mathcal{CN}(0, 1)$.

A projeção do sinal recebido sobre o piloto $\boldsymbol{\varphi}_k^{\text{OMA}}$ resulta em:

$$\tilde{y}_{mk}^{\text{OMA}} = \left(\boldsymbol{\varphi}_k^{\text{OMA}} \right)^H \mathbf{y}_m^{\text{OMA}}. \quad (3.2)$$

A estimativa MMSE do canal g_{mk} é então:

$$\hat{g}_{mk} = \frac{\sqrt{\tau_p^{\text{OMA}}} \rho_u \beta_{mk}}{\tau_p^{\text{OMA}} \rho_u \beta_{mk} + 1} \tilde{y}_{mk}^{\text{OMA}}, \quad (3.3)$$

onde β_{mk} é a variância do canal. A variância correspondente da estimativa do canal, denotada por γ_{mk} , é calculada como:

$$\gamma_{mk} = \mathbb{E}\{|\hat{g}_{mk}|^2\} = \frac{\tau_p^{OMA} \rho_u (\beta_{mk})^2}{\tau_p^{OMA} \rho_u \beta_{mk} + 1}. \quad (3.4)$$

3.4.3 Transmissão Downlink e Precodificação

No downlink, as APs utilizam as estimativas de canal para precodificar os sinal. Adota-se o *conjugated beamforming* com restrição de potência de longo prazo. O sinal transmitido pelo m -ésimo AP é:

$$x_m^{OMA} = \sqrt{\rho_d} \sum_{k=1}^{K_{OMA}} \sqrt{\eta_{mk}} \hat{g}_{mk}^* s_k, \quad (3.5)$$

onde ρ_d é a SNR normalizada do downlink, η_{mk} é o coeficiente de controle de potência, e s_k é o símbolo destinado ao k -ésimo usuário, com $\mathbb{E}\{|s_k|^2\} = 1$.

A potência transmitida é limitada por:

$$\mathbb{E}\{|x_m^{OMA}|^2\} = \rho_d \sum_{k=1}^{K_{OMA}} \eta_{mk} \gamma_{mk} \leq \rho_d, \quad (3.6)$$

Onde $\gamma_{mk} = \mathbb{E}\{|\hat{g}_{mk}|^2\}$. O sinal recebido no k -ésimo usuário é:

$$r_k^{OMA} = \sum_{m=1}^M g_{mk} x_m^{OMA} + w_k \quad (3.7)$$

com $w_k \sim \mathcal{CN}(0, 1)$.

3.4.4 Análise de desempenho do Downlink

Com base no sinal recebido pelo k -ésimo usuário, expresso na equação (3.7), é possível decompô-lo para analisar os fatores que impactam o desempenho da comunicação. A equação do sinal recebido pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} r_k^{OMA} = & \underbrace{\sqrt{\rho_d} \left\{ \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mk}} g_{mk} \hat{g}_{mk}^* \right\}}_{DS_k} s_k \\ & + \underbrace{\sqrt{\rho_d} \left(\sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mk}} g_{mk} \hat{g}_{mk}^* - \mathbb{E} \left\{ \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mk}} g_{mk} \hat{g}_{mk}^* \right\} \right)}_{SI_k} s_k \\ & + \underbrace{\sum_{k' \neq k}^{K_{OMA}} \sqrt{\rho_d} \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{mk'}} g_{mk'} \hat{g}_{mk'}^* s_{k'}}_{IUI_{kk'}} + w_k \end{aligned} \quad (3.8)$$

Nesta equação, os termos são mutuamente não correlacionados e representam:

- DS_k : O sinal desejado (*Desired Signal*) destinado ao k-ésimo usuário OMA.
- SI_k : A autointerferência (*Self-interference*), que sugere da incerteza no ganho de beamforming devido à falta de informação instantânea do canal k-ésimo usuário.
- $IUI_{kk'}$: A interferência entre usuários (*Inter-user interference*), causada pelo k-ésimo usuário da rede OMA ($\forall k' \neq k$)

A partir dessa decomposição, a Eficiência Espectral (SE, do inglês *Spectral Efficiency*), medida em bits/s/Hz, para o k-ésimo usuário OMA é dada por:

$$SE_k^{OMA} = (1 - \frac{\tau_p^{OMA}}{\tau_c}) \log_2(1 + SINR_k^{OMA}), \quad (3.9)$$

Onde $SINR_k^{OMA}$ é a relação Sinal-Interferência-mais-Ruído (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) no k-ésimo usuário, expressa como:

$$SINR_k^{OMA} = \frac{|DS_k|^2}{\mathbb{E}\{|SI_k|^2\} + \sum_{k' \neq k}^{K_{OMA}} \mathbb{E}\{|IUI_{kk'}|^2\} + 1}. \quad (3.10)$$

Os termos de potência do sinal desejado, da autointerferência e da interferência usuários são calculados da seguinte forma:

$$|DS_k|^2 = (\sum_{m=1}^M \sqrt{\rho_d \eta_{mk}} \gamma_{mk})^2, \quad (3.11)$$

$$\mathbb{E}\{|SI_k|^2\} = \rho_d \sum_{m=1}^M \eta_{mk} \beta_{mk} \gamma_{mk}, \quad (3.12)$$

$$\mathbb{E}\{|IUI_{kk'}|^2\} = \rho_d \sum_{m=1}^M \beta_{mk} \eta_{mk'} \gamma_{mk'} \quad (3.13)$$

Finalmente, a taxa de soma alcançável (*Achievable sum rate*) para a rede OMA-base distribuída pode ser escrita como a soma da eficiência espectral de todos os usuários:

$$R^{OMA} = \sum_{k=1}^{K_{OMA}} SE_k^{OMA}. \quad (3.14)$$

3.5 Numerologia e Estrutura de Quadro

No NR 5G, o OFDM é escolhido como esquema base de transmissão. Para cenários de alta mobilidade, como o de trens, utilizar um valor alto de subportadora e, conseqüentemente, um símbolo OFDM mais curto é desejável para evitar a interferência entre subportadoras induzida pelo efeito Doppler (NOH; HUI; KIM, 2020).

3.5.1 Seleção de subcarrier spacing

O Subcarrier Spacing refere-se à distância em frequência entre subportadoras adjacentes em um sistema OFDM. Ele determina o espaçamento entre as subportadoras que compõem o sinal transmitido. Partindo do pressuposto que o UE está a 500 km/h e uma frequência portadora de 25 GHz, o Doppler shift máximo (f_m) é de 11,58 kHz. É possível chegar a esse valor usando a equação (1), da seguinte forma:

$$f_m = \frac{v \cdot f_c}{c} = \frac{138,89 \text{ m/s} * (2,5 * 10^4) \text{ Hz}}{3 * 10^8 \text{ m/s}} = 11,58 \text{ kHz} \quad (3.15)$$

O tempo de coerência do canal é o inverso do doppler shift máximo, e pode ser calculado por:

$$T_c = \frac{1}{f_m} = \frac{1}{2 \cdot (11,58 \times 10^3)} \approx 36,5 \mu\text{s} \quad (3.16)$$

Logo, o tempo de coerência é de $36,5 \mu\text{s}$. Nesse cenário, a performance do link será severamente degradada por conta de interferência entre subportadoras induzida pelo efeito Doppler. A forma de solucionar isso é uma duração curta do símbolo OFDM. Visando satisfazer a frequência e as condições de tempo e domínio do canal, um espaçamento de subportadora de 180 kHz foi selecionado. (NOH et al., 2019)

Tendo em vista que o tempo de símbolo deve ser menor que o tempo de coerência, a SCS deve ser inferior a $36,5 \mu\text{s}$. A duração do símbolo OFDM pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$T_{\text{symb}} = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{180} = 5,56 \mu\text{s} \quad (3.17)$$

Logo, conclui-se que o valor adotado proporciona espaço de tempo suficiente para o envio de todos os pacotes sem interferência entre eles, garantindo que o canal permaneça quasi-estático. (NOH et al., 2019).

4 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

4.1 Metodologia da Avaliação 1: Enlace Vagão x Access Point

O modelo Single Tap Channel Profile adotado nesta pesquisa tem sua fundamentação técnica direta na especificação 3GPP TS 38.101 (3GPP, 2020), documento que estabelece os requisitos de desempenho de rádio para redes 5G NR. O Single Tap Channel Profile (Perfil de Canal de Toque Único) é um modelo simplificado de canal de rádio definido na especificação 3GPP TS 38.101, que estabelece requisitos de rádio para dispositivos de usuário e estações-base em redes 5G NR.

Características principais:

- **1. Propagação em um único caminho (Tap):** Representa um cenário idealizado onde o sinal chega ao receptor por apenas um caminho direto, sem reflexões, difrações ou espalhamento. Não há multicaminhos (multipath).
- **2. Sem desvanecimento seletivo em frequência:** Como há apenas um caminho, o canal não introduz variações de amplitude ou fase que dependam da frequência do sinal. A resposta do canal é plana em toda a banda.

4.1.1 Apresentação das fórmulas do modelo

O modelo de trem de alta velocidade considera um cenário em que o UE desloca-se com velocidade constante ao longo de uma trajetória retilínea, passando por uma sequência de APs equidistantes. A Figura 4 ilustra a geometria do modelo, no qual a distância entre antenas adjacentes é denotada por D_s , e a distância mínima entre o trem e uma antena é D_{min} . No instante $t = 0$, o trem está exatamente no ponto médio entre as duas antenas.

O deslocamento doppler instantâneo é dado por:

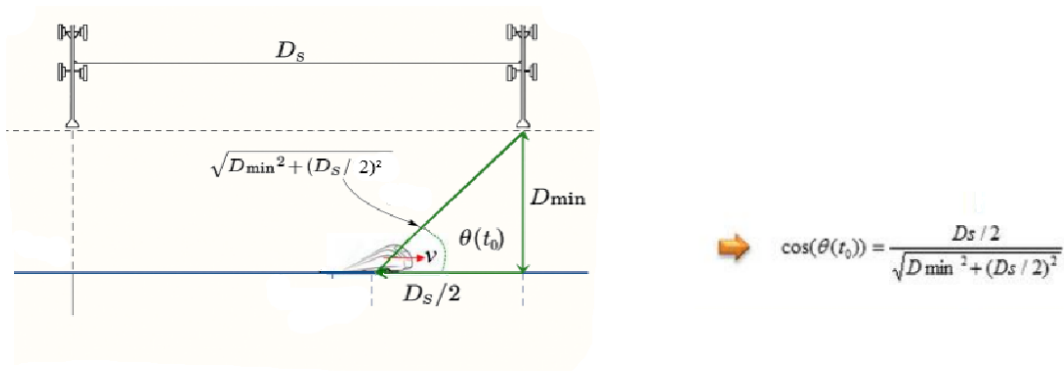


Figura 4 – Função quando $t = 0$.

$$Fd(t) = f_m \cdot \cos(\theta(t)) \quad (4.1)$$

A função $\cos(\theta(t))$ é crucial para modelar a variação do deslocamento Doppler e é definida em partes, refletindo as diferentes fases do movimento do trem em relação a um AP:

4.1.1.1 Quando o trem se aproxima do AP ($0 \leq t \leq \frac{D_s}{v}$)

Nesta fase, o trem está a mover-se da sua posição inicial ($\frac{D_s}{2}$ de um AP) em direção ao AP. A distância horizontal do trem em relação ao ponto diretamente abaixo da AP diminui. A geometria do cenário pode ser verificada na imagem:

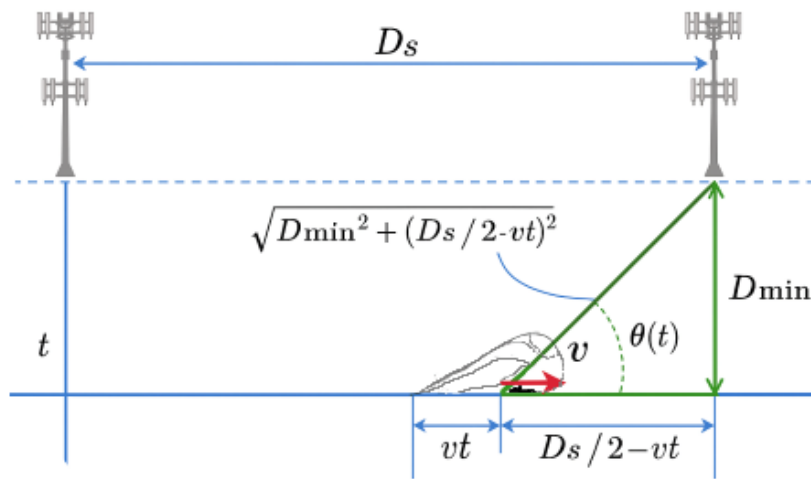


Figura 5 – Trem após de deslocar t segundos.

Realizando uma aplicação direta de trigonometria básica nos lados do triângulo apresentados, é possível chegar na seguinte fórmula:

$$\cos(\theta(t)) = \frac{D_s/2 - vt}{\sqrt{D_{\min}^2 + (D_s/2 - vt)^2}} \quad (4.2)$$

4.1.1.2 Quando o trem passa pela AP e se afasta dela ($\frac{D_s}{v} \leq t \leq \frac{2D_s}{v}$)

Após passar pelo ponto diretamente abaixo do AP, o trem continua a afastar-se. A distância horizontal do trem em relação ao ponto diretamente abaixo do AP aumenta novamente, mas em direção oposta.

$$\cos(\theta(t)) = \frac{-1.5D_s + v \cdot t}{\sqrt{D_{\min}^2 + (-1.5D_s + v \cdot t)^2}} \quad (4.3)$$

4.1.1.3 Para tempos posteriores, o padrão repete-se ($t > \frac{2D_s}{v}$)

O movimento do trem é cíclico em relação aos APs igualmente espaçadas. Portanto, o comportamento do ângulo repete-se a cada ciclo de $\frac{2D_s}{v}$ segundos (tempo que leva para o trem percorrer a distância entre duas APs e a próxima).

$$\cos(\theta(t)) = \cos\left(\theta\left(t \bmod \frac{2D_s}{v}\right)\right) \quad (4.4)$$

4.1.2 Fluxograma do código

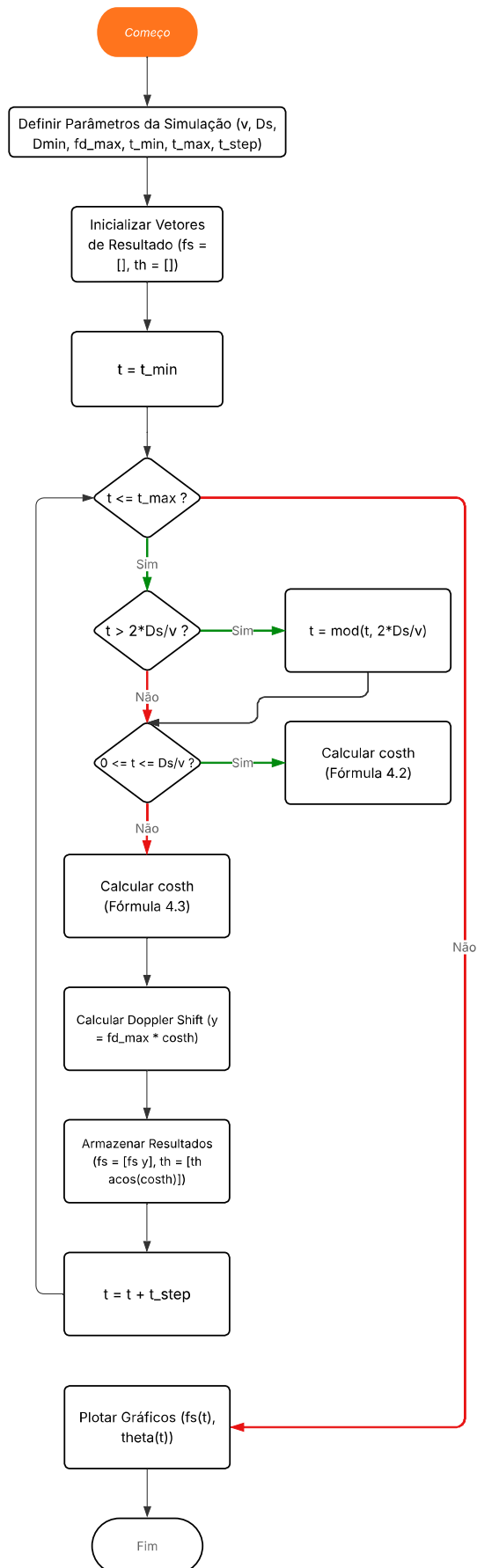


Figura 6 – Fluxograma da lógica de simulação do Modelo 3GPP (Apêndice A).

4.2 Metodologia da Avaliação 2: Sistema Cell-Free Massive MIMO Indoor

Esta seção detalha a metodologia da segunda avaliação, focada no desempenho do sistema Cell-Free Massive MIMO no cenário interno do vagão. Para avaliar o sistema em condições de uso realistas, a simulação foi projetada para ser executada em três cenários distintos, variando a densidade de usuários (K). Respondendo a uma questão levantada pela banca, os valores de $K=20$, $K=40$ e $K=100$ foram escolhidos propositalmente para representar cenários de baixa, média e alta densidade de passageiros, respectivamente. Esta abordagem permite uma análise escalável do impacto da interferência entre usuários (IUI) à medida que a rede se aproxima da sua capacidade máxima.

A simulação foi estruturada de forma modular para construir este modelo. As subseções seguintes (4.2.1 a 4.2.5) detalham a implementação de cada componente principal: a geração do cenário físico, a modelagem dos transreceptores, a modelagem do canal, a definição da SNR e a alocação de potência.

4.2.1 Geração do Cenário Físico

A primeira etapa do código consiste em construir um ambiente físico para a simulação. Foram utilizados os valores de comprimento de 28 metros e de 3 metros para altura, que são dimensões do vagão do trem Series L0 (Central Japan Railway Company, 2024). Dentro deste espaço, múltiplos APs são distribuídos de forma equidistante ao longo do perímetro, com o intuito de garantir uma área de cobertura onipresente, em linha com a arquitetura Cell-Free. Em contrapartida, os UEs são posicionados de forma aleatória dentro do vagão, para simular de forma mais natural a disposição dos passageiros.

4.2.2 Modelagem dos Transreceptores

Visando uma abordagem mais realista, a simulação considera que os componentes de hardware não são ideais. A função modela as respostas em frequências dos circuitos tanto nos APs quanto nos UEs. Essa etapa introduz o efeito de não reciprocidade de hardware no canal, um desafio relevante, conforme elaborado por (MORTE-PALACIOS et al., 2020)

4.2.3 Modelagem de Larga Escala do Canal

Com base nos cálculos obtidos na Seção 5.1.2, a função determina os coeficientes de larga escala do canal, **Betas** (β_{mk}). Estes coeficientes representam os efeitos combinados de

perda de percurso (*path loss*) e sombreamento (*shadowing*). Para o cálculo desse coeficiente, a simulação emprega o modelo de canal 3GPP para ambientes Urban Micro (UMi), conforme a especificação (3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2020), garantindo que a atenuação do sinal siga um padrão realista.

4.2.4 Definição da Relação Sinal-Ruído Normalizada

Para que a estimação do canal e o cálculo sejam realizados, é necessário estabelecer a qualidade do sinal no sistema. É calculado então a Relação Sinal-Ruído (SNR) normalizada para o uplink (ρ_u) e para downlink (ρ_d), conforme referenciadas na equação 3.4. Estes valores são calculados com base em parâmetros globais do sistema, como a potência de transmissão, a largura de banda e figura de ruído dos receptores.

4.2.5 Alocação de potência

A alocação de potência no downlink é uma etapa fundamental para mitigar a interferência entre usuários e otimizar o desempenho do sistema. A simulação adota o método de alocação de potência 'per-AP', no qual, para cada AP, o coeficiente de controle de potência é o mesmo para todos os usuários. Os coeficientes **Etas** (η_{mk}) são calculados conforme a seguinte equação:

$$\eta_{mk} = \frac{1}{\sum_{i=1}^K \gamma_{mi}} \quad (4.5)$$

onde γ_{mi} é a variância da estimativa de canal entre o m-ésimo AP e o i-ésimo usuário, e K é o número total de usuários. Esta formulação garante que a restrição de potência de longo prazo em cada AP, detalhada na Seção 3.4.3, seja satisfeita.

Com o cenário e os parâmetros estabelecidos, a simulação prossegue para a estimação de canal (obtenção dos **Gammas**, γ_{mi}) e o cálculo de performance, seguindo o embasamento teórico detalhado nas Seções 3.4.2 e 3.4.4.

5 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO 1: COMUNICAÇÃO VAGÃO X ACCESS POINT

Tendo sido expostos nos capítulos anteriores os fundamentos teóricos e os principais desafios das comunicações em cenários de alta mobilidade, como o pronunciado efeito Doppler, a rápida variação temporal do canal e as restrições impostas pela estrutura metálica dos trens, bem como as tecnologias propostas para mitigá-los, é necessária a validação desses conceitos. Este capítulo apresenta a avaliação de desempenho do enlace entre o vagão e o AP por meio de simulações fundamentadas no modelo Single-Tap da especificação 3GPP TS 38.101 (3GPP, 2020). A análise concentra-se no deslocamento Doppler e na variação angular do sinal em diferentes velocidades e configurações de rede, com o objetivo de quantificar o impacto da mobilidade extrema e verificar a eficácia das soluções arquiteturais e de camada física discutidas anteriormente.

5.1 Cenários de avaliação

Visando avaliar o desempenho do canal e situações diferentes, os seguintes parâmetros serão utilizados:

Parâmetro	HST-750	HST-972	HST-1000	HST-1667	Ericsson
D_s	300 m	300 m	300 m	300 m	400-500 m
$D_{\min}$	2 m	2 m	2 m	2 m	20-50 m
v	300 km/h	500 km/h	300 km/h	500 km/h	300 km/h
Fd	750 Hz (15 kHz SCS)	972 Hz (15 kHz SCS)	1000 Hz (30 kHz SCS)	1667 Hz (30 kHz SCS)	—

Tabela 3 – Parâmetros dos cenários de trem de alta velocidade

A Tabela 3 descreve os parâmetros para cinco cenários diferentes de trens de alta velocidade, utilizados para testar o desempenho do canal de propagação em condições de deslocamento Doppler. Cada coluna representa um cenário específico, identificado por um nome que reflete o Doppler Shift. Aqui está a explicação detalhada dos parâmetros:

- **D_s (Distância inicial do trem em relação ao AP):**
 - Valor de 400 a 500 metros para a Ericsson, 300 metros para todos os outros cenários. Representa a distância inicial entre o trem e a estação base (AP) no início do teste.
- **$D_{\min}$ (Distância mínima entre o AP e a ferrovia)**
 - Valor fixo de 2 metros para todos os cenários e 20 a 50 metros para a Ericsson. Corresponde à distância perpendicular mais próxima entre a estação base e os trilhos do trem.

- v (Velocidade do trem):
 - **HST-750:** 300 km/h
 - **HST-972:** 500 km/h
 - **HST-1000:** 300 km/h
 - **HST-1667:** 500 km/h
 - **Ericsson:** 300 km/h
- Fd (Doppler shift):
 - **HST-750:** 750 Hz com 15 kHz de SCS
 - **HST-972:** 972 Hz com 15 kHz de SCS
 - **HST-1000:** 1000 Hz com 15 kHz de SCS
 - **HST-1667:** 1667 Hz com 15 kHz de SCS
 - **Ericsson:**

5.1.1 Resultados e comentários

Os resultados apresentados nesta seção foram gerados através de simulações no OCTAVE baseadas no modelo HST 3GPP, cuja implementação completa está documentada no APÊNDICE A. Todos os cenários utilizam a mesma estrutura de código, variando apenas os parâmetros listados na Tabela 3:

Simulação 1:

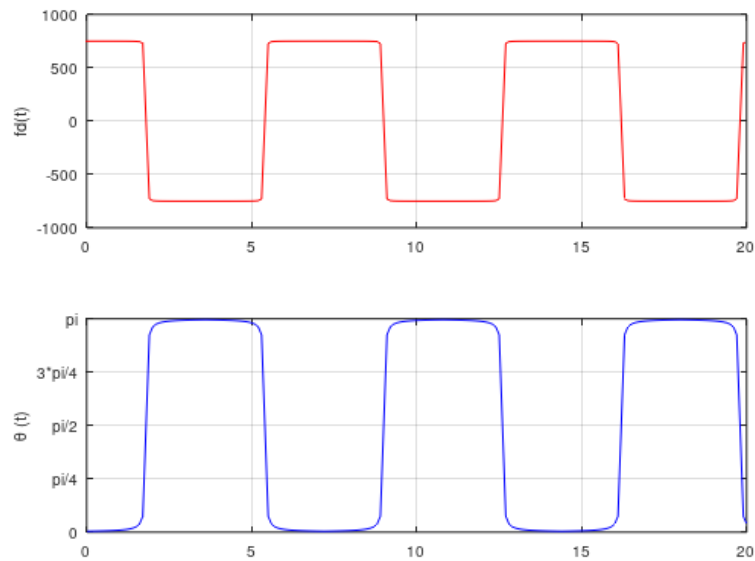


Figura 7 – HST-750.

A simulação evidencia um comportamento de deslocamento Doppler relativamente estável, com pico em torno de 750 Hz. A curva de $\theta(t)$ acompanha variações suaves, indicando um canal com tempo de coerência razoável, adequado para subportadoras de 15 kHz. Esse cenário representa um equilíbrio entre velocidade e desempenho espectral.

Simulação 2:

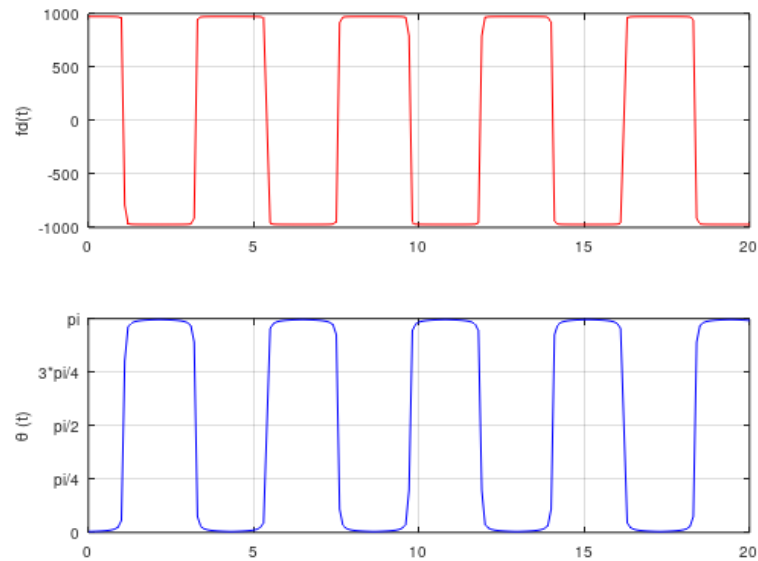


Figura 8 – HST-972.

Com o aumento da velocidade para 500 km/h, observa-se um crescimento considerável no deslocamento Doppler, alcançando aproximadamente 972 Hz. Embora o SCS permaneça em 15 kHz, há um estreitamento no tempo de coerência do canal, o que pode comprometer a ortogonalidade das subportadoras. O gráfico de $\theta(t)$ mostra transições mais abruptas, condizentes com variações rápidas no canal.

Simulação 3:

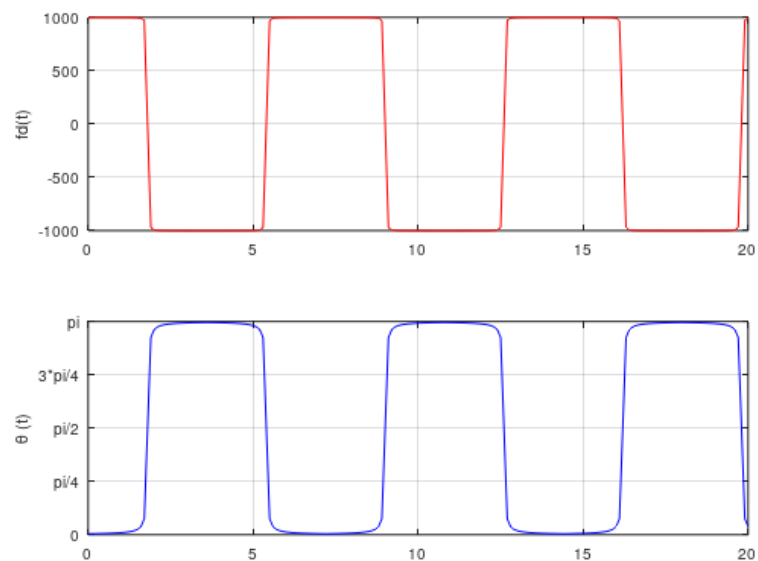


Figura 9 – HST-1000.

Neste cenário, apesar da velocidade se manter em 300 km/h, a utilização de uma subportadora mais larga (30 kHz) contribui para maior robustez frente ao efeito Doppler. A curva Doppler atinge 1000 Hz, mas o tempo de símbolo mais curto favorece a manutenção da ortogonalidade, reduzindo a interferência entre subportadoras.

Simulação 4:

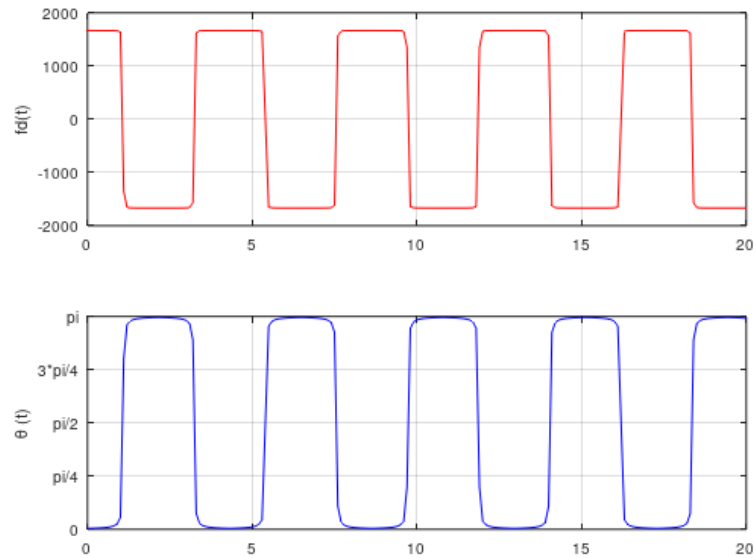


Figura 10 – HST-1667.

Trata-se do cenário mais crítico, com velocidade elevada e SCS ampliado. O deslocamento Doppler chega a 1667 Hz, com flutuações intensas e frequentes. O gráfico de $\theta(t)$ revela uma variação angular acentuada, exigindo estratégias como tracking dinâmico de fase e uso de algoritmos de compensação em tempo real para manter a qualidade do link.

Simulação 5:

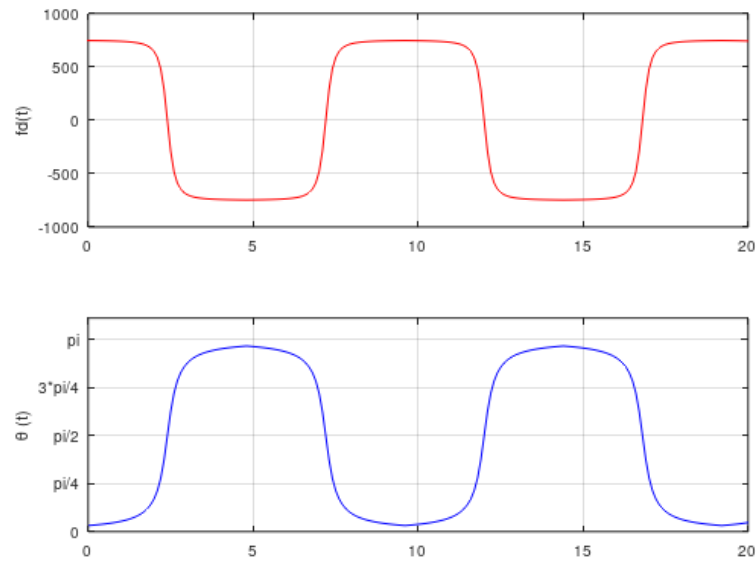


Figura 11 – Ericsson.

A simulação Ericsson, com maior distância entre AP e trem (D_s), apresenta um comportamento Doppler mais moderado. Embora a velocidade seja de 300 km/h, a distância extra suaviza a curva de $\theta(t)$, favorecendo uma transição mais lenta no canal. Esse cenário é propício à aplicação de beamforming e agregação de portadoras para mitigar perdas.

5.1.2 Análise comparativa final

Reunindo os resultados, observa-se que o parâmetro mais determinante para a degradação do canal é o Fd máximo, diretamente proporcional à velocidade e à frequência. Os cenários com SCS de 30 kHz, embora mais eficientes em ambientes com alto Doppler, demandam maior precisão nos algoritmos de sincronização.

A curva de $\theta(t)$ funciona como indicador da dinâmica angular do canal, sendo mais abrupta nos cenários com menor D_s e maior velocidade, como no HST-1667. Esse comportamento reforça a necessidade do uso de sinais de referência adaptativos (DM-RS, PT-RS) e estratégias como Dual Connectivity com DAPS.

Estes achados confirmam os pressupostos teóricos sobre coerência temporal e estratégias de compensação Doppler descritas no capítulo 3, além de se alinharem com os resultados publicados por (NOH et al., 2019) e (WU; FAN, 2016)

6 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO 2: SISTEMA CELL-FREE MASSIVE MIMO

Tendo em vista que foi abordado no capítulo anterior o desempenho da comunicação entre a infraestrutura externa e o trem, agora o foco será na análise de desempenho dentro do vagão. Nessa seção será avaliada e quantificada a performance de um sistema Cell-Free Massive MIMO, uma das tecnologias habilitadoras discutidas na seção 3.4, dentro de um cenário de alta densidade e de área reduzida, como o vagão de um trem de alta velocidade.

Enquanto na avaliação anterior o foco foi em analisar os impactos impostos por Doppler Shift, essa análise tem o intuito de investigar a capacidade do sistema de oferecer cobertura uniforme de taxas de dados elevadas aos passageiros. Para tal, foi utilizado um modelo de simulação em ambiente OCTAVE, cuja metodologia é detalhada a seguir, tendo a descrição da implementação de cada etapa do processo.

6.1 Apresentação e Análise dos Resultados

Para avaliar o desempenho do sistema Cell-Free Massive MIMO em condições de uso realistas, a simulação foi executada para três cenários distintos, variando a densidade de usuários (K) dentro do vagão. Foram analisados os casos com $K = 20$, $K = 40$ e $K = 100$ usuários. A performance é mensurada pela Eficiência Espectral por usuário (bits/s/Hz) e apresentada por meio de Funções de Distribuição Cumulativa (CDF).

A análise comparativa dos cenários revela a relação intrínseca entre a carga da rede e o desempenho individual do usuário, destacando o impacto da interferência entre múltiplos usuários (IUI, do inglês *Inter-User Interference*).

6.1.1 Baixa Densidade ($K = 20$)

Esta figura ilustra o layout do cenário de simulação de baixa densidade. Os 20 UEs (pontos vermelhos) são posicionados aleatoriamente dentro do vagão, enquanto os APs (pontos azuis) estão distribuídos equidistantemente no perímetro, simulando a arquitetura Cell-Free.

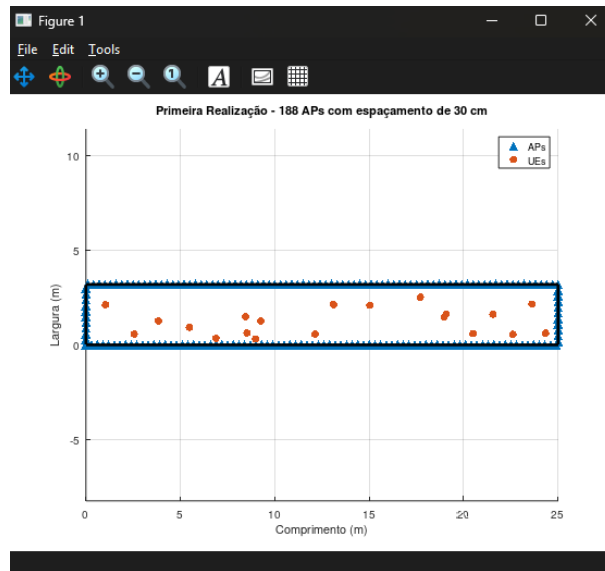


Figura 12 – Layout do cenário de simulação do vagão com $K=20$ usuários (vermelho) e APs (azul) distribuídos no perímetro.

Este gráfico detalha a análise de potência para $K=20$. Nota-se que a potência do 'Sinal Desejado' (barras azuis) é significativamente superior aos demais componentes. Isso confirma que, neste cenário de baixa carga, a Interferência Entre Usuários (IUI) é minimizada.

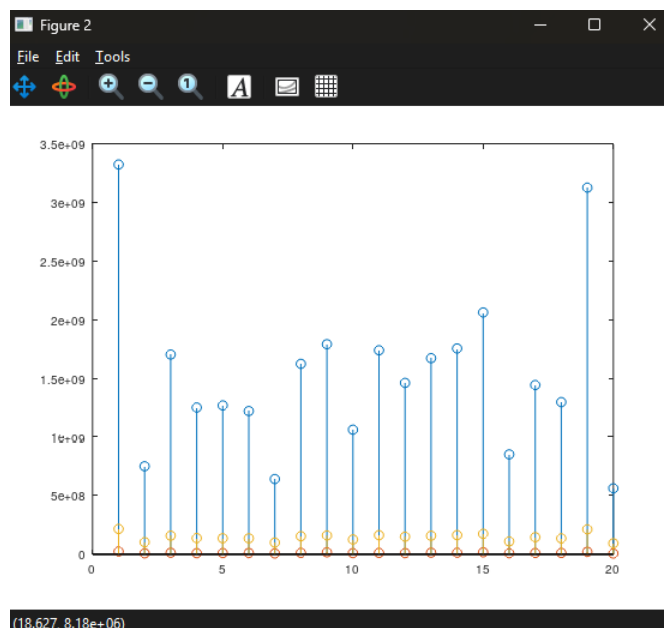


Figura 13 – Análise de potência do sinal para $K=20$ usuários, destacando a dominância do 'Sinal Desejado' (azul) sobre a 'Autointerferência' (vermelho) e a 'IUI' (amarelo)

A Função de Distribuição Cumulativa (CDF) para $K=20$ demonstra o alto desempenho do sistema. Como resultado da baixa interferência, este cenário alcança a maior eficiência espectral por usuário entre os testados, validando a eficácia do sistema em condições de baixa carga.

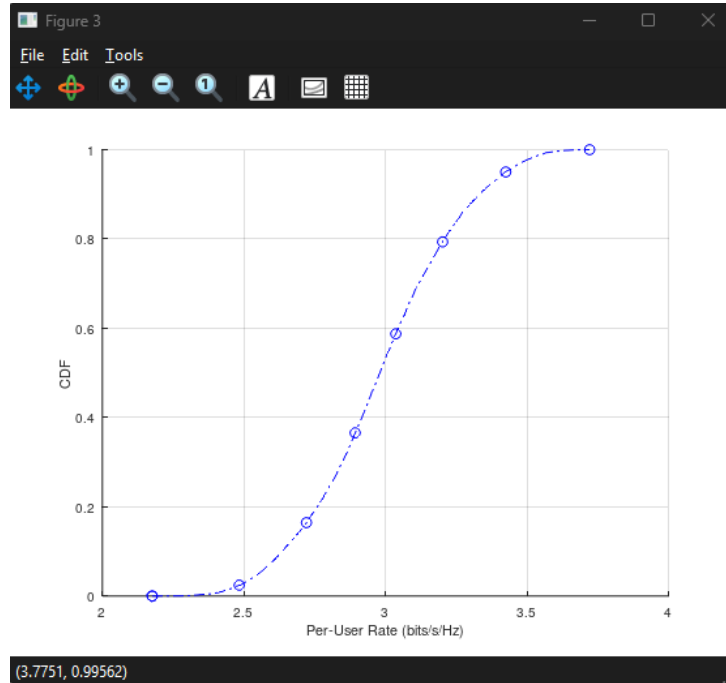


Figura 14 – CDF da Eficiência Espectral (bits/s/Hz) para o cenário de baixa densidade ($K=20$), demonstrando o mais alto desempenho individual.

6.1.2 Média Densidade ($K = 40$)

Esta figura ilustra o layout do cenário de média densidade, agora com $K = 40$ UEs posicionados aleatoriamente, simulando uma condição de uso moderado do vagão.

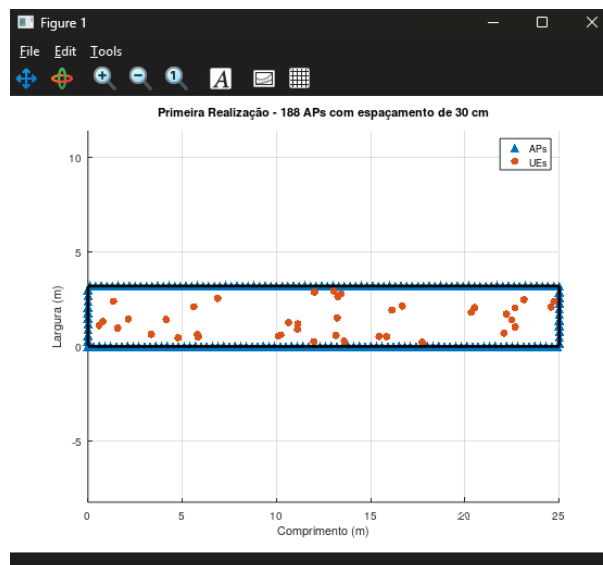


Figura 15 – Layout do cenário de simulação com densidade média ($K=40$ usuários), simulando uma condição de uso moderado.

Com $K=40$ usuários, a análise de potência mostra que a Interferência Entre Usuários (IUI, barras amarelas) torna-se mais presente e relevante. Embora o sinal desejado (azul) ainda seja dominante na maioria dos casos, o impacto da interferência começa a ser notável.

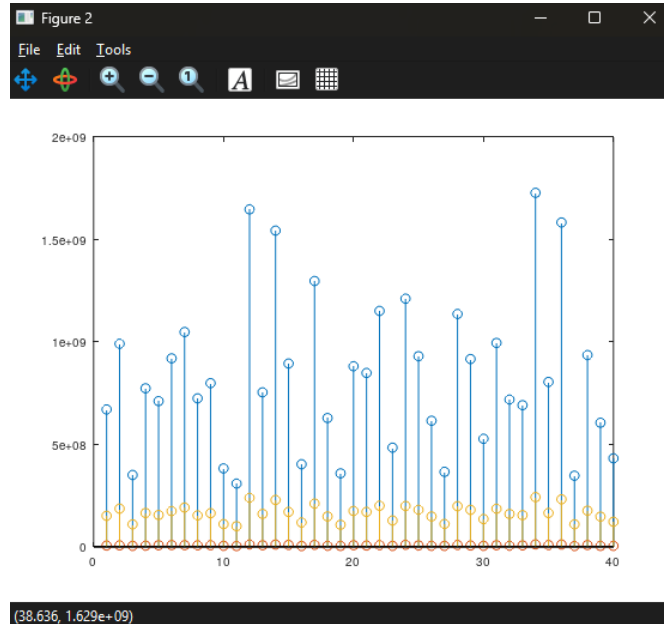


Figura 16 – Análise de potência do sinal para $K=40$ usuários. Nota-se o aumento da Interferência Entre Usuários (IUI, amarelo) em comparação com o cenário de baixa densidade.

A CDF para $K=40$ revela um desempenho robusto, mas com a natural degradação causada pelo aumento da IUI. A simulação indica que o sistema entrega uma eficiência espectral mediana (no 50º percentil) de aproximadamente 2.0 bits/s/Hz neste cenário.

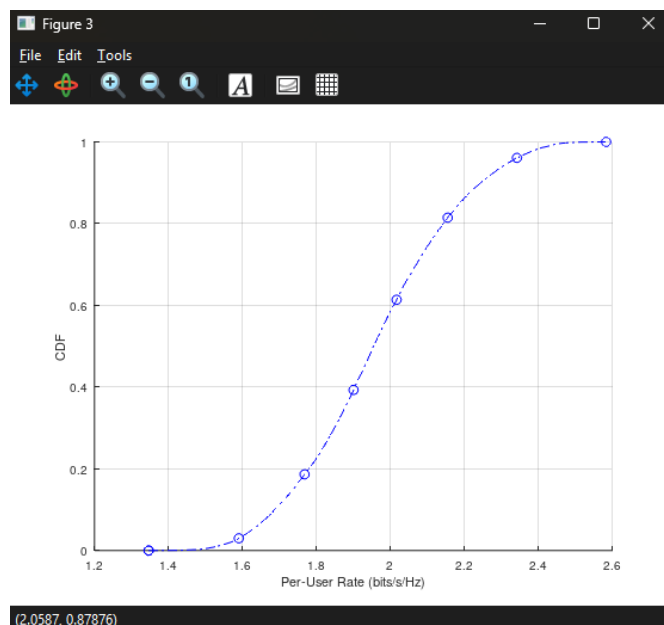


Figura 17 – CDF da Eficiência Espectral (bits/s/Hz) para $K=40$ usuários, indicando um desempenho robusto, mas com uma mediana inferior (aprox. 2.0 bits/s/Hz) devido à maior interferência.

6.1.3 Alta Densidade ($K = 100$)

Esta figura ilustra o layout do cenário de alta densidade ($K=100$), simulando uma condição de alta demanda, com o vagão densamente populado por 100 UEs.

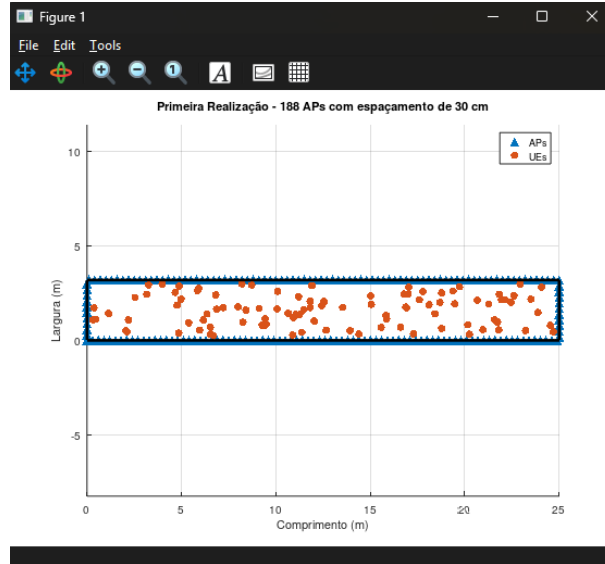


Figura 18 – Layout do cenário de simulação de alta densidade ($K=100$), representando uma condição de vagão densamente populado.

Na condição de alta demanda ($K=100$), a análise de potência demonstra que a Interferência Entre Usuários (IUI) se torna um fator dominante. As barras amarelas atingem níveis muito próximos ou até superiores ao sinal desejado para vários usuários.

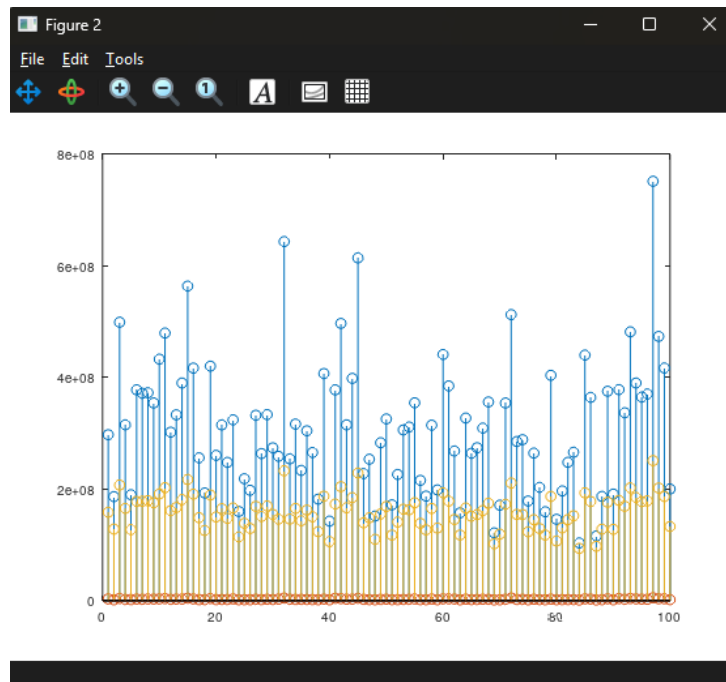


Figura 19 – Análise de potência do sinal para $K=100$ usuários. A IUI (amarelo) torna-se um fator dominante, aproximando-se ou superando o 'Sinal Desejado' (azul) para muitos usuários

A CDF para $K=100$ evidencia o impacto severo da IUI quando o sistema se aproxima da sua capacidade máxima. O desempenho individual é reduzido, resultando em uma eficiência espectral mediana de aproximadamente 0.7 bits/s/Hz

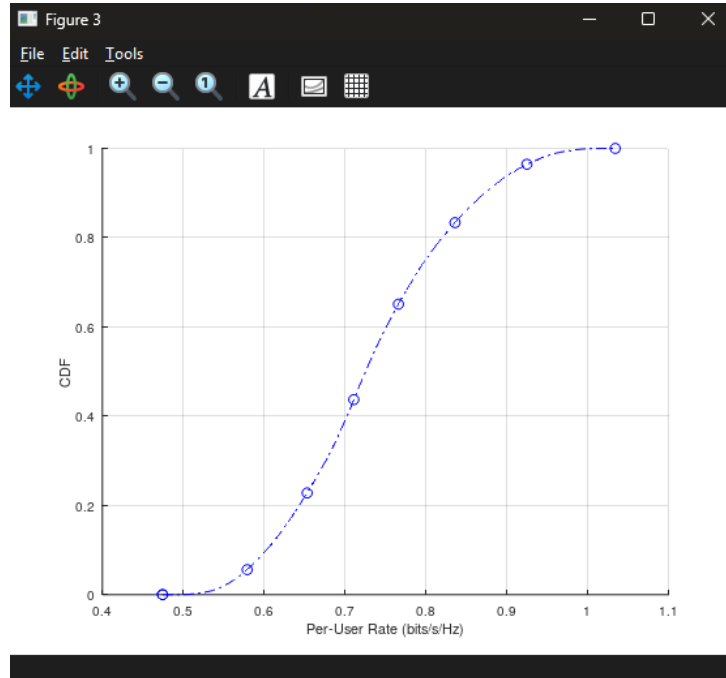


Figura 20 – CDF da Eficiência Espectral (bits/s/Hz) para $K=100$ usuários. O desempenho individual é severamente impactado pela IUI, resultando na menor eficiência espectral mediana (aprox. 0.7 bits/s/Hz).

Em suma, os resultados desta avaliação de desempenho no cenário indoor demonstram o trade-off fundamental da arquitetura Cell-Free Massive MIMO em um ambiente de alta densidade. A análise quantitativa nos três cenários ($K=20$, $K=40$ e $K=100$) confirma que, embora o sistema seja altamente eficaz em prover cobertura uniforme, a performance individual, medida pela eficiência espectral, é inversamente proporcional à densidade de usuários. Conclui-se que a Interferência Entre Usuários (IUI) é o fator limitante crítico para a qualidade de serviço à medida que a rede se aproxima de sua capacidade máxima.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou os desafios e as soluções tecnológicas para as comunicações em trens de alta velocidade no contexto das redes 5G e com perspectivas para o 6G. A análise confirmou que a mobilidade extrema impõe obstáculos significativos, como o severo efeito Doppler, a rápida variação do canal, as perdas por penetração na carcaça metálica dos vagões e os handovers frequentes.

A investigação das tecnologias habilitadoras demonstrou que uma abordagem multicamadas é essencial. Arquiteturas como a Macro-and-Relay mostraram-se cruciais para mitigar a perda de penetração e centralizar o processo de handover, evitando o fenômeno de "signaling storm". A avaliação de desempenho do enlace vagão-AP, por meio de simulações baseadas no modelo 3GPP, quantificou o impacto do desvio Doppler e reforçou a necessidade de tecnologias adaptativas, como o uso de um SCS mais largo, para preservar a ortogonalidade do sinal OFDM. No ambiente interno do vagão, a análise do sistema Cell-Free Massive MIMO evidenciou sua eficácia em prover cobertura uniforme, ao mesmo tempo que destacou o trade-off entre a densidade de usuários e a eficiência espectral, onde a IUI se torna o fator limitante.

Como sugestão para trabalhos futuros e respondendo a um questionamento levantado pela banca, outras avaliações do enlace vagão-AP poderiam ser realizadas. A presente pesquisa focou nos efeitos do Doppler baseados na velocidade, mas a exploração de diferentes parâmetros do modelo 3GPP, como variar a distância mínima ou a distância entre APs, permitiria analisar o impacto direto da topologia da rede na frequência de handover e no comportamento do canal, complementando os achados deste trabalho.

Olhando para o futuro, a transição para o 6G intensificará esses desafios, enquanto trará ferramentas mais poderosas para superá-los. A exploração de bandas THz para alcançar taxas de dados na ordem de Tbps tornará os sistemas ainda mais sensíveis ao desvio Doppler, exigindo mecanismos de compensação e sincronização com precisão sem precedentes.

Nesse contexto, a IA e o aprendizado de máquina serão fundamentais na gestão da mobilidade altíssima. Soluções baseadas em IA permitirão a predição da trajetória do trem e do comportamento do canal, possibilitando beamforming proativo, handovers preditivos e alocação de recursos dinâmica. A IA será a chave para orquestrar a complexa rede de múltiplos feixes em bandas THz e para gerenciar a interferência de forma eficiente, garantindo a comunicação ultraconfiável e de baixíssima latência que as futuras aplicações exigirão.

Em suma, este trabalho demonstrou que as bases do 5G são um passo fundamental, mas a garantia de uma conectividade resiliente em cenários de mobilidade extrema dependerá da integração nativa da inteligência artificial nas arquiteturas de rede 6G, transformando os desafios atuais em oportunidades para uma nova era de transporte conectado.

REFERÊNCIAS

- 3GPP. TS 38.101-1: NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone. *3GPP Technical Specification (TS 38.101-1)*, 2020.
- 3rd Generation Partnership Project (3GPP). *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*. [S.l.], 2020. Version 16.1.0.
- BURRELL, S. Time division duplexing explained: A beginner's guide to efficient communication. **Wray Castel**, 2024.
- Central Japan Railway Company. **Design - SCMaglev**. 2024. <<https://scmaglev.jr-central-global.com/about/design/>>. Acessado em: 05 de outubro de 2024.
- HASEGAWA, F. et al. High-speed train communications standardization in 3gpp 5g nr. **IEEE Communications Standards Magazine**, v. 2, n. 1, p. 44–52, 2018.
- HEMEL, M. S. K. et al. Design trends of lc-tank based cmos ilfd for shf and ehf transceiver applications. **Alexandria Engineering Journal**, v. 67, p. 301–342, 2023. ISSN 1110-0168. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822007980>>.
- MARCHETTI, N. et al. Ofdm: Principles and challenges. In: _____. [S.l.: s.n.], 2009. p. 29–62. ISBN 978-1-4419-0672-4.
- MORTE-PALACIOS, J. et al. Impact of channel non-reciprocity in cell-free massive mimo. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 9, n. 3, p. 344–348, 2020.
- NGO, H. Q. Cell-free massive mimo: New concept. **Wireless Future**, 2016.
- NOH, G.; HUI, B.; KIM, I. High speed train communications in 5g: Design elements to mitigate the impact of very high mobility. **IEEE Wireless Communications**, v. 27, n. 6, p. 98–106, 2020.
- NOH, G. et al. Realizing multi-gbps vehicular communication: Design, implementation, and validation. **IEEE Access**, v. 7, p. 19435–19446, 2019.
- PYRGIDIS, C. N. **Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation**. [S.l.]: CRC Press, 2016.
- RAJAGOPALAN, R. 5g ofdm numerologies. **Award Solution**, 2025.
- SADJADPOUR, H. Orthogonal frequency division multiplexing (ofdm). In: _____. [S.l.: s.n.], 2004. p. 333–353. ISBN 9780750676953.
- SOLUTIONS, V. O que é temporização e sincronização 5g? **Centro de Aprendizagem**, 2025. Disponível em: <<https://www.viavisolutions.com/pt-br/o-que-e-temporizacao-e-sincronizacao-5g>>.
- TAKAHASHI, Y. et al. Field trial of 28ghz band 5g downlink massive mimo employing beam tracking in railway environment. **IEICE Transactions on Communications**, E102.B, n. 8, p. 1411–1417, 2019.
- TSE, D.; VISWANATH, P. Contents. In: _____. **Fundamentals of Wireless Communication**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005. p. vii–xiv.

WU, J.; FAN, P. A survey on high mobility wireless communications: Challenges, opportunities and solutions. **IEEE Access**, v. 4, p. 450–476, 2016.

APÊNDICE A – CÓDIGO OVTAVE PARA SIMULAÇÃO DO MODELO SINGLE TAP (3GPP TS 38.101)

```

% High Speed Train Model - 3GPP

fd= 750; % Doppler spread em Hz (Doppler Shift Máximo)
Dmin = 2; % Distancia entre antenas e o trilho em metros
Ds= 300;% Distância entre antenas em metros
v_kmh= 500; % Velocidade do trem em Km/h
v_ms= v_kmh * (1000/3600); % Conversão de km/h para m/s
v=v_ms; % Velocidade em m/s

tmin = 0; % Tempo inicial
tmax = 20; % Tempo final
tstep= 0.01; % Passo temporal

function y = CosTh(t, Dmin, Ds, v) % Função recursiva de acordo com o modelo
    if (t >= 0) && ( t <= Ds/v)
        y = (Ds./2 - v.*t)/sqrt(Dmin.^2 + (Ds./2 - v.*t)^2);
    elseif (t > Ds/v) && ( t<=(2.* Ds./v))
        y = (-1.5.*Ds + v.*t)/sqrt(Dmin.^2 + (-1.5.*Ds + v.*t)^2);
    elseif (t > 2 .* Ds./v)
        y = CosTh(mod(t, 2.*Ds./v),Dmin, Ds, v); %Periodicidade
    end
end

%simulação principal
fs=[]; % Doppler shift (Hz)
th=[]; % Ângulo theta(t) [rad]

for t=tmin:tstep:tmax
    costh = CosTh(t,Dmin,Ds,v);% Cos(theta) em instantes diferentes de tempo
    y = fd.*CosTh(t,Dmin,Ds,v);% Doppler shift em instantes diferentes de tempo
    fs = [fs y];
    th = [th acos(costh)];
end

%% Geração de Gráficos (Figura X.Y)

```

```
subplot(2,1,1);
plot(tmin:tstep:tmax,fs,'r-');
xlim([tmin tmax]); ylim([-1000 1000]);
ylabel('fs(t)');
grid();

subplot(2,1,2);
plot(tmin:tstep:tmax,th,'b-');
xlim([tmin tmax]);
ylim([0 pi()]);
set(gca,'ytick',[0 pi/4 pi/2 3*pi/4 pi]);
set(gca,'yticklabel',{'0', 'pi/4', 'pi/2', '3*pi/4', 'pi'});
ylabel('\theta (t)');

grid();
```