



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS SOBRAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FÁBIO LÚCIO DE ALMEIDA SOUSA JÚNIOR**

**MELHORIAS NA CONECTIVIDADE EM SISTEMAS DE CONTROLE DE TRENS:  
UMA AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE HANDOVER EM AMBIENTE CBTC**

**SOBRAL**

**2023**

FÁBIO LÚCIO DE ALMEIDA SOUSA JÚNIOR

MELHORIAS NA CONECTIVIDADE EM SISTEMAS DE CONTROLE DE TRENS: UMA  
AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE HANDOVER EM AMBIENTE CBTC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do *Campus* Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo.

SOBRAL

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

J1m Júnior, Fábio Lúcio de Almeida Sousa.  
MELHORIAS NA CONECTIVIDADE EM SISTEMAS DE CONTROLE DE TRENS: UMA  
AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE HANDOVER EM AMBIENTE CBTC / Fábio Lúcio de Almeida  
Sousa Júnior. – 2023.  
76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,  
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo.

1. Sinalização Ferroviária. 2. Comunicações sem fio. 3. CBTC. 4. Handover. I. Título.

CDD 621.3

---

FÁBIO LÚCIO DE ALMEIDA SOUSA JÚNIOR

MELHORIAS NA CONECTIVIDADE EM SISTEMAS DE CONTROLE DE TRENS: UMA  
AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE HANDOVER EM AMBIENTE CBTC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do *Campus* Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 08/12/2023

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Esp. Edgar Vergopolem Ribeiro  
ALSTOM Brasil Energia e Transporte

À minha família, Cleidia, Eduardo e Yohana que me deram suporte e amor em todos os momentos. À Profa. Jermana Lopes que me guiou, incentivou e resgatou ao longo da graduação. Aos meus familiares, amigos, professores e colegas de trabalho que me fazem querer ser uma pessoa melhor todos os dias.



## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Ceará, por disponibilizar recursos acadêmicos essenciais e de alta qualidade, tais como o excelente acervo bibliográfico, instalações modernas de ensino e pesquisa, e a infraestrutura tecnológica, que foram fundamentais para o meu sucesso acadêmico durante todo o curso.

Além disso, agradeço aos professores, que contribuíram com seus conhecimentos e experiências para o meu crescimento acadêmico, pessoal e profissional. Seus ensinamentos e orientações foram de grande valor e ajudaram a moldar minha trajetória acadêmica e profissional.

Ao Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo, cuja orientação, apoio e incentivo foram essenciais para a conclusão bem-sucedida deste trabalho. Sua expertise foram cruciais na realização deste projeto, e sou grato pelo seu comprometimento sincero, paciência e apoio durante todo o processo.

Por fim, aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. Francisco Rafael Marques Lima e Eng. Esp. Edgar Vergopolem Ribeiro pelo valioso tempo dedicado à avaliação deste trabalho e pelas contribuições e sugestões que foram fundamentais para o seu aprimoramento.

## RESUMO

Proporcionando uma alternativa eficaz de locomoção em grandes centros urbanos, o transporte ferroviário experimentou notável crescimento nas últimas décadas, atendendo à demanda crucial de modernização dos sistemas de controle de trens. Este fenômeno destaca a importância dos Sistemas Controle de Trem Baseado em Comunicações (CBTC), desempenhando papel crítico ao controlar dinamicamente a velocidade e a posição dos trens, impactando diretamente a segurança dos passageiros e a eficiência operacional. Através do subsistema *Data Communication System* (DCS) utilizando comunicações sem fio, como a tecnologia IEEE 802.11 (Wi-Fi), o CBTC ajusta a velocidade e a posição dos trens ao longo da rota. Este trabalho tem como objetivo investigar o impacto do *handover* em sistemas ferroviários que fazem uso da tecnologia CBTC. A pesquisa concentra-se na otimização do processo de *handover* para aprimorar o tempo de resposta dos trens a comandos críticos, como frenagem de emergência. A metodologia utilizada envolveu a modelagem de um simulador que contempla desde a modelagem utilizada para o movimento do trem, a comunicação trem-terra e os algoritmos de *handover* aplicados. A análise abrange a identificação e compreensão dos atrasos na comunicação decorrentes do *handover*, explorando como os diferentes algoritmos podem influenciar o desempenho geral do sistema. O estudo também explora o uso de métricas específicas para avaliar a eficácia dos diversos algoritmos examinados. Os resultados indicam que a otimização do processo de *handover* pode promover melhorias significativas nos sistemas CBTC e destacam a importância da pesquisa contínua na área de sinalização em sistemas de metrô e das tecnologias de telecomunicações presentes no CBTC para melhorar a segurança e eficiência desses sistemas.

**Palavras-chave:** Sinalização Ferroviária; Comunicações sem fio; CBTC; *Handover*.

## ABSTRACT

By providing an effective alternative for transportation in large urban centers, railway transportation has witnessed remarkable growth in recent decades, addressing the critical demand for the modernization of train control systems. This phenomenon underscores the significance of Communication-Based Train Control (CBTC) systems, playing a crucial role in dynamically controlling train speed and position, directly impacting passenger safety and operational efficiency. Through the Data Communication System (DCS) subsystem using wireless communications, such as IEEE 802.11 (Wi-Fi) technology, CBTC adjusts train speed and position along the route. This work aims to investigate the impact of handover in railway systems utilizing CBTC technology. The research focuses on optimizing the handover process to enhance train response time to critical commands, such as emergency braking. The methodology employed involved modeling a simulator that encompasses the modeling used for train movement, train-ground communication, and the applied handover algorithms. The analysis encompasses the identification and understanding of communication delays resulting from handover, exploring how different algorithms may influence the overall system performance. The study also explores the use of specific metrics to assess the effectiveness of the various examined algorithms. Results indicate that optimizing the handover process can significantly enhance CBTC systems and underscore the importance of ongoing research in the signaling field of metro systems and the telecommunication technologies present in CBTC to improve the safety and efficiency of these systems.

**Keywords:** Railway Signaling; Wireless Communications; CBTC; Handover.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa global de sistemas CBTC. . . . .	18
Figura 2 – Áreas do conhecimento envolvidas no estado da arte. . . . .	21
Figura 3 – Comunicações sem fio ferroviário. . . . .	27
Figura 4 – Ilustração de blocos fixos e blocos móveis. . . . .	28
Figura 5 – Sistema de Controle de Trens Baseado em Comunicações. . . . .	31
Figura 6 – Componentes de bordo (a) e de via (b) no CBTC. . . . .	32
Figura 7 – Representação do DCS. . . . .	34
Figura 8 – <i>Handover</i> do trem ao longo da via. . . . .	35
Figura 9 – WLAN e outras tecnologias móveis em função da mobilidade e da taxa de dados. . . . .	36
Figura 10 – a) WLAN em modo infraestrutura. b) WLAN em modo <i>ad-hoc</i> . . . . .	41
Figura 11 – Decisão de <i>handover</i> dependendo do <i>threshold</i> . . . . .	45
Figura 12 – Etapas críticas do cenário simulado. . . . .	48
Figura 13 – Sinal de interesse e interferente usados para cálculo da SINR do trem. . . . .	51
Figura 14 – Curvas de MCS usadas no 802.11g. . . . .	53
Figura 15 – Processo de <i>handover</i> do HPR-L. . . . .	56
Figura 16 – Processo de <i>handover</i> do HPR-H. . . . .	57
Figura 17 – Gráfico de frenagem do trem para o HPR-L. . . . .	61
Figura 18 – Gráfico de frenagem do trem para o HPR-H. . . . .	63
Figura 19 – Gráfico de frenagem do trem para o HOLO. . . . .	63
Figura 20 – Gráfico de frenagem do trem para o (a) HMMS e (b) HMME. . . . .	64
Figura 21 – Gráfico de resultado geral para cada valor de métrica. . . . .	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Adaptação de enlace do 802.11g. . . . .	52
Tabela 2 – Parâmetros da simulação. . . . .	55
Tabela 3 – Dados de algoritmos de decisão de <i>handover</i> . . . . .	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	<i>Access Point</i>
ATC	Controle Automático de Trens
ATO	Operação Automática de Trens
ATP	Proteção Automática de Trens
ATS	Supervisão Automática de Trens
BART	<i>San Francisco Bay Area Rapid Transit District</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CBTC	Controle de Trem Baseado em Comunicações
CCO	Centro de Controle de Operações
CIR	<i>Carrier-to-Interference Ratio</i>
CR	<i>Cognitive Radio</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
DCS	<i>Data Communication System</i>
DIFS	<i>Distributed Coordination Function Inter-Frame Space</i>
DoS	<i>Denial-of-Service</i>
DS	<i>Distribution System</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
FNS	Ferrovia Norte Sul
HMM	<i>Handover</i> Baseado em Média Móvel
HMME	<i>Handover</i> Baseado em Média Móvel Exponencial
HMMS	<i>Handover</i> Baseado em Média Móvel Simples
HO	<i>Handover</i>
HOLO	<i>Handover</i> Baseado em Localização
HPR-H	<i>Handover</i> Baseado em Potência de Recepção com Histerese
HPR-L	<i>Handover</i> Baseado em Potência de Recepção com Limiar
IAPP	<i>Inter Access Point Protocol</i>

IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFS	<i>Inter-Frame Space</i>
IHM	Interface homem-máquina
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
MME	Média Móvel Exponencial
MMS	Média Móvel Simples
MRUV	Movimento Retilíneo Uniformemente Variado
MTA	<i>Baltimore Maryland Transit Administration</i>
MU-MIMO	<i>Multi-User Multiple-Input and Multiple-Output</i>
NYCT	<i>New York City Transit</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PCF	<i>Point Coordination Function</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PIFS	<i>Point Coordination Function Inter-Frame Space</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RCS	<i>Radio Communitacion System</i>
RSS	<i>Received Signal Strength</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RTA	<i>Real-Time Application</i>
RTS	<i>Request to Send</i>
SIFS	<i>Short Inter-Frame Space</i>
SINR	<i>Signal to Interference-plus-Noise Ratio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
STA	<i>Station</i>

TBTC	<i>Transmission-based Train Control</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
VAL	<i>Véhicule Automatique Léger - Veículo leve automatizado</i>
WECA	<i>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</i>
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPA	<i>Wi-Fi Protected Access</i>
ZC	Controlador de Zona

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v(t)$	Velocidade instantânea
$v_0$	Velocidade inicial
$a$	Aceleração
$t$	Tempo
$s(t)$	Posição
$s_0$	Posição inicial
$PL$	Perda de percurso
$\alpha$	Parâmetro que caracteriza a atenuação do sinal
$d$	Distância entre o transmissor e o receptor
$d_0$	Distância de referência
$\sigma_{sf}$	Desvio padrão da distribuição normal
$\mathcal{N}$	Variável aleatória normal padrão
$FF$	Desvanecimento de rápida variação
$\gamma$	Relação sinal-ruído mais interferência
$p_{tx}$	Potência de transmissão dos <i>Access Points</i> (APs)
$h_{k,j}$	Coefficientes de canal
$k'$	Índices dos APs interferentes
$\eta$	Ruído gaussiano branco
$D$	Taxa de dados
$T$	<i>throughput</i>
$E_D$	Atraso médio
$E_X$	Número médio de <i>slots</i> requeridos para uma transmissão sucedida
$E_{slot}$	Tamanho médio de um <i>slot</i>
$P_{tr}$	Probabilidade de que pelo menos uma AP transmita um pacote no <i>slot</i> considerado
$\beta$	Tamanho do <i>slot</i>
$P_s$	Probabilidade de que uma transmissão de pacote ocorrida seja sucedida

$T_s$	Tempo médio que o meio é percebido como ocupado devido a uma transmissão sucedida
$T_c$	Tempo médio que o meio é percebido como ocupado devido a uma colisão
$\rho$	Taxa de freio de emergência
$C$	Comprimento do vagão
$L$	Largura do vagão
$f$	Frequência
$W$	Largura de banda
$P_t$	Potência de transmissão
$S_{rx}$	Sensibilidade do receptor
$\sigma_s$	Sombreamento
$N_0$	Densidade espectral de ruído
$k$	Tamanho do pacote

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	17
<b>1.2</b>	<b>Motivação e Escopo da Monografia</b>	19
<b>1.3</b>	<b>Estado da Arte</b>	20
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b>	24
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	26
<b>2.1</b>	<b>Comunicações Ferroviárias Modernas</b>	26
<b>2.1.1</b>	<i>Introdução às Comunicações Ferroviárias</i>	26
<b>2.1.2</b>	<i>Impacto das Comunicações nas Operações Ferroviárias</i>	27
<b>2.1.3</b>	<i>O Papel dos Sistemas de Sinalização nos Trens</i>	28
<b>2.1.4</b>	<i>Controle de Trens Baseado em Comunicações (CBTC)</i>	29
<b>2.1.4.1</b>	<i>Camadas do Sistema CBTC</i>	30
<b>2.1.4.2</b>	<i>Tecnologia de Redes e Requisitos do Data Communication System (DCS)</i>	34
<b>2.2</b>	<b>IEEE 802.11</b>	36
<b>2.2.1</b>	<i>Histórico do IEEE 802.11</i>	36
<b>2.2.2</b>	<i>Características do IEEE 802.11</i>	38
<b>2.2.3</b>	<i>Handover</i>	43
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	47
<b>3.1</b>	<b>Cenário CBTC Simulado</b>	47
<b>3.1.1</b>	<i>Movimento do Trem</i>	48
<b>3.1.1.1</b>	<i>Velocidade Instantânea e Função Horária do Espaço</i>	48
<b>3.2</b>	<b>Comunicação Terra-Trem</b>	48
<b>3.2.1</b>	<i>Modelos de Propagação e Cálculo de Qualidade do Enlace Sem Fio</i>	49
<b>3.2.1.1</b>	<i>Perda de Percurso</i>	49
<b>3.2.1.2</b>	<i>Sombreamento</i>	50
<b>3.2.1.3</b>	<i>Desvanecimento de Pequena Escala</i>	50
<b>3.2.1.4</b>	<i>Cálculo da SINR</i>	50
<b>3.2.1.5</b>	<i>Adaptação de Enlace</i>	51
<b>3.2.1.6</b>	<i>Atraso de Pacote</i>	52

3.3	<b>Simulação de Nível Sistêmico</b> . . . . .	54
3.4	<b>Algoritmos de Handover</b> . . . . .	54
3.4.1	<i>Handover Baseado em Potência de Recepção com Limiar (HPR-L)</i> . . . . .	55
3.4.2	<i>Handover Baseado em Potência de Recepção com Histerese (HPR-H)</i> . . . . .	56
3.4.3	<i>Handover Baseado em Localização (HOLO)</i> . . . . .	57
3.4.4	<i>Handover Baseado em Média Móvel (HMM)</i> . . . . .	57
4	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	60
4.1	<b>Resultados do HPR-L</b> . . . . .	60
4.2	<b>Resultados do HPR-H</b> . . . . .	62
4.3	<b>Resultados do HOLO</b> . . . . .	62
4.4	<b>Resultados do HMM.</b> . . . . .	64
4.5	<b>Comparação dos resultados</b> . . . . .	65
5	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	67
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	69

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Os sistemas de transporte ferroviários tiveram um crescimento massivo em áreas urbanas nas últimas décadas. Os sistemas de metrô tornaram-se essenciais em grandes centros urbanos, proporcionando um deslocamento ágil e conveniente para distâncias curtas e médias (WHITNEY, 2012) isso tudo comportando uma grande número de usuários.

Os metrôs reduzem o uso de automóveis, limitando os riscos ambientais e à saúde associados às emissões de gases de escape e melhoram a qualidade de vida nas comunidades urbanas, limitando o congestionamento e fornecendo conexões necessárias de transporte dentro de uma cidade. Além disso, estudos empíricos também demonstraram um impacto positivo e significativo das linhas ferroviárias no crescimento econômico a longo e curto prazo (FOSU, 2021).

A qualidade do serviço de transporte ferroviário urbano pode ser visto, por exemplo, no metrô de São Paulo. Segundo o portal da transparência do metrô de São Paulo, em 2022, em média 2,6 milhões de pessoas utilizaram o metrô de São Paulo por dia em dias úteis. A maior demanda já registrada foi de 4,2 milhões de passageiros em um único dia. Este número foi registrado em 14 de novembro de 2013. E o tempo médio de percurso entre duas estações do sistema é estimado em 2 minutos.

Com o crescimento da demanda em grandes centros urbanos ao longo dos anos, surgiu a necessidade de modernizar os sistemas de controle de trens com o objetivo de otimizar o desempenho, aumentar a capacidade de transporte e garantir a segurança dos passageiros.

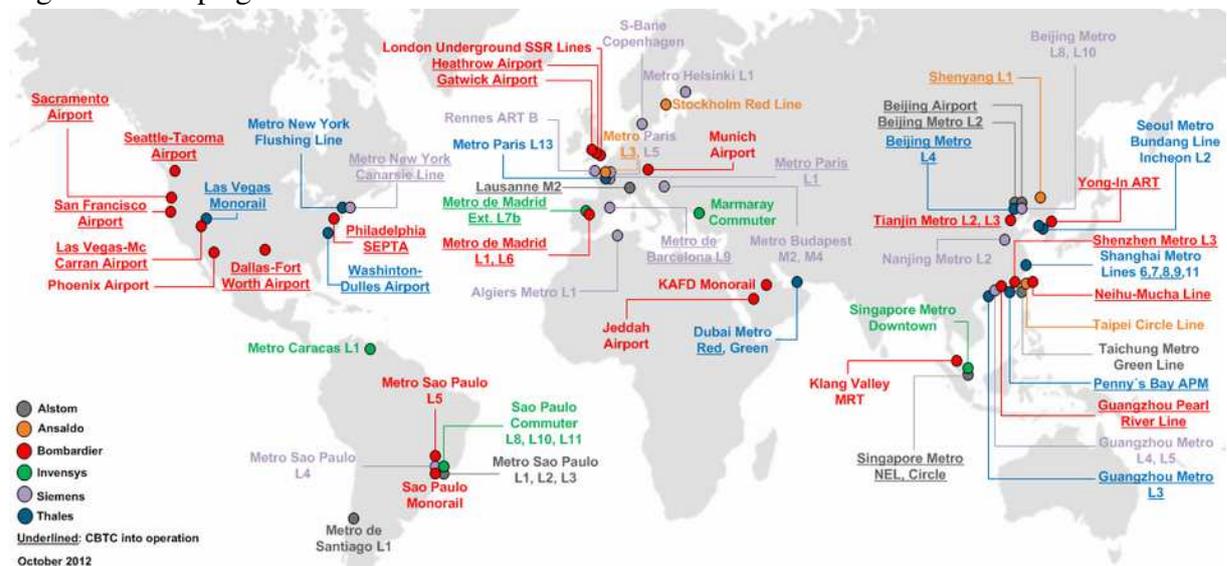
Para atender a essas necessidades, foram desenvolvidos os sistemas Controle de Trem Baseado em Comunicações (CBTC), que controlam a velocidade e posição dos trens de forma dinâmica, permitindo que o sistema opere de forma mais eficiente e segura. Um elemento central do sistema CBTC é o DCS, que é responsável por coordenar e gerenciar as informações de diferentes subsistemas dentro do sistema de controle.

O DCS é responsável por transportar informações de diferentes equipamentos, incluindo equipamentos de sinalização e controle de tráfego, garantindo a comunicação segura e eficiente entre eles para permitir o correto funcionamento do sistema CBTC. Desse modo, ele é responsável pelo controle da velocidade e gerenciamento da posição dos trens para garantir a segurança dos passageiros e permitir que o sistema opere de forma coordenada e eficiente

(FAROOQ; SOLER, 2017). O CBTC utiliza comunicação sem fio, geralmente por meio de rede *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), para transmitir informações em tempo real entre o trem e o centro de controle.

Na comunicação Wi-Fi do CBTC, há módulos transmissores e receptores instalados em cada uma das extremidades do trem e nos pontos do sistema de trilhos, que enviam e recebem dados de posição e velocidade do trem, bem como outros dados críticos do processo. Esse sistema permite que o trem se comunique com o centro de controle em tempo real, permitindo que a rede de controle ajuste a velocidade do trem e sua posição na rota, gerenciando todo o processo. A Figura 1 contém o mapa global com os sistemas CBTC existentes até outubro de 2012.

Figura 1 – Mapa global de sistemas CBTC.



Fonte: Fitzmaurice (2013, p. 74).

Outras tecnologias de comunicações móveis também são utilizadas em sistemas CBTC além do Wi-Fi, como o *Long-Term Evolution* (LTE) e o 5G (LIANG *et al.*, 2020; YOON *et al.*, 2022). Entretanto, o Wi-Fi ainda é o mais utilizado por esses sistemas uma vez que, para utilizar a tecnologia LTE ou 5G para transmitir dados sem fio é necessário pagar pelo uso do espectro de radiofrequência.

O termo "espectro" se refere a uma faixa de frequência do espectro eletromagnético utilizada para a transmissão de sinais sem fio. A regulamentação do uso desse recurso natural escasso e estratégico é tratada pelo Estado através de leis e diretrizes governamentais que determinam as faixas disponíveis a serem licitadas entre as empresas de telecomunicação interessadas. Essas empresas adquirem o direito de usar e explorar essas faixas conforme as

regras estabelecidas, por meio de licitações públicas (ANKER, 2017). O custo para obter o direito de uso pode variar bastante, dependendo do tamanho da faixa de frequência e da demanda do mercado. O processo de leilão é utilizado com o objetivo de maximizar o potencial econômico do espectro e garantir seu uso eficiente (NOZDRIN, 2022).

Desse modo, a utilização de tecnologias como LTE e 5G para sistemas CBTC acarreta custos a mais devido a necessidade de pagar pelo uso do espectro ao transmitir dados sem fios por meio dessas tecnologias.

Entretanto, as redes *Wireless Local Area Network* (WLAN), nas quais o Wi-Fi está inserido, utilizam o canal aberto, ou seja, operam na faixa de frequência não licenciada. Isto leva ao aparecimento de redes coexistentes que induzem interferência externa, enquanto os nós dentro da rede sofrem interferência interna. Essas interferências podem degradar o desempenho das WLANs (KIM *et al.*, 2009).

Além das interferências devido as redes coexistentes, as altas velocidades dos trens são desafiadoras para as redes WLAN que devem ser projetadas de modo a garantir que a troca de ponto de acesso (*handover*) ocorra de maneira que não haja perdas de pacote significativas pela comunicação sem fio, ou seja, o trem deve se manter conectado durante todo o percurso ao longo da via, fazendo a transferência de conexão entre os APs do DCS na via.

## 1.2 Motivação e Escopo da Monografia

O CBTC é uma tecnologia altamente utilizada em sistemas de sinalização de transporte ferroviário urbano, tendo em vista sua eficiência em fornecer *headways* mínimos, ou seja, um menor intervalo entre dois trens consecutivos. Com isto em mente, pode-se dizer que o *headway* de um sistema de transporte ferroviário está diretamente relacionado ao desempenho do sistema e a qualidade do serviço. Ou seja, quanto menor o *headway*, melhor o desempenho do sistema de sinalização e maior a qualidade do serviço ofertado. O DCS é um componente chave do CBTC uma vez que é responsável por transmitir todas as informações de posição e velocidade dos trens em tempo real para o Centro de Controle de Operações (CCO), bem como entregar comandos do CCO para os trens, por exemplo, um comando de frenagem de emergência. Para que isso ocorra em toda a extensão da via, o DCS conta com APs ao longo de toda a via de maneira que o trem possa se manter conectado à medida que se desloca. O *handover* ocorre quando acontece a troca de conexão de um AP para outro durante o percurso do trem. Atualmente, o método mais comum de decisão de *handover*, ou seja, a técnica utilizada

pelo sistema para decidir quando trocar de um AP para outro, é utilizar o valor da potência de recepção do sinal emitido pelos APs. Normalmente a esse sinal é atribuído um limiar e quando o trem identifica este limiar, ele então escaneia os sinais dos APs e troca a conexão para o AP com maior potência naquele instante.

O *handover* é um processo crítico em comunicações sem fio, principalmente em um sistema CBTC, no qual falhas no DCS poderiam ser catastróficas. O que na prática não acontece, uma vez que o CBTC estabelece que falhas significativas no DCS provoquem a parada do comboio. Esta é uma medida de segurança adotada para prevenir acidentes. Apesar disso, uma falha no DCS do CBTC pode resultar em uma interrupção total dos serviços de transporte ferroviário, o que pode causar enormes prejuízos para as empresas ou órgãos responsáveis pela operação, além de impactar na rotina e no deslocamento das pessoas. Desse modo, o DCS conta com uma redundância de rede física, ou seja, o sistema é duplicado para diminuir falhas críticas.

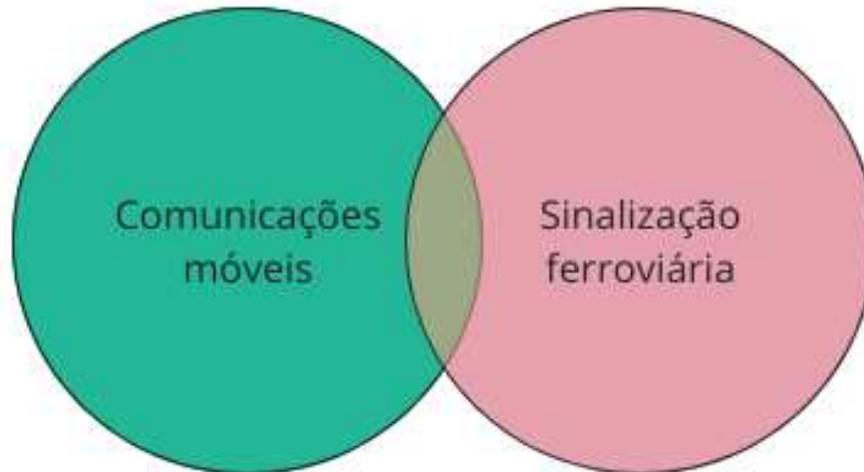
Tendo em vista a criticidade do *handover* para o sistema CBTC e a métrica tradicional de decisão de *handover* comumente adotada, este trabalho propõe um estudo de outras estratégias de *handover* para um sistema CBTC, utilizando uma situação crítica e avaliando como esta alteração impacta no atraso de comunicação devido ao *handover* e o quanto o algoritmo de decisão de *handover* impacta na frenagem do trem mediante comando atrasado pelo próprio *handover*. Dentre os algoritmos analisados, foi apresentado um algoritmo de *handover* utilizando média móvel pensando em suavizar flutuações abruptas no sinal de recepção a fim de garantir um *handover* mais preciso no momento em que a potência de um AP se torna maior que a potência do AP atualmente conectado.

### 1.3 Estado da Arte

Nesta seção, são expostas alguns dos estudos provenientes da comunidade científica que constituíram fonte inspiradora para a elaboração deste trabalho. Estas investigações são apresentadas de maneira a contextualizar o estado da arte das áreas do conhecimento abordadas neste trabalho. Os trabalhos científicos tomados como referência para esta monografia estão relacionados à sinalização de sistemas ferroviários, mais especificamente ao CBTC e às comunicações móveis, especialmente ao IEEE 802.11, e ainda a intersecção de ambas, conforme mostra o diagrama apresentado na Figura 2.

Carvalho e Silveira (2022), Cruz *et al.* (2019), Vieira e Oliveira (2020) e Brenna *et al.* (2018) em suas pesquisas contribuem com este proporcionando um entendimento abrangente

Figura 2 – Áreas do conhecimento envolvidas no estado da arte.



Fonte: elaborada pelo autor.

do contexto histórico do sistema de transporte ferroviário, bem como seus impactos na sociedade. Além disso, Brenna *et al.* (2018) é uma literatura didática com vasto conhecimento voltado para tecnologia de tração elétrica.

Os trabalhos de Chaitanya *et al.* (2019); Tu (2020); Leles *et al.* (2018) e Wu *et al.* (2018) apresentam contribuições na área de comunicações em operações ferroviárias, além de trazer conceitos diversos como *cloud computing*, *Internet of Things* (IoT) e rádios cognitivos. Dentre estes, Wu *et al.* (2018) se aproxima da temática desta monografia por estudar a redução de *handovers*, entretanto utilizando rádios cognitivos. Ele apresenta uma abordagem inovadora para melhorar a eficiência espectral das comunicações ferroviárias por meio do uso de rádio cognitivo. O autor utiliza uma teoria de aprendizado por reforço e sistemas de agentes para construir um modelo de estação base cognitiva adequado ao ambiente ferroviário. O modelo proposto é avaliado por meio de uma plataforma de simulação de rede de comunicação ferroviária, demonstrando melhorias significativas na probabilidade de transmissão bem-sucedida de dados e na redução do número de trocas de canais. O autor também sugere que trabalhos futuros investiguem mecanismos de aprendizado em cascata para estações base, bem como estratégias de acesso espectral em ambientes ferroviários em movimento.

Outra referência que merece destaque é Farooq e Soler (2017), pois o trabalho fornece um tutorial abrangente e uma pesquisa sobre o estado da arte da comunicação por rádio em sistemas CBTC. O mesmo discute a operação e os componentes fundamentais de um sistema CBTC, a evolução das tecnologias de comunicação usadas para sinalização ferroviária moderna,

os benefícios e prejuízos do uso da tecnologia de comunicação por rádio, particularmente o Wi-Fi, e os desafios que ela introduz. Além disso, apresenta as melhores práticas no *design* de uma rede de rádio CBTC e as medidas para melhorar sua disponibilidade, bem como uma visão geral dos exercícios de padronização do CBTC. O autor destaca a importância da comunicação por rádio em sistemas CBTC, fornecendo uma melhor visão abrangente dos desafios, soluções e práticas. Ele contribui para a compreensão dos benefícios e desafios da comunicação via rádio.

Ainda seguindo a temática de melhorias para o sistema de comunicações do CBTC, Wen *et al.* (2018) aborda a otimização do posicionamento de APs em sistemas CBTC através de um algoritmo evolucionário multiobjetivo baseado em decomposição (MOEA/D) para melhorar a eficiência da busca na otimização do posicionamento dos APs. O estudo é validado em uma plataforma de simulação integrada, demonstrando que os APs otimizados apresentam melhor desempenho do que o planejamento original. O estudo de Wen considera a influência de fatores como a perda de percurso e o sombreamento na propagação de ondas de rádio em túneis ferroviários. A análise da propagação de ondas de rádio em diferentes seções do túnel é realizada para compreender as características de desvanecimento em larga escala e a influência do ambiente na comunicação sem fio. A pesquisa também destaca a importância da modelagem de canais de comunicação sem fio em sistemas ferroviários, considerando fatores como a perda de percurso e o sombreamento para garantir uma comunicação confiável entre os trens e os APs. Como sugestão para trabalhos futuros, o autor propõe a realização de estudos adicionais em ambientes ferroviários específicos para validar a metodologia em diferentes contextos e aprimorar ainda mais a eficiência da otimização.

Segundo Chy *et al.* (2019) e Chy (2020) é de suma importância o desenvolvimento das tecnologias de sistemas ferroviários e a gestão de obsolescência dos sistemas antigos, especialmente em sistemas de trânsito de massa, como o *New York City Transit* (NYCT), o *Baltimore Maryland Transit Administration* (MTA) e o *San Francisco Bay Area Rapid Transit District* (BART). Em ambos, Chy aborda a implementação da tecnologia de CBTC em projetos de *resignaling*<sup>1</sup>, com ênfase nas melhorias de capacidade e gerenciamento de obsolescência em sistemas de sinalização ferroviária. Ambos destacam a complexidade desses projetos principalmente devido ao sistema estar em operação, o que normalmente representa uma janela de horas de trabalho muito pequena para implementação dos novos sistemas, referindo-se a estes tipos de

---

<sup>1</sup> *resignaling* é o processo de substituir ou modernizar os sistemas de sinalização em redes de transporte ferroviário para melhorar eficiência, segurança e capacidade.

projetos como projetos de controle de trens em campos já existentes (*brownfield*)<sup>2</sup>. Apesar disso, o autor destaca a importância da modernização desses sistemas o que ressalta a viabilidade do desenvolvimento de pesquisas na área.

Já Farooq *et al.* (2018) apresenta um projeto de rede de comunicação de rádio *ad-hoc* para trens em sistemas CBTC. Ele propõe um *design* que utiliza nós em modo *ad-hoc* para encaminhar pacotes de dados oriundos de trens, eliminando a necessidade de *handshake* e cabos de fibra óptica. O projeto oferece resiliência contra interferência por meio do uso de múltiplas frequências, mas enfrenta perda significativa de pacotes devido à interferência causada pelas transmissões dos trens. Para resolver esse problema, é proposta a utilização de uma frequência dedicada para separação de frequência na comunicação trem-via, o que resulta em uma redução significativa na perda de pacotes. A metodologia utilizada inclui um simulador de eventos discretos, considerando parâmetros como distância entre nós, potência de transmissão e sensibilidade de recepção. Os resultados das simulações demonstram que a extensão proposta elimina a interferência causada pelos trens, permitindo a transferência de um número significativamente maior de pacotes. As contribuições do trabalho incluem a proposta de um design de rede mais eficiente para comunicação trem-via em sistemas CBTC. E sugere para trabalhos futuros investigar soluções adicionais para minimizar a interferência causada pelas transmissões dos trens, considerando mobilidade e um maior número de trens. Além desses estudos envolvendo sistemas ferroviários, sistemas de sinalização ferroviários e, mais especificamente, sistemas CBTC e as comunicações relacionadas a ele, outros trabalhos referenciados ajudaram a obter uma compreensão mais ampla dos sistemas CBTC bem como do DCS e do processo de *handover* que ocorre neste sistema.

Para apresentar as redes WLAN e, mais especificamente, o IEEE 802.11, Prasad e Prasad (2005) foi utilizado como principal literatura base uma vez que o livro fornece informações sobre redes sem fio e redes locais, abrange tópicos como segurança, qualidade de serviço (*Quality of Service* (QoS)) e mobilidade em WLANs. Ele discute os desafios e as soluções relacionados à segurança da WLAN, incluindo autenticação, criptografia e detecção de intrusões. Os autores também explicam em detalhes o processo de *handover* e suas características. Esta literatura base foi fundamental para incluir as informações relevantes envolvendo redes WLAN e o IEEE 802.11, como entender sua evolução e histórico, suas vantagens e desvantagens, suas principais características, topologias, arquitetura lógica, também compreender os mecanismos de acesso ao

---

<sup>2</sup> *brownfield* refere-se a projetos que ocorrem em áreas já desenvolvidas, muitas vezes com infraestrutura existente.

meio e o *handover*.

Muitos outros trabalhos científicos foram utilizados complementarmente ao livro base desta seção, todavia. Estes trabalhos auxiliaram na construção coesa e coerente do texto a respeito do tema, mas sempre de maneira complementar ao conteúdo de Prasad e Prasad (2005).

#### 1.4 Objetivos

O DCS comumente utiliza como métrica de decisão de *handover* um limiar de potência projetado para garantir que a cobertura de toda a via seja garantida e que não existam perdas de pacote significativas durante o *handover*. Pesquisar outras métricas de decisão de *handover* aplicadas aos sistemas CBTC e entender como diferentes algoritmos de *handover* influenciam no funcionamento do sistema é uma maneira de utilizar as comunicações móveis para propor melhorias para o sub sistema DCS.

O objetivo deste trabalho é entender como o *handover* impacta nos sistemas CBTC mediante um comando crítico como uma frenagem de emergência e como melhorar este processo mediante utilização de outros tipos de algoritmos de *handover*, mediante observação:

- Do atraso de comunicação devido ao *handover* e, portanto, da resposta do trem ao comando de frenagem de emergência;
- De como cada algoritmo pode utilizar métricas com valores melhores ou piores e como isso pode impactar o sistema como um todo.

#### 1.5 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é dividida em cinco capítulos, incluindo o capítulo de introdução. Um breve resumo dos quatro capítulos restantes é apresentado a seguir:

- **Capítulo 2:** apresenta os principais conceitos aplicados neste trabalho, tais como: comunicações e a sinalização em sistemas ferroviários, em que se faz um levantamento de como funciona e quais os componentes básicos do CBTC, assim como o funcionamento, componentes e requisitos do DCS, bem como o funcionamento do processo de *handover* do trem ao longo da via. Além disso, é explicado conceitos importantes de redes WLAN, mais especificamente do padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi), desde seu desenvolvimento ao longo dos anos, suas características principais e como tecnicamente acontece o *handover* nestas redes;

- **Capítulo 3:** contém a metodologia utilizada para esta pesquisa e descreve o cenário utilizado para estudo, a modelagem do simulador que contempla desde a modelagem utilizada para o movimento do trem, a comunicação terra-trem, a simulação realizada e os algoritmos de *handover* aplicados;
- **Capítulo 4:** apresenta os resultados obtidos com a simulação para cada algoritmo proposto, bem como a análise e discussões destes resultados apresentados, sendo a maioria deles conclusivo com exceção do algoritmo de *handover* baseado em localização;
- **Capítulo 5:** abrange considerações conclusivas a partir dos resultados, assim como propõe outras pesquisas futuras envolvidas do tema e aperfeiçoamentos para o simulador utilizado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Comunicações Ferroviárias Modernas

#### 2.1.1 *Introdução às Comunicações Ferroviárias*

O surgimento do meio de transporte ferroviário no Brasil ocorreu no século XIX com a inauguração da Estrada de Ferro Petrópolis em 1854 que conectava Porto Mauá a Fragozo-RJ, com 14,5 km de extensão. As ferrovias foram um dos maiores avanços tecnológicos da época e tiveram um papel estruturador em diversas cidades brasileiras, potencializando a expansão territorial e o crescimento de diversas áreas da sociedade, como tecnológica, política, social e cultural (CARVALHO; SILVEIRA, 2022). Os trilhos representavam o progresso e o crescimento para os municípios, e a adesão foi incentivada por investidores privados e apoio público, com alta receptividade dos cidadãos (CRUZ *et al.*, 2019).

O meio de transporte ferroviário teve um impacto significativo no desenvolvimento dos locais afetados pela instalação da linha ferroviária. A construção de ferrovias permitiu o transporte de mercadorias e pessoas de forma mais rápida e eficiente, o que contribuiu para o crescimento econômico de muitas regiões. Por exemplo, um estudo sobre a Ferrovia Norte-Sul no Brasil constatou melhorias na economia dos municípios de Açailândia (MA) e Porto Nacional (TO), locais em que se encontram os principais pátios ferroviários da Ferrovia Norte Sul (FNS) em funcionamento (VIEIRA; OLIVEIRA, 2020).

Com relação à tecnologia, a tração elétrica foi de suma importância para o desenvolvimento do sistema ferroviário como meio de transporte de bens e pessoas, uma vez que, a partir do seu surgimento, diversos estudos e avanços nos campos da engenharia voltados para os sistemas metrô-ferroviários trouxeram mais confiabilidade, segurança, velocidade e precisão para este meio de transporte em oposição ao meio de transporte automobilístico, que oferece mais riscos e menor velocidade nos grandes centros urbanos (BRENNNA *et al.*, 2018).

Além de melhor eficiência e qualidade dos sistemas de tráfego ferroviários, estes são reconhecidos como um meio de transporte mais ecológico devido a maior capacidade, maior eficiência energética e seu impacto ambiental substancialmente menor em comparação ao automóvel como meio de transporte, tendo em vista a ainda massiva utilização de automóveis que utilizam motor a combustão (BRENNNA *et al.*, 2018).

Com o crescimento populacional e o aumento da urbanização, o transporte ferro-

viário, sendo um meio de transporte mais eficiente, tornou-se o principal meio de transporte nos grandes centros urbanos (WANG *et al.*, 2018) e tem sido alvo de forte desenvolvimento tecnológico e grandes investimentos (FAROOQ; SOLER, 2017).

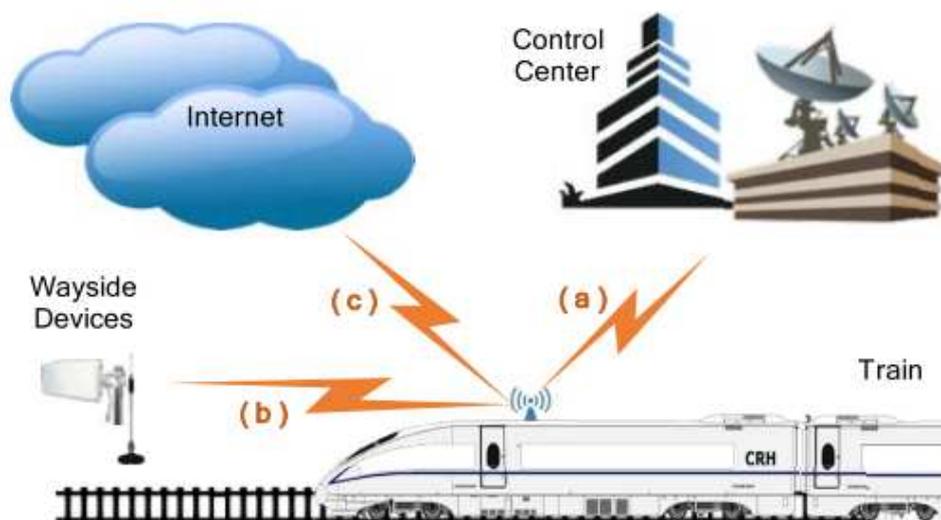
### 2.1.2 Impacto das Comunicações nas Operações Ferroviárias

Os avanços nas áreas da engenharia elétrica, engenharia mecânica, eletrônica de potência e automação contribuíram significativamente na evolução dos sistemas ferroviários (BRENNAN *et al.*, 2018). Os avanços na área da comunicação também tiveram grande impacto no desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias do mundo moderno e para os sistemas ferroviários este impacto também se faz presente (TU, 2020).

Dentre as tecnologias de comunicação presentes nos sistemas ferroviários modernos, a comunicação sem fio tem sido amplamente empregada nesses sistemas (WU *et al.*, 2018). Segundo Wu *et al.* (2018), existem três aplicações principais para as comunicações sem fio em sistemas ferroviários. A primeira delas é o controle operacional dos trens através da troca de informações entre os mesmos, as estações e os centros de controle, conforme Figura 3 (a) e (b). A Figura 3 (c) representa a comunicação dos passageiros com a internet.

A comunicação sem fio tem sido a melhor opção na transmissão de dados importantes para prover a melhor operação dos sistemas ferroviários, fazendo a transmissão de dados dos equipamentos da via para o trem, do trem para a via e destes para o centro de controle operacional (CHAITANYA *et al.*, 2019).

Figura 3 – Comunicações sem fio ferroviário.



Fonte: Wu *et al.* (2018, p. 1).

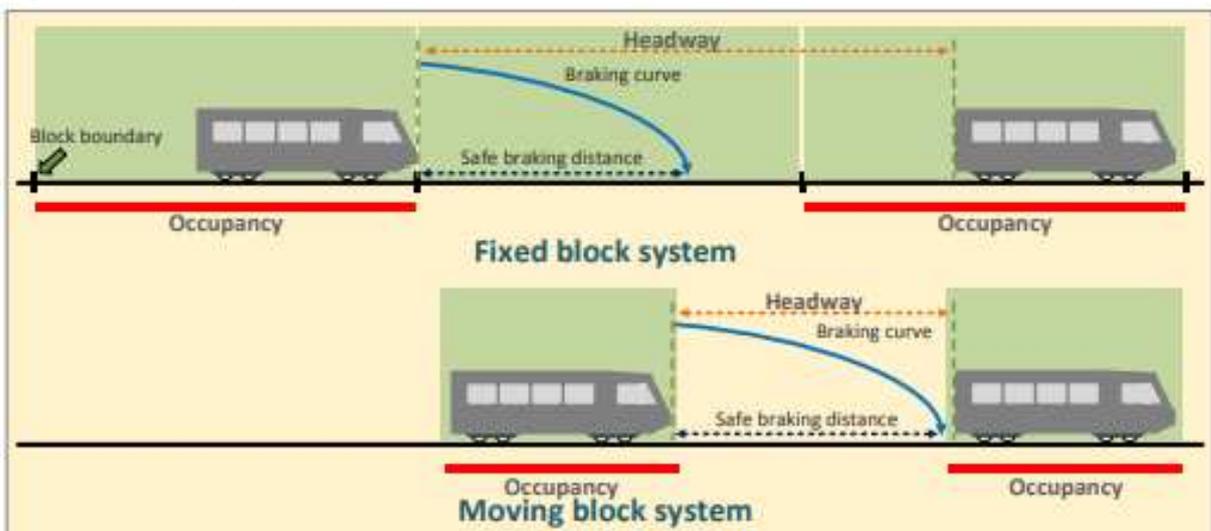
Assim, nos sistemas ferroviários modernos, a comunicação sem fio é utilizada entre o trem e o solo para garantir o funcionamento de múltiplas aplicações e serviços, como aplicações de segurança, comandos para o movimento dos trens, circuito fechado de TV (CFTV), multimídia, manutenção remota, monitoramento da via, dentre outros serviços diversos (LELES *et al.*, 2018) principalmente a transmissão de dados do sistema de sinalização que é vital na operação do sistema (FAROOQ; SOLER, 2017).

### 2.1.3 O Papel dos Sistemas de Sinalização nos Trens

O sistema de sinalização também denominado sistema de controle de trens, pois através dos dispositivos de sinalização instalados na via, em salas técnicas e no bordo é possível fazer todo o controle e operabilidade dos trens (WEN *et al.*, 2018), é um componente crítico para garantir comunicação confiável entre o trem e o solo. (AI *et al.*, 2020).

A fim de evitar colisões e efetuar o controle do trem, é fundamental ter informações de sua localização na via. Isso é possível devido a utilização de circuitos de via que dividem a mesma em "blocos"(WEN *et al.*, 2018). A posição dos trens na via é determinada por meio desses blocos, que podem estar ocupados ou livres de acordo com o movimento dos trens (DIMITROVA; TOMOV, 2020). Os blocos podem ser fixos ou móveis, ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Ilustração de blocos fixos e blocos móveis.



Fonte: Farooq e Soler (2017, p. 3).

O sistema blocos fixos é um método tradicional de controle de trens, onde a linha férrea é dividida em trechos pré-definidos ou "blocos". Cada bloco é protegido por sinais que impedem que mais de um trem ocupe um bloco ao mesmo tempo. Este garante uma distância

segura entre os trens, mas pode limitar a capacidade da linha, pois os blocos têm tamanho e localização fixos, independentemente da distância real entre os trens (ZHANG *et al.*, 2018).

Por outro lado, o sistema de blocos móveis é uma abordagem mais moderna que permite aumentar a capacidade da linha. Neste sistema, os blocos não são fixos, mas movem-se com os trens. A separação segura atrás de um trem é calculada dinamicamente com base em fatores como velocidades máximas de operação, curvas de frenagem e localizações dos trens na linha. Isto permite que o sistema ajuste a separação segura entre os trens quando necessário, por exemplo, quando um trem precisa desacelerar ou parar. O sistema de blocos móveis também pode ser utilizado para otimizar os horários dos trens, permitindo um uso mais eficiente da infraestrutura ferroviária (ZHANG, 2018). Uma característica interessante em sistemas de blocos móveis em comparação a sistemas de blocos fixos, é que a distância (ou o tempo) entre trens consecutivos pode ser muito menor, sendo mínima quando igualada à distância de frenagem segura. Essa distância entre dois trens consecutivos é denominada "*headway*" no contexto ferroviário (FAROOQ; SOLER, 2017).

Alguns autores definem o *headway* como o intervalo de tempo entre a passagem de dois trens consecutivos (CHAITANYA *et al.*, 2019). Esta definição é mais comercial uma vez que para as empresas que compram os sistemas é mais interessante saber quanto tempo o usuário esperará pelo próximo trem caso tenha acabado de perder um. Por exemplo, segundo Guedes *et al.* (2022), o *headway* da Linha 1-Azul do metrô de São Paulo no horário de maior demanda é de 107 segundos. Para alcançar esse *headway*, o Metrô de São Paulo utiliza o CBTC (AVELLEDA, 2011), o qual usa o sistema de blocos móveis e telecomunicações entre o trem e os equipamentos da via para gerenciamento de tráfego e controle de infraestrutura. Eles integram determinação de localização de trens de alta resolução, controle contínuo dos movimentos dos trens e funções avançadas de proteção de trens para aumentar a segurança, capacidade e eficiência operacional ferroviária (ZHANG *et al.*, 2018).

#### **2.1.4 Controle de Trens Baseado em Comunicações (CBTC)**

O CBTC é um sistema moderno que usa comunicação de rádio para transferir informações de controle de trem precisas. É a escolha atual dos operadores ferroviários de transporte coletivo (FAROOQ; SOLER, 2017).

Os primeiros sistemas de CBTC, também conhecidos como "*Transmission-based*

*Train Control* (TBTC)", utilizavam tecnologia de *loop* indutivo<sup>1</sup> para comunicação. O primeiro sistema CBTC foi instalado em Toronto, Canadá, em 1985, na Toronto Transit Commission Scarborough RT Line. Esta tecnologia foi um avanço significativo nos sistemas de controle de trens, permitindo operações mais eficientes e confiáveis (FAROOQ; SOLER, 2017). A tecnologia de *loop* indutivo é um tipo de sistema de comunicação eletromagnética que envolve um laço de fio, geralmente enterrado sob a superfície da estrada, que cria um campo eletromagnético (LIU *et al.*, 2019). Quando um trem passa pelo *loop*, ele interrompe esse campo, e essa interrupção pode ser detectada e usada para rastrear a localização do trem. Dois outros exemplos de sistemas baseados em *loop* indutivo foram o *Véhicule Automatique Léger* - Veículo leve automatizado (VAL), que foi implantado no metrô leve de Lille em 1983, e o Meteor que está em serviço na Linha 14 de Paris desde 1998. O primeiro sistema CBTC que utilizava rádio-comunicação foi fornecido pela empresa Bombardier no AirTrain do Aeroporto de São Francisco em 2003 (FAROOQ; SOLER, 2017).

#### 2.1.4.1 Camadas do Sistema CBTC

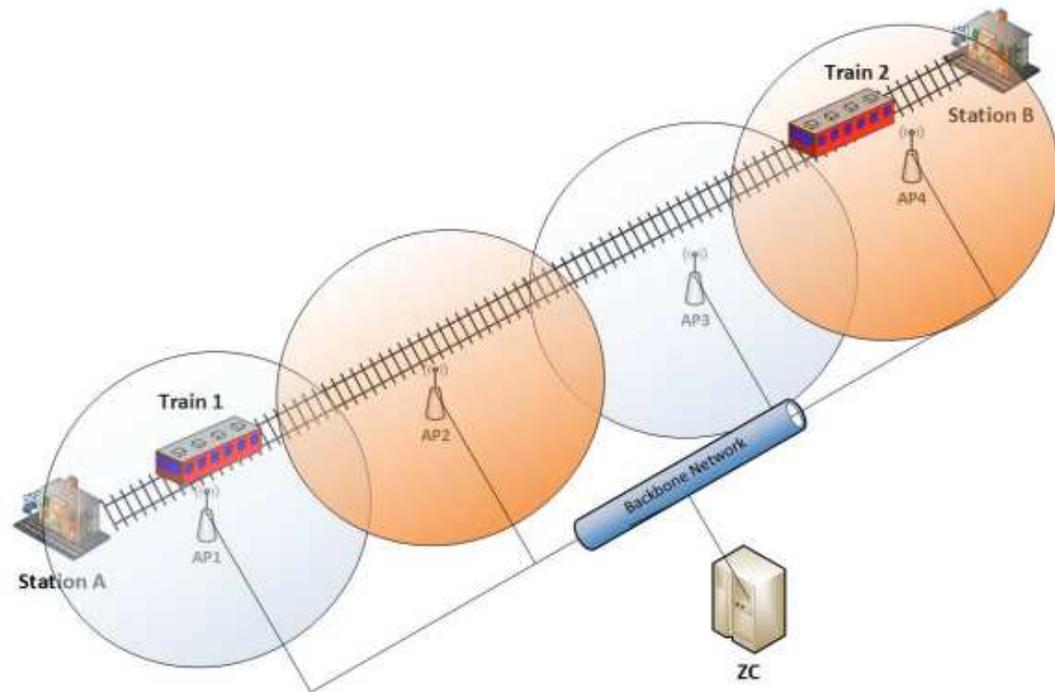
Num sistema CBTC, o trem comunica continuamente sua posição e velocidade exatas via rádio aos equipamentos de via distribuídos ao longo da linha como pode ser visualizado na Figura 5 em que podemos verificar trens se deslocando ao longo da via entre duas estações. Esta região é representada por um Controlador de Zona (ZC). Isso permite funções de Controle Automático de Trens (ATC), Proteção Automática de Trens (ATP), Operação Automática de Trens (ATO) e Supervisão Automática de Trens (ATS) (ZHANG *et al.*, 2018; ATILGAN *et al.*, 2023; CHEN *et al.*, 2018).

O ATC é a camada superior do sistema CBTC. O ATC se comunica com os trens por meio do sistema de rádio para transmitir comandos, autorizações e informações de controle. Ele é responsável pela supervisão e gerenciamento do tráfego ferroviário. O ATC se comunica com o sistema central de controle, geralmente um Centro de Controle de Tráfego, para obter informações sobre a programação dos trens, autorizações de movimento, prioridades e outras diretrizes operacionais (TAKATA *et al.*, 2019).

O ATP é a camada intermediária do CBTC, com foco na segurança direta dos trens. Sua principal função é evitar colisões e garantir que os trens não ultrapassem os limites de

<sup>1</sup> *Loop* indutivo é usado para detecção de trens dentro de uma seção definida da via. Isso é obtido utilizando os trilhos como parte do circuito de trilhos, onde a presença de um trem é identificada pela detecção da mudança na impedância de derivação entre os trilhos quando um trem entra na seção (ZHANG *et al.*, 2013)

Figura 5 – Sistema de Controle de Trens Baseado em Comunicações.



Fonte: Wen *et al.* (2018, p. 1).

velocidade ou pontos críticos da via. O ATP se comunica com o ATC para receber instruções e atualizações sobre horários de trens e autorizações de movimentação (GAO *et al.*, 2020). O ATP monitora e controla continuamente a velocidade e o movimento dos trens para garantir que eles operem dentro de limites seguros (ZHANG *et al.*, 2016). Se um trem exceder esses limites, o sistema ATP poderá aplicar automaticamente os freios para trazer o trem de volta aos parâmetros operacionais seguros (SONG *et al.*, 2018).

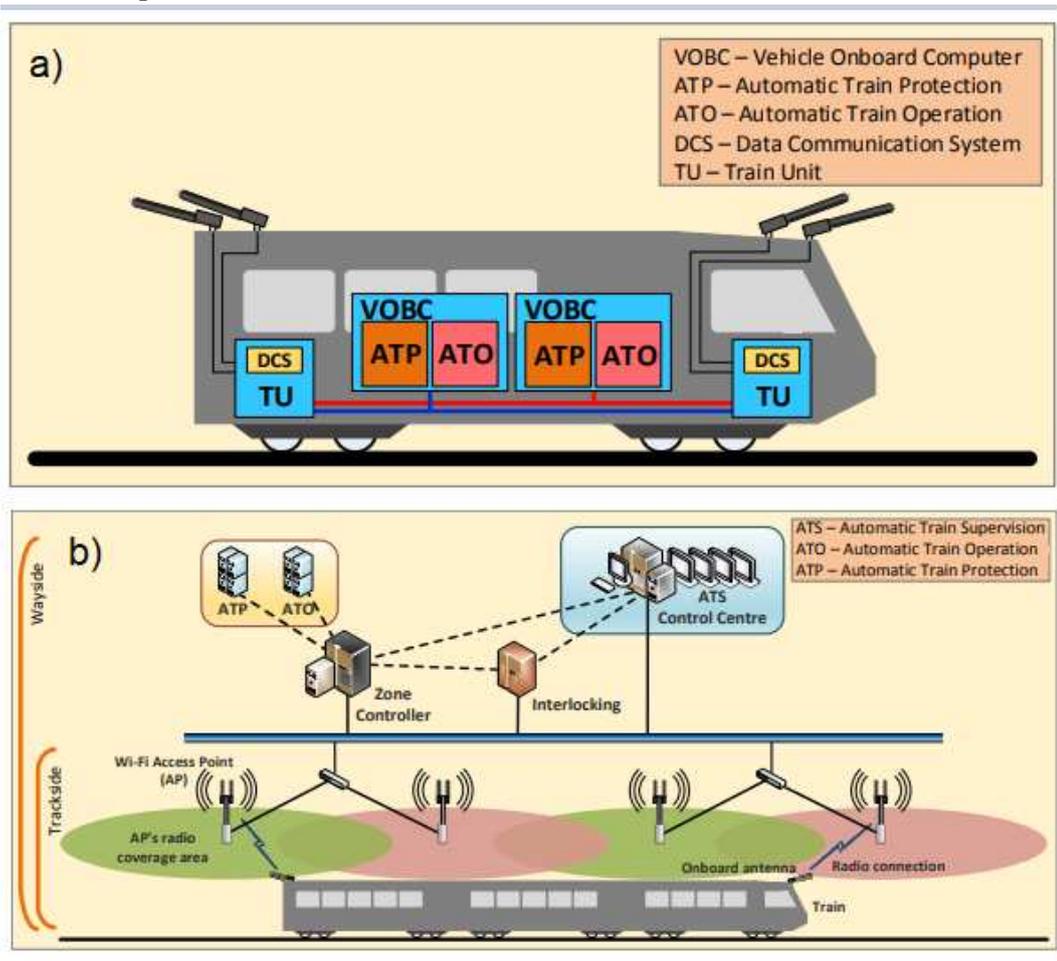
O ATO é a camada mais baixa do CBTC, com foco na operação eficiente dos trens. O ATO é responsável por controlar funções operacionais, como aceleração, desaceleração e parada de trens. O ATO se comunica com o ATP para receber informações de velocidade alvo, distâncias de parada programadas e outras instruções operacionais. Controla e faz ajustes contínuos de velocidade para garantir que os trens sigam o horário e evitem ultrapassar os limites de velocidade estabelecidos (YU *et al.*, 2021). Além disso o ATO estabelece outros controles como abertura de porta e local de parada do trem na plataforma (POULUS *et al.*, 2018).

Finalmente, o ATS é responsável por monitorar e regular as operações dos trens (CHEN *et al.*, 2018). Suas funções incluem identificar, rastrear e exibir trens e apontar restrições de velocidade e zonas de trabalho. O ATS também serve como Interface homem-máquina (IHM) entre os controladores de trem no CCO (CHY, 2020).

Assim, estes subsistemas trabalham em conjunto para garantir que os trens operem

de forma eficiente e segura. O ATO concentra-se na operação automática dos trens, o ATP garante a segurança da operação e o ATS supervisiona a gestão do tráfego ferroviário (ATILGAN *et al.*, 2023). Na Figura 6 é ilustrado os componentes de bordo (a), formados por ATO e ATP de bordo e os componentes de via (b) formados pelo ATS, ZC, ATO e ATP.

Figura 6 – Componentes de bordo (a) e de via (b) no CBTC.



Fonte: adaptado de Farooq e Soler (2017, p. 3 e 4).

A tecnologia do CBTC transferiu a responsabilidade de determinar a localização de um trem do circuito da via, equipamentos e sensores responsáveis pela sinalização em sistemas convencionais de sinalização de trens, para o próprio trem (CHY *et al.*, 2019). E assim como o ATO, o ATP e o ATS são subsistemas do CBTC, o sistema de comunicações via-rádio responsável pela comunicação de dados entre trens, estações e demais elementos do sistema de controle ferroviário recebe o nome de DCS ou *Radio Communication System* (RCS) (ZHUANG *et al.*, 2022; HUANG; HUANG, 2021; FAROOQ; SOLER, 2017).

Num sistema CBTC, a distância entre os trens é significativamente reduzida em comparação com os sistemas de sinalização convencionais. Isto é conseguido através da comuni-

cação contínua entre o trem e o centro de controle, permitindo atualizações em tempo real sobre a localização e velocidade do trem. Esta informação é usada para gerenciar com segurança o movimento do trem e manter distâncias ideais entre os trens (YOON *et al.*, 2022).

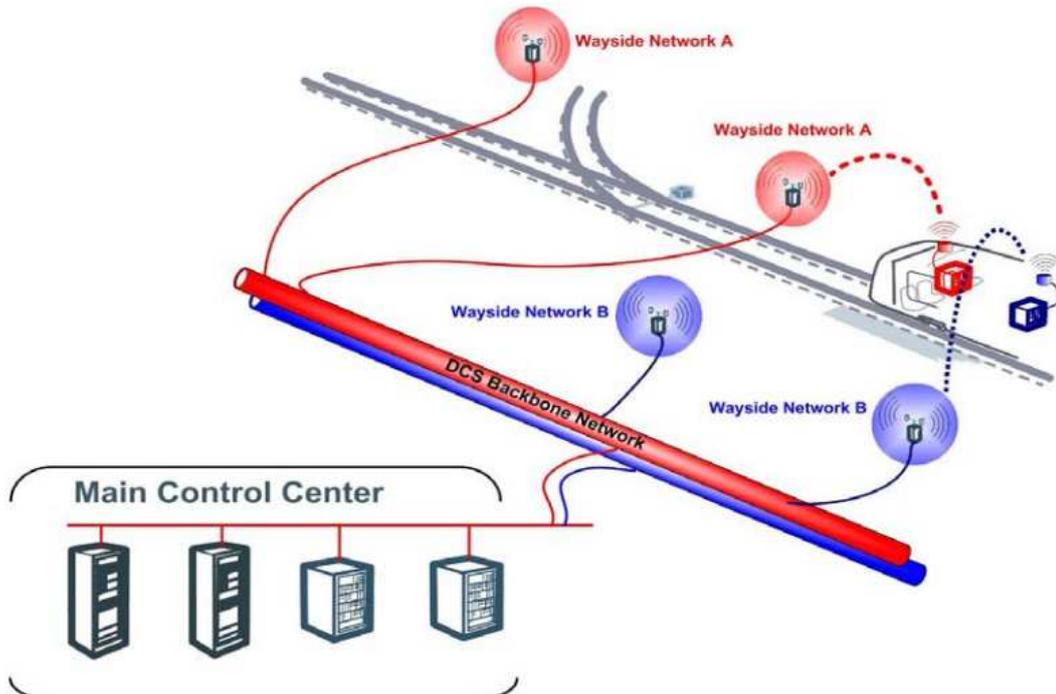
Contudo, a confiabilidade da comunicação via rádio é um fator crítico na funcionalidade dos sistemas CBTC. No caso de uma falha de comunicação, uma abordagem típica nos sistemas CBTC é aplicar os freios de emergência (YOON *et al.*, 2022). Os sistemas CBTC são projetados para ajustar automaticamente as distâncias entre os trens em caso de aplicação de freio de emergência (FAROOQ; SOLER, 2017). Quando um trem aplica os freios de emergência, o sistema CBTC é notificado e pode tomar medidas para ajustar a distância entre os trens subsequentes (BOYNUKALIN *et al.*, 2021). No entanto, é importante notar que a eficácia deste ajuste depende de vários fatores, incluindo a velocidade dos trens, a frequência das mensagens de controle do CBTC e a latência da rede de comunicação.

A fim de reduzir a criticidade do subsistema de comunicação, o DCS é projetado para ser altamente confiável e tolerante a falhas. Isto é conseguido através do uso de arquiteturas redundantes (ZHU *et al.*, 2018). A redundância de *hardware* do DCS provê uma rede *dual* (HUANG; HUANG, 2021) normalmente nomeadas Rede Azul e Rede Vermelha (ZHANG *et al.*, 2021) pelos arquitetos e *designers* do DCS. A rede azul e a rede vermelha do DCS, representadas na Figura 7, são essencialmente duas redes separadas e independentes usadas para fornecer redundância no sistema. Cada rede opera de forma independente e é capaz de realizar todas as tarefas de comunicação necessárias. Se uma rede falhar, a outra poderá assumir as suas funções, garantindo que o sistema CBTC possa continuar a operar de forma segura e eficiente (ZHU *et al.*, 2018). Cada rede possui seus próprios APs fisicamente separados (FAROOQ; SOLER, 2017).

Para garantir a segurança e confiabilidade, além da arquitetura redundante, o DCS conta com requisitos de tráfego de dados. As mensagens devem ser entregues em tempo hábil para garantir a operação segura dos trens. Além disso, as mensagens devem ser precisas e completas. As mensagens também precisam ser seguras para evitar acesso não autorizado ou manipulação (DANDOUSH *et al.*, 2016).

Em Farooq e Soler (2017, p. 3) são mencionados requisitos de tráfego de dados no CBTC como frequência, tamanho e taxa de transmissão das mensagens. Além disso, os autores apresentam alguns valores para estes requisitos, como tamanho típico de uma mensagem de controle do CBTC que é de 400-500 bytes. Normalmente é suportado um tempo de transmissão da mensagem inferior a 100 milissegundos. Dado que a frequência típica dessas mensagens varia

Figura 7 – Representação do DCS.



Fonte: Spiezio *et al.* (2018, p. 16).

entre 100-600 milissegundos, os requisitos de dados para um sistema CBTC estão normalmente na faixa de 20-40 kbps.

As redes que compõem o CBTC consistem em três redes integradas: a rede de bordo do trem, a rede de rádio trem-via e a rede principal de via (FAROOQ; SOLER, 2017). Em cada trem, a rede de bordo é composta pelo ATC de bordo (ATO e ATP) (YU; LI, 2021) e ainda um controlador de bordo e dois rádios de bordo (componente do DCS). A comunicação entre os elementos de bordo utiliza comunicação Ethernet (FAROOQ; SOLER, 2017). A rede de rádio trem-via utiliza comunicação Wi-Fi (IEEE 802.11) e é composta pelos rádios de bordo e os rádios de via APs (FAROOQ *et al.*, 2018).

Por ultimo, a rede principal de via é composta pela rede *backbone* que comunica os servidores e controladores (ATS, ATP, ATO, etc.) de via aos rádios (AZIMINEJAD; EPELBAUM, 2018). Essa rede é cabeada e utiliza fibra óptica para conectar o CCO, as redes locais das estações e todos os APs do DCS.

#### 2.1.4.2 Tecnologia de Redes e Requisitos do DCS

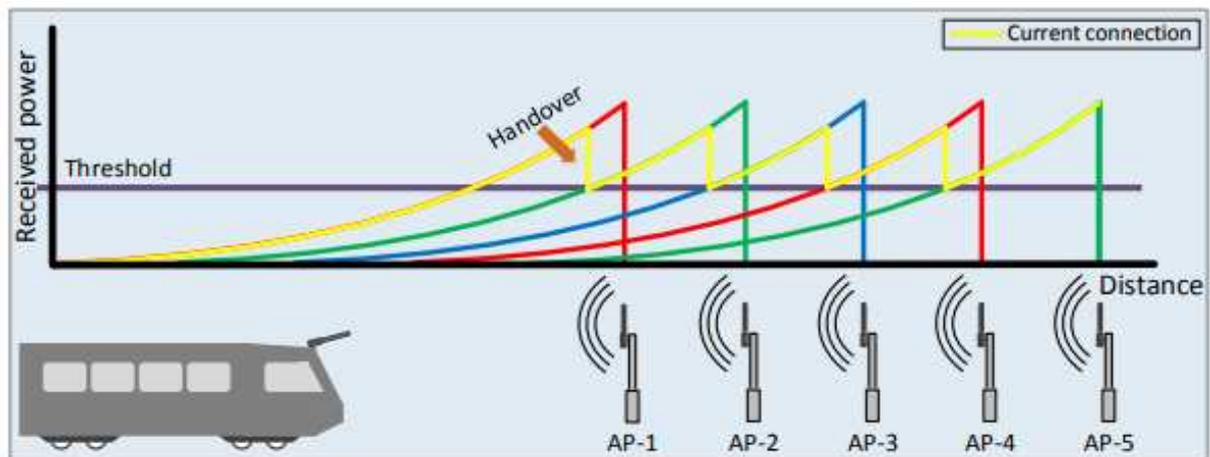
Na rede de via, que pode ser visualizada na Figura 6 (b), o ZC é um componente fundamental. Nele está inserido o ATP para garantir a proteção dos trens em sua "zona" e o ATO que envia a todos os trens em uma "zona" comandos operacionais como zona de destino, tempo

de permanência em uma estação, comando de abertura e fechamento de portas (DANDOUSH *et al.*, 2016). Enquanto o ATS faz o monitoramento e programação do tráfego (FAROOQ; SOLER, 2017).

No CBTC, a via é dividida em múltiplas células WiFi, cada uma servida por um AP, conforme Figura 5. Esses APs alternam canais ao longo da via para evitar interferências (WEN *et al.*, 2017). Um processo crítico no CBTC é o *handover* (ou *handoff*), que nada mais é que a transferência do *link* de comunicação do trem de um AP para outro à medida que o trem se move ao longo da via, pois deve garantir uma comunicação contínua e confiável entre o trem e a rede de via. Além disso, devido às altas velocidades dos trens modernos e à necessidade de alternar entre diferentes frequências ao passar de um AP para outro, resultando em mudanças rápidas de canais, os algoritmos de *Handover* (HO) usados em ambientes WiFi estacionários podem não ser adequados para o CBTC (WANG *et al.*, 2019).

O *handover* é determinado pela distância entre dois APs e pela velocidade do trem. O processo de *handover* no IEEE 802.11, comumente usado em sistemas CBTC, é conhecido como *hard handover*. Neste processo, o nó móvel (neste caso, o trem) interrompe a conexão atual antes de estabelecer a próxima. Isso pode resultar em atrasos e perda de pacotes (FAROOQ; SOLER, 2017). A Figura 8 contém a representação do trem passando por APs e fazendo o *handover* para se manter conectado.

Figura 8 – *Handover* do trem ao longo da via.



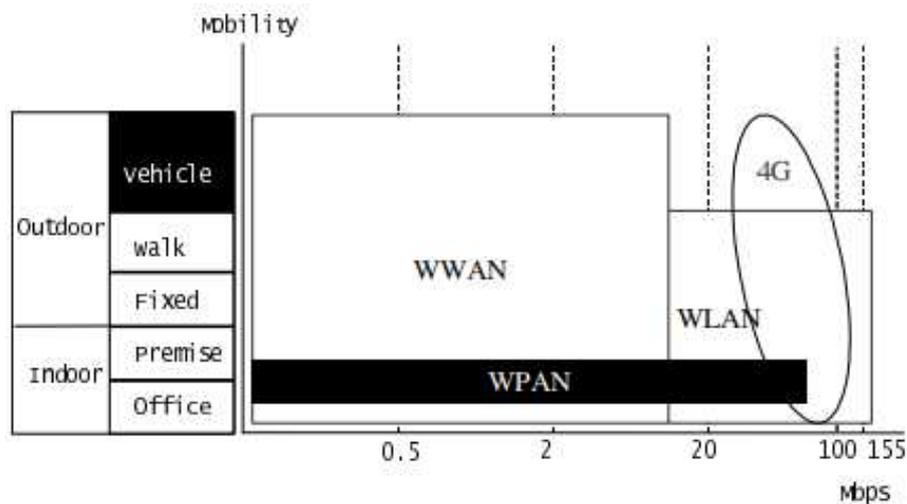
Fonte: Farooq e Soler (2017, p. 9).

## 2.2 IEEE 802.11

### 2.2.1 Histórico do IEEE 802.11

Uma rede local sem fio WLAN é uma tecnologia que possibilita a comunicação entre dispositivos dentro de uma área geográfica limitada sem necessidade de infraestrutura de cabos físicos para fazer essa comunicação e permite que dispositivos se conectem à Internet e aos recursos da rede local. As WLANs evoluíram significativamente ao longo dos anos, com avanços nos padrões e capacidades para atender às crescentes demandas de usuários e aplicações. A Figura 9 contém um diagrama considerando a mobilidade e a taxa de dados da tecnologia WLAN e de outras tecnologias *wireless*. As redes locais sem fio (WLANs) operam em dois modos principais: modo de infraestrutura e modo *ad-hoc* (PRASAD; PRASAD, 2005) ambos apresentados na Figura 10.

Figura 9 – WLAN e outras tecnologias móveis em função da mobilidade e da taxa de dados.



Fonte: Prasad e Prasad (2005, p. 2).

No modo infraestrutura, dispositivos se conectam a um AP que facilita a conexão com a rede cabeada e permite o acesso à Internet (SIDDAVATAM, 2011). Esse modo é comum em residências, escritórios e locais públicos, onde a conexão a uma rede maior ou à Internet é necessária. Enquanto no modo *ad-hoc*, dispositivos se conectam diretamente entre si, criando uma rede ponto a ponto para comunicação direta (LEU; TANG, 2019). É útil em redes temporárias sem acesso a uma rede maior ou à Internet, como reuniões ou locais remotos.

Vale destacar que as WLANs não substituem as redes com fio, mas são complementares a elas. Elas fornecem conectividade de rede em áreas onde a fiação pode ser difícil ou

impraticável e oferecem flexibilidade para mover e ampliar redes conforme necessário (PRASAD; PRASAD, 2005). De acordo com Prasad e Prasad (2005, p. 1) "as WLANs são os únicos dispositivos de **rede local** que permitem verdadeira mobilidade e conectividade".

As WLANs padronizadas tornaram-se acessíveis desde o final da década de 1990 com a introdução do padrão IEEE 802.11. Este padrão tem sido a base para a maioria das tecnologias WLAN e sofreu diversas alterações ao longo dos anos para melhorar o desempenho e atender às crescentes demandas de usuários e aplicações (NEGUS; PETRICK, 2009).

Sendo o IEEE 802.11 uma das tecnologias WLAN mais comuns e amplamente usadas para implementar redes locais sem fio, se tornou conhecido popularmente como Wi-Fi (NEGUS; PETRICK, 2009). Este termo surgiu a partir da *Wireless Ethernet Compatibility Alliance* (WECA), posteriormente denominada Wi-Fi Alliance, fundada em 1999 por diversas empresas do ramo tecnológico com o intuito de estabelecer padrões para os dispositivos sem fio baseados no Wi-Fi de modo que garantissem também a interoperabilidade destes dispositivos (SILVA, 2018), de forma a proporcionar a melhor experiência aos usuários.

No entanto, os padrões técnicos foram definidos pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) em 1997 por meio da norma "*WLAN Medium Access Control Layer and Physical Layer Specifications*", conhecida como 802.11. Esses padrões ofereceram taxas de transferência de até 2 Mbps na faixa de frequência de 2,4 GHz (SILVA, 2018).

Os padrões IEEE 802.11 evoluíram desde 1997, incluindo o IEEE 802.11a (5 GHz, 54 Mbps), o IEEE 802.11b (2,4 GHz, 11 Mbps), e o IEEE 802.11g (2,4 GHz, 54 Mbps) introduzido em 2003. Em 2009, surgiu o IEEE 802.11n (Wi-Fi 4), operando em 2,4 GHz e 5 GHz, com tecnologia *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO) que aumentou as taxas de dados para até 600 Mbps e melhorou o alcance (GOPSTEIN *et al.*, 2021). A tecnologia MIMO opera por meio de vários fluxos de dados paralelos, enviando dados através de múltiplas antenas que são recebidos por outras antenas. Algoritmos de classificação são usados para criar uma mensagem coerente a partir desses fluxos. MIMO pode melhorar a eficiência espectral (mais bits por segundo por hertz de largura de banda) e a confiabilidade do link (menos erros por bit transmitido) (BAKULIN *et al.*, 2021).

O Wi-Fi 5, padrão IEEE 802.11ac de 2013, operando a 5 GHz, aprimorou a tecnologia MIMO e introduziu o MIMO multiusuário (*Multi-User Multiple-Input and Multiple-Output* (MU-MIMO)), com uma taxa máxima de dados de 1,3 Gbps (GOPSTEIN *et al.*, 2021). No MU-MIMO, fluxos paralelos são enviados a vários dispositivos simultaneamente, utilizando

técnicas avançadas de processamento de sinais para gerenciar transmissão e recepção simultâneas (KINOL *et al.*, 2022).

O IEEE 802.11ax, também chamado Wi-Fi 6 e introduzido em 2019, opera nas faixas de 2,4 GHz e 5 GHz. Introduziu o *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e aprimorou o MU-MIMO, permitindo a transmissão simultânea de vários usuários. O OFDMA divide o espectro em subportadoras ortogonais, possibilitando que vários usuários transmitam ao mesmo tempo em subportadoras distintas. A taxa máxima de dados do Wi-Fi 6 é de 10 Gbps (GOPSTEIN *et al.*, 2021; CHEN; CHENG, 2019).

Finalmente, atualmente em desenvolvimento está o IEEE 802.11be (Wi-Fi 7). Espera-se que este padrão opere nas bandas de frequência de 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz trazendo ainda mais melhorias ao OFDMA e ao MU-MIMO e introduza novas tecnologias, como aplicações em tempo real (*Real-Time Application* (RTA) ) (GOPSTEIN *et al.*, 2021). A taxa de dados máxima esperada é de 30 Gbps.

### **2.2.2 Características do IEEE 802.11**

No contexto das comunicações sem fio, as WLANs oferecem várias vantagens, incluindo mobilidade, rápida implementação, adaptabilidade a ambientes de cabeamento desafiadores e escalabilidade (PRASAD; PRASAD, 2005). Elas permitem que os usuários se movam entre diferentes locais na rede local (*Local Area Network* (LAN)), proporcionando mobilidade na rede (ISLAM, 2016). Além disso, as WLANs são soluções econômicas para acesso à Internet sem fio, com menores custos de manutenção em comparação com redes celulares tradicionais, tornando-as viáveis em ambientes de cabeamento difícil ou impossível (MOHAMMADANI *et al.*, 2020). As WLANs oferecem escalabilidade, permitindo a expansão ou redução conforme necessário, como adicionar ou remover APs para cobertura adicional ou suporte a mais usuários (ISLAM, 2016). A ampla adoção do Wi-Fi o tornou um padrão altamente compatível com uma variedade de dispositivos (THING, 2017). Sua flexibilidade de operação em modos infraestrutura e *ad-hoc* possibilita uma variedade de aplicações (MAHMOOD *et al.*, 2017). Além disso, o IEEE 802.11 pode coexistir com outras tecnologias sem fio em bandas de espectro não licenciadas, embora exija gerenciamento cuidadoso nesses casos (PATRICIELLO *et al.*, 2020).

Por outro lado, as WLANs enfrentam desafios que afetam o desempenho e a qualidade do sinal de rádio, como a degradação de sinais devido a perdas, reflexões e interferências (PRASAD; PRASAD, 2005; APAVATJRUT; KAMDEE, 2021). Em ambientes reais, o sinal sofre

modificações, resultando em réplicas atenuadas, refletidas, refratadas e difratadas, juntamente com a adição de ruído e possíveis mudanças de frequência devido ao efeito Doppler em caso de movimento do transmissor ou receptor (APAVATJRUT; KAMDEE, 2021). Problemas de segurança nas WLANs, incluindo falhas em métodos de criptografia e autenticação do padrão 802.11, como o fraco protocolo *Wired Equivalent Privacy* (WEP), frequentemente usado em dispositivos Wi-Fi, destacam a necessidade de protocolos mais robustos, como *Wi-Fi Protected Access* (WPA) e WPA2 (PRASAD; PRASAD, 2005; KAUR *et al.*, 2013). A ocupação do espectro é outro fator crítico que deve ser considerado. A faixa *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) de 2,4 GHz tornou-se uma faixa congestionada (PRASAD; PRASAD, 2005), sendo uma faixa não licenciada é comumente utilizada, inclusive fornos de micro-ondas operam nessa faixa de frequência, o que pode acarretar interferências nas redes (NASSAR *et al.*, 2011).

Para Prasad e Prasad (2005, p. 12), "outra questão é a taxa de dados real versus a publicidade (por exemplo, o IEEE 802.11b promete 11 Mbps, mas a taxa real de transferência de dados é de no máximo 5 Mbps)". Isso ocorre devido à sobrecarga da camada *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP), que inclui dados para verificação de erros, endereçamento e informações de controle, reduzindo a taxa de dados efetiva (ZHANG, 2004). Colisões na camada *Media Access Control* (MAC) também são um fator, já que várias transmissões simultâneas resultam em colisões e retransmissões, reduzindo a taxa de dados efetiva (LEE *et al.*, 2013). Além disso, outros problemas relevantes incluem a atenuação, que é a redução na intensidade do sinal devido à distância, obstáculos e orientação do dispositivo do usuário (TERENCE; BASIRI, 2019). As perdas por multipercurso ocorrem quando os sinais são refletidos, refratados ou difratados, seguindo vários caminhos até o receptor, o que pode degradar o sinal e impactar o desempenho das WLANs (HRAD *et al.*, 2020). Adicionalmente, Prasad e Prasad (2005) destaca a preocupação com a saúde humana devido à exposição à radiação eletromagnética de sistemas de comunicação pessoal e dispositivos móveis. Essa proximidade com antenas irradiantes levanta preocupações sobre os possíveis impactos na saúde dos indivíduos.

Além dos citados, muitos são os pontos positivos e negativos do padrão IEEE 802.11 que são variáveis também dependendo da versão. Entretanto, é indiscutível que o IEEE 802.11 é uma tecnologia dominante em redes locais sem fio, com pesquisas buscando melhorias e soluções para desafios críticos.

O IEEE 802.11 incorpora mecanismos de economia de energia, como a transição entre modos ativo e de economia de energia (BHARGAVA; RAGHAVA, 2022). A camada MAC

gerencia o consumo de energia dos rádios (AP), colocando-os em modo de repouso quando inativos, com *buffers* para armazenar mensagens em espera, permitindo que estações em repouso “acordem” periodicamente para receber mensagens (PRASAD; PRASAD, 2005).

As faixas de espectro ISM têm uma largura de banda limitada, o que resulta em taxas de dados mais baixas do que o desejado para certas aplicações (PRASAD; PRASAD, 2005). Para mitigar isso, a alocação dinâmica de largura de banda é incorporada, como a tecnologia de Rádio Cognitivo (*Cognitive Radio* (CR)), que permite o acesso oportunista ao espectro 802.11 usando “buracos de espectro” detectados (LAU *et al.*, 2012). Isso melhora a utilização do espectro.

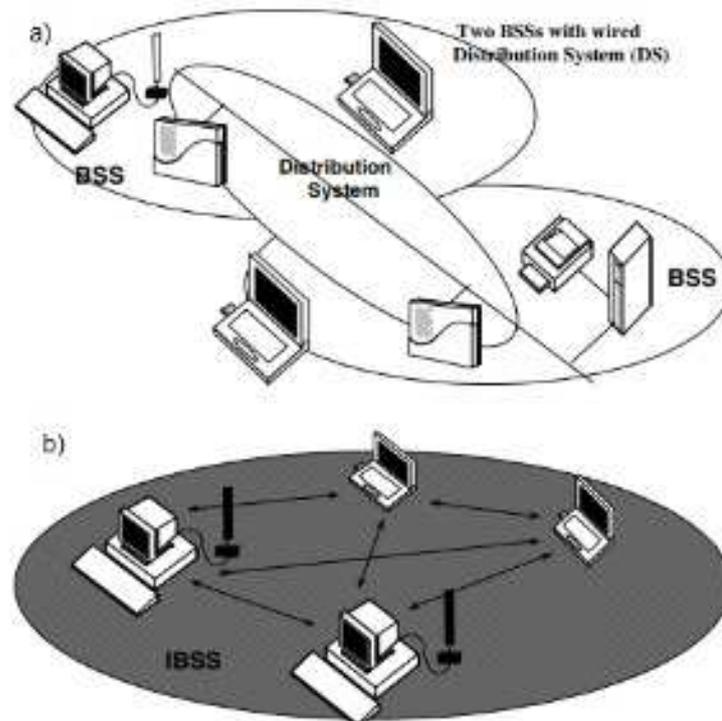
Devido à maior cobertura e à ausência de conexões físicas em redes WLAN, a segurança é um desafio significativo comparado às redes locais cabeadas (PRASAD; PRASAD, 2005). O IEEE 802.11 implementa protocolos de segurança, como WEP, WPA e WPA2, para prevenir o acesso não autorizado e proteger dados confidenciais. No entanto, o uso desses protocolos pode afetar o desempenho da rede, particularmente o rendimento (ALGHAMDI, 2019).

O IEEE 802.11 aborda o desafio da topologia dinâmica em redes sem fio por meio do IEEE 802.11f, conhecido como *Inter Access Point Protocol* (IAPP) (PRASAD; PRASAD, 2005). O IAPP facilita a comunicação e coordenação entre vários APs em uma WLAN, sendo especialmente útil para roaming (quando uma estação se move de um AP para outro). O IAPP não apenas facilita transferências eficientes, mas também contribui para a segurança da rede. O bloco de contexto pode incluir um campo de autenticação que protege contra ataques de repetição e negação de serviço (*Denial-of-Service* (DoS)) (CHO; JEON, 2005).

As redes Wi-Fi consistem em dispositivos interconectados, como *Stations* (STAs), AP e *Distribution System* (DS) (KARABULUT *et al.*, 2018). STAs são os terminais da rede, APs atuam como transmissores e receptores centrais de sinais WLAN, e o DS é a espinha dorsal que conecta vários APs, permitindo a comunicação entre estações em diferentes redes (NAGARAJ; SARKAR, 2022). O padrão IEEE 802.11 suporta diferentes topologias, incluindo redes *Independent Basic Service Set* (IBSS) e *Extended Service Set* (ESS) (YIN *et al.*, 2019). Uma rede IBSS, também conhecida como rede *ad-hoc* (Figura 10 (b)), é uma rede onde as estações se comunicam diretamente entre si sem a necessidade de um AP (PRASAD; PRASAD, 2005). Este tipo de rede é auto-organizada e não requer infraestrutura específica (ALI *et al.*, 2020), por isso é muito útil em situações onde é necessária uma rede temporária ou em áreas onde a infra-estrutura não está disponível (SILVANI *et al.*, 2022). No entanto, seu alcance é limitado,

a segurança pode ser um problema e o desempenho degrada com o aumento do tamanho da rede (ALI *et al.*, 2020; SILVANI *et al.*, 2022). Uma rede ESS (Figura 10 (a)) interconecta vários *Basic Service Sets* (BSSs) por meio de APs, oferecendo gerenciamento eficaz de recursos, suporte a QoS e manuseio de múltiplos fluxos de tráfego (YIN *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2006). No entanto, sua configuração demanda mais recursos e falhas no AP podem afetar toda a rede (JIAO *et al.*, 2017). Além desses dois tipos principais de topologias, o padrão IEEE 802.11 também oferece suporte a outras topologias, como as redes *mesh* em que os nós são interconectados de maneira não hierárquica, permitindo vários caminhos entre dois nós quaisquer. Isto pode proporcionar maior confiabilidade e redundância, pois os dados ainda podem ser transmitidos mesmo se um caminho ficar indisponível (SILVANI *et al.*, 2022).

Figura 10 – a) WLAN em modo infraestrutura. b) WLAN em modo *ad-hoc*.



Fonte: adaptado de Prasad e Prasad (2005, p. 57 e 58).

Segundo Prasad e Prasad (2005, p. 59), "a topologia fornece um meio de explicar os componentes físicos necessários de uma rede, mas a arquitetura lógica define a operação da rede". A arquitetura lógica do IEEE 802.11 engloba a *Physical Layer* (PHY) e a subcamada de MAC para governar a transmissão e recepção de dados (ANWAR *et al.*, 2019). A camada PHY é responsável pela transmissão dos dados sem fio, incluindo detalhes técnicos como modulação, codificação, taxas de dados e frequências dos canais (ANWAR *et al.*, 2019). Essas frequências podem afetar o desempenho, sendo a banda de 2,4 GHz ideal para penetração, mas

suscetível a interferências, enquanto a banda de 5 GHz oferece altas taxas de dados, mas com menor alcance e penetração (GUNANTARA *et al.*, 2018; LAMOLA *et al.*, 2019). A camada MAC é um componente chave para o gerenciamento do acesso ao canal sem fio, impedindo interferências por meio do protocolo chamado *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) (BOUJNOUI *et al.*, 2020). Além disso, lida com funções como HO, que ocorre quando um dispositivo móvel muda de ponto de acesso (BALFAQIH *et al.*, 2015).

O controle de acesso ao meio em redes IEEE 802.11 é crucial para coordenar transmissões e garantir eficiência e confiabilidade (QI, 2007). O processo é gerenciado pelo protocolo CSMA/CA, que opera em várias etapas, começando com a Verificação de Portadora (*Carrier Sense*) para detectar a ocupação do canal (CARVALHO; GARCIA-LUNA-ACEVES, 2019). O CSMA/CA utiliza o espaçamento entre quadros (*Inter-Frame Space* (IFS)) para gerenciar o acesso ao meio (PRASAD; PRASAD, 2005). Os IFS têm diferentes valores para priorizar tráfego, com um IFS curto para alta prioridade e redução de atrasos, e um IFS longo para tráfego de baixa prioridade e redução de colisões (BIANCHI; TINNIRELLO, 2003). O *Short Inter-Frame Space* (SIFS) é o IFS mais curto, usado para tráfego de alta prioridade, como quadros *ACK*, garantindo rápida transmissão após o término do quadro anterior (XIAO, 2005). O *Point Coordination Function Inter-Frame Space* (PIFS) é o SIFS mais um período de tempo, e o *Distributed Coordination Function Inter-Frame Space* (DIFS) é o PIFS com um tempo adicional (PRASAD; PRASAD, 2005). A *Distributed Coordination Function* (DCF) é o principal protocolo de acesso ao meio e opera em um modo competitivo (PRASAD; PRASAD, 2005). Quando uma estação identifica o meio livre, aguarda um período de tempo aleatório chamado DIFS para minimizar colisões entre estações (BALBI *et al.*, 2019).

Adicionalmente, os quadros *Request to Send* (RTS) e *Clear to Send* (CTS) podem ser usados para reservar o acesso ao meio. Uma estação envia um quadro RTS para solicitar permissão para transmitir, e se a estação receptora está pronta, responde com um quadro CTS, reservando o canal para a transmissão. Esse "aperto de mão" com RTS/CTS é especialmente útil em situações de alta carga de tráfego, coordenando transmissões e reduzindo colisões, pois as estações conhecem os momentos apropriados para transmitir (QI, 2007). A *Point Coordination Function* (PCF) oferece uma alternativa à DCF, proporcionando acesso ao meio previsível e gerenciado, com coordenação centralizada pelo AP (QI, 2007). É útil para redes que exigem alta QoS e permite a priorização do tráfego durante os Períodos sem Contenção (CFP), alternando com os Períodos de Contenção (CP), onde a DCF é usado para competir pelo acesso ao meio

(PRASAD; PRASAD, 2005).

A *Fragmentation* é outra técnica relevante para otimizar a transmissão, dividindo quadros longos em fragmentos menores para aumentar a probabilidade de entrega bem-sucedida em condições adversas (QI, 2007). No entanto, essa abordagem introduz *overhead* na rede devido à necessidade de informações de controle em cada fragmento (PRASAD; PRASAD, 2005). As fases de *Scanning*, *Association*, *Authentication* e *Encryption* são fundamentais para o estabelecimento de conexões sem fio (PRASAD; PRASAD, 2005). A fase de *scanning* identifica redes, com varreduras passivas e ativas. Na varredura passiva, dispositivos ouvem *beacons* e coletam informações essenciais. A varredura ativa é mais rápida e envolve envio de "*probes*" e coleta de informações semelhantes (QI, 2007). Após a varredura, acontece a associação a um AP. A estação envia sondagens e o AP responde com mensagens de resposta. A estação seleciona o AP com base na qualidade do sinal e envia uma solicitação de associação. Essas ações configuram com sucesso a conexão sem fio (PRASAD; PRASAD, 2005). A autenticação verifica a identidade das estações e garante a segurança da rede sem fio. A criptografia desempenha um papel essencial na proteção da confidencialidade dos dados transmitidos, impedindo acesso não autorizado (QI, 2007). O *roaming* é uma funcionalidade particularmente importante para dispositivos que se deslocam e precisam trocar de AP à medida que se movem pela área de cobertura de uma rede sem fio, pois evita desconexões e interrupções na comunicação, garantindo uma experiência contínua para os usuários (QI, 2007). Por fim, a sincronização, realizada com a função de sincronização de tempo do *beacon*, possibilita o gerenciamento eficiente de energia e facilita a organização das transmissões (PRASAD; PRASAD, 2005).

### 2.2.3 *Handover*

Em redes de comunicação, a gestão de mobilidade desempenha um papel fundamental ao possibilitar que usuários itinerantes acessem serviços por meio de diversas tecnologias de acesso, simultaneamente ou de forma sequencial. Essa gestão abrange cenários estáticos, como a localização de nós móveis para entrega de pacotes de dados, e cenários dinâmicos, que envolvem a manutenção de conexões com nó móvel em movimento para novas áreas (PRASAD; PRASAD, 2005).

A gestão de mobilidade é composta por dois componentes distintos: a gestão de localização, que rastreia o movimento de nó móvel, atualiza informações de localização e determina sua posição (KO *et al.*, 2017), e a gestão de HO, que se concentra no controle da

mudança do AP durante a transmissão ativa de dados (CARDONA *et al.*, 2017). Ela deve atender a requisitos de desempenho e escalabilidade. Isso inclui a necessidade de *handoffs* rápidos, minimizando a latência de pacotes, e *handoffs* sem falhas, que reduzem a perda de pacotes ao mínimo (GHADERI, 2006). É importante manter a sobrecarga de tráfego de sinalização dentro de limites aceitáveis e otimizar os caminhos de roteamento, eliminando transferências redundantes (PRASAD; PRASAD, 2005). A garantia de QoS também é um elemento crítico, com a capacidade de estabelecer novas reservas de QoS para diferentes tipos de tráfego, minimizando interrupções. A segurança desempenha um papel vital, exigindo suporte para vários níveis de segurança, como criptografia de dados e autenticação de usuário. Além disso, a preferência por mecanismos de mobilidade que exijam poucas mudanças nos componentes da rede é desejável, como armazenamento em *buffer* e encaminhamento, detecção e previsão de movimento, controle de *handoff* e área de *paging* (PRASAD; PRASAD, 2005).

O *handover* é uma funcionalidade essencial em redes móveis, permitindo a migração dinâmica de terminais entre diferentes estações base. Ele desempenha um papel fundamental na gestão de recursos de rádio, que constituem a base da indústria de comunicações sem fio (SAEED, 2019). O HO também está relacionado ao conceito de *roaming*. Segundo (PRASAD; PRASAD, 2005), no IEEE 802.11 WLANs “*roaming*” é sinônimo de “*handover*”. Entretanto, é importante evidenciar as diferenças entre os dois conceitos, em que *roaming* refere-se ao processo pelo qual o dispositivo sem fio se mantém conectado ao se mover de um AP para outro, enquanto o *handover* é a transferência de conexão em si.

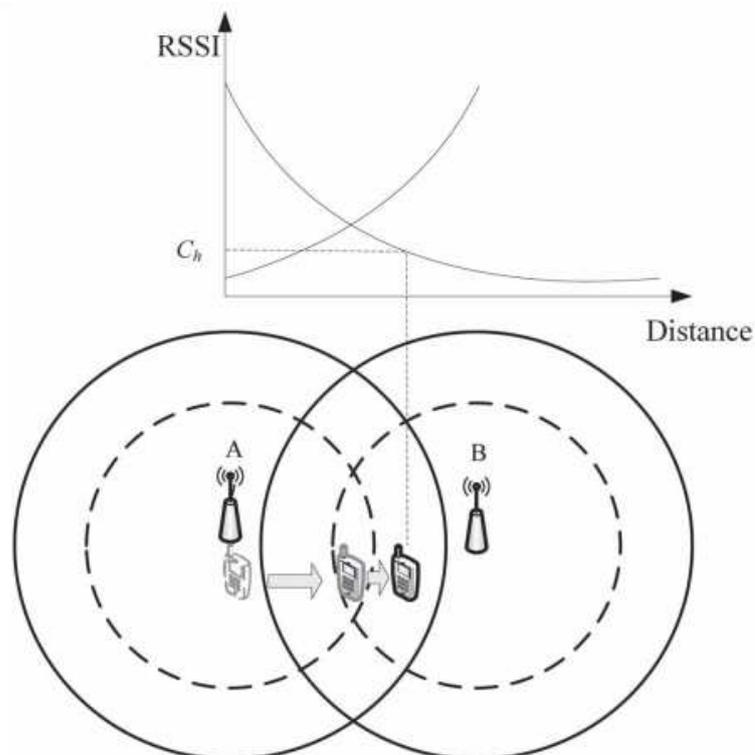
As questões relacionadas ao HO podem ser categorizadas em questões arquiteturais que refere-se a aspectos metodológicos, controle e elementos de *software/hardware* envolvidos na realocação da conexão do dispositivo móvel e questões relacionadas aos algoritmos de tomada de decisão que englobam tipos de algoritmos, métricas usadas por esses algoritmos e metodologias de avaliação de desempenho. Além disso, para atender aos requisitos essenciais do HO, é necessário garantir baixa latência, escalabilidade, interrupções mínimas e recuperação rápida, bem como a manutenção ou renegociação da QoS (PRASAD; PRASAD, 2005).

Diversos tipos de algoritmos têm sido empregados ou estudados visando a tomada de decisões precisas para o momento de *handover*. As abordagens tradicionais de *handover* são, em sua maioria, fundamentadas em métricas que avaliam a intensidade do sinal recebido, como a *Received Signal Strength* (RSS) e a potência recebida (CARDONA *et al.*, 2017).

A Figura 11 contém um esquema em que acontece um *handover* baseado no *threshold*

(limiar) que é um valor crítico que o dispositivo móvel monitora, como a qualidade do sinal, a força do sinal, a taxa de transferência de dados ou outros parâmetros relevantes. Quando esse valor atinge ou cai abaixo do limite predefinido, o dispositivo toma a decisão de realizar o *handover* para se conectar a um AP diferente que ofereça uma melhor qualidade de conexão. Na Figura 11, a decisão de *handover* utiliza o *threshold* baseado no *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). O gráfico representa a força do sinal dos APs “A” e “B” a medida que a STA se desloca. O ponto  $C_h$  representa o momento em que ocorre o HO.

Figura 11 – Decisão de *handover* dependendo do *threshold*.



Fonte: Jin e Choi (2013, p. 1416).

Outras métricas são igualmente consideradas, como a *Carrier-to-Interference Ratio* (CIR), a *Bit Error Rate* (BER) e a *Block Error Rate* (BLER) (CARDONA *et al.*, 2017). Adicionalmente, a literatura acadêmica explora técnicas de maior complexidade, incluindo previsões, o uso de reconhecimento de padrões com base em redes neurais ou lógica *fuzzy* e abordagens avançadas que consideram parâmetros de sistema, como a taxa de dados e o tipo de serviço (PRASAD; PRASAD, 2005).

No contexto do IEEE 802.11, são definidos três cenários distintos de *handover*. O primeiro é o cenário "Sem *handover*", que inclui duas subclasses: "Estático", que não envolve movimento, e "Movimento Local", que se refere ao deslocamento dentro do BSS ou área de

cobertura do AP (FETTOUH *et al.*, 2012). O segundo cenário é o *Handover* de AP, que ocorre quando uma STA se move de um AP para outro dentro do mesmo ESS . O terceiro cenário, *Handover* de ESS, envolve o deslocamento de uma STA de um BSS em um ESS para um BSS em um ESS diferente (PRASAD; PRASAD, 2005).

O processo de *handover* enfrenta atrasos que variam conforme a implantação de canais únicos ou multicanais. Em cenários com múltiplos canais eficientes, a STA deve realizar varreduras somente nos canais que não têm interferência mútua, ou seja, nos canais que não se sobrepõem. Isso é particularmente crítico na banda de 2,4 GHz, onde apenas três canais estão disponíveis sem sobreposição, embora o padrão permita o uso de até cinco canais (PRASAD; PRASAD, 2005). Canais sobrepostos se referem à situação em que as faixas de frequência utilizadas por diferentes canais se sobrepõem, o que pode causar interferência e degradação no desempenho da rede (WANG *et al.*, 2023). Na faixa de 5 GHz, a situação é mais favorável, pois não há canais sobrepostos, o que tem implicações diretas nos atrasos durante o processo de *handover*. Os principais atrasos no processo de *handover*, independentemente de ser um *handover* de canal único ou multicanal, envolvem a detecção da necessidade de *handover*, ou seja, o tempo até a STA reconhecer a necessidade de iniciar o *handover*, o período exigido para a STA realizar a varredura, o tempo necessário para a reautenticação da STA com o novo AP e o tempo envolvido na rearrogação da STA com o novo AP (PRASAD; PRASAD, 2005).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será descrita a metodologia empregada na pesquisa, com foco nas etapas que possibilitaram a avaliação dos algoritmos de *handover* em ambientes CBTC. Serão apresentados o cenário aplicado ao modelo, os procedimentos de modelagem do sistema, as equações do modelo de canal sem fio, o modelo de transmissão e a simulação em nível de sistema.

#### 3.1 Cenário CBTC Simulado

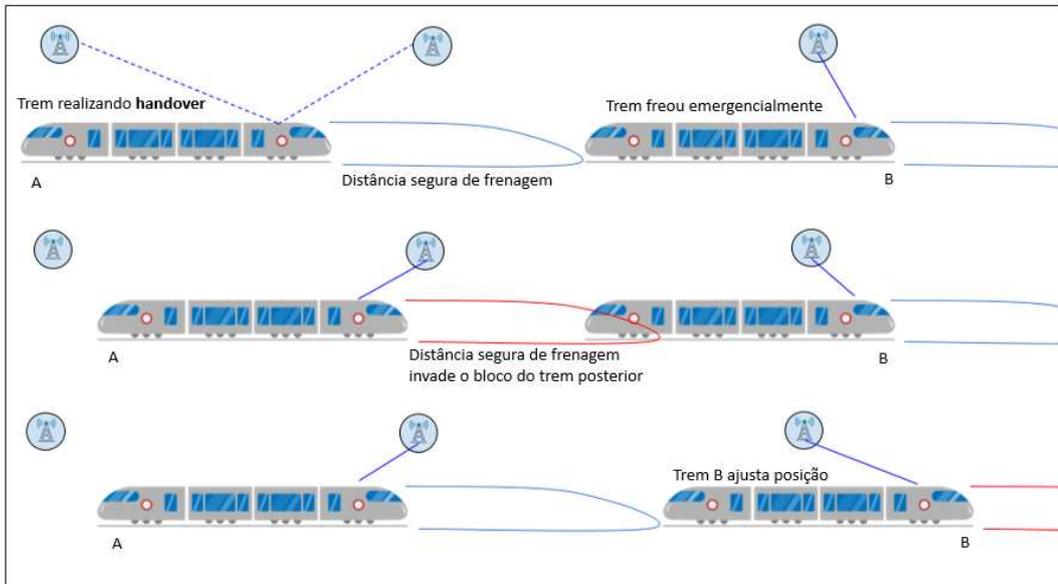
No cenário simulado tem-se um sistema CBTC modelado, em que um trem se encontra inicialmente em movimento a uma velocidade de 80 km/h, uma velocidade máxima comum para trens urbanos. Durante o momento exato do *handover* entre dois APs no sistema de comunicação, uma mensagem de frenagem deve ser entregue ao trem, mas devido ao HO, há um atraso na entrega dessa mensagem.

Esse atraso ocorre devido à transição do trem de um AP para outro, caracterizada pelo HO. A entrega da mensagem de frenagem ao trem é fundamental para assegurar que o trem reduza sua velocidade de maneira controlada e, dessa forma, garanta a segurança e a eficiência da operação ferroviária. Portanto, no cenário de simulação, está sendo analisada a capacidade do sistema CBTC em lidar com esse *handover* crítico.

O atraso na frenagem devido ao HO pode ser crítico em um sistema CBTC uma vez que os trens ajustam constantemente suas posições na via em função da posição dos trens posteriores. Conforme ilustrado na Figura 12, em que os trens *A* e *B* estão inseridos no cenário descrito e ao final do cenário da Figura 12, o trem *B* ajusta sua posição para restaurar a distância de frenagem segura. Entretanto o deslocamento nesse ajuste pode acarretar prejuízos conforme a situação de frenagem emergencial.

Para este estudo, o modelo do trem foi desenvolvido considerando uma trajetória unidimensional (retilínea). O trem tem comprimento de 10 m e 3 m de largura (equivalente a um vagão) uma vez que a modelagem utiliza Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV) e, portanto, a massa do trem e suas dimensões não influenciarão nos resultados simulados.

Figura 12 – Etapas críticas do cenário simulado.



Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.1.1 Movimento do Trem

Para descrever o movimento do trem foram utilizadas as equações do MRUV. No contexto da pesquisa, as equações MRUV foram empregadas para descrever o comportamento dinâmico do trem, levando em consideração as acelerações e desacelerações especificadas. Essas equações são essenciais na modelagem do movimento do trem no cenário CBTC.

#### 3.1.1.1 Velocidade Instantânea e Função Horária do Espaço

A velocidade instantânea do trem no tempo  $t$ ,  $v(t)$ , é atualizada de acordo com a seguinte equação:

$$v(t) = v_0 + a \cdot t, \quad (3.1)$$

onde  $v_0$  é a velocidade inicial do trem e  $a$  é a aceleração do trem. Já a posição do trem no tempo  $t$ ,  $s(t)$ , é atualizada com base na seguinte equação:

$$s(t) = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2, \quad (3.2)$$

onde  $s_0$  é a posição inicial do trem.

## 3.2 Comunicação Terra-Trem

O trem utiliza o sistema de comunicação 802.11g para estabelecer conectividade durante sua operação. Este oferece uma combinação de velocidade de transmissão de dados

e alcance adequados para as necessidades de comunicação no CBTC (JIANG *et al.*, 2011). Quanto às antenas empregadas no sistema CBTC, tanto antenas direcionais quanto antenas omnidirecionais podem ser empregadas, de acordo com os requisitos específicos de cada projeto. Dessa forma, devido à capacidade da antena omnidirecional de distribuir o sinal de maneira uniforme em todas as direções, ela foi adotada a fim de simplificar o simulador. E devido à adoção da antena omnidirecional, a distância adotada entre os três APs que estão ao longo da via simulada foi de 200 m, uma vez que, para distâncias maiores seria mais adequado utilizar antenas diretivas. Com antenas diretivas, a distância normalmente adotada é de 400 m (JIANG *et al.*, 2011).

A simulação do comportamento do sistema CBTC, incluindo a comunicação sem fio entre os trens e os APs, foi realizada por meio do *software* MATLAB. Ele oferece as ferramentas necessárias para simular a interação entre o trem e os APs, levando em consideração os parâmetros de comunicação e a física do movimento do trem.

### 3.2.1 Modelos de Propagação e Cálculo de Qualidade do Enlace Sem Fio

As perdas observadas ao longo da trajetória que separa o trem do AP resultam de diversos fatores, incluindo as características do ambiente, como meio de propagação, mudanças no terreno e a existência de grandes obstáculos, bem como a presença de obstruções que têm dimensões comparáveis ao comprimento de onda da portadora da informação. Em resumo, essas perdas decorrem da interação de três fenômenos de propagação: reflexão, refração e difração das ondas transmitidas pelo espaço. Sob uma abordagem sistêmica, modelos matemáticos simples são empregados para prever de maneira suficientemente precisa o comportamento do sistema na presença desses fenômenos de propagação. Normalmente, considera-se três principais tipos de atenuação: a perda no percurso, o sombreamento e o desvanecimento de pequena escala.

#### 3.2.1.1 Perda de Percurso

A perda de percurso  $PL$  é um fenômeno que ocorre quando um sinal de rádio se enfraquece à medida que se afasta do transmissor. Esta é influenciada por diversos fatores, incluindo a distância entre os dispositivos de comunicação e as características do ambiente. A fórmula que descreve a perda de percurso  $PL$  em decibéis ( $dB$ ) é a seguinte:

$$PL = -10\alpha \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \text{ [dB]}, \quad (3.3)$$

onde:

- $\alpha$  é um parâmetro que caracteriza a atenuação do sinal;
- $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor;
- $d_0$  é uma distância de referência.

### 3.2.1.2 Sombreamento

O sombreamento  $SF$  é um efeito que se superpõe à perda de percurso refletindo variações locais da potência recebida em função da existência de obstáculos de grande porte naturais ou artificiais (como morros e edifícios, por exemplo). Usamos para modelar o sombreamento uma variável aleatória com distribuição log-normal e desvio padrão  $\sigma_{sf}$ , como descrita abaixo:

$$SF = \sigma_{sf} \cdot \mathcal{N}(0, 1) \text{ [dB]}, \quad (3.4)$$

onde:

- $\sigma_{sf}$  é o desvio padrão da distribuição normal;
- $\mathcal{N}(0, 1)$  denota uma variável aleatória normal padrão.

### 3.2.1.3 Desvanecimento de Pequena Escala

O desvanecimento de pequena escala refere-se às flutuações rápidas e temporárias na qualidade do sinal. Essas flutuações podem ser causadas por reflexões, difrações e espalhamento do sinal transmitido. O modelo para o desvanecimento de rápida variação  $FF$  usa o conceito de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas. Em outras palavras, se  $X$  e  $Y$  são duas variáveis aleatórias gaussianas independentes com média zero e variância igual a  $\frac{\sigma^2}{2}$ , então a magnitude  $FF = \sqrt{X^2 + Y^2}$  segue uma distribuição de Rayleigh (THEODORE *et al.*, 2002).

### 3.2.1.4 Cálculo da SINR

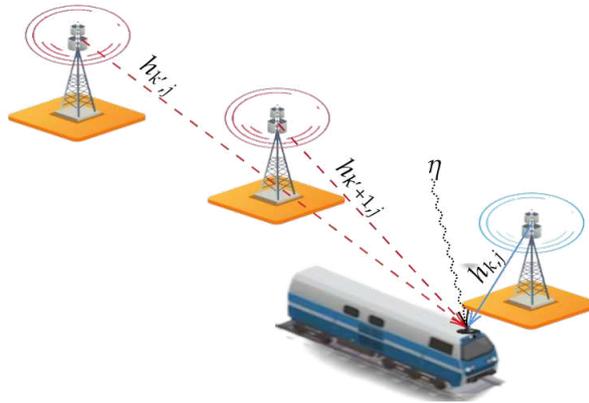
A *Signal to Interference-plus-Noise Ratio* (SINR) é um indicador que analisa a qualidade de um sinal, expresso em Decibel, sendo definido pela razão entre a força do mesmo em comparação à potência do ruído e a interferência sobreposto a ele. Dessa forma, a SINR  $\gamma$  do trem conectado no AP de índice  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ , onde  $K$  é a quantidade de APs, durante o

tempo de intervalo de símbolo  $j$  é dado por:

$$\gamma_{k,j} = \frac{|h_{k,j}|^2 p_{tx}}{\sum_{k'=1, k' \neq k}^K |h_{k',j}|^2 p_{tx} + \eta}, \quad (3.5)$$

onde  $p_{tx}$  representa a potência de transmissão dos APs,  $h_{k,j}$  são os coeficientes de canal do AP  $k$  (i.e. considerando perda de percurso, sombreamento e desvanecimento de pequena escala),  $k' \in \{1, 2, \dots, K\}$  são os índices dos APs interferentes e  $\eta$  é o ruído gaussiano branco. A Figura 13 apresenta um trem conectado ao AP de cor azul, o canal de comunicação é representado por  $h_{k,j}$ . Além do sinal de interesse o trem sofre interferência dos APs vermelhos, sendo representado pelos canais de comunicações  $h_{k',j}$  e  $h_{k'+1,j}$ . Por fim, o  $\eta$  representa a potência do ruído gaussiano branco presente no cenário de estudo.

Figura 13 – Sinal de interesse e interferente usados para cálculo da SINR do trem.



Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.2.1.5 Adaptação de Enlace

O *Modulation and Coding Scheme* (MCS) é uma parte fundamental da comunicação sem fio, desempenhando um papel essencial na transmissão de dados em redes Wi-Fi. O 802.11g possuem 8 esquemas de MCS que são responsáveis por determinar como os dados são modulados e codificados antes de serem transmitidos através do canal de comunicação sem fio. O objetivo principal do MCS é otimizar a eficiência da transmissão de dados, levando em consideração as condições variáveis do canal. Cada índice MCS está associado a uma combinação específica de modulação e codificação. Por exemplo, um MCS mais baixo pode usar uma modulação menos complexa e uma codificação mais simples, enquanto um MCS mais alto pode empregar modulações mais avançadas e codificações mais eficazes. A escolha do MCS depende das condições do canal, que podem variar devido a fatores como distância entre o transmissor e o

receptor, interferência de outros dispositivos, qualidade do sinal e obstruções no ambiente. Em condições ideais, um MCS mais alto pode ser selecionado para obter uma taxa de transferência de dados mais alta. No entanto, em condições desfavoráveis, um MCS mais baixo pode ser mais apropriado para manter uma comunicação estável. A adaptação dinâmica do MCS é uma característica comum em sistemas de comunicação sem fio, permitindo que os dispositivos escolham automaticamente o MCS mais apropriado com base nas condições em tempo real. Isso ajuda a otimizar o desempenho da rede, garantindo uma comunicação confiável e eficiente. A Tabela 1 apresenta os MCSs usados no simulador:

Tabela 1 – Adaptação de enlace do 802.11g.

MCS	Tipo de Modulação	Taxa de Codificação $R$	Taxa de Dados Máxima (Mbps)
1	BPSK	1/2	6
2	BPSK	3/4	9
3	QPSK	1/2	12
4	QPSK	3/4	18
5	16 QAM	1/2	24
6	16 QAM	3/4	36
7	64 QAM	2/3	48
8	64 QAM	3/4	54

Fonte: Prasad e Prasad (2005).

A Figura 14 apresenta a taxa de dados  $D$  em relação à *Signal to Noise Ratio* (SNR) para cada esquema de modulação. A partir desses valores, o *throughput*  $T$  foi calculado como:

$$T = D \cdot (1 - \text{BER}), \quad (3.6)$$

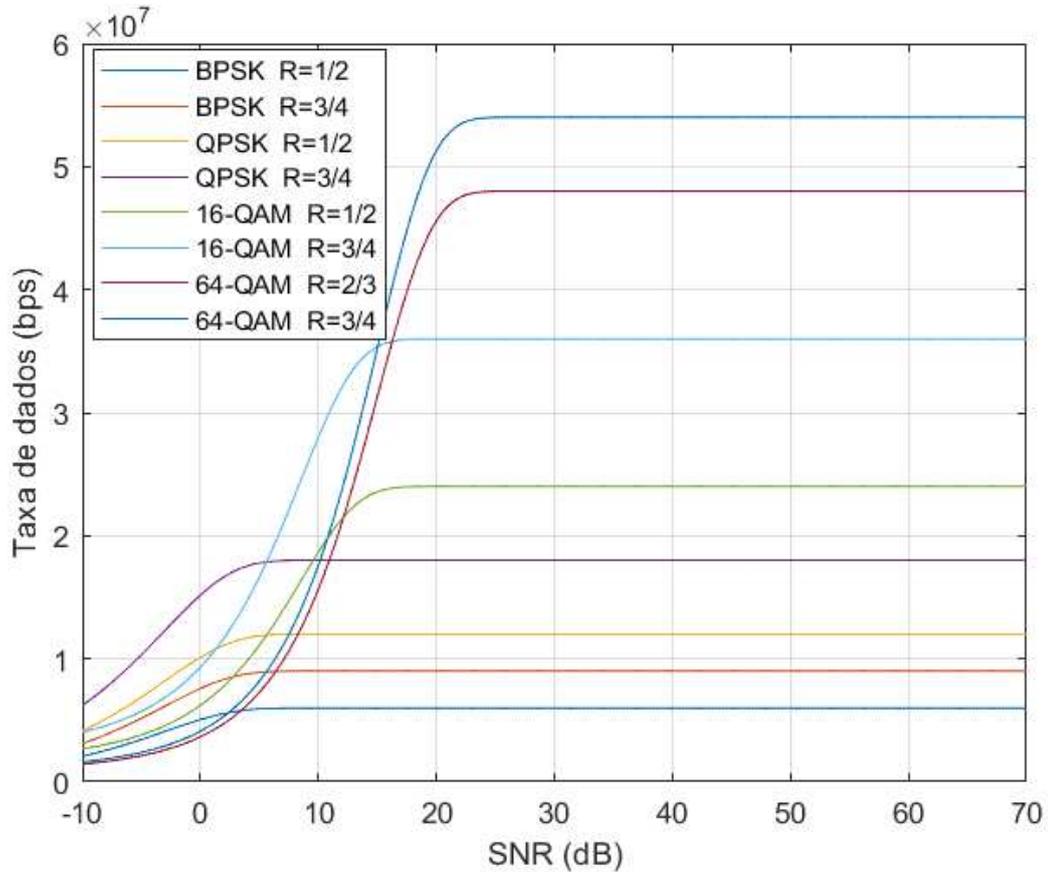
onde o valor da BER foi obtido por meio de modelos teóricos como o modelo de canal AWGN (Aditivo Branco Gaussiano) (THEODORE *et al.*, 2002).

### 3.2.1.6 Atraso de Pacote

O protocolo MAC no 802.11g baseia-se no CSMA/CA e adota um esquema de retrocesso exponencial binário<sup>1</sup> com *slot* para reduzir colisões resultantes de estações transmitindo simultaneamente. Diante disso, o atraso médio para um pacote transmitido com sucesso é definido como o intervalo de tempo desde o momento em que o pacote se encontra no topo da fila do MAC, pronto para ser transmitido, até o momento em que uma confirmação para esse pacote é recebida. Se um pacote for descartado devido ao alcance do limite de novas tentativas

<sup>1</sup> O retrocesso exponencial binário indica que o aumento do tempo de espera é feito em etapas discretas, geralmente multiplicando-o por 2. Por exemplo, se o dispositivo esperou 10 unidades de tempo na primeira tentativa e ocorreu uma colisão, ele esperaria 20 unidades de tempo na próxima tentativa, e assim por diante.

Figura 14 – Curvas de MCS usadas no 802.11g.



Fonte: elaborada pelo autor.

especificado, o tempo de atraso desse pacote não será incluído no cálculo do atraso médio  $E_D$  (CHATZIMISIOS *et al.*, 2003):

$$E_D = E_X * E_{slot}, \quad (3.7)$$

onde  $E_X$  é o número médio de *slots* requeridos para uma transmissão sucedida e  $E_{slot}$  é o tamanho médio de um *slot* que é dado por (CHATZIMISIOS *et al.*, 2003):

$$E_{slot} = (1 - Ptr) * \beta + Ptr * Ps * Ts + Ptr * (1 - Ps) * Tc, \quad (3.8)$$

onde:

- $Ptr$  corresponde probabilidade de que pelo menos uma AP transmita um pacote no *slot* considerado;
- $\beta$  é o tamanho do *slot*;
- $Ps$  define a probabilidade de que uma transmissão de pacote ocorrida seja sucedida;
- $Ts$  é o tempo médio que o meio é percebido como ocupado devido a uma transmissão bem sucedida;

- $T_c$  é o tempo médio que o meio é percebido como ocupado devido a uma colisão.

É importante destacar que no sistema CBTC, o atraso na transmissão de pacotes desempenha um papel fundamental na asseguuração da segurança e na precisa coordenação entre os trens. Qualquer atraso significativo na comunicação entre os sistemas de controle e os trens pode resultar em situações perigosas, como colisões ou falhas na manutenção das distâncias de segurança. Portanto, a minimização do atraso é essencial para manter a eficácia do sistema e garantir a segurança dos passageiros e operadores.

### 3.3 Simulação de Nível Sistêmico

A simulação computacional é considerada uma ferramenta importante para analisar e avaliar o desempenho de sistemas complexos, como o CBTC. A ferramenta de simulação baseada em MATLAB proporciona confiabilidade para a avaliação de desempenho do sistema CBTC, uma vez conhecidos os comportamentos do sistema e modelados no ambiente de simulação.

A implementação de uma ferramenta de simulação abrangente em nível de sistema permite compreender e prever o comportamento do sistema, levando a aprimoramentos significativos na sua eficiência, confiabilidade e segurança. Portanto, a simulação é uma ferramenta fundamental na tomada de decisões e avaliação de projetos para sistemas críticos como o CBTC. A simulação foi realizada com o uso do método Monte Carlo, utilizando 100 amostras aleatórias para gerar dados estatísticos representativos. Através desse método, foram obtidas estimativas numéricas para avaliar o desempenho do sistema em diferentes cenários e analisar a incerteza nos resultados. Os principais parâmetros considerados nas simulações estão na Tabela 2.

### 3.4 Algoritmos de *Handover*

Nesta seção, serão apresentados os algoritmos de *handover* adotados no contexto da simulação. Os Algoritmos de HO determinam quando e como os dispositivos se conectam a diferentes APs para garantir a melhor qualidade de sinal e confiabilidade de comunicação. Os quatro algoritmos específicos usados para a tomada de decisão de HO estão nas subseções a seguir.

Tabela 2 – Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor	Fonte
Velocidade inicial do trem ( $v_0$ )	80km/h	(ZHU <i>et al.</i> , 2010)
Taxa de Freio de Emergência ( $\rho$ )	2m/s <sup>2</sup>	(BRENNNA <i>et al.</i> , 2018)
Posição inicial do trem ( $s_0$ )	10m	
Comprimento do vagão ( $C$ )	10m	
Largura do vagão ( $L$ )	3m	
Frequência ( $f$ )	2.4GHz	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Largura de Banda ( $W$ )	20MHz	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Potência de Transmissão ( $P_t$ )	20dBm	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Expoente de Perda de Percurso ( $\alpha$ )	2	(KAREDAL <i>et al.</i> , 2010)
Desvanecimento de Pequena Escala	IID 6dB	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Sensibilidade do Receptor ( $S_{rx}$ )	-90dBm	
Sombreamento ( $\sigma_s$ )	4dB	
Densidade Espectral de Ruído ( $N_0$ )	-101dBm/Hz	
Tamanho do Pacote ( $k$ )	512bytes	(FAROOQ; SOLER, 2017)
MAC header	224bits	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
PHY header	192bits	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
ACK	304bits	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
Limite de Retransmissão Curta	6	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
DIFS	50 $\mu$ s	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
SIFS	10 $\mu$ s	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
Tamanho do <i>slot</i> $\beta$	20 $\mu$ s	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
Tempo Médio $T_s$	$\frac{H+k+ACK}{T} + DIFS + SIFS$	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
Tempo Médio $T_c$	$\frac{H+k+ACK}{T} + DIFS + SIFS$	(CHATZIMISIOS <i>et al.</i> , 2003)
Monte Carlo	100	

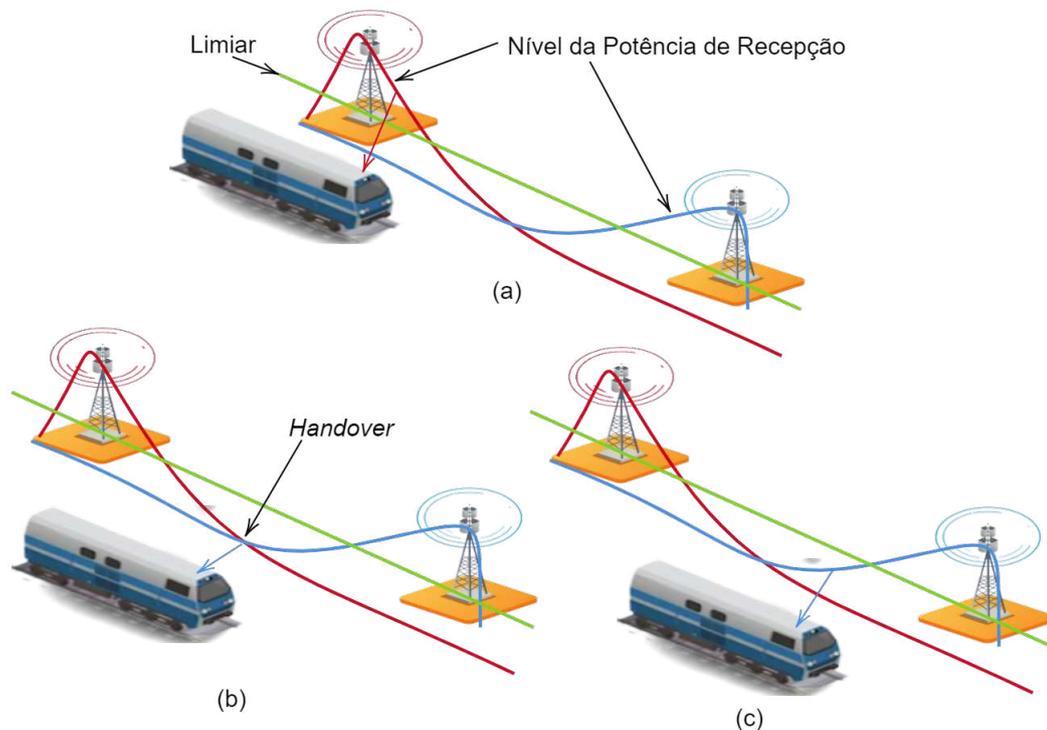
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4.1 Handover Baseado em Potência de Recepção com Limiar (HPR-L)

O *Handover* Baseado em Potência de Recepção com Limiar (HPR-L) adota um valor mínimo de limiar, expresso em dBm, como referência para a determinação da oportunidade de executar um procedimento de *handover*. Quando um trem está atualmente conectado a um AP e a intensidade do sinal diminui, atingindo um patamar inferior ao limiar pré-estabelecido, o algoritmo realiza o HO se a potência de recepção de outra AP for superada. Em contrapartida, se a potência de recepção permanece acima do limiar, o trem não inicia o processo de *handover*, mesmo que o sinal de outro AP apresente maior potência. Essa abordagem visa prevenir a ativação do HO devido a flutuações transitórias de potência e, desse modo, assegurar a manutenção de uma conexão com o sinal mais robusto, proporcionando uma comunicação confiável. A Figura 15 ilustra três fases do procedimento HPR-L. Inicialmente, na etapa (a), o trem está conectado ao AP vermelho devido ao alto nível de potência recebida. Mesmo que, em algum momento transitório, a potência do AP azul ultrapasse a do AP vermelho, o trem não iniciará o *handover* porque o limiar não foi atingido. Na segunda etapa (b), o trem já apresenta uma potência de recepção vinda do AP vermelho abaixo do limiar, enquanto o AP azul oferece

uma potência de recepção superior, desencadeando assim o início do processo de *handover*. Por fim, na figura (c), o procedimento de *handover* foi concluído, e o trem permanece conectado ao AP azul.

Figura 15 – Processo de *handover* do HPR-L.



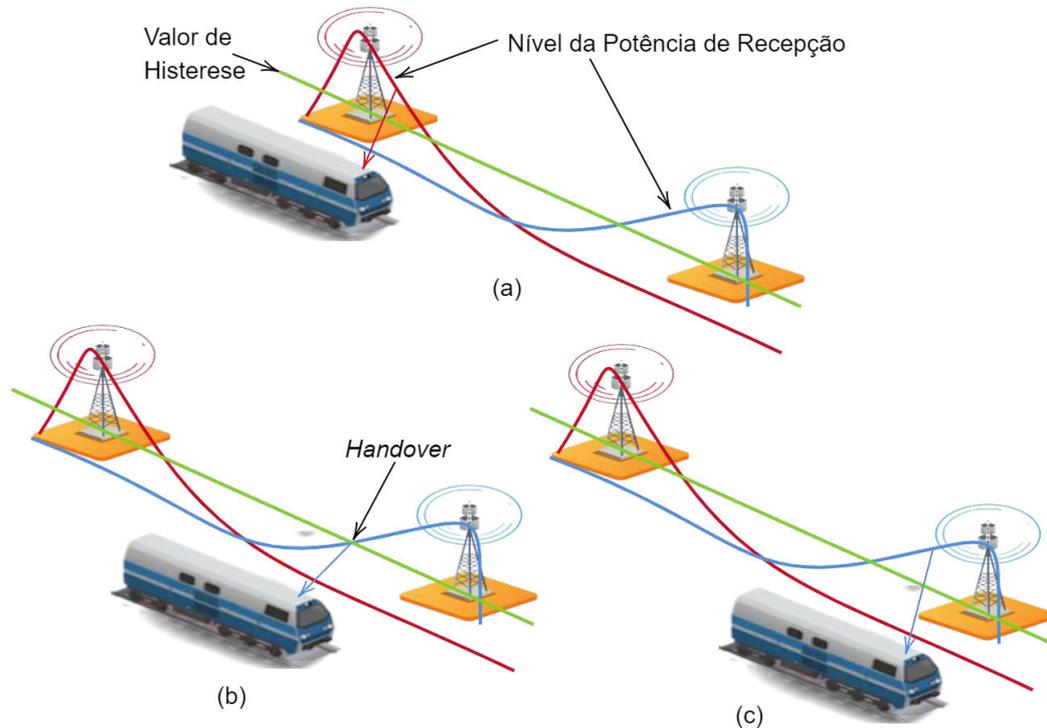
Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.4.2 Handover Baseado em Potência de Recepção com Histerese (HPR-H)

O *Handover* Baseado em Potência de Recepção com Histerese (HPR-H) utiliza uma estratégia que envolve a avaliação da potência de recepção e a consideração do critério de histerese antes de iniciar o HO. Em vez de acionar imediatamente o HO quando a potência de recepção no AP diminui, o algoritmo estabelece uma margem de histerese. O HO é acionado somente quando o nível de potência de recepção no AP atual cai abaixo do valor de potência de recepção do próximo AP, acrescido da margem de histerese. Essa abordagem evita tomadas de decisão frequentes e intermitentes de HO em cenários com flutuações de sinal, o que contribui para aprimorar a estabilidade da conexão. A Figura 16 ilustra três fases do procedimento HPR-H. Inicialmente, na etapa (a), o trem está conectado ao AP vermelho devido ao alto nível de potência recebida. Na segunda etapa (b), o trem já apresenta uma potência de recepção vinda do AP azul superior a AP vermelha no valor de histerese, desencadeando assim o início do processo de

*handover*. Por fim, na figura (c), o procedimento de *handover* foi concluído, e o trem permanece conectado ao AP azul.

Figura 16 – Processo de *handover* do HPR-H.



Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.4.3 Handover Baseado em Localização (HOLO)

Este algoritmo é um método de HO que utiliza a posição do trem em relação aos APs para tomar decisões de HO. O algoritmo verifica a distância entre o trem e os APs e compara essa distância com um limiar de distância pré-definido. Se a distância entre o trem e um AP for menor que o limiar de distância, o algoritmo considera que o trem deve se conectar a esse AP.

### 3.4.4 Handover Baseado em Média Móvel (HMM)

A média móvel é um conceito estatístico amplamente utilizado na análise de séries temporais e processamento de sinais. Ela é usada para suavizar os dados, identificar tendências e reduzir a variabilidade em um conjunto de observações ao longo do tempo. A média móvel calcula a média dos valores em um período específico e, em seguida, desloca essa janela de cálculo ao longo dos dados.

No contexto do algoritmo de HO, a média móvel desempenha um papel fundamental na decisão de quando o trem deve realizar o HO entre os APs ao longo da via. Em termos práticos, a média móvel é usada para suavizar a potência de recepção do trem de diferentes APs à medida que ele se desloca pela via. Essa avaliação leva em consideração não apenas as medições instantâneas, mas também o histórico recente das medições de qualidade do sinal. Dessa forma, O *Handover* Baseado em Média Móvel (HMM) calcula a média dos valores de qualidade do sinal em um intervalo específico ao redor da posição atual do trem e, então, ajusta continuamente essa janela de cálculo à medida que o trem avança e, dessa forma, suaviza as flutuações de curto prazo na qualidade do sinal, identificando tendências e variações significativas. O algoritmo utiliza essa técnica para determinar o momento ideal para realizar o HO, visando sempre manter a conectividade com o AP que oferece o sinal mais confiável e forte em qualquer ponto da via.

Foram empregados dois tipos de média móvel: a Média Móvel Simples (MMS) e a Média Móvel Exponencial (MME). A MMS atribui o mesmo peso a todos os valores contidos na janela de cálculo. À medida que a janela se desloca ao longo dos dados, os valores mais antigos são descartados, e novos valores são incorporados, permitindo que a média reflita as mudanças ao longo do tempo. Consequentemente, o algoritmo de HO é denominado *Handover* Baseado em Média Móvel Simples (HMMS) é a potência de recepção do trem  $P_r$  proveniente do AP  $k$  durante o *slot*  $j$  usando uma janela de  $n$  é regida pela equação:

$$P_r(k, j, n) = \frac{P_{r_j} + P_{r_{j-1}} + P_{r_{j-2}} + \dots + P_{r_{j-n+1}}}{n} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} P_{r_{j-i}}}{n}. \quad (3.9)$$

Por outro lado, a MME é uma variante da média móvel que atribui pesos exponenciais aos valores, conferindo maior relevância aos dados mais recentes. Por isso, o algoritmo de HO é denominado *Handover* Baseado em Média Móvel Exponencial (HMME) é a potência de recepção do trem  $P_r$  advindo do AP  $k$  durante o *slot*  $j$  usando uma janela de  $n$  é dada pela equação:

$$P_r(k, j, n) = (1 - \lambda) \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i P_{r_{j-i}}, \quad \lambda = \frac{n-1}{n+1}. \quad (3.10)$$

Durante a execução do Algoritmo 1, são empregados dois *loops* aninhados para percorrer os *slots* de tempo ( $N_{\text{slot}}$ ) e os diferentes pontos de acesso ( $K$ ). Em cada iteração, o código realiza a cópia das potências de recepção  $P_r(k)$  para uma matriz  $P_r(k, j)$ , onde  $j$  representa o *slot* de tempo atual. A principal estratégia para determinar o HO é a aplicação de uma média móvel, que suaviza as flutuações temporais nas potências de recepção. Se o *slot* de tempo atual

( $j$ ) ultrapassa o tamanho da janela da média móvel ( $n$ ), o algoritmo calcula a média móvel (i.e. HMMS ou HMME) das potências de recepção para cada ponto de acesso. Em seguida, identifica o índice  $k$  que proporciona a maior potência de recepção. Se  $k \neq idxAP$  (onde  $idxAP$  é o índice do ponto de acesso atual), o  $idxNovoAP$  é atualizado com o novo índice  $k$ . Caso contrário, mantém-se  $idxNovoAP$  igual a  $idxAP$ . Em situações em que  $j$  não ultrapassa  $n$ ,  $idxNovoAP$  é atribuído diretamente como  $idxAP$ .

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo HMM.

---

**Entrada:**  $n, idxAP$

**Saída:**  $idxNovoAP$

**begin**

**for**  $j \leftarrow 1$  **to**  $N_{slot}$  **do**

**for**  $k \leftarrow 1$  **to**  $K$  **do**

$P_r(k, j) \leftarrow P_r(k)$

**end**

**if**  $j > n$  **then**

      Calcule (3.9) ou (3.10) usando  $P_r(k, j)$

      Encontre  $k$  que fornece maior  $P_r$

**if**  $k \neq idxAP$  **then**

$idxNovoAP \leftarrow k$

**end**

**else**

$idxNovoAP \leftarrow idxAP$

**end**

**end**

**else**

$idxNovoAP \leftarrow idxAP$

**end**

**end**

**end**

---

## 4 RESULTADOS

Em um sistema CBTC, o *handover* entre os APs do DCS é um fator crítico para a operação dos trens considerando que erros ou grandes atrasos no processo de *handover* podem ensejar significativa degradação na transmissão de dados e, conseqüentemente, afetar o desempenho do sistema ferroviário. Como no CBTC o *headway* é minimizado, falhas no DCS provocam a parada de todo o comboio em operação como medida de segurança, impactando na qualidade de experiência do usuário.

Sendo o CBTC totalmente dependente do DCS para sua operacionalidade, estudos relacionados ao aprimoramento do sistema podem trazer benefícios, por exemplo, reduzir o *headway*, melhorar a qualidade de experiência do usuário e, ainda, diminuir os custos de desenvolvimento do projeto.

A utilização de técnicas de *handover* não convencionais nesses sistemas deve ser objeto de estudo com propósito não somente de minimizar falhas de comunicação do DCS, mas também para prover o desenvolvimento constante do sistema. Os quatro algoritmos de decisão de *handover* implementados no simulador contaram com diferentes parâmetros em sua execução. A tabela 3 contém os valores desses parâmetros variáveis para cada algoritmo de decisão de *handover* utilizado no simulador.

Tabela 3 – Dados de algoritmos de decisão de *handover*.

Algoritmo	Parâmetros variáveis para <i>handover</i>	Valores atribuídos
HPR-L	Limiar de potência de recepção (dBm)	[-10,-20,-30,-40,-50,-60,-70]
HPR-H	Valor de histerese (dB)	[3, 6, 9, 12, 15, 18, 21]
HOLO	Limiar de distância (m)	[1, 6, 11, 16, 21, 26, 31]
HMM	Janela de média móvel (n)	[2, 4, 6, 8, 10, 12, 14]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Visando avaliar o desempenho dos algoritmos, foi observado o atraso de comunicação devido ao HO e o avanço do trem sobre o *headway* durante a frenagem para cada parâmetro de *handover*.

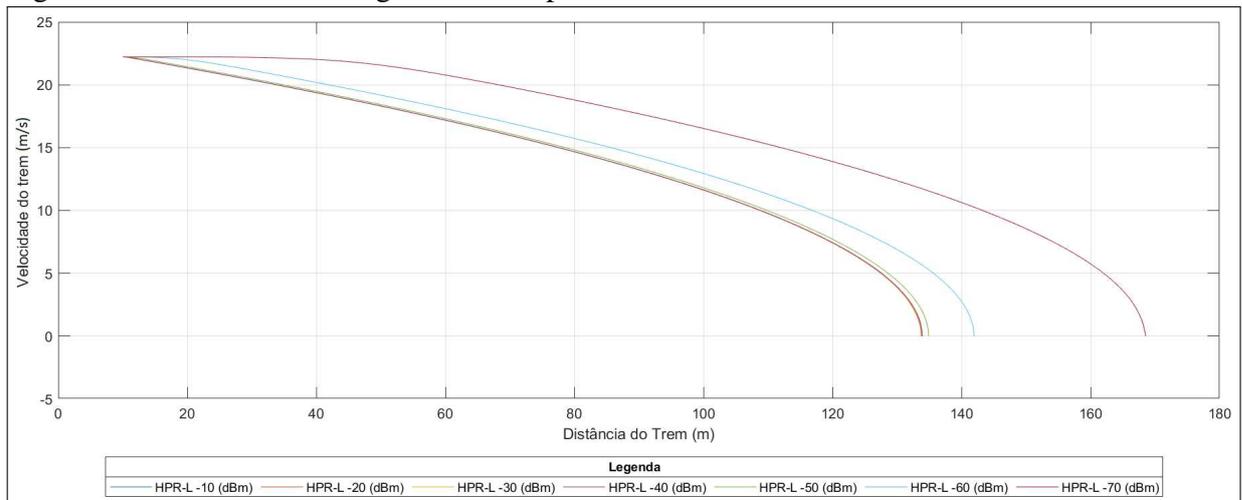
### 4.1 Resultados do HPR-L

O algoritmo HPR-L, frequentemente utilizado em sistemas CBTC usou o limiar da potência de recepção para fazer o HO. Os valores utilizados foram de **-10 dBm a -70 dBm**, conforme tabela 3. Este último é comumente utilizado em sistemas CBTC e equivale a um valor

mínimo de limiar de potência de recepção utilizado mediante adoção da maior distância possível entre os APs visando a utilização de uma menor quantidade de equipamentos. Adotar um limiar de potência muito abaixo disto (**-70 dBm**) pode acarretar em perdas de pacote significativas.

A figura 17 contém o gráfico de frenagem do trem para o algoritmo HPR-L. O eixo da ordenada representa a velocidade do trem, enquanto o eixo da abscissa indica a distância percorrida pelo trem. Nos quatro algoritmos esta velocidade inicia em 80 km/h.

Figura 17 – Gráfico de frenagem do trem para o HPR-L.



Fonte: elaborada pelo autor.

Para o HPR-L, a curva referente ao valor de limiar de potência de recepção usual (**-70 dBm**) teve o pior resultado com uma maior distância de avanço sobre a *headway*. Quanto maior este avanço, pior o desempenho do algoritmo, uma vez que esta distância será, posteriormente, ajustada pelo trem da frente para manter a *headway*. Quanto maior essa distância de ajuste, maiores são os riscos à segurança da operação.

Para os valores de limiar de **-10 dBm** a **-30 dBm**, os resultados estão muito próximos a ponto das curvas se sobreporem. Na faixa de **-10 dBm** a **-30 dBm**, o trem está localizado próximo ao AP ao qual está atualmente conectado. Essa faixa de potência indica que o sinal recebido pelo trem é bastante forte, indicando uma proximidade física significativa com a AP atual. Nota-se que, mesmo configurando o limiar de *handover* para **-10 dBm**, o trem realizará a transição próximo a **-30 dBm**, devido às características variáveis do canal. Isso significa que, mesmo que o limiar esteja definido para um valor mais alto, o sistema decidiu pelo *handover* em um ponto de sinal mais fraco, como **-30 dBm**. Portanto, para o HPR-L, é possível que não haja grande variação na decisão do *handover* entre valores de limiar desde que o sinal esteja em um patamar de variabilidade menor. Entretanto, utilizar estes valores de limiar é economicamente

inviável, uma vez que seria necessário uma quantidade maior de APs para garantir a cobertura da via nestas potências.

É interessante notar também pela análise do gráfico da figura 17 que a diferença de avanço sobre o *headway* entre a curva que utiliza o limiar de **-70 dBm** e as melhores curvas do algoritmo corresponde à distância percorrida pelo trem devido ao *handover* tardio ao usar **-70 dBm**. Portanto, o tempo de frenagem do trem é o mesmo para todos os parâmetros, entretanto a resposta do trem ao comando de frenagem é mais ou menos rápida dependendo do parâmetro.

## 4.2 Resultados do HPR-H

O HPR-H utilizou valores de histerese sobre a potência de recepção para realizar o *handover*. Os valores de histerese utilizados vão de **3 dB** a **21 dB** com variação de **3 dB**, como é possível verificar na Tabela 3. Este intervalo de valores proporciona uma análise abrangente uma vez que a histerese de **3 dB** pode representar um valor baixo para o CBTC, em contrapartida **21 dB** de histerese é um valor alto de histerese. Para este último valor, existe risco da potência de recepção do trem conectado ao AP ultrapassar o limiar de **-70 dBm** que é um valor mínimo seguro para não ter grandes perdas de pacote.

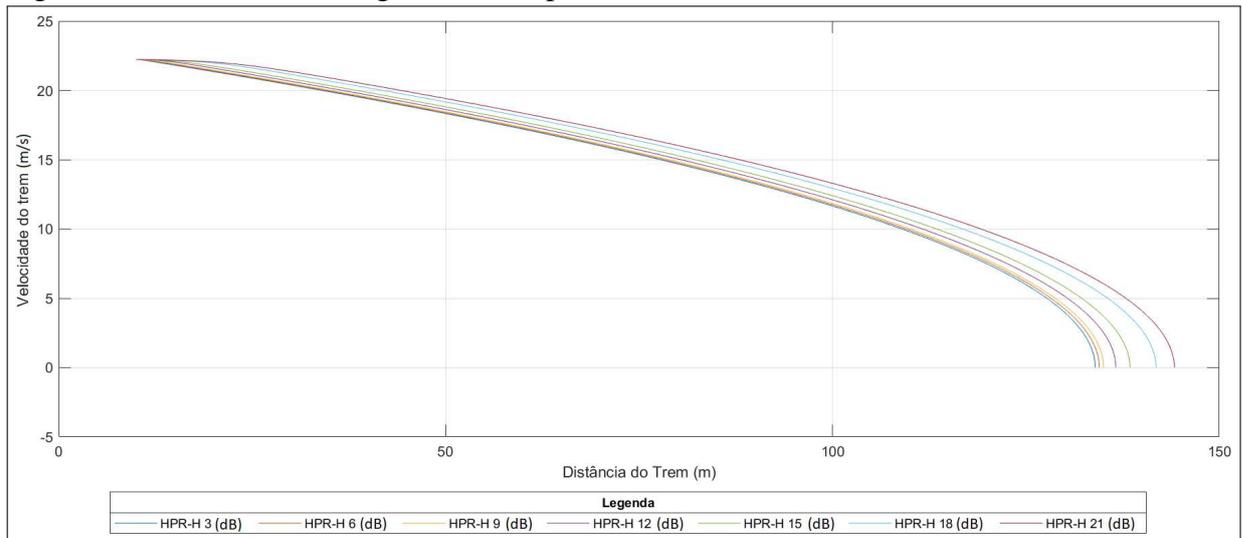
A figura 18 apresenta a frenagem do trem para o algoritmo. Foi observado que o aumento no nível de histerese ocasiona o deslocamento da curva de frenagem para a direita. Este comportamento é provocado pelo aumento da discrepância necessária entre os níveis de potência percebidos pelo AP conectado e pelo candidato para iniciar o HO. Em outras palavras, ao utilizar um valor de histerese, o trem não realiza o *handover* imediatamente ao detectar que o sinal de outro AP está mais forte. Em vez disso, ele espera para verificar se o sinal continua a ser forte depois de uma redução pré-estabelecida da potência de recepção. Dessa forma, isso ajuda a evitar *handovers* desnecessários que podem ser causados por flutuações momentâneas no sinal.

## 4.3 Resultados do HOLO

O algoritmo *Handover* Baseado em Localização (HOLO) utilizou o limiar de distância entre o trem e o próximo AP. A variação do limiar de distância vai de **1 m** a **31 m**, que são valores razoavelmente próximos do AP, desse modo, o trem pode passar muito tempo conectado a um AP com potência de recepção baixo até fazer *handover*.

O HOLO foi desconsiderado da análise geral dos algoritmos implementados neste

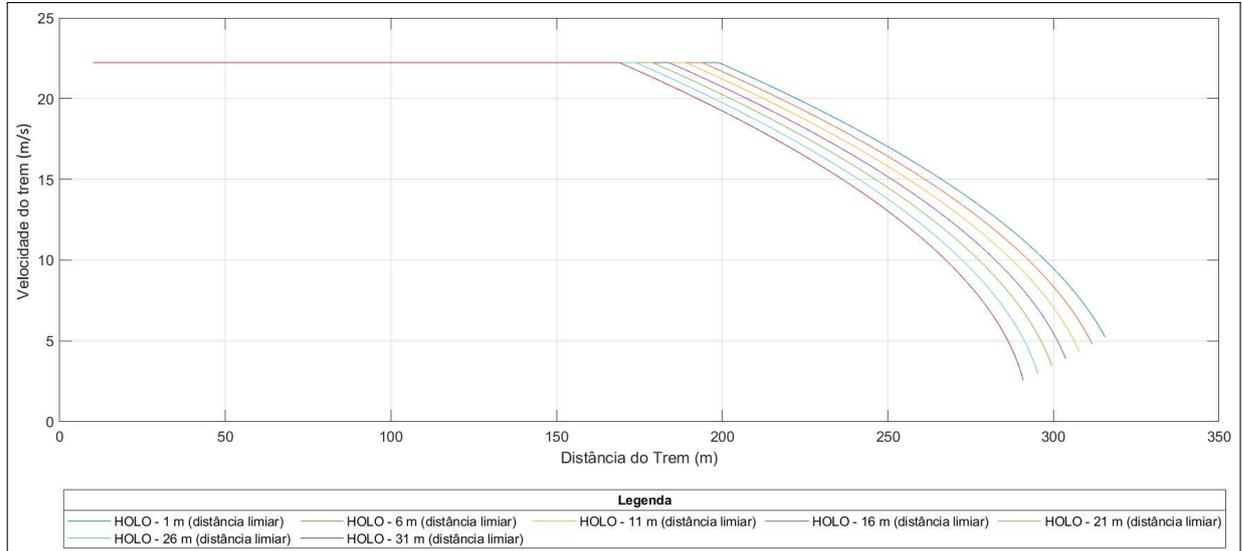
Figura 18 – Gráfico de frenagem do trem para o HPR-H.



Fonte: elaborada pelo autor.

trabalho uma vez que sua eficiência não foi suficiente para que o trem parasse dentro do intervalo de tempo da simulação. A Figura 19 contém o gráfico de frenagem para o algoritmo HOLO. Nela é possível verificar que o trem não chegou a parar para nenhum dos limiares de distância.

Figura 19 – Gráfico de frenagem do trem para o HOLO.



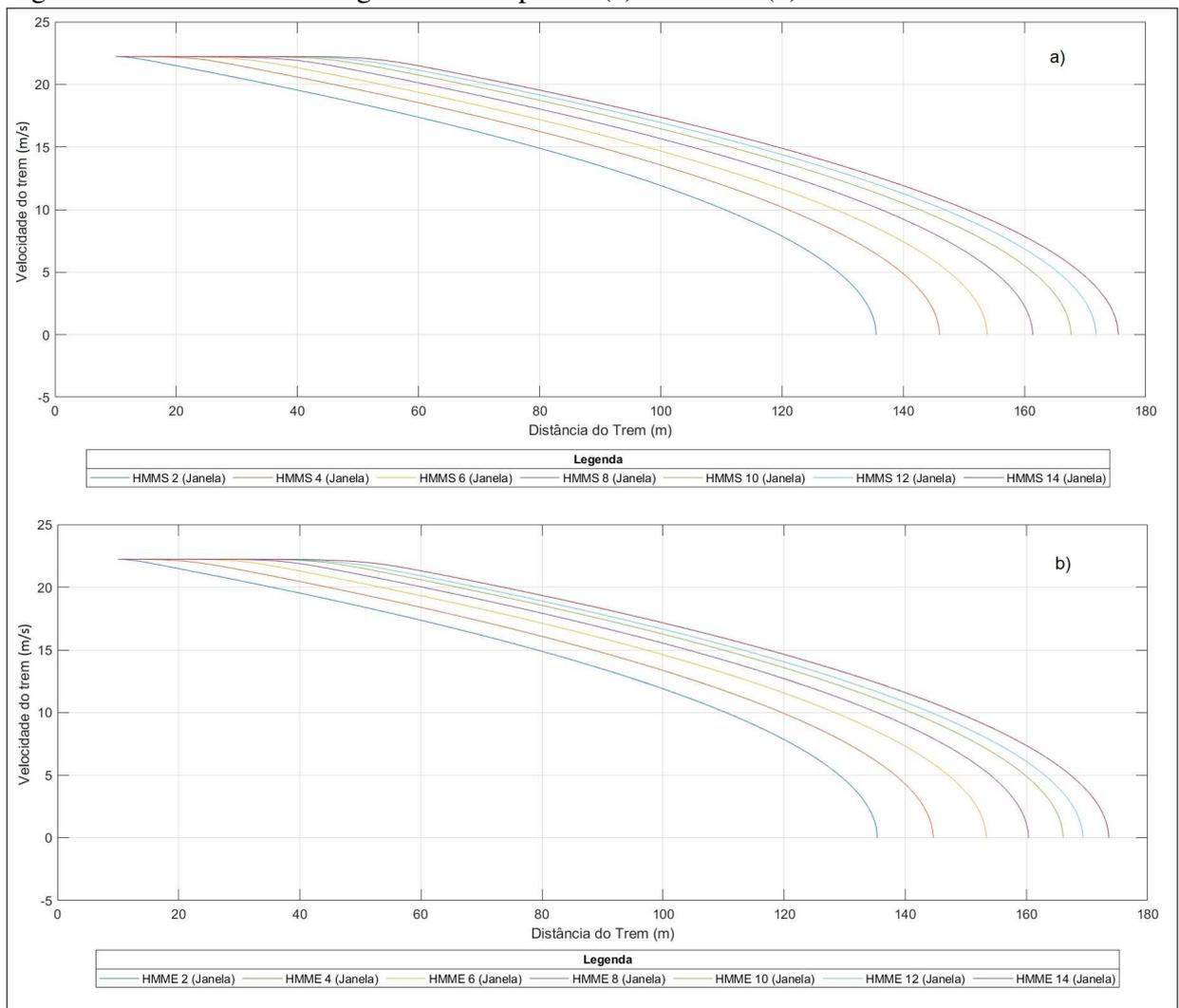
Fonte: elaborada pelo autor.

Apesar de ter sido desconsiderado da análise geral, o HOLO não deve ser descartado em estudos futuros, uma vez que ajustes nos limiares de distância ou no tempo de amostragem pode trazer resultados satisfatórios para este algoritmo.

#### 4.4 Resultados do HMM.

No que se refere ao HMM foram usadas janelas para calcular a média móvel da potência de recepção, de modo a suavizar o sinal recebido para, assim, realizar o *handover* no momento em que a potência de recepção do AP atualmente conectado fica abaixo da potência de recepção de outro AP. Os valores utilizados de janela de média móvel foram de **2** a **14**, conforme tabela 3, tanto para o HMMS quanto para o HMME. Analisando os gráficos de frenagem presentes na Figura 20, é possível notar que o comportamento das curvas para o HMMS (a) e o HMME (b) possuem uma sutil diferença, na qual o HMME alcançou um *headway* sutilmente inferior ao HMMS. É importante destacar que o uso de uma janela de média móvel mais ampla resulta em um maior avanço sobre o *headway*. Isso ocorre porque é necessário mais dados para calcular a média móvel, o que, por sua vez, suaviza ainda mais o sinal de potência.

Figura 20 – Gráfico de frenagem do trem para o (a) HMMS e (b) HMME.



Fonte: elaborada pelo autor.

#### 4.5 Comparação dos resultados

Analisando o conjunto de resultados para todos os algoritmos implementados apresentados na figura 21, com exceção do HOLO que não atingiu resultados necessários para ser comparado com os demais algoritmos, é possível visualizar o comportamento de cada algoritmo em função do avanço sobre o *headway* e do atraso de comunicação devido ao *handoff*.

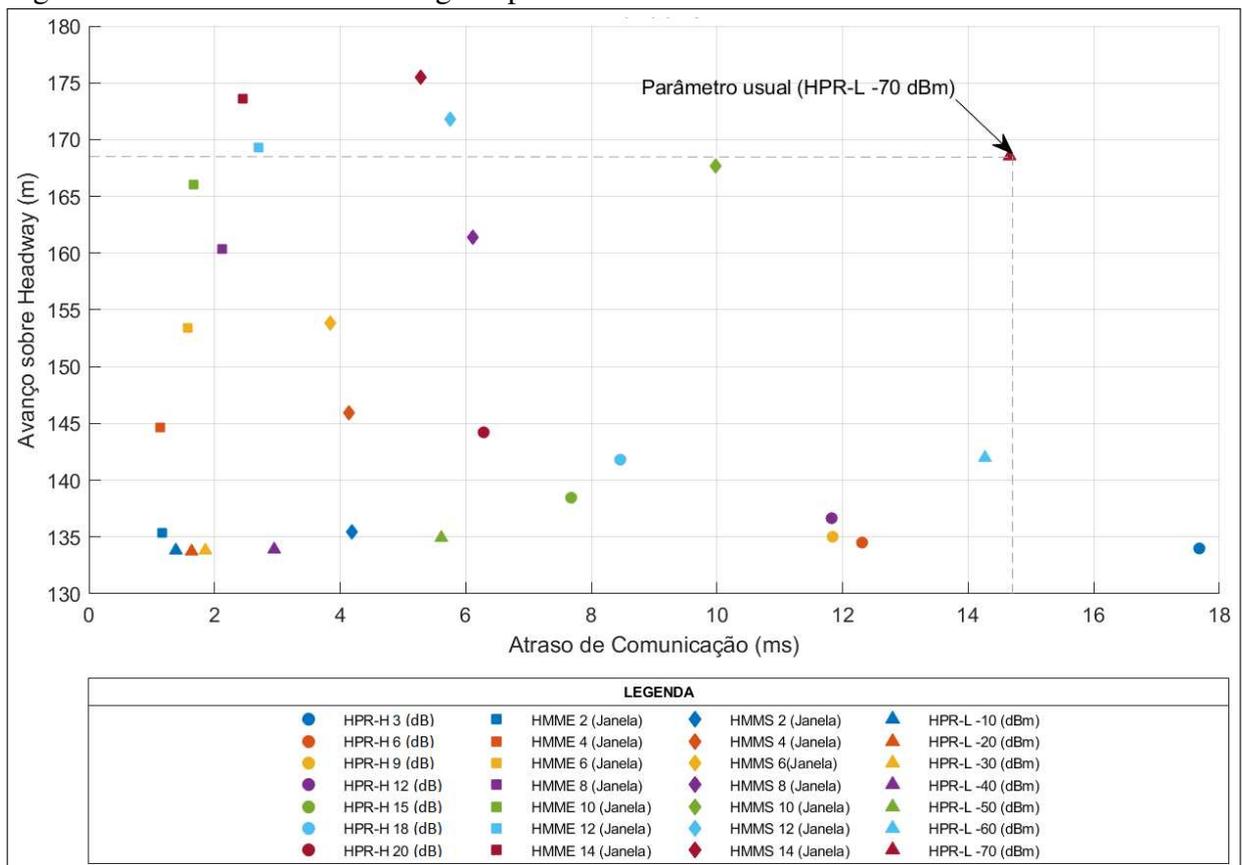
A figura 21 proporciona uma análise comparativa dos algoritmos, destacando o avanço sobre o *headway* e o atraso na comunicação para cada parâmetro específico de cada algoritmo. No HPR-L, observa-se uma tendência de que quanto menor o valor do limiar, maior é o avanço sobre o *headway*. Isso ocorre porque, com limiares mais baixos, a probabilidade de ocorrer um *handover* mais tardio aumenta. Por exemplo, no HPR-L-10, notou-se que as flutuações na potência proveniente da AP candidata superaram a potência da AP conectada a um nível próximo de -10 dBm. Isso resultou em *handovers* ocorrendo durante essas flutuações, reduzindo o atraso de comunicação devido à boa qualidade do canal da AP candidata. No contexto do HPR-L-70, observou-se que o *handover* ocorria quando a potência da AP conectada estava abaixo de -70 dBm. Nessa condição, qualquer nível ligeiramente superior a -70 dBm da AP candidata iniciava o *handover*, ou seja, o *handover* era iniciado em níveis bastante baixos de potência tanto da AP atual quanto da candidata, contribuindo assim para o aumento do atraso na comunicação.

No cenário do HPR-H, evidenciou-se que um aumento no valor da histerese implica um aumento no avanço no *headway*. Em termos de atraso na comunicação, constatou-se que um valor mais elevado de histerese está associado a um menor atraso. Vale destacar que, para o HPR-H 3, é imperativo que a potência da AP candidata seja superior em 3 dB à potência da AP conectada. Essa condição foi atendida no início da jornada do trem, onde reduções súbitas de potência da AP conectada possibilitaram a realização do *handover*. No entanto, é importante notar que, mesmo superando os 3 dB em relação à AP conectada, a potência da AP candidata estava em um nível baixo, resultando em um aumento do atraso de comunicação. Por outro lado, no cenário do HPR-H 20, observou-se uma redução significativa do impacto dessas flutuações, culminando em um *handover* mais tardio e com um nível de potência da AP candidata mais satisfatório, consequentemente diminuindo o atraso na comunicação.

No contexto das HMM, tanto HMMS quanto HMME, percebeu-se que o aumento da janela resulta em um notável avanço no *headway*. Essa tendência se deve, sobretudo, ao fato de que uma janela mais ampla demanda uma maior quantidade de dados para realizar a

média móvel, retardando, por conseguinte, o instante do *handover*. Em relação ao atraso na comunicação, destaca-se que o HMME apresentou valores mais reduzidos em comparação com o HMMS em todas as janelas analisadas. Vale ressaltar que, entre os algoritmos submetidos à análise, os HMM exibiram uma menor variação no atraso. Tal efeito pode ser atribuído à capacidade de atenuar as influências das flutuações, buscando efetuar o *handover* em momentos de média que demonstra uma persistência mais acentuada diante das variações.

Figura 21 – Gráfico de resultado geral para cada valor de métrica.



Fonte: elaborada pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho foi investigado como o mecanismo de *handover* pode influenciar na operabilidade segura em um sistema CBTC mediante situação de um comando de frenagem no momento de *handover* e qual o desempenho de um algoritmo de *handover* baseado em média móvel em comparação a outros tipos de *handover*.

Esta investigação se baseou na utilização dos quatro diferentes tipos de HO: HPR-L; HPR-H; HOLO e HMM. Este último ainda subdividido em HMMS e HMME.

Para o caso estudado, o algoritmo de decisão de *handover* se mostrou influente no avanço do trem sobre o *headway*, que no CBTC equivale a distância segura de frenagem, conforme elucidado pela literatura.

O algoritmo HMM funcionou como um filtro para o sinal de recepção, reduzindo flutuações no sinal e podendo, assim, realizar o *handover* no momento em que o sinal de recepção do AP conectado se torna menor que o sinal de recepção do próximo AP, minimizando as rápidas flutuações causadas ao sinal emitido.

As métricas fundamentais utilizadas na análise de desempenho dos algoritmos foram o atraso de comunicação devido ao *handover* e o avanço do trem sobre o *headway*. Estes parâmetros foram observados com o propósito de classificar os algoritmos e as métricas variáveis utilizadas por cada algoritmo e, assim, entender o comportamento dos algoritmos individualmente e em comparação aos outros.

O HMME apresentou o melhor resultado dentre os demais uma vez que apresentou menores valores de atraso de comunicação. E para uma janela de média móvel de valor 2, obteve também o menor avanço sobre o *headway*. Isto, claro, eliminando os valores de HPR-L de **-10 dBm** a **-30 dBm** que representam um projeto de alto custo para o sistema CBTC.

Vale ressaltar que as limitações do ambiente de simulação devem ser consideradas, uma vez que o ambiente real possui muitas outras variáveis influentes no CBTC e no DCS. Desse modo, é sempre interessante buscar utilizar parâmetros que aproximem cada vez mais o simulador do sistema real, bem como implementar o algoritmo criado em dispositivos utilizados pelo DCS para uma análise de desempenho em um ambiente real.

Os algoritmos utilizados neste trabalho também podem ser investigados de maneira mais ampla utilizando mais valores de variáveis ou intervalos menores entre estes valores, e podem ser reutilizados em outros cenários envolvendo sistemas CBTC ou outros sistemas de comunicação móvel, em especial os que envolvam altas velocidades de deslocamento. Outras

métricas também podem ser observadas para um estudo mais abrangente da eficiência do algoritmo. Como a BER, que mede a proporção de bits transmitidos de forma incorreta, e a *Quality of Experience* (QoE), que avalia a satisfação do usuário final com o serviço oferecido. A análise dessas métricas pode fornecer uma perspectiva mais ampla e precisa da performance do sistema. Além disso, outras técnicas de decisão de *handoff* devem ser investigadas sempre considerando os indicadores de eficiência não só para o sistema de comunicação sem fio, mas também para o sistema CBTC de modo geral.

Em síntese, foi possível obter uma visão abrangente de diversas estratégias de HO implementadas nos sistemas CBTC. O HPR-L desempenha um papel crucial no desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas de controle de trens baseados em comunicação. Este estudo destaca que mudanças simples no sistema de comunicação, como a técnica de decisão de *handover*, podem gerar impactos significativos no sistema CBTC. Dessa forma, abre-se espaço para novas pesquisas e investigações que visem aprimorar a eficiência do DCS no contexto do CBTC.

Vale destacar que o HMM é um algoritmo raramente abordado pela literatura e seus resultados neste trabalho demonstram que devem ser estudada mais a fundo esta técnica de decisão de *handover*, além de evidenciar que outras técnicas também devem ser estudadas em seus variados contextos de aplicação.

## REFERÊNCIAS

- AI, B.; MOLISCH, A. F.; RUPP, M.; ZHONG, Z.-D. 5g key technologies for smart railways. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 108, n. 6, p. 856–893, 2020.
- ALGHAMDI, T. M. Throughput analysis of ieee wlan “802.11 ac” under wep, wpa, and wpa2 security protocols. In: . [S. l.: s. n.], 2019.
- ALI, A. M.; DHIMISH, M.; GLOVER, I. Wlan protocol and network architecture identification for service mix applications. **International Journal of Advance Computational Engineering and Networking (IJACEN)**, York, 2020.
- ANKER, P. From spectrum management to spectrum governance. **Telecommunications Policy**, Elsevier, v. 41, n. 5-6, p. 486–497, 2017.
- ANWAR, W.; FRANCHI, N.; FETTWEIS, G. Physical layer evaluation of v2x communications technologies: 5g nr-v2x, lte-v2x, ieee 802.11 bd, and ieee 802.11 p. In: IEEE. **2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)**. [S. l.], 2019. p. 1–7.
- APAVATJRUT, A.; KAMDEE, S. On optimizing wifi rssi and channel assignment using genetic algorithm for wifi tuning. **ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications**, 2021.
- ATILGAN, C.; KAYMAKÇI, Ö. T.; MUMCU, T. V. Haberleşme tabanlı tren kontrolünün (cbtc) otomatik tren korumasına (atp) ilişkin dağıtılmış-hiyerarşik kontrol yaklaşımı. **Demiryolu Mühendisliği**, Demiryolu Mühendisleri Derneği, n. 17, p. 66–81, 2023.
- AVELLEDA, S. H. P. Sao paulo metro line 4-yellow. the first driverless line in latin america. In: **CONGRESS-DUBAI 2011**. [S. l.: s. n.], 2011.
- AZIMINEJAD, A.; EPELBAUM, G. Trackside loss analysis: An application in a radio-frequency chain of a communication-based train control system. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, IEEE, v. 13, n. 1, p. 105–113, 2018.
- BAKULIN, M.; KREYNDELIN, V.; PANKRATOV, D. Y. Application of mimo technology in modern wireless communication systems of different generations. **T-Comm**, v. 15, n. 4, p. 4–12, 2021.
- BALBI, H. D.; PASSOS, D. G.; CARRANO, R. C.; MAGALHÃES, L. C. S.; ALBUQUERQUE, C. V. N. A case study of association instability in dense ieee 802.11 networks. **2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)**, p. 1–6, 2019.
- BALFAQIH, M.; NORDIN, R.; BALFAQIH, Z. A.; HASEEB, S.; HASHIM, A. H. A. An evaluation of ieee 802.11 mac layer handoff process in capwap centralized wlan. **Journal of theoretical and applied information technology**, v. 71, p. 468–479, 2015.
- BHARGAVA, V.; RAGHAVA, N. An enhancement for ieee 802.11 sta power saving and access point memory management mechanism. **Electronics**, 2022.
- BIANCHI, G.; TINNIRELLO, I. Analysis of priority mechanisms based on differentiated inter frame spacing in csma-ca. **2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No.03CH37484)**, v. 3, p. 1401–1405 Vol.3, 2003.

- BOUJNOUI, A.; BARBOSA, L. O.; HAQIQ, A. Performance evaluation and tuning of an iee 802.11 audio video multicast collision prevention mechanism. **Wireless Networks**, v. 26, p. 5047 – 5061, 2020.
- BOYNUKALIN, S.; AÇIKBAŞ, S.; SÖYLEMEZ, M. T. Effect of guaranteed emergency braking rate and gradient on turnback headway time in metro lines. In: IEEE. **2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)**. [S. l.], 2021. p. 52–56.
- BRENNNA, M.; FOIADELLI, F.; ZANINELLI, D. **Electrical railway transportation systems**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2018.
- CARDONA, N.; BOTERO, J. F.; OSPINA, D. Handoff management for smart access points in iee 802.11 networks. **2017 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)**, p. 1–6, 2017.
- CARVALHO, G. L. L.; SILVEIRA, J. A. R. da. Trilhando o contexto do patrimônio ferroviário brasileiro: Um panorama sobre situação, memória e gestão. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 15, n. 36, 2022.
- CARVALHO, M. M.; GARCIA-LUNA-ACEVES, J. Carrier-sense multiple access with transmission acquisition and channel-access prioritization. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 67, n. 12, p. 8394–8407, 2019.
- CHAITANYA, K. K.; SRAVAN, K.; RAMANJANEYULU, B. S. Role of wireless communications in railway systems: A global perspective. In: SPRINGER. **International conference on Computer Networks, Big data and IoT**. [S. l.], 2019. p. 704–711.
- CHATZIMISIOS, P.; BOUCOUVALAS, A. C.; VITSAS, V. Iee 802.11 packet delay-a finite retry limit analysis. In: IEEE. **GLOBECOM'03. IEEE global telecommunications conference (IEEE Cat. No. 03CH37489)**. [S. l.], 2003. v. 2, p. 950–954.
- CHEN, C.; CHENG, X. Overview of ofdma and mimo systems. **Wireless Networks**, 2019.
- CHEN, T.; WANG, H.; NING, B.; ZHANG, Y.; TANG, T.; LI, K. Architecture design of a novel train-centric cbtc system. In: IEEE. **2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)**. [S. l.], 2018. p. 1–5.
- CHO, J.-H.; JEON, J. A study on improvement of mechanism for secure handoff in wireless networks. **The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences**, v. 30, p. 1047–1055, 2005.
- CHY, J. Application of virtualization to implement the automatic train supervision system of a communications based train control system. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME/IEEE Joint Rail Conference**. [S. l.], 2020. v. 83587, p. V001T11A005.
- CHY, J.; DIEMUNSCH, K.; BANKS, B. Application of software tools to implement a systems engineering process for specification development in a brownfield train control project. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME/IEEE Joint Rail Conference**. [S. l.], 2019. v. 58523, p. V001T03A004.
- CRUZ, C. M. S.; ARAÚJO, A. dos S.; CRUZ, K. A. da; BARRETO, J. de M.; GERIBELLO, R. S.; AMARANTE, M. dos S. Modais de transporte no brasil. **Revista Pesquisa e Ação**, v. 5, n. 2, p. 1–27, 2019.

DANDOUSH, A.; TUHOLUKOVA, A.; ALOUF, S.; NEGLIA, G.; SIMOENS, S.; DEROUET, P.; DERSIN, P. ns-3 based framework for simulating communication based train control (cbtc) systems. In: **Proceedings of the 2016 Workshop on ns-3**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 116–123.

DIMITROVA, E.; TOMOV, S. Algorithm for positioning of metro trains under communications-based train control. In: IEEE. **2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BULEF)**. [S. l.], 2020. p. 1–4.

FAROOQ, J.; BRO, L.; KARSTENSEN, R. T.; SOLER, J. A multi-radio, multi-hop ad-hoc radio communication network for communications-based train control (cbtc): Introducing frequency separation for train-to-trackside communication. In: IEEE. **2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**. [S. l.], 2018. p. 1–7.

FAROOQ, J.; SOLER, J. Radio communication for communications-based train control (cbtc): A tutorial and survey. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 19, n. 3, p. 1377–1402, 2017.

FETTOUH, A.; FAZIKI, A. E.; KAMOUN, N. E. Improving horizontal handover performance of real time applications over homogeneous wireless networks. In: IEEE. **2012 6th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)**. [S. l.], 2012. p. 619–623.

FITZMAURICE, M. Wayside communications: Cbtc data communications subsystems. **IEEE vehicular technology magazine**, IEEE, v. 8, n. 3, p. 73–80, 2013.

FOSU, P. Does railway lines investments matter for economic growth? **Economics**, v. 9, n. 1, p. 11–24, 2021.

GAO, P.; LIU, C.; DONG, H.; ZHENG, W. A dynamic fault tree based cbtc onboard atp system safety analysis method. In: IEEE. **2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**. [S. l.], 2020. p. 1–7.

GHADERI, M. **Impact of Mobility and Wireless Channel on the Performance of Wireless Networks**. Tese (Doutorado) – University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10012/2935>.

GOPSTEIN, A.; NGUYEN, C.; O’FALLON, C.; HASTINGS, N.; WOLLMAN, D. *et al.* **NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 4.0**. [S. l.]: Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology . . . , 2021.

GUEDES, R. S.; SOUSA, C. A. de; PEREIRA, S. L. Simulation study of inverter substations to improve energy efficiency in dc traction for subway systems. **Available at SSRN 4194375**, 2022.

GUNANTARA, N.; SUDIARTA, P. K.; PRASETYA, A. A. I.; DHARMA, A.; ANTARA, I. N. G. Measurements of the received signal level and service coverage area at the ieee 802.11 access point in the building. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 989, 2018.

HRAD, J.; VOJTECH, L.; CIHLAR, M.; STASA, P.; NERUDA, M.; BENES, F.; SVUB, J. Indoor positioning system based on fuzzy logic and wlan infrastructure. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 16, p. 4490, 2020.

HUANG, C.; HUANG, Y. Research and design of data communication subsystem of urban rail transit cbtc system. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, Springer, v. 12, n. 4, p. 629–639, 2021.

ISLAM, G. Z. The emergence of wireless lans (wlans) brings the benefits of user mobility and flexible network deployment in local area computing. with mobility, a network client can migrate between different physical locations within the lan. In: . [S. l.: s. n.], 2016.

JIANG, H.; ZHAO, H.; ZHAO, B. A novel handover scheme in wireless lan in cbtc system. In: **IEEE. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics**. [S. l.], 2011. p. 473–477.

JIAO, Y.; WU, J.; TAN, Q.; TAN, Z. fu; WANG, G. An optimization model and modified harmony search algorithm for microgrid planning with ess. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, v. 2017, p. 1–11, 2017.

JIN, S.; CHOI, S. A seamless handoff with multiple radios in ieee 802.11 wlans. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 63, n. 3, p. 1408–1418, 2013.

KARABULUT, M. A.; SHAH, A. S.; ILHAN, H. The performance of the ieee 802.11 dcf for different contention window in vanets. In: **IEEE. 2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)**. [S. l.], 2018. p. 1–4.

KAREDAL, J.; CZINK, N.; PAIER, A.; TUFVESSON, F.; MOLISCH, A. F. Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications. **IEEE transactions on vehicular technology**, IEEE, v. 60, n. 1, p. 323–328, 2010.

KAUR, A.; AGGARWAL, M.; GURUDAS, B. Analysis of various security issues in cloud computing using wlan protocols. In: . [S. l.: s. n.], 2013.

KIM, S.; CHA, J.; MA, J. Interference-aware channel assignments with seamless multi-channel monitoring in wireless mesh networks. In: **IEEE. 2009 IEEE International Conference on Communications**. [S. l.], 2009. p. 1–6.

KINOL, A. M. J.; NISHA, A. S. A.; MARSHIANA, D.; KRISHNAMOORTHY, N. Hybrid multi beamforming and multi-user detection technique for mu mimo system. **Wireless Personal Communications**, Springer, v. 124, n. 4, p. 3375–3385, 2022.

KO, H.; LEE, J.; PACK, S. MALM: mobility-aware location management scheme in femto/macrocell networks. **IEEE Trans. Mob. Comput.**, v. 16, n. 11, p. 3115–3125, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TMC.2017.2690287>.

LAMOLA, M. M.; JOHNSON, D. L.; LYSKO, A.; DENSMORE, M.; MALIWATU, R. Performance analysis of dual 5 ghz wifi and uhf tv white space network links. **2019 IEEE 2nd Wireless Africa Conference (WAC)**, p. 1–6, 2019.

LAU, L.-C.; LIN, C.-C.; WANG, S.-Y. An ieee 802.11 cognitive radio mac protocol with dynamic bandwidth allocation capabilities. **2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**, p. 1422–1426, 2012.

LEE, T.-H.; HSIEH, M.-C.; CHANG, L.-H.; CHIANG, H.-S.; WEN, C.-H.; YAP, K. M. Avoiding collisions between ieee 802.11 and ieee 802.15.4 using coexistence inter-frame space. In: **EMC/HumanCom**. [S. l.: s. n.], 2013.

LELES, R. D. C.; RODRIGUES, J. J.; WOUNGANG, I. W.; RABEL, R. A.; FURTADO, V. Railways networks-challenges for iot underground wireless communications. In: **IEEE. 2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)**. [S. l.], 2018. p. 1–6.

- LEU, G.; TANG, J. Comparison of infrastructure and adhoc modes in survivable networks enabled by evolutionary swarms. In: SPRINGER. **Advances in Swarm Intelligence: 10th International Conference, ICSI 2019, Chiang Mai, Thailand, July 26–30, 2019, Proceedings, Part I 10**. [S. l.], 2019. p. 80–89.
- LIANG, H.; ZHAO, H.; WANG, S.; ZHANG, Y. Lte-u based train to train communication system in cbtc: system desin and reliability analysis. **Wireless Communications and Mobile Computing**, Hindawi Limited, v. 2020, p. 1–14, 2020.
- LIU, L.; QIAO, L.; LIU, L.; GENG, Z.; SHI, Z.; FANG, G. Applying stray inductance model to study turn-off current in multi-turn loop of shallow transient electromagnetic systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 35, n. 2, p. 1711–1720, 2019.
- MAHMOOD, A.; EXEL, R.; TRSEK, H.; SAUTER, T. Clock synchronization over ieee 802.11—a survey of methodologies and protocols. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, p. 907–922, 2017.
- MOHAMMADANI, K. H.; BUTT, R. A.; MEMON, K. A.; HASSAN, F.; MAJEED, A.; KUMAR, R. Highest cost first-based qos mapping scheme for fiber wireless architecture. **Photonics**, v. 7, p. 114, 2020.
- NAGARAJ, S. V.; SARKAR, M. Preliminary results on overlaid cooperation channels between nearby ieee 802.11 access points. **2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)**, p. 254–256, 2022.
- NASSAR, M.; LIN, X. E.; EVANS, B. L. Stochastic modeling of microwave oven interference in wlans. **2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)**, p. 1–6, 2011.
- NEGUS, K. J.; PETRICK, A. History of wireless local area networks (wlans) in the unlicensed bands. **info**, Emerald Group Publishing Limited, v. 11, n. 5, p. 36–56, 2009.
- NOZDRIN, V. Empirical techno-economic analysis of spectrum auctions. TechRxiv, 2022.
- PATRICIELLO, N.; LAGÉN, S.; BOJOVIĆ, B.; GIUPPONI, L. Nr-u and ieee 802.11 technologies coexistence in unlicensed mmwave spectrum: Models and evaluation. **IEEE Access**, v. 8, p. 71254–71271, 2020.
- POULUS, R.; KEMPEN, E. V.; MEIJEREN, J. V. Automatic train operation. driving the future of rail transport. TNO, 2018.
- PRASAD, R.; PRASAD, N. **802.11 WLANs and IP Networking: Security, QoS, and Mobility.**—USA MA Norwood: Artech House. [S. l.]: Inc, 2005.
- QI, E. H. **Distributed cooperative framework and algorithms for wireless network performance optimization**. Tese (Doutorado), 2007.
- SAEED, R. A. Handover in a mobile wireless communication network—a review phase. **International Journal of Computer Communication and Informatics**, v. 1, n. 1, p. 6–13, 2019.
- SIDDAVATAM, I. Achieving improved performance at access point in wlan infrastructure mode. **International Journal on Computer Science and Engineering**, Engg Journals Publications, v. 3, n. 7, p. 2869–2875, 2011.

SILVA, M. A. Análise de propagação de redes wlan em ambientes indoor. **Trabalho de conclusão de curso, IFSC**, 2018.

SILVANI, X.; AGHA, K. A.; MARTIN, S.; GOIRAND, D.; BULTÉ, N. Ieee 802.11 wireless sensor network for hazard monitoring and mitigation. **Natural Hazards**, v. 114, p. 3545–3574, 2022.

SONG, H.; LIU, H.; SCHNIEDER, E. A train-centric communication-based new movement authority proposal for etcs-2. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 20, n. 6, p. 2328–2338, 2018.

SPIEZIO, M.; RICCIO, A.; PEZZULLO, F.; CARCATELLA, C.; EMPIREO, M.; SALEMME, A.; MONTAGNA, A.; D’ALTERIO, L.; CASTALDI, V.; DONADIO, P. Fast radio technologies for uninterrupted train to track side communications. **EU, Mar**, v. 27, 2018.

TAKATA, T.; ASANO, A.; NAKAMURA, H. Interlocking system for cbtc (communication based train control) system. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 7, n. 4, 2019.

TERENCE, L.; BASIRI, A. Signal attenuation modelling in wlan positioning. In: . [S. l.: s. n.], 2019.

THEODORE, S. R. *et al.* **Wireless communications: principles and practice**. [S. l.]: Upper Saddle River. Prentice Hall, 2002.

THING, V. L. L. Ieee 802.11 network anomaly detection and attack classification: A deep learning approach. **2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**, p. 1–6, 2017.

TU, H. Research on the application of cloud computing technology in urban rail transit. In: **2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)**. [S. l.: s. n.], 2020. p. 828–831.

VIEIRA, J. C.; OLIVEIRA, L. A. Ferrovia norte-sul: impactos no desenvolvimento de açailândia e porto nacional. **DRd-Desenvolvimento Regional em debate**, v. 10, p. 609–633, 2020.

WANG, J.; ZHONG, X.; ZHOU, S. Channel allocation algorithm of wi-fi. In: IEEE. **2023 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)**. [S. l.], 2023. p. 677–682.

WANG, X.; LIU, L.; TANG, T.; SUN, W. Enhancing communication-based train control systems through train-to-train communications. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 20, n. 4, p. 1544–1561, 2018.

WANG, X.; XIONG, H.; WANG, X. Stochastic game analysis for attack-defense of the cbtc handover process under jamming attacks. In: IEEE. **2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)**. [S. l.], 2019. p. 2515–2515.

WEN, T.; CONSTANTINOU, C.; CHEN, L.; TIAN, Z.; ROBERTS, C. Access point deployment optimization in cbtc data communication system. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 19, n. 6, p. 1985–1995, 2017.

- WEN, T.; CONSTANTINOU, C.; CHEN, L.; LI, Z.; ROBERTS, C. A practical access point deployment optimization strategy in communication-based train control systems. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 20, n. 8, p. 3156–3167, 2018.
- WHITNEY, D. E. Growth patterns of subway/metro systems tracked by degree correlation. **arXiv preprint arXiv:1202.1747**, 2012.
- WU, C.; WANG, Y.; YIN, Z. Realizing railway cognitive radio: A reinforcement base-station multi-agent model. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 20, n. 4, p. 1452–1467, 2018.
- XIAO, Y. Ieee 802.11 n: enhancements for higher throughput in wireless lans. **IEEE Wireless Communications**, IEEE, v. 12, n. 6, p. 82–91, 2005.
- YIN, Y.; GAO, Y.; HEI, X. Performance evaluation of a unified ieee 802.11 dcf model in ns-3. In: **International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques**. [S. l.: s. n.], 2019.
- YOON, B.; LEE, S.; OH, S.; CHOI, M.; LEE, S.; SUNG, D. Enhancement of reliability and availability for lte-r based train control. In: IEEE. **2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)**. [S. l.], 2022. p. 2274–2276.
- YU, H.; LI, S. The function design for the communication-based train control (cbtc) system: How to solve the problems in the underground mine rail transportation? **Applied System Innovation**, MDPI, v. 4, n. 2, p. 31, 2021.
- YU, H.; LI, S.; YU, J. Intelligent monitoring and control system for underground mine rail transportation based on communication-based train control (cbtc) system and ai computing. In: IEEE. **2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)**. [S. l.], 2021. p. 704–707.
- ZHANG, J.; LU, Q.; ZAO, S. Tcas: Train collision avoidance system. In: ATLANTIS PRESS. **2018 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2018)**. [S. l.], 2018. p. 1079–1085.
- ZHANG, S.; LEE, W.-K.; PONG, P. Train detection by magnetic field sensing. **Sensors and Materials**, v. 25, n. 6, p. 423–436, 2013.
- ZHANG, W.; DONG, D.; SHEN, T.; HOU, S. The auxiliary anti-collision scheme of urban rail transit based on css. In: **CICTP 2016**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 1007–1017.
- ZHANG, X. **Advanced parabolic equation-based propagation modeling for train communication systems**. [S. l.]: University of Toronto (Canada), 2018.
- ZHANG, Y. A multilayer ip security protocol for tcp performance enhancement in wireless networks. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 22, p. 767–776, 2004.
- ZHANG, Y.; WANG, X.; YU, Y.; CHU, P.; XU, Y. Design of system-level hot standby redundancy-based signal system. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S. l.], 2021. v. 2010, n. 1, p. 012090.
- ZHAO, R.; WALKE, B. H.; HIERTZ, G. R. An efficient ieee 802.11 ess mesh network supporting quality-of-service. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 24, p. 2005–2017, 2006.

ZHU, L.; YAO, D.; ZHAO, H. Reliability analysis of next-generation cbtc data communication systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 68, n. 3, p. 2024–2034, 2018.

ZHU, L.; YU, F. R.; NING, B. A seamless handoff scheme for train-ground communication systems in cbtc. In: IEEE. **2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference-Fall**. [S. l.], 2010. p. 1–5.

ZHUANG, Q.; ZHU, L.; LIN, S. A gan-bert based fault diagnosis model for cbtc data communication systems using edge-to-edge collaboration training. In: IEEE. **ICC 2022-IEEE International Conference on Communications**. [S. l.], 2022. p. 5076–5081.