



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

**YARA MARIA SANTOS MORAIS**

**CONECTIVIDADE EM SISTEMAS CBTC: ANÁLISE COMPARATIVA DE  
ALGORITMOS DE HANDOVER EM CENÁRIOS DE TRÁFEGO VARIÁVEL**

**SOBRAL**

**2025**

YARA MARIA SANTOS MORAIS

CONECTIVIDADE EM SISTEMAS CBTC: ANÁLISE COMPARATIVA DE ALGORITMOS  
DE HANDOVER EM CENÁRIOS DE TRÁFEGO VARIÁVEL

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

Orientador: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo

SOBRAL

2025

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)

---

- S239c Santos Morais, Yara Maria.  
Conectividade em sistemas CBTC : análise comparativa de algoritmos de handover em cenários de tráfego variável / Yara Maria Santos Morais. – 2025.  
70 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia da Computação, Sobral, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo.
1. CBTC. 2. Handover. 3. Comunicação sem fio. 4. Atraso médio. 5. IEEE 802.11. I. Título.  
CDD 621.39
-

YARA MARIA SANTOS MORAIS

CONECTIVIDADE EM SISTEMAS CBTC: ANÁLISE COMPARATIVA DE ALGORITMOS  
DE HANDOVER EM CENÁRIOS DE TRÁFEGO VARIÁVEL

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

Aprovada em: 10 de Dezembro de 2025

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)

---

Prof. Me. Danilo Fernandes do Nascimento  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus, que sustentou cada passo. À minha família, em especial Anderson, Fernando e Iolanda, por todo amor incondicional. Aos professores e amigos, por me inspirarem e me impulsionarem. Aos familiares que torceram mesmo de longe. E ao meu amor, que foi abrigo e força em todos os momentos.



## AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser minha rocha firme em meio às tempestades, e por me conduzir até aqui com amor e propósito.

À Universidade Federal do Ceará, minha gratidão por todo o conhecimento, desafios e vivências que me moldaram ao longo dessa jornada.

Ao Prof. Dr. Yuri Victor Lima de Melo, minha gratidão mais profunda. Obrigada por ser mais que um guia acadêmico — por sua paciência, dedicação, escuta atenta e apoio constante. Seu olhar cuidadoso, suas palavras firmes e sua confiança foram fundamentais em cada etapa deste trabalho. Levo comigo não apenas os ensinamentos técnicos, mas o exemplo de ética, compromisso e humanidade que vi em você.

Aos professores Dr. Francisco Rafael Marques Lima e Me. Danillo Fernandes do Nascimento, membros da banca examinadora, agradeço imensamente pelas valiosas contribuições, pelo olhar crítico e respeitoso que engrandeceram este trabalho.

E a todos que estiveram por perto — com palavras, silêncio, oração ou presença —, minha mais profunda gratidão.

“Se eu entender a beleza da espera, não terei  
pressa em adiantar os planos de Deus.”

(São João Paulo II)

## RESUMO

A modernização dos sistemas de transportes ferroviários urbanos tem impulsionado a adoção de tecnologias de sinalização baseadas em comunicação sem fio, destacando o Controle de Trem Baseado em Comunicações (CBTC), que utiliza redes *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11 (*Wi-Fi*) para realizar controle dinâmico da operação dos trens. Nesse cenário, o processo de *handover* — responsável pela troca de conexão entre pontos de acesso ao longo da via — representa um aspecto crítico para garantir a continuidade da comunicação trem-terra e a resposta adequada a comandos operacionais. Este trabalho realiza uma análise comparativa de diferentes algoritmos de decisão de *handover* em cenários com variação de tráfego, por meio de simulações em *Matrix Laboratory* (*MATLAB*). Foram analisados os modelos Histerese, RSSI-Limiar, Média Móvel e Média Móvel com *Delay*, considerando a métrica de atraso médio de comunicação. Os resultados evidenciam que o algoritmo de Média Móvel com *Delay* apresentou maior estabilidade e menor atraso, destacando-se como a solução mais adequada para ambientes ferroviários automatizados, enquanto métodos mais simples mostraram limitações em condições de alta carga. O estudo reforça a importância da escolha adequada do algoritmo de *handover* conforme o contexto operacional, contribuindo para a melhoria da eficiência e da segurança em sistemas CBTC modernos.

**Palavras-chave:** CBTC; *Handover*; Comunicação sem fio; Atraso médio; IEEE 802.11; *Wi-Fi*, Simulação.

## ABSTRACT

The modernization of urban railway transport systems has driven the adoption of signaling technologies based on wireless communication, with Communication-Based Train Control (CBTC) standing out as a key solution. CBTC relies on IEEE (*Wi-Fi*) networks to dynamically manage train operations, where the *handover* process — responsible for switching connections between access points along the track — plays a critical role in ensuring continuous train-to-ground communication and timely response to operational commands. This work presents a comparative analysis of different *handover* decision algorithms under varying traffic conditions, through simulations conducted in *MATLAB*. The study evaluates the Hysteresis, RSSI-Threshold, Moving Average, and Moving Average with *Delay* models, considering the average communication delay as the main performance metric. Results show that the Moving Average with *Delay* algorithm achieved greater stability and lower latency, making it the most suitable solution for automated railway environments, while simpler methods exhibited limitations under high load. The findings highlight the importance of selecting the appropriate *handover* algorithm according to the operational context, contributing to improved efficiency and safety in modern CBTC systems.

**Keywords:** CBTC; *Handover*; Wireless communication; Average *Delay*; IEEE 802.11; *Wi-Fi*; Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comunicação de controle CBTC entre trens e infraestrutura . . . . .	18
Figura 2 – Controle por blocos fixos e blocos móveis. . . . .	26
Figura 3 – Arquitetura do sistema CBTC. . . . .	28
Figura 4 – Transição de Conexão em Movimento com Base no <i>Threshold</i> . . . . .	34
Figura 5 – Pontos críticos na execução do cenário simulado. . . . .	40
Figura 6 – Sinal de interesse e interferente usados para cálculo da SINR do trem. . . . .	45
Figura 7 – <i>Handover</i> com margem de Histerese. . . . .	49
Figura 8 – <i>Handover</i> com potência de recepção com limiar. . . . .	50
Figura 9 – <i>Delay</i> Médio de Comunicação para o algoritmo de HPR-H. . . . .	55
Figura 10 – <i>Delay</i> Médio de Comunicação para o algoritmo HPS-L. . . . .	56
Figura 11 – <i>Delay</i> Médio de Comunicação para o algoritmo HMM. . . . .	58
Figura 12 – <i>Delay</i> Médio de Comunicação para o algoritmo HMMD. . . . .	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da simulação. . . . .	47
Tabela 2 – Parâmetros de Configuração dos Algoritmos de <i>handover</i> . . . . .	54
Tabela 3 – <i>Delay</i> médio de comunicação por algoritmo. . . . .	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
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
CBTC	Controle de Trem Baseado em Comunicações
CIR	<i>Carrier-to-Interference Ratio</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DCS	<i>Data Communication System</i>
ERB	Estação Rádio Bases
ERTMS	Sistema Europeu de Gestão do Tráfego Ferroviário
ESS	<i>Extended Service Set</i>
HMM	<i>Handover</i> Baseado em Média Móvel
HMMD	<i>Handover</i> Baseado em Média Móvel com Delay
HO	<i>Handover</i>
HPR-H	<i>Handover</i> Baseado em Potência de Recepção com Histerese
HPS-L	<i>Handover</i> Baseado em Limiar de Potência de Sinal
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MMS	Média Móvel Simples
MRUV	Movimento Retilíneo Uniformemente Variado
OCC	Centros de Controle Operacional
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i>

SINR	<i>Signal to Interference-plus-Noise Ratio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v(t)$	Velocidade instantânea
$v_0$	Velocidade inicial
$a$	Aceleração
$t$	Tempo
$s(t)$	Posição
$s_0$	Posição inicial
$i$	Índice temporal na média
$j$	Instante atual da simulação
$n$	Tamanho da janela de amostragem
$\Sigma$	Operador de somatório
$\alpha$	Fator de suavização
$r$	Taxa de freio de emergência
$C$	Comprimento do vagão
$L$	Largura do vagão
$f$	Frequência
$W$	Largura de banda
$P(t)$	Potência de Transmissão
$N_0$	Densidade espectral de ruído
$k$	Tamanho do pacote
$E_D$	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

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
1.1	<b>Contextualização</b>	17
1.2	<b>Motivação e Escopo da Monografia</b>	19
1.3	<b>Estado da Arte</b>	20
1.4	<b>Objetivo</b>	23
1.5	<b>Estrutura do Trabalho</b>	23
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	25
2.1	<b>Panorama das Comunicações Ferroviárias</b>	25
2.1.1	<i>Introdução à evolução dos sistemas de sinalização ferroviária</i>	25
2.1.2	<i>Conceitos e arquitetura do CBTC</i>	26
2.1.3	<i>Comunicação trem-terra e a importância da conectividade contínua</i>	28
2.2	<b>Redes IEEE 802.11</b>	30
2.2.1	<i>Características técnicas do padrão IEEE 802.11</i>	30
2.2.2	<i>Aplicações em ambientes móveis ferroviários</i>	31
2.2.3	<i>Handover</i>	32
2.3	<b>Qualidade de Serviço e Variação de Carga em Ambientes CBTC</b>	34
2.3.1	<i>Efeitos da densidade de usuários sobre a performance da rede</i>	34
2.3.2	<i>Sensibilidade dos algoritmos de handover ao tráfego dinâmico</i>	35
2.3.3	<i>Avaliação de desempenho em condições críticas de carga</i>	37
3	<b>METODOLOGIA</b>	39
3.1	<b>Modelagem de um Ambiente CBTC Controlado</b>	39
3.2	<b>Estrutura de Comunicação entre Trem e Infraestrutura</b>	41
3.2.1	<i>Modelagem do canal de comunicação sem fio</i>	42
3.2.2	<i>Perda de percurso</i>	42
3.2.3	<i>Sombreamento</i>	43
3.2.4	<i>Desvanecimento de pequena escala</i>	43
3.2.5	<i>Cálculo da SINR</i>	44
3.2.6	<i>Atraso médio de comunicação</i>	45
3.3	<b>Ambiente de Simulação e Estratégia Computacional</b>	46
3.4	<b>Técnicas de Handover Avaliadas</b>	47

3.4.1	<i>Handover Baseado em Potência de Recepção com Histerese (HPR-H)</i> . . .	48
3.4.2	<i>Handover Baseado em Limiar de Potência de Sinal (HPS-L)</i> . . . . .	49
3.4.3	<i>Handover Baseado em Média Móvel (HMM)</i> . . . . .	50
3.4.4	<i>Handover Baseado em Média Móvel com Delay (HMMD)</i> . . . . .	52
4	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	54
4.1	<b>Resultados para o HPR-H</b> . . . . .	54
4.2	<b>Resultados para o HPS-L</b> . . . . .	56
4.3	<b>Resultados para o HMM</b> . . . . .	57
4.4	<b>Resultados para o HMMD</b> . . . . .	59
4.5	<b>Comparação de Resultados</b> . . . . .	60
5	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	64
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	66

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Nas últimas décadas, o crescimento acelerado da urbanização e a intensificação da mobilidade nas grandes cidades têm impulsionado a modernização dos sistemas de transporte público, especialmente os modais sobre trilhos. Nesse cenário, os sistemas metroferroviários desempenham papel estratégico na promoção de deslocamentos mais sustentáveis, seguros e eficientes. Para atender às exigências de confiabilidade, pontualidade e capacidade operacional, diversas operadoras ao redor do mundo têm adotado tecnologias avançadas de controle e sinalização, entre as quais se destaca o CBTC (*Communication-Based Train Control*) — um sistema de controle automático de trens baseado em comunicação contínua entre o trem e a via (FAROOQ; SOLER, 2017; NGADIRON *et al.*, 2024).

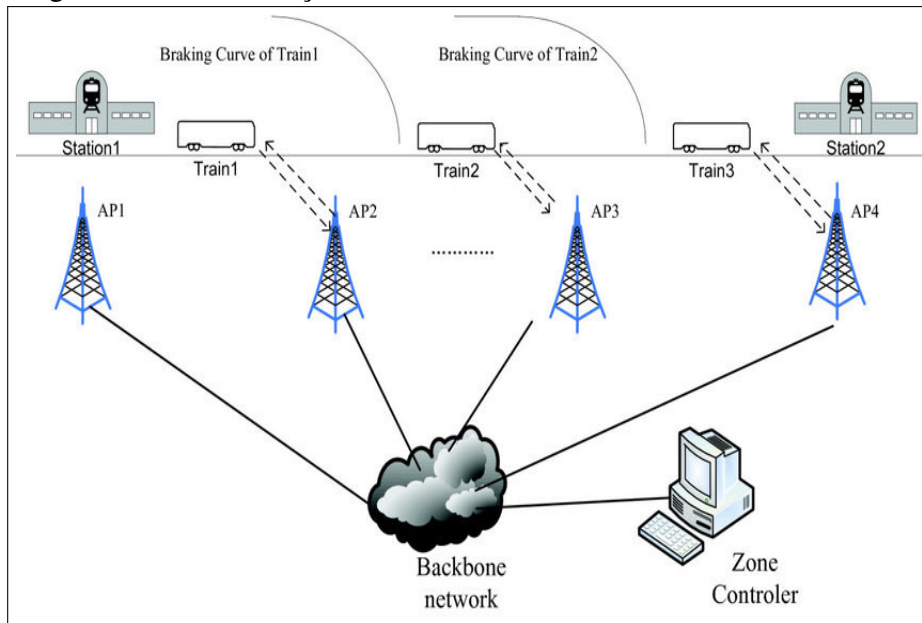
O CBTC representa uma evolução significativa dos sistemas tradicionais de sinalização ferroviária, substituindo os circuitos de via físicos, dessa forma, o CBTC estabelece uma rede de comunicação digital entre os trens, os equipamentos de bordo e as unidades de controle distribuídas ao longo da via. Essa estrutura permite monitoramento preciso e tomada de decisão em tempo real.

Por meio do CBTC, é possível reduzir a distância entre os trens (*headway*), aumentar a frequência de operação e garantir maior precisão no controle de velocidade e posicionamento dos veículos (WHITNEY, 2012; FAROOQ; SOLER, 2017). Em cidades com alta densidade populacional e demandas crescentes por transporte de massa, como São Paulo, Paris, Tóquio e Seul, a adoção desse tipo de sistema tem sido essencial para manter a fluidez e segurança do serviço ferroviário. Apenas na cidade de São Paulo, por exemplo, a Linha Azul do metrô transporta diariamente cerca de 1,2 milhão de pessoas, dentro de um sistema que movimenta mais de 4,2 milhões de passageiros por dia útil (CBTU, 2021).

A Figura 1 ilustra o funcionamento do sistema CBTC, empregado para o controle automatizado de trens. No exemplo apresentado, três trens trafegam entre duas estações (*Station1* e *Station2*), cada um com sua respectiva curva de frenagem, que define a distância segura em relação ao trem à frente. A comunicação entre os trens e o centro de controle é realizada por meio de pontos de acesso *Wi-Fi* (AP1 a AP4), estrategicamente distribuídos ao longo da via. Esses pontos se conectam à rede principal "*backbone network*", responsável por encaminhar os dados ao *Zone Controller*. Esse controlador central recebe informações em tempo real, como

posição e velocidade dos trens, e emite comandos de controle para garantir a operação segura e eficiente, mesmo com pequenos intervalos entre os trens, evitando colisões e otimizando o fluxo ferroviário.

Figura 1 – Comunicação de controle CBTC entre trens e infraestrutura



Fonte: (ZHU *et al.*, 2012a).

O sucesso operacional do CBTC depende fortemente do subsistema de comunicação denominado *Data Communication System* (DCS), que é responsável pela troca de informações entre o trem e os equipamentos de controle fixos ao longo da via. O DCS emprega tecnologias de comunicação sem fio — predominantemente o padrão IEEE 802.11 *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) — para transmitir dados em tempo real sobre posição, velocidade, frenagem e autorização de movimento, garantindo assim a integridade das operações ferroviárias (FAROOQ; SOLER, 2017).

Apesar das vantagens em termos de alcance e custo, a utilização do Wi-Fi apresenta desafios técnicos significativos, especialmente em ambientes urbanos densamente povoados, onde há maior susceptibilidade a interferências, perdas de pacotes e flutuações de sinal. Em particular, o processo de transição da conexão entre dois *Access Point* (AP) ao longo da via — é um dos pontos mais críticos para a continuidade e qualidade da comunicação. Durante essa transição, podem ocorrer atrasos na entrega de comandos essenciais, como os de frenagem de emergência, o que compromete diretamente a segurança operacional do sistema (NEZDIRIN, 2021).

Diversos estudos recentes vêm buscando alternativas para mitigar os impactos da

troca de pontos de acesso em sistemas CBTC baseados em Wi-Fi, por meio da implementação de algoritmos mais robustos e adaptativos. Entre os métodos investigados estão abordagens baseadas na potência do sinal recebido (RSSI), histerese e janelas de média móvel, cada uma com estratégias distintas para determinar o momento mais adequado de realizar o *handover*. Trabalhos como o de Farooq e Soler (2017) destacam o papel da comunicação sem fio na confiabilidade do CBTC, enquanto pesquisas mais recentes, como a de (KHAN *et al.*, 2022) e (SOOD *et al.*, 2019), exploram algoritmos de predição e decisão de *handover* com base em modelos físicos e técnicas de aprendizado de máquina, demonstrando melhorias significativas na redução de latência e na estabilidade da conexão durante o deslocamento dos trens.

Dessa forma, a presente pesquisa se insere no esforço de aprimoramento dos sistemas de controle ferroviário por meio do estudo dos atrasos de comunicação causados pelo *handover* no contexto do CBTC com tecnologia Wi-Fi. Utilizando simulações computacionais desenvolvidas em ambiente MATLAB, este trabalho visa comparar o desempenho de diferentes algoritmos de *handover* com base no tempo de atraso para a entrega de comandos críticos, contribuindo para o avanço da confiabilidade e da eficiência dos sistemas ferroviários inteligentes.

## 1.2 Motivação e Escopo da Monografia

O CBTC é uma tecnologia de sinalização ferroviária amplamente adotada na modernização do transporte sobre trilhos em ambientes urbanos. Seu principal objetivo é reduzir o intervalo entre trens consecutivos por meio da comunicação contínua entre os veículos e a infraestrutura, promovendo maior eficiência e segurança na operação. Um elemento fundamental para o funcionamento do CBTC é o processo de *handover*, que consiste na troca da conexão do trem entre diferentes Estação Rádio Bases (ERB) ao longo do percurso.

No contexto ferroviário, o *handover* é um processo crítico, pois qualquer falha ou atraso na troca pode afetar diretamente o desempenho do sistema, comprometendo a qualidade da comunicação e, conseqüentemente, a segurança operacional. Para evitar esses problemas, o CBTC utiliza sistemas DCS (*Distributed Control System*), responsáveis por monitorar a posição e velocidade dos trens, além de gerenciar a comunicação entre o trem e a central de controle.

O *handover* deve ser realizado de forma precisa e oportuna, geralmente baseado na potência do sinal recebido dos APs, para garantir que o trem esteja sempre conectado ao AP com melhor qualidade de sinal. No entanto, variações abruptas e interferências podem causar trocas desnecessárias ou atrasos na decisão de *handover*, afetando a estabilidade da rede.

Neste trabalho, o foco está na análise e comparação de diferentes algoritmos de *handover*, avaliando o atraso de comunicação especialmente em cenários com variação na densidade de usuários conectados.

O escopo deste estudo limita-se à simulação desses algoritmos em um ambiente controlado, utilizando a métrica do atraso na comunicação para avaliar o desempenho. Aspectos como interferências ambientais reais ou falhas físicas no equipamento não são abordados, focando exclusivamente na análise teórica e simulada dos métodos de *handover* em CBTC.

### 1.3 Estado da Arte

A modernização dos sistemas metroferroviários nas últimas décadas tem demandado soluções tecnológicas que garantam maior eficiência operacional, segurança e confiabilidade. Nesse contexto, destaca-se a adoção do CBTC, um sistema de controle automático de trens baseado em comunicação contínua e bidirecional entre os trens e os equipamentos de via. Ao substituir os tradicionais blocos fixos por blocos móveis, o CBTC permite um controle mais preciso da posição dos trens, possibilitando a redução dos intervalos entre composições e, assim, aumentando a capacidade das linhas. Segundo o portal Brasil Ferroviário (Brasil Ferroviário, 2023b), o CBTC tem sido amplamente adotado por sua capacidade de fornecer maior flexibilidade e segurança à operação ferroviária.

Historicamente, sistemas CBTC utilizavam comunicação por *loops* indutivos, exigindo infraestrutura física complexa e manutenção intensiva. A transição para redes sem fio, especialmente *Wi-Fi* (IEEE 802.11), representou uma ruptura tecnológica, permitindo maior flexibilidade e redução de custos operacionais. Segundo ALVAREZ (2014), essa mudança foi impulsionada pela necessidade de superar limitações de capacidade e confiabilidade dos sistemas baseados em indução, especialmente em ambientes urbanos densos.

Para viabilizar a comunicação constante entre trem e via, o CBTC frequentemente utiliza redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11, conhecido popularmente como *Wi-Fi*. Essas redes *Wireless Local Area Network* (WLAN) oferecem vantagens como ampla difusão, baixo custo e facilidade de implementação. No entanto, quando aplicadas em ambientes altamente móveis, como os sistemas ferroviários urbanos, surgem desafios significativos relacionados à continuidade e à qualidade da comunicação. De acordo com (PRASAD; PRASAD, 2005a), redes IEEE 802.11 em cenários de mobilidade elevada enfrentam dificuldades em manter a conectividade sem interrupções, especialmente durante o processo de troca de AP, conhecido

como *handover*.

O processo de *handover* em redes *Wi-Fi* é composto por três etapas principais: varredura (*scanning*), autenticação e reassociação. Conforme (MONTAVONT *et al.*, 2015) observaram, essas etapas podem resultar em atrasos superiores a 100 ms, o que é crítico em aplicações em tempo real como o CBTC. Durante o *handover*, o trem precisa desconectar-se de um AP e conectar-se a outro à medida que se desloca ao longo da linha, o que, se mal gerenciado, pode causar perda de pacotes, latência elevada e comprometimento do controle automatizado do sistema. A capacidade de decisão eficiente nesse processo é, portanto, essencial para garantir a qualidade de serviço da rede.

A avaliação de algoritmos de *handover* em sistemas CBTC geralmente considera métricas como latência de comunicação, taxa de perda de pacotes, tempo de interrupção, número de *handovers* e taxa de falhas. Em ambientes de alta mobilidade, atrasos elevados no processo de troca de ponto de acesso podem comprometer aplicações em tempo real, como o controle automático de trens. Estudos em redes CBTC baseadas em WLAN indicam que procedimentos de *handoff* tradicionais podem resultar em latências da ordem de centenas de milissegundos, impactando diretamente a confiabilidade e a segurança operacional (ZHU *et al.*, 2012b).

Diversos algoritmos têm sido propostos para mitigar os impactos negativos do *handover*. O algoritmo baseado em RSSI Limiar, por exemplo, desencadeia o processo de troca de AP quando a intensidade do sinal recebido cai abaixo de um determinado valor. Embora de fácil implementação, esse método é bastante sensível a variações momentâneas no sinal e pode provocar *handovers* prematuros ou desnecessários, especialmente na ausência de mecanismos adicionais como margem de histerese ou médias temporais de sinal (ROY, 2009). Por sua vez, o algoritmo de Histerese procura reduzir a instabilidade nas conexões ao introduzir uma margem de decisão entre o sinal atual e o sinal de vizinhança, evitando assim o efeito *ping-pong*. Ainda que aumente a estabilidade, essa abordagem pode atrasar *handovers* críticos em situações de rápida degradação do sinal (JUNIOR, 2012).

Em contrapartida, abordagens mais recentes e sofisticadas têm buscado superar as limitações dos métodos tradicionais ao incorporar múltiplos critérios no processo de decisão de *handover*. Uma dessas estratégias é a adoção de algoritmos multicritério, que avaliam simultaneamente parâmetros como intensidade do sinal, carga do ponto de acesso e taxa de perda de pacotes. Essa abordagem visa promover decisões mais contextuais e resilientes, especialmente em ambientes com alta densidade de usuários e exigência de comunicação contínua, como os

sistemas CBTC. Segundo Boulhosa et al. (2011), técnicas baseadas em funções de custo hierárquicas, integradas a mecanismos de *Quality of Service* (QoS) e *Quality of Experience* (QoE), demonstram ganhos significativos na estabilidade da conexão e na redução de falhas de *handover* em redes heterogêneas. Embora o estudo tenha sido conduzido em um contexto mais amplo de mobilidade, seus princípios se aplicam diretamente à realidade ferroviária, onde a previsibilidade do movimento e a criticidade da comunicação exigem decisões de *handover* mais inteligentes e adaptativas.

Adicionalmente, trabalhos recentes na área de redes sem fio sugerem o uso de técnicas baseadas em aprendizado de máquina, redes definidas por software e algoritmos bioinspirados, como algoritmos genéticos, para tornar o processo de *handover* mais preditivo e adaptável. Segundo Riggio et al. (2014), por exemplo, apresentaram uma abordagem proativa de *handover* em redes IEEE 802.11 utilizando controle orientado por *Software Defined Network* (SDN), promovendo decisões mais rápidas e conscientes. Já Vieira et al. (2020) propôs uma heurística baseada em algoritmo genético para otimizar o processo de *handover* em redes heterogêneas móveis, considerando parâmetros como intensidade de sinal, carga da célula e histórico de mobilidade. Os resultados demonstraram significativa redução nas falhas de *handover* e no efeito *ping-pong*, reforçando o potencial dessas estratégias em ambientes críticos e dinâmicos como o ferroviário.

Pesquisas recentes têm explorado o uso de redes definidas por *software* e algoritmos de aprendizado de máquina para tornar o processo de *handover* mais inteligente e adaptativo. KHAN et al. (2024) propõe um modelo baseado em programação linear para seleção dinâmica de células em redes densas, reduzindo em até 39% o número de *handovers* desnecessários. Já RIAZ et al. (2025) demonstra que algoritmos preditivos baseados em redes neurais podem otimizar parâmetros como tempo de disparo e margem de *handover*, reduzindo falhas em mais de 75%.

Embora diversos algoritmos tenham sido propostos, poucos estudos realizam comparações sistemáticas entre diferentes abordagens de *handover* em cenários específicos de CBTC. Além disso, a maioria dos trabalhos não considera simultaneamente fatores como mobilidade elevada, densidade de usuários conectados e interferência de sinal. Essa lacuna é evidenciada por (WANG et al., 2017), que destacam a necessidade de modelos mais realistas para avaliar a coexistência de CBTC com sistemas adjacentes em bandas licenciadas. Diante disso, o presente trabalho se propõe a avaliar, com base em simulações *MATLAB*, o desempenho de quatro algoritmos — Histerese, RSSI Limiar, Média Móvel e Média Móvel com *Delay* — em diferentes

condições de tráfego, particularmente considerando variações no número de usuários conectados. A principal métrica analisada será o atraso médio de comunicação, permitindo uma comparação direta entre as abordagens em cenários representativos da operação ferroviária.

#### 1.4 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o atraso de comunicação causado por diferentes algoritmos de *handover* no sistema CBTC, considerando cenários variados de tráfego ferroviário. A análise busca compreender como as condições de tráfego e as estratégias de troca de conexão afetam o atraso na comunicação entre os trens e os elementos de controle, fator essencial para garantir a segurança e eficiência do sistema ferroviário automatizado.

Para atingir o objetivo geral proposto, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e descrever os principais algoritmos de *handover* aplicáveis ao ambiente CBTC;
- Modelar cenários com diferentes condições de tráfego ferroviário;
- Comparar os resultados obtidos, avaliando o desempenho de cada estratégia em termos de atraso.

#### 1.5 Estrutura do Trabalho

Esta monografia está organizada em cinco capítulos, incluindo o capítulo de introdução. A estrutura dos quatro capítulos restantes é brevemente descrita a seguir, com ênfase nos principais conteúdos abordados:

- **Capítulo 2:** traz os principais conceitos relacionados ao tema, começando por uma visão geral das comunicações e da sinalização nos sistemas ferroviários. Explica como funciona o CBTC e seus componentes. Também aborda o processo de *handover* ao longo da via, além dos conceitos fundamentais das redes *Wi-Fi* baseadas no padrão IEEE 802.11, seu funcionamento e como ocorre o *handover* nessas redes;
- **Capítulo 3:** descreve a metodologia utilizada no trabalho, explicando como o ambiente foi modelado para simular o movimento do trem, a comunicação entre trem e solo, os cenários com diferentes densidades de usuários e a aplicação dos algoritmos de *handover*;
- **Capítulo 4:** apresenta os resultados obtidos nas simulações e discute o desempenho de cada algoritmo de *handover* em relação à métrica analisada, atraso de comunicação, considerando diferentes cenários de tráfego;

- **Capítulo 5:** traz as conclusões do trabalho com base nos resultados obtidos e propõe possíveis melhorias para o simulador, além de sugestões para estudos futuros sobre o tema.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Panorama das Comunicações Ferroviárias

#### 2.1.1 *Introdução à evolução dos sistemas de sinalização ferroviária*

A sinalização ferroviária é um dos pilares fundamentais da segurança e da eficiência operacional no transporte sobre trilhos. Desde os primórdios da ferrovia, mecanismos de controle foram desenvolvidos para evitar colisões, organizar o tráfego e garantir a separação segura entre trens. Os primeiros sistemas eram essencialmente manuais e visuais, baseados em bandeiras, apitos e sinais mecânicos operados por agentes ao longo da via. Com o avanço da eletrificação e da engenharia de controle, surgiram os sistemas eletromecânicos e, posteriormente, os sistemas eletrônicos, que permitiram maior automação e confiabilidade na operação ferroviária (THEEG; VLASENKO, 2009b).

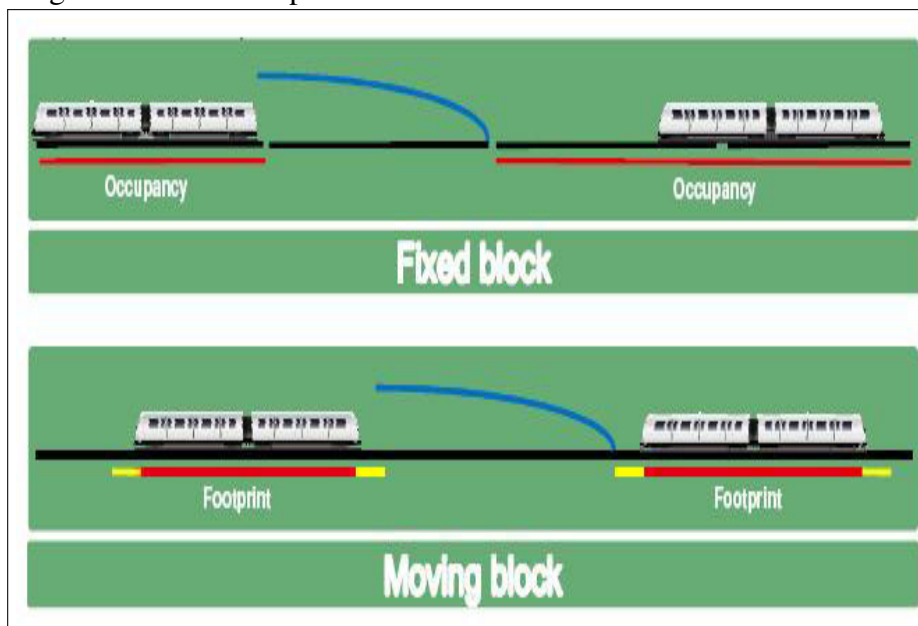
Um dos modelos mais amplamente utilizados ao longo do século XX foi o sistema de blocos fixos, no qual a via é dividida em segmentos de comprimento predeterminado, chamados de blocos. Cada bloco é monitorado por circuitos de via ou contadores de eixos, e apenas um trem pode ocupar um bloco por vez. Essa abordagem garante a separação física entre trens, mas impõe limitações operacionais, pois a distância entre composições é determinada pelo tamanho fixo dos blocos, independentemente da velocidade ou capacidade de frenagem dos trens (THEEG; VLASENKO, 2009a; HAY, 1982).

Com o crescimento da demanda por transporte urbano e a necessidade de reduzir o intervalo entre trens, surgiram sistemas mais avançados, como o Controle Automático de Trens (ATC) e o Sistema Europeu de Gestão do Tráfego Ferroviário (ERTMS). O ATC introduziu funcionalidades como a proteção automática do trem Proteção Automática de Trens (ATP) e a supervisão centralizada Supervisão Automática de Trens (ATS), permitindo maior automação e segurança. Já o ERTMS, adotado amplamente na Europa, padronizou protocolos de comunicação e controle, promovendo interoperabilidade entre diferentes operadores e fabricantes (MARTÍNEZ; MARTIN, 2020).

Apesar dos avanços, tanto o ATC quanto o ERTMS ainda operam, em grande parte, com base em blocos fixos. A necessidade de maior flexibilidade operacional, aumento da capacidade da linha e redução de custos de infraestrutura impulsionou o desenvolvimento do CBTC. Diferentemente dos sistemas anteriores, o CBTC abandona o conceito de blocos

fixos e adota o modelo de blocos móveis, nos quais a separação entre trens é recalculada dinamicamente com base na posição exata, velocidade e capacidade de frenagem de cada composição. Essa abordagem permite maior aproximação entre trens, aumento da frequência e melhor aproveitamento da infraestrutura existente (Brasil Ferroviário, 2023a). A Figura 2 ilustra a diferença entre os modelos de controle por blocos fixos e blocos móveis, evidenciando como o CBTC permite maior aproximação entre trens sem comprometer a segurança operacional.

Figura 2 – Controle por blocos fixos e blocos móveis.



Fonte: (Wikipedia contributors, 2025).

Além disso, o CBTC incorpora comunicação contínua entre o trem e os equipamentos de via, geralmente por meio de redes sem fio, o que permite decisões em tempo real e maior capacidade de resposta a eventos operacionais. Essa evolução representa um marco na história da sinalização ferroviária, pois transforma o paradigma de controle baseado em infraestrutura fixa para um modelo centrado na comunicação e na inteligência embarcada.

### 2.1.2 Conceitos e arquitetura do CBTC

O CBTC é um sistema de controle ferroviário que representa uma ruptura com os modelos tradicionais de sinalização baseados em blocos fixos. Sua principal inovação está na adoção de blocos móveis, nos quais a separação entre trens é calculada dinamicamente com base na posição exata, velocidade e capacidade de frenagem de cada composição. Essa abordagem permite maior aproximação entre trens, aumento da frequência operacional e melhor aprovei-

tamento da infraestrutura existente, sem comprometer a segurança (MARTÍNEZ; MARTIN, 2020).

A arquitetura funcional do CBTC é composta por três subsistemas principais: ATP, Operação Automática de Trens (ATO) e ATS. Esses módulos operam de forma integrada e são sustentados por uma infraestrutura de comunicação contínua entre o trem e os equipamentos de via, geralmente baseada em redes sem fio como IEEE 802.11.

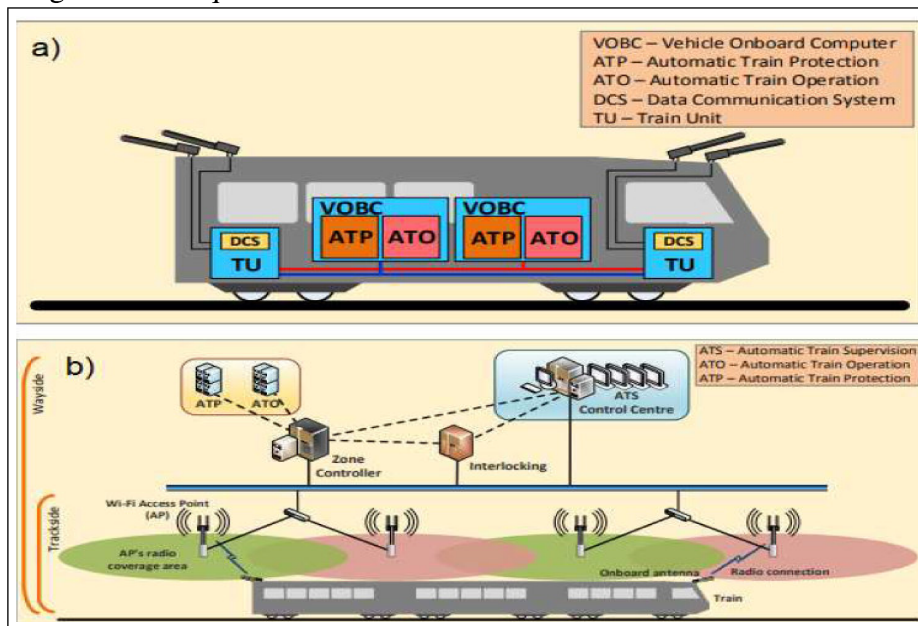
O ATP é o subsistema responsável por garantir a segurança da operação. Ele monitora continuamente a posição do trem, sua velocidade, direção de deslocamento e distância em relação a outras composições. Com base nesses dados, o ATP calcula curvas de frenagem seguras e aplica automaticamente os freios caso o trem ultrapasse os limites operacionais definidos. Além disso, o ATP detecta tentativas de retrocesso não autorizado, supervisiona o ponto de parada e emite alertas em caso de excesso de velocidade. Todo esse processo é executado de forma *fail-safe*, ou seja, qualquer falha no sistema resulta em uma resposta segura, como a frenagem de emergência (Railway Signalling Concepts, 2022).

O ATO, por sua vez, é responsável pela automação da condução do trem. Ele executa tarefas como aceleração, frenagem, abertura e fechamento de portas e controle do tempo de parada nas estações. O ATO opera dentro dos limites definidos pelo ATP, garantindo que a automação não comprometa a segurança. Em sistemas com alto grau de automação, o ATO pode operar os trens sem intervenção humana, inclusive em cenários de falha parcial, desde que o ATP continue ativo. O ATO também pode ajustar a velocidade do trem com base em metas de pontualidade e intervalos programados, otimizando o fluxo da linha (MARTÍNEZ; MARTIN, 2020).

Já o ATS é o subsistema de supervisão centralizada. Ele permite o monitoramento em tempo real da posição dos trens, a regulação do tráfego, o despacho de composições e a gestão de falhas. O ATS também se integra a sistemas de informação ao passageiro, controle de energia e gerenciamento de horários. Em Centros de Controle Operacional (OCC), o ATS fornece uma interface gráfica que exibe o status da linha, dos trens e dos equipamentos de via, permitindo que operadores humanos intervenham quando necessário. Além disso, o ATS registra o histórico de movimentação dos trens, gera relatórios operacionais e pode realizar ajustes automáticos na programação em caso de atrasos ou interrupções (Railway Signalling Concepts, 2022). Na figura 3 é ilustrado os subsistemas.

A integração entre ATP, ATO e ATS é viabilizada por uma infraestrutura de comuni-

Figura 3 – Arquitetura do sistema CBTC.



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

cação digital contínua, que permite a troca de dados em tempo real entre os trens e os sistemas de controle. No contexto deste trabalho, destaca-se que a eficiência dessa comunicação é medida principalmente pelo *delay* médio, ou seja, o tempo de latência entre o envio e o recebimento das mensagens. A confiabilidade e a baixa latência da rede são fundamentais para garantir que os subsistemas atuem de forma coordenada e responsiva, especialmente em ambientes com tráfego variável e múltiplos pontos de acesso.

### 2.1.3 Comunicação trem-terra e a importância da conectividade contínua

A operação segura e eficiente de sistemas CBTC depende fundamentalmente da existência de um canal de comunicação confiável entre os trens e a infraestrutura de via. Esse canal, conhecido como comunicação trem-terra, é responsável por transmitir, em tempo real, informações críticas como posição exata do trem, velocidade, comandos de autorização de movimento, status operacional e mensagens de controle. A troca contínua desses dados é o que permite que os subsistemas ATP, ATO e ATS atuem de forma coordenada, garantindo a segurança e a automação da operação ferroviária (Westermo, 2024).

Nos sistemas CBTC modernos, essa comunicação é geralmente implementada por meio de redes sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11, também conhecido como *Wi-Fi*. Essa escolha se deve à ampla disponibilidade de equipamentos comerciais, à facilidade de implantação e à capacidade de operar em faixas de frequência não licenciadas. No entanto, a aplicação do *Wi-*

*Fi* em ambientes ferroviários impõe desafios significativos, especialmente devido à mobilidade contínua dos trens, à presença de túneis, interferências eletromagnéticas e à necessidade de *handover* frequente entre pontos de acesso ao longo da via (ZHU *et al.*, 2012).

A conectividade contínua é um requisito crítico para o funcionamento do CBTC. Diferentemente de aplicações convencionais de rede, em que pequenas perdas de pacotes ou atrasos podem ser tolerados, no CBTC qualquer interrupção na comunicação pode comprometer a segurança da operação. Por exemplo, se o trem deixar de receber atualizações de autorização de movimento ou perder a sincronização com o centro de controle, o sistema pode acionar automaticamente a frenagem de emergência como medida de segurança. Por isso, a rede deve garantir baixa latência, alta disponibilidade e resiliência a falhas (JUNIOR, 2023).

O processo de *handover* — ou troca de conexão entre APs — é um dos principais pontos de vulnerabilidade nesse contexto. Em redes IEEE 802.11, o *handover* tradicional envolve etapas como varredura de canais, autenticação e reassociação, o que pode introduzir atrasos superiores a 100 ms (INET Framework, 2024). Esse tempo de interrupção é inaceitável em sistemas CBTC, que exigem respostas em tempo real. Por isso, diversos algoritmos de *handover* têm sido propostos para minimizar o *delay* de comunicação durante essas transições, utilizando métricas como RSSI, jitter, carga do AP e histórico de mobilidade para tomar decisões mais inteligentes e contextuais (ZHU *et al.*, 2012; Westermo, 2024).

Além disso, a comunicação trem-terra não se limita apenas ao controle operacional. Ela também pode ser utilizada para aplicações complementares, como videomonitoramento em tempo real, manutenção preditiva, atualização de *software* embarcado e sistemas de informação ao passageiro. Isso amplia ainda mais a demanda por largura de banda, QoS e priorização de tráfego crítico, reforçando a importância de uma infraestrutura de rede robusta e adaptável às condições dinâmicas do ambiente ferroviário (Westermo, 2024).

Em resumo, a comunicação trem-terra é o elo vital que sustenta a lógica de operação do CBTC. Sua continuidade e desempenho impactam diretamente a segurança, a eficiência e a confiabilidade do sistema. Por isso, o estudo e a otimização dos algoritmos de *handover* em redes IEEE 802.11, especialmente sob condições de tráfego variável, são essenciais para garantir a integridade da comunicação e o funcionamento adequado do sistema como um todo.

## 2.2 Redes IEEE 802.11

### 2.2.1 Características técnicas do padrão IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11, popularmente conhecido como *Wi-Fi*, define as especificações técnicas para redes locais sem fio *Wireless Local Area Network* - WLAN. Desenvolvido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* - IEEE, esse conjunto de normas estabelece os protocolos de comunicação nas camadas física e de enlace de dados, permitindo que dispositivos se conectem sem a necessidade de cabos. Desde sua primeira versão, publicada em 1997, o padrão passou por diversas atualizações, cada uma com melhorias em taxa de transmissão, alcance, eficiência espectral e robustez frente a interferências (IEEE Standards Association, 2023).

As diferentes versões do padrão são identificadas por letras ou combinações alfanuméricas, como 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n (*Wi-Fi* 4), 802.11ac (*Wi-Fi* 5) e 802.11ax (*Wi-Fi* 6). Cada uma dessas versões opera em faixas de frequência específicas — principalmente 2,4 GHz e 5 GHz — e apresenta características distintas em termos de largura de banda, modulação, alcance e taxa de transmissão (RF Wireless World, 2024).

Por exemplo, o 802.11b, lançado em 1999, opera na faixa de 2,4 GHz com taxas de até 11 Mbps e alcance de aproximadamente 40 metros em ambientes internos. Já o 802.11a, também de 1999, utiliza a faixa de 5 GHz e oferece até 54 Mbps, com menor alcance devido à maior atenuação nessa frequência. O 802.11g, lançado em 2003, combina a faixa de 2,4 GHz com a taxa de 54 Mbps, sendo amplamente adotado em redes domésticas e corporativas (TutorialsPoint, 2024).

O 802.11n (*Wi-Fi* 4) introduziu o conceito de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), permitindo múltiplas antenas para transmissão e recepção simultânea, o que aumentou significativamente a taxa de dados (até 600 Mbps) e o alcance (até 70 metros em ambientes internos). O 802.11ac (*Wi-Fi* 5), por sua vez, opera predominantemente em 5 GHz e oferece taxas superiores a 1 Gbps, com suporte a até 8 fluxos espaciais e técnicas como beamforming para direcionamento do sinal. Já o 802.11ax (*Wi-Fi* 6), lançado em 2019, trouxe avanços como *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e *BSS Coloring*, otimizando o uso do espectro em ambientes densos e suportando taxas de até 9,6 Gbps (RF Wireless World, 2024).

Apesar dos avanços, o padrão IEEE 802.11 apresenta limitações importantes quando aplicado a ambientes de alta mobilidade, como sistemas ferroviários. Entre os principais desafios

estão a latência durante o processo de *handover*, a suscetibilidade a interferências em ambientes subterrâneos e a degradação do desempenho com o aumento do número de usuários conectados. Além disso, o *Wi-Fi* tradicional não foi originalmente projetado para aplicações críticas em tempo real, o que exige adaptações e algoritmos especializados para garantir a continuidade da comunicação em sistemas como o CBTC (ZHU *et al.*, 2012).

### 2.2.2 Aplicações em ambientes móveis ferroviários

A aplicação do padrão IEEE 802.11 em sistemas ferroviários urbanos, especialmente em contextos de alta mobilidade como o CBTC, representa uma solução prática e economicamente viável para viabilizar a comunicação trem-terra. Embora originalmente projetado para ambientes internos e com baixa mobilidade, o *Wi-Fi* tem sido amplamente adaptado para operar em cenários ferroviários por meio de ajustes na infraestrutura de rede, algoritmos de *handover* e protocolos de controle de acesso ao meio (ZHOU *et al.*, 2011).

Em ambientes ferroviários móveis, a rede sem fio precisa lidar com desafios específicos, como a variação rápida da posição do trem, a presença de túneis e viadutos, interferências eletromagnéticas e a necessidade de manter a comunicação contínua mesmo durante a transição entre pontos de acesso. Para isso, os APs são estrategicamente posicionados ao longo da via, formando uma malha de cobertura que permite ao trem manter conectividade durante todo o trajeto. No entanto, a troca de conexão entre APs — o processo de *handover* — pode introduzir atrasos significativos, afetando diretamente a latência da comunicação e, por consequência, a operação segura do CBTC (ZHU *et al.*, 2012).

Estudos experimentais demonstram que, em redes IEEE 802.11 aplicadas a ferrovias, fatores como a qualidade do enlace, o esquema de alocação de canais e a latência de *handover* têm impacto mais significativo no desempenho da rede do que a própria velocidade do trem. Segundo Zhou *et al.* (2011), realizaram testes em um ambiente ferroviário real com múltiplos APs distribuídos ao longo de 3,5 milhas de trilhos. Os autores discutem aspectos de desempenho da comunicação em função da distribuição dos APs e dos mecanismos de transição entre células, indicando a influência desses fatores na estabilidade do enlace.

Além disso, o uso de *Wi-Fi* em ferrovias não se limita ao controle operacional. Ele também é empregado para transmissão de dados de manutenção, videomonitoramento embarcado, atualização remota de *software* e comunicação com sistemas de supervisão e segurança. Em alguns casos, o trem atua como um nó móvel de coleta de dados, captando informações de

sensores distribuídos ao longo da via, como em passagens de nível, estações meteorológicas e dispositivos de diagnóstico de trilhos (RICHTER *et al.*, 2019). Essa abordagem reduz a necessidade de cabeamento físico e permite maior flexibilidade na manutenção da infraestrutura.

### 2.2.3 Handover

A gestão de mobilidade em redes de comunicação é responsável por manter a conectividade contínua de dispositivos em movimento, permitindo que terminais acessem serviços por meio de múltiplas tecnologias de forma sequencial ou simultânea (PRASAD; PRASAD, 2005b). Essa gestão se divide em dois componentes principais: (i) gestão de localização, que rastreia o terminal móvel e atualiza sua posição (KO; LEE, 2017), e (ii) gestão de *Handover* (HO), que cuida da realocação da conexão ativa entre pontos de acesso (CARDONA *et al.*, 2017). A eficiência dessas estratégias está diretamente ligada à escalabilidade, à baixa latência, à minimização de perdas de pacotes e à manutenção da QoS — aspectos críticos em aplicações ferroviárias.

No contexto dos sistemas CBTC, o *handover* representa a transição da conexão entre dois APs enquanto o trem se desloca em alta velocidade. Embora o padrão IEEE 802.11 seja amplamente adotado por sua compatibilidade com redes *Internet Protocol* (IP) e baixo custo, ele foi originalmente projetado para ambientes estáticos ou de baixa mobilidade, o que impõe desafios significativos em aplicações críticas como o CBTC (MONTAVONT; NOEL, 2005).

O processo clássico de *handover* em redes *Wi-Fi* é composto por três etapas:

- Detecção: O dispositivo identifica que o sinal do AP atual está degradado — geralmente por meio da métrica de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI).
- Varredura (*Scanning*): O terminal realiza uma busca ativa ou passiva por APs disponíveis nos canais da rede, o que pode consumir dezenas de milissegundos.
- Autenticação e reassociação: Uma vez escolhido o novo AP, o dispositivo realiza os procedimentos de autenticação (em redes seguras) e, em seguida, efetua a reassociação, transferindo formalmente a conexão.

Essas etapas, embora funcionais em redes convencionais, podem gerar atrasos entre 50 ms e 300 ms (INET Framework contributors, 2024), tempo considerado inaceitável em sistemas CBTC, nos quais a interrupção da comunicação pode levar à aplicação automática da frenagem de emergência por falha no envio de dados operacionais. Pesquisas como as de (PRASAD; PRASAD, 2005b) mostram que em ambientes com múltiplos canais, mesmo com

otimizações, o tempo de resposta ainda pode ultrapassar 200 ms.

Em cenários ferroviários, especialmente em velocidades superiores a 60 km/h, o tempo de permanência dentro da área de cobertura de um AP é reduzido, exigindo uma tomada de decisão rápida. Os atrasos mais recorrentes incluem: tempo até detecção da necessidade de *handover*, tempo de varredura, tempo de autenticação e de reassociação com o novo AP — cada um contribuindo para o *delay* total da comunicação (PRASAD; PRASAD, 2005b; WANG *et al.*, 2023).

Diferentes cenários de *handover* foram classificados no contexto IEEE 802.11, conforme (QETTOUH *et al.*, 2012):

- Sem *handover*: O terminal permanece conectado dentro da área de cobertura do mesmo AP (movimento estático ou local).
- *Handover* de AP: Troca de conexão entre APs pertencentes ao mesmo *Extended Service Set* (ESS).
- *Handover* de ESS: Migração entre APs que pertencem a ESSs distintos.

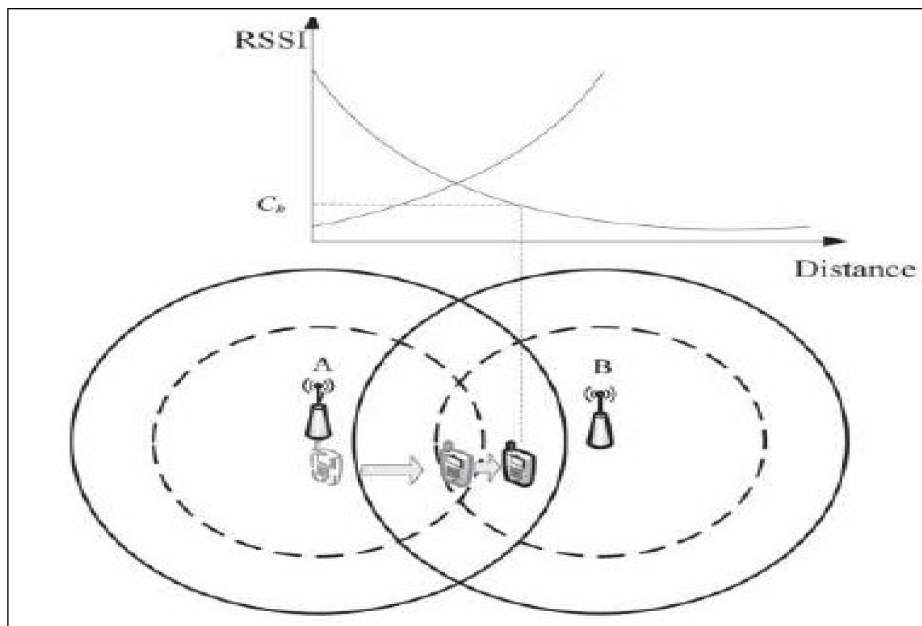
No CBTC, o foco está no horizontal *handover* entre APs *Wi-Fi* de um mesmo ESS, o que demanda alta precisão e baixo tempo de interrupção.

A tomada de decisão sobre o momento ideal de *handover* é frequentemente baseada em métricas como o RSSI, taxa de transferência e qualidade do canal (CARDONA *et al.*, 2017). Na abordagem por *threshold* (limiar), o terminal monitora continuamente a qualidade do sinal e executa a troca ao atingir o ponto crítico. A Figura 4 ilustra esse processo, mostrando a variação dos sinais de dois APs (A e B) e o ponto “ $C_h$ ” onde ocorre o *handover*.

Além do RSSI, outras métricas como *Carrier-to-Interference Ratio* (CIR), *Bit Error Rate* (BER) e *Block Error Rate* (BLER) podem ser consideradas. Estudos recentes indicam também a eficácia de métodos preditivos, como redes neurais artificiais, reconhecimento de padrões, lógica *fuzzy* e heurísticas adaptativas (GHADERI, 2006; PRASAD; PRASAD, 2005b).

Em sistemas CBTC, garantir comunicação contínua com baixa latência implica não apenas em escolher o algoritmo mais adequado, mas também em ajustar sua parametrização às condições reais da rede. Algoritmos que não são sensíveis à mobilidade podem gerar atrasos críticos, interferência cruzada e até perda de sincronização com o centro de controle. Por isso, este trabalho dedica-se à avaliação comparativa de algoritmos de *handover*, visando identificar soluções que minimizem o *delay* e mantenham a confiabilidade da operação ferroviária mesmo em ambientes com alta mobilidade.

Figura 4 – Transição de Conexão em Movimento com Base no *Threshold*.



Fonte: (JIN; CHOI, 2013).

## 2.3 Qualidade de Serviço e Variação de Carga em Ambientes CBTC

### 2.3.1 Efeitos da densidade de usuários sobre a performance da rede

A densidade de usuários<sup>1</sup> conectados a uma rede sem fio é um fator determinante para o desempenho de sistemas de controle ferroviário baseados em comunicação, como o CBTC. Em ambientes urbanos, a quantidade de unidades móveis conectadas à rede *Wi-Fi* pode variar significativamente ao longo do dia, especialmente em estações movimentadas ou durante eventos de grande porte. Essa variação dinâmica de carga afeta diretamente a latência de comunicação, a estabilidade do enlace trem-terra e a eficiência dos algoritmos de *handover*.

Em redes IEEE 802.11, o aumento do número de usuários leva à maior competição pelo canal de acesso, resultando em colisões de pacotes, retransmissões e atrasos no tempo de resposta. Isso compromete a entrega de mensagens críticas entre o trem e o centro de controle, podendo gerar falhas de sincronização e acionamento indevido de mecanismos de segurança, como a frenagem de emergência ((ZHOU *et al.*, 2011). Além disso, a sobrecarga em pontos de acesso específicos pode induzir decisões de *handover* precipitadas ou instáveis, agravando o problema.

Nesse contexto, a escolha do algoritmo de *handover* torna-se crucial. Abordagens

<sup>1</sup> Neste trabalho, o termo usuários refere-se aos trens que realizam a comunicação via rádio com as estações rádio base.

tradicionais, como o limiar de RSSI, são altamente sensíveis a flutuações momentâneas de sinal, o que as torna inadequadas em cenários com tráfego variável. Algoritmos com histerese oferecem maior estabilidade, mas podem atrasar decisões importantes quando a degradação do enlace é rápida. Já os algoritmos baseados em média móvel se destacam por sua capacidade de suavizar variações abruptas no sinal recebido, utilizando uma janela temporal para calcular o valor médio do RSSI antes de tomar a decisão de troca de AP (CHAN *et al.*, 2017). Nesse contexto, a variação Média Móvel com *Delay* amplia essa abordagem ao introduzir um atraso controlado na decisão, evitando trocas precipitadas e proporcionando maior estabilidade em cenários de tráfego intenso, onde flutuações rápidas do sinal poderiam comprometer a continuidade da comunicação.

Essa abordagem reduz significativamente o efeito *ping-pong* e melhora a robustez da decisão de *handover* em ambientes com alta densidade de usuários. Estudos demonstram que o uso da média móvel com *Delay* resulta em menor taxa de *handover* desnecessário e melhor distribuição de carga entre os APs, mesmo em cenários com mobilidade elevada e interferência intercelular (SOOD *et al.*, 2019). Além disso, a média móvel com *Delay* pode ser facilmente combinada com outras métricas, como carga do AP e latência estimada, ampliando sua aplicabilidade em algoritmos multiatributo.

Portanto, em ambientes CBTC sujeitos a tráfego variável, o algoritmo de média móvel com *Delay* representa uma solução eficaz para garantir a continuidade da comunicação trem-terra, reduzindo o *delay* médio e aumentando a estabilidade da rede. Sua adoção contribui diretamente para a confiabilidade do sistema e para a segurança da operação ferroviária automatizada.

### 2.3.2 *Sensibilidade dos algoritmos de handover ao tráfego dinâmico*

A eficiência de um algoritmo de *handover* em sistemas CBTC depende diretamente de sua capacidade de adaptação às condições variáveis da rede, especialmente em cenários com tráfego dinâmico. Em ambientes ferroviários urbanos, a densidade de dispositivos conectados (no contexto deste trabalho, as unidades móveis) à rede *Wi-Fi* pode variar significativamente ao longo do tempo, afetando métricas como *delay* de comunicação, carga dos pontos de acesso e estabilidade do enlace trem-terra. Essas flutuações impactam diretamente a tomada de decisão de *handover*, podendo comprometer a continuidade da comunicação e a segurança da operação automatizada (ZHOU *et al.*, 2011).

O algoritmo de limiar de RSSI é uma abordagem simples e amplamente utilizada,

na qual o *handover* é acionado quando o valor do sinal recebido (RSSI) cai abaixo de um determinado limiar fixo. Embora de fácil implementação, esse método é altamente sensível a variações momentâneas do sinal, o que o torna vulnerável ao efeito *ping-pong* — troca repetida entre APs vizinhos — especialmente em ambientes congestionados. Além disso, o RSSI não reflete diretamente a qualidade do canal em situações de sobrecarga, podendo levar a decisões equivocadas em cenários com múltiplos usuários ativos (MONTAVONT; NOËL, 2005).

O algoritmo com histerese busca mitigar esse problema ao introduzir uma margem de decisão: o *handover* só é realizado se o RSSI do novo AP for superior ao do atual por um valor mínimo (histerese). Essa abordagem reduz a instabilidade e melhora a previsibilidade da decisão. No entanto, em cenários com tráfego dinâmico, a histerese fixa pode se tornar um obstáculo, pois retarda a resposta do sistema quando a degradação do enlace é real e rápida. Estudos mostram que, sob carga elevada, a histerese pode aumentar o *delay* de comunicação e comprometer a responsividade do sistema se não for adaptada dinamicamente (ALVAREZ *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020).

O algoritmo de Média Móvel representa uma evolução ao considerar múltiplas métricas simultaneamente — como RSSI, *delay*, carga do AP e *Signal to Noise Ratio* (SNR) — para tomar decisões mais contextuais. Essa abordagem é mais robusta frente a variações de tráfego, pois avalia a qualidade do enlace de forma multidimensional. No entanto, sua eficácia depende da correta ponderação dos atributos e da atualização em tempo real dos parâmetros, o que exige maior capacidade de processamento e calibração criteriosa (SOOD *et al.*, 2019).

Nesse cenário, destaca-se o uso da média móvel como técnica de suavização aplicada ao RSSI ou a outras métricas. Ao calcular a média dos valores ao longo de uma janela temporal, o algoritmo reduz a influência de flutuações abruptas e melhora a estabilidade da decisão. Essa abordagem é particularmente eficaz em ambientes com carga flutuante, pois evita decisões precipitadas causadas por picos de interferência ou degradações transitórias. Além disso, a média móvel pode ser integrada ao algoritmo *handover* por Média Móvel como pré-processamento das métricas, aumentando ainda mais sua robustez (CHAN *et al.*, 2017).

Portanto, frente a diferentes perfis de cargas de trens, os algoritmos de *handover* apresentam níveis distintos de sensibilidade. Enquanto o RSSI limiar é mais suscetível a instabilidades e a histerese pode atrasar decisões críticas, o uso da média móvel — em conjunto com abordagens multiatributo — oferece um equilíbrio eficaz entre estabilidade e responsividade. Nesse contexto, a variação Média Móvel com *Delay* amplia essa robustez ao introduzir um atraso

controlado na decisão, evitando trocas precipitadas e garantindo maior consistência em ambientes de tráfego intenso. Assim, torna-se altamente recomendada para aplicações ferroviárias sensíveis à latência, onde a continuidade da comunicação é essencial para a segurança operacional.

### 2.3.3 Avaliação de desempenho em condições críticas de carga

A avaliação do desempenho de algoritmos de *handover* sob condições críticas de carga é essencial para garantir a confiabilidade da comunicação em sistemas CBTC. Em contextos operacionais com alta densidade de unidades móveis — como em estações centrais, túneis com presença de dispositivos embarcados ou horários de pico — a rede *Wi-Fi* se torna suscetível a congestionamentos, interferências e aumento expressivo nas métricas de qualidade do enlace. Esses fatores impactam diretamente o funcionamento dos algoritmos de *handover*, podendo comprometer a segurança e a estabilidade do sistema (FAROOQ, 2020).

Quando há sobrecarga na rede, observa-se aumento na latência de *handover*, degradação do *throughput* e, principalmente, um crescimento significativo no *delay* de comunicação — ou seja, o tempo de resposta entre o envio e recebimento de pacotes. Em cenários simulados com até 50 usuários ativos por célula, o *delay* pode superar 100 ms, valor inaceitável para os requisitos de comunicação em tempo real exigidos pelos subsistemas ATP e ATO do CBTC (NGUYEN *et al.*, 2014; SYSTEMS, 2025).

Algoritmos de *handover* simples, como o de limiar de RSSI, tendem a apresentar desempenho precário nesse tipo de cenário, já que são altamente sensíveis a flutuações momentâneas do sinal. O resultado são decisões precipitadas, aumento da taxa de *handover* desnecessário e instabilidade no enlace. O algoritmo com histerese se propõe a mitigar esse problema ao criar uma margem de tolerância entre o sinal atual e o do próximo AP. Isso reduz o efeito *ping-pong*, mas em contrapartida pode atrasar a resposta quando a degradação do enlace é real e rápida, especialmente em ambientes com flutuação intensa de carga (ALVAREZ *et al.*, 2020).

Já o algoritmo baseado em média móvel destaca-se por sua resiliência frente à variabilidade do ambiente. Ao suavizar oscilações no RSSI (ou em outras métricas relevantes), esse algoritmo permite que a decisão de *handover* seja tomada com base em uma tendência estável, e não em um valor pontual e volátil. Isso reduz a suscetibilidade a picos momentâneos de ruído ou interferência e garante maior consistência na manutenção do enlace. Em estudos realizados por (CARDONA *et al.*, 2017), a média móvel demonstrou redução de até 40% nos *handovers* desnecessários, além de diminuir em até 25% o *delay* médio de comunicação, mesmo

sob condições de tráfego congestionado. Uma variação desse método, a Média Móvel com *Delay*, amplia tais benefícios ao introduzir um atraso controlado na decisão, evitando trocas prematuras e proporcionando maior estabilidade em cenários de alta densidade de usuários. Essa abordagem se mostra especialmente mais eficaz que a Média Móvel convencional em ambientes ferroviários, onde a continuidade da comunicação é crítica para a segurança operacional.

Além disso, quando integrado a algoritmos multiatributo, o mecanismo de média móvel pode ser aplicado simultaneamente a métricas como carga do ponto de acesso ou tempo de resposta, tornando-se um componente valioso para decisões mais contextuais e adaptativas. Essa capacidade de filtrar ruídos temporários e priorizar estabilidade torna o algoritmo ideal para ambientes altamente sensíveis à latência — como sistemas CBTC operando sem sinalização lateral.

Portanto, sob condições críticas de carga, o desempenho dos algoritmos de *handover* está diretamente ligado à sua capacidade de absorver instabilidades do meio sem comprometer a continuidade da comunicação. A avaliação comparativa evidencia que, o algoritmo de média móvel com *delay* é o mais eficaz em mitigar picos de *delay* e garantir previsibilidade na decisão de *handover*, configurando-se como uma abordagem promissora para aplicações ferroviárias automatizadas.

### 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.

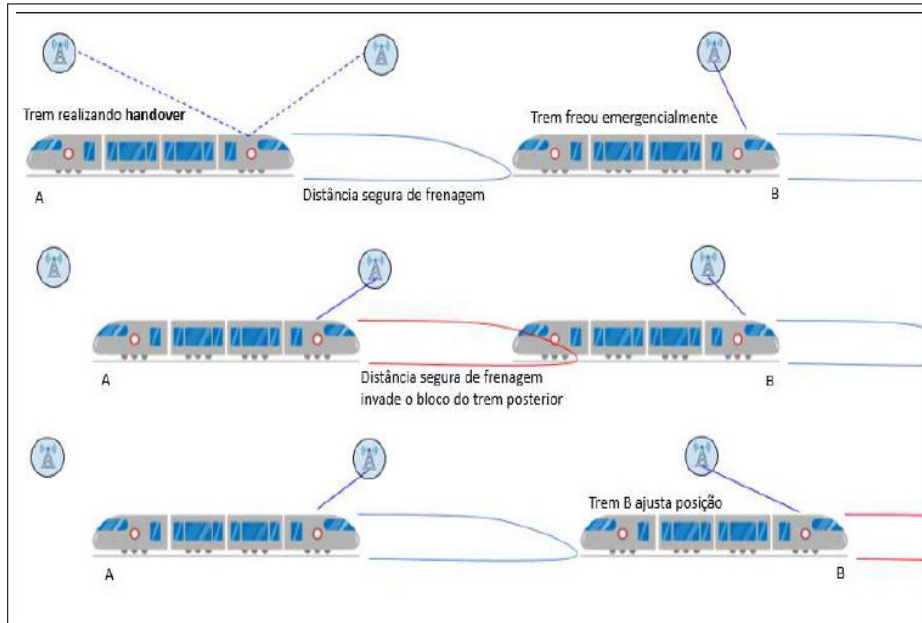
#### 3.1 Modelagem de um Ambiente CBTC Controlado

O ambiente simulado foi concebido com o objetivo de avaliar o impacto do processo de *handover* na comunicação sem fio entre o trem e a infraestrutura fixa de um sistema CBTC, em um cenário de operação urbana. A modelagem considera um trecho ferroviário retilíneo e unidimensional, sobre o qual um trem realiza deslocamento contínuo e controlado. O trem inicia seu percurso com velocidade constante de 80 km/h, compatível com padrões de operação de sistemas metroviários urbanos, sendo tal valor utilizado como base para o dimensionamento dos eventos de comunicação.

A conectividade entre o trem e o centro de controle é mantida por meio de pontos de acesso (AP) *Wi-Fi*, configurados segundo o padrão IEEE 802.11, posicionados estrategicamente ao longo da via. A movimentação do trem através das zonas de cobertura dos APs exige a execução de procedimentos de *handover*, isto é, a troca de associação entre o terminal móvel e os diferentes pontos de acesso disponíveis. Esse processo, embora essencial para garantir a continuidade da comunicação, pode introduzir atrasos temporários na entrega de pacotes — especialmente aqueles relacionados à sinalização operacional, como os comandos de frenagem automática.

Durante cada *handover*, ocorre uma breve interrupção na sessão de comunicação, que pode comprometer a resposta imediata do sistema a eventos críticos, caso o tempo de troca exceda o limite operacional tolerado. Assim, o foco da simulação está na mensuração do atraso na comunicação causada pelo *handover*, avaliando em quais condições esse atraso ultrapassa os valores admissíveis para operação segura. Conforme ilustrado na Figura 5, em que os trens A e B estão inseridos no cenário descrito e ao final do cenário da Figura 5, 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.

Figura 5 – Pontos críticos na execução do cenário simulado.



Fonte: (JUNIOR, 2023).

O deslocamento do trem foi modelado como um Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV), permitindo representar as fases de aceleração, velocidade de cruzeiro e frenagem. As equações utilizadas na simulação são:

$$v(t) = v_0 + at \quad (3.1)$$

e

$$s(t) = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (3.2)$$

onde  $v_0$  é a velocidade inicial (80 km/h),  $a$  a aceleração (ou desaceleração) aplicada, e  $s_0$  a posição inicial. Essas equações possibilitam calcular, com alta granularidade temporal, os instantes exatos em que o trem entra ou sai das áreas de cobertura dos APs, o que por sua vez permite identificar os momentos de transição de conexão e medir os respectivos atrasos de comunicação.

Embora o modelo preserve as dimensões físicas do trem (10 metros de comprimento e 3 metros de largura), essas informações têm caráter apenas ilustrativo e não interferem diretamente nos cálculos da simulação. O cenário foi projetado para reproduzir com fidelidade os aspectos essenciais da comunicação trem-terra, sem adicionar complexidades espaciais que não influenciem os fenômenos observados.

Por fim, o modelo permite a comparação entre diferentes algoritmos de decisão de *handover* sob distintas condições de carga na rede, como número de usuários - termo que,

neste contexto, refere-se às unidades móveis em operação, ou seja, aos trens - conectados simultaneamente por célula. Essa abordagem viabiliza a análise de quais estratégias provocam menores atrasos e contribuem para a manutenção da responsividade do sistema, mesmo em cenários congestionados — aspecto fundamental para a segurança e desempenho de sistemas ferroviários automatizados.

### 3.2 Estrutura de Comunicação entre Trem e Infraestrutura

A comunicação entre o trem e a infraestrutura ao longo da via é fundamental para o funcionamento de sistemas baseados em CBTC, pois permite a troca contínua de dados operacionais, comandos de controle e atualizações de posição. No ambiente simulado, foi adotado o padrão IEEE 802.11g, que opera na faixa de 2,4 GHz, como tecnologia de acesso sem fio. A escolha deste padrão baseia-se na sua ampla disponibilidade, facilidade de implementação, compatibilidade com dispositivos comerciais e desempenho satisfatório em cenários urbanos com mobilidade moderada. O IEEE 802.11g oferece taxa nominal de 54 Mbps, latência reduzida e alcance adequado para aplicações em transporte ferroviário.

Para representar o canal de comunicação entre a unidade móvel e o sistema de controle, foram definidos 3 pontos de acesso distribuídos linearmente ao longo da via, com espaçamento de 200 metros entre cada AP. Esse intervalo foi estabelecido com base na estimativa de cobertura eficaz de antenas omnidirecionais, que irradiam sinal em todas as direções, promovendo sobreposição parcial entre as zonas de cobertura. Essa configuração permite ao trem se conectar a um novo AP antes de perder completamente o sinal do AP anterior, habilitando o processo de *handover* sem interrupção abrupta, mas potencialmente com atraso.

Durante o deslocamento, o trem realiza comunicação com o centro de controle por meio de pacotes *User Datagram Protocol* (UDP) periódicos, com intervalo de envio de 100 milissegundos e carga média de 512 bytes por pacote. O protocolo UDP foi escolhido por sua leveza e baixa sobrecarga, sendo apropriado para aplicações onde a rapidez de entrega é mais relevante que a garantia de retransmissão — característica alinhada aos sistemas CBTC, que operam em tempo real. A aplicação simula o envio contínuo de mensagens de controle (como comandos de frenagem) entre o trem e a infraestrutura, considerando uma latência tolerável máxima de 50 ms para cada pacote enviado. Acima deste limiar, há risco operacional de resposta tardia.

A detecção do momento exato de troca de conexão é realizada com base na in-

tensidade do sinal recebido. À medida que o trem avança e se aproxima do limite da célula atual, inicia-se a avaliação das potências de sinal dos APs vizinhos. O algoritmo de decisão de *handover* (especificado na seção 3.4) define os critérios para ativação da troca. Esse momento representa uma janela crítica, pois pode haver interrupção temporária na comunicação, resultando em atraso de entrega dos pacotes.

O atraso de comunicação observado nesse processo — também conhecido como latência — é calculado com base na diferença entre dois eventos: o envio do último pacote ao AP anterior e o recebimento do primeiro pacote pelo novo AP após a troca. Esse intervalo é registrado como *delay* médio de comunicação, e representa a métrica central deste estudo. Cabe destacar que, além do próprio *handover*, outros fatores como interferência de sinal, colisão de pacotes e sobrecarga de usuários também podem contribuir para o aumento da latência em sistemas reais.

### 3.2.1 Modelagem do canal de comunicação sem fio

A modelagem do canal visa representar matematicamente os principais efeitos que degradam o sinal durante a transmissão. Segundo (RAPPAPORT, 2002), os canais sem fio são afetados por três fenômenos principais: perda de percurso, sombreamento e desvanecimento de pequena escala.

### 3.2.2 Perda de percurso

A perda de percurso ocorre devido à dispersão da energia do sinal à medida que ele se propaga. Um modelo amplamente utilizado é o modelo log-distância, cuja equação é dada por:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right), \quad (3.3)$$

onde:

- $PL(d)$ : perda de percurso em decibéis (dB) na distância  $d$ ;
- $PL(d_0)$ : perda de percurso na distância de referência  $d_0$ ;
- $\alpha$ : parâmetro que caracteriza a atenuação do sinal;
- $d$ : distância entre transmissor e receptor.

### 3.2.3 Sombreamento

O sombreamento refere-se às flutuações de grande escala na intensidade do sinal recebido. Essas flutuações ocorrem devido a obstruções como edifícios, montanhas e vegetação, que bloqueiam ou refletem o caminho direto entre o transmissor e o receptor, que causa perdas no sinal e pode impactar significativamente o desempenho de sistemas de comunicação sem fio. O fenômeno de sombreamento é modelado por meio de uma variável aleatória que segue uma distribuição log-normal e caracterizada por um desvio padrão  $\sigma_{sf}$ , conforme descrita abaixo:

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

onde:

- $\sigma_{sf}$  é o desvio padrão do sombreamento. Controla a dispersão dos valores do sombreamento em torno da média, ou seja, a intensidade das flutuações do sinal;
- $\mathcal{N}(0, 1)$  representa uma variável aleatória com distribuição normal padrão, com média zero e desvio padrão de 1.

### 3.2.4 Desvanecimento de pequena escala

O desvanecimento de pequena escala refere-se às variações rápidas e aleatórias na intensidade de um sinal recebido, observadas ao longo de curtas distâncias ou períodos de tempo. Essas flutuações são causadas principalmente pela interferência construtiva e destrutiva entre múltiplas réplicas do sinal transmitido, que chegam ao receptor por diferentes trajetos devido à reflexão, difração e espalhamento em objetos do ambiente — fenômeno conhecido como propagação por multipercurso (RAPPAPORT, 2002).

Para modelar esse fenômeno, é comum utilizar distribuições estatísticas que representam a magnitude da resposta do canal. Quando não há linha de visada, a distribuição de Rayleigh é frequentemente adotada, assumindo que o sinal recebido é composto por múltiplos componentes com fases aleatórias. Por outro lado, em cenários com linha de visada, a distribuição de Rice pode ser mais apropriada, pois considera a presença de um componente dominante (MOLISCH, 2011).

$$FF = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.5)$$

Em que  $X$  e  $Y$  são variáveis aleatórias Gaussianas independentes com média zero e variância  $\frac{\sigma^2}{2}$ , resultando em uma variável  $FF$  com distribuição Rayleigh.

### 3.2.5 Cálculo da SINR

A *Signal to Interference-plus-Noise Ratio* (SINR) é uma métrica fundamental para a avaliação da qualidade de um enlace em comunicações sem fio. Ela expressa a relação entre a potência do sinal desejado recebido e a soma das potências dos sinais interferentes e do ruído térmico, sendo geralmente apresentada em decibéis (dB). Em um cenário composto por múltiplos pontos de acesso, a SINR para o usuário  $k$ , no instante de símbolo  $j$ , é dada por:

$$\gamma_{k,j} = \frac{|\mathbf{h}_{k,j}|^2 p_{\text{tx}}}{\sum_{k'=1, k' \neq k}^K |\mathbf{h}_{k',j}|^2 p_{\text{tx}} + \eta}, \quad (3.6)$$

onde:

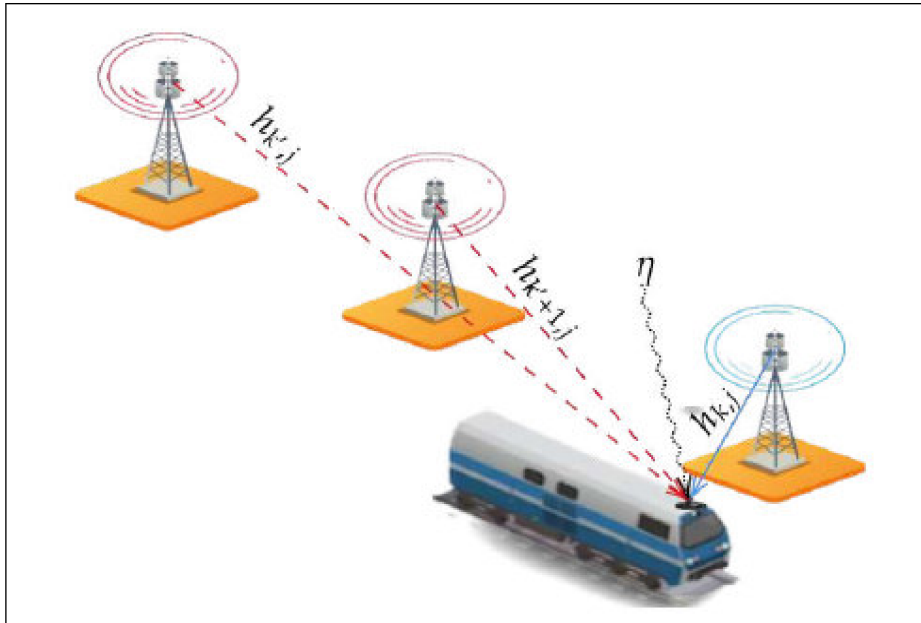
- $\gamma_{k,j}$  é a SINR do usuário  $k$  no instante  $j$ ;
- $\mathbf{h}_{k,j}$  representa o coeficiente de canal entre o AP  $k$  e o receptor no instante  $j$ ;
- $k' \in \{1, 2, \dots, K\}$  são os índices dos APs interferentes
- $p_{\text{tx}}$  corresponde à potência de transmissão dos APs;
- $\eta$  é a potência do ruído gaussiano aditivo;
- $K$  é o número total de APs presentes no cenário.

A soma presente no denominador contabiliza a interferência produzida pelos APs distintos daquele ao qual o usuário está conectado, refletindo o impacto de transmissões simultâneas no mesmo ambiente.

Os coeficientes de canal  $\mathbf{h}_{k,j}$  são assumidos como variáveis aleatórias complexas gaussianas, independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), com média zero e variância unitária. Essa modelagem caracteriza um ambiente de desvanecimento rápido (*fast fading*), típico de cenários com elevada mobilidade.

A Figura 6 ilustra esse cenário. Nela, observa-se um trem conectado ao AP destacado em azul, cujo canal  $\mathbf{h}_{k,j}$  representa o sinal desejado. De forma simultânea, o trem é afetado por sinais oriundos de outros APs, representados em vermelho, cujos canais  $\mathbf{h}_{k',j}$  e  $\mathbf{h}_{k'+1,j}$  constituem fontes de interferência. Além disso, o enlace está sujeito à presença de ruído gaussiano branco, representado por  $\eta$ , que contribui adicionalmente para a degradação da qualidade da recepção.

Figura 6 – Sinal de interesse e interferente usados para cálculo da SINR do trem.



Fonte: (JUNIOR, 2023).

### 3.2.6 Atraso médio de comunicação

O protocolo no 802.11g baseia-se no *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA) e adota um esquema de retrocesso exponencial binário 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 *Media Access Control* (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 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):

$$E_{slot} = (1 - P_{tr}) * \beta + P_{tr} * P_s * T_s + P_{tr} * (1 - P_s) * T_c, \quad (3.8)$$

onde:

- $P_{tr}$  corresponde probabilidade de que pelo menos um AP transmita um pacote no *slot* considerado;
- $\beta$  é o tamanho do *slot*;
- $P_s$  define a probabilidade de que uma transmissão de pacote ocorrida seja sucedida;
- $T_s$  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 Ambiente de Simulação e Estratégia Computacional

A simulação computacional é uma ferramenta essencial para a avaliação do desempenho de sistemas críticos como o CBTC, especialmente em situações que envolvem variabilidade de usuários e decisões de conectividade como o *handover*. Neste trabalho, foi implementada uma simulação em ambiente *MATLAB*, focada no comportamento do subsistema de comunicação durante a transição entre pontos de acesso, com destaque para o atraso na entrega de comandos de frenagem.

O modelo simulado inclui o movimento do trem em uma trajetória unidimensional com perfil de velocidade variável, representado por um sistema Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV). A infraestrutura *Wi-Fi* foi construída com base no padrão IEEE 802.11, composta por 3 pontos de acesso posicionados linearmente ao longo da via. A comunicação entre o trem e o centro de controle foi realizada via protocolo UDP, com envio de pacotes de 512 bytes a cada 100 milissegundos.

A cada instante da simulação, são atualizados o posicionamento do trem, os valores de intensidade de sinal recebidos de cada ponto de acesso e o estado da conexão ativa. Quando as condições de troca são detectadas, o algoritmo de *handover* selecionado executa a transição, e o sistema registra automaticamente o tempo de atraso entre o último pacote recebido do ponto de acesso anterior e o primeiro recebido após o *handover*.

A fim de representar as incertezas do ambiente operacional, foi utilizada a abordagem estatística de Monte Carlo. Esse método consiste em realizar múltiplas simulações com variações aleatórias nos parâmetros de entrada, permitindo estimar o comportamento do sistema sob diferentes condições (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964) . No presente trabalho, foram realizadas 100 execuções independentes por cenário de carga, considerando variações nos tempos de atraso (*delay*) introduzidos na comunicação. Três perfis de carga distintos foram combinados para compor os cenários analisados.

Os principais parâmetros utilizados na simulação estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor	Fonte
Velocidade inicial do trem ( $v_0$ )	80 km/h	(ZHU L.; YU, 2010)
Taxa de Freio de Emergência ( $r$ )	2 m/s <sup>2</sup>	(BRENNAN M.; FOIADELLI, 2018)
Posição inicial do trem ( $s_0$ )	10 m	
Comprimento do vagão (C)	10 m	
Largura do vagão (L)	3 m	
Frequência (f)	2.4 GHz	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Largura de Banda (W)	20 MHz	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Potência de Transmissão (Pt)	20 dBm	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Expoente de Perda de Percurso ( $\alpha$ )	2	(KAREDAL <i>et al.</i> , 2010)
Desvanecimento de Pequena Escala IID 6 dB	2	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Densidade Espectral de Ruído ( $N_0$ )	-101 dBm/Hz	
Sensibilidade do Receptor ( $S_{rx}$ )	-90 dBm/Hz	
Sombreamento $\sigma_s$	4 dB	
Tamanho do Pacote (k)	512 bytes	(FAROOQ; SOLER, 2017)
Monte Carlo	100	

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.4 Técnicas de *Handover* Avaliadas

Nesta etapa do estudo, foram implementados e avaliados diferentes algoritmos de *handover* com o intuito de verificar seus impactos no desempenho da comunicação em sistemas CBTC. Esses algoritmos definem os critérios utilizados para que o trem troque de ponto de acesso ao longo da via, com o objetivo de manter a conectividade contínua e minimizar falhas ou atrasos durante a transmissão de dados críticos.

Como foco deste trabalho está no atraso de comunicação gerado durante o processo de *handover*, especialmente em situações onde mensagens de frenagem devem ser transmitidas ao trem. Sendo assim, a escolha e o comportamento de cada algoritmo influenciam diretamente na performance do sistema simulado.

Foram selecionadas 4 abordagens distintas para tomada de decisão de *handover*, que

variam desde critérios simples baseados na intensidade do sinal até técnicas mais robustas que consideram médias móveis. As descrições detalhadas de cada algoritmo são apresentadas nas subseções a seguir.

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

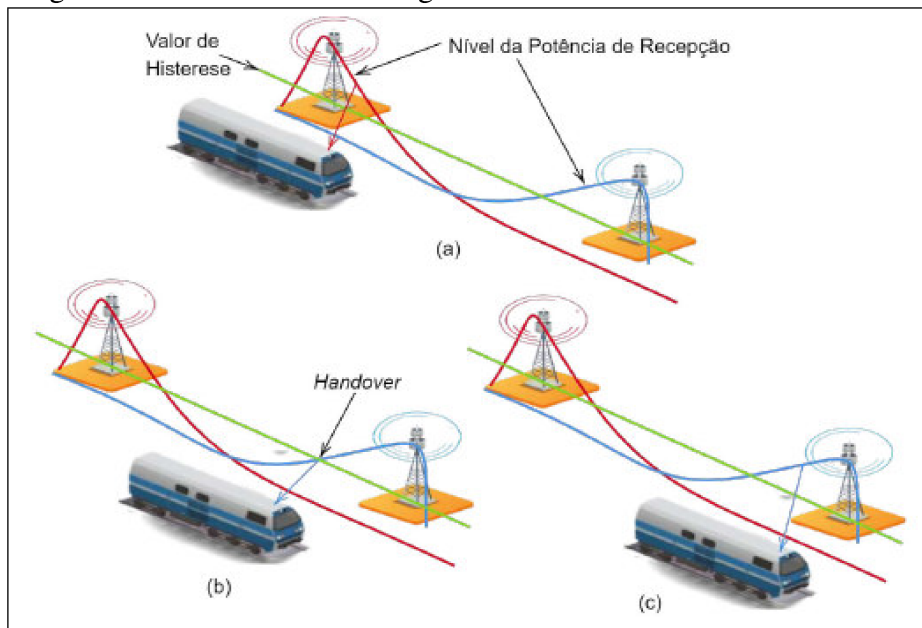
O algoritmo de *Handover* Baseado em Potência de Recepção com Histerese (HPR-H) adota uma abordagem mais conservadora na tomada de decisão quanto à troca de AP. Em vez de acionar imediatamente o *handover* ao identificar uma queda na potência do sinal do AP atual, o algoritmo introduz uma margem de histerese como parâmetro adicional para evitar oscilações excessivas de conexão.

A decisão pelo *handover* somente é efetivada quando a potência de recepção de um AP vizinho excede a potência de recepção do AP atual em um valor mínimo pré-definido, correspondente à margem de histerese. Essa técnica visa mitigar decisões precipitadas em ambientes com variações rápidas de sinal, promovendo maior estabilidade na comunicação entre trem e solo.

A utilização da margem de histerese reduz significativamente o número de trocas desnecessárias de APs, o que é especialmente relevante em cenários dinâmicos como os sistemas CBTC, nos quais a confiabilidade da comunicação é crítica para a operação segura e eficiente. Ao garantir que apenas mudanças realmente vantajosas sejam efetuadas, o HO por histerese contribui para a melhoria do desempenho do sistema como um todo.

A Figura 7 ilustra o funcionamento da lógica decisória aplicada pelo algoritmo com histerese, por meio de três momentos distintos. Inicialmente na etapa (a), o terminal ainda está conectado ao AP atual (sinal vermelho). Apesar de o AP vizinho (sinal azul) estar se aproximando em intensidade, ainda não há vantagem significativa. A linha verde representa a margem de histerese, que ainda não foi superada — logo, o *handover* não é autorizado. Na segunda etapa (b), o ponto crítico de decisão. A intensidade do sinal do AP vizinho excede a do AP atual e ultrapassa o valor da margem de histerese. O terminal reconhece a condição vantajosa e realiza o *handover*, migrando para o novo AP. Por fim, na etapa (c), após a troca de AP, o terminal continua conectado ao novo ponto (sinal azul), cuja intensidade permanece superior. A troca foi validada por uma condição robusta, evitando flutuações ou reconexões desnecessárias.

Figura 7 – *Handover* com margem de Histerese.



Fonte: (JUNIOR, 2023).

### 3.4.2 *Handover Baseado em Limiar de Potência de Sinal (HPS-L)*

O algoritmo de *Handover* Baseado em Limiar de Potência de Sinal (HPS-L) fundamenta-se na verificação da intensidade do sinal recebido (medido em dBm) pelo terminal móvel conectado a um AP. Para sua aplicação, define-se um valor mínimo — o limiar de potência — abaixo do qual a comunicação é considerada degradada.

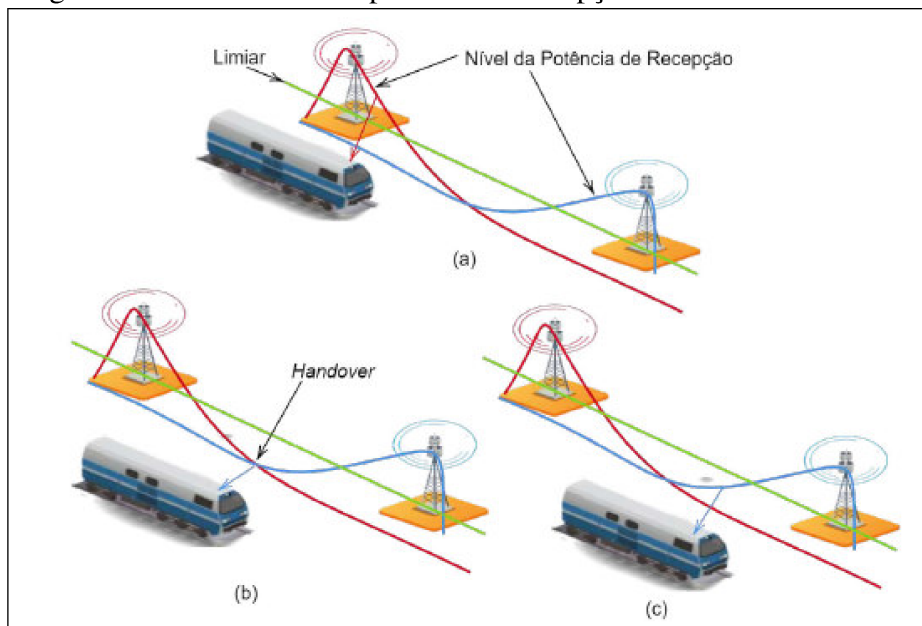
Durante a operação, enquanto a potência do AP atual estiver acima do limiar pré-estabelecido, o *handover* não é executado, mesmo que outro AP vizinho apresente sinal superior. Essa estratégia visa evitar trocas desnecessárias provocadas por flutuações momentâneas, promovendo maior estabilidade na conexão entre o trem e a infraestrutura.

A troca de AP ocorre somente quando duas condições são simultaneamente atendidas: (i) a potência do sinal do AP atual está abaixo do limiar definido; (ii) existe ao menos um AP vizinho cuja intensidade de sinal é superior à do AP atual. Essa dupla verificação assegura maior robustez ao processo decisório, evitando migrações instáveis e reforçando a confiabilidade na comunicação — fator essencial em sistemas CBTC, nos quais atrasos ou interrupções podem impactar diretamente a operação ferroviária em tempo real.

A Figura 8 ilustra o funcionamento do algoritmo, em três momentos distintos. Na etapa (a), o trem está posicionado em uma área onde a intensidade do sinal do AP atual permanece acima do limiar estabelecido. Apesar de o AP vizinho apresentar um sinal crescente, não há degradação suficiente na conexão para justificar a troca, portanto, o *handover* não é executado.

Na segunda etapa (b), o sinal do AP atual sofre uma queda e ultrapassa negativamente o limiar de potência, enquanto o AP vizinho já apresenta sinal superior. Ambas as condições do algoritmo são satisfeitas, e o handover é deflagrado, redirecionando a conexão para o AP mais vantajoso. E por fim, na etapa (c), após o *handover*, a conexão do trem permanece com o novo AP, cuja intensidade de sinal continua acima da do AP anterior. O algoritmo evita qualquer retorno à conexão anterior, mesmo se houver flutuações momentâneas, promovendo a estabilidade da comunicação.

Figura 8 – *Handover* com potência de recepção com limiar.



Fonte: (JUNIOR, 2023)

### 3.4.3 *Handover* Baseado em Média Móvel (HMM)

O algoritmo de *Handover* Baseado em Média Móvel (HMM) propõe uma estratégia estatística voltada para a suavização de variações abruptas na qualidade do sinal recebido, promovendo maior estabilidade na conexão entre o trem e os pontos de acesso ao longo da via. Essa abordagem se mostra especialmente relevante em sistemas CBTC, nos quais a comunicação sem fio precisa ser confiável e resiliente mesmo sob condições adversas, como tráfego intenso, efeitos de sombreamento e interferências ambientais.

No contexto desse algoritmo, a média móvel exerce papel essencial na tomada de decisão sobre o momento ideal para realizar a troca de ponto de acesso ao longo do trajeto. Em termos práticos, a técnica permite suavizar oscilações na potência de recepção dos diferentes

APs à medida que o trem se desloca, utilizando não apenas medições instantâneas, mas também o histórico recente da qualidade do sinal.

A abordagem, denominada HMM, calcula continuamente a média da potência de recepção dentro de uma janela temporal que acompanha o movimento do trem. Ao incorporar múltiplas amostras sucessivas, o algoritmo reduz os impactos de flutuações momentâneas e identifica tendências consistentes, contribuindo para decisões mais robustas e oportunas.

Com isso, o sistema prioriza a manutenção da conectividade com o ponto de acesso que oferece o sinal mais estável e confiável em cada trecho da via, evitando alternâncias excessivas e garantindo o desempenho eficiente do sistema de comunicação.

Neste trabalho, foi implementada a Média Móvel Simples (MMS), que atribui pesos iguais a todos os valores contidos na janela de cálculo. À medida que essa janela se desloca ao longo dos dados, os valores mais antigos são descartados e novos valores são incorporados, permitindo que a média reflita as variações temporais da qualidade de conexão.

A potência de recepção do trem, denotada por  $P_r(k, j, n)$ , proveniente do ponto de acesso  $k$  no instante  $j$ , considerando uma janela de  $n$  amostras, é definida pela equação:

$$P_r(k, j, n) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} P_r(j-i) \quad (3.9)$$

Durante a execução do algoritmo, dois loops aninhados percorrem os instantes de tempo ( $N_{\text{slot}}$ ) e os diferentes pontos de acesso ( $K$ ). Em cada iteração, os valores de potência de recepção são armazenados em uma matriz temporal  $P_r(k, j)$ . A principal estratégia para determinação do *handover* consiste na aplicação da média móvel, que suaviza flutuações temporais nas potências de recepção.

Quando o instante atual  $j$  excede o tamanho da janela  $n$ , o algoritmo calcula a média móvel para cada AP e identifica aquele com maior potência. Se o índice correspondente for diferente do ponto de acesso atual ( $\text{idxAP}$ ), a variável  $\text{idxNovoAP}$  é atualizada com o novo índice. Caso contrário, mantém-se a conexão atual. Nos instantes iniciais ( $j \leq n$ ), o algoritmo conserva a conexão com o ponto de acesso original, conforme descrito no Algoritmo 1.

Estudos prévios, como o de (CHAN *et al.*, 2017), sugerem que o uso da média móvel pode reduzir o número de *handovers* desnecessários e melhorar a latência média de comunicação. No entanto, os resultados obtidos neste trabalho indicaram que o desempenho do HMM foram inferiores aos de outros algoritmos avaliados, apresentando maior atraso médio nas transições e menor estabilidade em determinados cenários simulados.

Dessa forma, o HMM foi utilizado como base comparativa, mas não foi adotado como referência principal, evidenciando a necessidade de critérios mais responsivos em aplicações ferroviárias críticas, onde a tomada de decisão precisa ocorrer com agilidade e confiabilidade.

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo HMM

---

**Entrada :**  $n, idxAP$

**Saída :**  $idxNovoAP$

```

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
  | | Calcular média móvel  $P_r(k, j, n)$ 
  | | Identificar índice  $k$  com maior  $P_r$ 
  | | if  $k \neq idxAP$  then
  | | |  $idxNovoAP \leftarrow k$ 
  | | else
  | | |  $idxNovoAP \leftarrow idxAP$ 
  | | end
  | else
  | |  $idxNovoAP \leftarrow idxAP$ 
  | end
end

```

---

#### 3.4.4 Handover Baseado em Média Móvel com Delay (HMMD)

O algoritmo de *Handover* Baseado em Média Móvel com Delay (HMMD), propõe uma abordagem aprimorada para a tomada de decisão de AP em sistemas de comunicação embarcada. Sua lógica combina a suavização da intensidade do sinal recebido, por meio de uma média móvel, com um mecanismo de persistência temporal que evita decisões precipitadas.

Durante a operação, o trem monitora continuamente a intensidade do sinal dos APs disponíveis. A média móvel é aplicada para atenuar flutuações transitórias, proporcionando uma visão mais estável da qualidade do canal. No entanto, diferentemente da média móvel convencional, o HMMD introduz um intervalo de *delay* — definido como uma janela de tempo mínima — durante o qual a tendência de deterioração do sinal precisa se manter antes que o

*handover* seja efetivado.

Esse mecanismo atua como um filtro decisório, impedindo que variações momentâneas ou ruídos provoquem trocas desnecessárias de conexão. A decisão de troca só ocorre quando há evidência consistente de degradação do sinal, e um AP vizinho apresenta intensidade superior de forma sustentada. Essa abordagem garante maior estabilidade na conexão e reduz significativamente o tempo de resposta, mesmo em cenários de alta carga.

Estudos recentes indicam que a escolha do algoritmo de *handover* impacta diretamente a frequência de interrupções e o tempo de latência em sistemas CBTC (WANG *et al.*, 2017; SOOD *et al.*, 2018), sendo essencial considerar técnicas que equilibrem reatividade e estabilidade. O HMMD se alinha a essa necessidade ao mitigar os efeitos negativos da média móvel tradicional, que tende a retardar decisões em ambientes dinâmicos (SOOD *et al.*, 2018). Além disso, pesquisas aplicadas em sistemas ferroviários urbanos reforçam a importância de abordagens adaptativas para garantir a confiabilidade da comunicação embarcada (JUNIOR, 2023).

## 4 RESULTADOS

Em sistemas CBTC, o processo de *handover* entre os *Access Points* do subsistema de comunicação de dados configura-se como um elemento crítico para a continuidade da operação ferroviária. A ocorrência de erros ou atrasos significativos durante o *handover* pode comprometer a entrega tempestiva de comandos essenciais — como o de frenagem — ocasionando degradação na transmissão de dados e impacto direto na confiabilidade operacional do sistema.

Considerando que o CBTC depende integralmente do DCS para executar suas funcionalidades de controle e sinalização, investigações voltadas à mitigação de atrasos de comunicação tornam-se estratégicas. A redução desses atrasos pode aprimorar a resposta do sistema a eventos críticos, aumentar a segurança operacional e elevar a qualidade da experiência do usuário final, ao mesmo tempo em que pode contribuir para a eficiência de custo do projeto.

Nesse contexto, a aplicação e análise de técnicas de *handover* alternativas ou não convencionais apresentam-se como uma via promissora para elevar a robustez da comunicação. Este trabalho propõe a avaliação comparativa de quatro algoritmos de decisão de *handover*, modelados e testados em ambiente de simulação, com enfoque específico na análise do atraso de comunicação provocado pelo processo de troca de AP.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros adotados para cada algoritmo implementado no simulador, destacando as particularidades de configuração que impactam no tempo de resposta do sistema.

Tabela 2 – Parâmetros de Configuração dos Algoritmos de *handover*.

Algoritmo	Parâmetro de Decisão	Valores Utilizados	Limiar <i>Delay</i>
HPR-H	Margem de histerese (dB)	[3, 6, 9, 12]	
HPS-L	Limiar de Potência de Recepção (dBm)	[-10, -20, -30, -40]	
HMM	Tamanho da Janela da Média Móvel (n)	[2, 4, 6, 8]	
HMMD	Tamanho da Janela da Média Móvel (n)	[2, 4, 6, 8]	$5 \times 10^{-3}$ ms

Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.1 Resultados para o HPR-H

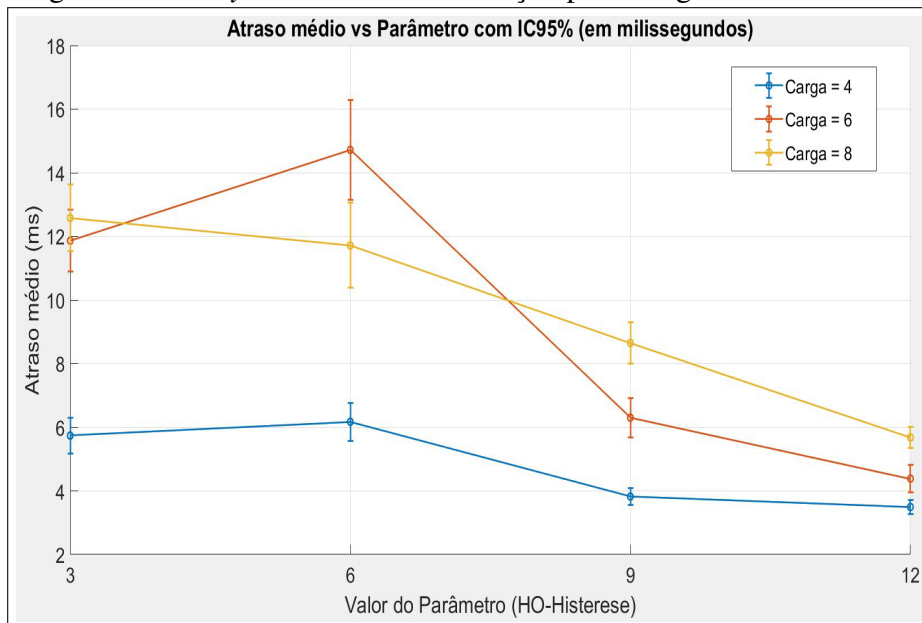
O algoritmo de HPR-H foi avaliado em ambiente de simulação com o objetivo de analisar seu impacto sobre o tempo de comunicação durante a troca de ponto de acesso. Foram consideradas 4 configurações distintas de margem de decisão: **3 dB, 6 dB, 9 dB e 12 dB**,

conforme definido na Tabela 2. Cada configuração foi testada em três cenários de carga de rede: com 4, 6 e 8 usuários (trens) conectados simultaneamente por ponto de acesso.

A Figura 9 apresenta o gráfico de *delay* médio de comunicação obtido para diferentes margens de histerese, nos três cenários simulados. De modo geral, observa-se uma tendência de redução no *delay* médio de comunicação conforme o valor da margem de histerese aumenta. Esse comportamento indica que margens mais amplas contribuem para uma comunicação mais estável, por reduzirem a frequência de trocas de ponto de acesso desnecessárias.

No cenário com carga de 4 usuários, o maior *delay* foi registrado com margem de 6 dB (6,1727 ms), enquanto o menor valor ocorreu com 12 dB (3,4938 ms). Para 6 usuários, o *delay* também apresentou queda significativa, com maior valor registrado em 6 dB (14,7202 ms) e menor em 12 dB (4,3855 ms). Já no cenário com carga de 8 usuários, o maior *delay* registrado foi na margem de 3 dB (12,5795 ms) e valor mínimo em 12 dB (5,6762 ms), mantendo a mesma tendência observada nos demais casos.

Figura 9 – *Delay* Médio de Comunicação para o algoritmo de HPR-H.



Fonte: elaborado pelo autor.

Esse comportamento sugere que margens mais amplas de histerese contribuem significativamente para a redução da latência, ao impedir que o sistema execute *handovers* precipitadamente em resposta a oscilações temporárias no sinal. Ao adiar a decisão de troca até que a diferença de sinal ultrapasse um limiar mais robusto, o algoritmo evita interrupções frequentes na comunicação, promovendo maior continuidade e estabilidade na transmissão de dados.

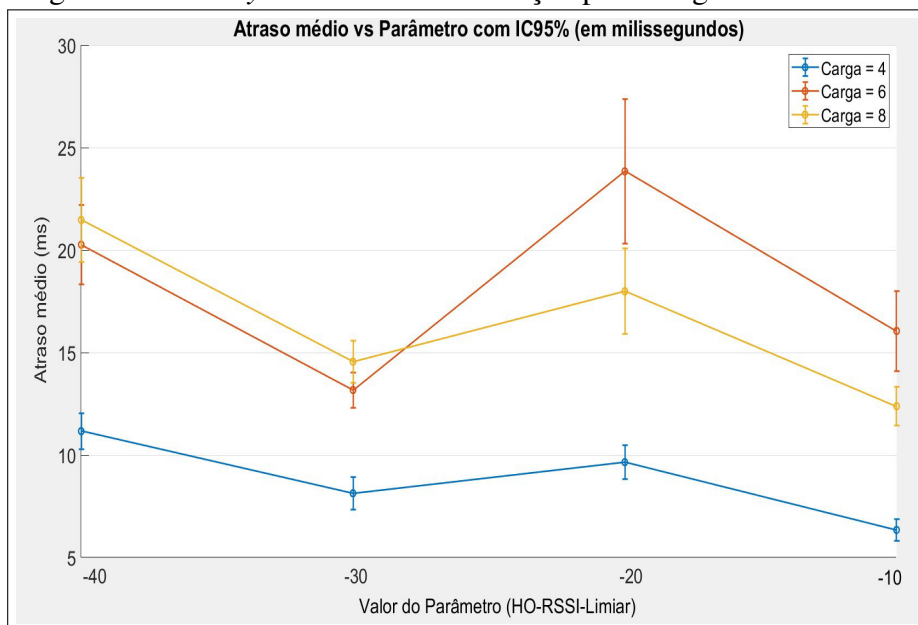
Por outro lado, é necessário considerar que, em contextos operacionais dinâmicos, margens excessivamente altas podem retardar *handovers* necessários, especialmente quando há degradação real e persistente na qualidade do sinal. No entanto, dentro dos limites simulados, a configuração com 12 dB mostrou-se mais eficiente na mitigação do *delay* de comunicação, indicando que, neste estudo específico, essa margem proporcionou o melhor equilíbrio entre estabilidade e capacidade de resposta.

## 4.2 Resultados para o HPS-L

O algoritmo HPS-L foi avaliado com 4 configurações distintas de limiar de potência de recepção: **-10 dBm**, **-20 dBm**, **-30 dBm** e **-40 dBm**, conforme definido na Tabela 2. Cada configuração foi testada em três cenários de carga de rede: com 4, 6 e 8 usuários conectados simultaneamente por ponto de acesso.

A seguir, são apresentados os resultados do atraso médio de comunicação obtidos para o algoritmo HPS-L, considerando os diferentes valores de limiar e os três cenários de carga de rede.

Figura 10 – *Delay* Médio de Comunicação para o algoritmo HPS-L.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 10 apresenta o gráfico de *delay* médio de comunicação obtido para cada valor de limiar nos três cenários simulados. De modo geral, observa-se que valores mais baixos de limiar, como **-40 dBm**, estão associados a maiores atrasos médios de comunicação, enquanto

limiares mais elevados tendem a reduzir esse tempo. No cenário com 4 usuários, observa-se que o maior valor de *delay* foi registrado com o limiar de  $-40$  dBm (11,1627 ms), enquanto o menor *delay* foi registrado com limiar de  $-10$  dBm (6,3443 ms).

Para 6 usuários, o maior valor marcado foi com limiar de  $-20$  dBm (23,8417 ms) e menor em  $-30$  dBm (13,1723 ms). Já no cenário com carga de 8 usuários, o maior *delay* apontou no limiar de  $-40$  dBm (21,4681 ms) e valor mínimo em  $-10$  dBm (12,381 ms). Esses resultados indicam que o valor do limiar exerce influência direta sobre o tempo de comunicação, tal comportamento se repete nos diferentes níveis de carga, reforçando a consistência dos dados obtidos.

Esse padrão indica que quanto mais negativo o limiar RSSI configurado, maior é a resistência do algoritmo em realizar o *handover*, o que pode postergar decisões relevantes e impactar diretamente na latência da comunicação. O algoritmo aguarda que o nível de sinal decaia bastante antes de efetuar a troca, o que, em ambientes dinâmicos como sistemas CBTC, pode comprometer a entrega apropriada de comandos críticos.

Por outro lado, valores menos negativos — como  $-10$  dBm — tornam o sistema mais ágil ao identificar deteriorações na qualidade do sinal, permitindo trocas mais rápidas de AP e reduzindo o tempo de comunicação. Contudo, é necessário equilibrar essa agilidade com o risco de excesso de trocas, o que pode gerar instabilidade se não bem controlado.

Portanto, dentro dos parâmetros simulados, o valor de  $-10$  dBm mostrou-se mais eficiente em termos de *delay* de comunicação, sobretudo sob cargas elevadas, apontando para a importância da calibragem adequada do limiar RSSI.

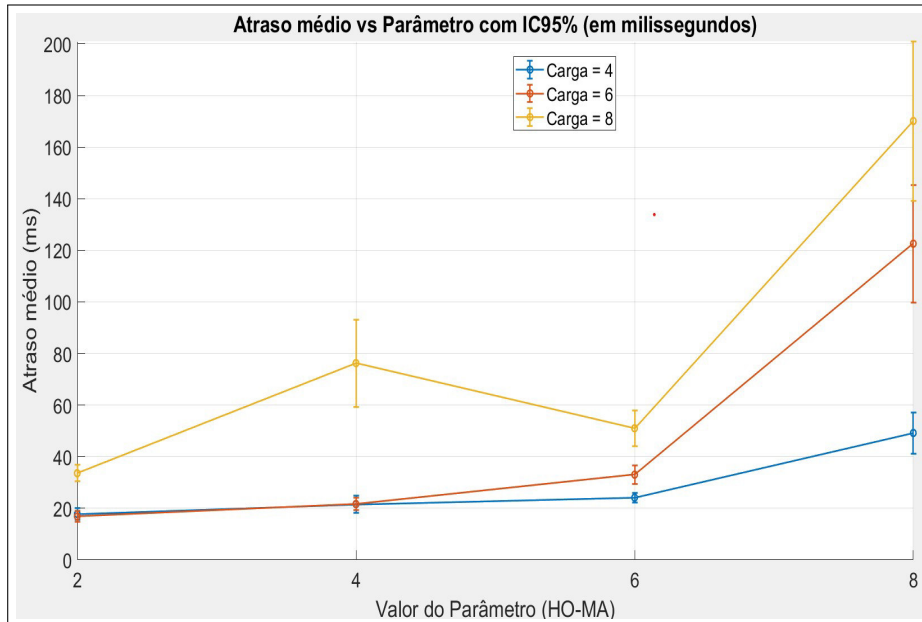
### 4.3 Resultados para o HMM

O algoritmo HMM foi avaliado com 4 configurações distintas de tamanho de janela de suavização:  $n = 2, 4, 6$  e  $8$ , conforme definido na Tabela 2. Cada configuração foi testada em três cenários de carga de rede: com 4, 6 e 8 usuários conectados simultaneamente por ponto de acesso.

A Figura 11 apresenta o gráfico de *delay* médio de comunicação obtido para cada valor de  $n$  nos três cenários simulados. Em ambos os cenários, observa-se um aumento significativo no *delay* médio de comunicação com o crescimento do parâmetro de suavização. No caso de uma carga de 4 usuários, o valor máximo *delay* foi registrado com  $n = 8$  (49,1946 ms), enquanto o menor valor ocorreu com  $n = 2$  (17,8174 ms). No cenário com 6 usuários, o máximo

valor de  $n$  foi marcado em  $n = 8$  (122.555 ms) e o mínimo valor em  $n = 2$  (16.8536ms). Já no cenário com 8 usuários, o impacto é ainda mais expressivo, o *delay* máximo ocorre em  $n = 8$  (170,101 ms) e o mínimo em  $n = 2$  (33,5823 ms).

Figura 11 – *Delay* Médio de Comunicação para o algoritmo HMM.



Fonte: elaborado pelo autor.

Esse padrão revela que quanto maior a janela de suavização, mais lenta se torna a capacidade do algoritmo em reagir às variações reais do sinal. Embora a Média Móvel tenha como objetivo reduzir instabilidades causadas por ruído, em ambientes dinâmicos como o CBTC uma suavização excessiva pode retardar respostas críticas, acumulando latência na comunicação.

Além disso, os dados do cenário com 8 usuários indicam que o algoritmo é sensível à carga, apresentando escalabilidade limitada sob condições de tráfego elevado. O aumento acentuado do *delay* na configuração com  $n = 8$  reforça a necessidade de ajustes criteriosos para evitar impacto negativo na confiabilidade operacional.

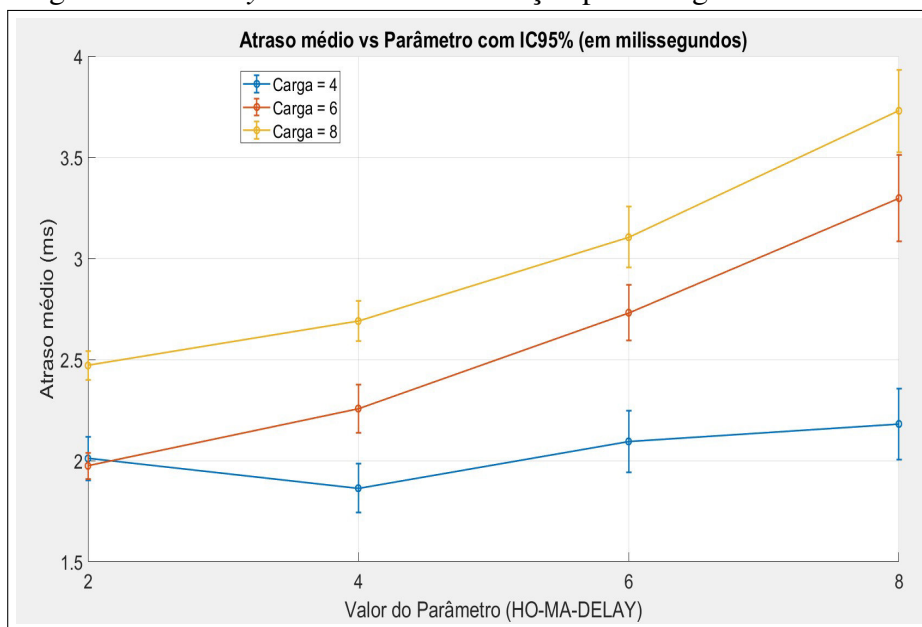
Portanto, no contexto simulado, o algoritmo de Média Móvel não demonstrou ganhos em termos de redução de *delay* em relação às demais técnicas testadas — ao contrário, apresentou os maiores valores observados, especialmente sob carga elevada. Essa evidência reforça a importância de se avaliar o equilíbrio entre suavização e agilidade na tomada de decisão de *handover*.

#### 4.4 Resultados para o HMMD

O algoritmo HMMD foi avaliado com 4 configurações distintas de tamanho de janela de suavização: **n = 2, 4, 6 e 8**, conforme definido na Tabela 2. Cada configuração foi testada em três cenários de carga de rede: com 4, 6 e 8 usuários conectados simultaneamente por ponto de acesso. Além disso, foi adotado um valor fixo de limiar de persistência temporal igual a  $5 \times 10^{-3}$  ms, representando o tempo mínimo necessário para que a condição de *handover* se mantenha antes da troca de conexão.

A Figura 12 apresenta o gráfico de *delay* médio de comunicação obtido para cada valor de *n* nos três cenários simulados. Em todos os casos, observa-se que o algoritmo HMMD apresentou valores significativamente menores de *delay* em comparação com o algoritmo HMM, evidenciando o impacto positivo da introdução do limiar de *delay*. No cenário com 4 usuários, o valor máximo de *delay* foi registrado com *n* = 8 (2.1813 ms), enquanto o mínimo ocorreu com *n* = 4 (1.8634 ms). Para 6 usuários, o máximo valor de *delay* foi em *n* = 8 (3.2978 ms) e *delay* mínimo em *n* = 2 (1.9742 ms). Já no cenário com 8 usuários, o *delay* médio foi máximo em *n* = 8 (3.7296 ms) e o mínimo foi registrado em *n* = 2 (2.4703 ms).

Figura 12 – *Delay* Médio de Comunicação para o algoritmo HMMD.



Fonte: elaborado pelo autor.

Esse padrão revela que, embora o aumento da janela de suavização torne o algoritmo menos responsivo às variações do sinal, o mecanismo de persistência temporal introduzido pelo HMMD compensa essa limitação, evitando decisões precipitadas e reduzindo o número de

*handovers* desnecessários. Como resultado, o *delay* médio permanece em níveis baixos mesmo sob carga elevada.

Além disso, os dados indicam que o algoritmo apresenta melhor escalabilidade, com crescimento mais controlado do *delay* conforme aumenta o número de trens. Essa característica torna o HMMD uma alternativa promissora para ambientes dinâmicos como o CBTC, onde a estabilidade da comunicação é crítica para a operação segura e eficiente do sistema.

Portanto, no contexto simulado, o algoritmo demonstrou ganhos expressivos em termos de redução de *delay*, superando todas as demais técnicas testadas. Essa evidência reforça a importância de se considerar mecanismos de persistência na tomada de decisão de *handover*, equilibrando agilidade e robustez.

#### 4.5 Comparação de Resultados

Analisando o conjunto de resultados para todos os algoritmos de decisão de *handovers* implementados: HPR-H, HPS-L, HMM e HMMD. A comparação foi realizada com base na métrica de *delay* médio de comunicação, medida em milissegundos, considerando três cenários distintos de carga de rede.

A Tabela 3 apresenta os valores reais de *delay* médio obtidos para cada configuração de parâmetro dos algoritmos testados:

Tabela 3 – *Delay* médio de comunicação por algoritmo.

Algoritmo	Parâmetro de Decisão	<i>Delay</i> (4 usuários)	<i>Delay</i> (6 usuários)	<i>Delay</i> (8 usuários)
HPR-H	3 dB	5.7380 ms	11.8641 ms	12.5795 ms
HPR-H	6 dB	6.1727 ms	14.7202 ms	11.7154 ms
HPR-H	9 dB	3.8230 ms	6.3011 ms	8.6503 ms
HPR-H	12 dB	3.4938 ms	4.3855 ms	5.6763 ms
HPS-L	-10 dBm	6.3443 ms	16.0546 ms	12.3810 ms
HPS-L	-20 dBm	9.6504 ms	23.8417 ms	17.9877 ms
HPS-L	-30 dBm	8.1334 ms	13.1723 ms	14.5568 ms
HPS-L	-40 dBm	11.1627 ms	20.2643 ms	21.4681 ms
HMM	n = 2	17.8174 ms	16.8536 ms	33.5823 ms
HMM	n = 4	21.5584 ms	21.7021 ms	76.2499 ms
HMM	n = 6	24.1420 ms	33.0403 ms	51.0164 ms
HMM	n = 8	49.1946 ms	122.555 ms	170.1010 ms
HMMD	n = 2	2.0106 ms	1.97425 ms	2.4703 ms
HMMD	n = 4	1.8634 ms	2.2574 ms	2.6900 ms
HMMD	n = 6	2.0948 ms	2.7314 ms	3.10476 ms
HMMD	n = 8	2.0948 ms	3.2978 ms	3.7296 ms

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos dados apresentados, observa-se que o algoritmo HPR-H apresentou um

desempenho consistente nos três cenários simulados, com valores de *delay* significativamente inferiores aos algoritmos de HPS-L e HMM. À medida que se adotam margens de decisão progressivamente maiores, verifica-se uma redução expressiva na latência, especialmente sob carga elevada. No cenário com 8 usuários — termo que, neste contexto, refere-se às unidades móveis (trens) em operação — o *delay* reduziu de 12,58 ms (com 3 dB) para 5,67 ms (com 12 dB), evidenciando que o mecanismo baseado em diferença de sinal com janela de tolerância consegue amortecer oscilações transitórias sem comprometer a reatividade do sistema. Essa característica torna o algoritmo de Histerese particularmente eficiente em ambientes de alta mobilidade, como os sistemas CBTC, onde a escalabilidade da conexão é essencial. No entanto, apesar de seu desempenho, os resultados indicam que ele foi ultrapassado pelo algoritmo HMMD, que apresentou valores de *delay* ainda mais baixos e maior consistência sob diferentes condições de carga.

O algoritmo de HPS-L, por sua vez, demonstrou desempenho intermediário. Embora o limiar de  $-10\text{dBm}$  tenha apresentado os menores valores de *delay* nesse conjunto, há um padrão de crescimento acentuado quando se adotam valores mais negativos. Com limiar de  $-40\text{dBm}$ , o *delay* atingiu 21,46 ms para 8 usuários — mais do que o triplo do valor alcançado com 12 dB de Histerese. Isso evidencia que limiares excessivamente baixos tornam o sistema demasiadamente tolerante à degradação do sinal, adiando decisões críticas de troca e acumulando latência.

Já o algoritmo HMM, foi o menos eficiente entre os algoritmos avaliados, com crescimento abrupto no *delay* à medida que se aumentava o parâmetro de suavização. Na configuração  $n = 8$ , o *delay* alcançou 170,10 ms com 8 usuários — mais de 30 vezes superior ao valor obtido com histerese no mesmo cenário. Isso indica que, embora a Média Móvel tenha como propósito mitigar ruídos e flutuações, seu comportamento sob carga elevada compromete completamente o tempo de resposta. A janela de suavização, ao atrasar a percepção da deterioração do sinal, torna o sistema lento e vulnerável em situações que exigem ação imediata.

A ausência de ganho no desempenho da Média Móvel, embora inicialmente inesperada, não representa uma falha metodológica — muito pelo contrário: ela confirma, por meio de testes práticos, uma limitação técnica que poderia ser ignorada em abordagens meramente teóricas. A demonstração dessa ineficácia em ambientes CBTC reforça o valor do estudo, pois permite evitar a aplicação equivocada desse algoritmo em projetos reais, potencialmente expostos a riscos operacionais.

Em contrapartida, o algoritmo HMMD consegue contornar as limitações do HMM ao incorporar um mecanismo de persistência temporal, que evita decisões precipitadas sem comprometer a agilidade do sistema. Como evidenciado pelos resultados, o HMMD apresentou o melhor desempenho entre todas as técnicas avaliadas, com os menores valores de *delay* registrados nos três cenários simulados. A introdução do parâmetro de persistência temporal — fixado em  $5 \times 10^{-3}$  ms — permitiu ao sistema aguardar uma confirmação da tendência de variação do sinal antes de efetivar o *handover*, filtrando oscilações transitórias sem retardar indevidamente a resposta.

Essa abordagem se mostrou especialmente eficaz em cenários de alta carga, onde os algoritmos baseados em limiar fixo (como HPR-H e HPS-L) apresentaram crescimento acentuado de *delay*, e o algoritmo de HMM tornou-se excessivamente lento à medida que o valor de *n* aumentava. Diferentemente desses, o HMMD manteve o *delay* menor em todos os cenários, independente do número de usuários ou do valor de *n*, conforme se observa na Tabela 3. Essa estabilidade operacional evidencia a capacidade do algoritmo de manter um desempenho consistente mesmo diante do aumento da carga de usuários, preservando a qualidade da comunicação em cenários congestionados. Sua eficiência sob diferentes níveis de demanda demonstra um alto grau de escalabilidade, essencial para aplicações críticas como os sistemas CBTC.

Além disso, o HMMD combina os benefícios de suavização com uma lógica de decisão mais refinada, evitando tanto os *handovers* prematuros quanto os atrasos excessivos. Sua capacidade de amortecer variações transitórias sem afetar a reatividade operacional posiciona o algoritmo como a solução mais eficaz entre os algoritmos avaliados. Ao combinar estabilidade na comunicação com agilidade na tomada de decisão, o método se destaca por oferecer o melhor equilíbrio entre desempenho e robustez, superando as demais abordagens tanto em consistência quanto em eficiência.

Além disso, a comparação mostra que o desempenho de um algoritmo está intrinsecamente ligado à sensibilidade do sistema à carga de usuários e à dinâmica da mobilidade envolvida. O comportamento distinto dos algoritmos frente ao tráfego variável demonstra que decisões de *handover* não devem ser tomadas com base apenas em teorias de suavização ou sinal, mas precisam considerar o impacto real na latência, escalabilidade e consistência da comunicação.

Ao revelar essas nuances, o trabalho contribui para a seleção mais criteriosa de algoritmos em projetos ferroviários, como também abre espaço para investigações futuras,

incluindo o desenvolvimento de abordagens híbridas, mecanismos adaptativos ou modelos preditivos que explorem o potencial de cada técnica conforme o contexto operacional. Em vez de ignorar limitações isoladas, essas estratégias podem promover uma integração inteligente entre múltiplos critérios de decisão, ampliando a eficiência da comunicação em sistemas CBTC sob condições variáveis de tráfego e mobilidade.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo a análise comparativa de quatro algoritmos de decisão de *handover* — HPR-H, HPS-L, HMM e HMMD — no contexto dos sistemas CBTC, com enfoque na métrica de *delay* médio de comunicação. Tais sistemas dependem de comunicação contínua e confiável entre os trens e a infraestrutura, tornando a latência de troca de ponto de acesso um elemento crítico para a operação segura e eficiente.

A motivação deste estudo está enraizada na necessidade de aprimorar a qualidade da comunicação em ambientes ferroviários de alta mobilidade, onde instabilidades podem comprometer diretamente a entrega de comandos essenciais, como frenagem. Ao explorar algoritmos alternativos de decisão, buscou-se identificar abordagens que possibilitassem uma troca de conexão mais precisa e com menor impacto no atraso da comunicação.

Por meio de simulações com cargas de 4, 6 e 8 trens, foi possível avaliar o comportamento de cada algoritmo sob condições distintas, simulando cenários operacionais realistas. Os resultados obtidos demonstraram que os algoritmos respondem de maneira bastante diferente à variação de carga e à parametrização interna, reforçando a importância de uma configuração adequada e de uma abordagem contextual para a decisão de *handover*.

Embora o algoritmo de HPR-H tenha apresentado desempenho satisfatório, com valores de *delay* médio inferiores aos das técnicas baseadas em HPS-L e HMM, com mecanismos de decisão, baseado na diferença de sinal com janela de tolerância, permitindo uma troca de AP mais estável e com tempo de resposta satisfatório, os resultados indicaram que o algoritmo HMMD foi o que obteve os melhores índices de desempenho. Seu mecanismo de decisão, que combina suavização por média móvel com persistência temporal, permitiu uma troca de ponto de acesso mais estável e com tempo de resposta significativamente menor.

O algoritmo de HPS-L demonstrou desempenho moderado, sensível à configuração do limiar utilizado. Valores menos negativos (como  $-10$  dBm) propiciaram uma resposta mais ágil, com menores tempos de *delay*, ao passo que limiares mais negativos ( $-40$  dBm) retardaram indevidamente a troca de AP, elevando consideravelmente o atraso. Essa oscilação revela que a eficácia do algoritmo depende fortemente da calibragem, o que pode representar uma fragilidade em ambientes com alta variabilidade de sinal.

Já o algoritmo de HMM, foi o que apresentou os piores resultados de *delay*, com crescimento abrupto no atraso à medida que se ampliava o parâmetro de suavização. Em cargas elevadas, o *delay* ultrapassou 170 ms, valor incompatível com os requisitos de sistemas

que demandam tempo de resposta em tempo real. Apesar da proposta teórica de estabilizar a decisão contra ruídos, sua aplicação prática revelou que o excesso de suavização compromete a capacidade de reagir a degradações reais do sinal.

Essa constatação, embora contrarie a expectativa inicial de melhora com a Média Móvel, não representa uma limitação do estudo — mas sim uma evidência científica. O teste e comprovação da ineficácia deste algoritmo neste contexto específico fornecem subsídios importantes para futuras tomadas de decisão, evitando implementações equivocadas e contribuindo para o avanço do conhecimento na área de comunicação ferroviária.

Nesse sentido, a proposta do algoritmo HMMD surge como uma alternativa promissora, ao preservar os benefícios da suavização do sinal, mas incorporando um mecanismo de persistência temporal que corrige justamente a lentidão observada na média móvel convencional. Os resultados obtidos com o HMMD demonstraram que é possível alcançar estabilidade sem comprometer a agilidade, consolidando-o como a técnica mais eficaz entre as avaliadas.

A análise comparativa realizada permite concluir que o desempenho dos algoritmos está intimamente ligado não apenas à técnica empregada, mas ao contexto operacional, à carga de usuários e às características dinâmicas da mobilidade envolvida. A escolha do algoritmo mais adequado para sistemas CBTC deve considerar esses fatores de maneira integrada, priorizando abordagens que garantam agilidade, estabilidade e baixo atraso na comunicação.

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a exploração de técnicas híbridas, que possam combinar a robustez da média móvel com um limiar de *delay* com a sensibilidade adaptativa de outros modelos. Além disso, abre-se espaço para o desenvolvimento de sistemas preditivos baseados em aprendizado de máquina, capazes de antecipar mudanças na qualidade do sinal e realizar o *handover* de forma proativa, minimizando riscos operacionais e promovendo uma comunicação mais inteligente.

Por fim, este trabalho reforça a importância de análises técnicas aplicadas, que não apenas testam hipóteses, mas confrontam modelos teóricos com a realidade prática. Ao apresentar resultados consistentes e interpretações fundamentadas, espera-se que este estudo contribua para a construção de sistemas ferroviários mais seguros, eficientes e tecnologicamente avançados.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, R.; LI, M.; GUPTA, S. Adaptive hysteresis margin for handover optimization in high-speed wireless networks. In: **Proceedings of the International Conference on Wireless Mobility and Computing**. Barcelona, Espanha: [s.n.], 2020. p. 112–119.
- Brasil Ferroviário. **CBTC e o controle por blocos móveis**. 2023.
- Brasil Ferroviário. **CBTC – Communication-Based Train Control**. 2023.
- BRENNA M.; FOIADELLI, F. Z. D. **Electrical Railway Transportation Systems**. S.l.: John Wiley & Sons, 2018.
- CARDONA, J.; RUIZ, P.; SÁNCHEZ-AARNOUTSE, J. C. An adaptive handover scheme for IEEE 802.11 WLANs in mobility scenarios. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 21, n. 9, p. 1945–1948, 2017.
- CBTU. **Relatório de Mobilidade Urbana**. 2021.
- CHAN, K.; ABOLADE, J.; FAKOLUJO, O.; ORIMOGUNJE, A. Multi-segment rssi-based handover algorithm for mobile wireless networks. **International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)**, v. 3, n. 9, p. 933–937, 2017.
- CHATZIMISIOS, P.; BOUCOUVALAS, A. C.; VITSAS, V. IEEE 802.11 packet delay—a finite retry limit analysis. In: **Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'03)**. [S.l.]: IEEE, 2003. v. 2, p. 950–954. IEEE Cat. No. 03CH37489.
- FAROOQ, J. **Performance Analysis and Evaluation of Advanced Designs for Radio Communication Systems for Communications-Based Train Control (CBTC)**. Tese (Doutorado) — Technical University of Denmark (DTU), 2020.
- FAROOQ, J.; SOLER, J. Radio communication for communications-based train control (cbtc): A tutorial and survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, v. 19, n. 3, p. 1377–1402, 2017.
- GHADERI, E. A fuzzy logic based handover decision method in heterogeneous wireless networks. In: **International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications**. [S.l.]: IEEE, 2006. p. 125–130.
- HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo Methods**. London: Methuen, 1964.
- HAY, W. W. **Railroad Engineering**. 2. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1982.
- IEEE Standards Association. **IEEE 802.11 Wireless LAN Standards Overview**. 2023.
- INET Framework. **IEEE 802.11 Handover Scenarios — Showcase**. 2024.
- INET Framework contributors. **INET Framework: Wireless Network Simulation Tools**. 2024.
- 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.

- JUNIOR, F. L. de A. S. Trabalho de Conclusão de Curso, **Melhorias na conectividade em sistemas de controle de trens: uma avaliação de algoritmos de Handover em ambiente CBTC**. Sobral, CE: [s.n.], 2023. Curso de graduação em Engenharia Elétrica, 78 f.
- JUNIOR, R. B. R. d. S. **Gerenciamento de mobilidade transparente com suporte integrado a QoS/QoE em redes heterogêneas**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, fevereiro 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/3000>>.
- 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.
- KHAN, M. A.; HU, F.; WU, S. ML-based handover prediction and ap selection in cognitive wi-fi networks. **Wireless Networks**, v. 29, n. 6, p. 1885–1899, 2022.
- KO, J.; LEE, S. Location management in wireless mobile communication networks. In: **International Conference on Advanced Communications and Signal Processing**. [S.l.]: IEEE, 2017. p. 45–50.
- MARTÍNEZ, L.; MARTIN, U. Terminology, differences and challenges of communications-based train control and european train control systems. In: **Computers in Railways XVII: Railway Engineering Design and Operation**. Berlin, Germany: WIT Press, 2020. (WIT Transactions on The Built Environment, v. 199), p. 15–26.
- MOLISCH, A. F. **Wireless Communications**. 2. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2011.
- MONTAVONT, J.; NOËL, T.; THEOLEYRE, F. Handover triggering in ieee 802.11 networks. In: **IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–9.
- MONTAVONT, N.; NOEL, T. Mobile ip in ipv6: Handover delay analysis. In: **Proceedings of the IFIP International Conference on Networking**. [S.l.]: Springer, 2005. p. 934–944.
- MONTAVONT, N.; NOËL, T. Anticipated handover over ieee 802.11 networks. In: **IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)**. Montréal, Canadá: [s.n.], 2005. p. 64–71.
- NEZDIRIN. **Desafios técnicos na utilização de Wi-Fi em sistemas CBTC**. 2021. Fonte não especificada. Referência mencionada no texto. Verificar detalhes da publicação para completar.
- NGADIRON, Z.; BACHOK, S.; KAMALUDDIN, N. A. Enhancing the cbtc system in urban rail transit. **AIP Conference Proceedings**, v. 2991, n. 1, p. 050042, 2024.
- NGUYEN, V. M.; CHEN, C. S.; THOMAS, L. A unified stochastic model of handover measurement in mobile networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 22, n. 6, p. 1910–1923, 2014.
- PRASAD, N. R.; PRASAD, A. **802.11 WLANs and IP Networking: Security, QoS, and Mobility**. Boston, MA: Artech House, 2005. ISBN 9781580538304.
- PRASAD, R.; PRASAD, K. Mobility management for voice over ip services. In: **IEEE Vehicular Technology Conference**. [S.l.]: IEEE, 2005. p. 2199–2203.

QETTOUH, S.; BOUAZIZI, F.; FARAH, J. Efficient handover mechanisms in iee 802.11 wlans for multimedia applications. In: **International Conference on Communications**. [S.l.]: IEEE, 2012.

Railway Signalling Concepts. **Automatic Train Control: ATP, ATO, ATS Explained**. 2022.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

RF Wireless World. **Wi-Fi 6 vs Wi-Fi 7 Comparison**. 2024.

RICHTER, D.; BEILHARZ, J.; PIRL, L.; WERLING, C.; POLZE, A. **Performance of Real-Time Wireless Communication for Railway Environments with IEEE 802.11p**. 2019.

ROY, S. D. Performance evaluation of signal strength based handover algorithms. **International Journal of Communications, Network and System Sciences**, v. 2, n. 7, p. 657–663, 2009.

SOOD, N.; BAROUDI, S.; ZHANG, X.; LIEBEHERR, J.; SARRIS, C. D. Investigating the effect of handoff algorithms on the performance of cbtc systems. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, Institution of Engineering and Technology, v. 12, n. 10, p. 1625–1631, 2018.

SOOD, N.; NAYYAR, A.; MAHAPATRA, R. Investigating the effect of handoff algorithms on the performance of cbtc systems using physics-based propagation models. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, v. 13, n. 10, p. 1565–1571, 2019.

SYSTEMS, C. **Cisco 2025 Networking Research**. [S.l.], 2025.

THEEG, G.; VLASENKO, S. **Railway Signalling & Interlocking**. Utrecht, Netherlands: Eurail Press, 2009.

THEEG, G.; VLASENKO, S. **Railway Signalling and Interlocking: International Compendium**. Hamburgo, Alemanha: Eurailpress, 2009. ISBN 9783895122390.

TutorialsPoint. **Wi-Fi IEEE Standards**. 2024.

WANG, H.; YU, F. R.; WANG, H. A cognitive control approach to interference mitigation in communications-based train control (cbtc) co-existing with passenger information systems (piss). **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2017, p. 186, 2017.

WANG, Y.; LI, Z.; CHEN, R. Channel interference and optimization strategies in iee 802.11 wlans. **Wireless Networks**, Springer, v. 29, p. 1021–1033, 2023.

WANG, Y.; LIU, J.; ZHANG, H. Handover performance test and analysis in td-lte based cbtc train systems. In: **2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)**. [S.l.]: IEEE, 2017. p. 1–6.

Westermo. **Wireless Train-to-Ground Communication for CBTC Systems**. 2024.

WHITNEY, D. **Communications-Based Train Control Systems**. London: Institution of Railway Signal Engineers, 2012.

Wikipedia contributors. **Moving block**. 2025.

ZHANG, S.; CHUAI, G.; GAO, W. A handover optimization algorithm for lte-r system handover parameter prediction and dynamic adjustment. In: **Communications, Signal Processing, and Systems**. [S.l.]: Springer, 2020. (Lecture Notes in Electrical Engineering, v. 515), p. 655–669.

ZHOU, Y.; LI, J.; HUANG, Y.; SHI, J.; ZHOU, J. A novel handover scheme for seamless wireless connectivity in high-speed rail. In: **Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 230–236.

ZHU, L.; YU, F.; NING, B.; TANG, T. Handoff management in communication-based train control networks using stream control transmission protocol and ieee 802.11p wlans. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2012, 07 2012.

ZHU, L.; YU, F. R.; NING, B.; TANG, T. Handoff management in communication-based train control networks using stream control transmission protocol and ieee 802.11p wlans. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2012, p. 211, 2012.

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

ZHU, Y.; SONG, M.; WEI, B. Handoff management in communication-based train control networks using sctp and ieee 802.11p wlans. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2012, p. 1–14, 2012.