

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO

GUILHERME PACHECO

**SISTEMA DE ALERTA POR RÁDIO FREQUÊNCIA PARA
SEGURANÇA DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO EM LINHAS
METROFERROVIÁRIAS**

Santo André, SP
2026

GUILHERME PACHECO

**SISTEMA DE ALERTA POR RÁDIO FREQUÊNCIA PARA
SEGURANÇA DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO EM LINHAS
METROFERROVIÁRIAS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro de Informação.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Bender Perotoni

Santo André, SP
2026

GUILHERME PACHECO

**SISTEMA DE ALERTA POR RÁDIO FREQUÊNCIA PARA
SEGURANÇA DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO EM LINHAS
METROFERROVIÁRIAS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro de Informação.

Prof. Dr. Marcelo Bender Perotoni

Orientador

Prof. Dr. Cláudio José Bordin Júnior

Prof. Dr. Pedro Ivo da Cruz

RESUMO

A manutenção em linhas metroferroviárias apresenta riscos elevados devido à movimentação constante dos trens, tornando essencial a implementação de sistemas de segurança eficazes. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de alerta por rádio frequência para proteção de equipes de manutenção metroferroviária. O sistema consiste em um receptor portátil, que acompanhará os trabalhadores e acionará alarmes quando um trem se aproximar. A transmissão de dados será realizada por dois dispositivos: um fixado nos trens, transmitindo continuamente sua posição, e outro móvel, instalado pela equipe em pontos estratégicos da via. Esse segundo transmissor utilizará sensores indutivos para detectar a passagem do trem, permitindo um alerta antecipado e aumentando a segurança operacional.

Foram conduzidos testes experimentais em ambiente ferroviário real, especificamente no Pátio Guido Caloi, com o objetivo de validar a viabilidade técnica do sistema por meio da análise da comunicação por rádio frequência entre transmissor e receptor. Os ensaios consistiram na medição da taxa de recepção de pacotes em função da distância, sendo observada uma relação consistente entre a degradação do enlace e o aumento da distância, o que permitiu a definição de zonas operacionais de segurança. O protótipo apresentou funcionamento adequado até aproximadamente 300 metros, sendo capaz de fornecer alertas progressivos à equipe de manutenção, embora sujeito à influência de interferências eletromagnéticas e características do ambiente ferroviário.

Palavras-chave: Segurança Operacional. Alerta por Rádio Frequência. Manutenção Metroferroviária.

ABSTRACT

Maintenance activities in metro-railway systems involve significant risks due to the constant movement of trains, making the implementation of effective safety systems essential. This work proposes the development of a radio frequency-based alert system aimed at protecting railway maintenance teams. The system consists of a portable receiver that accompanies workers and triggers alarms when an approaching train is detected. Data transmission is carried out by two devices: one installed on the train, continuously transmitting its presence, and another mobile unit deployed by the maintenance team at strategic points along the track. This second transmitter uses inductive sensors to detect train passage, enabling early warning and increasing operational safety.

Experimental tests were conducted in a real railway environment, specifically at Guido Caloi Yard, with the objective of validating the technical feasibility of the system through the analysis of radio frequency communication between transmitter and receiver. The tests consisted of measuring packet reception rate as a function of distance, revealing a consistent relationship between communication degradation and increasing distance, which allowed the definition of operational safety zones. The prototype demonstrated satisfactory performance up to approximately 300 meters, providing progressive alerts to the maintenance team, although subject to the influence of electromagnetic interference and environmental characteristics typical of railway systems.

Keywords: Operational Safety. Radio Frequency Alert. Metro-Rail Maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 - Mapa do Transporte Metropolitano de São Paulo	8
Ilustração 2 - Mapa Ferroviário Nacional	9
Ilustração 3 – Divisão de Linha Férrea em Blocos ou Circuitos de Via	16
Ilustração 4 – Bloqueio de Acesso a Via.....	16
Ilustração 5 - Estrutura do ATO	17
Ilustração 6 - Cálculo de Distância entre Trens no CBTC.....	18
Ilustração 7 - Equipe de manutenção atuando nos trilhos	20
Ilustração 8 - Funcionamento do Sistema.....	26
Ilustração 9 – Sensor Indutivo para Contagem de Eixos Instalado	26
Ilustração 10 – Funcionamento do Sensor de Indutivo Contador de Eixo.....	29
Ilustração 11 – Microcontrolador ESP32.....	30
Ilustração 12 – Módulo NRF24L01+PA+LNA.....	31
Ilustração 13 – Esquema Elétrico do Transmissor (Embarcado e Via)	32
Ilustração 14 – Esquema Elétrico do Receptor (Equipe de Manutenção)	32
Ilustração 15 – Protótipo do Transmissor (Embarcado e Via).....	33
Ilustração 16 – Protótipo do Receptor (Equipe de Manutenção).....	33
Ilustração 17 – Imagem Aérea do Pátio Guido Caloi (Linha 5 – Lilás).....	34
Ilustração 18 – Trens da Frota P (Linha 5 – Lilás)	35
Ilustração 19 – Posição do Transmissor na Cabine do Trem.....	35
Ilustração 20 – Distância de Cobertura entre Transmissor e Receptor.....	36
Ilustração 21 – Relação de Pacotes Recebidos por Distância	38
Ilustração 22 – Representação de Zonas de Segurança	40
Ilustração 23 - Funcionamento do Sistema	42
Ilustração 24 - Cisco Catalyst IW6300	44
Ilustração 25 - Sensor de roda Frauscher RSR180	45
Ilustração 26 - Advantech UNO-137	46
Ilustração 27 – Trem da Série 7000/Charlie utilizado nas Linhas 8 e 9	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	SISTEMA METROFERROVIÁRIO BRASILEIRO	8
3	ACIDENTES EM SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS	11
4	MECANISMOS DE SEGURANÇA	14
4.1	SISTEMAS DE SINALIZAÇÃO	15
4.2	PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA E MANUTENÇÃO	19
4.3	REGIÃO SEGURA PARA EVACUAÇÃO.....	21
5	SISTEMA DE ALERTA POR RÁDIO FREQUÊNCIA.....	23
5.1	NORMAS DE SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS	23
5.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	25
5.3	FREQUÊNCIAS UTILIZADAS EM SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS	27
5.4	SENSOR INDUTIVO CONTADOR DE EIXO.....	28
5.5	VALIDAÇÃO DO FUNCIONAMENTO	30
5.5.1	PROTÓTIPO EXPERIMENTAL	30
5.5.2	ETAPA DE CALIBRAÇÃO	34
5.5.3	ANÁLISE DE RESULTADOS	36
5.5.4	AVALIAÇÃO DE ZONAS DE SEGURANÇA.....	39
6	PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA EM AMBIENTE FERROVIÁRIO REAL.....	42
6.1	ARQUITETURA PROPOSTA DO SISTEMA	42
6.2	EQUIPAMENTOS FERROVIÁRIOS RECOMENDADOS	44
6.3	REQUISITOS NORMATIVOS PARA IMPLEMENTAÇÃO	47
6.4	ETAPAS DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA.....	47
6.5	ANÁLISE DE RISCOS OPERACIONAIS DO SISTEMA.....	49
6.6	ESTIMATIVA DE CUSTOS.....	50
7	CONCLUSÃO.....	53
	REFERÊNCIAS.....	55

APÊNDICE A - CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DO TRANSMISSOR.....	59
APÊNDICE B - CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DO RECEPTOR.....	62
APÊNDICE C – CÓDIGOS DO TRANSMISSOR EMBARCADO	67
APÊNDICE D – CÓDIGO DO TRANSMISSOR DE VIA	69
APÊNDICE E – CÓDIGO DO RECEPTOR DA MANUTENÇÃO	71

1 INTRODUÇÃO

A operação de sistemas metroferroviários desempenha papel essencial na mobilidade urbana e no transporte de cargas, exigindo elevados níveis de confiabilidade e segurança. Nesse contexto, as atividades de manutenção na via permanente são fundamentais para garantir a integridade da infraestrutura e a continuidade da operação. No entanto, essas atividades expõem as equipes a riscos significativos, especialmente devido à circulação constante de trens em ambientes operacionais complexos. A segurança dos trabalhadores depende, em grande parte, da correta aplicação de procedimentos operacionais, sinalização e comunicação entre as equipes e o centro de controle, conforme estabelecido em regulamentos ferroviários (VALEC, 2010).

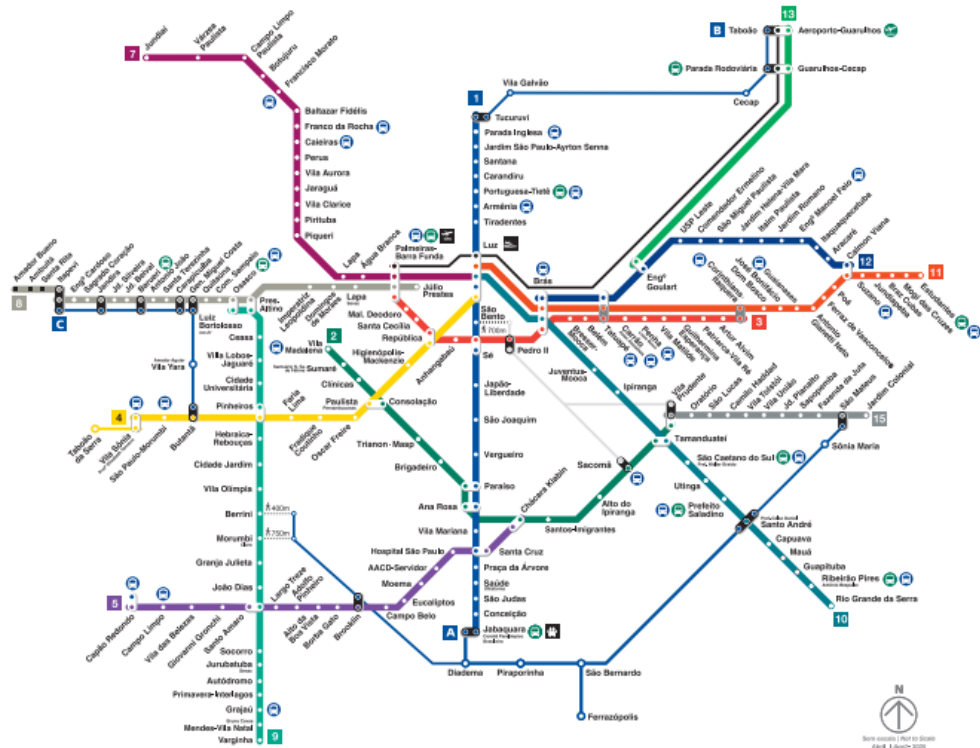
Embora existam sistemas de sinalização avançados, como o CBTC (*Communications-Based Train Control*), que utilizam comunicação por rádio para controle da circulação de trens, esses sistemas são projetados principalmente para a operação ferroviária e não atuam diretamente na proteção individual das equipes de manutenção em campo. Dessa forma, a segurança dessas equipes ainda depende de múltiplas camadas de proteção, incluindo medidas administrativas, operacionais e tecnológicas, sendo a redundância um princípio fundamental em sistemas críticos (CENELEC, 2018). Nesse cenário, surge a necessidade de soluções complementares que possam aumentar o nível de segurança durante intervenções na via.

Diante desse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de alerta por rádio frequência voltado à segurança de equipes de manutenção metroferroviária. A proposta baseia-se na utilização de comunicação sem fio para identificação da aproximação de trens e geração de alertas antecipados, contribuindo como uma camada adicional de proteção aos mecanismos já existentes. Ao longo do trabalho, são abordados os fundamentos teóricos, o desenvolvimento do protótipo, a validação experimental em ambiente real e a análise de viabilidade para aplicação em sistemas ferroviários.

2 SISTEMA METROFERROVIÁRIO BRASILEIRO

O sistema metroferroviário brasileiro desempenha papel fundamental tanto no transporte de passageiros quanto de cargas, sendo estratégico para a mobilidade urbana e para a economia nacional. No segmento de passageiros, o país conta atualmente com sistemas em 12 capitais, incluindo São Paulo (Ilustração 1), Rio de Janeiro, Brasília, Belo Horizonte, Recife e Salvador, além de cidades médias que operam Veículos Leves sobre Trilhos (VLTs) e mon trilhos (ANPT trilhos, 2018). Em 2024, o setor transportou 2,57 bilhões de passageiros (ANPT trilhos, 2024), demonstrando sua relevância para o deslocamento diário de milhões de pessoas, especialmente nas grandes metrópoles, onde o metrô é a alternativa mais eficiente, segura e sustentável para enfrentar congestionamentos e poluição (MARCHESI, 2023). A malha metroferroviária soma cerca de 1.137 km, distribuídos em 49 linhas, 633 estações e cerca de 39,7 mil profissionais, mas ainda é considerada insuficiente para atender plenamente à crescente demanda urbana (ANPT trilhos, 2018).

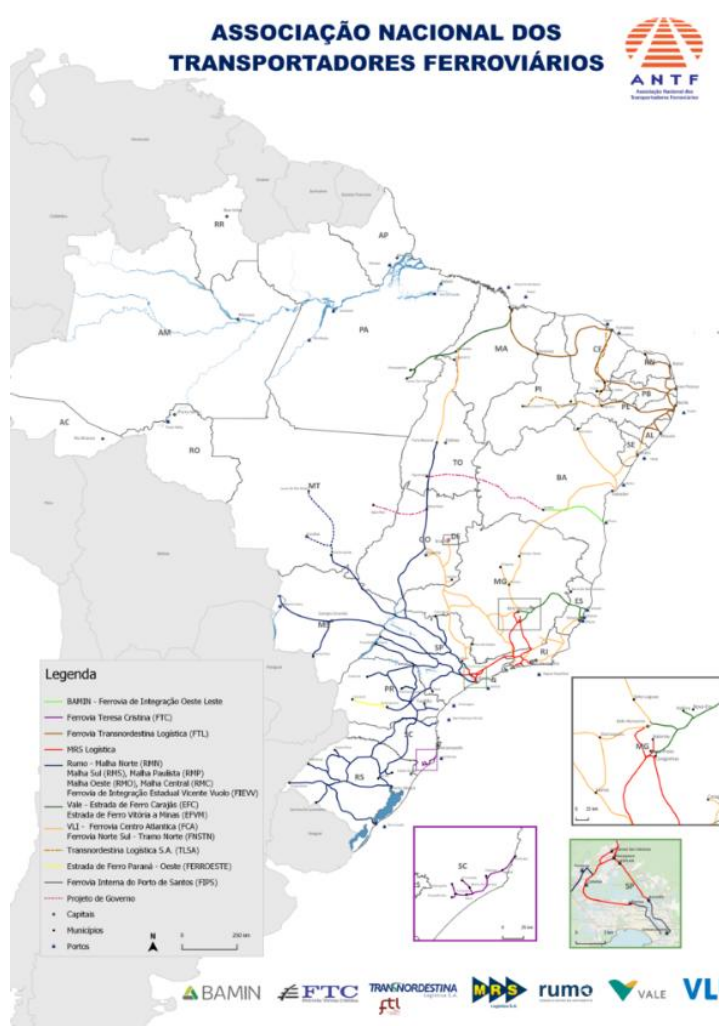
Ilustração 1 - Mapa do Transporte Metropolitano de São Paulo



Fonte: Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, 2025

No transporte de cargas, as ferrovias brasileiras (Ilustração 2) movimentam grandes volumes de commodities, como minério de ferro, grãos e produtos industrializados, contribuindo para a competitividade das exportações e a redução dos custos logísticos do país (MARCHESI, 2023). Apesar disso, a integração entre os sistemas de carga e passageiros é limitada, e a malha ferroviária nacional sofre com a fragmentação, falta de investimentos e baixa densidade em relação ao território brasileiro, o que restringe sua eficiência e alcance (SILVA et al., 2019).

Ilustração 2 - Mapa Ferroviário Nacional



Fonte: Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF), 2023

Entre as principais dificuldades de operação, destacam-se a falta de integração entre modais, a fragmentação da gestão e a ausência de uma autoridade metropolitana que coordene o planejamento e a expansão do sistema (MARCHESI, 2023). Isso resulta em sobreposição de serviços, tarifas desintegradas e dificuldades para o passageiro, além de impedir um planejamento estratégico de longo prazo. A operação de sistemas antigos, como o Metrorec em Recife e SuperVia no Rio de Janeiro, enfrenta desafios técnicos e econômicos, com unidades obsoletas, falta de investimentos regulares e receitas insuficientes para cobrir os custos operacionais, o que compromete a qualidade do serviço e a segurança dos usuários (SILVA et al., 2019).

A manutenção é outro ponto crítico: a negligência pode levar a falhas mecânicas, descarrilamentos e acidentes, enquanto a manutenção adequada é essencial para garantir a segurança dos trens e passageiros (AEAMESP, 2013). Em 2023, mais de 10 milhões de horas de trabalho foram dedicadas à manutenção dos sistemas metroferroviários no país, evidenciando a seriedade com que o tema é tratado pelos operadores (SILVA et al., 2019). No entanto, a deficiência na manutenção, aliada à falta de políticas públicas e inovação tecnológica, impacta diretamente a eficiência e a competitividade do setor (AEAMESP, 2013).

Apesar dos avanços, o sistema metroferroviário brasileiro ainda enfrenta desafios estruturais, como expansão lenta da malha, financiamento insuficiente, burocracia para concessões e necessidade de modernização tecnológica (MARCHESI, 2023). Superar essas barreiras é fundamental para que o transporte sobre trilhos assuma o protagonismo na transformação da mobilidade urbana e logística do Brasil, promovendo integração, sustentabilidade e qualidade de vida para a população (ANPTrilhos, 2018).

3 ACIDENTES EM SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

O sistema metroferroviário, apesar de suas inúmeras vantagens operacionais como conforto, regularidade e baixo impacto ambiental, está inserido em um contexto urbano que demanda extrema atenção quanto à segurança, tanto para usuários quanto para trabalhadores que atuam na sua operação e manutenção. Entre os riscos mais preocupantes nesse tipo de transporte, destaca-se o atropelamento de pessoas na via férrea, evento que, em sua maioria, resulta em ferimentos graves ou morte. Esses acidentes configuram-se como expressiva parcela das fatalidades em operações ferroviárias e implicam custos financeiros e sociais consideráveis, além de impactos psicológicos profundos nos envolvidos, como maquinistas e equipes de resgate (ABREU, 2020; VELOSO, 2020).

Embora os sistemas de sinalização ferroviária desempenhem um papel essencial na promoção da segurança operacional — ao garantir o controle do tráfego, prevenir colisões e regular a movimentação dos trens —, eles não são capazes de eliminar completamente a ocorrência de acidentes. Conforme destaca Bittencourt e Souza (2018), mesmo com a presença de modernos sistemas automáticos de controle e proteção, como o *Automatic Train Protection* (ATP) e o *Positive Train Control* (PTC), falhas humanas e a imprudência de pedestres continuam sendo fatores críticos que desafiam a eficácia plena desses mecanismos.

De acordo com estudos recentes, os atropelamentos ferroviários não são causados unicamente por falhas técnicas, mas principalmente por fatores humanos. Esses fatores incluem o comportamento de risco, a impulsividade, a desatenção e, em muitos casos, o consumo de álcool e drogas. Segundo Abreu (2020), aproximadamente 80% das vítimas em determinados estudos apresentavam álcool no sangue, o que evidencia a relevância do fator intoxicação nesses eventos. A pesquisa de Pelletier (1997), por exemplo, identificou que 82% dos mortos por transgressões nos trilhos haviam consumido álcool, com níveis superiores a 100 mg/dL. Esses dados reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à conscientização e controle do acesso às vias férreas por indivíduos em situação de vulnerabilidade.

Outro agravante se dá pelo uso indevido da faixa de domínio ferroviário por pedestres. A urbanização desordenada e a falta de infraestrutura adequada, como passarelas e viadutos, levam muitos a atravessar os trilhos por caminhos clandestinos, chamados de passagens clandestinas (PCs), que não possuem sinalização ou condições de segurança adequadas (VELOSO, 2020). Esses acessos ilegais são apontados como locais de alta incidência de acidentes. Conforme citado por Abreu e Trindade (2019), estudos realizados em regiões como a Grã-Bretanha apontam que o número de invasores mortos é três vezes maior do que o número de vítimas legais como passageiros e funcionários ferroviários.

Os indivíduos mais frequentemente vitimados por atropelamentos ferroviários pertencem a um perfil bastante definido: homens adultos, entre 20 e 39 anos, saudáveis, de baixo nível socioeconômico e com baixa escolaridade. Essa constatação foi corroborada por diversas pesquisas (CINA et al., 1994; PELLETIER, 1997; SILLA; LUOMA, 2012; FRA, 2013). A tendência é que tais indivíduos tenham menos percepção de risco e demonstrem atitudes mais ousadas frente a situações de perigo, o que aumenta significativamente sua exposição ao risco de acidentes fatais nas vias.

É importante também destacar os riscos enfrentados pelas equipes de manutenção que atuam diretamente nos trilhos. Apesar de sua presença ser legal e essencial para a operação ferroviária, esses profissionais estão sujeitos a condições de trabalho perigosas. Uma pesquisa da Faculdade de Saúde Pública da USP, aplicada na Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), identificou que falhas na gestão de segurança e comunicação deficiente entre setores são causas recorrentes de acidentes com trabalhadores da via permanente. Em 2011, por exemplo, foram registrados nove acidentes fatais com funcionários da CPTM, o que levou à assinatura de um Termo de Ajuste de Conduta e à necessidade urgente de adoção de novas medidas de segurança (USP, 2023).

Essas ocorrências demonstram a importância de ações integradas de prevenção, que vão desde a melhoria da infraestrutura e da sinalização até programas de educação e campanhas de conscientização para a população em geral. A literatura sugere a implantação de barreiras físicas como cercas, além da utilização de sensores e sistemas de alarme que detectem a presença de pessoas nas vias, desligando automaticamente a energia ou alertando os operadores do sistema (HAVÂRNEANU;

BURKHARDT; PARAN, 2015). Também se recomenda um mapeamento constante das passagens clandestinas e pontos de reincidência de invasão, com ações específicas como presença policial ou reforço de infraestrutura nesses locais (VELOSO, 2020).

A implementação de políticas públicas eficazes deve considerar as múltiplas causas dos acidentes e o perfil das vítimas, tratando o problema de forma sistêmica. Além disso, a prevenção de suicídios em ferrovias é uma pauta crescente. Estudos mostram que áreas próximas a hospitais psiquiátricos, pontes e regiões densamente povoadas são locais críticos que merecem atenção especial, devendo ser priorizadas na instalação de cercas e dispositivos de prevenção (ROUTLEY et al., 2004; LINDQVIST et al., 2004; VAN HOUWELINGEN, 2011).

Portanto, a redução dos riscos em sistemas metroferroviários exige o engajamento de diversos setores da sociedade, incluindo operadores ferroviários, órgãos públicos, empresas privadas, engenheiros de transporte, psicólogos e urbanistas. A promoção da segurança deve ser encarada como prioridade não apenas para evitar perdas humanas e materiais, mas também para garantir o funcionamento eficiente de um sistema essencial à mobilidade urbana.

4 MECANISMOS DE SEGURANÇA

A segurança nos sistemas metroferroviários depende de um conjunto de mecanismos técnicos e operacionais voltados à prevenção de acidentes e à proteção de usuários, trabalhadores e da própria infraestrutura. Entre os principais elementos, destacam-se os sistemas de sinalização, que regulam o tráfego dos trens por meio de semáforos, bloqueios automáticos e comunicação contínua entre trens e centros de controle. Esses sistemas são essenciais para evitar colisões e garantir o cumprimento rigoroso de horários e distâncias seguras entre composições. Segundo Abreu (2020), o desempenho das passagens de nível (PNs), locais de elevado risco, depende diretamente da eficácia da sinalização e da disciplina operacional, sendo vulnerável a falhas humanas e técnicas que podem comprometer a segurança. A integração entre sinalização e tecnologia, como sensores de presença e sistemas automáticos de frenagem, é apontada por diversos autores como um fator essencial para elevar os padrões de segurança (SILLA; LUOMA, 2009).

Além dos sistemas de sinalização, os procedimentos de manutenção são fundamentais para a integridade da via permanente e a operação segura do sistema como um todo. Os trabalhadores responsáveis pela manutenção operam em condições de alto risco, sendo expostos a atropelamentos, choques elétricos e quedas, especialmente quando há falhas de comunicação ou ausência de protocolos bem definidos. De acordo com o estudo de Veloso (2020), a manutenção não planejada ou mal coordenada com a operação dos trens representa uma das principais causas de acidentes envolvendo trabalhadores. Para mitigar esses riscos, medidas como o bloqueio temporário da via durante intervenções, o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), e a implementação de sistemas de aviso sonoro e visual são recomendadas. A literatura também ressalta a importância de treinamentos constantes e da adoção de tecnologias para monitoramento em tempo real das condições da via, como forma de evitar falhas estruturais que possam resultar em descarrilamentos ou interrupções críticas (HAVÂRNEANU; BURKHARDT; PARAN, 2015).

4.1 SISTEMAS DE SINALIZAÇÃO

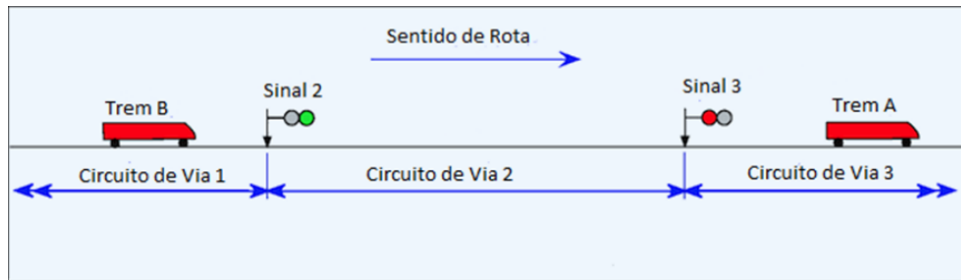
A sinalização ferroviária é um conjunto de tecnologias essenciais que garante a movimentação segura e eficiente dos trens. Esses sistemas variam em complexidade e abrangência, dependendo do grau de automação e da densidade de tráfego. Três dos sistemas mais utilizados em operações urbanas e metropolitanas são o ATC (*Automatic Train Control*), o ATO (*Automatic Train Operation*) e o CBTC (*Communications-Based Train Control*). Cada um apresenta características próprias em relação ao funcionamento, interação com operadores e níveis de segurança, inclusive para trabalhadores em manutenção (DIAS MIGUEL et al., 2018).

O ATC é um sistema que combina funções de sinalização e proteção automática de trens. Ele atua regulando a velocidade dos trens com base nas condições da via e na distância entre os trens. O sistema é composto por três subsistemas principais: ATP (*Automatic Train Protection*), que impede a ultrapassagem de sinais em vermelho e controla a velocidade; ATO (em alguns casos, como subsistema do ATC), e ATS (*Automatic Train Supervision*), que supervisiona e gerencia o tráfego (DIAS MIGUEL et al., 2018).

Esse sistema depende, tradicionalmente, do uso de circuitos de via, que identificam a ocupação dos trilhos por meio de variações na corrente elétrica provocadas pela presença do trem. Alternativamente, podem ser utilizados contadores de eixo, que registram a entrada e a saída de rodas em um determinado trecho, permitindo o monitoramento preciso da ocupação, mesmo em condições ambientais adversas (DIAS MIGUEL et al., 2018).

Como apresentado na Ilustração 3, quando a via está livre, o sinal percorre o circuito normalmente, indicando que o trecho está desocupado. No entanto, quando um trem ocupa o bloco, suas rodas e eixos metálicos fecham o circuito entre os trilhos, provocando uma queda ou desvio do sinal elétrico. Essa alteração é detectada pelos sistemas de sinalização, indicando a ocupação do trecho e permitindo o controle seguro da circulação ferroviária.

Ilustração 3 – Divisão de Linha Férrea em Blocos ou Circuitos de Via

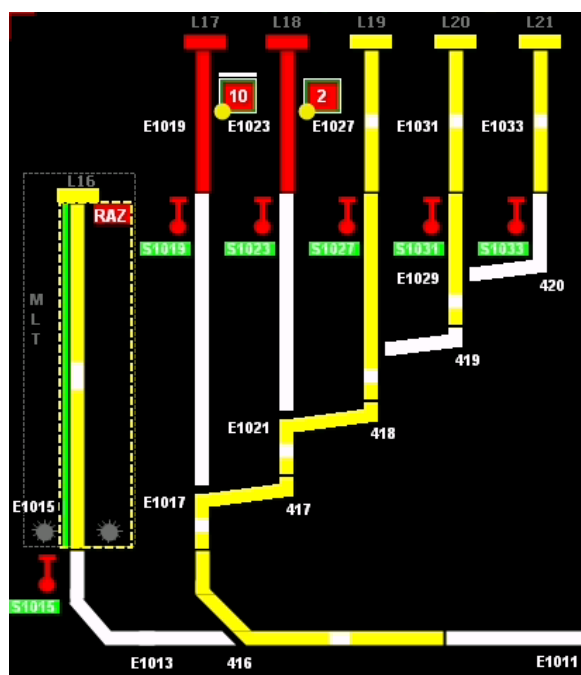


Fonte: Piers Connor Of PRC Rail Consulting LTD, 2016

No que diz respeito à segurança, o ATC oferece proteção robusta contra colisões e falhas humanas, mas exige que a equipe de manutenção esteja sincronizada com o centro de controle para garantir que não haja trens em movimento nas áreas de intervenção. Em geral, o acesso à via requer bloqueios temporários e contato constante com o Centro de Controle Operacional (CCO) (BITTENCOURT; SOUZA, 2018).

Como representado na ilustração 4, o sistema CBTC permite a aplicação de RAZ (Restricted Access Zone), demonstrado em pontilhado, sendo um bloqueio virtual dentro de uma determinada região para atuação das equipes de manutenção, impossibilitando o acesso de trens conduzidos de forma automática.

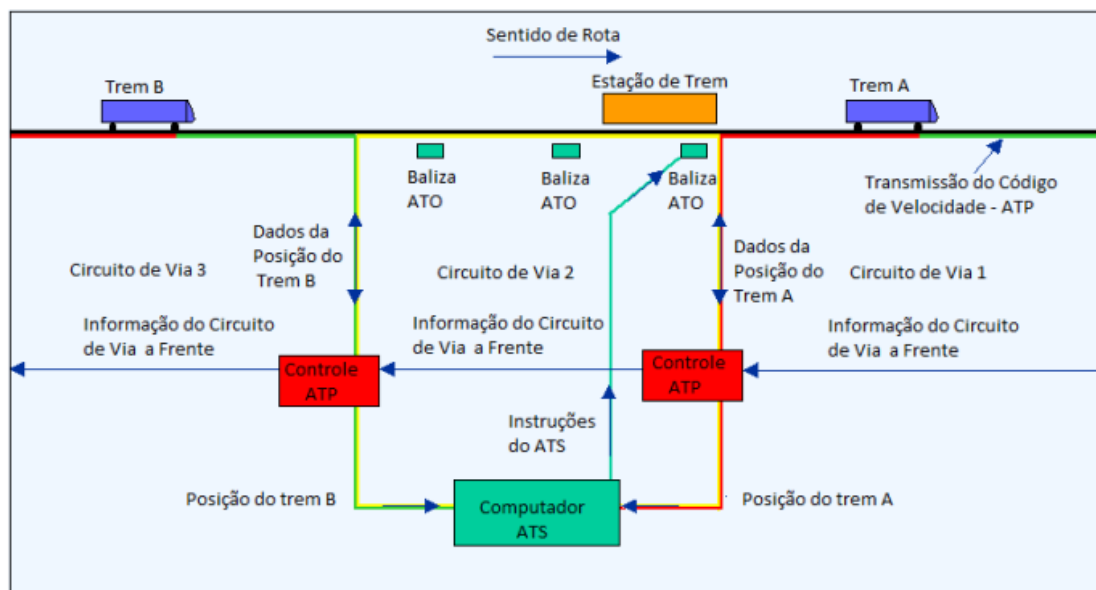
Ilustração 4 – Bloqueio de Acesso a Via



Fonte: O Autor, 2026

O ATO (Ilustração 5) complementa o ATC automatizando a operação dos trens em trechos programados. Ele permite que os trens arranquem, parem e ajustem a velocidade automaticamente, com base em informações recebidas do sistema de sinalização, incluindo dados de circuitos de via e balizas posicionadas estrategicamente ao longo da via. Os circuitos de via detectam a ocupação dos trechos à frente, e essas informações são processadas pelo ATP, que determina os limites seguros de velocidade e frenagem. As balizas, por sua vez, fornecem dados pontuais de posição e referência ao trem. Dessa forma, o ATO opera em conjunto com o ATP, garantindo que a condução automática respeite os limites de segurança e seja realizada de forma eficiente (DIAS MIGUEL et al., 2018).

Ilustração 5 - Estrutura do ATO



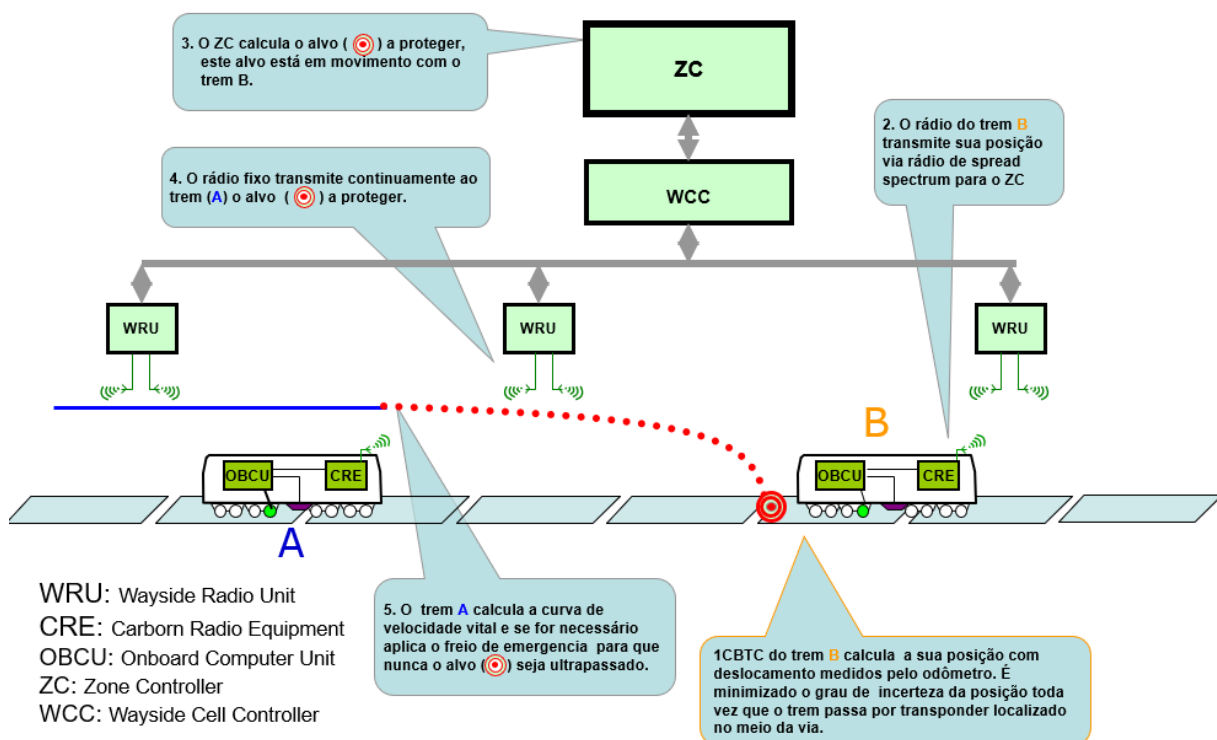
Fonte: Piers Connor Of PRC Rail Consulting LTD, 2016

Em sua infraestrutura, o ATO também pode fazer uso dos circuitos de via e dos contadores de eixo, tanto para assegurar que os trens estejam posicionados corretamente quanto para evitar a ocupação simultânea de um mesmo bloco ferroviário por mais de um trem. Essa redundância aumenta significativamente a segurança e a confiabilidade do sistema, especialmente durante as intervenções de manutenção (BITTENCOURT; SOUZA, 2018).

Em termos de segurança, o ATO melhora a precisão operacional e reduz significativamente erros humanos, mas também exige procedimentos rigorosos de permissão de acesso à via, que envolvem bloqueios de setor e comunicação direta com o sistema de supervisão. A sincronização entre os sistemas é vital para que interrupções programadas não afetem a operação.

O CBTC (*Communications-Based Train Control*) (Ilustração 6) é um sistema de sinalização baseado em comunicação digital que permite a localização precisa dos trens em tempo real. Ele elimina a necessidade de circuitos de via convencionais e possibilita a operação com menor headway (intervalo entre trens). No Brasil, o sistema CBTC é adotado, por exemplo, na Linha 4-Amarela da ViaQuatro em São Paulo (VIAQUATRO, 2025). Nesse sistema, a comunicação ocorre continuamente entre os trens e os controladores de zona (ZC – *Zone Controllers*), responsáveis por supervisionar e gerenciar a circulação em trechos específicos da via.

Ilustração 6 - Cálculo de Distância entre Trens no CBTC



Fonte: Via Quatro, 2012

O CBTC utiliza sensores embarcados e equipamentos em solo para manter a comunicação constante entre o trem e o sistema de controle. A partir das informações

de posição, velocidade e desempenho de frenagem enviadas pelos trens, o ZC calcula dinamicamente a distância segura entre as composições, estabelecendo o chamado “alvo a proteger”, que define o limite até onde o trem pode se deslocar com segurança. Apesar de sua arquitetura moderna e da possibilidade de operar sem circuitos de via, o CBTC pode integrá-los, assim como contadores de eixo, para aumentar a redundância e a segurança, especialmente em zonas de manutenção ou em situações de falha de comunicação (DIAS MIGUEL et al., 2018).

Um dos principais destaques desse sistema é a alta eficiência no uso da via, possibilitando operação automática com elevados níveis de segurança. Para as equipes de manutenção, o CBTC oferece proteção adicional por meio do monitoramento contínuo da via e da concessão de permissões eletrônicas para intervenção, impedindo a movimentação de trens em setores sinalizados como ocupados ou sob manutenção.

4.2 PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA E MANUTENÇÃO

O acesso de equipes de manutenção às vias ferroviárias é uma das operações mais críticas dentro do sistema metroferroviário. Embora essenciais para a preservação da infraestrutura e continuidade da operação, essas atividades expõem os trabalhadores a riscos elevados, como atropelamentos, eletrocussões e quedas em ambientes confinados. Para mitigar tais perigos, são adotados diversos procedimentos e mecanismos de segurança, que visam garantir a integridade física dos trabalhadores e a regularidade dos serviços prestados.

Segundo Veloso (2020), os acidentes envolvendo funcionários da manutenção ferroviária resultam, em sua maioria, de falhas organizacionais, ausência de sinalização adequada e, principalmente, da inexistência de protocolos bem definidos para acesso seguro à via.

O primeiro procedimento de segurança adotado antes do início de qualquer intervenção é a obtenção da Autorização de Acesso à Via. Trata-se de um documento obrigatório emitido pela central de controle operacional, no qual se verifica a

compatibilidade da atividade com a programação da malha ferroviária. Nenhum trabalhador pode acessar a via sem esse aval, sendo a comunicação entre a equipe de campo e o centro de controle um dos pilares do sistema de segurança (BRASIL FERROVIÁRIO, 2023).

Outro mecanismo fundamental é o bloqueio temporário da via, também chamado de “janela técnica”. Durante esse período, a circulação de trens no trecho afetado é suspensa, permitindo que os trabalhadores atuem com segurança. Este procedimento requer planejamento logístico rigoroso e o uso de sinalização temporária, como bandeiras, lanternas, cones e equipamentos de aviso sonoro, além da designação de um coordenador de segurança que atua como responsável técnico pela operação (PANTUZO, 2023).

No aspecto prático, os trabalhadores devem usar Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) (Ilustração 7), como coletes refletivos, capacetes, botas com biqueira de aço, protetores auditivos e lanternas. Além disso, é recomendado o uso de dispositivos de detecção de aproximação de trens, que alertam por vibração, som ou luz a presença de composições se aproximando. Em sistemas mais modernos, como o europeu, empregam-se tecnologias de detecção inteligente e georreferenciamento das equipes de campo, o que reduz significativamente os riscos operacionais (HAVÂRNEANU; BURKHARDT; PARAN, 2015).

Ilustração 7- Equipe de manutenção atuando nos trilhos



Fonte: Wasaki, 2023

Também são fundamentais os briefings de segurança realizados antes do início dos trabalhos. Nesses encontros, toda a equipe recebe informações sobre os riscos específicos do trecho, as condições do clima, os equipamentos disponíveis, os tempos estimados de operação e os procedimentos em caso de emergência. Segundo Abreu (2020), a padronização desses briefings e o treinamento contínuo dos trabalhadores são essenciais para consolidar uma cultura de segurança nas ferrovias.

Os manuais técnicos recomendam, ainda, a realização de auditorias internas periódicas nos protocolos de manutenção, a fim de verificar o cumprimento dos procedimentos estabelecidos. Além disso, deve haver um sistema eficiente de comunicação de ocorrências e quase-acidentes, de modo a promover aprendizado organizacional e ajustes nos procedimentos antes que falhas se repitam.

Diante da complexidade das operações ferroviárias e do número crescente de intervenções de manutenção necessárias em um sistema cada vez mais demandado, a gestão da segurança deve ser proativa, intersetorial e orientada por dados. É fundamental que operadores ferroviários, engenheiros, gestores e os próprios trabalhadores de campo compartilhem uma visão sistêmica do risco, adotando uma abordagem baseada em prevenção, formação contínua e tecnologia de apoio.

4.3 REGIÃO SEGURA PARA EVACUAÇÃO

A evacuação segura da equipe depende do conhecimento sobre a região de refúgio e da aplicação de normas técnicas e procedimentos operacionais padronizados. Um dos primeiros aspectos a considerar é o gabarito dinâmico da ferrovia, que compreende o espaço necessário para a movimentação lateral e vertical dos trens durante sua operação. De acordo com a ABNT NBR 12915:2020, as instalações fixas, bem como pessoas ou materiais, devem estar posicionadas fora da zona definida pelo gabarito para evitar colisões com o material rodante.

Embora a norma não estabeleça uma distância lateral única, operadores ferroviários costumam adotar como prática segura manter trabalhadores a pelo menos 2,50 metros do eixo da via, o que representa uma margem adicional ao gabarito

dinâmico, considerando deslocamentos causados por desgaste de trilhos, jogo da via e movimentos da composição (ABNT, 2020). Esta margem pode ser ajustada conforme o tipo de trem e a geometria local da linha férrea.

No que se refere ao tempo e distância necessários para garantir uma evacuação segura, o Regulamento de Operação Ferroviária (ROF) define procedimentos operacionais claros. O regulamento exige que, em qualquer atividade de manutenção na via, uma sinalização de advertência seja instalada a uma distância mínima de 300 metros do local da intervenção, sob vigilância de um funcionário habilitado (VALEC, 2010). Além disso, a tripulação do trem deve ser avisada via rádio a 1.000 metros da zona de trabalho e, a partir de 2.000 metros, deve iniciar a circulação com velocidade restrita, conforme determinado no licenciamento do trecho (VALEC, 2010). Esses protocolos garantem tempo suficiente para a parada do trem ou, pelo menos, sua desaceleração, permitindo que a equipe se retire com segurança para a região de escape previamente identificada.

Portanto, a definição da zona segura deve sempre considerar os critérios estabelecidos por normas técnicas como a ABNT NBR 12915:2020 e procedimentos operacionais oficiais como os do ROF, garantindo que a equipe de manutenção esteja posicionada fora do gabarito e que o trem seja alertado com antecedência suficiente. A aplicação correta desses parâmetros reduz consideravelmente o risco de atropelamentos e outros acidentes graves durante atividades ferroviárias.

5 SISTEMA DE ALERTA POR RÁDIO FREQUÊNCIA

5.1 NORMAS DE SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

O desenvolvimento de sistemas eletrônicos aplicados ao ambiente ferroviário exige o cumprimento rigoroso de normas técnicas internacionais que assegurem segurança, confiabilidade e integridade operacional. Entre essas normas, destaca-se o conjunto europeu EN 50xxx, amplamente utilizado por operadores e fabricantes ferroviários devido ao seu alto nível de maturidade técnica. Para projetos que envolvem comunicação por rádio, sensores distribuídos e unidades eletrônicas instaladas em trens ou ao longo da via, como é o caso do Sistema de Alerta por Rádio Frequência proposto neste trabalho, a conformidade normativa é essencial para eliminar riscos operacionais e garantir plena integridade funcional em todas as etapas de operação. O descumprimento desses requisitos pode resultar em falhas críticas, comprometendo a segurança dos trabalhadores e a confiabilidade dos processos de sinalização e proteção ferroviária.

A norma EN 50128 (*Railway Applications – Software for Railway Control and Protection Systems*) estabelece diretrizes específicas para desenvolvimento de software em sistemas de controle e proteção, com foco na aplicação de níveis de integridade de segurança (SIL - *Safety Integrity Level*). Essa norma garante que o software utilizado em equipamentos embarcados ou instalados na via siga um ciclo de vida estruturado, com processos rigorosos de verificação e validação. Em complemento, a EN 50129 (*Railway Applications – Safety Related Electronic Systems for Signalling*) aborda a segurança funcional de sistemas eletrônicos de sinalização, incluindo requisitos de arquitetura, redundância e tolerância a falhas. A aderência a essas normas é fundamental no contexto deste projeto, pois assegura que processos de detecção, transmissão e geração de alarmes não estejam sujeitos a falhas silenciosas, garantindo que o sistema de alerta opere de forma previsível mesmo em situações adversas.

Para os equipamentos instalados em trens, a norma EN 50155 (*Railway Applications – Electronic Equipment Used on Rolling Stock*) define requisitos ambientais e elétricos rigorosos, assegurando que os dispositivos resistam a vibrações, choques mecânicos, interferência eletromagnética, variações térmicas e flutuações de tensão — condições típicas do ambiente ferroviário. No caso do transmissor embarcado no trem, atender a essa norma é obrigatório para garantir que o sinal de rádio seja emitido de forma contínua e confiável, sem interrupções causadas por oscilações ambientais. Da mesma forma, a conformidade com a EN 50155 impacta diretamente a qualidade e estabilidade dos sinais recebidos pelo sistema portátil utilizado pelos trabalhadores.

As normas EN 50159-1 (*Railway Applications – Communication, Signalling and Processing Systems*) complementam esse conjunto ao especificarem diretrizes para comunicação segura em sistemas ferroviários. A primeira trata de redes fechadas, enquanto a segunda aborda redes abertas, como transmissões por rádio sujeitas a interferências externas. Para o sistema desenvolvido neste trabalho — que depende da transmissão confiável da potência do sinal do trem e de um transmissor móvel na via — o cumprimento dessas normas garante proteção contra corrupção de dados, perda de pacotes, mensagens falsas e interferências eletromagnéticas. Além disso, são as mesmas normas que embasam sistemas modernos como CBTC, demonstrando sua importância para qualquer aplicação ferroviária que envolva comunicação sem fio.

Dessa forma, o alinhamento do projeto às normas EN 50128, EN 50129, EN 50155 e EN 50159-1/2 não apenas atende às melhores práticas internacionais, mas também é indispensável para assegurar que o Sistema de Alerta por Rádio Frequência opere com confiabilidade e robustez em ambiente ferroviário real.

Além das normas internacionais apresentadas, é importante destacar a existência de normas brasileiras e regulamentos operacionais que complementam os requisitos de segurança e confiabilidade aplicáveis aos sistemas metroferroviários. No contexto nacional, destaca-se a ABNT NBR 12915:2020 (Via férrea – Gabarito ferroviário e entrevista) que estabelece critérios relacionados ao gabarito dinâmico ferroviário, definindo os limites de segurança para a circulação de trens e o posicionamento de pessoas e equipamentos ao longo da via. Essa norma é

fundamental para garantir que atividades de manutenção sejam realizadas fora da zona de risco, contribuindo diretamente para a proteção das equipes em campo.

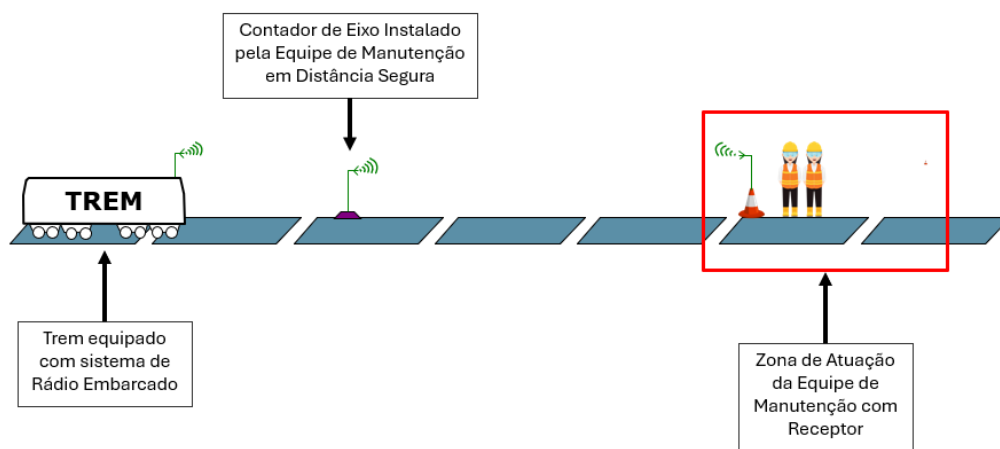
No âmbito operacional, documentos como o Regulamento de Operação Ferroviária (ROF) fornecem diretrizes essenciais para a execução segura de intervenções na via permanente, incluindo procedimentos de sinalização de obras, comunicação com o centro de controle e definição de distâncias mínimas para advertência da aproximação de trens (VALEC, 2010). Esses regulamentos complementam as normas técnicas ao estabelecer práticas operacionais padronizadas, reduzindo a dependência exclusiva de ações humanas e aumentando o nível de segurança das operações.

Adicionalmente, normas brasileiras de caráter geral podem ser aplicadas como suporte à implementação de sistemas seguros e confiáveis, como a ABNT NBR ISO 9001 (Sistemas de gestão da qualidade), voltada à gestão da qualidade, e a ABNT NBR ISO 45001 – Sistemas de gestão de saúde e segurança ocupacional – Requisitos com orientação para uso, relacionada à gestão de saúde e segurança ocupacional. Embora não sejam específicas do setor ferroviário, essas normas contribuem para a estruturação de processos organizacionais robustos, sendo especialmente relevantes em projetos que impactam diretamente a segurança dos trabalhadores. Dessa forma, a integração entre normas internacionais e nacionais permite o desenvolvimento de soluções mais aderentes à realidade brasileira, garantindo maior confiabilidade e segurança operacional.

5.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O Sistema de Alerta por Rádio Frequência é composto por um receptor portátil, que permanece junto aos trabalhadores durante as atividades de manutenção na via férrea. Esse receptor é responsável por acionar alarmes sonoros e visuais sempre que for detectada a aproximação de um trem (Ilustração 8).

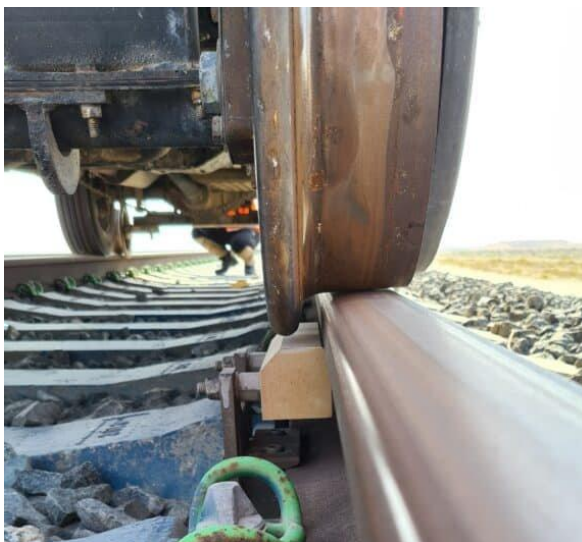
Ilustração 8 - Funcionamento do Sistema



Fonte: O Autor, 2025

A transmissão de dados é realizada por dois transmissores distintos, garantindo redundância e confiabilidade ao sistema. O primeiro transmissor é instalado diretamente nos trens, emitindo continuamente pacotes por meio de sinais de rádio. O segundo é um dispositivo móvel (Ilustração 9), posicionado pela equipe técnica em pontos estratégicos da ferrovia, respeitando uma distância mínima de 300 metros do local da intervenção, conforme estabelecido pelo Regulamento de Operação Ferroviária (VALEC, 2010).

Ilustração 9 – Sensor Indutivo para Contagem de Eixos Instalado



Fonte: REVISTA FERROVIÁRIA, 2022

Esse segundo transmissor utiliza sensores semelhantes aos empregados em sistemas de contagem de eixos, permitindo a detecção precisa da passagem dos trens. Assim, mesmo em situações em que o transmissor do trem falhe ou esteja ausente, o sistema garante um alerta antecipado à equipe, reforçando a segurança operacional e ampliando a margem de tempo para evacuação segura.

O receptor portátil, que acompanha os trabalhadores durante as intervenções na via férrea, será responsável por monitorar continuamente a variação da potência do sinal de rádio emitido pelo transmissor fixado no trem. A lógica de funcionamento considera que, à medida que o trem se aproxima, a intensidade do sinal recebido aumentará, permitindo ao sistema antecipar sua chegada. Além disso, o sistema também estará programado para reconhecer o sinal de alarme emitido pelo transmissor móvel instalado na via. Caso o trem passe pelo ponto de detecção e a equipe ainda esteja na zona de risco, o sistema acionará imediatamente alarmes visuais e sonoros de alta prioridade, reforçando a urgência de evacuação e ampliando a proteção dos trabalhadores.

5.3 FREQUÊNCIAS UTILIZADAS EM SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

A operação ferroviária moderna depende intensamente da comunicação por rádio para garantir a segurança, eficiência e coordenação das atividades ao longo da via. Diversas aplicações — como a comunicação entre trens e centros de controle, o monitoramento de tráfego, os sistemas de automação embarcada e os alertas de segurança — utilizam faixas específicas de frequência, principalmente nas bandas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*). No Brasil, destacam-se as faixas de 160 MHz, 250 MHz e 450 MHz, regulamentadas pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL, 2008).

A faixa de 160 MHz é amplamente utilizada para comunicação voz-voz, sobretudo em áreas abertas e com longa extensão de trilhos, graças ao seu bom alcance e estabilidade (TUNNEL RADIO, 2021). A faixa de 250 MHz vem sendo adotada por operadoras ferroviárias para transmissão contínua de dados, permitindo o monitoramento remoto da operação e a supervisão do material rodante (REVISTA

FERROVIÁRIA, 2021). Já a faixa de 450 MHz se destaca por oferecer maior largura de banda, favorecendo aplicações que requerem atualização frequente de dados e menor latência — como sistemas de controle e automação embarcada (TUNNEL RADIO, 2021).

Além dessas frequências licenciadas, os sistemas ferroviários também fazem uso de faixas do espectro ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), como 433 MHz e 2,4 GHz, que são de uso livre e amplamente empregadas em sistemas auxiliares, como sensores de via, dispositivos de alarme e sistemas de alerta de aproximação. Essas frequências são ideais para comunicações de curto alcance e baixo consumo, sendo regulamentadas para aplicações de radiação restrita (ANATEL, 2008; TELE RADIO, 2021).

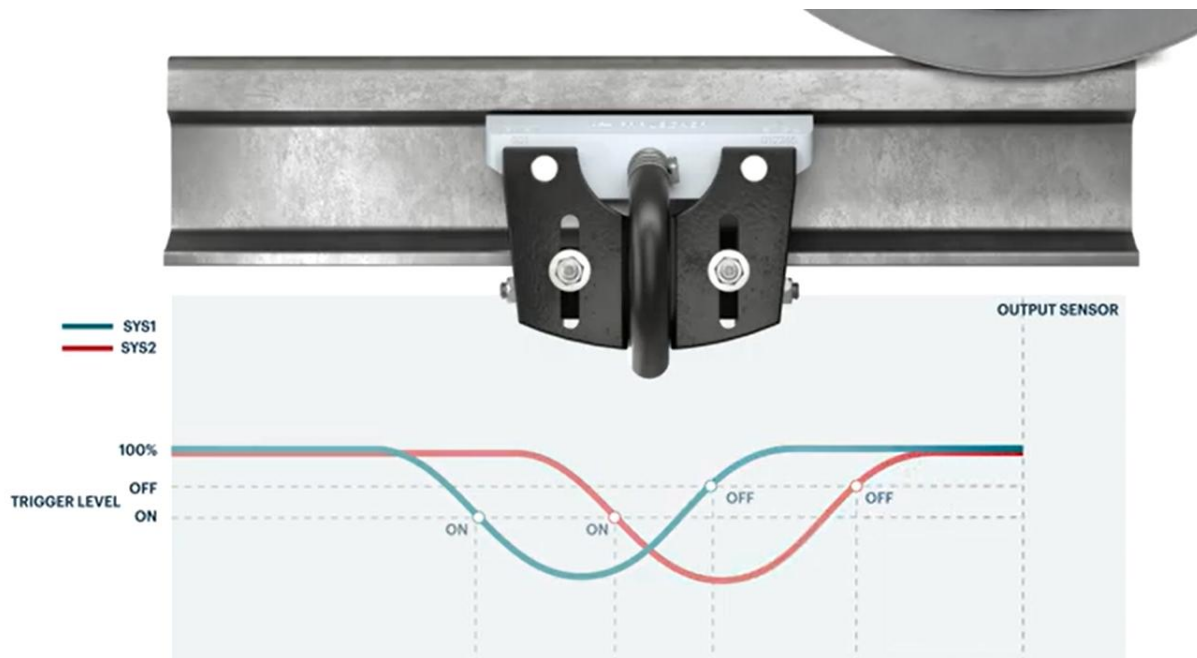
Outro exemplo relevante é o sistema de sinalização CBTC, que baseia-se inteiramente na comunicação contínua entre trens e centros de controle por meio de rádio digital, geralmente utilizando frequências da faixa de 2,4 GHz ou 5,8 GHz. (TUNNEL RADIO, 2021).

Com isso, a seleção adequada da frequência deve considerar as características do trecho ferroviário, os requisitos operacionais e as restrições regulatórias. No desenvolvimento de sistemas de segurança e alerta para trabalhadores — como o proposto neste trabalho —, o uso de frequências ISM como 433 MHz ou 2,4 GHz mostra-se eficiente, de fácil implementação e compatível com o cenário de operação ferroviária.

5.4 SENSOR INDUTIVO CONTADOR DE EIXO

Os sensores contadores de eixo utilizam dois enrolamentos (ou bobinas) independentes para detectar a passagem de eixos ferroviários com alta precisão. Cada enrolamento funciona como um sistema indutivo separado, gerando sinais analógicos que são processados para determinar a presença e o movimento das rodas do trem. Quando uma roda metálica passa sobre o sensor, ela altera o campo magnético gerado pelos enrolamentos, resultando em uma mudança no sinal que indica a presença do eixo (Ilustração 10).

Ilustração 10 – Funcionamento do Sensor de Indutivo Contador de Eixo



Fonte: Frauscher, 2020

A disposição dos dois enrolamentos permite não apenas a detecção da presença do trem, mas também a determinação da direção de movimento, conforme os sinais Sys1 e Sys2 na ilustração anterior. Ao analisar a sequência e o tempo em que cada enrolamento é ativado pela passagem da roda, o sistema pode inferir se o trem está se aproximando ou se afastando. Essa funcionalidade é essencial para sistemas de contagem de eixos e controle de tráfego ferroviário, garantindo operações seguras e eficientes.

Além disso, a utilização de dois enrolamentos proporciona redundância ao sistema. Caso um dos enrolamentos apresente falha, o outro pode continuar operando, mantendo a funcionalidade do sensor. Essa característica aumenta a confiabilidade do sistema, especialmente em ambientes ferroviários onde a segurança é crítica.

5.5 VALIDAÇÃO DO FUNCIONAMENTO

A validação do funcionamento do sistema desenvolvido neste trabalho teve como objetivo demonstrar a viabilidade técnica do conceito de alerta por rádio frequência destinado à proteção de equipes de manutenção em sistemas metroferroviários. Para essa finalidade, foi elaborado um protótipo experimental utilizando microcontroladores ESP32 e módulos de rádio nRF24L01+PA+LNA operando na banda ISM de 2,4 GHz, o que permitiu avaliar, em condições reais, parâmetros como perda de pacotes, estabilidade do enlace e comportamento da comunicação em ambiente ferroviário.

Apesar de não utilizar equipamentos ferroviários certificados, o protótipo serviu como base para validar a lógica de funcionamento, a arquitetura de comunicação e os princípios que serão futuramente implementados em dispositivos padronizados conforme as normas EN 50128, EN 50129, EN 50155 e EN 50159.

5.5.1 PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

O protótipo foi constituído por três módulos principais: (i) transmissor embarcado no trem (TX-TREM), (ii) transmissor fixo instalado na via (TX-VIA), equipado com sensor indutivo de eixo, e (iii) receptor portátil utilizado pela equipe de manutenção (RX-EQUIPE). Para esse protótipo, utilizaram-se microcontroladores ESP32 (Ilustração 11), escolhido por seu baixo custo e capacidade de implementar a lógica de comunicação desejada.

Ilustração 11 – Microcontrolador ESP32



Fonte: Espressif, 2020

Além disso, como o protótipo depende de comunicação por rádio frequência, utilizou-se o módulo nRF24L01+PA+LNA (Ilustração 12) devido ao seu alcance ampliado e capacidade de estabelecer comunicação bidirecional, condição necessária para simular o funcionamento de um transmissor embarcado e de um transmissor fixo na via.

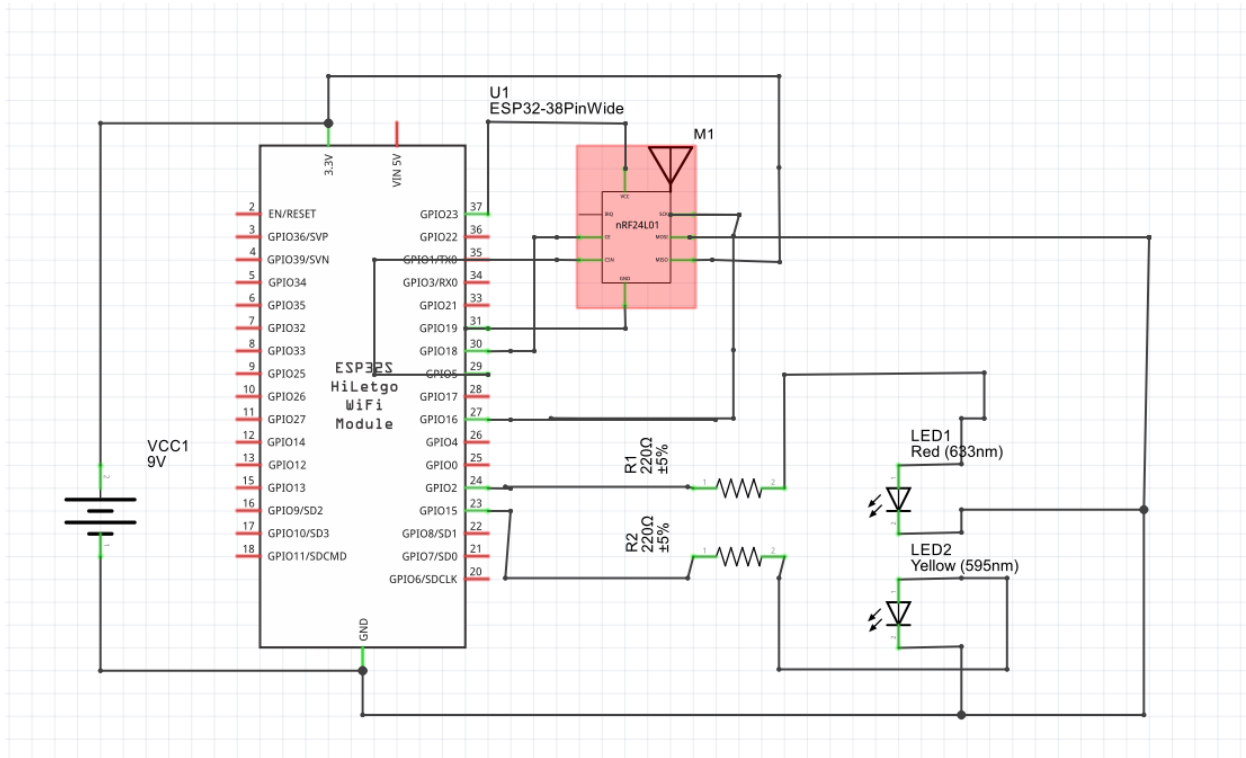
Ilustração 12 – Módulo NRF24L01+PA+LNA



Fonte: Nordic Semiconductor, 2007

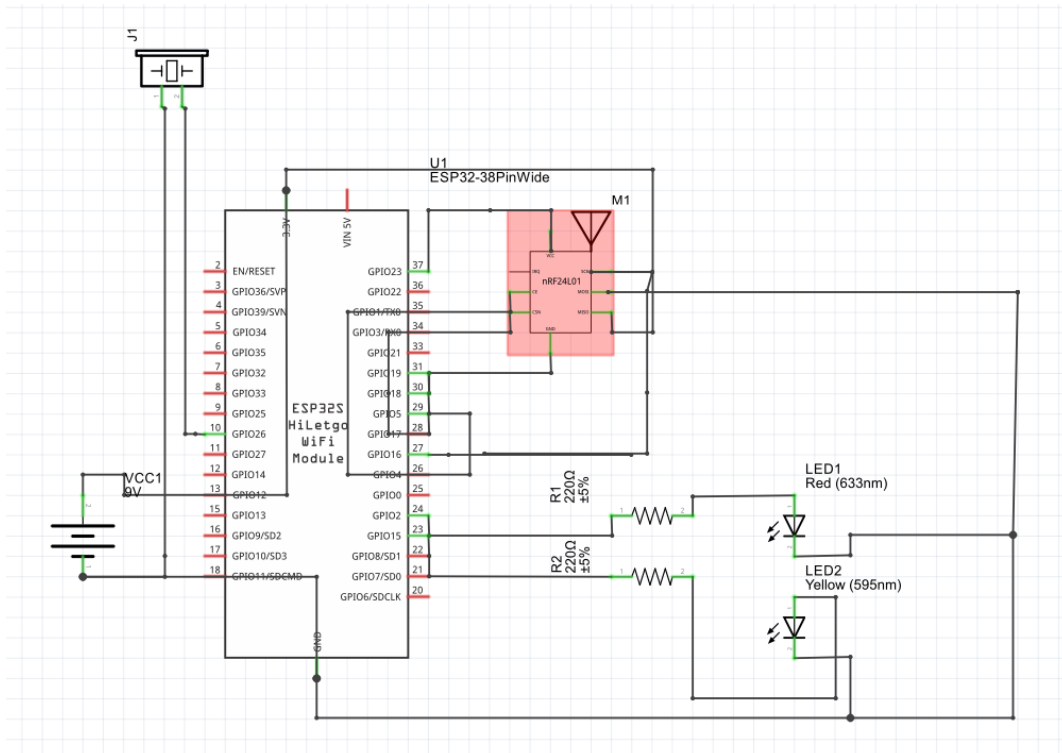
Para possibilitar a montagem física do sistema, foram elaborados esquemas elétricos específicos para o transmissor (Ilustração 13) e para o receptor (Ilustração 14). Esses esquemas determinaram a ligação entre microcontrolador, módulo RF, LEDs indicativos (amarelo para indicar conexão entre transmissão e receptor e vermelho de alerta) e buzzer, garantindo uma estrutura funcional para os testes de campo.

Ilustração 13 – Esquema Elétrico do Transmissor (Embarcado e Via)



Fonte: O Autor, 2025

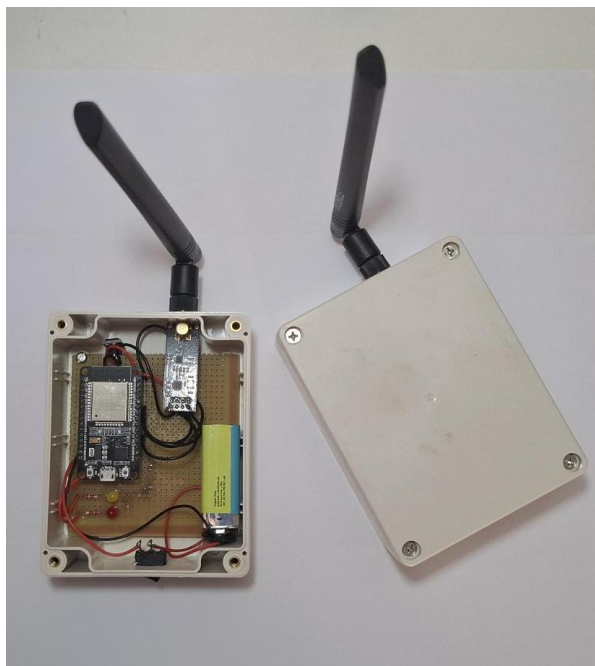
Ilustração 14 – Esquema Elétrico do Receptor (Equipe de Manutenção)



Fonte: O Autor, 2025

Após a elaboração dos circuitos, os protótipos foram montados em Placas de Circuito Impresso e posteriormente fixados em estruturas adequadas para validação dos testes em ambiente metroferroviário.

Ilustração 15 – Protótipo do Transmissor (Embarcado e Via)



Fonte: O Autor, 2025

Ilustração 16 – Protótipo do Receptor (Equipe de Manutenção)



Fonte: O Autor, 2025

5.5.2 ETAPA DE CALIBRAÇÃO

A primeira etapa da validação consistiu na calibração da comunicação RF em ambiente ferroviário real. Os testes foram realizados no Pátio Guido Caloi (Ilustração 17), pertencente à Linha 5–Lilás, onde o posicionamento do transmissor e o deslocamento progressivo do receptor permitiram avaliar a estabilidade do sinal e a taxa de recepção de pacotes em diferentes distâncias. Esse ambiente, por se tratar de área operacional aberta e sujeita a interferências típicas do setor, forneceu condições adequadas para a obtenção de dados empíricos.

Ilustração 17 – Imagem Aérea do Pátio Guido Caloi (Linha 5 – Lilás)



Fonte: O Autor, 2022

Para simular a condição real de operação, o transmissor foi instalado no interior da cabine de comando de um trem da Frota P (Ilustração 18), posicionado na área superior da cabine do condutor (Ilustração 19), de modo a representar o ponto mais avançado do trem durante a aproximação da equipe de manutenção.

Ilustração 18 – Trens da Frota P (Linha 5 – Lilás)



Fonte: O Autor, 2025

Ilustração 19 – Posição do Transmissor na Cabine do Trem

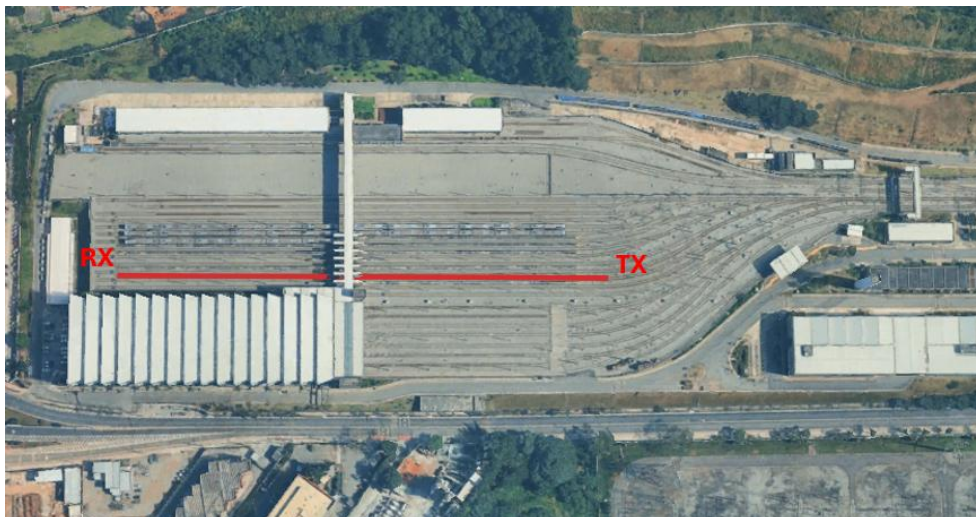


Fonte: O Autor, 2025

O transmissor portátil foi deslocado progressivamente ao longo do pátio com a movimentação do trem, seguindo trajetória retilínea sobre a via, e parando a cada incremento de 5 metros para coleta de dados via interface HTML embarcado no ESP32 do Receptor, desenvolvido para a calibração do equipamento. O ensaio prosseguiu até aproximadamente 300 metros, momento em que o sistema apresentou

perda completa de pacotes, caracterizando o limite operacional do módulo RF em questão no ambiente ferroviário (Ilustração 20).

Ilustração 20 – Distância de Cobertura entre Transmissor e Receptor



Fonte: O Autor, 2025

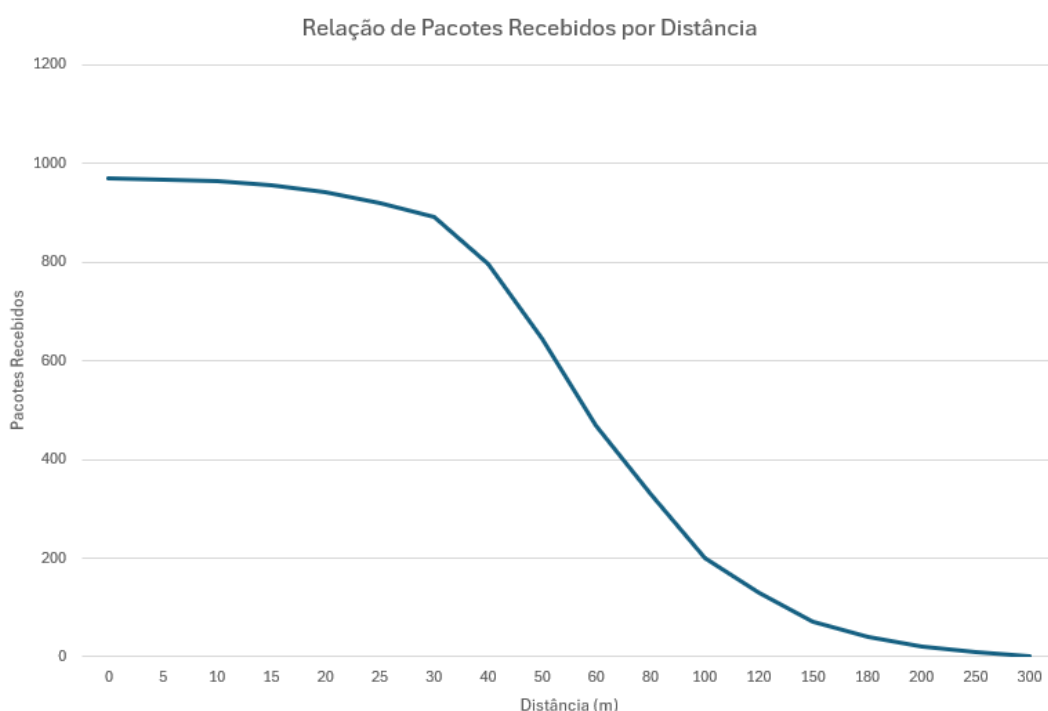
5.5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A avaliação da comunicação entre transmissor e receptor foi conduzida ao longo de toda a extensão do Pátio Guido Caloi, com medições progressivas desde a posição inicial do trem até o ponto em que o enlace de rádio deixou de existir. Em cada ponto, o transmissor — instalado na cabine da Frota P — enviava continuamente pacotes numerados, enquanto o receptor registrava, dentro de uma janela de tempo fixa, quantos desses pacotes eram efetivamente recebidos. A comparação entre pacotes enviados e recebidos resultava na taxa de perda de pacotes, utilizada como indicador direto da qualidade do enlace e, portanto, da distância entre os equipamentos.

Tabela 1 – Resultados da Coleta de Dados durante a Calibração

Distância (m)	Pacotes Recebidos	Perda (%)
0 m	970	3,0%
5 m	968	3.2%
10 m	964	3.6%
15 m	957	4.3%
20 m	943	5.7%
25 m	921	7.9%
30 m	892	10.8%
40 m	796	20.4%
50 m	646	35.4%
60 m	470	53,0%
80 m	330	67,0%
100 m	200	80,0%
120 m	130	87,0%
150 m	70	93,0%
180 m	40	96,0%
200 m	20	98,0%
250 m	10	99,0%
300 m	0	100,0%

Nos primeiros metros, até aproximadamente 15 metros, a comunicação manteve-se extremamente estável, com perdas inferiores a 5%, demonstrando que o módulo nRF24L01+PA+LNA operava próximo ao seu desempenho ideal. À medida que o receptor avançava para distâncias entre 20 e 40 metros, o ambiente ferroviário passou a influenciar de forma crescente o comportamento do sinal. Trilhos, dormentes metálicos, pórticos de rede aérea, cabos e o próprio corpo do trem criaram condições de multipercurso, sombreamento e absorção eletromagnética, resultando em perdas que variaram entre 5% e 17%, caracterizando uma região de comunicação moderada, porém ainda funcional.

Ilustração 21 – Relação de Pacotes Recebidos por Distância

Fonte: O Autor, 2026

A partir desse ponto, os resultados evidenciaram de forma clara a relação operacional do sistema: quanto maior a taxa de pacotes recebidos, mais próximo o trem se encontra do receptor. Entre 45 e 80 metros, observou-se queda mais acentuada na recepção, com perdas entre 24% e 67%, marcando uma zona de atenção. Acima de 100 metros, o enlace tornou-se crítico, com perdas entre 80% e 93%, faixa que, devido à drástica redução de pacotes válidos, configura o início adequado para alertas operacionais, especialmente considerando que trens de aproximadamente 120 metros de extensão exigem margem significativa para frenagem segura. Embora o pátio possua extensão próxima de 1 km, o protótipo atingiu seu limite funcional em torno de 300 metros, ponto em que a recepção tornou-se residual e, posteriormente, nula, definindo assim o alcance efetivo do equipamento no ambiente real de ensaio (Ilustração 21).

5.5.4 AVALIAÇÃO DE ZONAS DE SEGURANÇA

Com base nos ensaios realizados no Pátio Guido Caloi, a calibração permitiu estabelecer a relação entre a quantidade de pacotes recebidos pelo módulo nRF24L01+PA+LNA e a distância aproximada entre o transmissor (no trem) e o receptor (com a equipe de manutenção). Essa relação, fundamental para o funcionamento do sistema, foi incorporada ao código final do protótipo para que o receptor fosse capaz de estimar proximidade e acionar alertas automaticamente em condições operacionais reais.

O comportamento observado durante a calibração é característico de sistemas de rádio: quanto mais distante o transmissor está, menor a quantidade de pacotes recebidos, até chegar ao ponto em que, além de aproximadamente 300 metros, não há praticamente comunicação — caracterizando a zona totalmente segura, onde o trem encontra-se distante e sem qualquer risco imediato à equipe. À medida que o receptor se aproxima do transmissor, a recepção aumenta progressivamente, reduzindo a taxa de perda de pacotes e indicando aproximação física do trem.

Essa característica foi traduzida no código final por meio de limiares operacionais derivados da tabela de calibração. A lógica implementada define três estados (Ilustração 22):

a) Zona Segura — além de 300 metros

Nesta condição, o receptor recebe poucos ou nenhum pacote dentro da janela de tempo analisada. O código interpreta esse comportamento como distância elevada, mantendo o sistema em estado normal, sem acionamento de alarmes, e apenas registrando a comunicação intermitente característica dessa região.

b) Zona de Atenção — entre aproximadamente 150 e 300 metros

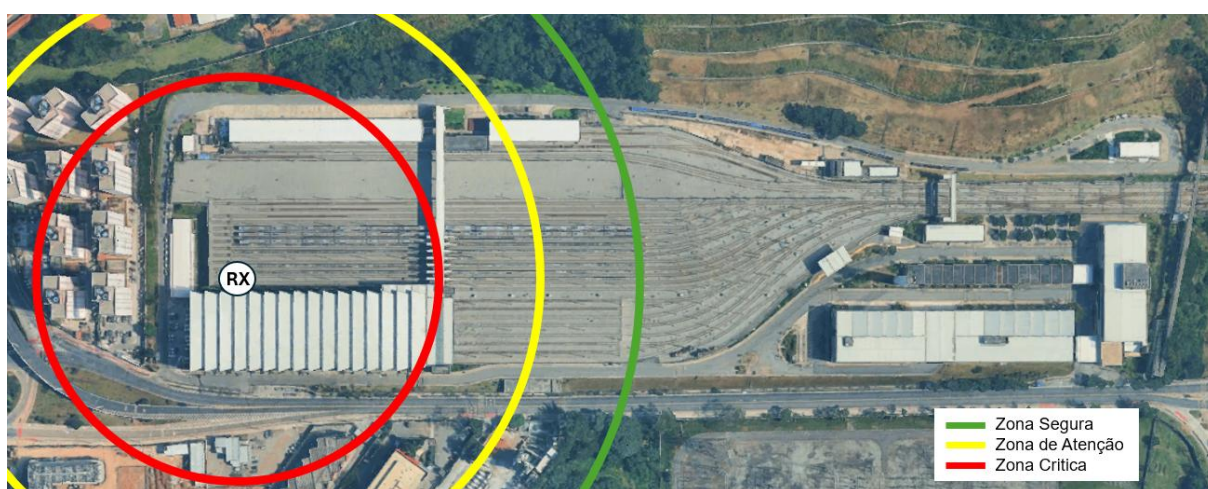
Conforme o trem se aproxima da equipe, a quantidade de pacotes recebidos aumenta gradualmente. O código detecta essa mudança comparando a taxa de recepção com os valores registrados na calibração.

Aqui, a comunicação torna-se mais estável, mas ainda sujeita às reflexões típicas do ambiente ferroviário. A zona de atenção serve como pré-alerta, indicando que o trem se encontra em aproximação significativa.

c) Zona Crítica — até aproximadamente 150 metros

Nesta região, a recepção torna-se muito alta, pois o transmissor encontra-se próximo ao receptor. A calibração mostrou que, abaixo de cerca de 150 metros, a quantidade de pacotes recebidos por segundo é elevada e consistente, caracterizando o ponto de maior risco operacional. O código final utiliza esse comportamento como gatilho para os alertas luminoso e sonoro, acionando LED vermelho e buzzer em padrão intermitente para orientar a equipe a desocupar a via imediatamente.

Ilustração 22 – Representação de Zonas de Segurança



Fonte: O Autor, 2025

A interpretação baseada na taxa de recepção de pacotes é realizada de forma contínua pelo receptor, que monitora em tempo real a quantidade de pacotes válidos recebidos dentro de um intervalo de tempo previamente definido. Para cada janela de leitura, o sistema calcula a razão entre pacotes recebidos e pacotes esperados, utilizando esse valor como indicador da qualidade do enlace de comunicação e, consequentemente, da proximidade do trem.

Com o objetivo de reduzir variações abruptas causadas por fenômenos típicos do ambiente ferroviário, o algoritmo emprega uma média móvel sobre um conjunto de amostras recentes. Essa abordagem suaviza flutuações instantâneas do sinal,

evitando que variações momentâneas resultem em mudanças indevidas no estado do sistema. Além disso, é aplicada uma lógica de histerese na definição das zonas operacionais, impedindo comutações rápidas entre estados devido a pequenas oscilações nos valores medidos.

Entretanto, o uso da média móvel introduz uma limitação inerente ao sistema: a possibilidade de ocorrência de falsos negativos em situações de degradação abrupta do sinal. Como o cálculo considera amostras anteriores, o sistema pode apresentar um atraso na identificação de condições críticas, especialmente quando há uma queda rápida na qualidade da comunicação. Dessa forma, existe um compromisso entre estabilidade e tempo de resposta, sendo necessário ajustar o tamanho da janela de amostragem e os limiares de decisão para equilibrar robustez e sensibilidade. Ainda assim, a combinação de média móvel e histerese proporciona maior confiabilidade geral ao sistema, reduzindo significativamente a incidência de alarmes indevidos em condições normais de operação. No trecho operacional, o funcionamento se dá de forma idêntica ao teste de calibração:

- O transmissor envia pacotes continuamente durante todo o deslocamento do trem;
- O receptor analisa quantos desses pacotes chegam efetivamente;
- A classificação da situação é feita com base nos dados calibrados;
- Os alarmes são acionados conforme a aproximação detectada.

Assim, mesmo sem uso de sensores dedicados ou hardware ferroviário normatizado, o protótipo desenvolvido — composto por ESP32 e nRF24L01+PA+LNA — conseguiu replicar de maneira eficiente o comportamento esperado de sistemas profissionais de alerta por rádio, validando o conceito e confirmando a viabilidade do método para aplicações futuras em equipamentos certificados, além de obtenção dos códigos descritos nos ANEXOS.

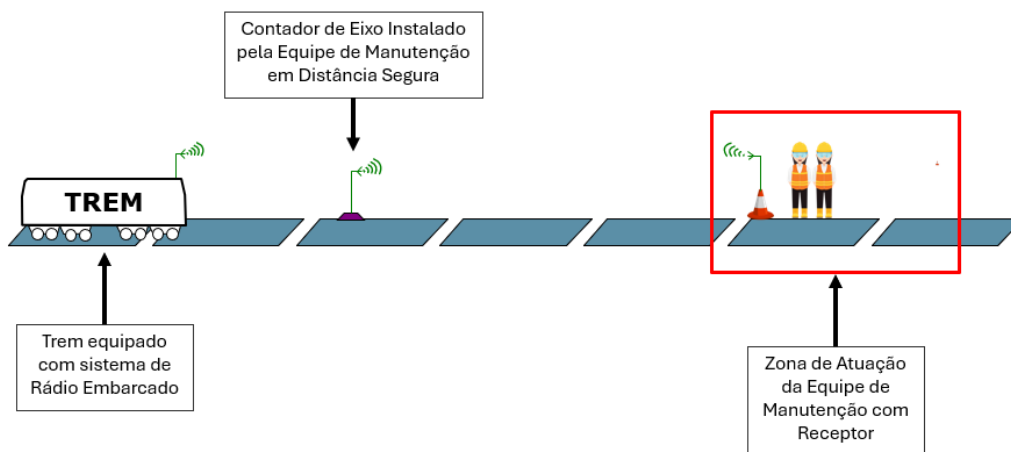
6 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA EM AMBIENTE FERROVIÁRIO REAL

6.1 ARQUITETURA PROPOSTA DO SISTEMA

Com base nos resultados obtidos na validação experimental apresentada neste trabalho, verifica-se que o Sistema de Alerta por Rádio Frequência apresenta viabilidade técnica como solução auxiliar para a proteção de equipes de manutenção em linhas metroferroviárias. O sistema desenvolvido demonstrou a capacidade de identificar a aproximação de trens por meio da comunicação por rádio, permitindo a definição de zonas operacionais e a geração de alertas antecipados para evacuação da via.

A arquitetura proposta mantém a lógica validada e é composta por três elementos principais: transmissor embarcado no trem, transmissor de via associado a sensor de detecção e receptor portátil da equipe (Ilustração 23). O transmissor embarcado realiza a emissão contínua de sinais, enquanto o transmissor de via atua como redundância, sendo instalado a aproximadamente 300 metros da zona de intervenção, conforme diretrizes operacionais ferroviárias (VALEC, 2010). O receptor portátil interpreta os sinais recebidos e classifica a condição operacional em zonas segura, de atenção ou crítica, acionando alertas conforme o nível de risco.

Ilustração 23 - Funcionamento do Sistema



Fonte: O Autor, 2025

No que se refere à comunicação do sistema, recomenda-se a utilização de faixas pertencentes ao espectro ISM (Industrial, Scientific and Medical), com destaque para 433 MHz e 2,4 GHz, devido à sua ampla disponibilidade e regulamentação para aplicações de baixa potência (ANATEL, 2008). A faixa de 433 MHz apresenta melhor desempenho em termos de alcance e menor atenuação em ambientes com obstáculos, enquanto a faixa de 2,4 GHz oferece maior taxa de transmissão, porém com maior suscetibilidade a interferências. Em aplicações ferroviárias, também podem ser utilizadas faixas licenciadas em UHF, como a faixa de 450 MHz, amplamente empregada em sistemas de comunicação ferroviária (TUNNEL RADIO, 2021).

Além disso, sistemas modernos de sinalização, como o CBTC (Communications-Based Train Control), utilizam comunicação contínua por rádio, frequentemente em faixas como 2,4 GHz ou 5,8 GHz, demonstrando a viabilidade do uso de tecnologias sem fio em aplicações críticas ferroviárias (TUNNEL RADIO, 2021).

A potência do sinal recebido (RSSI) é amplamente utilizada em sistemas de comunicação sem fio como indicador direto da qualidade do enlace, permitindo inferir a proximidade entre dispositivos. Estudos demonstram que a redução do RSSI está diretamente associada ao aumento da taxa de perda de pacotes, evidenciando que a perda de pacotes é consequência da degradação do sinal (SAUTER, 2011; YIN, 2016). Além disso, o RSSI permite uma análise contínua do canal de comunicação, sendo mais adequado para aplicações que exigem resposta em tempo real e maior precisão (FOERSTER, 2011).

Dessa forma, recomenda-se que a versão final do sistema utilize a potência do sinal como variável principal para classificação das zonas operacionais, mantendo a lógica validada neste trabalho, porém com recalibração dos limiares e aplicação de técnicas de filtragem para garantir estabilidade e evitar falsos alarmes.

6.2 EQUIPAMENTOS FERROVIÁRIOS RECOMENDADOS

Para a implementação do sistema em ambiente ferroviário real, torna-se necessária a substituição dos componentes utilizados no protótipo por equipamentos industriais certificados, capazes de operar de forma confiável em condições severas e atender às normas técnicas aplicáveis ao setor ferroviário.

No caso do transmissor embarcado no trem, recomenda-se a utilização de rádios industriais ferroviários robustos, projetados para aplicações críticas de comunicação sem fio. Equipamentos como o Cisco Catalyst IW6300 (Ilustração 24) e a linha Siemens Scalance W são exemplos amplamente utilizados em sistemas industriais e ferroviários, oferecendo suporte a comunicação em faixas ISM e UHF, além de elevada resistência a vibrações, variações térmicas e interferências eletromagnéticas. Esses dispositivos operam tipicamente com padrões como IEEE 802.11 (Wi-Fi industrial), podendo ser configurados para redes dedicadas e seguras, e apresentam compatibilidade com requisitos da norma EN 50155, garantindo sua adequação para instalação em material rodante. Além disso, esses rádios permitem a leitura de parâmetros de enlace, como RSSI, fundamentais para a lógica de funcionamento proposta neste trabalho.

Ilustração 24 - Cisco Catalyst IW6300



Fonte: CISCO, 2026

Para o transmissor de via, recomenda-se a utilização de sensores ferroviários certificados para detecção de passagem de trens, integrados a módulos de comunicação robustos. Entre os principais exemplos estão o sensor de roda Frauscher RSR180 (Ilustração 25) e sistemas de contagem de eixo desenvolvidos pela Siemens, amplamente empregados em sistemas de sinalização ferroviária. Esses dispositivos apresentam elevada confiabilidade operacional e podem atingir níveis de integridade de segurança SIL 4, conforme diretrizes da norma EN 50129 (CENELEC, 2018). O sensor deve ser integrado a um módulo transmissor industrial, que pode utilizar rádios compatíveis com as mesmas faixas adotadas no sistema (433 MHz, 2,4 GHz ou UHF), garantindo interoperabilidade. Adicionalmente, o conjunto deve ser projetado com alimentação autônoma, por meio de baterias industriais ou sistemas embarcados de energia, e encapsulamento com grau de proteção elevado (IP65 ou superior), permitindo operação segura em ambiente externo.

Ilustração 25 - Sensor de roda Frauscher RSR180



Fonte: FRAUSCHER, 2025

O receptor portátil utilizado pela equipe de manutenção deve ser desenvolvido com base em hardware industrial robusto, garantindo confiabilidade, ergonomia e resistência às condições de campo. Para essa aplicação, recomenda-se o uso de plataformas embarcadas industriais como o Advantech UNO-137 (Ilustração 26), que

é um computador embarcado compacto com características industriais, incluindo ampla faixa de temperatura de operação, resistência a vibração e compatibilidade com aplicações críticas. Esses equipamentos podem ser integrados a módulos de comunicação compatíveis com as frequências adotadas (433 MHz, 2,4 GHz ou UHF) e possuem capacidade de processamento suficiente para execução dos algoritmos de análise de RSSI. O receptor deve ainda incorporar sistemas de alerta, como LEDs de alta intensidade, buzzer sonoro e, preferencialmente, alerta vibratório, além de funcionalidades como autoteste, indicação de falha de comunicação e monitoramento de bateria, garantindo maior segurança operacional.

Ilustração 26 - Advantech UNO-137



Fonte: ADVANTECH, 2023

Além dos módulos principais, a implementação do sistema deve considerar componentes auxiliares como fontes de alimentação industriais, antenas adequadas para cada faixa de frequência, cabos e conectores blindados e sistemas de proteção contra interferência eletromagnética. A correta especificação desses elementos é fundamental para garantir a integridade do sinal e o funcionamento confiável do sistema.

6.3 REQUISITOS NORMATIVOS PARA IMPLEMENTAÇÃO

A implementação do sistema deve atender às normas ferroviárias aplicáveis, garantindo segurança e confiabilidade operacional.

O software deve seguir a EN 50128, assegurando validação e rastreabilidade (CENELEC, 2011). A arquitetura deve atender à EN 50129, garantindo análise de risco e comportamento seguro em caso de falha (CENELEC, 2018). Os equipamentos embarcados devem cumprir a EN 50155 (CENELEC, 2017). A comunicação deve atender à EN 50159, garantindo integridade e confiabilidade dos dados transmitidos (CENELEC, 2010).

6.4 ETAPAS DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA

A implementação do sistema proposto deve ocorrer de forma estruturada e progressiva, visando reduzir riscos técnicos, garantir conformidade normativa e assegurar a confiabilidade operacional antes de sua aplicação em larga escala. Dessa forma, recomenda-se a divisão do processo de implantação em etapas sequenciais, permitindo a validação gradual dos requisitos técnicos e operacionais.

A primeira etapa consiste na transição do protótipo experimental para um protótipo industrial, substituindo os módulos eletrônicos utilizados nos testes por equipamentos certificados e adequados ao ambiente ferroviário. Nessa fase, devem ser implementados rádios industriais compatíveis com as frequências definidas, sensores ferroviários certificados para detecção de passagem de trens e plataformas embarcadas robustas para o receptor portátil. Também é necessário adequar o sistema de alimentação, encapsulamento e interfaces físicas, garantindo resistência a condições ambientais como vibração, temperatura, umidade e interferência eletromagnética.

Na sequência, deve-se realizar a etapa de testes em ambiente controlado, com o objetivo de validar o funcionamento do sistema utilizando o hardware definitivo. Esses testes devem incluir a verificação da comunicação entre os módulos, a medição da potência do sinal recebido (RSSI) em diferentes distâncias e condições de

propagação, bem como a calibração dos limiares que definem as zonas operacionais. Nessa fase, também devem ser aplicadas técnicas de filtragem e histerese, a fim de reduzir oscilações e evitar a geração de alarmes indevidos.

A terceira etapa corresponde à realização de ensaios de validação técnica e normativa, contemplando testes de compatibilidade eletromagnética (EMC), resistência ambiental, estabilidade da comunicação e análise de falhas. Além disso, deve ser conduzida uma análise de risco do sistema, considerando possíveis modos de falha, como perda de comunicação, falha de sensores ou erro na interpretação dos dados. Esses ensaios são fundamentais para garantir que o sistema atenda aos requisitos das normas EN 50128, EN 50129, EN 50155 e EN 50159, assegurando seu comportamento seguro em condições adversas.

Posteriormente, recomenda-se a execução de um projeto piloto em ambiente ferroviário real, preferencialmente em um trecho controlado ou pátio operacional. Nessa etapa, o sistema deve ser utilizado em condições reais de manutenção, permitindo a avaliação de seu desempenho em cenários práticos, incluindo diferentes velocidades de trens, geometrias de via e níveis de interferência eletromagnética. Também é importante coletar dados operacionais, como tempo de resposta do sistema, precisão na identificação das zonas e ocorrência de alarmes falsos ou não detectados.

Com base nos resultados obtidos no projeto piloto, deve-se proceder com ajustes finais no sistema, incluindo refinamento dos parâmetros de operação, melhorias na interface do usuário e eventuais adequações de hardware. Em seguida, inicia-se a etapa de implantação operacional, que envolve a definição de procedimentos de uso, treinamento das equipes de manutenção e integração do sistema aos processos existentes, como comunicação com o centro de controle operacional e protocolos de segurança da via.

Por fim, a implementação deve prever uma etapa contínua de monitoramento e melhoria, com acompanhamento do desempenho do sistema em operação, análise de eventos registrados e atualização periódica dos parâmetros de funcionamento. Essa abordagem permite garantir a evolução do sistema ao longo do tempo, aumentando sua confiabilidade e adequação às diferentes condições operacionais encontradas no ambiente ferroviário.

6.5 ANÁLISE DE RISCOS OPERACIONAIS DO SISTEMA

A implementação de sistemas de comunicação sem fio em ambiente ferroviário exige a avaliação criteriosa dos riscos operacionais associados, especialmente em aplicações voltadas à segurança de equipes de manutenção. Entre os principais riscos identificados para o sistema proposto, destaca-se a perda de comunicação entre transmissor e receptor, que pode ocorrer devido a interferências eletromagnéticas, obstáculos físicos, reflexões do sinal (*multipath*) ou falhas nos equipamentos. Esse tipo de falha é crítico, pois pode impedir a geração de alertas em tempo hábil, comprometendo a segurança dos trabalhadores. Segundo a norma EN 50159, sistemas de comunicação utilizados em aplicações ferroviárias devem prever mecanismos de detecção e mitigação de falhas, garantindo a integridade e disponibilidade das informações transmitidas (CENELEC, 2010).

Outro risco relevante está associado à geração de alarmes falsos ou ausência de alarmes (falsos negativos). Alarmes indevidos podem reduzir a confiança da equipe no sistema, enquanto a não detecção da aproximação do trem representa um cenário de alto risco. Para mitigar essas situações, recomenda-se a utilização de redundância operacional, como a combinação entre transmissor embarcado e transmissor de via, além da aplicação de algoritmos de filtragem e histerese na análise do sinal recebido. De acordo com a EN 50129, sistemas eletrônicos de segurança devem ser projetados considerando modos de falha previsíveis e estratégias de tolerância a falhas, assegurando comportamento seguro mesmo em condições adversas (CENELEC, 2018).

Adicionalmente, devem ser considerados riscos relacionados à falha de sensores de detecção de passagem de trem, especialmente no transmissor de via. Sensores indutivos utilizados em contagem de eixos apresentam alta confiabilidade, porém não estão isentos de falhas decorrentes de desgaste, instalação inadequada ou condições ambientais extremas. A norma EN 50128 reforça que sistemas críticos devem possuir validação contínua e monitoramento de integridade, garantindo que falhas sejam identificadas e tratadas de forma segura (CENELEC, 2011).

Por fim, aspectos ambientais como variações climáticas, vibração, temperatura e interferência eletromagnética também podem impactar o desempenho do sistema. Nesse contexto, a utilização de equipamentos certificados conforme a EN 50155 é fundamental para garantir robustez e operação confiável em condições ferroviárias severas (CENELEC, 2017). Dessa forma, a análise de riscos evidencia a necessidade de adoção de redundância, monitoramento contínuo, conformidade normativa e validação rigorosa, assegurando que o sistema opere de forma segura e confiável em ambiente real.

6.6 ESTIMATIVA DE CUSTOS

A estimativa de custos para implementação do sistema proposto foi elaborada com base em equipamentos industriais compatíveis com a aplicação ferroviária, considerando valores médios de mercado obtidos por meio de consulta a uma concessionária de operação metroferroviária. Para fins de análise, foram considerados dois cenários distintos: um cenário inicial de validação operacional e um cenário de implantação ampliada em linhas metropolitanas.

No cenário de validação, considera-se a implementação de um sistema completo composto por um trem equipado e um conjunto de dispositivos para uma equipe de manutenção. Para esse caso, são necessários três módulos de processamento industrial, sendo um para o transmissor embarcado no trem, um para o receptor portátil da equipe e um para o transmissor de via, utilizando equipamentos como o Advantech UNO-137, com custo médio estimado em R\$ 11.000,00 por unidade. Dessa forma, o custo total para os módulos de processamento é de aproximadamente R\$ 33.000,00.

Além disso, são necessários três módulos de comunicação sem fio industriais, como o Cisco Catalyst IW6300, com custo médio estimado em R\$ 9.000,00 por unidade, totalizando aproximadamente R\$ 27.000,00. Para a detecção da passagem do trem, considera-se a utilização de um sensor ferroviário certificado, como um sensor de roda Frauscher, com custo médio estimado em R\$ 9.000,00. Dessa forma, o custo total estimado para implementação de um sistema completo de validação é da ordem de R\$ 69.000,00, não incluindo custos adicionais de integração, instalação e testes.

Para o cenário de implantação em escala, considera-se a aplicação do sistema nas Linhas 8 e 9 do sistema metropolitano, que possuem uma frota aproximada de 55 trens. Como o sistema deve ser instalado nas duas cabeceiras de cada composição, são necessários dois conjuntos de transmissão por trem, totalizando 110 pontos de instalação embarcada. Considerando a utilização de um módulo Advantech UNO-137 e um rádio industrial por cabeceira, tem-se um custo estimado de R\$ 20.000,00 por ponto, resultando em aproximadamente R\$ 2.200.000,00 para equipar toda a frota (Ilustração 27).

Ilustração 27 – Trem da Série 7000/Charlie utilizado nas Linhas 8 e 9



Fonte: ANP TRILHOS, 2022

Adicionalmente, para as equipes de manutenção, considera-se que, em uma única noite de operação, podem ocorrer intervenções simultâneas em até 8 pontos distintos da via. Para cada ponto de intervenção, é necessário um conjunto composto por um transmissor de via e um receptor portátil, totalizando dois módulos de processamento e dois módulos de comunicação por ponto. Dessa forma, são necessários 16 módulos de processamento e 16 rádios industriais, resultando em um custo aproximado de R\$ 320.000,00 para suporte às equipes de manutenção. Soma-

se a esse valor o custo dos sensores ferroviários, considerando 8 unidades adicionais, totalizando aproximadamente R\$ 72.000,00.

Com base nesses valores, o investimento total estimado para implantação do sistema nas Linhas 8 e 9 é da ordem de R\$ 2.592.000,00, desconsiderando custos adicionais de engenharia, certificação, integração com sistemas existentes e treinamento operacional. Esses custos complementares podem representar uma parcela significativa do investimento total, porém são inerentes a qualquer solução aplicada em ambiente ferroviário.

Apesar do investimento inicial, o sistema apresenta potencial de retorno elevado, uma vez que sua aplicação está diretamente relacionada à mitigação de riscos de acidentes envolvendo equipes de manutenção, podendo reduzir custos operacionais associados a incidentes, interrupções de serviço e impactos à segurança. Dessa forma, a relação custo-benefício da solução proposta mostra-se favorável, especialmente em sistemas metroferroviários com elevada densidade operacional e frequentes intervenções na via.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um sistema de alerta por rádio frequência voltado à segurança de equipes de manutenção em linhas metroferroviárias, considerando os riscos associados à aproximação de trens em ambiente operacional. A motivação do estudo fundamentou-se na necessidade de complementar os mecanismos tradicionais de segurança, que, embora robustos, ainda dependem fortemente de procedimentos operacionais e comunicação humana, fatores suscetíveis a falhas.

A proposta apresentada baseou-se na utilização de um sistema composto por transmissores e um receptor portátil, capaz de identificar a aproximação do trem por meio da análise da comunicação por rádio frequência. A arquitetura desenvolvida incorporou redundância operacional com a inclusão de um transmissor de via associado a sensor de detecção de passagem de trem, ampliando a confiabilidade do sistema. O conceito foi implementado por meio de um protótipo experimental utilizando microcontroladores e módulos de rádio frequência, permitindo a validação prática da solução em ambiente ferroviário real.

Os testes realizados no Pátio Guido Caloi demonstraram que existe uma relação consistente entre a taxa de recepção de pacotes e a distância entre transmissor e receptor, possibilitando a definição de zonas operacionais de segurança. Os resultados obtidos evidenciaram que o sistema é capaz de fornecer alertas progressivos e antecipados, permitindo à equipe de manutenção reagir de forma adequada à aproximação do trem. Dessa forma, foi possível comprovar a viabilidade técnica do método proposto, atingindo o objetivo principal do trabalho. Destaca-se, contudo, que a perda de pacotes foi utilizada como métrica de validação experimental, sendo que, para aplicação em ambiente ferroviário real, recomenda-se a utilização da potência do sinal recebido (RSSI) como variável principal, por apresentar maior precisão, estabilidade e aderência às práticas de sistemas de comunicação profissionais.

Além da validação experimental, o estudo abordou aspectos fundamentais relacionados à segurança ferroviária, incluindo a análise de acidentes, mecanismos

de proteção existentes, normas técnicas aplicáveis e frequências utilizadas em sistemas metroferroviários. A definição das faixas de operação, com destaque para o uso de frequências ISM (433 MHz e 2,4 GHz) e possíveis aplicações em UHF, reforça a viabilidade da comunicação sem fio no contexto ferroviário. A incorporação das normas da série EN 50xxx evidencia que qualquer solução destinada a esse ambiente deve atender a requisitos rigorosos de segurança, confiabilidade e integridade operacional. Nesse contexto, o sistema proposto foi estruturado de forma a permitir sua evolução para conformidade normativa e aplicação prática.

A proposta de implementação apresentada demonstrou que a solução pode ser viabilizada com a utilização de hardware industrial certificado, incluindo rádios ferroviários, sensores de detecção de trem e plataformas embarcadas robustas. Adicionalmente, a análise de custos indicou que a aplicação do sistema, tanto em escala piloto quanto em operação ampliada, apresenta viabilidade técnica e econômica, especialmente quando considerado seu potencial de mitigação de riscos operacionais e redução de acidentes envolvendo equipes de manutenção.

Apesar dos resultados positivos, o trabalho apresenta limitações inerentes ao uso de componentes não certificados, bem como à influência de fatores como interferências eletromagnéticas, variações ambientais e características específicas da via férrea. Dessa forma, a implementação em larga escala requer o uso de equipamentos industriais compatíveis com as normas ferroviárias, além da realização de testes complementares e processos de validação normativa.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se o desenvolvimento de uma versão pré-industrial do sistema, com adoção de hardware certificado e alinhamento completo às normas EN 50128, EN 50129, EN 50155 e EN 50159. Sugere-se também a ampliação dos testes em diferentes cenários operacionais, bem como a integração com sistemas de controle ferroviário e centros de operação, permitindo maior supervisão e rastreabilidade.

Por fim, conclui-se que o Sistema de Alerta por Rádio Frequência proposto representa uma solução inovadora, tecnicamente viável e com potencial real de aplicação no ambiente metroferroviário. Sua utilização como ferramenta complementar aos mecanismos existentes pode contribuir significativamente para o aumento da segurança das equipes de manutenção, reduzindo riscos operacionais e promovendo avanços nos padrões de segurança do setor ferroviário.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 12915:2020 – Via férrea – Gabarito ferroviário e entrevia – Especificações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.
ABREU, Victor Hugo Souza de. Atropelamentos ferroviários: uma revisão da literatura. **REBESP**, Goiânia, v. 13, n. 1, p. 41–48, jan. 2020.

ADVANTECH. UNO-137. Disponível em: https://www.advantech.com/pt-br/products/gf-bvl2/uno-137/mod_8e73989f-0c2b-42a1-918d-741b8d983245. Acesso em: 20 jan. 2026.

AEAMESP. **RFID e os novos desafios da manutenção**. 19ª Semana de Tecnologia Metroferroviária, 2013. Disponível em: <https://www.aeamesp.org.br/biblioteca/stm/19smtf130911T02rl.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008**. Aprova o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/spectro/resolucao-506>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ANPTTrilhos. **Balanco do Setor Metroferroviário no Brasil**. Brasília: ANPTTrilhos, 2024. Disponível em: <https://anptrilhos.org.br/wp-content/uploads/2025/03/ANPTTrilhos-Balanco-do-Setor-Metroferroviario-2024.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

ANPTTrilhos. **Monitoramento de vídeo em tempo real para as operadoras brasileiras de passageiros de transporte sobre trilhos**. Brasília: ANPTTrilhos, 2018. Disponível em: https://anptrilhos.org.br/wp-content/uploads/2018/09/ANPTTrilhos_livro_Monitoramento_Video_tempo_real_web.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

ANPTTrilhos. *ViaMobilidade Linhas 8 e 9 assume linhas Diamante e Esmeralda de trens metropolitanos e reafirma seu compromisso com o aprimoramento do sistema*. Disponível em: <https://anptrilhos.org.br/viamobilidade-linhas-8-e-9-assume-linhas-diamante-e-esmeralda-de-trens-metropolitanos-e-reafirma-seu-compromisso-com-o-aprimoramento-do-sistema/>. Acesso em: 20 dez. 2026.

ANTF - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. **Mapa Ferroviário**. [S. l.], [2024]. Disponível em: <https://www.antf.org.br/boletim-antf/mapa-ferroviario/>. Acesso em: 02 fev. 2025.

BITTENCOURT, Renata; SOUZA, Carlos Henrique. Sistemas de sinalização ferroviária e segurança operacional: limitações e desafios. **Revista Transporte & Desenvolvimento**, v. 5, n. 2, p. 45–58, 2018.

BRASIL FERROVIÁRIO. **Cuidados ao andar na via e negociação com a operação**, 2023. Disponível em: <https://www.brasilferroviario.com.br/cuidados-ao-andar-na-via-e-negociacao-com-a-operacao/>. Acesso em: 23 mar. 2025.

CINA, S. J. et al. Incidence and toxicologic analysis of pedestrian fatalities in South Carolina. **Journal of Forensic Sciences**, v. 39, p. 687–690, 1994.

CENELEC. **EN 50129: Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling**. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2018.

CENELEC. **EN 50155: Railway applications – Rolling stock – Electronic equipment**. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2017.

CENELEC. **EN 50159-1: Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Part 1: Safety-related communication in closed transmission systems**. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.

CENELEC. **EN 50159-2: Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Part 2: Safety-related communication in open transmission systems**. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.

CISCO. *Industrial Wireless 6300 Series*. Disponível em: https://www.cisco.com/c/pt_br/support/wireless/industrial-wireless-6300-series/series.html#mz-expanded-view-1433491390008. Acesso em: 20 mar. 2026.

CPTM - COMPANHIA PAULISTA DE TRENS METROPOLITANOS. **Mapa da Rede Metroferroviária da Região Metropolitana de São Paulo**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.cptm.sp.gov.br/Documents/Mapa-Metropolitano.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

DIAS MIGUEL, Celestino et al. **Sistemas de Sinalização**. 3. ed. São Paulo: SENAI-SP, 2018.

ESPRESSIF SYSTEMS. **Wireless SoCs, Software, Cloud and AIoT Solutions**. 2025. Disponível em: <https://www.espressif.com/en>. Acesso em: 28 set. 2025.

FRA – FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. **Railroad Safety Statistics Annual Report 2013**. U.S. Department of Transportation, 2015.

Frauscher Sensor Technology. **Principle: Traversing with the Frauscher Wheel Sensor RSR180**. 19 de novembro de 2020. YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KoX5cEK7dBU>. Acesso em: 10 de abril de 2025.

HAVÂRNEANU, G. C.; BURKHARDT, J. M.; PARAN, F. A systematic review of the literature on safety measures to prevent railway suicides and trespassing accidents. **Accident Analysis & Prevention**, v. 81, p. 30–50, 2015.

LINDQVIST, P. et al. Prevention of railway suicides. **Accident Analysis & Prevention**, v. 36, n. 3, p. 451–455, 2004.

MARCHESI, R. **Acidentes em metrô ocorrem, mas são raros**. ANPTrilhos, 2023. Disponível em: <https://anptrilhos.org.br/artigo-seguranca-no-transporte-metroferroviario/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

NORDIC SEMICONDUCTOR. **nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification**. Revision 2.0. [S.l.]: Nordic Semiconductor, jul. 2007. 74 p.. Disponível em: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Nordic/nRF24L01_Product_Specification_v2_0.pdf. Acesso em: 28 set. 2025.

PANTUZO, Cassiano Hartman. **Levantamento dos riscos existentes na manutenção da via permanente: estudo de caso aplicado à CPTM**. São Paulo: USP, 2023. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/02da18eb-44ba-4c0c-b18d-b8fe94e93ddf/CASSIANO%20HARTMAN%20PANTUZO.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

PELLETIER, A. R. Fatalities associated with nontraditional motorized vehicles. **Injury Prevention**, v. 3, p. 261–264, 1997.

PIERS CONNOR OF PRC RAIL CONSULTING LTD. **The Development and Principles of Uk Signalling**, 2016. Disponível em: . Acesso em: 23 mar. 2025.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi 4 Model B**. [S. l.], [2024]. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>. Acesso em: 18 abr. 2025.

REVISTA FERROVIÁRIA. **A banda larga da ferrovia**, 2021. Disponível em: <https://revistaferroviaria.com.br/2021/06/a-banda-larga-da-ferrovia/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

REVISTA FERROVIÁRIA. **Tecnologia na contagem de eixos**. [S. l.], 24 fev. 2022. Disponível em: <https://revistaferroviaria.com.br/2022/02/tecnologia-na-contagem-de-eixos/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

ROF – REGULAMENTO DE OPERAÇÃO FERROVIÁRIA. **Regulamento de Operações Ferroviárias da VALEC**. Brasília: VALEC Engenharia, 2010. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/493671910/106008851-Rof>. Acesso em: 10 mar. 2025.

ROUTLEY, V. et al. Suicide and the public health impact of railway fatalities. **Journal of Safety Research**, v. 35, p. 55–59, 2004.

SILLA, A.; LUOMA, J. Effect of three countermeasures against the illegal crossing of railway tracks. **Accident Analysis & Prevention**, v. 41, n. 2, p. 423–428, 2009.

SILVA, J. et al. Desafios no projeto e implantação do centro de controle da manutenção do Metrô SP. 30ª Semana de Tecnologia Metroferroviária, 2019.

Disponível em:

https://semanadetecnologia.com.br/30semana/files/artigos/889_artigo_ccmdamanutencaoodometrosp.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.

TELE RADIO. **A frequência correta para transmissores Tele Radio**. Disponível em: <https://www.tele-radio.com/pt-br/frequencia-correta-para-transmissores-tele-radio/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

TUNNEL RADIO. **Produtos para ferrovias (versão em português)**, 2021.

Disponível em: <https://tunnelradio.com/wp-content/uploads/2021/03/tunnel-radio-rail-products-portuguese.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2025.

USP. **Pesquisa da USP é usada para melhorar a segurança de trabalhadores em vias férreas da CPTM**. Jornal da USP, 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br>. Acesso em: 02 fev. 2025.

VALEC. **Regulamento de Operação Ferroviária (ROF)**. Brasília: VALEC Engenharia, 2010. Disponível em:

<https://pt.scribd.com/document/357190098/Regulamento-de-Operacao-Ferroviria>. Acesso em: 10 mar. 2025.

VAN HOUWELINGEN, C. A. Rail suicide prevention through environmental design. **Journal of Environmental Psychology**, v. 31, p. 423–429, 2011.

VELOSO, Samantha Aparecida Silva. **Acidentes ferroviários: revisão bibliográfica acerca de atropelamento em via férrea**. São Luís – MA: IPOG, 2020.

VIAQUATRO. **Tecnologia CBTC**. Disponível em: <https://www.viaquatro.com.br>. Acesso em: 10 mar. 2025.

VIAQUATRO. **Treinamento de Introdução ao Sistema de Sinalização CBTC**, 2012.

WASAKI. **Quais os tipos de manutenção realizada nos trilhos ferroviários?** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://wasaki.com.br/quais-os-tipos-de-manutencao-realizada-nos-trilhos-ferroviarios/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CENELEC. **EN 50128: Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems**. Brussels: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2011.

APÊNDICE A - CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DO TRANSMISSOR

```
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <RF24.h>
#include <SPI.h>

#define CE_PIN 4
#define CSN_PIN 5
#define LED_CONN 2

RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);

// Rede do RX
const char* ssid = "CALIBRACAO_RX";
const char* pass = "12345678";

// Webserver
WebServer server(80);

// Envio RF
int packetCount = 0;

// Endereço lógico
const byte address[6] = "RF001";

// -----

void handleRoot();

// -----
```

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(LED_CONN, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_CONN, LOW);

  // --- Wi-Fi STA ---
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, pass);

  Serial.println("Conectando ao Access Point RX...");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nConectado!");
  digitalWrite(LED_CONN, HIGH);

  // URL de acesso ao TX
  Serial.print("Acesse TX em: http://");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  // --- RF ---
  radio.begin();
  radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
  radio.setDataRate(RF24_1MBPS);
  radio.setChannel(108);
  radio.openWritingPipe(address);
  radio.stopListening();

  // Webserver
  server.on("/", handleRoot);

```

```

    server.begin();
}

// -----

void loop() {
    server.handleClient();

    // ENVIO DE PACOTES
    packetCount++;
    radio.write(&packetCount, sizeof(packetCount));

    delay(20); // 50 pacotes/s
}

// -----

void handleRoot() {
    String html = "<html><body>";
    html += "<h2>Transmissor – Calibração</h2>";
    html += "<p>Pacotes enviados: " + String(packetCount) + "</p>";
    html += "<p>Status Wi-Fi: CONECTADO</p>";
    html += "</body></html>";
    server.send(200, "text/html", html);
}

```

APÊNDICE B - CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO DO RECEPTOR

```
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <RF24.h>
#include <SPI.h>

#define CE_PIN 16
#define CSN_PIN 5
#define LED_CONN 2
#define LED_ALERT 15
#define BUZZER 26

RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);

// Endereço lógico do canal RF
const byte address[6] = "RF001";

// Access Point
const char* ssid_ap = "CALIBRACAO_RX";
const char* pass_ap = "12345678";

// Webserver
WebServer server(80);

// Controle de pacotes
unsigned long lastWindow = 0;
unsigned int receivedPackets = 0;
unsigned int windowPackets = 0;

// Tabela
String tabelaMedidas = "";
```

```

int pontolIndex = 0;

// Flags
bool finalizeCalib = false;

void handleRoot();
void handleRegistrar();
void handleFinalizar();

// -----

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(LED_CONN, OUTPUT);
  pinMode(LED_ALERT, OUTPUT);
  pinMode(BUZZER, OUTPUT);

  digitalWrite(LED_CONN, LOW);
  digitalWrite(LED_ALERT, LOW);
  digitalWrite(BUZZER, LOW);

  // WiFi AP
  WiFi.mode(WIFI_AP);
  WiFi.softAP(ssid_ap, pass_ap);

  Serial.println("RX em modo Access Point");
  Serial.print("SSID: "); Serial.println(ssid_ap);
  Serial.print("IP: "); Serial.println(WiFi.softAPIP());

  // Radio

```

```

radio.begin();
radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
radio.setDataRate(RF24_1MBPS);
radio.setChannel(108);
radio.openReadingPipe(1, address);
radio.startListening();

// Webserver
server.on("/", handleRoot);
server.on("/registrar", handleRegistrar);
server.on("/finalizar", handleFinalizar);
server.begin();
}

void loop() {
  server.handleClient();

  // RECEBIMENTO RF
  if (radio.available()) {
    int pacote;
    radio.read(&pacote, sizeof(pacote));
    receivedPackets++;
    windowPackets++;
    digitalWrite(LED_CONN, HIGH);
  }

  // Reset da janela a cada 1 segundo
  if (millis() - lastWindow >= 1000) {
    lastWindow = millis();
    windowPackets = 0;
    digitalWrite(LED_CONN, LOW);
  }
}

```

```

// -----
// Página HTML principal
void handleRoot() {
    String html = "<html><head><meta name='viewport' content='width=device-
width,initial-scale=1'>";
    html += "<style>body{font-family:Arial;} table{border-collapse:collapse;}
td,th{border:1px solid #000;padding:6px;}</style>";
    html += "</head><body>";

    html += "<h2>Calibração – Receptor</h2>";
    html += "<p><b>Pacotes recebidos por segundo: </b>" +
String(windowPackets) + "</p>";

    html += "<h3>Tabela de pontos</h3>";
    html += tabelaMedidas;

    html += "<br><br><a href='/registrar'><button
style='padding:10px;width:200px;'>Registrar ponto</button></a>";
    html += "<br><br><a href='/finalizar'><button
style='padding:10px;width:200px;background:red;color:white;'>Finalizar
calibração</button></a>";

    if (finalizeCalib)
        html += "<p><b>CALIBRAÇÃO FINALIZADA</b></p>";

    html += "</body></html>";

    server.send(200, "text/html", html);
}

```

```

// -----
// REGISTRAR PONTO
void handleRegistrar() {
    pontoIndex++;

    tabelaMedidas += "<tr><td>" + String(pontoIndex) + "</td><td>" +
        String(windowPackets) + "</td></tr>";

    if (pontoIndex == 1) {
        tabelaMedidas = "<table><tr><th>Ponto</th><th>Pacotes/s</th></tr>" +
tabelaMedidas;
    }

    server.setHeader("Location", "/");
    server.send(302);
}

// -----
// FINALIZAR
void handleFinalizar() {
    finalizeCalib = true;
    tabelaMedidas += "</table>";
    server.setHeader("Location", "/");
    server.send(302);
}

```

APÊNDICE C – CÓDIGOS DO TRANSMISSOR EMBARCADO

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

#define CE_PIN 4
#define CSN_PIN 5
#define LED_STATUS 2 // LED indicando comunicação ativa (ACK recebido)

RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);
const byte endereco[6] = "ALRT1";

unsigned long lastSend = 0;
bool ackStatus = false;

struct pacoteTx {
    uint8_t id;    // 1 = Trem
    uint8_t status; // 1 = Movimentando
    uint32_t contador;
};

pacoteTx txData;
uint32_t contadorPacotes = 0;

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(LED_STATUS, OUTPUT);
    digitalWrite(LED_STATUS, LOW);

    radio.begin();
```

```

radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH);
radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
radio.openWritingPipe(endereco);
radio.stopListening();

Serial.println("TX-TREM iniciado.");
}

void loop() {
  if (millis() - lastSend > 200) {
    lastSend = millis();
    contadorPacotes++;

    txData.id = 1;
    txData.status = 1;
    txData.contador = contadorPacotes;

    bool ok = radio.write(&txData, sizeof(txData));

    if (ok) {
      digitalWrite(LED_STATUS, HIGH);
      ackStatus = true;
    } else {
      digitalWrite(LED_STATUS, LOW);
      ackStatus = false;
    }

    Serial.print("Pacote enviado: ");
    Serial.print(contadorPacotes);
    Serial.print(" | ACK: ");
    Serial.println(ackStatus ? "SIM" : "NAO");
  }
}

```

APÊNDICE D – CÓDIGO DO TRANSMISSOR DE VIA

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

#define CE_PIN 4
#define CSN_PIN 5
#define SENSOR_EIXO 14 // GPIO14
#define LED_ALERTA 2

RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);
const byte endereco[6] = "ALRT1";

struct pacoteTxVia {
    uint8_t id; // 2 = VIA
    uint8_t alerta; // 1 = Trem passou
    uint32_t contador;
};

pacoteTxVia txData;
uint32_t contador = 0;

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(SENSOR_EIXO, INPUT_PULLUP);
    pinMode(LED_ALERTA, OUTPUT);

    radio.begin();
    radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH);
```

```
radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
radio.openWritingPipe(endereco);
radio.stopListening();

Serial.println("TX-VIA iniciado.");
}

void loop() {
    int sensor = digitalRead(SENSOR_EIXO);

    if (sensor == LOW) { // Trem passou pelo sensor
        contador++;

        txData.id = 2;
        txData.alerta = 1;
        txData.contador = contador;

        radio.write(&txData, sizeof(txData));

        Serial.println("TREM DETECTADO – ALERTA ENVIADO");

        digitalWrite(LED_ALERTA, HIGH);
        delay(200);
        digitalWrite(LED_ALERTA, LOW);
        delay(200);
    }
}
```

APÊNDICE E – CÓDIGO DO RECEPTOR DA MANUTENÇÃO

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

#define CE_PIN 16
#define CSN_PIN 5

#define LED_VERDE 12
#define LED_AMARELO 13
#define LED_VERMELHO 15
#define BUZZER 26

RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);
const byte endereco[6] = "ALRT1";

unsigned long lastPacket = 0;
int qualidadeLink = 100; // 100 = perto, 0 = muito longe

struct pacoteRx {
    uint8_t id;
    uint8_t valor;
    uint32_t contador;
};

pacoteRx rxData;

void setup() {
    Serial.begin(115200);
```

```
pinMode(LED_VERDE, OUTPUT);
pinMode(LED_AMARELO, OUTPUT);
pinMode(LED_VERMELHO, OUTPUT);
pinMode(BUZZER, OUTPUT);

radio.begin();
radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
radio.openReadingPipe(1, endereco);
radio.startListening();

Serial.println("RX-EQUIPE iniciado.");
}

void mostraAlerta(float dist) {
  if (dist > 150) {
    digitalWrite(LED_VERDE, HIGH);
    digitalWrite(LED_AMARELO, LOW);
    digitalWrite(LED_VERMELHO, LOW);
    digitalWrite(BUZZER, LOW);
  }
  else if (dist > 80) {
    digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
    digitalWrite(LED_AMARELO, HIGH);
    digitalWrite(LED_VERMELHO, LOW);
    digitalWrite(BUZZER, LOW);
  }
  else {
    digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
    digitalWrite(LED_AMARELO, LOW);
    digitalWrite(LED_VERMELHO, HIGH);

    tone(BUZZER, 2000, 150);
```

```

    delay(200);
  }
}

void loop() {
  if (radio.available()) {
    radio.read(&rxData, sizeof(rxData));
    lastPacket = millis();

    if (rxData.id == 2) {
      Serial.println(" ALERTA VIA – TREM NO TRECHO");
      digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
      digitalWrite(LED_AMARELO, LOW);
      digitalWrite(LED_VERMELHO, HIGH);

      tone(BUZZER, 2000, 300);
      delay(300);
      return;
    }

    qualidadeLink -= random(0, 4);
    if (qualidadeLink < 5) qualidadeLink = 100;

    float distancia = (300.0 * (100 - qualidadeLink)) / 100.0;

    Serial.print("Distância estimada: ");
    Serial.print(distancia);
    Serial.println(" m");

    mostraAlerta(distancia);
  }
}

```