

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ELETRICIDADE – DEEE
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRESSA SILVA DA CRUZ

**A Integração de Sistemas de Comunicação Backbone na Automação de
Máquinas de Chave na Estrada de Ferro Carajás: Desafios e Avanços
Tecnológicos.**

São Luís- MA

2025

ANDRESSA SILVA DA CRUZ

A Integração de Sistemas de Comunicação Backbone na Automação de Máquinas de Chave na Estrada de Ferro Carajás: Desafios e Avanços Tecnológicos.

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Marcos Tadeu Rezende de Araújo.

São Luís- MA

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Cruz, Andressa Silva da.

A Integração de Sistemas de Comunicação Backbone na
Automação de Máquinas de Chave na Estrada de Ferro
Carajás: Desafios e Avanços Tecnológicos / Andressa Silva
da Cruz. - 2025.
69 f.

Orientador(a): Marcos Tadeu Rezende de Araújo.
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Estrada de Ferro Carajás. 2. Backbone. 3. Máquina
de Chave. I. Araújo, Marcos Tadeu Rezende de. II. Título.

ANDRESSA SILVA DA CRUZ

A Integração de Sistemas de Comunicação Backbone na Automação de Máquinas de Chave na Estrada de Ferro Carajás: Desafios e Avanços Tecnológicos.

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Marcos Tadeu Rezende de Araújo.

Aprovada em 28 de agosto de 2025.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcos Tadeu Rezende de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Prof. Dr. Hércules Araújo Oliveira
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Msc. Wagner Elvio de Loiola Costa
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

São Luís- MA
2025

AGRADECIMENTOS

Neste momento tão especial da minha graduação, agradeço primeiramente a Deus, autor e consumidor da minha fé. Sem Ele nada seria possível, e a Ele dedico toda honra e louvor, por estar presente desde o início desta jornada até a colação de grau.

Sou profundamente grata à minha família, especialmente aos meus pais, Adriana e Adir, pelo amor, força, generosidade e exemplo de persistência e humildade. Aos meus irmãos, Aline e Adson, e seus cônjuges, Dhone e Graciele, pelo apoio e incentivo constantes. À minha princesa Hannah e ao meu amado Miguel, presentes de Deus ao longo desta caminhada.

Agradeço à Universidade Federal do Maranhão pela oportunidade de cursar a graduação, e à coordenação de Engenharia Elétrica pelo suporte ao longo dos anos. Sou especialmente grata ao meu orientador, Dr. Tadeu Rezende, pela orientação dedicada, paciência, apoio e valiosas contribuições para meu desenvolvimento acadêmico.

Registro minha gratidão à Vale S.A., pelo apoio ao meu crescimento profissional e por ceder todos os materiais, documentos e manuais necessários para construção de trabalho, e aos colegas de trabalho que colaboraram na elaboração deste trabalho, em especial Diorgenes Silva, Filipe Silva, Marcos Torre, Arthur Lucena, Valério Nunes, Viviane Santos, André Machado, Leonardo Torres, Bruna Carneiro, Mariana Vale, Vanderson Reis, Willi Santos, Fernando Matos, Leandro Pinto, Carlos Arthur, Luiz Teixeira e Daniele Portela. Gostaria de destacar também a contribuição do meu amigo Ledson Martins que de maneira tão paciente conseguiu me orientar, incentivar e contribuiu de forma significativa no desenvolvimento desta monografia.

Sou grata à minha igreja, AD Vila Nova I e II, na pessoa do dirigente Edson Corrêa e sua esposa Adriane Corrêa, e a todos os irmãos que me apoiaram em oração e incentivo, em especial às intercessoras Ir. Ivonete, Ir. Lucilene e Ir. Beta, a minha amiga Sophia e as nossas crianças. Agradeço aos meus amigos dos grupos JCP, PE e MF, que de maneira especial acompanharam de perto a minha jornada, em especial agradeço ao Mateus Silva, Marina Oliveira, Matheus Marques, Nazylle Moura, Bia Silva e Karol Pimenta. Sou também profundamente grata aos meus amigos missionários, cujas vidas me inspiram a amar mais a Jesus e amar a Obra Missionária.

Este trabalho é resultado de um esforço coletivo. Sua conclusão representa um marco importante em minha jornada acadêmica, e todos vocês que contribuíram desempenharam papel fundamental nessa realização.

Obrigado!

***“Grandes coisas fez o SENHOR
por nós, e, por isso, estamos
alegres.”***

Salmos 126.3

RESUMO

Com o crescimento exponencial do tráfego de informações em larga escala, os sistemas de comunicação do tipo backbone tornaram-se essenciais para garantir a eficiência na transmissão de dados em tempo real, com elevada precisão e confiabilidade. No contexto ferroviário, essa necessidade se intensifica, uma vez que a segurança operacional depende da troca contínua de informações entre os sistemas de sinalização, automação e telecomunicações distribuídos ao longo da malha ferroviária. Nesse cenário, destacam-se as máquinas de chave, componentes do Aparelho de Mudança de Via (AMV), amplamente utilizadas na Estrada de Ferro Carajás (EFC). Esses dispositivos são fundamentais na definição da trajetória dos trens, possibilitando a mudança de posição das vias de forma dinâmica. Devido à sua distribuição extensa e alta demanda operacional, tais equipamentos apresentam elevada taxa de falhas, exigindo monitoramento contínuo e resposta rápida de manutenção. A integração entre os sistemas de comunicação backbone e a automação das máquinas de chave configura uma solução estratégica para o aprimoramento da gestão ferroviária, por meio do controle remoto em tempo real, aumentando a previsibilidade e a segurança das operações. Este trabalho analisa essa integração na EFC, destacando seus impactos na redução de manutenções corretivas, no desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva e preventiva, bem como na elevação da confiabilidade operacional, elevando a confiabilidade e reduzindo ocorrências como acidentes e descarrilamentos.

Palavras-chave: sistemas backbone; automação ferroviária; máquinas de chave; monitoramento remoto; Estrada de Ferro Carajás.

ABSTRACT

With the exponential growth of large-scale information traffic, backbone-type communication systems have become essential to ensure real-time data transmission with high accuracy and reliability. In the railway context, this need is even more critical, as operational safety depends on the continuous exchange of information among signaling, automation, and telecommunications systems distributed throughout the railway network. Within this scenario, switch machines—components of the Track Switching Device (AMV)—stand out as key elements, being widely used in the Carajás Railway (Estrada de Ferro Carajás – EFC). These devices are crucial in defining train routes by dynamically changing track positions. Due to their extensive distribution and high operational demand, such equipment tends to have high failure rates, requiring continuous monitoring and rapid maintenance response. The integration between backbone communication systems and switch machine automation represents a strategic solution for improving railway management through real-time remote control, increasing the predictability and safety of operations. This study analyzes this integration within the EFC, highlighting its impact on reducing corrective maintenance, enabling the development of predictive and preventive maintenance strategies, and enhancing operational reliability, thereby reducing occurrences such as accidents and derailments.

Keywords: backbone systems; railway automation; switch machines; remote monitoring; Carajás Railway.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Stokton- Darlington Railway: primeira ferrovia pública do mundo.	18
Figura 2 – Inauguração da Imperial Companhia de Navegação a Vapor e Estrada de Ferro de Petrópolis.	18
Figura 3 – Malha ferroviária brasileira.....	20
Figura 4 – Ferrovias concedidas e em projeto/construção no Brasil.	20
Figura 5 – Registro da inauguração da Estrada de Ferro Carajás, em 28 de fevereiro de 1985.	21
Figura 6 – Aparelho de mudança de via.	26
Figura 7 – Esquema ilustrativo do funcionamento da fibra óptica.....	30
Figura 8 – Sistema de Telecomunicações da EFC.....	39
Figura 9 – Sistema de Telecomunicações da EFC.....	40
Figura 10 – Visão Geral de Todo Processo de Comunicação na Infraestrutura de Telecomunicações.....	42
Figura 11- Painel do Sistema de Gestão Ferroviária (SGF).	43
Figura 12 – Caixa de terminais de fibra óptica GPON. SC/UPC SC/APC	46
Figura 13 – Cabo de fibra óptica blindado.	47
Figura 14 – Interface TU do Supervisório de MCH.....	48
Figura 15 – Equipamento EletrologIXS dentro do TU, Modelo gerado por IA.....	49
Figura 16 – Multiplexador FOX 515	50
Figura 17 – Cartões do EletrologIXS	51
Figura 18 – Exemplo do log TU 209	55
Figura 19 – Falhas de MCH/TRE.....	58
Figura 20 – Detalhes das Falhas MCH/TRE	58
Figura 21 – Falhas Evitáveis e Inevitáveis MCH/TRE.	59
Figura 22 – Detalhamento das Falhas Evitáveis MCH/TRE.....	59
Figura 23 – Falhas Evitadas MCH/TRE.....	60
Figura 24– Detalhes das Falhas Evitadas MCH/TRE.	60

LISTA DE SIGLAS

AMV	Aparelho de Mudança de Via
AMZA	Amazônia Mineração
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
APS	Automatic Protection Switching
ATP	Automatic Train Protection
CCO	Centro de Controle Operacional
CDV	Circuito de Via
CMA	Centro de Monitoramento de Ativos
ECC	Controlador de Circuito Eletrônico
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
EFC	Estrada de Ferro Carajás
ELIX	EletrologIXS
EONs	Redes Ópticas Elásticas
FEPASA	Ferrovias Paulista S.A
GE	General Electric
IoT	Internet of Things
ITU-T	International Telecommunication Union
IVM	Intertravamento Vital Microprocessado
KPI	Key Performance Indicators
LED	Light Emitting Diode
MCHs	Máquinas de Chave
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OPC UA	Unified Architecture
PCL	Painel de Controle Local
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PGSs	Procedimento de Gestão de Segurança
PROs	Procedimento Operacional
QoS	Quality of Service
RFSP	Ramal Ferroviário Sudeste do Pará
RFSA	Rede Ferroviária Federal S.A.
RNP	Rede Nacional de Ensino e Pesquisa
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition

SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SGF	Sistema de Gestão Ferroviária
STM	Synchronous Transport Module
TDS	Train Dispatching System
TU	Travessão Universal
UIT	União Internacional de Telecomunicações
UNEM	Unidade de Equipamentos Multiplexados
UPSR	Unidirectional Path Switched Ring
VHF	Very High Frequency
VoIP	Voice over Internet Protocol
VPN	Virtual Private Network

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1	JUSTIFICATIVA.....	15
2	OBJETIVOS	15
3.1	OBJETIVO GERAL	15
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
4	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
5.1	INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS FERROVIÁRIOS AUTOMATIZADOS ...	17
5.1.1	Evolução da Automação na Malha Ferroviária	17
5.1.2	Panorama da Malha Ferroviária no Brasil	19
5.1.3	A Importância da Estrada de Ferro Carajás na Logística Nacional	21
5.1.4	Avanços Tecnológicos e Perspectivas Futuras	22
5.2	SISTEMAS DE SINALIZAÇÃO FERROVIÁRIA.....	23
5.2.1	Conceitos e Importância dos Sistemas de Sinalização	23
5.2.2	Tipos de Sinalização Ferroviária	24
5.2.3	Aplicações na Estrada de Ferro Carajás.	25
5.2.4	Máquinas de Chave (MCHs): Funcionamento e Relevância.....	25
5.2.5	Centro de Controle Operacional (CCO)	27
5.2.6	Estratégias de Monitoramento e Manutenção	28
5.3	COMUNICAÇÃO BACKBONE.....	28
5.3.1	Conceito e Características	28
5.3.2	Fibra Ótica como Meio de Transmissão no Backbone	29
5.3.3	Hierarquia Digital Síncrona (SDH) em Redes de Fibra Óptica.....	30
5.3.4	Redundância e Continuidade Operacional em Sistemas Ferroviários.....	31
5.3.5	Benefícios da Integração entre o Backbone de Comunicação e as Máquinas de Chave	31
5.3.6	SDH e a Automação das MCHs na Estrada de Ferro Carajás	32
5.4	INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS E DESAFIOS TECNOLÓGICOS	33
5.4.1	Interoperabilidade entre Sistemas Legados e Tecnologias Modernas	33
5.4.2	Integração com IoT e Sistemas Inteligentes de Monitoramento	33
5.4.3	Desafios na Escalabilidade e Manutenção de Sistemas Automatizados.....	34
5.4.4	Perspectivas Futuras na Automação Ferroviária e na Infraestrutura Digital	34

5.4.5	Normas e Padronizações Técnicas Aplicadas à Automação Ferroviária	35
6	METODOLOGIA	36
7	DISCUSSÕES E RESULTADOS	38
7.1	INFRAESTRUTURA BACKBONE NA EFC	38
7.2	ROTA DE COMUNICAÇÃO FERROVIÁRIA: DO CENTRO DE CONTROLE OPERACIONAL (CCO) À MÁQUINA DE CHAVE (MCH)	42
7.2.1	Centro de Controle Operacional	43
7.2.2	Transmissão via Backbone	44
7.2.3	Travessões Universais	47
7.2.4	Multiplexador FOX515	49
7.2.5	Equipamento ElectroLogIXS	50
7.2.6	Máquina de Chave	52
7.3	MONITORAMENTO	55
7.4	BENEFÍCIOS DA INTEGRAÇÃO BACKBONE/MCH	57
7.5	DESAFIOS E AVANÇOS TECNOLÓGICOS	61
8	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário tem sido, historicamente, um dos principais motores do desenvolvimento industrial e logístico em vários países. No Brasil, apesar da sua relevância econômica, o setor ferroviário passou por longos períodos sem avanços tecnológicos significativos, o que prejudicou sua competitividade em relação a outros meios de transporte. Nos últimos anos, contudo, a maior demanda por eficiência logística, junto com os avanços da chamada Indústria 4.0, vem impulsionando a modernização da malha ferroviária nacional por meio da adoção de sistemas automatizados e integrados digitalmente.

O progresso tecnológico e a expansão do mercado global têm exigido investimentos em infraestrutura logística robusta, capaz de sustentar o crescimento econômico. Nesse contexto, a Estrada de Ferro Carajás (EFC) se destaca como um dos eixos ferroviários mais estratégicos do Brasil, com aproximadamente 892 km de extensão.

Sua malha conecta pontos logísticos essenciais, como a Ferrovia Norte-Sul (em Açailândia- MA), a Companhia Ferroviária Nordeste S.A. (em Itaqui- MA) e o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, também no Maranhão. Esta última conexão é crucial para o escoamento da produção mineral da região Norte, consolidando a EFC como um dos principais corredores de exportação do país.

Entre as tecnologias aplicadas à automação ferroviária, destacam-se as máquinas de chave, que são responsáveis por mudar a direção dos trilhos, permitindo manobras seguras e precisas durante a operação. Considerando a grande extensão da ferrovia, não é viável manter equipes em campo para realizar inspeções manuais constantes. Por isso, foram criados sistemas de monitoramento remoto que integram essas máquinas a uma infraestrutura centralizada, composta por equipamentos digitais de alta performance e redes de fibra óptica, que formam a base do sistema de telecomunicações da Vale S.A.

Para que esses equipamentos funcionem de forma segura e eficiente, é necessário dispor de uma infraestrutura de comunicação confiável, capaz de captar e transmitir dados em tempo real. Nesse contexto, os sistemas de comunicação backbone têm papel fundamental, atuando como a espinha dorsal da infraestrutura digital industrial e promovendo a conexão entre sensores, atuadores, servidores e centros de controle, garantindo o fluxo contínuo e seguro das informações.

Na EFC, a infraestrutura de comunicação backbone permite o envio e o recebimento remoto de dados operacionais em tempo real. Entre os principais parâmetros monitorados estão:

corrente elétrica, temperatura, estados de funcionamento, sobretensões e comandos de acionamento das Máquinas de Chave (MCHs).

Os dados operacionais são transmitidos por meio da rede de fibra óptica e processados pelos multiplexadores, integrando-se ao sistema de sinalização Eletrologixs. Nesse sistema, os registros (logs) são armazenados internamente e utilizados pelos supervisórios de MCHs, possibilitando uma interface visual interativa. Essa interface disponibiliza gráficos, alertas, pré-alarmes e registros históricos, os quais fornecem suporte à análise preditiva e à tomada de decisões com maior agilidade e precisão.

A integração entre as máquinas de chave e os sistemas de comunicação backbone representa um avanço importante para a digitalização das ferrovias. Essa infraestrutura tecnológica contribui para melhorar a eficiência logística, reduzir erros humanos e aumentar a segurança operacional, especialmente em ferrovias com grande volume de tráfego e exigências rigorosas de controle, como é o caso da EFC.

Apesar dos progressos alcançados, ainda existem desafios técnicos, logísticos e de segurança digital a serem superados. A literatura acadêmica carece de estudos mais aprofundados sobre a integração entre sistemas de comunicação e automação ferroviária no Brasil. Essa lacuna é notável, especialmente considerando a complexidade e a confidencialidade inerentes às operações de infraestrutura crítica como a Estrada de Ferro Carajás. A ausência de pesquisas específicas e publicamente disponíveis sobre as soluções implementadas e os desafios superados em contextos nacionais limita a disseminação de conhecimento e a inovação aberta no setor, tornando estudos como este cruciais para o avanço da área.

1 JUSTIFICATIVA

A demanda crescente por maior eficiência operacional e segurança nas ferrovias tem impulsionado o uso de tecnologias avançadas voltadas à automação e ao monitoramento remoto de ativos. Nesse contexto, as MCHs — responsáveis pelas mudanças de via e pela orientação segura dos trens — ocupam um papel estratégico na malha da EFC, uma das mais importantes do país no transporte de minério.

Para garantir a operação segura e contínua desses dispositivos críticos, a integração com sistemas de comunicação de alta performance tornou-se essencial. A utilização de redes backbone baseadas em fibra óptica, associadas a tecnologias como a Hierarquia Digital Síncrona (SDH), o rádio digital e os multiplexadores, permite a automação eficiente das MCHs, reduzindo o tempo de resposta e otimizando a detecção de falhas. Esse modelo tecnológico proporciona também o monitoramento em tempo real, aumentando a previsibilidade e diminuindo a necessidade de manutenções corretivas não planejadas.

Considerando a extensão da EFC, com seus mais de 900 quilômetros de extensão e sendo responsável pelo transporte de um volume de minério de ferro superior a 200 milhões de toneladas anuais, e sua relevância logística, tais recursos são fundamentais para garantir a continuidade das operações e a integridade da infraestrutura. Assim, este estudo justifica-se por sua relevância técnica e estratégica, ao investigar como a integração entre os sistemas de comunicação backbone e a automação das MCHs pode contribuir para a modernização ferroviária e para a manutenção da competitividade e da capacidade produtiva da Vale S.A. Além disso, busca preencher uma lacuna na literatura técnica brasileira, oferecendo uma análise aplicada sobre um tema ainda pouco explorado no contexto nacional.

2 OBJETIVOS

Os objetivos são apresentados a seguir, divididos em geral e específicos.

3.1 OBJETIVO GERAL

Estudar e analisar a integração dos sistemas de comunicação backbone no processo de automação das Máquinas de Chave (MCHs) da Estrada de Ferro Carajás (EFC), considerando seu papel estratégico na operação ferroviária. O objetivo é compreender como essa integração contribui para a melhoria da eficiência operacional, da confiabilidade e da segurança, bem como identificar os principais desafios e os avanços tecnológicos que possibilitam a modernização e otimização desse sistema no contexto ferroviário nacional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Descrever o funcionamento técnico das MCHs e sua importância na estratégia na operação ferroviária;
- Investigar a infraestrutura do sistema de comunicação backbone ao longo da EFC;
- Analisar o fluxo de dados gerados pelas MCHs, desde a sua origem até o Centro de Monitoramento de Ativos (CMA), por meio dos sistemas EletrologIXS e supervisor;
- Identificar os principais desafios enfrentados e os avanços tecnológicos implementados na automação ferroviária da EFC.

4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com a finalidade de apresentar, de forma clara e objetiva, a proposta deste trabalho está organizada em quatro capítulos principais. Antes deles, é realizada a apresentação e contextualização do tema, acompanhada da delimitação do problema, dos objetivos gerais e específicos, bem como da justificativa.

A **seção 5** aborda a fundamentação teórica relacionada à automação ferroviária, às redes de comunicação industriais e ao papel das máquinas de chave. A **seção 6** é caracterizada pelas metodologias adotadas para desenvolver o trabalho. A **seção 7** trata da infraestrutura tecnológica da Estrada de Ferro Carajás, detalhando o funcionamento dos sistemas de comunicação backbone e sua integração com os dispositivos de automação e apresenta uma análise dos principais desafios enfrentados, dos avanços tecnológicos alcançados e das perspectivas futuras para a automação ferroviária integrada. E por fim na **seção 8** são apresentadas as considerações finais e as contribuições do estudo.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos e referenciais que embasam a pesquisa, abordando os sistemas ferroviários automatizados e sua evolução tecnológica. São discutidos os principais mecanismos de sinalização que garantem a segurança e a eficiência operacional. Em seguida, destaca-se o papel do backbone de comunicação como estrutura central de integração. Por fim, analisam-se os desafios tecnológicos e as perspectivas de integração dos sistemas.

5.1 INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS FERROVIÁRIOS AUTOMATIZADOS

A busca por maior eficiência, segurança operacional e integração logística tem impulsionado a modernização dos sistemas ferroviários em escala global. No Brasil, esse avanço é evidenciado pela adoção crescente de tecnologias de automação, especialmente em corredores logísticos estratégicos. A Estrada de Ferro Carajás (EFC) destaca-se nesse cenário como exemplo da aplicação de soluções tecnológicas no transporte ferroviário de cargas. Este capítulo aborda a evolução da automação ferroviária, o panorama da malha nacional, a relevância da EFC e as perspectivas futuras do setor.

5.1.1 Evolução da Automação na Malha Ferroviária

Desde sua origem no século XIX, os sistemas ferroviários evoluíram significativamente, passando de operações manuais para estruturas altamente automatizadas e digitalizadas. Essa transformação tem sido impulsionada por exigências crescentes de produtividade, confiabilidade e segurança, sobretudo em contextos logísticos de grande escala. A automação, nesse cenário, emerge como elemento central na reestruturação das ferrovias modernas, permitindo controle remoto, supervisão contínua e integração de múltiplos sistemas operacionais.

Conforme ilustrado na Figura 1, a primeira ferrovia pública do mundo foi a Stockton-Darlington, inaugurada na Inglaterra em 1825, sob a direção do Engenheiro George Stephenson. Com aproximadamente 32 quilômetros de trilhos, sua construção se estendeu por um período de dez anos e tinha como objetivo principal fazer o transporte de mercadorias, especialmente carvão, e o deslocamento de passageiros, marcando um avanço significativo na história da engenharia e da mobilidade terrestre.

Dessa forma, a partir da década de 1830, a construção de ferrovias expandiu-se rapidamente pela Grã-Bretanha e Europa continental. No Reino Unido, esse processo foi

liderado por empresas privadas, com mínima intervenção estatal, enquanto na Europa continental esteve, em grande parte, sob controle direto dos governos nacionais.

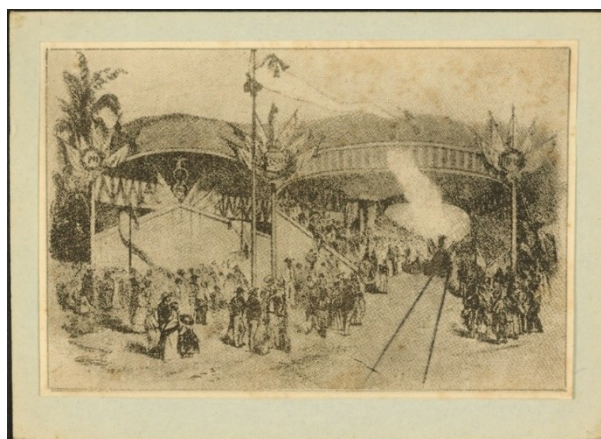
Figura 1 – Stokton- Darlington Railway: primeira ferrovia pública do mundo.



Fonte: Ferrovias e Trens Antigos (2016).

No Brasil, os primeiros marcos legais para o desenvolvimento do setor ferroviário remontam à promulgação da Lei nº 101, de 31 de outubro de 1835 — conhecida como Lei Feijó —, que autorizava a criação de companhias ferroviárias para interligar a capital do Império às províncias de Minas Gerais, Bahia e Rio Grande do Sul, com concessão de exclusividade por quarenta anos. Entretanto, a primeira ferrovia efetivamente construída foi inaugurada apenas em 1854: a Estrada de Ferro Mauá, implantada para conectar o Porto de Mauá, na Baía de Guanabara, à região serrana de Petrópolis (Figura 2). Essa linha férrea visava principalmente ao escoamento da produção cafeeira, destacando-se como importante iniciativa logística no contexto econômico do Segundo Reinado. A expansão da malha ferroviária nacional, contudo, só ganhou maior impulso cerca de uma década depois, impulsionada por interesses políticos e comerciais do período.

Figura 2 – Inauguração da Imperial Companhia de Navegação a Vapor e Estrada de Ferro de Petrópolis.



Fonte: Museu Imperial / Ibram / MinC (acervo José Kopke Fróes, c. 1854).

Vale ressaltar que a automação ferroviária apresentou avanços significativos ao longo do século XX, iniciando-se com a implementação de sistemas eletromecânicos voltados à sinalização. Com o progresso tecnológico, esses sistemas foram substituídos e aprimorados por soluções eletrônicas, computacionais e digitais. Tal evolução permitiu a integração de tecnologias de comunicação, possibilitando o controle remoto das operações e o monitoramento em tempo real dos equipamentos ferroviários, aumentando a eficiência e a segurança do transporte ferroviário.

5.1.2 Panorama da Malha Ferroviária no Brasil

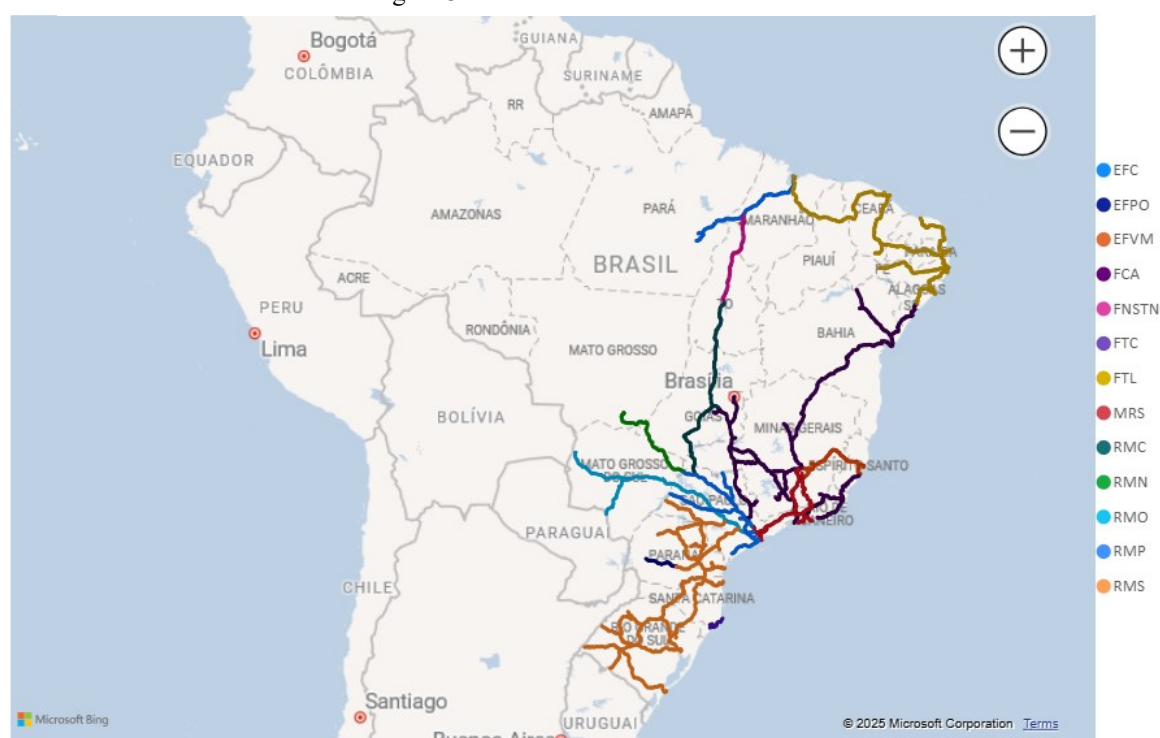
Ao longo do século XX, a administração da malha ferroviária esteve concentrada em grandes empresas estatais, tais como a Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), responsável por cerca de 77% da malha nacional, a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e a Estrada de Ferro Carajás (EFC), controladas pela então estatal Vale do Rio Doce, e a Ferrovia Paulista S.A. (FEPASA), vinculada ao governo do Estado de São Paulo. Esse modelo operacional enfrentou limitações que se manifestaram em baixa eficiência logística, infraestrutura inadequada, falta de padronização, burocracia excessiva e malha ferroviária insuficiente em relação à extensão territorial do país. Na década de 1980, conhecida como “Década Perdida”, a escassez de investimentos agravou a situação, levando à adoção do modelo de privatização do setor ferroviário.

A partir da inclusão da RFFSA no programa nacional de desestatização em 1992 e da promulgação da Lei nº 8.987/1995, que regula as concessões públicas, iniciou-se um novo ciclo para as ferrovias brasileiras. A privatização da Vale, em 1997, promoveu a transferência para o controle privado de importantes ferrovias, como a EFVM e a EFC. Embora tenha sido alvo de críticas iniciais, essa fase proporcionou avanços relevantes na manutenção, na incorporação de tecnologias modernas e na melhoria do desempenho operacional. Contudo, persistem desafios relacionados à articulação e integração da malha ferroviária em âmbito nacional. Diante disso, a necessidade de investimentos contínuos em automação e modernização tecnológica continua sendo essencial para a otimização do sistema ferroviário brasileiro.

Hoje a Agência Nacional de Transporte Terrestres (ANTT) gerencia cerca 30.684 km de malha ferroviária operacional (Figura 3), dividida em 13 concessões (Figura 4), sendo responsável pela regulamentação, concessão, autorizações e fiscalização dos contratos federais. É através dela que é feito o acompanhamento dos ativos e isso envolve o seu uso, conservação,

manutenção e preservação, além disso, fomenta política de melhoria de acompanhado de inovações tecnológicas no transporte de cargas.

Figura 3 – Malha ferroviária brasileira



Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT, [s.d.]).

Figura 4 – Ferrovias concedidas e em projeto/construção no Brasil.

Concessões em operação*	Sigla *	Extensão(km) **
Estrada de Ferro Carajás	EFC	997
Estrada de Ferro Paraná Oeste	EFPO	248
Estrada de Ferro Vitória Minas	EFVM	894
Ferrovia Centro-Atlântica	FCA	7.857
Ferrovia Norte-Sul – Tramo Norte	FNSTN	745
Ferrovia Tereza Cristina	FTC	162
Ferrovia Transnordestina Logística	FTL	4.295
MRS Logística	MRS	1.821
Rumo Malha Central ***	RMC	1.544
Rumo Malha Norte	RMN	735
Rumo Malha Oeste	RMO	1.973
Rumo Malha Paulista	RMP	2.118
Rumo Malha Sul	RMS	7.223
Total		30.612

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT, [s.d.]).

5.1.3 A Importância da Estrada de Ferro Carajás na Logística Nacional

No final da década de 1960, com a identificação de extensas reservas de minério de ferro na região da Serra dos Carajás, no estado do Pará, tornou-se necessária a criação de uma infraestrutura logística que permitisse o escoamento dessa produção até os portos localizados no estado do Maranhão. Em 1976, foi estabelecida a concessão federal para a construção de uma ferrovia ligando Parauapebas (PA) a São Luís (MA), sob responsabilidade da empresa Amazônia Mineração S.A. (AMZA). As obras tiveram início apenas em 1982, e a ferrovia, como mostrado na Figura 5, foi inaugurada oficialmente em 28 de fevereiro de 1985, marcando o início do transporte comercial de minério de ferro. Já o serviço de transporte de passageiros foi implantado no ano seguinte, em 1986.

Figura 5 – Registro da inauguração da Estrada de Ferro Carajás, em 28 de fevereiro de 1985.



Fonte: Arquivo FCCM; CORREIO DE CARAJÁS (2025).

A Estrada de Ferro Carajás (EFC), com 892 km de extensão, conecta os estados do Pará e Maranhão, possuindo uma linha principal e diversos ramais que interligam minas, áreas agrícolas e portos. Sua estrutura foi projetada para suportar o transporte de cargas pesadas, em grande volume e com alta frequência. Além disso, utiliza bitola larga (1,60 m), o que contribui para maior estabilidade e capacidade de carga. Ao longo dos anos, a via foi duplicada, e os

investimentos contínuos em infraestrutura e tecnologia possibilitaram uma ampliação significativa da capacidade operacional da ferrovia.

Desde 2010, a EFC foi modernizada com a instalação de sistemas de Aparelhos de Mudança de Via (AMVs), fundamentais para melhorar a eficiência e a segurança operacional. Ao longo do tempo, a Vale também promoveu modernizações tecnológicas que incluem automação, digitalização dos sistemas operacionais, implantação de redes industriais robustas e implementação de infraestrutura de comunicação de alta capacidade. Essas iniciativas vêm contribuindo para ganhos expressivos em eficiência, confiabilidade e segurança, além de possibilitar o monitoramento remoto em tempo real de subsistemas como sinalização, controle de tráfego etc. (LOGWEB, 2011).

Além dos benefícios técnicos, a EFC continua a desempenhar um papel estratégico na logística nacional, especialmente no escoamento de minério de ferro e outros produtos de alto volume entre o interior do Pará e o litoral maranhense. Sua modernização contínua, por meio da integração de soluções digitais, fortalece a competitividade do modal ferroviário brasileiro, promovendo a integração regional, reduzindo custos logísticos e contribuindo para o desenvolvimento econômico das regiões Norte e Nordeste. Essas iniciativas reforçam o compromisso da Vale com a eficiência energética, sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica no setor de transporte ferroviário.

O processo de modernização tecnológica da EFC será explorado com maior profundidade nos capítulos seguintes, com ênfase especial nos avanços em sistemas de sinalização, nas infraestruturas do centro de controle operacional e no papel das MCHs como elementos fundamentais na automação ferroviária.

5.1.4 Avanços Tecnológicos e Perspectivas Futuras

O desenvolvimento tecnológico no setor ferroviário promoveu a utilização de materiais de maior durabilidade, sistemas de sinalização automatizados, controle centralizado do tráfego e locomotivas com maior potência. Além disso, a incorporação de tecnologias digitais, como redes de comunicação, monitoramento remoto e aplicações baseadas em inteligência artificial, tem contribuído para tornar o transporte ferroviário mais seguro, economicamente eficiente e menos impactante ao meio ambiente.

O transporte ferroviário é considerado um dos meios mais estratégicos para o escoamento de grandes volumes de carga a longas distâncias, destacando-se pelo baixo custo operacional e pela menor agressão ambiental em comparação ao transporte rodoviário. As

tendências apontam para um avanço contínuo na adoção de tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT), a análise de grandes volumes de dados (Big Data) e os sistemas autônomos. Essas inovações devem aprimorar o desempenho das operações, ampliando a capacidade de resposta a falhas, otimizando processos e fortalecendo os padrões de segurança.

Dentre os casos de modernização mais representativos no Brasil, destaca-se a Estrada de Ferro Carajás (EFC), cuja importância logística será abordada na próxima seção.

5.2 SISTEMAS DE SINALIZAÇÃO FERROVIÁRIA

Os sistemas de sinalização ferroviária são elementos fundamentais para garantir a segurança, a regularidade e a eficiência das operações nos trilhos. Com o avanço tecnológico, esses sistemas passaram a integrar soluções automatizadas que otimizam o controle de tráfego e a tomada de decisões em tempo real. Este tópico apresenta os principais conceitos, tipos de sinalização e suas aplicações na Estrada de Ferro Carajás, abordando ainda o funcionamento das MCHs, o papel do Centro de Controle Operacional (CCO) e as estratégias de monitoramento e manutenção utilizadas.

5.2.1 Conceitos e Importância dos Sistemas de Sinalização

Os sistemas de sinalização ferroviária representam um elemento fundamental para o gerenciamento seguro e eficiente do tráfego nas malhas ferroviárias. Sua função primordial consiste em coordenar o deslocamento das composições em circulação, prevenindo colisões, descarrilamentos e demais incidentes operacionais que possam comprometer a segurança e a continuidade das operações. Por meio da utilização de sinais codificados, dispositivos eletromecânicos e sistemas de controle remoto, esses sistemas estabelecem comandos precisos de parada, liberação e limitação de velocidade, conferindo maior previsibilidade e segurança ao trânsito ferroviário.

Em ferrovias de grande extensão e elevada demanda logística, como a EFC, a robustez e a confiabilidade do sistema de sinalização são diretamente proporcionais à eficiência do escoamento de cargas e à preservação da integridade da infraestrutura. Dessa forma, a modernização contínua dos sistemas de sinalização torna-se não apenas uma resposta à evolução tecnológica, mas um requisito estratégico essencial para a sustentabilidade operacional e o desenvolvimento do transporte ferroviário.

5.2.2 Tipos de Sinalização Ferroviária

a) Sinalização Visual.

A sinalização visual representa o método mais tradicional de comunicação entre a via e o maquinista. Consiste em sinais físicos dispostos ao longo do trajeto ferroviário, que transmitem ordens por meio de aspectos visuais. Entre os principais elementos dessa modalidade estão:

- **Semáforos:** dispositivos luminosos que exibem cores como vermelho, amarelo e verde, indicativas de parada, atenção ou liberação do trecho para circulação.
- **Placas e indicativos fixos:** sinais estáticos que fornecem informações diversas, como limites de velocidade, avisos de obstáculos, pontos de parada e orientações para mudanças de via.

b) Sinalização Telefônica ou por Comunicação Direta.

Este sistema baseia-se na comunicação direta entre operadores ou controladores, que utilizam rádios ou telefones para liberar a passagem dos trens ou informar sobre condições da via. Essa modalidade depende da interação humana para garantir a coordenação segura do tráfego ferroviário.

c) Sinalização Automática.

A sinalização automática emprega sensores e sistemas eletrônicos capazes de detectar a presença de composições nos trechos ferroviários, controlando os sinais sem a necessidade de intervenção manual constante. Exemplos incluem:

- **Blocos automáticos:** setores da via que são liberados automaticamente conforme o avanço do trem, assegurando a manutenção de distância segura entre as composições.
- **Sistemas de detecção de ocupação:** dispositivos que monitoram se determinado trecho está ocupado, ajustando os sinais para prevenir riscos operacionais.

d) Sinalização Manual.

Ainda empregada em determinadas ferrovias ou situações específicas, a sinalização manual envolve operadores que utilizam sinais visuais, como bandeiras, ou sinais sonoros para comunicação direta com o maquinista, assegurando orientações imediatas e pontuais durante as operações.

5.2.3 Aplicações na Estrada de Ferro Carajás.

Os sistemas de sinalização empregados na ferrovia englobam modalidades de sinalização visual fixa, dispositivos embarcados e sistemas automatizados de controle de tráfego. A sinalização fixa inclui sinais luminosos, balizas, placas indicativas de velocidade e dispositivos de proteção da via, essenciais para informar ao maquinista emergências, autorizações de avanço, restrições de velocidade e emergências.

Complementarmente, a sinalização embarcada nos trens envolve luzes de identificação, dispositivos sonoros de alerta e sistemas de comunicação que permitem a interação contínua entre as composições e os centros de controle operacional. Além disso, a EFC utiliza intensamente sistemas automáticos de controle baseados em redes de telecomunicações, sensores de via, radares, sistemas de rastreamento e protocolos digitais. Esses recursos possibilitam o monitoramento em tempo real da localização dos trens, das condições operacionais da via permanente e dos equipamentos de campo, como as MCHs.

O sistema fundamental de sinalização é o ElectrologIXS (Elixs) que é responsável por aplicar comandos e receber as informações de todos os equipamentos eletrônicos do campo, permitindo que eles se comuniquem, gerenciando a segurança na circulação dos trens da ferrovia.

Os Elixs ficam localizados em pequenas estações ao longo da ferrovia, chamadas de “Travessões Universais”, “TUs”, “Remotas” ou “Houses”. Um TU típico possui 12 MCHs (4A, 4B e 4C) que possuem variáveis (*tags*) de seu estado dentro do Elixs. As tags possuem nomenclatura específica para serem relacionadas diretamente aos equipamentos.

A integração desses sistemas ocorre por meio de um backbone de alta capacidade, baseado em redes de fibra óptica e enlaces de rádio, que permite a transmissão eficiente de dados críticos entre os trens, os centros de monitoramento e os dispositivos de campo. Dessa forma, a sinalização na EFC não apenas orienta o tráfego, mas também atua como elemento central na automação e gestão inteligente da operação ferroviária.

5.2.4 Máquinas de Chave (MCHs): Funcionamento e Relevância

As MCH desempenham um papel fundamental na operação ferroviária, sendo responsáveis pela movimentação dos aparelhos de mudança de via, conhecidos como AMVs. Nos AMVs (Figura 6) as suas agulhas e jacaré formam canais por onde o friso das rodas passarão e alcancem o trilho da linha desejada.

Figura 6 – Aparelho de mudança de via.



Fonte: CPTM; METRÔ SP, 2018. Foto: Alberto Lobo.

Por meio deste dispositivo mecânico, é possível alterar o trajeto dos trens em cruzamentos, entroncamentos e pátios ferroviários, viabilizando a organização do fluxo e a formação das composições.

O funcionamento das MCHs baseia-se em acionamentos eletromecânicos, que, por meio de motores elétricos e mecanismos de transmissão, promovem o deslocamento das agulhas do AMV entre suas posições. Esse movimento deve ocorrer com alta precisão, assegurando o travamento seguro das agulhas e a sinalização correta da posição da via para o sistema de controle e para os operadores.

Na EFC, esse ativo é integrado ao sistema de sinalização e automação, permitindo que o comando de mudança de via seja realizado remotamente, a partir dos Centros de Controle Operacional (CCO). Essa integração é viabilizada por meio do backbone de comunicação, que transmite pela fibra ótica as informações para os comandos dela.

Além do controle remoto, as MCHs possuem dispositivos de feedback que informam em tempo real sua condição, incluindo:

- **Posição atual das agulhas (normal ou reversa);**
- **Status de travamento mecânico;**
- **Presença de obstruções na via;**
- **Falhas elétricas ou mecânicas no sistema.**

Devido à sua posição estratégica e ao elevado número de ciclos operacionais, elas estão sujeitas a diferentes tipos de falhas, que podem ser classificadas em três categorias principais: abruptas, que ocorrem de forma súbita; intermitentes, caracterizadas por manifestações irregulares; e incipientes, que se desenvolvem progressivamente e podem ser identificadas por meio de monitoramento contínuo. Essa classificação está fundamentada em conceitos

amplamente reconhecidos na área de confiabilidade e manutenção preditiva (DAVIS; MESNICK; TERRILL, 2003).

Entre as principais causas dessas falhas, destacam-se o desgaste mecânico, desalinhamento de componentes, contaminação por partículas, problemas no Controlador de Circuito Eletrônico (ECC) e efeitos de variações térmicas. Tais fatores, se não identificados precocemente, podem comprometer a continuidade das operações e ocasionar paralisações de alto custo logístico.

A sua relevância na operação da ferrovia se reflete diretamente na segurança e na eficiência do tráfego ferroviário. Uma falha no funcionamento de uma MCH pode gerar impactos significativos, como atrasos, desvios operacionais não planejados ou, em casos extremos, risco de descarrilamento.

Portanto, a automação desses dispositivos, aliada a sistemas de comunicação robustos, não apenas melhora a confiabilidade da operação, mas também permite uma gestão mais inteligente, proativa e segura do sistema ferroviário. Essa integração tecnológica representa um avanço significativo na modernização da malha ferroviária da EFC, alinhando-se às melhores práticas internacionais em controle e automação ferroviária.

5.2.5 Centro de Controle Operacional (CCO)

O Centro de Controle Operacional (CCO) representa um dos principais avanços na gestão ferroviária contemporânea. Trata-se de uma central integrada que reúne e administra informações por meio do Sistema de Gestão Ferroviária (SGF), responsável pelo monitoramento e controle de todos os dispositivos distribuídos ao longo da malha ferroviária. O sistema de sinalização que viabiliza essa operação é denominado Elixs, o qual possibilita o gerenciamento remoto de diversas funções, como o acionamento de rotas, a movimentação das MCHs, o monitoramento do circuito de via (CDV) e etc.

Na EFC, o CCO é operado a partir de um centro de controle dotado de sistemas supervisórios que recebem dados em tempo real, permitindo respostas imediatas a situações de risco e otimizando a circulação das composições. Tal sistema está diretamente interligado ao backbone de comunicação da Vale, que possibilita a transmissão confiável de dados ao longo de toda a malha, mesmo em regiões remotas.

5.2.6 Estratégias de Monitoramento e Manutenção

Dado o volume operacional da EFC e a extensão de sua malha, a inspeção presencial periódica torna-se inviável. Por essa razão, foi implementado um sistema de monitoramento remoto baseado em sensores conectados por redes de fibra óptica, que transmite informações sobre temperatura, corrente elétrica, posição das agulhas e outras variáveis críticas (VALE S.A., documento interno, 2023).

Com base nos dados obtidos, a equipe de engenharia pode aplicar estratégias de manutenção preditiva, que consistem na antecipação de falhas por meio da análise de tendências e comportamentos anormais nos dispositivos. Essa abordagem reduz a necessidade de manutenções corretivas emergenciais e minimiza o tempo de indisponibilidade dos equipamentos.

Além disso, a incorporação de inteligência artificial e algoritmos de análise preditiva ao sistema de monitoramento da EFC possibilita diagnósticos mais precisos e a geração automática de alertas para falhas potenciais. Essa abordagem promove uma operação ferroviária mais eficiente, segura e tecnologicamente avançada.

5.3 COMUNICAÇÃO BACKBONE

A infraestrutura de comunicação backbone exerce papel estratégico na automação ferroviária, viabilizando a transmissão de dados com alta capacidade, confiabilidade e baixa latência. No contexto ferroviário, tecnologias como a fibra óptica e a Hierarquia Digital Síncrona (SDH) são amplamente utilizadas para garantir a conectividade entre sistemas críticos, como as MCHs e os centros de controle. Este tópico explora os conceitos fundamentais do backbone, suas características técnicas, os recursos de redundância e os benefícios de sua integração com sistemas automatizados na EFC.

5.3.1 Conceito e Características

O Backbone é a espinha dorsal da rede, é a parte central da infraestrutura de telecomunicações, pois é responsável por carregar a maior parte dos dados, conecta vários segmentos da rede e tem como propósito de garantir fluidez e eficiência no tráfego e na transmissão de dados mesmo em longas distâncias.

Podem ser divididos em três tipos, sendo classificados com base na sua área e função:

- **Nacionais:** são as principais rotas de comunicação dentro de um país, conectando diversas cidades e regiões a centros de dados e redes locais.

- **Internacionais:** são as rotas de comunicação que conectam países entre si. São responsáveis por uma grande parte do tráfego global, tendo como exemplo o comércio eletrônico.
- **Intercontinentais:** compreendem as rotas de comunicação que conectam continentes inteiros, através de cabos submarinos ou links de satélite que atravessam oceanos.

O primeiro backbone brasileiro foi criado em 1992, por iniciativa do então Ministério da Ciência e Tecnologia, com a finalidade de conectar instituições de ensino superior e centros de pesquisa. Essa infraestrutura, conhecida como Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), interligava inicialmente dez capitais e o Distrito Federal, formando a base de uma rede de comunicação de alto desempenho voltada ao meio acadêmico e científico.

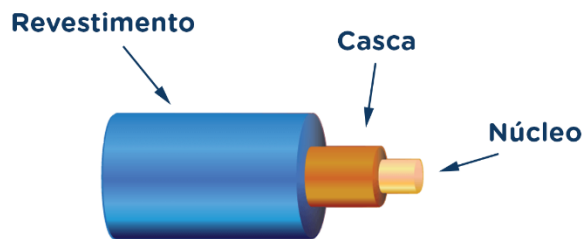
5.3.2 Fibra Ótica como Meio de Transmissão no Backbone

O backbone de fibra ótica constitui uma infraestrutura de comunicação composta por cabos com alta capacidade de transmissão, resistência a interferências eletromagnéticas e longo alcance. Esse meio físico permite o tráfego de grandes volumes de dados com baixa latência e mínima perda de sinal. A adoção da fibra ótica deve-se à sua eficiência em comunicações de longa distância, à segurança contra interceptações e à confiabilidade exigida em operações críticas, como as envolvidas na malha ferroviária.

O funcionamento baseia-se na transmissão de um feixe de luz através do núcleo (Figura 7), de modo que este não atravesse o revestimento externo, mas seja refletido internamente, permitindo sua propagação ao longo do cabo. Essa reflexão ocorre devido ao fato de o índice de refração do núcleo ser maior que o do revestimento, aliado ao ângulo de incidência da luz ser superior ao ângulo crítico estabelecido para o meio (CAMACHO REYES, 2019).

As fibras também possuem desvantagens alta fragilidade, necessidade de usar transmissores e receptores mais caros e as emendas são difíceis de realizar.

Figura 7 – Esquema ilustrativo do funcionamento da fibra óptica.



Fonte: BARBOSA (2021).

5.3.3 Hierarquia Digital Síncrona (SDH) em Redes de Fibra Óptica

Essa infraestrutura é complementada por tecnologias de transmissão síncrona, como a Hierarquia Digital Síncrona (SDH), que organiza os fluxos de dados em níveis hierárquicos, garantindo sincronia e controle eficiente do tráfego. A SDH representou um marco nas redes de telecomunicações ao substituir a antiga Hierarquia Digital Plesiócrons (PDH), que apresentava limitações quanto à capacidade de transmissão, sincronização entre canais e gerenciamento. Padronizada pela União Internacional de Telecomunicações (UIT, 2017), por meio das recomendações G.707, G.708 e G.709, a SDH estabeleceu um modelo unificado e eficiente para o transporte de sinais digitais em redes ópticas. Essa padronização trouxe ganhos significativos em flexibilidade, interoperabilidade e confiabilidade, consolidando a SDH como base das infraestruturas de comunicação de longa distância.

O sistema SDH opera por meio da combinação de múltiplos sinais digitais com taxa fixa, resultando em fluxos síncronos controlados por um único relógio de referência. Essa característica permite a inserção e remoção eficiente de sinais de baixa ordem, otimizando o uso de multiplexadores. A hierarquização do sistema é estruturada em diferentes níveis, com protocolos como STM-1, STM-16 e STM-256, que atendem a diferentes demandas de transmissão. As taxas variam de 155 Mbit/s a 40 Gbit/s, e a arquitetura do sistema é dividida em camadas funcionais baseadas no modelo servidor/cliente, compatível com a estrutura de camadas da ISO/OSI (KOBAYASHI, 2011).

As características essenciais de um backbone de comunicação industrial incluem baixa latência, para garantir respostas rápidas e controle em tempo real; alta disponibilidade, assegurada por redes redundantes e mecanismos de failover; segurança e integridade dos dados,

com o uso de criptografia, autenticação e segmentação de rede; além de escalabilidade, permitindo a expansão conforme a rede cresce.

5.3.4 Redundância e Continuidade Operacional em Sistemas Ferroviários

A infraestrutura da EFC é desenhada com base em princípios de redundância em múltiplos níveis como enlaces ópticos (aéreo e enterrado), switches, roteadores e fontes de energia contam com caminhos e componentes alternativos. Essa arquitetura assegura continuidade na operação mesmo diante de eventos adversos, como rompimentos de fibra, panes elétricas ou falhas de dispositivos.

Além disso, os equipamentos críticos, como os controladores de MCH, possuem unidades redundantes em hot-standby, prontas para assumir a operação automaticamente em caso de falha da unidade principal. Essa abordagem reduz o tempo de inatividade e evita impactos operacionais graves, alinhando-se às melhores práticas internacionais em sistemas ferroviários.

5.3.5 Benefícios da Integração entre o Backbone de Comunicação e as Máquinas de Chave

A integração entre o backbone de comunicação e as MCHs proporciona ganhos substanciais em eficiência, segurança e inteligência operacional:

- **Agilidade nas manobras**, com respostas em tempo real aos comandos emitidos;
- **Redução de falhas operacionais**, graças ao controle remoto automatizado e à detecção precoce de anomalias;
- **Manutenção preditiva**, baseada na análise de históricos e no monitoramento contínuo, que minimiza intervenções corretivas;
- **Segurança operacional**, ao evitar manobras indevidas e garantir o correto posicionamento dos desvios;
- **Coleta massiva de dados**, viabilizando o uso de algoritmos de inteligência artificial para predição de falhas, otimização de tráfego e decisões autônomas.

De acordo com informações técnicas da Vale, a automação da rede backbone tem contribuído para a redução das paradas não programadas das máquinas de chave, impactando positivamente na disponibilidade operacional da via e na eficiência logística.

Com isso, o desenvolvimento de soluções baseadas em inteligência artificial e algoritmos de visão computacional tem viabilizado a vigilância automatizada de malhas

ferroviários de maneira constante e eficiente. Os Equipamentos ópticos, fixados em pontos-chave da malha ou acoplados a composições em circulação, realizam a captação contínua de dados, as quais são interpretadas por sistemas computacionais especializados. Esses sistemas permitem a identificação imediata de condições atípicas, como a obstrução da via por objetos, avanço de vegetação sobre a faixa de domínio, sinais de instabilidade geotécnica ou a presença indevida de pessoas nas proximidades da ferrovia.

5.3.6 SDH e a Automação das MCHs na Estrada de Ferro Carajás

A integração da SDH à infraestrutura de telecomunicações da EFC representa um avanço significativo na automação das MCHs. Essa tecnologia assegura a transmissão contínua e confiável de dados entre os equipamentos instalados em campo e o CCO, possibilitando o envio de comandos e o retorno de informações de estado com alta precisão temporal.

As MCHs, por sua natureza crítica para a segurança ferroviária, requerem comunicação com elevada disponibilidade e mínima latência, dessa forma, a arquitetura síncrona da SDH atende a essas exigências ao garantir a integridade dos pacotes de dados e sincronização exata entre os canais. Protocolos de proteção automática, como o Automatic Protection Switching (APS), contribuem para a manutenção da operação mesmo diante de falhas físicas na rede óptica, elevando a confiabilidade do sistema.

Além disso, a estrutura hierárquica da SDH facilita a gestão e o monitoramento em tempo real dos ativos de campo. O suporte aos protocolos STM (Synchronous Transport Module), como STM-1 e STM-4, permite o transporte de grandes volumes de dados com escalabilidade e eficiência, essenciais para o funcionamento de sistemas vitais como o ElectrologIXS (Elixs), que realiza o intertravamento, a habilitação de sinais e a atuação das MCH.

Dessa forma, a adoção da SDH na EFC não apenas potencializa a automação das MCHs, como também contribui para a segurança operacional, o controle centralizado e a padronização das comunicações no ambiente ferroviário de missão crítica.

5.4 INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS E DESAFIOS TECNOLÓGICOS

A crescente digitalização dos sistemas ferroviários exige uma abordagem robusta e estratégica para a integração entre as tecnologias tradicionais e os modernos sistemas de automação. Na ferrovia, operada pela Vale S.A., a integração entre o backbone de comunicação e as máquinas representa um marco na modernização da infraestrutura ferroviária nacional. Contudo, essa evolução impõe desafios técnicos, operacionais e de padronização que precisam ser continuamente superados para garantir segurança, escalabilidade e interoperabilidade.

5.4.1 Interoperabilidade entre Sistemas Legados e Tecnologias Modernas

Um dos maiores desafios enfrentados na automação ferroviária é a necessidade de garantir interoperabilidade entre sistemas legados, ainda em operação, e soluções tecnológicas modernas baseadas em redes de alta velocidade, sensores inteligentes e protocolos de comunicação padronizados. Equipamentos antigos, como os Controladores Lógicos Programáveis (CLP) e os controladores de sinalização, foram desenvolvidos com padrões proprietários, dificultando sua integração com plataformas atuais como o sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), Internet das Coisas (IoT) e protocolos como Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) e Message Queuing Telemetry Transport (MQTT).

5.4.2 Integração com IoT e Sistemas Inteligentes de Monitoramento

A incorporação de tecnologias IoT na automação ferroviária está transformando a forma como ativos críticos, como as MCHs, são monitorados e gerenciados. Sensores embarcados realizam medições contínuas de temperatura, vibração, posição e corrente elétrica, transmitindo os dados em tempo real por meio do backbone para plataformas analíticas. Essas informações são processadas em sistemas SCADA integrados a módulos de inteligência artificial, capazes de detectar anomalias e acionar rotinas preditivas de manutenção.

A integração de redes de comunicação com sensores inteligentes promove maior confiabilidade operacional e reduz significativamente falhas não programadas em sistemas ferroviários. Na Estrada de Ferro Carajás (EFC), uma infraestrutura baseada em dispositivos IoT interligados por backbone SDH transmite dados continuamente ao Centro de Controle Operacional (CCO), permitindo diagnósticos em tempo real e intervenções preventivas em máquinas de chave (MCHs). Essa abordagem é complementada por edge computing e análise preditiva, possibilitando o processamento local dos dados na origem, o que reduz a latência e

potencializa a agilidade decisória. Segundo o projeto ICOS (2024), essa convergência tecnológica transforma a manutenção corretiva em preditiva e estabelece um marco na automação ferroviária, elevando os padrões de segurança, eficiência e disponibilidade operacional.

5.4.3 Desafios na Escalabilidade e Manutenção de Sistemas Automatizados

Essa infraestrutura deve ser capaz de suportar não apenas o tráfego atual, mas também o crescimento futuro resultante da expansão da automação e do aumento no número de sensores IoT. Para isso, são necessárias soluções que ofereçam alta largura de banda, gerenciamento dinâmico da rede e roteamento inteligente. Conforme destacado por Silva, Zyrianoff e Heideker (2020), a escalabilidade eficiente de plataformas IoT está diretamente relacionada à arquitetura da rede subjacente, especialmente ao backbone, que é responsável pelo transporte de grandes volumes de dados.

Além da escalabilidade técnica, há desafios na manutenção dos sistemas, que se tornam mais complexos devido à diversidade de dispositivos, protocolos e fabricantes envolvidos. Manter a uniformidade nas atualizações, garantir a segurança cibernética e formar equipes técnicas multidisciplinares são condições indispensáveis para sustentar a operação automatizada.

Na prática, a Vale implementou o Sistema de Gestão Ferroviária atrelado ao Train Dispatching System (TDS), que tem como função principal a geração e gerenciamento das rotas dos trens. Além disso, práticas de manutenção preditiva baseadas em *analytics* e painéis supervisionados contribuem significativamente para a tomada de decisões ágeis, reduzindo o tempo médio de reparo e otimizando o uso dos recursos em campo.

5.4.4 Perspectivas Futuras na Automação Ferroviária e na Infraestrutura Digital

O futuro da automação ferroviária aponta para a consolidação de tecnologias como o 5G industrial, redes ópticas elásticas (EONs), inteligência artificial embarcada e sistemas de tomada de decisão autônoma. A integração da infraestrutura digital com plataformas baseadas em nuvem proporcionará maior elasticidade, resiliência e inteligência às operações ferroviárias, conforme discutido por especialistas da área.

Na Estrada de Ferro Carajás (EFC), investimentos em digital twin, computação distribuída e redes convergentes vêm sendo avaliados para ampliar a eficiência logística e a

segurança operacional. A automação das Máquinas de Chave (MCHs) tende a evoluir para modelos baseados em autoaprendizado, nos quais o sistema identifica padrões de desgaste e ajusta autonomamente os parâmetros de operação. Essa transformação digital requer, contudo, a implementação de políticas robustas de governança, segurança da informação e padronização técnica, essenciais para garantir a confiabilidade e integridade dos sistemas (LIU et al., 2022; FERRARI et al., 2023).

5.4.5 Normas e Padronizações Técnicas Aplicadas à Automação Ferroviária

A adoção de normas internacionais é fundamental para garantir a interoperabilidade, segurança e confiabilidade dos sistemas ferroviários automatizados. Entre as principais diretrizes aplicáveis destacam-se:

- IEC 62443, voltada para a segurança cibernética em automação industrial;
- IEC 60870-5-104, protocolo para supervisão e controle remoto em sistemas elétricos e ferroviários;
- EN 50126, EN 50128 e EN 50129, que tratam da segurança funcional em aplicações ferroviárias;
- IEEE 1474, guia para automação de sistemas ferroviários, incluindo o controle baseado em comunicação (CBTC).

A adesão a normas técnicas possibilita que os projetos de automação da EFC estejam em conformidade com padrões internacionais reconhecidos, favorecendo a mitigação de riscos e a elevação da maturidade tecnológica. A padronização constitui elemento essencial para o crescimento sustentável da automação ferroviária, ao promover a interoperabilidade entre fornecedores diversos e garantir a continuidade do avanço tecnológico com segurança e confiabilidade.

6 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento desta monografia baseia-se em uma abordagem estruturada e multidisciplinar, com o propósito de aprofundar a compreensão sobre a integração dos sistemas de comunicação backbone na automação das MCHs da EFC, considerando seus desafios operacionais e avanços tecnológicos. Trata-se de um estudo de natureza qualitativa, predominantemente exploratória e descritiva, com elementos de estudo de caso, focada no ambiente da ferrovia, além disso, envolve investigação teórica e análise técnica aplicada, utilizando fontes documentais (primárias e secundárias) e dados empíricos obtidos por meio de visitas técnicas e entrevistas.

O primeiro estágio consiste em uma revisão bibliográfica sistematizada, realizada a partir de livros, artigos científicos, publicações técnicas especializadas, relatórios institucionais, Procedimentos Operacionais (PROs), Procedimentos Gerais de Segurança (PGSs) e manuais técnicos de manutenção preditiva. Essa etapa visa proporcionar o embasamento teórico necessário para a compreensão dos seguintes temas principais:

- Sistemas de Comunicação Backbone: análise do conceito, arquitetura e funcionalidades dos sistemas backbone utilizados em ambientes industriais e ferroviários, ressaltando seu papel na automação, monitoramento remoto e integração de dispositivos de campo, como as MCHs.
- Contextualização do Sistema Ferroviário Brasileiro: descrição da estrutura e evolução do transporte ferroviário nacional, destacando sua importância estratégica para a logística de cargas no Brasil, especialmente no escoamento de minérios, papel exercido pela EFC.
- Análise da Estrada de Ferro Carajás e das Máquinas de Chave: apresentação técnica da EFC e do sistema de chaveamento ferroviário, enfatizando o funcionamento e a relevância das MCHs na operação automatizada.
- Avanços Tecnológicos em Redes de Comunicação: abordagem dos principais desenvolvimentos em redes industriais, com ênfase em tecnologias como SDH, adequada ao ambiente ferroviário.

Essa etapa inicial de revisão bibliográfica e documental foi crucial para fundamentar as análises empíricas realizadas nos estágios subsequentes.

O segundo eixo metodológico contempla a realização de visitas técnicas ao CCO da empresa gestora da EFC, com o objetivo de observar os processos de monitoramento, controle e operação dos ativos ferroviários, além da programação do trajeto dos trens e do envio das

informações para as máquinas de chave conforme as rotas estabelecidas. Durante esse período, foram realizadas reuniões com especialistas das áreas de engenharia, automação, sinalização, tecnologia da informação e telecomunicações, que proporcionaram insights valiosos e validação de informações teóricas com a prática operacional.

A terceira etapa consiste na coleta de dados e informações técnicas junto à equipe responsável pelo monitoramento e operação das MCHs, sistema de Telecomunicação, automação e sinalização. Os dados obtidos serão utilizados para validar as análises desenvolvidas com base no referencial teórico, incluindo registros históricos de falhas, alertas operacionais, relatórios de manutenção, diagnósticos técnicos e registros de conectividade dos sistemas backbone. A análise desses dados será realizada por meio da identificação de padrões e correlações, complementada pela construção de diagramas de fluxo para ilustrar o comportamento dos sistemas e seus pontos críticos.

Ao integrar essas etapas, o estudo visa não apenas descrever tecnicamente os sistemas envolvidos, mas também contribuir com subsídios práticos para a evolução das soluções aplicadas no contexto ferroviário brasileiro, especialmente no que tange à confiabilidade, eficiência e modernização da operação por meio de redes de comunicação de alta performance.

7 DISCUSSÕES E RESULTADOS

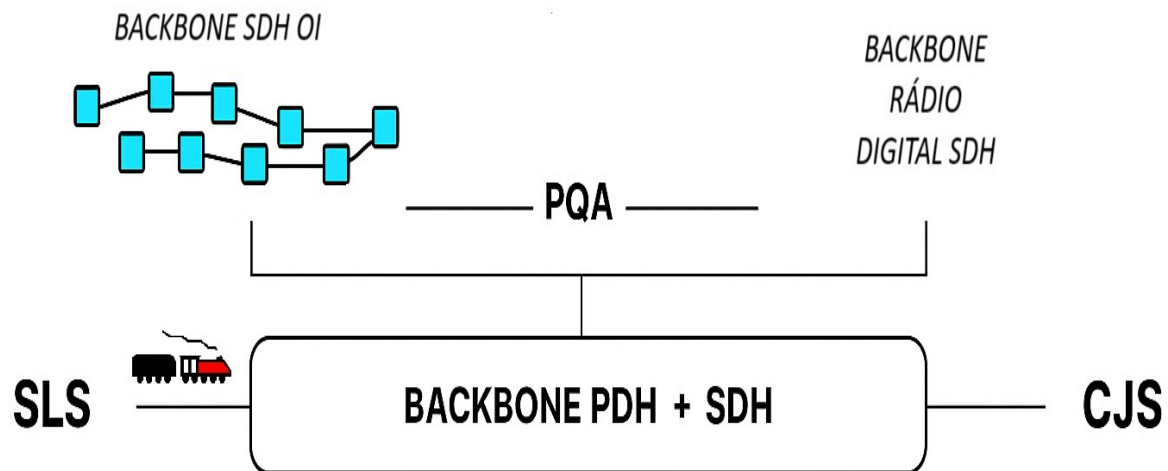
Este tópico apresenta a análise do desenvolvimento da pesquisa, com ênfase na aplicação do backbone de comunicação na Estrada de Ferro Carajás. Inicialmente, aborda-se a infraestrutura do backbone implantado na ferrovia, destacando sua função como base tecnológica para a integração de sistemas. Em seguida, analisa-se a rota de comunicação entre o Centro de Controle Operacional (CCO) e as Máquinas de Chave (MCH), ressaltando os fluxos de dados e sua importância para a operação. Também são discutidos os mecanismos de monitoramento, essenciais para a detecção de falhas e a manutenção preditiva, além dos benefícios proporcionados pela integração backbone/MCH, com foco na confiabilidade e eficiência. Por fim, apresentam-se os desafios e avanços tecnológicos que orientam a modernização da malha ferroviária.

7.1 INFRAESTRUTURA BACKBONE NA EFC

A rede de comunicação da EFC é responsável por oferecer serviços de dados, voz e imagem que atendem que são usadas em toda a sua operação. Os canais usados para operação são essenciais e precisam seguir critérios como estrutura da rede, forma de instalação, configuração e garantia de funcionamento.

Por isso, toda a estrutura formada por cabos de fibra óptica e equipamentos digitais que fazem a multiplexação compõe o sistema principal de telecomunicações da EFC, chamado de Backbone. Esse sistema utiliza uma combinação de topologias em estrela e em anel, que garantem segurança física e lógica no tráfego de sinais digitais, dentro dos padrões técnicos PDH e SDH, conforme as normas vigentes e as recomendações da ITU-T. Além disso, a rede conta com uma rota alternativa, que inclui tanto recursos de operadoras locais quanto infraestrutura própria da Vale, como o uso de Rádio Digital SDH. Essa estrutura de apoio é mantida por meio de contratos específicos de manutenção, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Sistema de Telecomunicações da EFC.



Fonte: Autor (2025).

Os principais serviços operacionais que trafegam no Backbone, são:

- SGF (Sistema de Gestão Ferroviária);
- Sistema Hot-Box;
- Sistema Wayside (Instrumentação na ferrovia para monitoramento de composição);
- Sistema de Gravação remota (Ramais, consoles de operação);
- Monitoramento por Imagem;

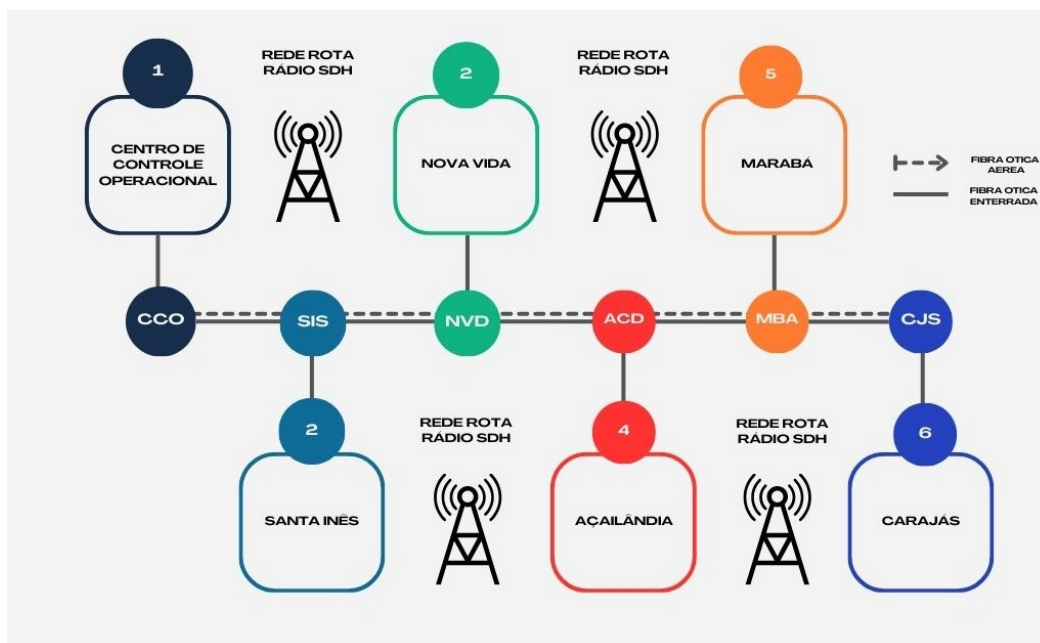
A Figura 9 exibe um modelo do sistema de telecomunicações da EFC, sua infraestrutura conta com equipamentos multiplexadores, comutadores digitais e cabos de fibra óptica, garantindo desempenho e confiabilidade na transmissão de dados ao longo da ferrovia

Essa rede dá suporte aos circuitos digitais que asseguram a sinalização, distribuídos em cinco seções.

- Seção 1 – CCO (SLS) – SIS;
- Seção 2 - SIS – NVD;
- Seção 3 - Km NVD– ACD;
- Seção 4 - ACD – MBA;
- Seção 5 - MBA – CJS.

O trecho está dividido em sessões para facilitar as manobras que a manutenção faz diante de algumas perturbações que acontece no sistema. Já no Ramal Ferroviário Sudeste Pará (RFSP) é constituído por dedes de fibra ótica áreas e comunicação Rota Rádio SDH.

Figura 9 – Sistema de Telecomunicações da EFC.



Fonte: Autor (2025).

Estrategicamente a plataforma de telecomunicações é dividida em três segmentos de transmissão:

- Segmento 1 - de SLS e ACD;
- Segmento 2 - de ACD a CJS;
- Segmento 3 – CJS a RFSP;

Os segmentos são suportados por infraestruturas de transmissão, onde adota-se os cenários de encaminhamento principal e de contingência, na forma de comutação automática, atuando da seguinte forma:

- SEGUIMENTO 1:** baseado em cabos de fibras ótica, enterrado e aéreo. Constituído por redes de contingência que são essenciais para garantir a continuidade das operações e a integridade dos dados em ambientes que dependem de uma infraestrutura de rede.
- SEGUIMENTO 2:** baseado em cabos de fibras ótica, enterrado e aéreo. Constituído por redes de contingência no backbone SDH da OI.

- c) **SEGUIMENTO 3:** baseado em cabos de fibras ótica aéreo. Constituído por redes de contingência no backbone Rota Rádio SDH no RFSP.

Além disso é formada por algumas redes:

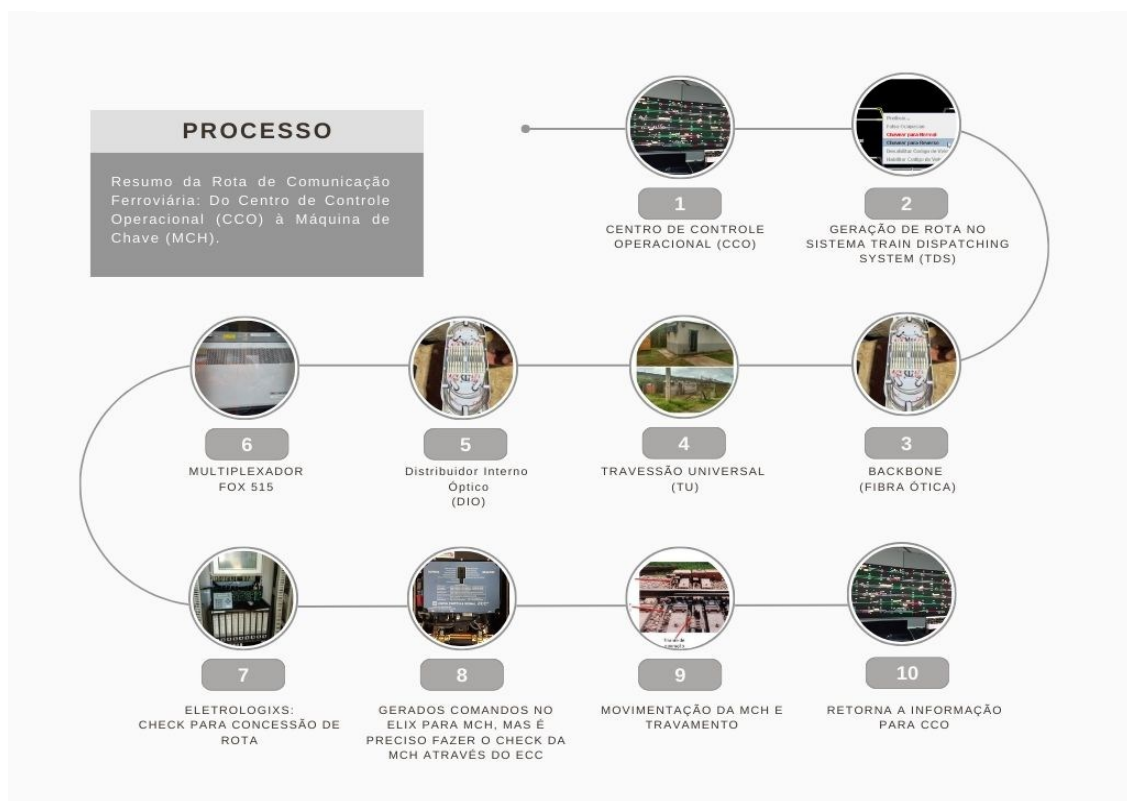
- a) **REDE DERIVADA:** é composta por equipamentos da família FOX, fornecidos pela Asea Brown Boveri (ABB). Em cada estação ou abrigo, há, no mínimo, um equipamento FOX instalado, distribuindo os serviços conforme as necessidades operacionais. Essa rede interliga os circuitos de sinalização, voz e dados ao longo da ferrovia, garantindo a comunicação eficiente entre os diversos pontos da EFC.
- b) **REDE DE MICROONDAS (MO):** utiliza enlaces ponto a ponto em frequências elevadas para conectar pontos distantes da ferrovia. É ideal para áreas onde o cabeamento físico é inviável, oferecendo comunicação confiável para dados, voz e serviços de controle. Essa tecnologia permite a transmissão eficiente de informações, mesmo em regiões remotas ou de difícil acesso.
- c) **REDE DE ALTA:** é uma rede de backbone que transporta grandes volumes de dados ao longo da ferrovia. Ela garante alta capacidade de transmissão e estabilidade nos serviços críticos, como sinalização, monitoramento remoto e comunicação operacional. Essa infraestrutura é essencial para a operação segura e eficiente da ferrovia, suportando as demandas de comunicação em tempo real.
- d) **REDE AFS/AFR:** é dedicada à automação de sistemas ferroviários, incluindo controle de equipamentos, supervisão e integração dos sistemas de chave e de sinalização. Ela proporciona monitoramento contínuo e rápida resposta a eventos operacionais, aumentando a segurança e a eficiência das operações ferroviárias. Essa rede é fundamental para a implementação de sistemas de controle avançados e para a otimização das operações na ferrovia.
- e) **5. ROTA RÁDIO DIGITAL SDH:** é baseada na tecnologia SDH (Synchronous Digital Hierarchy), utilizada para transportar múltiplos serviços de voz, dados e sinalização com alta confiabilidade. Essa rede digital via rádio permite cobertura estendida, redundância e integração com outros sistemas de comunicação. Ela é essencial para garantir a continuidade dos serviços de comunicação em toda a extensão da ferrovia, mesmo em áreas de difícil acesso.

A infraestrutura da EFC é composta por equipamentos FOX sendo gerenciada pela plataforma UNEM de gerenciamento proprietária da ABB que líder em investigação e desenvolvimento de soluções eléctricas e de automação para fabricantes de veículos, operadores de infraestruturas ferroviárias e integradores de sistema.

7.2 ROTA DE COMUNICAÇÃO FERROVIÁRIA: DO CENTRO DE CONTROLE OPERACIONAL (CCO) À MÁQUINA DE CHAVE (MCH)

Esta seção apresenta o processo completo de comunicação entre o Centro de Controle Operacional (CCO) e as Máquinas de Chave (MCH). Serão detalhados, passo a passo, os fluxos de informação desde a geração dos comandos no CCO, passando pela transmissão via backbone, Travessões Universais, multiplexadores FOX515 e o gerenciamento local pelo equipamento ElectroLogIXS, até a execução final das operações pelas MCH. Cada etapa do processo será analisada, destacando sua função e importância na automação ferroviária (Figura 10).

Figura 10 – Visão Geral de Todo Processo de Comunicação na Infraestrutura de Telecomunicações.



Fonte: Autor (2025).

7.2.1 Centro de Controle Operacional

O processo tem início no CCO, que é a sala de comando e monitoramento central da ferrovia. Neste local, operadores e sistemas supervisórios (Figura 11) monitoram em tempo real toda a operação ferroviária, gerenciando o tráfego, sinalizações e máquinas de chave. Ele emite os comandos necessários para garantir a segurança e eficiência do sistema, enviando sinais de controle para os equipamentos de campo.

Os comandos das rotas são gerados no Train Dispatching System (TDS) que é um sistema de arquitetura robusta, eficiente e fundamental para garantir a segurança em operações críticas ferroviárias.

Ele utiliza um Sistema de Sinalização Vital Microprocessada Distribuída da Estrada de Ferro Carajás, responsável por garantir a segurança das operações de movimentação de trens. O sistema oferece funções que asseguram confiabilidade e flexibilidade operacional, viabilizando a operação ferroviária com segurança.

Figura 11- Painel do Sistema de Gestão Ferroviária (SGF).



Fonte: Renato Lobo (2018).

Dentre as principais funções temos essas:

- Impedir a autorização de rotas conflitantes;
- Impedir que AMV mudem de posição à frente de trens em movimento, ou sob trens;
- Manter distâncias seguras entre os trens;
- Impedir a circulação de trens em velocidades superiores às permitidas pelo traçado da via;

- Detectar a presença de trens e a condição de "trilhos partidos" e impedir a autorização de rotas para trechos nessa condição;
- Detectar descarrilamento e promover a parada do trem na condição de descarrilhamento;
- Possibilitar o alinhamento e autorização de rotas, bem como o seu cancelamento automático pela passagem do trem ou por comando imposto pelos operadores dos PCL ou do Sistema de Gestão Ferroviária (SGF);
- Possibilitar o alinhamento e autorização de rotas na região de interface com estacionamentos e pátios existentes ao longo do trecho;
- Permitir o controle de tráfego centralizado pelo SGF e o controle local através dos Painéis de Controle Local (PCL);
- Permitir a comunicação vital entre os intertravamentos e prover comunicação não vital para diagnóstico, PCL e SGF;
- Provocar o acionamento imediato do processo de parada dos trens assim que se desejar fazê-lo, em qualquer ponto da via sinalizada;
- Permitir a supervisão do estado operacional dos seus equipamentos e obedecer aos comandos provenientes do SGF, através do Sistema de Transmissão de Dados, e através dos PCL instalados nos Abrigos, conforme Arquitetura do Sistema de Sinalização;
- Permitir a atuação integrada com o Sistema de Controle de Tráfego Centralizado (CCO), de forma a garantir a movimentação segura dos trens, bem como disponibilizará facilidades na operação da linha;
- permitir o controle local e individual das máquinas que compõem um AMV;
- executar a telemetria dos CDV e MCH.

A partir de uma rota gerada pelo Centro de Controle Operacional (CCO), as informações trafegam pela rede de telecomunicações, permitindo a gerência e o acompanhamento remoto de toda a rota em tempo real através do sistema SGF.

7.2.2 Transmissão via Backbone

Os comandos gerados para Rota são convertidos em sinais digitais que são transmitidos por meio de cabos de fibra óptica, mas antes passam por um FOX 515 para serem multiplexados, organizados de forma eficiente e serem transmitidos em uma taxa de transmissão de 155Mbit/s – STM-1. A fibra óptica é o meio físico escolhido por sua alta

capacidade de transmissão de dados em alta velocidade, baixa latência e imunidade a interferências eletromagnéticas, o que assegura a integridade das informações enviadas pela ferrovia. Por sua vez todos esses cabos são conectados a Abrigos e Armários que formam uma grande espinha dorsal chamada backbone, responsável pela alta capacidade de tráfego de dados entre redes, na ferrovia o conceito se adapta para garantir comunicação confiável, contínua e de alta disponibilidade ao longo de toda a malha.

A EFC possui uma infraestrutura moderna, baseada principalmente em tecnologias de transmissão digital síncrona, como a SDH, além de enlaces de fibra óptica que percorrem toda a extensão da ferrovia interligando pontos estratégicos, como estações, pátios, abrigos de micro-ondas e sinalização, bem como o CCO. Conforme apresentado na Figura 12, observa-se ainda a presença de uma caixa de distribuição destinada à conexão, distribuição e gerenciamento de cabos. Essa estrutura é organizada da seguinte forma:

a) Rede de Fibra Óptica

Percorre os mais de 900 km da ferrovia, desde São Luís (MA) até Parauapebas (PA).

- Utiliza cabos ópticos subterrâneos e aéreos (Figura 13), com múltiplas fibras para redundância.
- Permite comunicação em altíssima velocidade e baixa latência entre equipamentos e centros de operação.

b) Tecnologia SDH

- A SDH permite a multiplexação de sinais digitais em diferentes taxas de transmissão (ex: STM-1, STM-4, STM-16), criando uma rede confiável e estruturada.
- Suporta comunicação simultânea de voz, vídeo e dados, essenciais para sistemas como:
 - a) Supervisão das subestações elétricas;
 - b) Monitoramento das MCH (Máquinas de Chave);
 - c) Intertravamento Vital Microprocessado;
 - d) Sinalização ferroviária;
 - e) Rádio comunicação e CFTV;

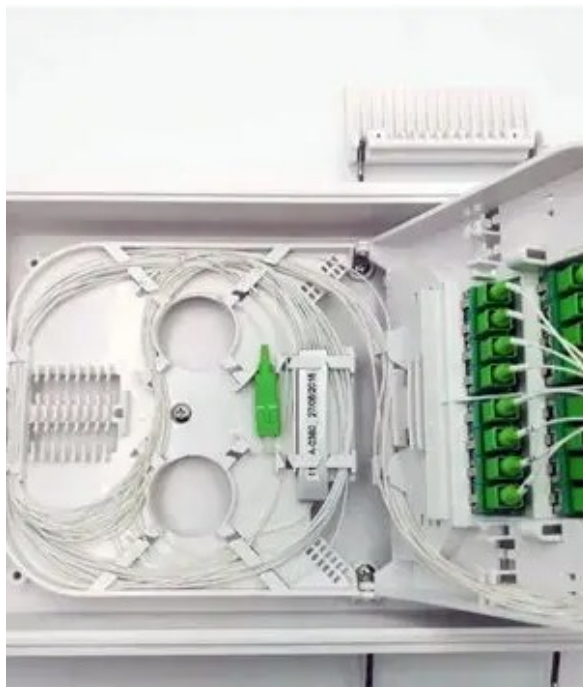
Na fibra óptica, a transmissão de dados ocorre por meio de pulsos de luz, e não por sinais elétricos. A propagação luminosa é conduzida ao longo de um núcleo de vidro ou material polimérico de alta pureza, utilizando o princípio da reflexão interna total. Esse mecanismo assegura baixa atenuação do sinal e elevada resistência a interferências eletromagnéticas.

O processo ocorre da seguinte forma:

1. Os sinais digitais (0 e 1), vindos de equipamentos eletrônicos, são convertidos em pulsos de luz por meio de um transmissor óptico. Esse transmissor, gera um pulso de luz para representar o bit 1 e a ausência de luz para o bit 0.
2. A luz gerada percorre o núcleo da fibra óptica, sendo refletida continuamente ao longo de suas paredes internas, devido à diferença de índice de refração do núcleo e a casca. Isso permite que o feixe permaneça confinado no interior da fibra mesmo em curvas suaves do percurso.
3. Em longas distâncias, repetidores ópticos ou amplificadores são usados para restaurar a intensidade do sinal luminoso, garantindo a integridade da informação até o destino.

Esse processo permite taxas de transmissão extremamente altas (em Gbps ou Tbps), sendo ideal para ambientes ferroviários que exigem comunicação contínua, segura e em tempo real entre centros de controle e equipamentos de campo.

Figura 12 – Caixa de terminais de fibra óptica GPON.



Fonte: Fonte: ONTOLT (2025).

Figura 13 – Cabo de fibra óptica blindado.



Fonte: HONE CABLE (2025).

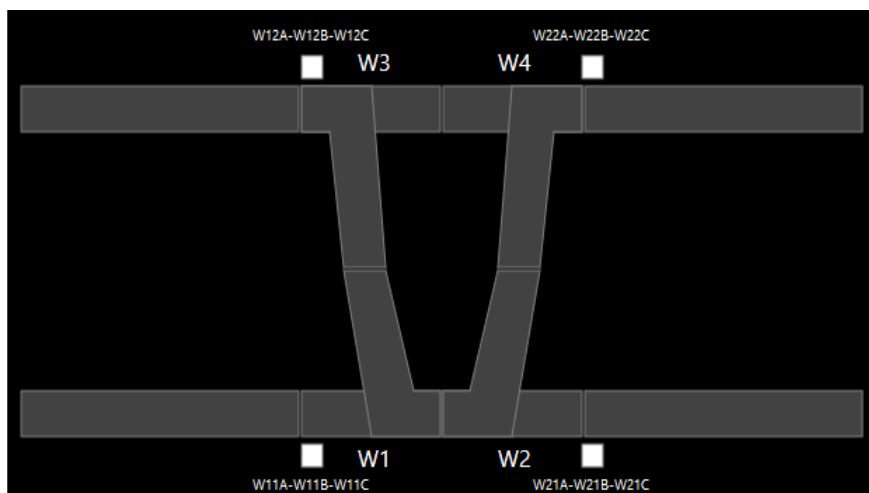
7.2.3 Travessões Universais

A fibra óptica chega aos Travessões Universais (TUs), ou *House*, que são pontos físicos de interconexão dentro da infraestrutura de comunicação. Esses dispositivos funcionam como caixas de distribuição, permitindo a conexão e a redistribuição dos sinais ópticos para diferentes segmentos da rede, facilitando a organização, manutenção e o controle local do sistema.

O TU é composto possui 12 MCHs (Figura 14) divididas igualmente entre os quatro aparelhos de mudança de via ou AMVs na ferrovia. Essa configuração permite que os trens passem de uma linha para a outra em ambos os sentidos de deslocamento, como mostrado na figura abaixo. As MCHs possuem variáveis (*tags*) que possuem nomenclatura específica para serem relacionadas diretamente aos equipamentos. O prefixo das tags relacionadas são onde os W[dd]AB, são as chaves A e B unificadas em uma só indicação:

- W11AB;
- W11C;
- W21AB;
- W21C;
- W12AB;
- W12C;
- W22AB;
- W11C.

Figura 14 – Interface TU do Supervisório de MCH



Fonte: Autor (2025).

Dentro dessas estruturas, encontra-se o Equipamento **EletrologIXS** (Figura 15) elemento central da sinalização ferroviária. Este equipamento, fabricado pela GE (General Electric), desempenha funções cruciais ao permitir o comando das máquinas de chave, o monitoramento dos circuitos de via, a definição de rotas para os trens e a habilitação dos sinais de código de via para as composições.

As fibras ópticas são conectadas ao Distribuidor Interno Óptico (DIO) instalado no Elixs correspondente ao trecho em que a rota do trem foi definida pelo CCO. Nesse ponto, os pulsos de luz são convertidos em sinais elétricos digitais, que seguem para processamento por sistemas eletrônicos.

Após essa conversão, os dados são encaminhados a dispositivos como switches, roteadores, multiplexadores ou controladores, responsáveis por executar comandos, registrar informações ou redirecionar os dados para os segmentos específicos da rede de controle.

Figura 15 – Equipamento EletrologIXS dentro do TU, Modelo gerado por IA.



Fonte: Autor (2025).

7.2.4 Multiplexador FOX515

Após a recepção dos sinais ópticos no DIO, ocorre a interligação com os demais dispositivos da infraestrutura de comunicação. Um dos principais equipamentos conectados ao DIO é o multiplexador FOX 515, da família FOX da (ABB, 2015). Trata-se de um multiplexador digital síncrono (SDH, STM-1), amplamente utilizado na rede óptica da EFC, especialmente nos sistemas de sinalização.

O FOX 515, conforme a Figura 16, desempenha papel essencial na derivação de sinais ópticos em pontos intermediários da ferrovia, viabilizando a comunicação entre o CCO e os equipamentos de campo, como as MCHs, os controladores de sinais e sensores distribuídos ao longo da via permanente. Sua principal função é multiplexar diferentes tipos de sinais – como dados, voz, alarmes, telemetria e comandos de controle – em um único fluxo digital de alta capacidade, transmitido por meio do backbone óptico.

Após a conversão óptico-elétrica realizada por receptores dedicados no FOX 515, os diferentes dados multiplexados são demultiplexados e há distribuição das informações para os

distintos sistemas de campo. Essa estrutura modular permite o roteamento eficiente de informações, garantindo sincronismo, integridade e confiabilidade na comunicação entre os sistemas de automação da ferrovia.

Além de realizar a multiplexação e demultiplexação, o FOX 515 também desempenha funções de monitoramento da integridade do sinal, alarmes de falhas, perdas de sincronismo e degradação de desempenho.

Figura 16 – Multiplexador FOX 515



Fonte: HITACHI ENERGY (2025).

7.2.5 Equipamento ElectroLogIXS

O EletroLogIXS (Elixs) é o equipamento responsável pela execução da sinalização vital microprocessada na malha ferroviária. Em cada TU, há um Elixs instalado com a finalidade de assegurar o pleno funcionamento do sistema de sinalização.

Os dados processados para concessão de rota são encaminhados por uma rede estruturada composta por *switches* e multiplexadores, possibilitando sua integração à rede de comunicação da Vale. Essa infraestrutura permite que os Elixs sejam acessados remotamente a partir do CCO, o que viabiliza o gerenciamento em tempo real das operações ferroviárias da EFC

O equipamento Elixs realiza uma verificação automática de favorecimento para a concessão de rota, por meio de comunicação direta com o CCO. Essa verificação envolve os seguintes critérios:

- Se as máquinas de chave de cada AMV estão posicionadas de forma favorável ao sentido de avanço do trem;

- O Circuito de Via do AMV correspondente estiver desocupado e sem interdição;
- Se não há ocupação na via para onde o trem está sendo encaminhado e o travamento;

Todo esse processo é executado em milissegundos, e, caso todas as condições estejam atendidas, a rota é concedida. O CCO recebe a confirmação de rota, mas não acompanha o processo visualmente em tempo real.

A concessão de rota pode ser monitorada tanto por meio do Painel de Controle do CCO, quanto pelo Painel de Controle Local, instalado no TU. Esse painel exibe a interface de controle dos quatro AMV, bem como das duas linhas (Linha 01 e Linha 02), abrangendo uma extensão de 4 km no sentido São Luís e 4 km no sentido Carajás daquele TU.

Se houver algum problema na remota, cabo quebrado ou queimado o CCO perde o gerenciamento local daquele TU.

Além do controle remoto, os Elixs também podem ser operados localmente, possibilitando intervenções das equipes de manutenção para a execução de ações corretivas ou preventivas com segurança e agilidade.

Todos os comandos enviados e recebidos por esses dispositivos são armazenados em memória interna, permitindo consultas posteriores para análise de falhas, ocorrências ou auditorias operacionais. Essas informações ficam disponíveis por meio de interface *web*, acessíveis na forma de registros de dados (*logs*) e eventos do sistema, os logs ficam armazenados nesses cartões na figura 17, e mais exatamente os logs das MHCs estão nos cartões VIO-86S, na qual cada um pertence a um AMV do TU.

Figura 17 – Cartões do EletrologIXS



Fonte: GE Transportation Rail (2007).

A interface do Painel de Controle Local no interior do (TU) disponibiliza todas as informações operacionais do equipamento e permite o controle manual do TU, desde que autorizado pelo CCO. A liberação do acesso é realizada por meio de comandos enviados pelo CCO, que destravam a operação manual conforme os protocolos estabelecidos.

7.2.6 Máquina de Chave

Após a execução dos comandos responsáveis por garantir o funcionamento dos sistemas de sinalização, o sistema Elixs também possibilita a comunicação entre os diferentes dispositivos de campo. Nesse contexto, estabelece-se a comunicação com o ativo denominado Aparelho de Mudança de Via, conhecido como Máquina de Chave (MCHs).

As Máquinas de Chave (MCH) utilizadas na Estrada de Ferro Carajás (EFC) são do modelo M-3, compostas essencialmente por três compartimentos: o compartimento do motor, o compartimento de engrenagens e o compartimento do Controlador de Circuito Eletrônico (ECC), conforme ilustrado na Figura 27. No mesmo compartimento do controlador encontram-se o mecanismo de travamento e os sensores de proximidade da caixa de travamento (dispositivo latchout). Os motores e a relação de engrenagem para a VALE correspondem a 189:1, com tensão nominal de 110 VCC. As máquinas são completamente cabeadas na fábrica, com a fiação interna conectada aos terminais WAGO e AREMA no compartimento do motor. Um diagrama de fiação padrão ou desenho técnico é fornecido juntamente com cada máquina, indicando de que maneira devem ser realizadas as conexões externas aos terminais WAGO e AREMA para a aplicação específica.

O ECC utiliza quatro sensores de proximidade vitais: dois destinados à detecção da posição das pontas da agulha (normal e reversa) e dois para verificar se a máquina encontra-se totalmente bloqueada em ambas as posições. Trata-se de um controlador baseado em microprocessador, responsável por monitorar continuamente o estado desses sensores e identificar possíveis condições como: conexão, desconexão, curto-circuito ou circuito aberto.

Este sistema constitui um mecanismo de detecção linear, isento de partes móveis suscetíveis a desgaste, o que contribui para sua alta confiabilidade. Requer, entretanto, o ajuste adequado dos alvos fixados na barra de detecção da ponta da agulha. Além disso, permite o ajuste interno dos sensores por meio da guia serrilhada linear.

Além disso, oferece recursos de diagnóstico avançado, possibilitando a identificação do estado atual da máquina e das condições de indicação de uma máquina adjacente interligada. Seus indicadores luminosos Light Emitting Diode (LED) fornecem informações sobre a

alimentação dos sinais principais e auxiliares enviados do abrigo para a máquina de chave, além de monitorar o fornecimento de energia ao motor e o status da função de trava externa.

Durante o processo de estabelecimento de uma rota ferroviária, é imprescindível que todas as MCHs ao longo do trajeto do trem estejam devidamente alinhadas e posicionadas de forma correta. Essa sincronização é fundamental para assegurar a continuidade segura da operação ferroviária e evitar possíveis acidentes provocados por falhas na comutação de trilhos.

Dessa forma, em função da confirmação de concessão de rota enviado para o CCO, o Elixs faz liberação mandando um pulso para o cabo de alimentação da máquina de chave. O motor da MCH é alimentado em 120Vcc, a partir da Nobreak do abrigo de equipamentos.

O Intertravamento Vital Microprocessado (IVM) somente indicará que o AMV está em correspondência se a posição indicada pela máquina estiver em concordância com o último comando recebido pela mesma e sem alimentação presente no motor, por exemplo, indicação da máquina em normal concordante com o último comando enviado para normal e sem alimentação presente no motor.

Levando-se em consideração alguns pontos uma MCH somente poderá ser comandada para a posição contrária à que se encontra caso todas as seguintes condições estejam atendidas:

- O Circuito de Via (CDV) do AMV correspondente deve estar desocupado e sem interdição;
- A máquina de chave não pode estar operando em modo manual (movimentação por manivela);
- O sistema de “Timing Lock” não pode estar em contagem regressiva;
- Não deve existir rota concedida ou registrada;
- Não pode haver indicação de posicionamento e travamento mecânico da chave nos casos em que a agulha fechada apresentar folga de abertura superior a: 1/4” (segundo a norma AREA); ou 4,0 mm (conforme a norma UIC), considerando-se a distância entre a ponta da agulha e o trilho de encosto.

O processo funciona da seguinte maneira: a manivela principal da máquina de chave aciona simultaneamente a barra de operação da agulha e a barra deslizante. Esta última movimenta a caixa de travamento, que possui travas responsáveis por se encaixar nos entalhes dos tirantes de travamento, garantindo o correto posicionamento das pontas das agulhas.

Quando a máquina está em uma das extremidades do seu curso, a mudança para a posição oposta é realizada por meio da rotação da manivela principal, que pode ser acionada automaticamente pelo motor ou manualmente. Durante essa rotação, a manivela movimenta

inicialmente a barra deslizante, retirando as travas dos entalhes e liberando o sistema de agulhas para movimentação.

Posteriormente, a barra deslizante permanece na posição intermediária, com ambas as travas afastadas, enquanto a barra de operação da agulha realiza o deslocamento até a nova posição. Ao término do curso, a manivela mantém a barra de operação fixa e reposiciona a barra deslizante, inserindo novamente a trava superior no entalhe correspondente do tirante de travamento, assegurando o bloqueio mecânico da agulha na nova posição.

Quando os comandos são executados, o sistema Elixs deve reconhecer que um AMV encontra-se em determinada posição — normal ou reversa — desde que o intertravamento correspondente indique que as máquinas de chave estão devidamente posicionadas, em conformidade com o comando enviado e memorizado. Contudo, caso o intertravamento sinalize que qualquer uma das máquinas de chave se encontra fora da posição esperada (normal ou reversa), ou em desacordo com o comando emitido, a posição do AMV é classificada como desconhecida ou fora da correspondência.

Em determinadas situações, a máquina de chave pode apresentar falhas operacionais. O comando de movimentação permanece ativo por até 5 (cinco) segundos para as máquinas AB e, adicionalmente, por mais 5 (cinco) segundos para a máquina C. Esse comando é interrompido assim que o IVM detecta a correspondência da indicação de posição. Caso essa correspondência não seja confirmada dentro do tempo estipulado, o IVM deve cessar a operação e registrar uma falha de correspondência da MCH. Além disso, o IVM também deve retirar o comando de operação sempre que ocorrer um alarme de sobrecorrente, entre outras condições anormais.

Após o envio e a execução do comando pela MCH, o sistema realiza a confirmação da operação por meio dos sinais de retorno gerados pelos sensores integrados ao equipamento ECC. Esses sinais indicam se a chave foi acionada corretamente, se encontra-se na posição solicitada e se não há falhas no funcionamento. Simultaneamente, o equipamento de sinalização Elixs registra continuamente, no TU, todas as informações relacionadas aos eventos ocorridos durante o dia.

Esses dados são também transmitidos em tempo real ao CCO, utilizando a mesma infraestrutura de comunicação — composta por rede de fibra óptica, equipamentos Elixs e multiplexadores —, com o uso de protocolos específicos de comunicação industrial.

No CCO, os dados recebidos são interpretados pelo sistema, possibilitando o monitoramento em tempo real do estado operacional da MCH, assegurando a confiabilidade e a segurança das operações ferroviárias

7.3 MONITORAMENTO

O sistema Elixs, responsável pela gestão da sinalização ferroviária, registra automaticamente logs de eventos, alterações de estado e falhas operacionais. Esses registros são organizados e armazenados em grupos de quatro por um robô integrado ao próprio sistema EletrologIXS. Dessa forma, as informações provenientes dos TUs podem ser acessadas remotamente, sendo o acesso restrito aos profissionais responsáveis pelos subsistemas de Telecomunicações, Sinalização e Automação. A título de exemplo, apresentam-se os dados obtidos a partir das variáveis e comandos registrados no TU 209 (Figura 18).

Figura 18 – Exemplo do log TU 209

```
|
Data Log          07-07-25    13:58:06

TU-209

APPLICATION INFORMATION
NAME              tu_209v
EPT CRC          DA35
EPT Checksum     19AB

EXECUTIVE INFORMATION
PN                083025-645
VER              6.45 Bld0005I

TIME INFORMATION
TIME ZONE         -3 hours from GMT
DAYLIGHT SAVINGS Disabled / Inactive
TIME SYNC SOURCE SNTP

07-07-25 13:44:57 Vital Recorder Entry
220VACPOK      =F

07-07-25 13:44:14 Vital Recorder Entry
220VACPOK      =T

07-07-25 13:41:20 Vital Recorder Entry
D1_2D1TDSRKI=F D1_2D1TESRKI=T

07-07-25 13:40:36 Vital Recorder Entry
220VACPOK      =F

07-07-25 13:37:24 Vital Recorder Entry
220VACPOK      =T
```

Fonte: Sistema EletrologIXS.

Com o objetivo de implementar a manutenção preditiva, isto é, realizar análises antecipadas capazes de evitar intervenções corretivas, foi desenvolvido o Supervisório de MCH, um sistema voltado à otimização da tomada de decisões na manutenção das Máquinas de Chave da EFC. Esse sistema obtém relatórios operacionais por meio de um robô que coleta automaticamente as informações dos TU a cada quatro horas, realizando a interpretação dos dados por meio de lógicas programadas.

A criação do Supervisório foi motivada pelos impactos operacionais relevantes que as Máquinas de Chave vinham causando na circulação ferroviária da EFC, em virtude da quantidade e das características de funcionamento desses ativos.

Entre as funcionalidades do Supervisório, destacam-se: a visualização de gráficos do comportamento das variáveis de sinalização relacionadas às MCHs, TFSP e TFPM; o monitoramento por meio de mapa de calor dos pré- alarmes das MCHs da EFC e do TFPM; bem como a visualização e extração dos pré- alarmes dessas mesmas unidades.

A análise de dados no sistema supervisório é, em geral, realizada de forma retrospectiva, por meio da comparação das informações registradas no dia anterior ao da avaliação. Para iniciar o processo, é necessário selecionar o TU desejado, bem como a data correspondente. Após a aplicação desse filtro, o sistema exibe todas as MCHs vinculadas ao TU selecionado.

Com visualização gráfica do comportamento de uma MCH W1 no TE_146, torna-se possível identificar quais MCHs apresentaram falhas, bem como a natureza de cada evento, tais como perda de indicação de posição (normal ou reversa), ocorrência de sobretensão elétrica, entre outros registros considerados relevantes para a manutenção e operação segura do sistema.

Cada cor exibida na interface gráfica do sistema representa uma condição específica de operação ou falha, o que facilita uma interpretação rápida e precisa por parte dos operadores. Além da interface visual, o sistema também fornece uma tabela consolidada de falhas, contendo registros detalhados de todas as MCHs distribuídas ao longo da malha ferroviária, abrangendo o trecho entre São Luís e Carajás.

Em resumo o supervisório gerencia 219 Locais Monitorados (ElectrologIXS), aproximadamente 1500 máquinas de chaves, Identificados Alertas e seus Tipos e Classifica as prioridades (P0, P1 e P2). Na figura 33 tem- se a causa de cada problema e qual escala de prioridade.

Por meio desse projeto de automação e monitoramento, o Centro de Monitoramento de Ativos (CMA) tem conseguido atuar preventivamente na identificação de falhas potenciais nas MCHs. A partir da análise detalhada de cada evento registrado pelo sistema supervisório, é possível, sempre que necessário, gerar uma nota de manutenção direcionada à equipe responsável pela intervenção técnica no ativo.

Com o apoio das tecnologias de automação e da integração entre os setores envolvidos, têm-se obtido resultados expressivos na redução de falhas. Os indicadores de eventos evitados ao longo dos últimos meses demonstram desempenho satisfatório, refletindo a eficácia do monitoramento contínuo. A expectativa é de que esses resultados sejam ainda mais aprimorados

com a evolução das ferramentas de diagnóstico, aumentando a precisão das análises e a confiabilidade operacional da malha ferroviária.

7.4 BENEFÍCIOS DA INTEGRAÇÃO BACKBONE/MCH

A integração entre o backbone de comunicação e os sistemas de automação das MCHs proporciona benefícios significativos para a operação ferroviária. Entre as principais vantagens, destaca-se a aplicação de técnicas de manutenção preditiva, que se baseiam na análise de dados operacionais para identificar anomalias e padrões de comportamento que antecedem possíveis falhas em equipamentos e processos.

Com a conectividade estabelecida por meio do backbone, torna-se possível acessar, de forma remota, informações operacionais detalhadas das MCHs. No CMA, o operador da área de Eletroeletrônica utiliza um modelo de SGF que, embora não opere em tempo real, disponibiliza os mesmos dados utilizados pelo CCO para a definição das rotas dos trens.

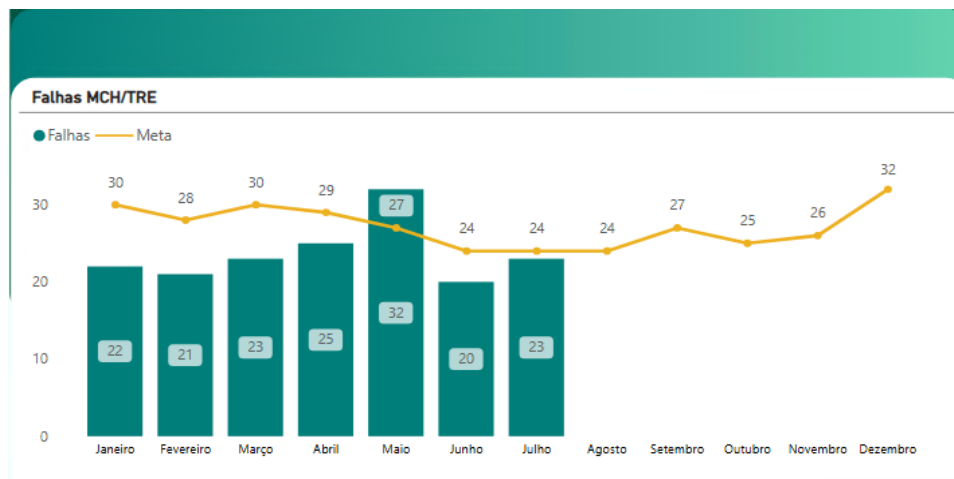
Ao identificar uma anormalidade no supervisório da MCH de um TU específico, o operador realiza uma análise preditiva dos dados disponíveis, a fim de antecipar possíveis falhas. O sistema permite ainda o acesso remoto aos registros de eventos (logs) do equipamento Elix associado à máquina de chave em questão, possibilitando o diagnóstico preliminar da ocorrência.

Esse processo é complementado por uma investigação colaborativa com os profissionais responsáveis pela inspeção da região correspondente, bem como pela análise dos históricos operacionais da máquina de chave. Dessa forma, a integração tecnológica promove maior confiabilidade ao sistema ferroviário, reduz o tempo médio de resposta às falhas, otimiza os recursos de manutenção e contribui para a continuidade operacional da ferrovia.

Nos gráficos apresentados a seguir, destacam-se três indicadores-chave de desempenho (KPIs), os quais representam medidas objetivas empregadas para mensurar a confiabilidade operacional do sistema. Esses indicadores refletem diretamente os ganhos obtidos com a integração entre o backbone de comunicação e os sistemas de automação das Máquinas de Chave (MCH), evidenciando a melhoria na estabilidade dos processos, a redução de falhas e o aumento da disponibilidade dos ativos críticos ao longo da malha ferroviária.

Conforme apresentado na Figura 19, tem-se o relatório das MCHs que falharam ao longo dos meses do ano, oferecendo uma visão geral das falhas não evitadas e evidenciando a eficácia, ou não, do CMA na predição das MCHs.

Figura 19 – Falhas de MCH/TRE.



Fonte: Autor (2025).

Além disso, antes da abertura de uma Ordem de Manutenção (OM), o operador de monitoramento realiza uma análise detalhada dos eventos que levaram à falha daquela MCH. Por meio da observação do gráfico representado na Figura 19, são verificados eventos como a passagem de trem, ocorrência de sobrecorrente, falha no ECC ou perda de indicação sem que tenha havido comando do CCO. Esses fatores são fundamentais para o diagnóstico da causa raiz da falha. A partir dessa avaliação, a OM é registrada com prioridade P0, a fim de garantir atendimento imediato e evitar impactos na operação ferroviária.

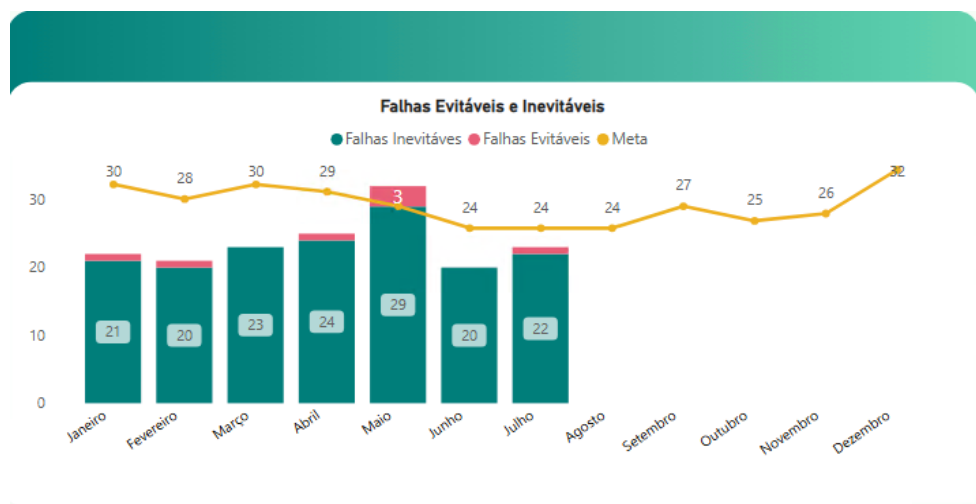
Na Figura 20, são apresentados os detalhes das falhas registradas, incluindo informações como a data da ocorrência, o número da Ordem de Manutenção (OM) correspondente e o status do evento.

Figura 20 – Detalhes das Falhas MCH/TRE

DataInicioAvaria	SedeSigla	InicioAvaria	Nota	Ordem	LocalInstalacao	Equipamento	StatusEvento
02/01/2025	SIS	02/01/2025 22:10:00	202500010001	202500038334	EFCJ-LPR-212-SINAL-MCH_ECJ14JC1K212	MCH	Concluído
03/01/2025	ACD	03/01/2025 03:39:00	202500010628	202500042974	EFCJ-LPR-512-SINAL-MCH_ECJZW12AK512	MCH	Concluído
03/01/2025	SPAB	03/01/2025 13:48:00	202500014390	202500050175	EFCJ-LPR-629-SINAL-MCH_ECJZW22CK629	MCH	Concluído
04/01/2025	NVD	04/01/2025 17:10:00	202500019287	202500062101	EFCJ-LPR-409-SINAL-MCH_ECJZW22CK409	MCH	Concluído
05/01/2025	PBA	05/01/2025 15:14:00	202500022213	202500070376	EFCJ-LPR-807-SINAL-MCH_ECJZW22AK807	MCH	Concluído
05/01/2025	RFSP	05/01/2025 20:09:00	202500022873	202500071551	EFCJ-S11-011-SINAL-MCH_ECJZW11CK011	MCH	Concluído
08/01/2025	VTM	08/01/2025 03:48:00	202500039331	202500123143	EFCJ-LPR-157-SINAL-MCH_ECJZW11CK157	MCH	Concluído
09/01/2025	TFPMII	09/01/2025 19:50:00	202500052994	202500157016	EFCJ-PPM-D08-SINAL-MCH_ECJD08ZW124C	MCH	Concluído
10/01/2025	ACD	10/01/2025 08:21:00	202500054794	202500165371	EFCJ-LPR-518-SINAL-TRE_ECJPA5TE5K514	TRE	Concluído
12/01/2025	VTM	12/01/2025 17:50:00	202500065869	202500191632	EFCJ-LPR-139-SINAL-MCH_ECJZW21AK139	MCH	Concluído
14/01/2025	MBA	14/01/2025 00:00:00	202500073703	202500215749	EFCJ-LPR-696-SINAL-MCH_ECJZW11AK696	MCH	Concluído
14/01/2025	TFPM	14/01/2025 03:00:00	202500073915	202500219613	EFCJ-PPM-D07-SINAL-	MCH	Concluído

Fonte: Autor (2025).

Figura 21 – Falhas Evitáveis e Inevitáveis MCH/TRE.



Fonte: Autor (2025).

Outro indicador relevante, apresentado na Figura 21, é o de Falhas Evitáveis, que representa as ocorrências que poderiam ter sido prevenidas pelo CMA, mas que, por diferentes fatores, não foram interceptadas a tempo. Dentre as causas mais comuns destacam-se a indisponibilidade técnica, a falta de tempo hábil para abertura de nota de manutenção e a ausência de priorização da falha. Esse indicador oferece uma visão crítica do ambiente operacional, permitindo identificar pontos que requerem aprimoramento na gestão e nos processos de tomada de decisão. Destaca-se que os dados das falhas inevitáveis correspondem às mesmas MCHs que entraram em estado de falha, porém em situações em que a prevenção não era viável.

Na Figura 22, apresenta-se o detalhamento dos eventos classificados como evitáveis, mas que, por não terem sido tratados previamente, evoluíram para falhas.

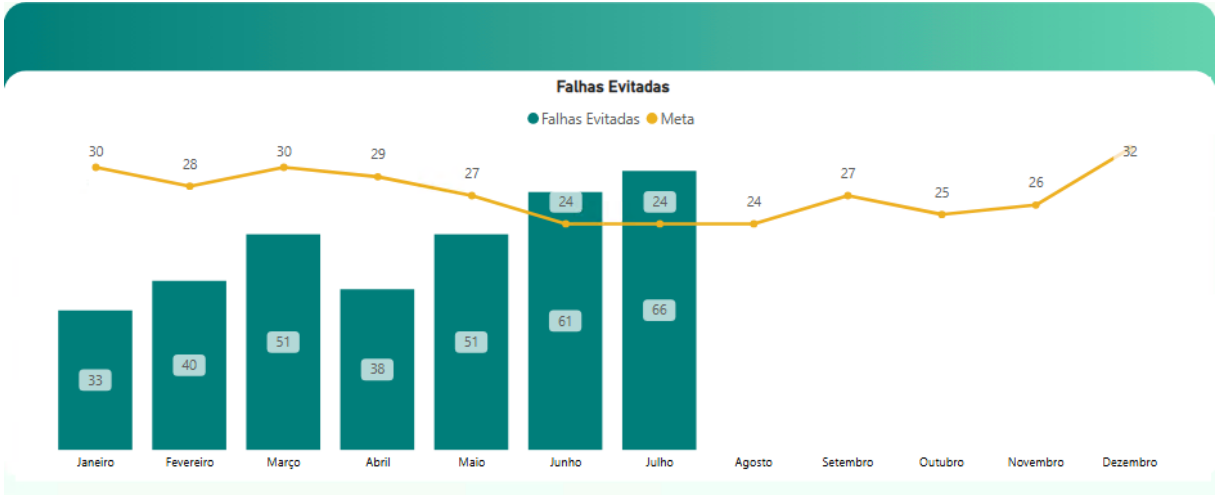
Figura 22 – Detalhamento das Falhas Evitáveis MCH/TRE.

Falhas Evitáveis MCH						
Sede	Remota	Resumo	Sintoma	Tipo de Atendimento	Motivo do Insucesso	Mês
Vtm	tu_149v	Manutenir Alerta W11C tu_149v	MCH sem correspondência sem passagem de trem	Insucesso	Indisponibilidade técnica	abril
Aal	tu_310v	Manutenir Alerta W12AB tu_310v	MCH sem correspondência sem passagem de trem	Insucesso	Não priorizado	fevereiro
Vtm	tu_139v	Manutenir Alerta W21AB tu_139v	MCH sem correspondência com passagem de trem	Insucesso	Não aberto nota de manutenção	janeiro
Acd 2	tu_562v	Manutenir Alerta W12C tu_562v	MCH sem correspondência sem passagem de trem	Insucesso	Não priorizado	julho
Acd 2	tu_587v	Manutenir Alerta W11AB tu_587v	MCH sem correspondência com passagem de trem	Insucesso	Não aberto nota de manutenção	maio
Tfpm	d10_am103_el1v	Manutenir Alerta W157B d10_am103_el1v	MCH sem correspondência sem passagem de trem	Insucesso	Não aberto nota de manutenção	maio
Vtm	tu_157v	Manutenir Alerta W11C tu_157v	MCH sem correspondência sem passagem de trem	Insucesso	Não priorizado	maio

Fonte: Autor (2025).

O terceiro indicador, considerado um dos mais relevantes, evidencia de maneira precisa e criteriosa a eficácia da atuação do Centro de Monitoramento de Ativos (CMA) na prevenção de falhas futuras (Figuras 23 e 24). Esse indicador expressa a capacidade analítica do sistema em identificar riscos potenciais e adotar ações preventivas, contribuindo de forma significativa para a elevação da confiabilidade operacional e para a redução das interrupções no sistema.

Figura 23 – Falhas Evitadas MCH/TRE.



Fonte: Autor (2025).

Figura 24– Detalhes das Falhas Evitadas MCH/TRE.

Falhas Evitadas MCH					
Descrição Pré-alarme	Sintoma	Modo de Falha	Dias para atender	Tipo de Atendimento	Mês
22/07 - MCH alarmou NWOTER, na W818 do d6_arm63_e1lv.	MCH sem correspondência após CMC		2	Sistemático	julho
23/07 - Indicação para normal caiu sem passagem de trem, na W1 do te_862_8lv.	TRE sem correspondência sem passagem de trem	conexões elétricas_avaria.	1	Emergencial	julho
23/07 - Indicação para reverso caiu sem passagem de trem, na W22C do tu_603lv.	MCH sem correspondência sem passagem de trem		0	Sistemático	julho
23/07 - MCH alarmou NWOTER, na W88 do d7_abr7_e1lv.	MCH sem correspondência após CMC	via permanente	0	Emergencial	julho
23/07 - MCH não movimentou com acionamento para reverso, na W738 do d6_arm62lv.	MCH sem movimentar após comando	via permanente	1	Emergencial	julho
24/07 - Indicação para reverso caiu durante passagem do M006 cumprindo rota 8C, na W12AB do tu_663lv.	MCH sem correspondência com passagem de trem	via permanente_desnivelamento.	1	Emergencial	julho
24/07 - MCH alarmou RWOTER, na W12AB do tu_466lv.	MCH sem correspondência após CMC	via permanente	2	Condicional	julho
24/07 - MCH não movimentou com acionamento para reverso, na W22C do tu_029lv.	MCH sem movimentar após comando devido avaria no circuito de acionamento do motor.	m3 fresimbra nao talonavel_nao identificado.	1	Emergencial	julho
25/07 - MCH alarmou NWOTER, na W818 do d6_arm63_e1lv.	MCH sem correspondência após CMC		1	Sistemático	julho
27/07 - Indicação para normal caiu durante passagem do J636 cumprindo rota BA, na W21AB do tu_182lv.	MCH sem correspondência com passagem de trem	via permanente	0	Emergencial	julho
27/07 - Indicação para normal caiu sem passagem de trem, na W21AB do tu_325lv.	MCH sem correspondência com passagem de trem	via permanente	1	Emergencial	julho
27/07 - MCH alarmou NWOTER, na W818 do d6_arm63_e1lv.	MCH sem correspondência após CMC		0	Sistemático	julho
27/07 - MCH alarmou NWOTER, operando com corrente de 9 ampères, na W21C do tu_261lv.	MCH sem correspondência após CMC (com arrasto da agulha sobre a chapa deslizante)	via permanente	0	Emergencial	julho
27/07 - TRE alarmou NWOTER, na W21C do tu_261lv.	TRE sem correspondência após CMC	via permanente	1	Emergencial	julho

Fonte: Autor (2025).

7.5 DESAFIOS E AVANÇOS TECNOLÓGICOS

Atualmente, um dos principais desafios enfrentados na operação do sistema de telecomunicações da Estrada de Ferro Carajás (EFC) é a obsolescência dos ativos e da infraestrutura. A rede backbone opera com multiplexadores que já se encontram descontinuados, além de utilizar cabos de fibra óptica com aproximadamente 30 anos de uso. Essa condição torna complexa a manutenção da qualidade do sinal e compromete a confiabilidade da transmissão de dados em longas distâncias.

Outro obstáculo relevante refere-se à integridade da rede, que sofre constantes ameaças externas, como rupturas físicas e degradação dos cabos ópticos. Importa destacar que a degradação não está relacionada apenas à idade do material, mas também a fatores técnicos como o ângulo inadequado de curvatura da fibra e a má execução de emendas, o que compromete a eficiência na transmissão do laser. Nesses casos, a potência do sinal precisa ser aumentada para compensar a perda de luz, resultando em maior desgaste dos equipamentos emissores e possível instabilidade na comunicação.

Além disso, intervenções de manutenção podem comprometer o desempenho da rede. A cada reparo por ruptura, é necessário inserir novos trechos de fibra, aumentando o comprimento total do enlace óptico. Por exemplo, uma seção originalmente projetada para 100 metros pode passar a ter 110 metros após a inserção de novos cabos. Essa extensão adicional exige que o equipamento de transmissão opere fora de suas especificações iniciais, o que pode prejudicar a cobertura e o desempenho da comunicação.

Apesar desses desafios, avanços significativos têm sido implementados. Destacam-se os projetos de renovação do parque tecnológico, voltados à atualização da infraestrutura e à modernização dos equipamentos de backbone, como os multiplexadores e os cabos ópticos. Parte dessa renovação inclui a aquisição de novos cabos de fibra óptica com características reforçadas, projetados especialmente para instalação subterrânea. Esses cabos possuem estrutura mais robusta e resistente à pressão do solo, o que aumenta sua durabilidade e reduz a vulnerabilidade a falhas mecânicas, especialmente quando comparados aos modelos aéreos anteriormente utilizados.

8 CONCLUSÃO

Durante o trabalho, foram alcançados os objetivos propostos: compreender o funcionamento e a importância estratégica das MCHs, investigar a infraestrutura do backbone ao longo da ferrovia, descrever o fluxo de dados até o Centro de Monitoramento de Ativos (CMA) e analisar as inovações adotadas pela Vale S.A. para a modernização da operação ferroviária.

O propósito do estudo foi alcançado de forma significativa, uma vez que a integração dos sistemas de comunicação com os dispositivos de campo, por meio de tecnologias como SDH, fibra óptica, supervisórios SCADA e protocolos industriais, possibilita o monitoramento em tempo real, a redução de falhas e a aplicação efetiva da manutenção preditiva. Essa integração resulta em ganhos expressivos de eficiência, segurança e confiabilidade na malha ferroviária, especialmente considerando a extensão continental da EFC e sua relevância estratégica no escoamento de minérios para exportação.

Entre os principais contatados desse estudo investigativo destacam-se a importância de uma arquitetura de rede robusta e resiliente para sistemas críticos; a relevância da automação na redução da dependência de intervenções manuais em ambientes operacionais de alta demanda; e a constatação de que a convergência entre as tecnologias da informação, telecomunicações e engenharia ferroviária é essencial para a modernização do setor. A aplicação bem-sucedida dessas soluções na ferrovia demonstra que a digitalização da infraestrutura ferroviária brasileira é não apenas viável, mas imprescindível para atender às exigências atuais de desempenho, segurança e sustentabilidade.

Além disso, este estudo pode ser aprofundado de forma mais significativa por meio de abordagens complementares, como a Avaliação do Desempenho em Tempo Real de Sistemas de Comunicação Backbone em Ambientes Ferroviários Hostis e a Análise de Sustentabilidade e Eficiência Energética na Expansão de Infraestrutura de Comunicação na Ferrovia. Esses temas ampliam a compreensão sobre a eficiência dos sistemas propostos, permitindo uma visão mais integrada entre desempenho técnico, viabilidade ambiental e inovação tecnológica.

O contínuo avanço da automação ferroviária, aliado à expansão da IoT e da inteligência artificial, tende a transformar a operação das ferrovias brasileiras. A EFC pode se tornar um modelo nacional de ferrovia digitalizada.

REFERÊNCIAS

- ABB. **FOX515H Technical Data PDH/SDH Multi Service Multiplexer**. 2015. Disponível em: https://theref.ru/wp-content/uploads/2023/10/fox515-technical-data-poster_2015.pdf. Acesso em: 24 jul. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Concessões**. Brasília: ANTT, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/concessoes>. Acesso em: 27 jul. 2025.
- AGRAWAL, Govind P. **Fiber-optic communication systems**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2021. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Fiber-Optic%2BCommunication%2BSystems%2C%2B5th%2BEdition-p-9781119737360>. Acesso em: 24 jul. 2025.
- ALTAVE. **Monitoramento inteligente em ferrovias: prevenção de riscos, agilidade operacional e decisões estratégicas**. Disponível em: <https://altave.com.br/monitoramento-inteligente-ferrovias/>. Acesso em: 24 jul. 2025.
- BRASIL. Decreto nº 77.608, de 13 de maio de 1976. **Outorga à Amazônia Mineração S.A. – AMZA concessão para construção de estrada de ferro entre a Serra dos Carajás (PA) e a Baía de São Marcos (MA)**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 maio 1976. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-77608-13-maio-1976-426485-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 01 ago. 2025.
- BRASIL. Decreto nº 87.961, de 21 de dezembro de 1982. **Declara extinta a concessão à AMZA e a transfere à Companhia Vale do Rio Doce**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 dez. 1982. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1980-1984/D87961.htm. Acesso em: 22 jul. 2025.
- BRANDÃO, A. A. et al. **Protocolos e sistemas automáticos em sinalização ferroviária**. Revista de Engenharia Ferroviária, v. 22, n. 1, p. 45–62, 2021.
- BRANDÃO, Luiz Alberto Dantas Soares. **O sistema ferroviário brasileiro – Estrada de Ferro Carajás**. WebArtigos. Disponível em: <https://www.webartigos.com/artigos/o-sistema-ferroviario-brasileiro-estrada-de-ferro-carajas/4800>. Acesso em: 21 jul. 2025.
- CORREIO DE CARAJÁS. **Estrada de Ferro Carajás completa seus 40 anos hoje**. Marabá, 28 fev. 2025. Disponível em: <https://correiodecarajas.com.br/estrada-de-ferro-carajas-completa-seus-40-anos-hoje>. Acesso em: 28 jul. 2025.
- DAVIS, W. J.; MESNICK, M. H.; TERRILL, L. J. **Practical reliability engineering**. 2. ed. New York: Wiley, 2003.

FERNANDES, Alexandre (coord.). **Redes de computadores: fundamentos**. 8. ed. São Paulo: Érica, 2020. Disponível em: <https://www.editoradodireito.com.br/livro-redes-de-computadores-fundamentos-alexandre-fernandes-erica-9788536532967>. Acesso em: 24 jul. 2025.

FERREIRA, L. C.; GOMES, R. T. **Protocolos de comunicação em sistemas ferroviários: panorama tecnológico e tendências**. Revista de Automação e Controle, v. 14, n. 3, p. 156–173, 2023.

FERROVIAS E TRENS ANTIGOS. **Stokton & Darlington Railway: primeira ferrovia pública do mundo**. 17 dez. 2016. Disponível em: <https://ferroviasetrensantigos.blogspot.com/2016/12/stokton-darlington-railway-primeira.html>. Acesso em: 27 jul. 2025.

GILBERT, M. **Railway signalling and control systems**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2019.

HITACHI ENERGY. **FOX 515 Utility Multiservice Platform**. Disponível em: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/communication-networks/wired-networks/fox-multiservice-platform/fox515>. Acesso em: 24 jul. 2025.

IEC (International Electrotechnical Commission). **IEC 60870-5-104: Telecontrol equipment and systems – Part 5-104: Transmission protocols**. Genebra, 2017.

KALATEC. **Redes industriais: o que são, tipos e vantagens (guia completo)**. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/redes-industriais/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

KOBUSCH, M.; GABRIEL, D. **Tecnologia de fibra óptica: princípios e aplicações**. São Paulo: Érica, 2018. Disponível em: <https://www.editoradodireito.com.br/livro-tecnologia-de-fibra-optica-principios-e-aplicacoes-9788536532967>. Acesso em: 24 jul. 2025.

KUMAR, R.; SRIVASTAVA, P. **Communication systems in modern railways**. Transportation Engineering Journal, v. 25, n. 3, p. 400–416, 2020.

LOGWEB. **Estrada de Ferro Carajás completa 25 anos de operação**. São Paulo: Revista Logweb, 2011. Disponível em: <https://www.logweb.com.br/materias/estrada-de-ferro-carajas-completa-25-anos-de-operacao>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MK SOLUTIONS. **O que é backbone: para que serve, quais são os tipos e onde fica**. Disponível em: <https://www.mksolutions.com.br/o-que-e-backbone/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

MUSEU IMPERIAL / IBRAM / MINC (Acervo José Kopke Fróes). **Inauguração da Imperial Companhia de Navegação a Vapor e Estrada de Ferro de Petrópolis, c. 30 abr. 1854**. Reprodução fotográfica de impresso (The Illustrated London News). Petrópolis, RJ: Acervo iconográfico.

PORTAL IDEA. **Fibras ópticas: modos de propagação e aplicações.** [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://portalidea.com.br/cursos/fibra-tica-apostila01.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2025.

RAEY, S. **Industrial communication protocols: a practical guide.** 2. ed. Londres: TechPress, 2017.

SCHWALBE, K. **Information technology project management.** 8. ed. Boston: Cengage Learning, 2015.

SIEMENS AG. **Railway signaling technology: principles and applications.** Munich: Siemens Mobility, 2020.

SMITH, R. **Railway communications and signaling.** London: Institution of Engineering and Technology, 2017.

SMZ AUTOMAÇÃO E CONTROLE. **Vale – SMZ Automação e Controle.** Disponível em: <https://smz.com.br/clientes/vale/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

UNIVERSAL ROBOTS. **Redes industriais: o que são, principais tipos e para que servem.** Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/redes-industriais-o-que-s%C3%A3o-principais-tipos-e-para-que-servem/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

WANG, L.; LI, J. **Wireless communication solutions for railway networks.** IEEE Communications Magazine, v. 59, n. 4, p. 82–88, 2021.

WATSON, Ivan; SANTOS, Ivan. **Introdução à fibra óptica.** [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: https://www.academia.edu/39996777/Introdu%C3%A7%C3%A3o_a_Fibra_%C3%93ptica. Acesso em: 24 jul. 2025.

VIAPERMANENTE. **Estrada de Ferro Mauá: a primeira ferrovia construída no Brasil.** Disponível em: <https://viapermanente.net/a-primeira-ferrovia-do-brasil/>. Acesso em: 01 ago. 2025.

WISE INDÚSTRIA DE TELECOMUNICAÇÕES. **Princípio de funcionamento e tipos de fibra óptica.** [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <https://wi.com.br/DOWNLOADS/applicationNote/principio-de-funcionamento-e-tipo-de-fibra-optica.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2025.

MUNIZ FILHO, Edisio Rodriguez. **Estratégia de manutenção prescritiva: um estudo aplicado às Máquinas de Chave da Estrada de Ferro Carajás.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

KOBAYASHI, Hisashi. **Sistemas de comunicação digital: fundamentos e aplicações.** São Paulo: LTC, 2011.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (UIT). **Recomendações G.707, G.708 e G.709: Interfaces e estruturas de multiplexação para redes ópticas de transporte (OTN) e SDH.** Genebra: UIT, 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SILVA, Dener Ottolini et al. **Desempenho e escalabilidade de plataformas livres de IoT.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, 38., 2020, Rio de Janeiro. Anais... Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020. p. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.5753/sbrc.2020.12274>.

VALE S.A. **Procedimento de Manutenção Preventiva Multiplex/SWITCH. PRO 001131, Rev. 09, 30 jan. 2024.** Documento interno.

MK SOLUTIONS. **O que é backbone?.** Disponível em: <https://www.mksolutions.com.br/o-que-e-backbone/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

REDAÇÃO EMBRATEL. **A história do Brasil conectado.** Próximo Nível – Embratel, 29 out. 2018. Disponível em: <https://proximonivel.embratel.com.br/a-historia-do-brasil-conectado/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

ELETRONET – EMPRESA DE TRANSPORTE DE DADOS. **Backbone óptico: como planejar uma rede escalável para os próximos 10 anos.** Eletronet, 17 jun. 2025. Disponível em: <https://www.eletronet.com/blog/backbone-optico/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

CAMACHO REYES, Jorge Armando. **Diseño del cableado estructurado backbone horizontal en fibra óptica para mejorar la velocidad de transmisión de datos.** Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.19083/tesis/625694>. Acesso em: 1 ago. 2025.

ICOS. **Cloud Edge IoT solutions: present and future for railway sector.** ICOS Project, 2024. Disponível em: <https://www.icos-project.eu/blog/cei-in-railway-sector/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

HORADECODAR. **Como integrar n8n com IoT e sensores usando MQTT: exemplos práticos.** Disponível em: <https://horadecodar.com.br/integrar-n8n-iot-sensores-mqtt-exemplos/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

LIMA, Thiago. **Conectividade 5G: acelerando a automação e a tomada de decisão.** Indústria Projetada, 28 jan. 2025. Disponível em: <https://industriaprojetada.com.br/conectividade-5g-acelerando-a-automacao-e-a-tomada-de-decisao/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

LIU, Yi et al. **Research on digital twin technology and its application in intelligent operation and maintenance of high-speed railway infrastructure.** *Railway Sciences*, v. 3, n. 6, p. 746–763, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1108/rs-09-2024-0036>. Acesso em: 1 ago. 2025.

NATÁLI, Christian Di et al. **Smart tools for railway inspection and maintenance work, performance enhancement, and safety improvement.** *Transportation Research Procedia*, v. 72, p. 3070–3077, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.019>. Acesso em: 1 ago. 2025.

ROISENBERG, Leandro. **O que é a certificação IEC 62443 e seu impacto na automação.** Blog LRI Automação Industrial, 06 jul. 2025. Disponível em: <https://blog.lri.com.br/o-que-e-a-certificacao-iec-62443-e-seu-impacto-na-automacao/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

ROISENBERG, Leandro. **O que é IEC 60870-5-104 e para que serve? Blog LRI Automação Industrial**, 7 fev. 2024. Disponível em: <https://blog.lri.com.br/o-que-e-iec-60870-5-104-e-para-quer-serve/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

DNV. **Segurança funcional para a indústria ferroviária.** Disponível em: <https://www.dnv.com.br/services/functional-safety-for-rail-industry-82739/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

IEEE. **IEEE 1474.1-2025: IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements.** 2025. Disponível em: <https://standards.ieee.org/ieee/1474.1/6959/>. Acesso em: 1 ago. 2025.

BARBOSA, Guilherme. **O que é fibra óptica? Entenda como essa tecnologia funciona.** Max Dicas, 14 jun. 2021. Disponível em: maxdicas.com.br/o-que-e-fibra-optica-entenda-como-essa-tecnologia-funciona/. Acesso em: 11 ago. 2025.

REDE NOTICIANDO. **Curiosidades do Transporte: Conheça e entenda sobre o AMV.** Rede Noticiando, 18 jul. 2018. Disponível em: <https://noticiando.net/curiosidades-do-transporte-conheca-e-entenda-sobre-o-amv/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

ONTOLT. **Caixa de terminais de fibra óptica nova original GPON SC/UPC SC/APC.** Disponível em: <https://ontolt.com/pt/product/fiber-optic-terminal-box-new-original-gpon-sc-upc-sc-apc/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

HONE CABLE. **Cabo de fibra óptica blindado.** Disponível em: <https://www.honecable.com/armored-optical-fiber-cable/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

HITACHI ENERGY. **Equipamento de comunicação de rede modular.** Disponível em: <https://www.hitachienergy.com/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

MASS TRANSIT MAGAZINE. **ElectroLogIXS**. 16 ago. 2007. Disponível em: <https://www.masstransitmag.com/technology/product/10067069/ge-transportation-rail-electrologixs>. Acesso em: 11 ago. 2025.