

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres
RDT - Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

PLANO DE TRABALHO

TÍTULO DO PROJETO:

**MONITORAMENTO INTELIGENTE DA INTEGRIDADE DOS CABOS DE CONTROLE DAS VIAS FERROVIÁRIAS
(MOCAB)**

TEMA PRIORITÁRIO:

9 - Aprimoramento da manutenção ferroviária, inclusive com a integração de diferentes tecnologias e a automação industrial

MRS S.A.

04/09/2025

SUMÁRIO

1. PROJETO	3
1.1. Título do Projeto	3
Monitoramento Inteligente da Integridade dos Cabos de Controle das Vias Ferroviárias (MOCAB)	3
1.1.1. Linha de inovação e desenvolvimento	3
1.1.2. Temas	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo Geral	4
1.2.2. Objetivos Específicos	5
2. JUSTIFICATIVA	5
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	19
3.1. Métodos e técnicas utilizadas	19
3.2. Etapas	27
4. PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL	37
5. LOCAL DE EXECUÇÃO	37
6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA	38
6.1. Identificação da entidade	38
6.2. Identificação da equipe executora	38
7. PRODUTOS	43
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS	44
9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO	44

1. PROJETO

1.1. Título do Projeto

Monitoramento Inteligente da Integridade dos Cabos de Controle das Vias Ferroviárias (MOCAB)

1.1.1. Linha de inovação e desenvolvimento

Foram definidos para este projeto consoante ao descrito nos Art. 3º e Art. 4º da Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), vinculada ao Ministério dos Transportes, a linha de inovação e desenvolvimento baseando-se nas diretrizes às quais se destinam os Recursos de Desenvolvimento Tecnológico (RDT), bem como dos objetivos de inovação no desenvolvimento.

Este projeto se enquadra prioritariamente nas diretrizes estabelecidas nos incisos I e II do Art. 3º, que tratam da “modernização da infraestrutura integrante do Subsistema Ferroviário Federal” e da “melhoria da qualidade dos serviços objeto de concessão ferroviária federal, inclusive relacionada aos atributos de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas”. Ao propor uma solução de monitoramento para cabos metálicos de controle de sinalização, o projeto visa a modernização da gestão de manutenção e a prevenção de falhas. A solução inovadora oferece maior eficiência operacional, redução de custos com manutenções corretivas e diminuição de interrupções inesperadas. Isso promove a segurança e a continuidade dos serviços onde os cabos atuam, posicionando o projeto na vanguarda tecnológica.

Além disso, conforme os objetivos do Art. 4º, o projeto busca a inovação no desenvolvimento de “soluções técnicas para problemas específicos” e de “soluções de acompanhamento e monitoramento de atividades ferroviárias em tempo real, bem como de aprimoramento da fiscalização pública”, conforme descrito nos incisos III e IV.

A proposta envolve o uso de sensores que coletam dados dos cabos metálicos e um analisador (software) que processa esses dados para prever falhas e fornecer informações em tempo real. Essa abordagem traz vantagens significativas, como maior confiabilidade dos sistemas de sinalização, redução do tempo de inatividade e otimização dos recursos de manutenção. Diferente das abordagens atualmente em uso, que demandam inspeções manuais e manutenções corretivas, a solução proposta possibilita uma manutenção preditiva quase contínua, oferecendo maior eficiência e sustentabilidade aos sistemas de sinalização. Por mais que essa tecnologia esteja sendo desenvolvida com apoio de uma empresa ferroviária, observa-se sua viabilidade técnica para aplicação em cabos de sinalização de distintas áreas de atuação.

1.1.2. Temas

O tema prioritário do presente projeto é definido com base na Deliberação nº 169 da Diretoria Colegiada da ANTT, de 27 de junho de 2024, especialmente no Anexo I, que determina os Temas Prioritários para a destinação dos RDTs. Assim, o projeto se alinha primariamente ao Tema Prioritário 9, descrito a seguir:

Tema Prioritário 9: Aprimoramento da manutenção ferroviária, inclusive com a integração de diferentes tecnologias e a automação industrial.

A solução proposta no projeto integra diversas tecnologias avançadas, incluindo sensores, processamento de sinais e inteligência artificial, que visam o aprimoramento da

manutenção dos sistemas de sinalização. Com base em dados de monitoramento contínuo dos sinais elétricos (tensão e corrente) que se propagam através dos cabos metálicos de controle de sinalização, a solução proposta é capaz de detectar e identificar padrões de degradação (p.ex., fuga para a terra e rompimento de dielétrico), prever e localizar a ocorrência de falhas nesses cabos. Além disso, a integração da solução proposta com sistemas de supervisão fornece informações relevantes para a execução de manutenções preditivas. Com a redução da necessidade de manutenções corretivas e melhor uso dos recursos humanos, há uma melhora significativa na eficiência das ações de manutenção. Assim sendo, a solução proposta, ao monitorar a degradação dos cabos de controle de sinalização, permite usar esses ativos durante somente o período em que eles efetivamente estão operacionais. Além de reduzir os custos com manutenção (CAPEX e OPEX), a segurança das operações é melhorada, posto que problemas relacionados com degradação dos cabos de controle de sinalização são reduzidos consideravelmente.

Em adição ao alinhamento com o Tema Prioritário 9, o presente desenvolvimento apresenta alinhamento com outros dois Temas prioritários, descritos a seguir:

Tema Prioritário 1: Qualidade no serviço de transporte ferroviário, com foco principal na atualidade.

A solução desenvolvida neste projeto está alinhada ao objetivo de garantir a qualidade no serviço de transporte ferroviário, especialmente no que diz respeito à atualidade das tecnologias empregadas. Ao integrar conceitos de Internet das Coisas (Internet of Things - IoT), sensoriamento distribuído, inteligência artificial e processamento de sinais para predição, detecção, classificação e localização, a solução proposta proporciona um controle em tempo real da integridade dos cabos metálicos de controle de sinalização. Essa abordagem possibilita intervenções preventivas mais precisas, reduzindo as ocorrências de falhas inesperadas e interrupções operacionais. Com a adoção desta tecnologia, é possível elevar os padrões de qualidade e segurança dos serviços de transporte ferroviário, tanto de cargas quanto de pessoas, oferecendo soluções que acompanham as inovações tecnológicas mais recentes e atendem às exigências de eficiência e confiabilidade.

Tema Prioritário 10: Desenvolvimento de estudos e tecnologias para melhoria da operação ferroviária.

O desenvolvimento tecnológico promovido pelo presente projeto também está alinhado com o aprimoramento da operação ferroviária. A capacidade de monitoramento contínuo e predição de falhas oferece uma visão detalhada e em tempo real do estado dos cabos de controle, permitindo uma operação mais eficiente e segura. Ao fornecer dados precisos sobre a condição dos cabos, a solução facilita a tomada de decisões, uma vez que os responsáveis estarão mais informados e terão acesso rápido às informações, reduzindo o tempo de inatividade e otimizando o uso de recursos. Isso resulta em uma melhoria significativa da operação ferroviária, com maior disponibilidade e confiabilidade das linhas, beneficiando tanto a gestão da malha ferroviária quanto os operadores.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do projeto de P&D é desenvolver um sistema de MONitoramento Inteligente da Integridade dos CABos de Controle das Vias Ferroviárias (MOCAB), denominada solução MOCAB, a qual faz uso de técnicas de processamento de sinais, processamento estocástico de sinais, e inteligência artificial (IA) para monitorar, detectar, classificar, localizar e prever, em tempo real e simultaneamente, as degradações e falhas

nos cabos metálicos multicondutores, constituídos de até 54 condutores. Com o MOCAB será possível prever problemas futuros nos cabos metálicos multicondutores de sinalização utilizados em vias ferroviárias e, conseqüentemente, reduzir o número de acidentes associados a deterioração dos cabos de sinalização, os quais não são atualmente monitorados pelas operadoras ferroviárias. O MOCAB permitirá a identificação e localização do problema no circuito de sinalização e, conseqüentemente, contribuirá com a redução do número de acidentes em operações ferroviárias, melhorando a segurança no transporte de pessoas e produtos e, portanto, impactando positivamente a sociedade civil e o setor produtivo. De uma forma geral, O MOCAB oferece benefícios práticos, econômicos e ambientais às operadoras ferroviárias, seus usuários, ANTT e toda a sociedade.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da proposta são descritos a seguir:

- Montar setups de testes em laboratório e de campo, permitindo a realização de experimentos e coleta de dados para uso em simulações numéricas;
- Desenvolver sensores MOCAB (*hardware*, *firmware* e mecânica) para injeção e extração de sinais nos cabos de sinalização. Cada sensor é capaz de monitorar até 18 cabos. Até três sensores podem ser conectados em paralelo para monitorar até 54 cabos;
- Desenvolver o analisador MOCAB para cabos de sinalização de detectar, classificar, localizar e prever degradações e falhas, a partir da injeção e da coleta de sinais elétricos (tensão e corrente);
- Integrar sensores e o analisador MOCAB para gerar a solução MOCAB;
- Realizar testes em laboratório e no setup experimental para introdução de ajustes e garantia da funcionalidade em ambiente controlado;
- Realizar testes em campo para introdução de ajustes e garantia da funcionalidade em ambiente real;
- Documentar testes, desenvolvimento e versões finais dos produtos criados, incluindo relatórios e materiais de disseminação do conhecimento.

2. JUSTIFICATIVA

Os sistemas de sinalização ferroviária dependem de diversos dispositivos eletrônicos em seus circuitos de via, tais como relés e atuadores. Esses dispositivos são alojados em armários específicos, conforme ilustrado na Figura 1, para protegê-los de condições climáticas adversas (p.ex., emprego de sistema de proteção contra descargas atmosféricas) e contra perdas não técnicas (p.ex., vandalismo e roubo). Esses armários são instalados na margem da linha férrea espaçados por uma distância que varia entre um e três quilômetros. Interconectados por cabos metálicos multicondutores, os equipamentos instalados nesses armários constituem a parte operativa do sistema de sinalização de circuitos de vias férreas.

A maior parte dos sistemas de controle de sinalização ferroviária utiliza cabos metálicos — geralmente multicondutores — enterrados a uma profundidade de cerca de 60 cm, ao longo da margem da via férrea. Esse tipo de instalação, conhecido como enterramento direto, apresenta vantagens econômicas e técnicas, pois dispensa o uso de dutos ou canalizações complexas, reduzindo custos e oferecendo proteção natural contra

intempéries e radiação ultravioleta. No entanto, o ambiente em que esses cabos operam é extremamente heterogêneo. A composição do solo pode variar significativamente ao

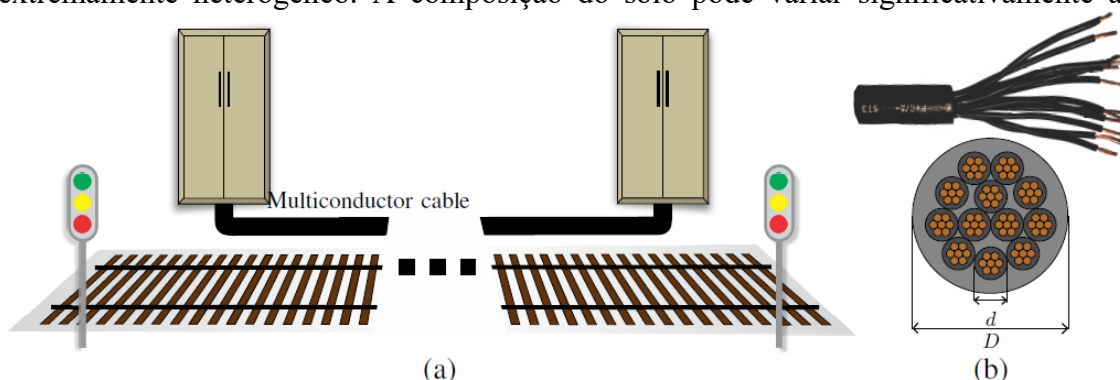


Figura 1. Ilustração de alguns componentes do sistema de sinalização de controle de vias. (a) sinalização entre dois armários e (b) cabo metálico utilizado na comunicação entre dois armários consecutivos.

longo da via, e fatores climáticos — como flutuações de temperatura, umidade e chuvas intensas — aceleram o desgaste dos materiais isolantes. Como consequência, a integridade dos cabos pode ser afetada em um intervalo de tempo menor do que os cinco anos previstos para o ciclo de verificações tradicionais.

Dentre as desvantagens do enterramento direto, destaca-se a possibilidade de infiltração de água, seja por lençóis freáticos, chuva ou enchentes, que pode levar à corrosão da blindagem do cabo e à degradação do isolamento entre condutores. Solos ácidos ou alcalinos e a presença de substâncias químicas ou sais também agravam o processo corrosivo, enquanto oscilações extremas de temperatura (calor ou frio) podem gerar expansão e contração, resultando em rachaduras ou falhas de isolamento. Além disso, roedores e insetos podem danificar os cabos ao roê-los, ao passo que as vibrações produzidas por máquinas pesadas ou mesmo pela circulação de trens impõem esforços adicionais. Raízes de plantas em crescimento podem exercer compressão ou tração, e eventuais danos mecânicos causados por objetos perfurantes ou escavações indevidas podem comprometer a funcionalidade dos cabos. Tais problemas podem acarretar curto-circuitos entre condutores ou em relação ao solo, aumento de diafonia (crosstalk) e até a ruptura dos condutores, impactando a confiabilidade dos sinais transmitidos.

Nos sistemas de controle de sinalização de vias férreas baseadas na transmissão de sinais DC através de cabos metálicos, um desafio significativo para as concessionárias ferroviárias, especialmente devido à complexidade das condições em que esses cabos operam, é a minimização da ocorrência de falhas. O método de monitoramento atualmente empregado para avaliar o estado dos cabos metálicos compreende o emprego de uma equipe técnica que faz o diagnóstico da qualidade utilizando um megômetro, conforme ilustrado na Figura 2. Esse tipo de teste que mede o isolamento entre condutores e terra é custoso, demorado e pode ser considerado destrutivo, pois a alta tensão aplicada acelera a degradação dos cabos, comprometendo sua vida útil. Este método de monitoramento é empregado a cada cinco anos, o que significa que possíveis degradações e falhas ainda incipientes e não detectadas durante a execução do método de monitoramento, podem se desenvolver, num intervalo de tempo inferior a cinco anos, até um ponto crítico e, consequentemente, comprometer a segurança e a eficiência da operação ferroviária. Noutras palavras, a dependência de inspeções espaçadas temporalmente de cinco anos,

coloca em risco a continuidade das comunicações entre os gabinetes de sinalização, podendo levar a falhas de sinal, atrasos nas entregas e riscos à segurança.



Figura 2. Emprego do megômetro para diagnóstico da qualidade dos cabos metálicos a cada cinco anos.

Outro aspecto preocupante é a interferência humana ao longo da margem da via, seja por prestadores de serviços, empresas ou até mesmo pela população local, que pode realizar escavações ou instalações diversas. Essas intervenções acidentais podem ocasionar danos imediatos aos cabos — como perfurações, rompimentos ou deformações — capazes de se agravar rapidamente se não forem identificados e, conseqüentemente, acelerar as degradações ou ocorrências de falhas nos cabos metálicos, que não são detectados pelo método atual de monitoramento. Assim, torna-se imperativo desenvolver estratégias de monitoramento mais frequentes, confiáveis e menos invasivas, que sejam capazes de detectar e até mesmo prevenir problemas nos cabos metálicos, contribuindo para a continuidade, a eficiência e a segurança das concessionárias ferroviárias.

Quando ocorrem os problemas mencionados acima, a eficiência operacional é gravemente comprometida, impactando não somente a concessionária ferroviária e os usuários dos serviços, mas também, principalmente, a sociedade em geral. Em enlaces de até 3 km de cabos metálicos aterrados, a identificação do local exato da falha e a realização do reparo podem demandar um tempo bastante longo, forçando as locomotivas a operarem em baixíssima velocidade. Essa situação resulta em perdas financeiras para a concessionária e usuários do transporte ferroviário, além de comprometer o cumprimento dos contratos firmados. Além disso, a operação em velocidade reduzida pode gerar transtornos relevantes para as comunidades locais, sobretudo em áreas urbanas populosas onde a via férrea possui muitas passagens de nível. Nesses casos, a maior lentidão das locomotivas prolonga o tempo de fechamento das passagens, impactando diretamente o trânsito urbano, aumentando o tempo de deslocamento das pessoas e potencializando riscos à segurança.

Um fator agravante é o elevado tempo necessário para atender e reparar essas falhas, principalmente devido à dificuldade no processo de localização precisa da falha,

conforme ilustrado na Figura 3. Durante o atendimento, há circulação de locomotivas em ordem de avanço. Esse procedimento emergencial é utilizado para evitar uma parada total das locomotivas. No entanto, seu uso prolongado leva a atrasos significativos, aumento dos custos operacionais, redução da capacidade de transporte e maior risco de incidentes devido à dependência de comunicações manuais e à falta de automação. Como exemplo, podemos mencionar o caso da concessionária ferroviária MRS Logística S.A. que reportou cerca de 60 falhas por ano nos cabos metálicos, gerando cerca de 581 horas de atuação por ano das equipes de manutenção e 256 horas nos últimos quatro anos em trem hora parado (THP).



Figura 3. Equipe de manutenção trabalhando para encontrar falhas no cabo metálico multicondutor utilizado pelo sistema de controle de sinalização de vias ferroviárias.

O método de inspeção manual para a localização da falha, ou seja, manutenção corretiva, amplamente utilizado, vide ilustração na Figura 3, apresenta custos elevados, pois requer o deslocamento de equipes técnicas especializadas, resultando na interrupção parcial ou total dos serviços de transporte ferroviário para permitir o diagnóstico e reparo. Esse processo não é apenas lento, mas também incapaz de oferecer uma análise das condições físicas do restante dos cabos metálicos. Consequentemente, a localização das falhas e a implementação de correções são inadequadas para atender às demandas operacionais modernas das concessionárias ferroviárias.

Em síntese, os métodos atuais de monitoramento dos cabos metálicos e de inspeção manual para a localização de falhas não satisfazem os requisitos de eficiência, segurança e confiabilidade. A limitação desses métodos impacta não apenas a gestão operacional da concessionária, mas também a qualidade do serviço prestado aos usuários, a fiscalização exercida pelos órgãos reguladores e a segurança das comunidades localizadas ao longo da malha ferroviária. Um avanço tecnológico considerável para lidar com as limitações desses métodos, é a introdução de um sistema de monitoramento, em tempo real, das condições físicas dos cabos metálicos multicondutores com capacidade de detectar, classificar, localizar e prever degradações e falhas. A partir do uso desse sistema é possível prever a ocorrência de falhas, planejar manutenções preditivas e, consequentemente, reduzir as despesas para lidar com interrupções por falhas e assegurar a segurança das concessionárias ferroviárias.

Diante deste cenário, no segundo semestre de 2023, uma equipe de pesquisadores da UFJF, liderada pelo coordenador do Projeto MOCAB, fundamentado na modelagem matemática baseada na teoria de cabos multicondutores (PAUL, 2008; PASSERINI, 2019; VERSOLATTO, 2011), desenvolveu para a MRS Logística S. A. uma prova de conceito (*proof of concept* - POC) para analisar a viabilidade técnica do uso de sinais elétricos

para fins de caracterização da degradação dos cabos metálicos multicondutores. Noutras palavras, esta POC permite apenas verificar a viabilidade técnica do emprego de sinais elétricos para fins de monitoramento da degradação de cabos metálicos multicondutores. Portanto, a POC desenvolvida não contemplou o desenvolvimento de nenhum protótipo de uma solução de monitoramento, posto que antes de se propor uma solução de monitoramento baseada em sinais elétricos, faz-se necessário verificar a viabilidade técnica do uso destes sinais. O resultado da POC foi mostrar que existe sim viabilidade técnica para o uso de sinais elétricos para fins de monitoramento da degradação de cabos metálicos multicondutores utilizados pelos sistemas de controle da sinalização das vias ferroviárias.

A POC contemplou o desenvolvimento de três setups de medição para realização de experimentos laboratoriais e de campo, visando a comparação das características obtidas através de simulações computacionais e dos experimentos e, a seguir, a análise dessas características para fins de monitoramento da degradação de cabos metálicos multicondutores. Os setups de medição desenvolvidos são descritos abaixo:

- **Setup de medição 1:** concebido para a impedância característica de um cabo metálico multicondutor. É constituído de um equipamento LCR meter e um adaptador para conexão das terminações de um par de condutores. Uma ilustração do setup de medição 2 é mostrada na Figura 4.

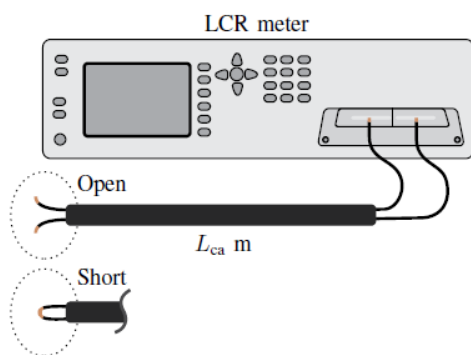


Figura 4. Setup de medição 1: medição da impedância característica.

- **Setup de medição 2:** concebido para medir os parâmetros de espalhamento e diafonia (crosstalk) entre os condutores de um cabo metálico multicondutor. Considera apenas o comprimento do cabo igual a 1 (um) metro. Contempla o uso de um equipamento LISN para minimizar a interferência eletromagnética da rede elétrica, o emprego de um analisador de rede vetorial (*vector network analyzer* - VNA) e um plano terra, sobre o qual o cabo metálico multicondutor é colocado para medição dos parâmetros de espalhamento, telediafonia e paradiafonia. Uma ilustração do setup de medição 1 é mostrada na Figura 5.

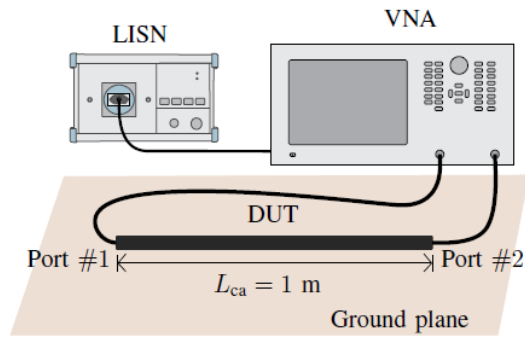


Figura 5. Setup de medição 2: medição dos parâmetros de espalhamento e diafonia (crosstalks).

- **Setup de medição 3:** concebido para medir a atenuação do sinal e ruído aditivo. É constituído de um circuito denominado SCU para permitir a transmissão e recepção de sinais elétricos (tensão e corrente) através de vários condutores. Além disso, faz uso de gerador de sinais e osciloscópios para armazenamento das formas de onda dos sinais elétricos. Uma ilustração do setup de medição 3 é mostrada na Figura 6.

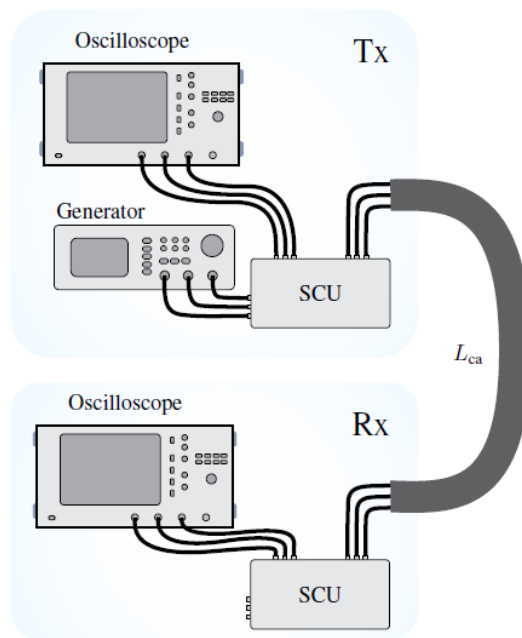


Figura 6. Setup de medição 3: medições dos sinais elétricos, da atenuação do sinal e do ruído aditivo.

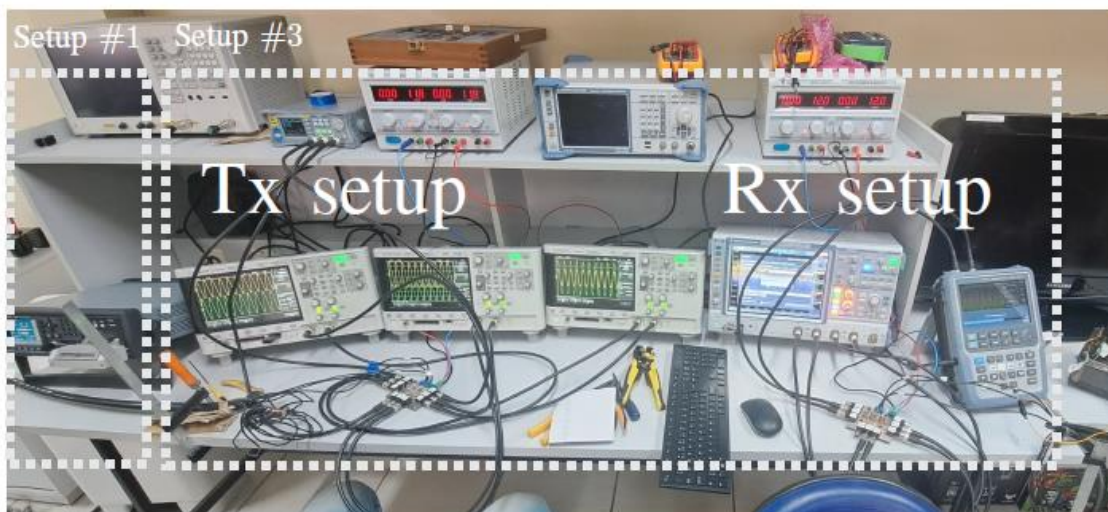


Figura 7. Setups de medição 1 e 3 desenvolvidos para a caracterização em laboratório e campo.

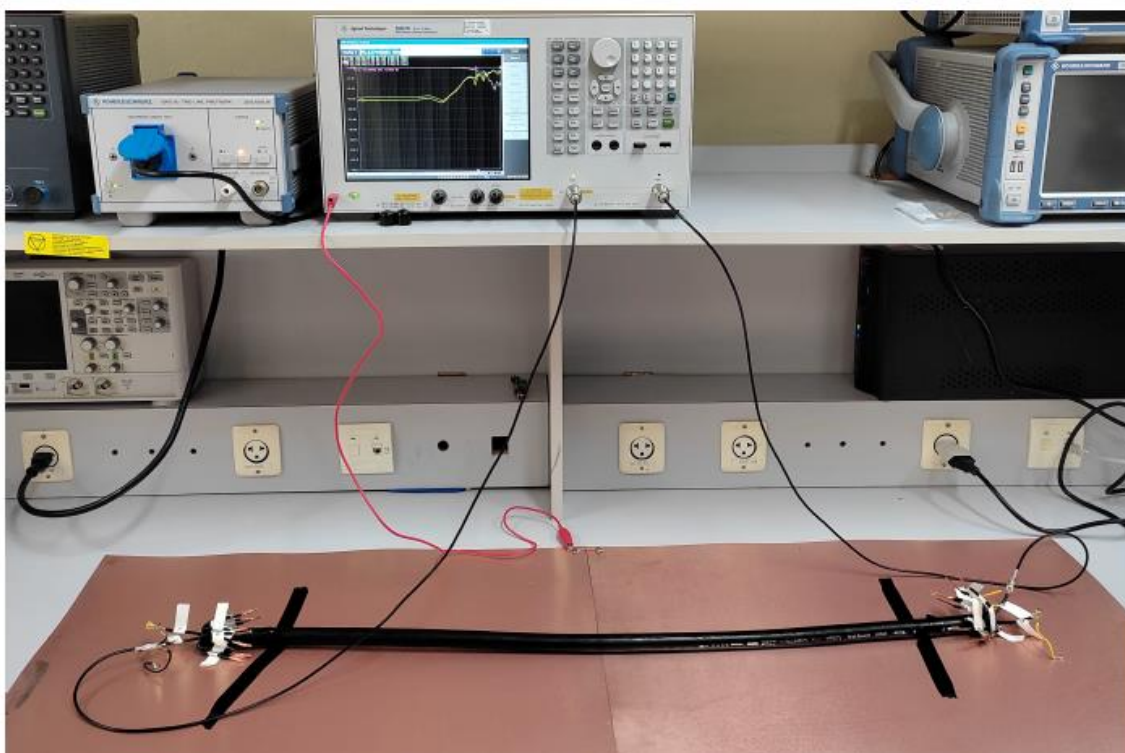


Figura 8. Setup de medição 1 desenvolvido para a caracterização em laboratório.

As Figuras 7 e 8 mostram os setups de medição descritos acima, ou seja, ilustra a POC desenvolvida para verificação da viabilidade técnica do monitoramento dos cabos metálicos multicondutores a partir de sinais elétricos. A partir dos experimentos conduzidos na POC, foram realizadas simulações computacionais e calculados parâmetros (características) relevantes para fins de detecção, classificação, localização e predição de degradação e falhas. Foram calculados parâmetros de espalhamento (S_{11} , S_{22} , S_{12} e S_{21}), telediafonia (*far-end crosstalk* - FEXT) e paradiafonia (*near-end crosstalk* - NEXT), impedância característica e propagação do sinal [LEE, 2007]. Essas comparações permitem verificar se os resultados obtidos com os experimentos estão de acordo com os

modelos teóricos e, a seguir, verificar se é possível utilizá-los para fins de monitoramento da degradação de cabos metálicos multicondutores, considerando a faixa de frequência entre 20 Hz e 2 MHz.

A Figura 9 mostra os valores da impedância característica obtidos com a simulação computacional e nas campanhas de medição no laboratório e no campo, quando o setup de medição 1 é utilizado e o comprimento do cabo é de 1 km. Conforme pode ser mostrado, as magnitudes da impedância característica obtidas através da simulação (Sim.) e da campanha de medição no laboratório (Lab. Meas.) e no campo (Field Meas.) não convergem quando a frequência é inferior a 1 kHz. Por outro lado, para valores superiores a 1 kHz, há uma convergência entre as simulações e as medições. No que tange a fase, os resultados obtidos com as simulações numéricas e campanha de medição informam que a impedância característica é capacitiva até 100 kHz. A partir de 100 kHz, a impedância característica é resistiva. Nos resultados obtidos no campo, observa-se que a impedância característica passa a ser indutiva à medida que a frequência aumenta, devido à conexão com outros cabos metálicos nos enlaces adjacentes e a presença dos relés.

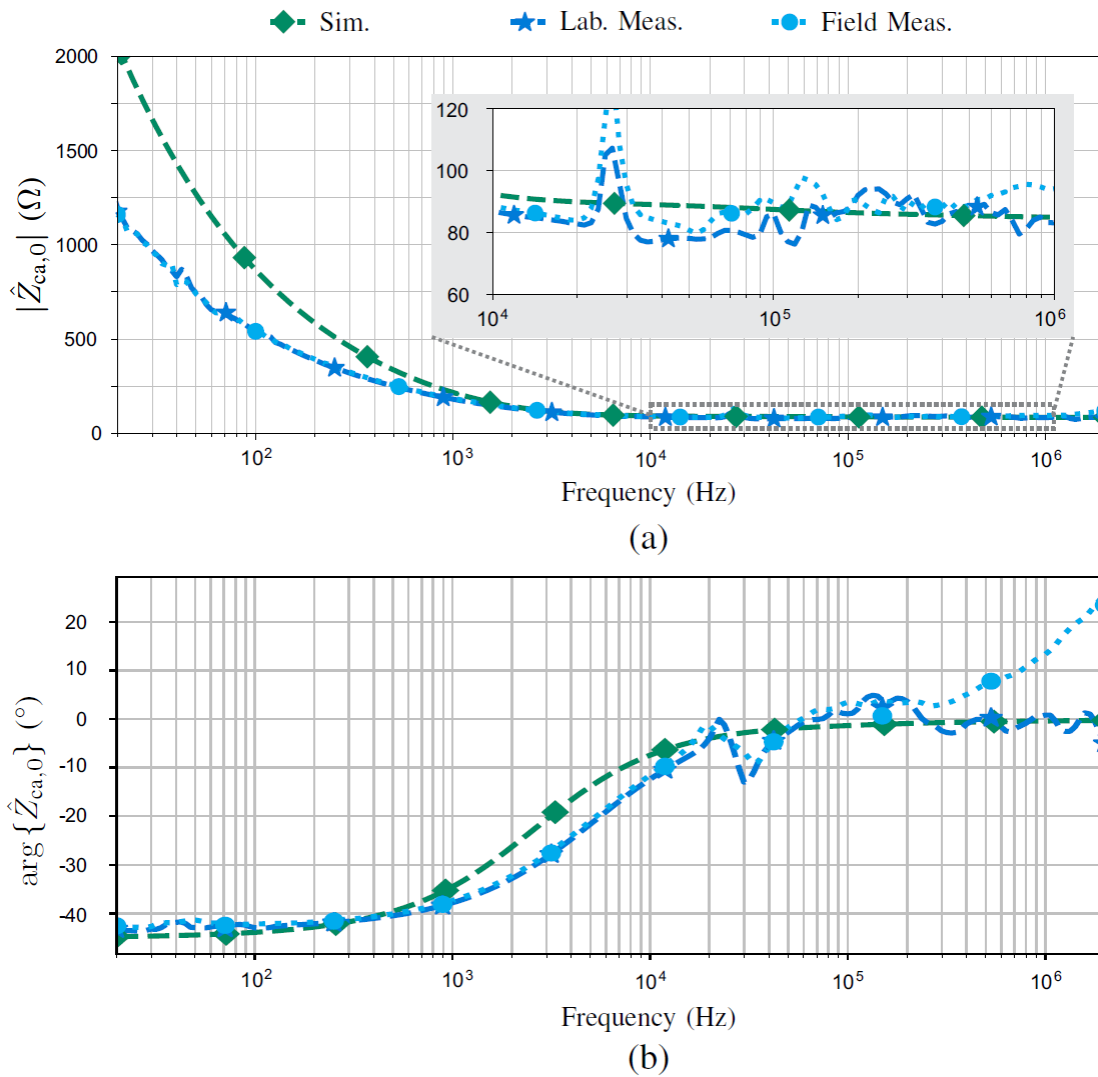


Figura 9. Magnitude e fase da impedância característica obtida a partir das simulações numéricas e nas campanhas de medição no laboratório e no campo.

Ainda para um comprimento do cabo igual a 1 (um) metro, as Figuras 10 e 11 apresentam uma comparação entre os resultados obtidos através de simulações numéricas e obtidos em laboratório com o setup de medição 2. Conforme pode ser observado, existe apenas uma diferença, que não é significativa, entre os parâmetros de espalhamento S_{11} e S_{22} obtidos numericamente e através de medição. Em relação aos parâmetros S_{12} e S_{21} , existe uma diferença insignificante. Finalmente, os resultados obtidos através de simulações computacionais e de uma campanha de medição resultam em valores praticamente iguais das magnitudes da paradiafonia e telediafonia. Note que essa convergência desaparece à medida que a frequência diminui, posto que o ruído do instrumento de medição apresenta maior valor do que as diafonias, as quais reduzem à medida que a frequência diminui.

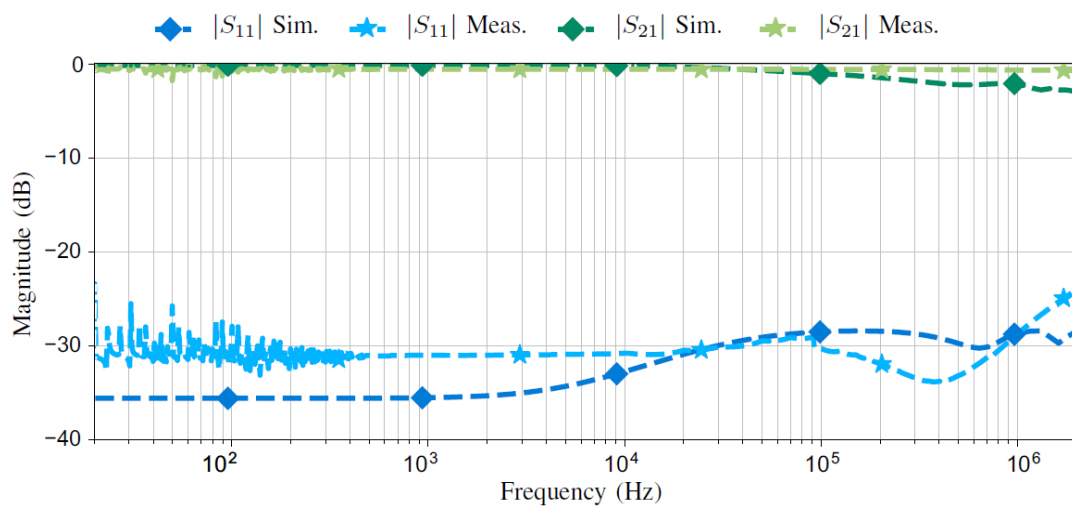


Figura 10. Simulação numérica e valores das medições das magnitudes dos parâmetros de espalhamento.

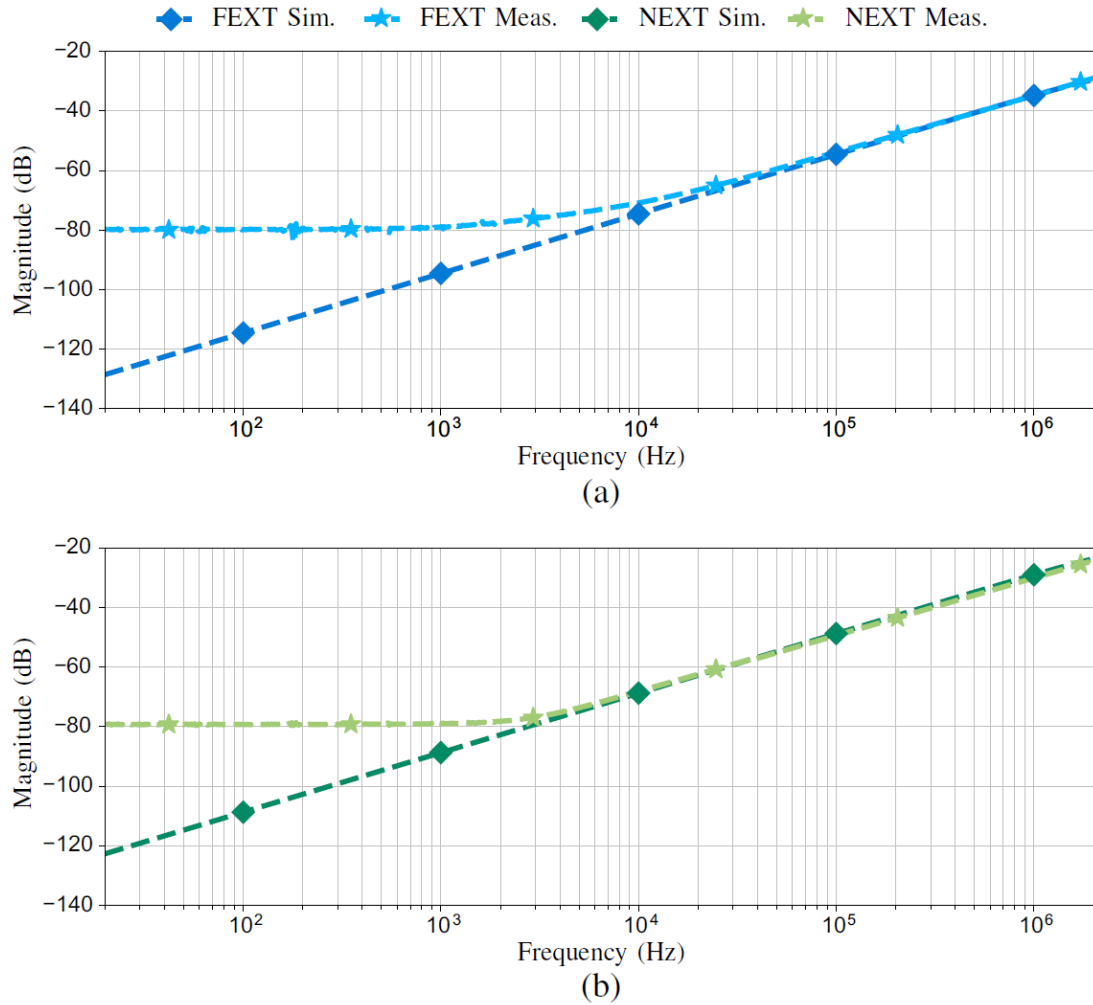


Figura 11. Simulação numérica e valores das medições das magnitudes das diafonias: (a) telediafonia (FEXT) e (b) paradiafonia (NEXT).

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados obtidos quando o cabo tem comprimento igual a 1 km e o setup de medição 3 é utilizado para realizar campanhas de medição no laboratório e no campo. Os resultados de atenuação obtidos através de simulações numéricas e campanhas de medição na Figura 12 mostram uma excelente concordância entre os resultados obtidos através de simulações computacionais e campanhas de medição. Existe apenas uma discrepância entre os resultados obtidos com as simulações computacionais e campanha de medição nas frequências inferiores a 1 kHz, devido ao uso de um filtro passa-alta para bloquear o sinal DC no setup de medição 3. Finalmente, a densidade espectral de potência ilustrada na Figura 13 mostra que é possível transmitir sinais através dos cabos metálicos multicondutores com baixa potência de transmissão e obter uma elevada relação sinal-ruído.

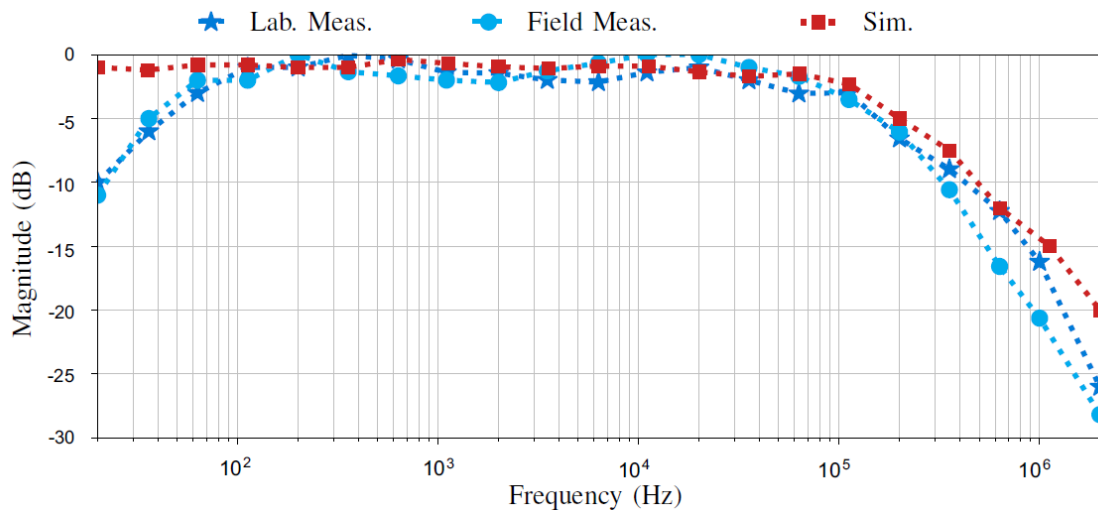


Figura 12. Atenuação de um cabo de 1km: resultados obtidos com as simulações numéricas e campanhas de medições no laboratório e no campo.

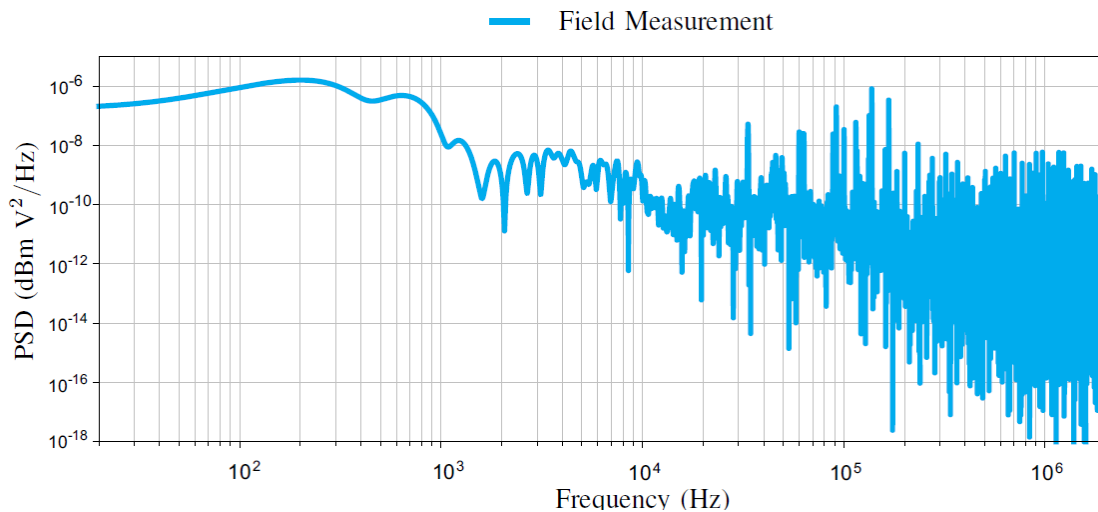


Figura 13. Densidade espectral de potência do ruído aditivo medido no campo.

Os resultados obtidos através das simulações numéricas a partir dos modelos teóricos e experimentos mostram que é possível monitorar a degradação dos cabos metálicos multicondutores a partir da análise dos parâmetros de espalhamento, resposta em frequência da diafonia e da impedância característica, os quais são obtidos a partir da injeção e extração de sinais elétricos nas extremidades desses cabos. Noutras palavras, a POC de caracterização de cabos metálicos confirmou a viabilidade técnica através do uso de sinais elétricos para monitorar a degradação de cabos metálicos multicondutores empregados nos sistemas de controle da sinalização das vias ferroviárias, a partir da análise dos sinais elétricos injetados e extraídos nas extremidades desses cabos. Noutras palavras, o desenvolvimento da POC para caracterização dos cabos metálicos multicondutores, empregados nos sistemas de controle de sinalização de vias ferroviárias, foi importante para verificar se haveria viabilidade técnica para desenvolvimento de uma solução de monitoramento desses cabos, a partir da análise de sinais elétricos. Assim sendo, a POC não resultou em nenhum protótipo da solução de monitoramento cabos metálicos multicondutores, empregados nos sistemas de controle de sinalização de vias ferroviárias, mas sim num parecer técnico favorável ao desenvolvimento de um projeto de

P&D.

A constatação da viabilidade técnica através da POC subsidiou a tomada de decisão para desenvolver a solução MOCAB, a qual compreende várias ações, dentre as quais destacam-se: conceber, especificar e construir setup para gerar banco de dados de assinaturas e realizar testes laboratoriais; conceber, especificar e prototipar hardware e firmware de equipamentos; conceber, especificar, desenvolver algoritmos de processamento de sinais e inteligências computacional e artificial para análise automática das assinaturas coletadas; conceber, especificar e desenvolver software dos equipamentos e de interfaceamento que permite a fácil integração com sistemas legados existentes; conceber, especificar e realizar testes laboratoriais, de integração e de campo (de prova e na linha ferroviária da MRS S.A.).

Conforme pode ser observado nas Figuras 7 e 8, a caracterização dos cabos metálicos multicondutores, através da POC, demandou o emprego de vários equipamentos (p.ex., geradores de sinais, osciloscópios, analisador vetorial de rede, LISN, analisador LCR, fontes de tensão, laptop para coleta de dados, dentre outros) e o desenvolvimento de placas de interfaceamento entre esses equipamentos e os cabos multicondutores. Note que os setup de medição ilustrados nas Figuras 7 e 8 não apresentam viabilidade técnica e econômica para uso em campo, posto que os equipamentos utilizados custam mais do que R\$ 600.000,00, foram projetados para uso em laboratório e contemplam um volume considerável. Assim sendo, faz-se necessário desenvolver um hardware de baixo custo, de pequenas dimensões, de fácil instalação nos armários do sistema de sinalização ferroviário, de fácil integração com sistemas legados e permita a injeção e extração de sinais elétricos com conteúdo espectral adequado para caracterizar as degradações nos cabos metálicos multicondutores. Esse hardware tem que ser de baixo custo, posto que será instalado nos armários do sistema de sinalização ferroviária, os quais distam até 3 km de distância uns dos outros. Além disso, o desenvolvimento dos modelos matemáticos, a partir do banco de dados, para fins de detecção, classificação, localização e predição é relevante e necessário para automatizar de forma inteligente a tomada de decisões.

Nesse contexto, o desenvolvimento da solução MOCAB para monitorar em tempo real as condições dos cabos metálicos multicondutores possibilita que a equipe de manutenção detecte degradações e falhas e realize intervenções preditivas, evitando interrupções não planejadas nas vias ferroviárias. A solução MOCAB é composta pelos sensores MOCAB e pelo Analisador MOCAB. Os sensores MOCAB são instalados nos armários de controle de sinalização, dispostos ao longo das linhas ferroviárias para injeção e extração de sinais elétricos. Já o Analisador MOCAB, instalado no Centro de Controle de Operações (CCO), utilizará os dados coletados pelos Sensores MOCAB para detectar, classificar, localizar e prever falhas nos cabos metálicos de controle de sinalização que conectam os dispositivos instalados nos armários de controle de sinalização ao longo da linha ferroviária.

A solução MOCAB promove uma mudança de paradigma no que tange a manutenção dos sistemas de controle de sinalização ao introduzir o monitoramento contínuo dos cabos metálicos multicondutores, viabilizando a adoção efetiva da manutenção preditiva. Por meio do monitoramento inteligente, será possível identificar precocemente padrões de degradação que indiquem a necessidade de manutenção, viabilizando estratégias mais proativas e, conseqüentemente, que aumentem a eficiência operacional da malha ferroviária. Essa inovação possibilita uma série de benefícios, aplicáveis tanto a concessionária e aos usuários dos serviços de transporte ferroviário quanto a ANTT e a sociedade de um modo geral, tais como:

- Redução de custos e mitigação de interrupções não programadas, atendendo a requisitos operacionais e de segurança exigidos na gestão do sistema de sinalização

ferroviária.

- Serviços mais confiáveis, com menor risco de atrasos e interrupções, contribuindo para a melhoria da previsibilidade e da competitividade nas operações logísticas.
- Maior controle e fiscalização sobre a infraestrutura ferroviária, garantindo o cumprimento de padrões de segurança e confiabilidade.
- Menos impactos no trânsito urbano local e maior segurança, uma vez que a operação mais eficiente das vias contribui para reduzir o tempo de fechamento das passagens de nível, minimizando os transtornos nas cidades por onde a ferrovia passa.

Portanto, observa-se que a implementação bem-sucedida da solução MOCAB trará benefícios estratégicos com a melhoria do sistema de controle de sinalização, contribuindo para a redução do THP e evitando que locomotivas e vagões fiquem parados ou se desloquem lentamente em áreas urbanas. Além disso, a maior eficiência das concessionárias ferroviárias contribuirá para o aumento do volume de carga ou número de pessoas transportadas, gerando maior arrecadação de impostos e impulsionando o desenvolvimento e infraestrutura do país.

O desenvolvimento da solução MOCAB também se justifica por, conforme apontado na Seção 1.1.1, estar em conformidade com a Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, especialmente com a diretriz estabelecida no inciso I do Art. 3º, “modernização da infraestrutura integrante do Subsistema Ferroviário Federal”. Isso ocorre porque a solução MOCAB propõe a introdução de novos dispositivos físicos, como os sensores MOCAB, que serão essenciais no sistema de monitoramento dos cabos multicondutores. Além disso, o desenvolvimento da solução MOCAB está alinhado com a diretriz descrita no inciso II do Art. 3º, “melhoria da qualidade dos serviços objeto de concessão ferroviária federal, inclusive relacionada aos atributos de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas”. Isso se dá porque a solução MOCAB, ao monitorar continuamente os cabos metálicos multicondutores, permitirá a manutenção preditiva, contribuindo para a eficiência e segurança dos serviços prestados pelas concessionárias ferroviárias ao reduzir interrupções não planejadas. De forma secundária, pode-se dizer que a solução MOCAB também se alinha com a diretriz descrita no inciso IV do Art. 3º, “desenvolvimento de novos centros de pesquisas tecnológicos na área ferroviária” uma vez que a realização do projeto irá fomentar o desenvolvimento do grupo de pesquisa focado em instrumentação para setor ferroviário na UFJF.

Ainda tomando a Resolução nº 6.021, de 20 de julho de 2023, como referência, o desenvolvimento do presente projeto se alinha ao inciso III do Art. 4º, “soluções técnicas para problemas específicos”, uma vez que a solução final, entregue pela solução MOCAB, visa solucionar os problemas relacionadas aos cabos de sinalização. De igual modo, o desenvolvimento da solução MOCAB se alinha ao inciso IV do Art. 4º, “soluções de acompanhamento e monitoramento de atividades ferroviárias em tempo real, bem como de aprimoramento da fiscalização pública”. Isso ocorre porque a solução proposta impacta diretamente no monitoramento dos cabos metálicos multicondutores usados nos sistemas de controle de sinalização de vias ferroviárias em tempo real. De uma forma geral, o principal resultado esperado com a utilização da solução MOCAB é uma mudança no paradigma vigente e utilizado para monitorar e manter a infraestrutura utilizada pelos sistemas de sinalização de vias ferroviárias. Em vez de depender de um monitoramento custoso de cabos metálicos a cada cinco anos e torcer para que nesse período não ocorra nenhuma falha, a solução MOCAB permitirá que o monitoramento dos cabos metálicos multicondutores ocorra continuamente, ou seja, em tempo real. O projeto ainda apresenta

aderência com três Temas Prioritários para a destinação dos Recursos para Desenvolvimento Tecnológico identificados no Anexo I da Deliberação nº 169 da Diretoria Colegiada da ANTT.

É importante mencionar que o desenvolvimento proposto pela solução MOCAB não está incluído nas obrigações contratuais da operadora ferroviária no que tange a concessão, pois se trata de pesquisa e desenvolvimento. Embora essa proposta resulte num sistema de monitoramento inteligente da integridade dos cabos de sinalização que deve ser testado e validado em ambientes reais de operação, trata-se de um projeto de pesquisa e desenvolvimento e, conseqüentemente, não faz parte dos requisitos de concessão da operadora ferroviária. Além disso, como ocorre em outros projetos de pesquisa e inovação, há riscos inerentes ao seu desenvolvimento que não poderiam ser contemplados em obrigações contratuais.

Por fim, ressalta-se que o desenvolvimento da solução MOCAB é baseado na combinação diversificada de experiências e áreas de conhecimento relacionados com o desenvolvimento de produtos eletroeletrônicos que também demandam conectividade e inteligência artificial (engenharia elétrica, engenharia eletrônica e engenharia de telecomunicações). Por isso, é fundamental que os membros da equipe participem de eventos especializados, como congressos, simpósios, feiras e outros, tanto para divulgar os avanços do projeto por meio da apresentação de artigos científicos e tecnológicos, quanto para estabelecer conexões com outros grupos de pesquisa com experiências complementares, favorecendo a troca e a absorção de novos conhecimentos.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Visando descrever detalhadamente o desenvolvimento da solução MOCAB, a Seção 3.1 apresenta os métodos e técnicas utilizadas, enquanto a Seção 3.2 apresenta as etapas.

3.1. Métodos e técnicas utilizadas

Nesta seção, apresentam-se os métodos e técnicas que serão utilizados no desenvolvimento da solução MOCAB. Além disso, discute-se a integração de métodos e técnicas avançadas de instrumentação, modelagem matemática, processamento de sinais e IA para resultar numa solução de monitoramento inteligente que seja eficaz para minimizar os problemas decorrentes da degradação dos cabos metálicos multicondutores utilizados nos sistemas de controle de sinalização de vias ferroviárias.

A estratégia metodológica adota uma abordagem multidisciplinar, que se inicia com a modelagem dos cabos metálicos multicondutores saudáveis e submetidos, em laboratório, a diferentes tipos de degradações e níveis de severidade. As alterações nas características elétricas dos cabos metálicos multicondutores (p.ex., resistência, reatância, parâmetros de espalhamento, paradiáfonia, telediafonia, impedância característica e reflexão de sinais) serão obtidas para constituir um banco de dados de assinaturas de cabos saudáveis e com degradações e falhas. Após a validação da suficiência estatística do banco de dados, constituídos a partir das campanhas de medições nos experimentos, será possível selecionar um conjunto reduzido de características, de natureza elétrica, para o desenvolvimento de técnica de detecção, classificação, localização e predição de degradação e falhas.

O sensor MOCAB desempenha um papel central na injeção e extração de sinais elétricos e, a seguir, no processamento desses sinais para extração de um conjunto reduzido de características elétricas. Por outro lado, o Analisador MOCAB, utilizando técnicas de IA distintas, interpreta as características elétricas obtidas para monitorar a degradação nos cabos metálicos multicondutores e, consequentemente, detectar, classificar, localizar e prever a ocorrência de falhas. Essas técnicas são aplicadas de forma integrada para garantir elevada precisão na identificação de degradações nos cabos metálicos multicondutores.

Modelagem matemática dos cabos metálicos multicondutores

A modelagem matemática dos cabos metálicos multicondutores é fundamental para o desenvolvimento da solução MOCAB, posto que estabelece a base para a análise das características elétricas e a identificação de assinaturas associadas aos cabos metálicos multicondutores saudáveis e sob diferentes tipos de degradações. Os cabos utilizados nos sistemas de controle de sinalização de vias ferroviárias podem ser representados como sistemas de transmissão multicondutores (PASSERINI, 2017), caracterizados por parâmetros elétricos distribuídos, conforme ilustrado na Figura 14.

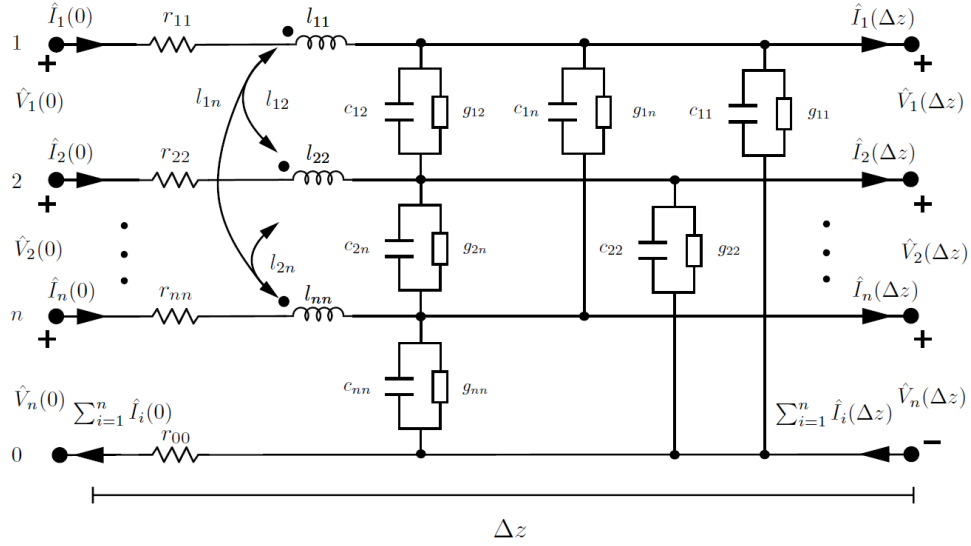


Figura 14. Modelagem baseada em teoria de linhas de transmissão para cabos metálicos constituído de n condutores para um segmento de tamanho Δz .

A concatenação de segmentos de comprimento Δz permite modelar matematicamente o comportamento dos cabos metálicos multicondutores para qualquer que seja a distância múltipla de Δz . Baseando-se nesta modelagem, é possível obter numericamente diversas características elétricas (p.ex., parâmetros de espalhamento, paradiafonia, telediafonia, impedância característica) a partir da correta medição dos valores das resistências, indutâncias, capacitâncias e condutâncias. Além disso, permite aplicar a reflectometria no domínio do tempo (FORNÁS, 2023).

A partir das matrizes de resistência, indutância, capacitância e condutância dadas por

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{00} + r_{11} & r_{00} & \dots & r_{00} \\ r_{00} & r_{00} + r_{22} & \dots & r_{00} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{00} & r_{00} & \vdots & r_{00} + r_{nn} \end{bmatrix} \Omega/\text{m},$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ l_{12} & l_{22} & \dots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{1n} & l_{2n} & \dots & l_{nn} \end{bmatrix} \text{H}/\text{m},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n c_{1k} & -c_{12} & \dots & -c_{1n} \\ -c_{12} & \sum_{k=1}^n c_{2k} & \dots & -c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{1n} & -c_{2n} & \dots & \sum_{k=1}^n c_{nk} \end{bmatrix} \text{F}/\text{m}.$$

e

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n g_{1k} & -g_{12} & \cdots & -g_{1n} \\ -g_{12} & \sum_{k=1}^n g_{2k} & \cdots & -g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{1n} & -g_{2n} & \cdots & \sum_{k=1}^n g_{nk} \end{bmatrix} \text{ S/m.}$$

e das tensões e correntes nas extremidades do segmento de comprimento Δz , é possível modelar matematicamente a propagação dos sinais elétricos e realizar diversas simulações numéricas para obter os parâmetros de espalhamento, paradiáfonia, telediafonia e impedância característica quando a frequência varia, por exemplo, entre 0 e 1 MHz.

Quando há degradação no cabo metálico multicondutor, ocorrem alterações nas matrizes de resistência, capacitância, indutância e condutância. Como exemplo, podemos citar as seguintes alterações:

- Aumento da resistência do condutor causado por corrosão ou redução da seção transversal do condutor;
- Variação da capacitância devido a mudanças no dielétrico ou danos físicos;
- Alteração da indutância por deformações mecânicas ou mudanças na disposição dos condutores;
- Aumento da condutância causado pela deterioração do material dielétrico entre os condutores.

Essas alterações afetam a propagação de sinais elétricos ao longo dos cabos metálicos multicondutores, modificando seu comportamento e gerando assinaturas únicas que podem ser usadas para identificar a natureza das degradações e falhas. A modelagem também considera fatores externos, como a interação dos cabos com o solo e as condições ambientais, criando uma representação precisa do comportamento dos cabos em operação.

No desenvolvimento da solução MOCAB, a modelagem matemática será validada por meio da comparação das simulações numéricas com resultados experimentais obtidos em laboratório. Para tanto, segmentos de 1 (um) metro dos cabos metálicos multicondutores serão submetidos a processos de degradação e falhas de forma artificial. Considerando cada tipo e nível de degradação e falhas implementados, os equipamentos analisador vetorial de rede e medidor LCR serão utilizados para obter as matrizes \mathbf{R} , \mathbf{L} , \mathbf{C} e \mathbf{G} , parâmetros de espalhamento, paradiáfonia, telediafonia e impedância característica de todos os condutores, em uma faixa de frequência entre 20 Hz e 2 MHz. Para tanto, os setups de medição 1 e 2, ilustrados nas Figuras 4 e 5, e setup de medição (a ser desenvolvido neste projeto de P&D) serão utilizados para caracterização dos cabos metálicos constituídos por até 54 condutores. Além disso, até 100 (cem) segmentos de cabos metálicos multicondutores saudáveis de um metro de comprimento serão caracterizados. A seguir, até 200 (duzentos) segmentos de cabos metálicos multicondutores de um metro de comprimento e com diferentes níveis e tipos de degradação serão caracterizados para constituição do banco de dados. Essa caracterização contemplará o uso do laboratório e do Setup de medição.

Alimentando o modelo matemático com as informações coletadas a partir dos testes experimentais, é possível gerar modelos matemáticos para as assinaturas das degradações e falhas contemplando diferentes comprimentos de cabos e, conseqüentemente, gerar banco de dados representativo. Finalmente, o banco de dados com as assinaturas de degradações e falhas, constituído a partir da modelagem matemática combinada com medições laboratoriais, será utilizado no treinamento das técnicas de inteligência artificial para fins de detecção, classificação, localização e predição.

Testes Experimentais em campo

Para que o desenvolvimento da solução MOCAB gere resultados adequados para aplicações práticas, é necessário que ele seja submetido às condições encontradas na malha ferroviária durante a fase de desenvolvimento. Como a utilização frequente da malha ferroviária é custosa e trabalhosa, se faz necessária a construção de um setup de campo para testes experimentais controlados, o qual é uma réplica de dois enlaces de comunicações consecutivos do sistema de controle de sinalização de vias ferroviárias, totalizando 2 km de distância. Cada enlace tem a distância de 1 km e nas suas extremidades são instalados armários com a instrumentação de sinalização. Este setup de campo será utilizado na realização de testes de campo controlados. A Figura 15 ilustra o setup de campo que será construído para testes experimentais de campo controlados.

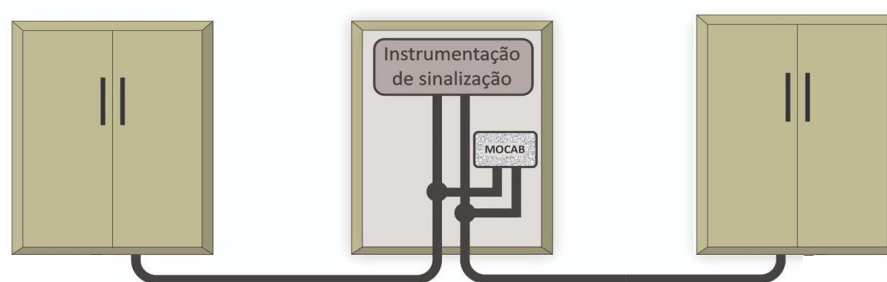


Figura 15. Ilustração do setup de campo a ser construído para a realização de testes experimentais de campo controlados.

Deteção, classificação, localização e predição

Para o problema de detecção, classificação, localização e predição serão utilizadas técnicas para extração e seleção de um conjunto reduzido e representativo de características. A seguir, técnicas clássicas e atuais (teoria de Bayes, classificadores robustos de baixa complexidade, regressão logística, *support vector machine* (SVM), redes neurais recorrentes, redes neurais convolucionais e modelos de aprendizagem profundos, dentre outros) (KOUTROUMBAS, 2013) serão analisados para detectar, classificar e prever a degradação e falhas nos cabos metálicos multicondutores. No que tange a predição, também será analisado o emprego de modelos *autoregressive integrated moving average* (ARIMA) para capturar a dinâmica temporal das características e, consequentemente, facilitar o processo de predição.

Note que comparar classificadores de baixa complexidade, como regressão logística e SVM, com redes neurais avançadas, como *recurrent neural network* (RNN), *long short-term memory* (LSTM) e *convolutional neural network* (CNN) e modelos de aprendizado profundo (LI, 2021), é essencial para abordar problemas de detecção, classificação e predição de degradação em cabos metálicos multicondutores, considerando a natureza do problema, a complexidade dos dados e o custo computacional. Na detecção, é preciso identificar anomalias, o que pode variar de padrões simples a complexos. Para a classificação, distinguir tipos de degradação pode exigir soluções que vão de modelos lineares a métodos para dados não lineares. Na predição, padrões históricos e dependências temporais tornam-se fundamentais. Esses aspectos determinam a adequação do classificador ao problema.

Dados simples e bem separados favorecem modelos como regressão logística, devido à sua rapidez e simplicidade. Já dados não lineares ou de alta dimensionalidade, como sinais multivariados ou imagens, requerem modelos mais robustos, como SVMs ou CNNs. Para séries temporais ou sinais com dependências temporais, RNNs ou LSTMs são mais eficazes. A escolha do modelo deve equilibrar precisão, robustez, custo computacional, generalização e interpretação. Modelos simples são rápidos e interpretáveis, enquanto redes neurais profundas oferecem maior desempenho para dados complexos, mas demandam mais recursos e dados. Ao alinhar essas características às tarefas específicas, como detecção de falhas, classificação de degradação ou previsão de comportamento, é possível obter técnicas adequadas para os problemas supracitados.

Finalmente, no que tange a localização da degradação e falhas, as técnicas de reflectometria temporal serão aplicadas. Serão analisadas técnicas baseadas em IA. Para isso, modelos de aprendizado de máquina podem ser usados para detectar padrões nos sinais e mapear características específicas para localizar falhas. Ao invés de medir reflexões, a IA pode ser usada para dividir o cabo em segmentos virtuais e utilizar um modelo preditivo para identificar a localização provável de uma falha em um segmento, com base nos padrões aprendidos. Isso é feito a partir de medições contínuas e da análise dos sinais elétricos. A principal vantagem dessa abordagem é a redução da dependência de equipamentos específicos de reflectometria, além da capacidade de adaptar-se a diferentes tipos de cabos e cenários operacionais. Embora a aplicação de IA seja promissora, existem desafios, como a necessidade de conjuntos de dados representativos para treinamento e a validação dos modelos em condições reais. No entanto, com dados bem estruturados e um modelo devidamente treinado, é possível implementar um sistema robusto, flexível e eficiente para localizar falhas e prever a degradação em cabos metálicos, substituindo métodos tradicionais de reflectometria.

Solução MOCAB

A solução MOCAB é constituída por Sensores MOCAB e Analisador MOCAB os quais se comunicam entre si, através de uma rede de dados, conforme ilustrado na Figura 16. O Sensor MOCAB é projetado para monitorar até 18 condutores simultaneamente e pode ser conectado, em paralelo, com até outros dois sensores MOCAB para monitorar até 54 condutores simultaneamente, conforme ilustrado na Figura 17. A solução MOCAB é escalável e, portanto, capaz de monitorar até $N-1$ segmentos da malha ferroviária, a partir do uso de N sensores MOCAB. Baseando-se numa abordagem integradora, a solução MOCAB promove a inovação para o monitoramento de cabos metálicos multicondutores usados nos sistemas de controle de sinalização das vias ferroviárias.

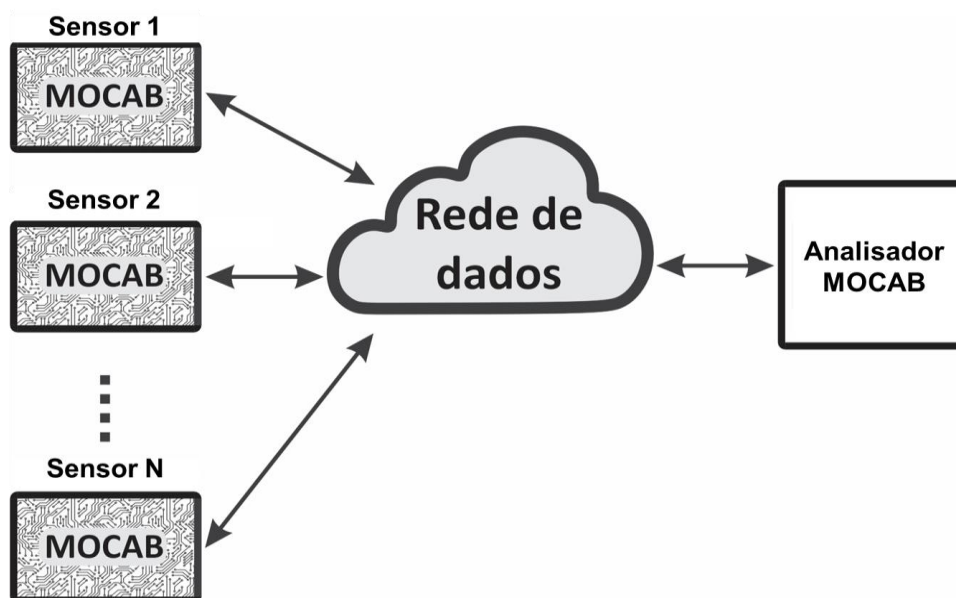


Figura 16. Ilustração da solução MOCAB.

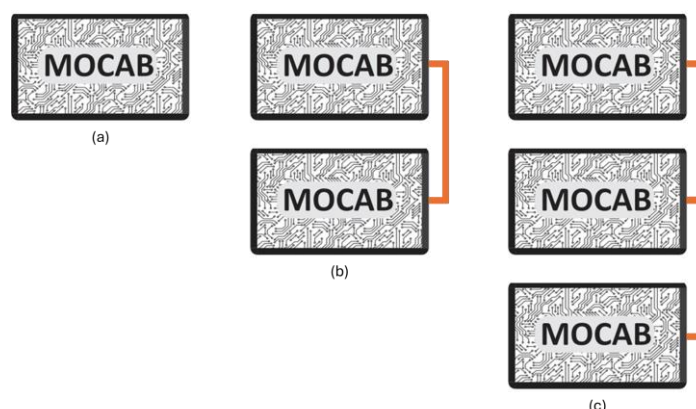


Figura 17. Configurações do Sensor MOCAB para o monitoramento simultâneo de condutores: a) até 18 condutores; b) até 36 condutores e c) até 54 condutores.

Sensor MOCAB

Na solução MOCAB, o sensor MOCAB é um dispositivo capaz de injetar e extrair sinais elétricos dos cabos metálicos multicondutores para fins de detecção, classificação, localização e predição de degradação e falhas. O sensor MOCAB opera numa faixa de frequência de interesse pré-determinada, nas condições estabelecidas durante a etapa de constituição do banco de dados de assinaturas. Tal fato permite que o sensor colete assinaturas elétricas em tempo real, diretamente no campo, sem interferir nas operações do sistema de controle de sinalização das vias ferroviárias. Com uma arquitetura modular, o sensor MOCAB combina funcionalidades avançadas de hardware e firmware para atender às condições do ambiente ferroviário. O sensor MOCAB é composto por múltiplos módulos integrados que desempenham funções específicas, incluindo:

- Condicionamento de sinais: módulos que condicionam os sinais elétricos para transmissão e recepção através dos cabos metálicos multicondutores e enriquecem os sinais elétricos recebidos, eliminando ruídos e interferências indesejadas;
- Injeção e extração de sinais: módulos de processamento de sinais que permitem a

aplicação controlada de sinais elétricos nos cabos e a coleta das respostas associadas, essenciais para a análise da impedância (resistência e reatância) e das assinaturas características dos cabos;

- Conversão analógica-digital e digital-analógica: circuitos que convertem os sinais analógicos para processamento digital e vice-versa, garantindo a precisão e integridade dos dados;
- Comunicação via RJ-45: interface de rede para integração com sistemas de comunicações, permitindo a troca de mensagens com o Analisador MOCAB ou outros sistemas de controle;
- Comunicação paralela: interface de comunicação para que até três sensores MOCAB possam funcionar simultaneamente e em paralelo na injeção e coleta de sinais elétricos através de até 54 condutores.

O Sensor MOCAB será projetado para operar com diferentes tipos de cabos de sinalização ferroviária, suportando cabos com 12, 15, 25 e até 50 condutores, dependendo do número de sensores MOCAB que são conectados em paralelo. Para garantir sua robustez e confiabilidade, o Sensor MOCAB será desenvolvido considerando os seguintes aspectos:

- Resistência ambiental: proteção contra vibrações, intempéries e altas temperaturas, comuns em ambientes ferroviários;
- Compatibilidade eletromagnética: testado para evitar interferências nos sistemas de sinalização ferroviária;
- Escalabilidade: suporte para expansão de canais de medição, com configurações que monitoram até 54 condutores.

As assinaturas coletadas pelos sensores MOCAB serão comparadas a padrões previamente definidos, permitindo a detecção precoce de anomalias. Essas assinaturas serão então processadas e enviadas para o Analisador MOCAB, que realizará a classificação e a predição de falhas com base nos dados recebidos.

Analisador MOCAB

O Analisador MOCAB é o núcleo de inteligência da solução MOCAB, posto que é o componente responsável por processar os dados coletados pelos sensores MOCAB, detectar e classificar padrões característicos de degradação e prever falhas nos cabos metálicos multicondutores. Combinando técnicas avançadas de processamento de sinais, IA, processamento estocástico de sinais, o Analisador MOCAB transforma os dados coletados em informações linguísticas para a tomada de decisão da equipe de manutenção.

O Analisador MOCAB é composto por algoritmos de extração de características, detecção e classificação de assinaturas, que permitem identificar variações nos parâmetros elétricos dos cabos metálicos multicondutores monitorados. Essas assinaturas refletem o estado físico dos cabos metálicos multicondutores, permitindo identificar anomalias que indiquem corrosão, ruptura de condutores ou falhas no isolamento. Além disso, aplica IA e reflectometria para localizar o local da falha. O Analisador MOCAB integra diferentes técnicas numa única plataforma para oferecer as seguintes funcionalidades:

- Extração de assinaturas elétricas: identificação de padrões específicos nos dados coletados pelos sensores;
- Classificação de anomalias: uso de algoritmos baseados em aprendizado de máquina para detectar e categorizar diferentes tipos de falhas;
- Predição de falhas: aplicação de processamento estocástico de sinais e de técnicas de IA para estimar a dinâmica da degradação dos cabos metálicos multicondutores;
- Localização das degradações e falhas: aplicação de IA e reflectometria para

informar o segmento do cabo metálico multicondutores com degradação ou falha.

O Analisador MOCAB é escalável e concebido para operar em tempo real nas nuvens ou no Centro de Controle Operacional (CCO). Ele irá integrar os dados recebidos dos Sensores MOCAB, correlacioná-los com assinaturas pré-estabelecidas e fornecer diagnósticos precisos e previsões de falhas iminentes. A interface com o usuário do Analisador MOCAB será desenvolvida para facilitar a visualização dos resultados e a emissão de relatórios, permitindo que a operadora ferroviária tenha acesso em tempo real às condições de operação dos cabos metálicos multicondutores do sistema de controle de sinalização das vias ferroviárias.

Apesar de não ser o objetivo do presente projeto de P&D, a solução MOCAB também pode ser utilizada para verificar a qualidade dos cabos metálicos multicondutores entregues pelos fornecedores. Essa funcionalidade pode ser implementada a partir de um treinamento dos algoritmos do Analisador MOCAB para executar essa tarefa. Além disso, a solução MOCAB também pode ser utilizada para as seguintes tarefas:

- 1) identificar degradações nos dispositivos existentes nos armários e utilizados nos sistemas de controle de sinalização das vias ferroviárias, tais como relé, baterias e fontes.
- 2) identificar a presença de composições ferroviárias no segmento da malha ferroviária monitorado, posto que a presença dessas composições altera a assinatura dos sinais elétricos medidos nos cabos metálicos multicondutores.
- 3) ser adaptada para monitorar a degradação e falhas em cabos dos sistemas de distribuição de energia elétrica e nos cabamentos utilizados em locomotivas.

Necessidade de Contratações de Serviços de Terceiros Pessoa Jurídica

Segue abaixo as justificativas para a contratação de serviços de terceiros pessoa jurídica para auxiliar no desenvolvimento do projeto MOCAB:

a) Auxílio para o desenvolvimento de software: concepção, especificação e desenvolvimento do software do Analisador MOCAB. Contempla o desenvolvimento do front-end e back-end, APIs para interface com o Analisador MOCAB e sistemas legados; rotinas e protocolos para troca de informações; gestão, supervisão, atualização e coordenação da operação de todos os Sensor MOCAB instalados no campo; geração de alarmes e relatórios. Integração com o centro de controle de operações (CCO) da MRS Logística S.A. para realizar testes de funcionalidade e adequação do front-end para melhor atender CCOs de empresas do setor ferroviário. Note que o escopo de criação do Analisador MOCAB abrange tanto o front-end quanto o back-end, incluindo o design de interfaces intuitivas. O escopo também contempla a implementação de APIs para integração com o Sensor MOCAB e com sistemas legados, além de rotinas robustas de troca de informações e coordenação de múltiplos dispositivos em campo. Uma empresa de software possui equipe multidisciplinar (UX/UI designers, desenvolvedores full-stack, engenheiros de integração e testers) capaz de estruturar arquiteturas escaláveis, garantir alta disponibilidade e implementar protocolos seguros de comunicação. Além disso, a experiência de um fornecedor externo em processos de DevOps, gestão de versões e monitoramento contínuo assegura que o Analisador MOCAB permaneça sempre atualizado, estável e pronto para emissão automática de alarmes e relatórios. Finalmente, a integração direta com o Centro de Controle de Operações (CCO) da MRS Logística S.A. — que envolve adequação de fluxos de trabalho, testes de usabilidade e customização de telas para atender a padrões do setor ferroviário — exige *expertise* que só uma empresa com *know-how* consolidado poderá fornecer em prazo e qualidade compatíveis com o cronograma do projeto.

b) Auxílio ao desenvolvimento de hardware. Fabricação profissional de protótipos do

Sensor MOCAB para fins de testes do equipamento e do invólucro a ser utilizado para acondicionamento dos sensores MOCAB. Contempla ainda auxílio para garantir que os protótipos sejam fabricados em conformidade com normas vigentes e, consequentemente, minimizar a necessidade de retrabalhos durante o processo de industrialização. Embora a equipe construa os primeiros protótipos do Sensor MOCAB em laboratório e realize todos os testes funcionais e elétricos, a transição para protótipos industriais requer um nível de maturidade e garantia de qualidade só alcançável por fabricantes profissionais. Esses parceiros são capazes de executar processos de montagem de alta precisão — incluindo técnicas SMT e BGA — com tolerâncias muito mais restritas do que as disponíveis em bancada acadêmica, garantindo que os protótipos utilizados em campo estejam adequados para testes de longa duração. Além disso, dispõem de materiais e fornecedores certificados segundo normas internacionais (IEC, NBR, EN) e requisitos específicos do setor ferroviário, o que minimiza o risco de não conformidades e retrabalhos onerosos na etapa de industrialização. A experiência desses fornecedores também permite validar precocemente custos, prazos de entrega e potenciais gargalos logísticos, antecipando desafios da cadeia de suprimentos. Em laboratórios especializados, os protótipos podem ser submetidos a testes ambientais e de durabilidade — como ciclos de temperatura, umidade e vibração — que simulam as condições reais de operação em trilhos, assegurando robustez e vedação IP adequadas. Por fim, o invólucro moldado profissionalmente recebe acabamento uniforme e resistência mecânica superior, requisitos fundamentais para a instalação e o uso em campo. Dessa forma, a fabricação profissional dos protótipos, mesmo após o desenvolvimento em bancada, é imprescindível para validar a viabilidade industrial do Sensor MOCAB. Logo, possibilita-se reduzir custos e prazos de desenvolvimento e garantir que o produto final esteja pronto para passar por processos de certificação e industrialização para produção em massa com mínima necessidade de ajustes.

3.2. Etapas

O projeto MOCAB foi estruturado em seis etapas, sendo cada uma delas dividida em diferentes atividades. As descrições destas etapas e suas respectivas atividades são apresentadas a seguir.

ETAPA 1 - Gestão do Projeto

Esta etapa é centrada na organização e coordenação geral do projeto MOCAB, garantindo que todos os recursos, equipes e atividades sejam alinhados com os objetivos estabelecidos. As atividades incluídas são:

- **1.1 - Contratação de equipe:** consiste no recrutamento e seleção dos bolsistas que irão executar as atividades do projeto, sendo essencial para garantir uma equipe qualificada e alinhada aos objetivos do MOCAB. O processo será realizado em três sub-atividades: divulgação do edital, análise curricular dos candidatos e entrevistas para avaliação complementar. O objetivo é contratar 10 (dez) bolsistas em um período de 4 semanas, assegurando que exista uma equipe interdisciplinar para atender às demandas do projeto.
- **1.2 - Compra de insumos, equipamentos e serviços:** envolve a aquisição de materiais, ferramentas, componentes eletrônicos, computadores, softwares e serviços indispensáveis para a execução do projeto, com foco no desenvolvimento do Sensor e do Analisador MOCAB, além da realização dos testes e campanhas de medição. As sub-atividades incluem a especificação técnica dos itens

necessários, consulta a fornecedores, cotação e processo de compra, assegurando que os insumos atendam às exigências técnicas do projeto. Estima-se adquirir componentes para prototipagem e serviços especializados, como a fabricação de algumas placas de circuitos eletrônicos e suporte técnico. Essa atividade é crucial para garantir a qualidade e confiabilidade dos dispositivos desenvolvidos e dos testes realizados.

- 1.3 - Redação de relatórios parciais: consiste na elaboração de documentos trimestrais que registram o progresso, os desafios enfrentados e os resultados alcançados ao longo do projeto, servindo como ferramenta de monitoramento interno e prestação de contas. As sub-atividades incluem a coleta de dados técnicos e financeiros, análise crítica dos avanços em relação ao cronograma, e redação dos relatórios. Esses documentos serão preparados pela equipe técnica, com contribuições dos responsáveis por cada atividade, e revisados para garantir precisão e clareza.
- 1.4 - Reuniões de acompanhamento: envolve a realização de reuniões mensais com a equipe do projeto para monitorar o progresso do projeto, discutir soluções para eventuais problemas e alinhar os próximos passos. As reuniões serão estruturadas em três sub-atividades principais: apresentação dos avanços realizados no período, análise de desafios encontrados e definição de ações corretivas e estratégias futuras. A condução será realizada pelo coordenador do projeto, com a participação de todos os membros do projeto. Essa atividade é fundamental para manter a equipe alinhada, identificar possíveis desvios em tempo hábil e promover uma gestão eficaz.
- 1.5 - Atividades acadêmicas: os bolsistas que atuarão no projeto são alunos de graduação e pós-graduação da UFJF. Assim sendo, uma fração das horas alocadas para os bolsistas (Resolução 18.2021-1 da UFJF, Anexo IX e Deliberação do Conselho Curador Nº 213, de 2024) é alocada para que eles realizem suas pesquisas relacionadas com o projeto MOCAB que, eventualmente poderá fazer parte de suas dissertações de mestrado e teses de doutorado. Noutras palavras, parte das horas são alocadas para desenvolvimento das atividades acadêmicas, contribuindo com a formação de pessoal qualificado para atuar no setor ferroviário brasileiro.
- 1.6 - Organização da documentação: consiste na compilação e estruturação de todos os documentos técnicos e administrativos produzidos ao longo do projeto. Inclui a consolidação de manuais de utilização, relatórios trimestrais, especificações de hardware e firmware, além de quaisquer outros documentos relevantes. A documentação será organizada de forma clara e acessível, permitindo fácil consulta para implementação e manutenção futura da solução MOCAB.
- 1.7 - Realização do workshop de encerramento: consiste em um evento de um dia, reunindo pesquisadores, bolsistas, fomentadores e empresas do setor ferroviário para apresentar a solução MOCAB, tornando o projeto de conhecimento público. Compreende a apresentação retrospectiva do cronograma e desafios superados, ressaltando os avanços alcançados em termos de hardware, firmware, software e algoritmos. Dá ênfase às lições aprendidas ao longo do processo. Contempla ainda a apresentação dos ganhos que a solução MOCAB oferece para o setor ferroviário, discussão de estratégias de transferência tecnológica, gerando recomendações para industrialização e novas pesquisas. O encerramento conta com considerações finais da MRS Logística S.A., um coffee break estendido para networking,

fortalecendo parcerias de longo prazo.

- 1.8 - Disponibilização de itens à ANTT e tramitações administrativas do encerramento do projeto: consiste em formalizar o encerramento do uso dos equipamentos solicitados pela fomentadora e deixá-los à disposição desta para tomada de decisão e destinação dos mesmos após a conclusão do projeto. Adicionalmente, a subetapa engloba os trâmites burocráticos para encaminhar a prestação final de contas e de execuções do projeto. Sendo assim, as atividades administrativas e técnicas serão apresentadas em um relatório final.

Resultados esperados: espera-se que a sistematização das informações permita ajustes rápidos e embasados, maior eficiência no acompanhamento das atividades e transparência no uso de recursos. A entrega de insumos e serviços de qualidade no prazo estabelecido viabiliza a execução eficaz das etapas subsequentes, contribuindo para o sucesso do projeto.

Entregas: relatórios técnicos finais que documentam de forma estruturada o progresso, os desafios superados e os resultados alcançados, servindo como registros formais e ferramentas de gestão.

ETAPA 2 - Construção do setup e realização de campanha de medição

Esta etapa contempla a construção de dois enlaces consecutivos do sistema de controle de sinalização de vias ferroviárias no campus da UFJF para levantamento de informações, além da constituição de banco de dados e realização de testes. As atividades incluídas são:

- 2.1 - Elaboração do projeto do setup de medição: consiste no planejamento detalhado do setup de medição que será utilizado para simular o ambiente de sinalização ferroviária e realizar a coleta de dados para análise. O projeto incluirá o layout técnico de dois enlaces consecutivos do sistema de controle de sinalização ferroviária, especificando o posicionamento dos cabos e eletrodutos. Também serão definidos os materiais e componentes necessários, assim como a metodologia de montagem e validação do setup. Essa atividade será conduzida com base em normas técnicas e melhores práticas, garantindo que o sistema esteja preparado para reproduzir com fidelidade o ambiente de operação real.
- 2.2 - Instalação e comissionamento dos equipamentos de dois enlaces dos circuitos de via: compreende a montagem, instalação e comissionamento dos equipamentos projetados para dois enlaces consecutivos do sistema de controle de sinalização ferroviária no campus da UFJF. O processo incluirá a montagem física dos componentes, como eletrodutos e cabos, seguindo rigorosamente o projeto técnico elaborado na atividade anterior. Após a instalação, será realizado o comissionamento do setup, envolvendo testes e ajustes finais para assegurar que todos os componentes estejam funcionando de forma integrada e alinhada aos objetivos do projeto. Durante essa atividade, serão validadas as conexões, o desempenho dos equipamentos e a capacidade do setup de realizar a coleta de dados esperada.
- 2.3 - Realização de campanha de medição e geração de banco de dados: consiste na coleta sistemática de dados utilizando o setup de medição e em alguns trechos

da linha ferroviária operada pela MRS. A campanha de medição será conduzida abrangendo diferentes condições operacionais e cenários de teste. Os dados obtidos serão registrados e organizados em um banco de dados estruturado, adequado para definir as melhores assinaturas posteriormente. Essa atividade é essencial para criar um repositório confiável de informações, que servirá de base para o desenvolvimento e validação do Sensor e do Analisador MOCAB.

- 2.4 - Realização de campanha de medição em redes trifásicas: consiste na realização de testes em redes trifásicas de distribuição de energia elétrica, permitindo a avaliação do desempenho da proposta em um novo cenário. A campanha será conduzida com base nos conceitos e metodologias já utilizados, adaptados para o ambiente trifásico. Serão realizadas medições sistemáticas de variáveis elétricas em condições operacionais representativas de redes de distribuição. Essa atividade funcionará como uma prova de conceito, avaliando a aplicabilidade dos métodos e tecnologias desenvolvidos no projeto em redes elétricas existentes ao longo da linha ferroviária, além de gerar dados que poderão contribuir para aplicações futuras.

Resultados esperados: espera-se obter uma estrutura funcional, preparada para realizar os testes e análises essenciais ao desenvolvimento do projeto MOCAB. Essa estrutura permitirá a coleta de um conjunto robusto de dados, garantindo a realização de análises precisas. Além disso, a etapa visa validar o desempenho dos conceitos do MOCAB em redes de distribuição trifásicas, fornecendo informações valiosas sobre sua viabilidade nesse ambiente.

Entregas: Evidências compostas por fotos, vídeos e aquisições de equipamentos para a realização desta etapa que incluam a descrição de todas as atividades.

ETAPA 3 - Desenvolvimento do Sensor MOCAB (até 18 canais)

Esta etapa foca no desenvolvimento inicial do Sensor MOCAB para cabos com até 18 canais, abordando as seguintes atividades:

- 3.1 - Desenvolvimento de hardware: consiste na especificação, design e implementação dos circuitos eletrônicos que serão responsáveis pela aquisição e processamento de sinais em cabos de controle de sinalização com até 18 canais. O trabalho inclui o desenvolvimento de placas de circuito impresso, seleção criteriosa de componentes e montagem de protótipos funcionais. Serão aplicadas técnicas avançadas de projeto para garantir eficiência, precisão e robustez, considerando os requisitos operacionais do ambiente ferroviário.
- 3.2 - Desenvolvimento de firmware: envolve a criação e otimização do software embarcado que controlará o funcionamento do Sensor MOCAB. O firmware será responsável por gerenciar a captura de dados dos cabos, processar as assinaturas características dos sinais elétricos e garantir a comunicação eficiente com o Analisador MOCAB. O desenvolvimento seguirá boas práticas de programação embarcada, com ênfase em eficiência, confiabilidade e compatibilidade com o hardware.

- 3.3 - Desenvolvimento da mecânica: abrange o projeto e construção do invólucro físico do Sensor MOCAB, a fim de proteger o hardware contra danos mecânicos e interferências externas, além de garantir isolamento elétrico. O design será otimizado para atender às exigências do ambiente ferroviário, como resistência a vibrações, intempéries e altas temperaturas.
- 3.4 - Realização de testes e introdução de correções: consiste na execução de testes de funcionamento e desempenho do Sensor MOCAB, abrangendo hardware, firmware e mecânica. Serão realizados ensaios laboratoriais para identificar possíveis falhas ou limitações, seguidos pela implementação de melhorias e ajustes necessários. Essa atividade é fundamental para assegurar que o Sensor MOCAB atenda aos requisitos do projeto.

Resultados esperados: espera-se ter um protótipo funcional e integrado, composto por hardware, firmware e mecânica, pronto para testes em até 18 canais, um protótipo robusto e eficiente, garantindo sua capacidade de aquisição, processamento e comunicação de dados de forma confiável. Além disso, como resultado esperado, tem-se um dispositivo corrigido e aprimorado com base nos testes realizados, assegurando que esteja totalmente preparado para a validação final.

Entregas: Sensor MOCAB para monitorar cabos de controle de sinalização com até 18 canais, em sua versão funcional.

ETAPA 4 - Desenvolvimento do Sensor MOCAB (até 36 ou 54 canais)

Esta etapa expande o desenvolvimento do Sensor MOCAB expansível para cabos de até 36 ou 54 canais, consolidando as especificações e ampliando as capacidades de medição. As atividades são:

- 4.1 - Desenvolvimento de hardware: consiste na especificação, design e implementação de circuitos eletrônicos voltados para sensores capazes de operar com até 36 ou 54 canais. Assim como na Atividade 3.1, o trabalho incluirá o desenvolvimento de placas de circuito impresso, a seleção criteriosa de componentes e a montagem de protótipos funcionais. Serão utilizadas técnicas avançadas de projeto para garantir que o hardware atenda aos requisitos de eficiência, precisão e robustez necessários ao ambiente ferroviário. O desenvolvimento dessa atividade será concomitante à Atividade 3.1, mas com foco nos desafios específicos associados ao maior número de canais, buscando garantir escalabilidade e desempenho na aquisição e processamento de sinais;
- 4.2 - Desenvolvimento de firmware: envolve a atualização e ampliação do software embarcado para suportar a aquisição e o processamento de dados em maior escala, acompanhando o aumento no número de canais do sensor. Inclui a possibilidade de se implementar dois tipos de módulos, um mestre e outro escravo. Serão realizados ajustes nos algoritmos de controle e processamento, com foco na eficiência computacional e na confiabilidade das medições para múltiplos canais. Além disso, o firmware será integrado ao hardware, garantindo compatibilidade plena;

- 4.3 - Desenvolvimento da mecânica: abrange a adaptação do invólucro do Sensor MOCAB para acomodar os novos módulos necessários para o monitoramento de cabos com maior número de canais. O design será ajustado para garantir robustez estrutural, isolamento elétrico e resistência às condições adversas do ambiente ferroviário, mesmo com o aumento da complexidade interna do Sensor MOCAB;
- 4.4 - Realização de testes e introdução de correções: consiste na execução de testes de funcionamento e desempenho do Sensor MOCAB atualizado, abrangendo hardware, firmware e mecânica. Serão realizados ensaios laboratoriais detalhados para identificar possíveis falhas, limitações ou incompatibilidades, seguidos pela implementação de correções e melhorias necessárias. O objetivo é assegurar que o sensor ampliado atenda aos requisitos do projeto e funcione de forma confiável em condições reais.

Resultados esperados: espera-se o desenvolvimento de um protótipo funcional e integrado do Sensor MOCAB para monitorar cabos de controle de sinalização com até 54 canais. O dispositivo deverá manter a confiabilidade, eficiência e robustez da versão anterior (até 18 canais), com hardware e firmware adaptados para suportar o maior número de canais e um invólucro mecânico adequado às exigências do ambiente ferroviário. Espera-se obter um protótipo corrigido e pronto para validação final.

Entregas: Sensor MOCAB em sua versão funcional para monitoramento de cabos de controle de sinalização de 18 canais e, que quando combinado consegue monitorar até 54 canais.

ETAPA 5 - Desenvolvimento do Analisador MOCAB

Esta etapa é dedicada ao desenvolvimento de métodos avançados para análise e interpretação de dados coletados pelo sensor MOCAB, buscando identificar padrões que indiquem a necessidade de manutenção e reparo dos cabos. Suas atividades incluem:

- 5.1 - Desenvolvimento de técnicas de extração de assinatura: envolve a criação de algoritmos para identificar e extrair assinaturas específicas dos sinais coletados pelo Sensor MOCAB. As assinaturas serão escolhidas para representar de maneira confiável as condições dos cabos monitorados, capturando características elétricas diversas. A etapa incluirá o desenvolvimento de métodos matemáticos e estatísticos para extração de assinaturas, além da validação dos algoritmos em cenários simulados;
- 5.2 - Desenvolvimento das técnicas de detecção, classificação, localização e predição: consiste na aplicação de métodos de inteligência computacional, como aprendizado de máquina e redes neurais, para a análise dos dados coletados. O foco será na detecção, classificação, localização e predição de falhas nos cabos de sinalização. A etapa inclui a preparação de dados para treinamento dos modelos, a seleção e implementação de algoritmos avançados e a realização de testes de validação. O desenvolvimento seguirá boas práticas de inteligência computacional, com ênfase na precisão e generalização dos modelos;
- 5.3 - Desenvolvimento do software do Analisador MOCAB: contempla a concepção, especificação, desenvolvimento, testes de funcionamento e integração.

Para tanto, também contempla o acompanhamento, recebimento e validação de entregas parciais e finais da empresa contratada para desenvolvimento do software do Analisador MOCAB;

- 5.4 - Realização de testes e introdução de correções: abrange a execução de testes das técnicas desenvolvidas, aplicando-as a cenários simulados para verificar sua eficácia. Os testes envolverão a análise dos dados coletados em diferentes condições operacionais, buscando identificar falhas ou limitações nos algoritmos. Após a identificação de problemas, serão realizados ajustes e refinamentos necessários para melhorar o desempenho do Analisador MOCAB.

Resultados esperados: espera-se desenvolver técnicas eficazes para a análise dos dados coletados pelo Sensor MOCAB, incluindo algoritmos para extração de assinaturas que representem com precisão as condições dos cabos monitorados. Também é esperado o desenvolvimento de modelos de inteligência computacional capazes de identificar e prever falhas de forma confiável. Como resultado, o Analisador MOCAB deverá estar otimizado e pronto para validação em cenários reais.

Entregas: Analisador MOCAB, composto por algoritmos para extração de assinaturas e técnicas de inteligência computacional, em sua versão funcional, para detecção, classificação, localização e predição de degradação e software que contempla o monitoramento, supervisão, atualização dos Sensores MOCAB, geração de relatórios e alertas, através de interface amigável.

ETAPA 6 - Integração da Solução MOCAB

Esta etapa é dedicada à consolidação da solução MOCAB, integrando os componentes desenvolvidos em etapas anteriores para formar uma solução completa e funcional. As atividades principais incluem:

- 6.1 - Integração do Sensor MOCAB e do Analisador MOCAB: consiste na conexão e sincronização entre o Sensor MOCAB e o Analisador MOCAB, formando um sistema integrado e automatizado para monitoramento e análise de cabos de sinalização ferroviária. A integração envolverá a configuração de interfaces de comunicação, alinhamento dos fluxos de dados e verificação do desempenho conjunto dos componentes;
- 6.2 - Realização de testes de integração e introdução de correções: abrange a execução de testes para verificar o funcionamento integrado do Sensor e do Analisador MOCAB. Serão realizados testes para avaliar a precisão da coleta e análise de dados, bem como a eficiência da comunicação entre os componentes. Caso sejam identificadas inconsistências ou falhas, ajustes e correções serão implementados para assegurar o funcionamento adequado da solução MOCAB;
- 6.3 - Realização de testes em campo e introdução de correções: consiste na aplicação do sistema integrado em testes de campo, simulando condições reais de operação em uma linha ferroviária ou ambiente similar. Serão avaliados aspectos como desempenho em situações práticas, resistência a interferências externas e capacidade de gerar dados confiáveis para manutenção preditiva. Com base nos

resultados dos testes de campo, serão implementadas melhorias para corrigir erros, bugs e garantir a viabilidade operacional e industrialização da solução MOCAB.

Resultados esperados: espera-se obter um sistema funcional e coeso, preparado para realizar a coleta, processamento e análise de dados de forma integrada. O resultado esperado é uma solução integrada robusta e confiável, apta para os testes em condições reais. Portanto, espera-se ter uma validação completa da solução MOCAB em ambiente real, pronta para aplicação prática.

Entregas: versões finais e funcionais dos Sensores MOCAB e do Analisador MOCAB, prontas para a utilização.

O cronograma de execução é mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Cronograma de execução do projeto de P&D.

Nº	METAS	ETAPAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Gestão do Projeto	1.1 - Contratação de equipe																														
		1.2 - Compra de insumos, equipamentos e serviços																														
		1.3 - Redação de relatórios parciais																														
		1.4 - Reuniões de acompanhamento																														
		1.5 - Atividades acadêmicas																														
		1.6 - Organização da documentação																														
		1.7 - Realização do workshop de encerramento																														
		1.8 - Disponibilização de itens à ANTT e tramitações administrativas do encerramento do projeto																														
2	Construção do setup e realização de campanha de medição	2.1 - Elaboração do projeto do setup de medição																														
		2.2 - Instalação e comissionamento dos equipamentos de dois enlaces dos circuitos de via																														
		2.3 - Realização de campanha de medição e geração de banco de dados																														
		2.4 - Realização de campanha de medição em redes trifásicas																														
3	Desenvolvimento do Sensor MOCAB (até 18 canais)	3.1 - Desenvolvimento de hardware																														
		3.2 - Desenvolvimento de firmware																														
		3.3 - Desenvolvimento da mecânica																														
		3.4 - Realização de testes e introdução de correções																														
4	Desenvolvimento do Sensor MOCAB	4.1 - Desenvolvimento de hardware																														
		4.2 - Desenvolvimento de firmware																														
		4.3 - Desenvolvimento da mecânica																														

[illegible]

4. PREVISÃO DE INÍCIO, TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO TOTAL

Este desenvolvimento será executado em 30 meses com orçamento de R\$ 4.655.279,21 (quatro milhões, seiscentos e cinquenta e cinco mil, duzentos e setenta e nove reais e vinte e um centavos). O valor de R\$ 1.612.510,59 (um milhão, seiscentos e doze mil, quinhentos e dez reais e cinquenta e nove centavos) é desembolsado no Ano 4, o valor de R\$ 1.803.450,36 (um milhão, oitocentos e três mil, quatrocentos e cinquenta reais e trinta e seis centavos) é desembolsado no Ano 5 e o valor de R\$ 1.239.318,26 (um milhão, duzentos e trinta e nove mil, trezentos e dezoito reais e vinte e seis centavos) é desembolsado no Ano 6.

Seu início está previsto para **01 de novembro de 2025**.

O documento completo com o Cronograma Físico-Financeiro é apresentado no Anexo II, de acordo com a Portaria n. 17/2023.

5. LOCAL DE EXECUÇÃO

O projeto será desenvolvido em diferentes instalações da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e da MRS Logística S.A. Cada instalação possui um uso específico nos diferentes estágios de desenvolvimento da solução MOCAB. Os locais de execução são os seguintes:

UFJF:

- **Laboratório de Comunicações (LCOM):** O LCOM é cadastrado como multiusuário na UFJF e no MCTI. O LCOM conta com infraestrutura de equipamentos e softwares que possibilita realizar pesquisas experimentais na faixa de frequência entre 0 a 6 GHz, compreendendo os seguintes equipamentos e softwares: geradores e analisadores vetoriais de sinais, analisadores vetoriais de rede, analisador de impedância, câmara anecoica, medidor LCR, kits SDR, testador banda larga de rádio, amplificadores de sinais, osciloscópios, analisador de cobertura, osciloscópios, fontes, oscilador atômico, analisador digital, analisador de QEE, analisador de tráfego, e vários softwares de desenvolvimento, tais como todos os softwares de desenvolvimento da Keysight e CTS da Dassault. É considerado um laboratório de referência pela Rohde&Schwarz, vide https://www.linkedin.com/posts/rohde-%26-schwarz_rs-e-inerge-parceiros-para-pesquisa-e-desenvolvimento-activity-7067169403674468352-j--s?utm_source=share&utm_medium=member_desktop. A infraestrutura de pesquisa do LCOM foi construída a partir de projetos de P&D com os setores público e privado ao longo dos últimos 16 anos. O laboratório é um centro de referência em power line communication (PLC) do INERGE (INCT de Energia Elétrica), www.inergeinct.com, ocupa uma área de 70m² e sua infraestrutura de pesquisa (equipamentos e softwares) é estimada em cerca de R\$ 8.000.000,00 (oito milhões de reais). A infraestrutura do LCOM acomoda até 22 pessoas. No LCOM, será desenvolvido o banco de dados de assinaturas, desenvolvimento do hardware, firmware e dos circuitos do Sensor MOCAB e dos algoritmos do Analisador MOCAB, testes de integração e experimentos laboratoriais. O laboratório dispõe de 70 metros quadrados e mesas e bancadas de desenvolvimento para atender até 20 pessoas.

- **Setup de campo:** o setup de campo compreende a reprodução de dois enlaces consecutivos do sistema de controle de sinalização de vias ferroviárias. O setup de campo será construído na UFJF na primeira etapa de desenvolvimento do MOCAB. A construção do setup de campo viabiliza a realização de campanhas de medição e caracterização e na realização de testes em ambiente controlado, facilitando a coleta de informações e identificando necessidades de correções.

MRS:

- **Segmento da malha ferroviária:** para garantir uma validação abrangente da solução, sensores MOCAB serão instalados ao longo de um ou mais trechos específicos da linha ferroviária, selecionados com base em critérios de tráfego e condições operacionais. Nesses trechos serão feitos testes nos sensores, observações e coleta de dados para introdução de correções, caso sejam necessárias.
- **Centro de Controle Operacional (CCO):** o CCO será o local de monitoramento e análise dos dados coletados em tempo real, com o uso do Analisador MOCAB, para acompanhar as condições operacionais dos cabos metálicos multicondutores monitorados.

6. ENTIDADE E EQUIPE EXECUTORA

6.1. Identificação da entidade

As entidades executoras do projeto são a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e a MRS Logística S.A. No contexto do presente projeto, a UFJF apresenta um histórico de desenvolvimento de projeto de P,D&I relacionados com a transmissão e o monitoramento de cabos metálicos, principalmente, com foco em sistemas de distribuição de energia elétrica. São mais de 20 projetos de P,D&I relacionados a essas temáticas que resultaram em mais 250 artigos científicos publicados, vários prêmios de inovação, várias patentes depositadas e mais de 45 mestres e doutores formados nos últimos 15 anos. A UFJF irá contribuir através da formação e disseminação do conhecimento, além do desenvolvimento da solução MOCAB. É importante ressaltar que a solução MOCAB será desenvolvida por pesquisadores do INERGE, INCT de Energia Elétrica (www.inergeinct.com), cuja sede é a UFJF, e num laboratório de pesquisa (Laboratório de Comunicações - LCOM) que faz parte do INERGE.

A MRS Logística S. A. contribuirá no desenvolvimento da solução MOCAB através da participação nas reuniões técnicas para discussão dos progressos e sugestões de melhorias; auxílio na montagem do setup de medição; auxílio na realização de campanhas de medição; e no acompanhamento e monitoramento da execução do presente projeto de P,D&I.

6.2. Identificação da equipe executora

Segue abaixo um breve resumo da equipe executora vinculada à UFJF:

1. **Pesquisador 1 (Coordenador):** Moisés Vidal Ribeiro é professor titular da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e coordenador do Laboratório de Comunicações (LCOM). No projeto, atua na coordenação geral e na coordenação do desenvolvimento do Analisador MOCAB. CPF: 007.523.177-84. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1290711673273506>.
2. **Pesquisador 2:** Luciano Manhães de Andrade Filho é doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). No projeto, é responsável pela coordenação técnica e executa o desenvolvimento do Sensor

MOCAB, pelos testes de integração e pela revisão dos relatórios técnicos parciais e final. CPF: 081.384.027-92. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5454168673866452>.

3. **Pesquisador 3:** A definir. Atuará na coordenação técnica e execução da construção do setup de medições, realização de medições, constituição do banco de dados, realização de testes laboratoriais e de campo, além da coordenação da elaboração da documentação final do projeto.
4. **Bolsista 1:** A definir. Será responsável pela redação dos relatórios técnicos, organização e revisão da documentação técnica do projeto, organização do workshop de encerramento, auxílio na integração do Sensor e Analisador MOCAB, bem como no suporte à coordenação geral do projeto.
5. **Bolsista 2:** Mateus de Lima Filomeno é doutor em Engenharia Elétrica pela UFJF. Suas atividades incluem a construção do setup de medições, realização de medições, constituição do banco de dados e execução de testes laboratoriais, de integração e de campo. CPF: 094.698.476-01. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1553060226254377>.
6. **Bolsista 3:** A definir. Terá como responsabilidades a construção do setup de medições, realização de medições, constituição do banco de dados e testes laboratoriais, integração e de campo.
7. **Bolsista 4:** Vinícius Emídio Monteiro é mestre em Engenharia Elétrica pela UFJF. No projeto, atua na concepção, especificação e desenvolvimento dos circuitos de interfaceamento do Sensor MOCAB, além de auxiliar no desenvolvimento dos circuitos de injeção e extração de sinais elétricos. Também é responsável por testes laboratoriais, introdução de correções e supervisão diária dos membros da equipe técnica. CPF: 102.414.236-19. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8697267984024934>.
8. **Bolsista 5:** Luís Guilherme da Silva Costa é pós-doutorando na UFJF. Participa do projeto com foco na concepção, especificação e desenvolvimento dos circuitos de injeção e extração de sinais elétricos, além de atuar na realização dos testes de integração. CPF: 432.218.906-72. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9558289428433767>.
9. **Bolsista 6:** A definir. Será responsável pela concepção, especificação, desenvolvimento, testes e correções dos circuitos digitais do Sensor MOCAB, confecção dos protótipos dos circuitos digitais, além de auxiliar nos testes de integração e na introdução de melhorias no hardware. Também é responsável pela redação da documentação técnica do Sensor MOCAB.
10. **Bolsista 7:** A definir. Atuará na concepção, especificação, desenvolvimento, prototipação, testes e correções dos circuitos analógicos do Sensor MOCAB. Prestará apoio nos testes de integração e na redação de relatórios e organização da documentação técnica. Também é responsável pela redação da documentação técnica do hardware do Sensor MOCAB.
11. **Bolsista 8:** A definir. Ficará encarregado da concepção, especificação, desenvolvimento, testes e validação do firmware do Sensor MOCAB, bem como de apoiar a redação de relatórios e a organização da documentação do projeto. Também é responsável pela redação da documentação técnica do firmware do Sensor MOCAB.

12. **Bolsista 9:** A definir. Suas atribuições incluem o desenvolvimento e testes dos algoritmos de seleção de características, classificação, detecção, localização e análise de degradação. Acompanhará a empresa contratada para desenvolvimento do software do Analisador MOCAB, assegurando conformidade com as especificações, e participará dos testes de integração e implementação de correções. Também é responsável pela redação da documentação técnica dos algoritmos utilizados pelo Analisador MOCAB.
13. **Bolsista 10:** A definir. Será responsável pela concepção, especificação, desenvolvimento e testes dos algoritmos de seleção de características, classificação, detecção, localização e análise de degradação. Participará ainda dos testes de integração, aplicação de correções nos algoritmos e auxílio na redação de relatórios e organização da documentação. Também é responsável pela redação da documentação técnica do software MOCAB.
14. **Bolsista 11:** A definir. Suas funções incluem o controle de ativos do projeto, organização e preparo de materiais e instrumentos como fontes de alimentação, geradores de sinais, osciloscópios, multímetros, analisadores de impedância, fresadora CNC, entre outros. Também auxiliará pesquisadores e demais bolsistas durante a execução de medições, garantindo a disponibilidade dos recursos necessários.

Dentre os onze bolsistas listados acima, dois (bolsistas 1 e 4) receberão a bolsa BDCTI acrescida de um adicional de R\$ 900,00, pelas seguintes razões:

a) Bolsista 1: atuará como auxiliar do coordenador nas atividades de coordenação geral do projeto e gestão do projeto. Para isso, acompanhará semanalmente a evolução das atividades, coletando informações sobre o andamento do projeto e reportando a execução das tarefas, de modo a subsidiar a tomada de decisões que minimizem eventuais atrasos. Também apoiará a organização de agendas com a MRS Logística S.A. e com a fundação de apoio da UFJF (FADEPE), para a discussão de ações que mitiguem possíveis impactos;

b) Bolsista 4: será responsável por acompanhar diariamente a execução das tarefas pelos demais membros da equipe, assegurando que as atividades planejadas diariamente estejam sendo devidamente realizadas. Essa função é essencial, considerando que os pesquisadores não se dedicam integralmente (40 horas semanais) ao projeto no laboratório. Assim, na ausência dos pesquisadores, caberá ao bolsista 4 garantir a presença e o cumprimento das tarefas pelos demais bolsistas;

Por fim, destaca-se que para a execução das atividades dos bolsistas 1 e 4 exigem-se perfis que já possuem experiência comprovada em projetos de P&D similares, pois estes irão apoiar o coordenador em atividades de orientação de execuções técnicas e processuais do projeto. Portanto, a oferta de uma bolsa no valor total de R\$ 6.620,00 para cada um torna essa posição mais atrativa, especialmente considerando que os bolsistas não contam com proteção social, como ocorre com trabalhadores contratados sob o regime da CLT.

Necessidade de Equipe

O desenvolvimento da solução MOCAB compreende um número expressivo de tarefas, que se articulam de forma sequencial e interdependente. Essas tarefas estão descritas a seguir, com maior nível de detalhamento:

a) A constituição do banco de dados de assinaturas eletromagnéticas é uma das atividades mais trabalhosas e fundamentais do projeto. Ela envolve a caracterização

precisa de até **300 segmentos de um metro** de cabos metálicos multicondutores, sendo parte desses segmentos em condição saudável e parte com **falhas ou degradações induzidas em laboratório**. Para garantir a diversidade e a representatividade dos dados, serão utilizados cabos com diferentes números de condutores: inicialmente os de **12 condutores**, estendendo-se posteriormente aos de **15, 25 e 50 condutores**. Essa caracterização inclui medições com injeção e recepção de sinais elétricos, utilizando o setup de bancada com instrumentação dedicada. A coleta de dados também contemplará múltiplas condições de operação, temperatura, envelhecimento simulado e outros fatores que influenciam na assinatura elétrica dos cabos.

b) Serão realizadas até **5.000 simulações computacionais**, com o objetivo de gerar um **banco sintético de assinaturas** que complemente as medições reais. As simulações serão conduzidas em ambientes controlados de modelagem eletromagnética e considerarão cabos com comprimento de **1 km a 3 km**, com diferentes níveis e localizações de degradações. Esse banco sintético será cruzado com os dados experimentais para garantir **suficiência estatística**, diversidade de padrões e validação cruzada dos modelos de predição.

c) A **instalação e supervisão do setup de campo** envolverá a montagem de uma estrutura que simula **dois segmentos consecutivos de 1 km** do sistema real de sinalização ferroviária. Este setup será empregado em ambiente controlado e em campo, permitindo a realização de testes em escala real. A tarefa inclui a elaboração da **documentação técnica e operacional** do sistema, com esquemas elétricos, procedimentos de segurança, instruções de montagem e execução dos testes experimentais.

d) A etapa de **projeto e desenvolvimento de hardware do Sensor MOCAB** contempla o ciclo completo de engenharia de produto. Serão desenvolvidos diversos circuitos: de **alimentação com proteção elétrica, conversão analógica-digital e digital-analógica de 18 canais, condicionamento e amplificação de sinais de entrada**, blocos de **processamento digital embarcado, memória não-volátil**, além de **interfaces de comunicação física**, como **RJ-45 (Ethernet) e RS-485 ou RS-232 (interface industrial)**. A arquitetura do Sensor MOCAB será modular e permitirá operação **paralelizada com até dois Sensores MOCAB adicionais**, totalizando 54 canais. Essa tarefa também inclui o **projeto mecânico do invólucro**, considerando proteção contra intempéries, vibração, interferência eletromagnética (EMI), além da acessibilidade para manutenção e integração.

e) A **integração dos circuitos desenvolvidos** será realizada de forma **modular e incremental**, permitindo a verificação isolada de cada subsistema e posterior validação do sistema completo. Serão conduzidos **testes de conformidade**, ajustes de layout, alterações nas especificações elétricas e lógicas, e verificação da **compatibilidade de sinais** e protocolos entre módulos. Essa fase assegura o funcionamento cooperativo entre os componentes do Sensor MOCAB, e sua capacidade de operar sincronizadamente em um ambiente distribuído.

f) O **desenvolvimento do firmware** do Sensor MOCAB será responsável por implementar todas as funções de controle e comunicação do sistema embarcado. O firmware incluirá rotinas para:

- Gerenciamento das interfaces de geração, injeção e aquisição de sinais elétricos;
- Controle e emissão de alertas sobre funcionamento;
- protocolos de comunicação entre sensores MOCAB e o analisador MOCAB, através de uma interface **Ethernet**, utilizando interfaces RJ-45, a qual permite

conexão com redes Ethernet, Wi-Fi, LoRa, 4G, 5G, ou Starlink, dentre outros;

- Rotinas para **atualização remota** do firmware, execução remota de comandos e automação de testes;
- Implementação de **técnicas de extração de características** dos sinais medidos, para fins de **detecção, classificação, localização e predição de degradação**;
- Sincronização da operação com outros sensores MOCAB para a **execução paralela e coordenada** de múltiplos canais de análise (até 54 canais simultâneos).

g) A etapa de **seleção e análise comparativa de algoritmos** envolve o estudo de técnicas de **seleção de características (feature selection)**, com foco em **redução de dimensionalidade**, e o emprego de **algoritmos de inteligência computacional e artificial** para implementar os módulos de:

- Detecção da ocorrência de degradações;
- Classificação de tipos de degradação;
- Localização precisa da degradação ao longo do cabo;
- Predição da evolução da degradação ao longo do tempo.

Serão comparadas técnicas tradicionais (como Principal Component Analysis, Linear Discriminant Analysis, k-Nearest Neighbors, Support Vector Machine) e métodos avançados baseados em aprendizado profundo (como redes neurais convolucionais e Long Short-Term Memory), com critérios de avaliação que incluem acurácia, sensibilidade, custo computacional, adaptabilidade a novos dados e economia na troca de mensagens entre os Sensores MOCAB e o Analisador MOCAB.

h) A **integração entre os Sensores MOCAB e o Analisador MOCAB** exigirá testes intensivos de conformidade funcional entre hardware, firmware e software. Serão conduzidos testes em laboratório, com cabos reais e simulados, a fim de validar o funcionamento coordenado dos módulos. Contempla ainda a integração com o CCO da MRS Logística S.A. para validar a sua utilidade na perspectiva da concessionária ferroviária. As correções identificadas durante os testes serão aplicadas tanto no firmware do Sensor MOCAB quanto no software do Analisador MOCAB.

i) Serão realizados **testes de laboratório e de campo** com cabos reais multicondutores (12, 15, 25 e 50 condutores), em ambientes ferroviários reais de três cidades distintas. As campanhas de campo contarão com duas equipes de até três membros cada, que serão responsáveis pela montagem dos setups, injeção de sinais, coleta de dados e ajustes em tempo real. Também serão realizados testes complementares em **redes trifásicas de distribuição elétrica**, com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso da tecnologia para monitoramento da rede auxiliar de energia das ferrovias.

j) Será produzida uma **documentação técnica completa** da solução MOCAB, contemplando Sensor MOCAB e Analisador MOCAB. Essa documentação incluirá:

- Diagramas elétricos e mecânicos;
- Manuais de operação e manutenção;

- Guias de integração e atualização;
- Procedimentos de teste e validação;
- Relatórios de desempenho e ensaios, de modo a garantir a **reprodutibilidade da solução por terceiros**.

Noutras palavras, a execução do projeto MOCAB ao longo de três anos requer uma equipe altamente qualificada, composta por **três pesquisadores seniores e onze bolsistas**, devido à complexidade técnica e à densidade de tarefas envolvidas. A **constituição do banco de dados de assinaturas reais e sintéticas** é uma etapa essencial, que sustenta a robustez dos algoritmos de análise. O desenvolvimento e integração do hardware e firmware do Sensor MOCAB, com suporte a múltiplas interfaces e sincronia entre sensores, demandam expertise avançada em sistemas embarcados, eletrônica analógica e digital, e redes industriais.

O projeto ainda contempla a **validação de campo em múltiplos cenários ferroviários**, abrangendo diferentes tipos de cabos e condições operacionais, além da elaboração de documentação completa para transferência tecnológica. Os **bolsistas da UFJF**, atuando em regime parcial devido às suas obrigações acadêmicas, contribuem com atividades essenciais como medições, montagem de protótipos, simulações, desenvolvimento de firmware e algoritmos, testes e documentação. A participação deles também promove a formação de recursos humanos especializados, o que é especialmente importante diante do déficit de profissionais qualificados no setor ferroviário brasileiro.

Por fim, a **divisão clara de responsabilidades entre pesquisadores e bolsistas** assegura o cumprimento do cronograma e a excelência técnica das entregas. Enquanto os pesquisadores lideram o projeto, conduzem as análises críticas e supervisionam as soluções desenvolvidas, os bolsistas garantem a execução prática e a operacionalização dos sistemas, consolidando um modelo eficaz de inovação aplicada ao setor ferroviário.

7. PRODUTOS

O produto a ser desenvolvido e entregue no presente projeto é a **solução MOCAB**, a qual permite diagnosticar e prever a degradação de até 54 condutores presentes em cabos de controle de sinalização. A solução MOCAB é constituída pelos seguintes componentes:

- Sensor MOCAB: dispositivo conectado aos condutores dos cabos de controle de sinalização. São utilizados para injeção e extração de sinais elétricos, a partir dos quais é possível diagnosticar e prever a degradação desses cabos;
- Analisador MOCAB: conjunto de algoritmos baseados em processamento de sinais, processamento estocástico de sinais e inteligência artificial que, a partir dos sinais elétricos injetados e extraídos é capaz de detectar, classificar, localizar e prever a degradação e falhas nos cabos de controle de sinalização.

Além da solução MOCAB, há a entrega de um relatório técnico final, o qual fornece informações detalhadas sobre a solução MOCAB, bem como as instruções e especificações necessárias à sua reprodução. Esse relatório inclui os requisitos de projeto, documentação, esquemáticos, arquivos Gerber, manual de operação, códigos-fonte e os resultados dos testes de campo.

A solução MOCAB permitirá que os usuários sejam capazes de diagnosticar e prever a degradação e falhas em cabos de controle de sinalização. A partir do uso desse sistema é possível prever a ocorrência de falhas, planejar manutenções preditivas e,

consequentemente, reduzir as despesas para lidar com interrupções por falhas (custos operacionais) e assegurar a continuidade e a segurança das instalações.

A solução MOCAB viabiliza uma análise aprofundada do sistema inovador de monitoramento de cabos de sinalização, além de possibilitar uma avaliação prática de sua aplicação em campo para otimizar a manutenção. Adicionalmente, são esperados estudos iniciais dos potenciais de impacto da inovação, no Brasil e no mundo, nas esferas operacional, econômica e ambiental.

Reiteramos que, embora esta solução esteja sendo desenvolvida em parceria com uma empresa do setor ferroviário, ela pode ser aplicada em qualquer empresa que possua cabos de sinalização.

Finalmente, como forma de divulgação do desenvolvimento e comunicação dos resultados do projeto, é esperada a publicação de artigos científicos em congressos nacionais e/ou internacionais e em periódicos relevantes.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / NORMATIVOS APLICÁVEIS

- **PAUL, Clayton R.** *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- **PASSERINI, F.; TONELLO, A. M.** Smart grid monitoring using power line modems: effect of anomalies on signal propagation. *IEEE Access*, Feb. 2019.
- **VERSOLATTO, F.; TONELLO, A. M.** An MTL theory approach for the simulation of MIMO power-line communication channels. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p. 1710–1717, Jul. 2011.
- **LEE, B.; CIOFFI, J. M.; JAGANNATHAN, S.; SEONG, K.; KIM, Y.; MOHSENI, M.; BRADY, M. H.** Binder MIMO channels. *IEEE Transactions on Communications*, v. 55, n. 8, p. 1617–1628, ago. 2007.
- **PASSERINI, F.; TONELLO, A. M.** Analysis of High Frequency Impedance Measurement Techniques for Power Line Network Sensing. *IEEE Sensors Journal*, v. 17, n. 13, p. 7630-7640, Jul. 2017.
- **FORNÁS, J. G.; JARABA, E. H.; BLUDSZUWEIT, H.; GARCÍA, D. C.; ESTOPIÑAN, A. L.** Modeling and simulation of time domain reflectometry signals on a real network for use in fault classification and location. *IEEE Access*, v. 11, p. 23596-23619, 2023.
- **KOUTROUMBAS, Konstantinos; THEODORIDIS, Sergios.** *Pattern Recognition*. 4. ed. Waltham: Elsevier, 2013.
- **LI, M.; BU, J.; SONG, Y.; PU, Z.; WANG, Y.; XIE, C.** A novel fault location method for power cables based on an unsupervised learning algorithm. *Energies*, v. 14, p. 1164, 2021.

9. ANEXOS DO PLANO DE TRABALHO

Deverão ser apensados os anexos listados a seguir, e outros que se fizerem necessários:

- I - Resumo do Plano de Trabalho;
- II - Cronograma físico-financeiro do projeto;
- III - Propostas técnicas e comerciais dos terceirizados que irão participar do projeto;
- IV - Cotações comerciais;
- V - Currículo dos coordenadores em formato .pdf;

- VI - Orçamento analítico previsto;
- VII - Lista de bens, produtos e estudos com previsão de transferência;
- VIII - Justificativa para aquisição de equipamentos;
- IX - Resolução no. 18.2021, Anexo 01, da UFJF e deliberações da FAPEMIG para os valores das bolsas;
- X - Resolução no. 18.2021, de 28 de abril de 2021, da UFJF que disciplina o ressarcimento da UFJF em projeto de P&D;
- XI - Declaração de interesse da UFJF nos equipamentos do projeto de P&D;
- XII - Seguro Obrigatório para inclusão de bolsistas;
- XIII - Declaração de Custeio de Tarifa de Manutenção de Conta e Transferência;
- XIV - PORTARIA/SEI No 829, DE 14 DE JUNHO DE 2022;
- XV - Ressarcimento – Projeto Monitoramento Inteligente da Integridade dos Cabos de Controle das Vias Ferroviárias (MOCAB) e declaração sobre aprovação do ressarcimento total (UFJF+FADEPE+CRITT) no valor de 20%;
- XVI - Calculo DOA FADEPE_Planilha de registro de Despesas Operacionais e Administrativas (DOA) para projetos.