

Aplicação da Transformada Rápida de Fourier na medição de tensão de circuitos de via ferroviários

Application of the Fast Fourier Transform to voltage measure in railway circuits

Engenharia de Controle e Automação

Júlio Rodrigo Ribeiro dos Santos (juliorrsantos@gmail.com)

Especialista em Sistemas Embarcados pelo Centro Universitário SENAI – SP.

Leandro Poloni Dantas (leandro.poloni@gmail.com)

Doutor em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário FEI e professor do Insper

FTT Journal of Engineering and Business

• SÃO BERNARDO DO CAMPO, SP JUN. 206

• ISSN 2525-8729

Submissão: 21 abr. 2025 Aceitação: 22 maio 2026

Sistema de avaliação: às cegas dupla (double blind review)

FACULDADE ENGENHEIRO SALVADOR ARENA, p. 157 – p. 175

FTT JOURNAL
of Engineering and Business



FACULDADE
ENGENHEIRO
SALVADOR ARENA

Resumo

Os circuitos de via desempenham um papel fundamental nos sistemas metroferroviários, sendo responsáveis pela detecção e sinalização da presença de trens em determinada linha. A manutenção desses circuitos, especialmente os mistos, que combinam diferentes frequências, apresenta desafios significativos, como a necessidade de desenergizar os circuitos de áudio frequência (AFO) durante as medições, impactando negativamente a operação ferroviária. Este trabalho apresenta uma solução baseada em um sistema embarcado, utilizando um microcontrolador equipado com núcleo ARM Cortex®-M4 e técnicas de processamento digital de sinais (DSP) para realizar medições de tensão com precisão em circuitos de 60 Hz sem a necessidade de desligar os AFOs. A metodologia emprega a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para garantir maior precisão na identificação da tensão RMS em 60 Hz, minimizando interferências provenientes de outras frequências. Os resultados demonstraram que a solução proposta resultou em medições confiáveis, facilitando manutenções preventivas e corretivas, contribuindo para uma maior eficiência operacional e menor impacto nas atividades metroferroviárias. Este estudo reforça a viabilidade do uso de sistemas embarcados para otimização da manutenção ferroviária, o que traz benefícios econômicos, operacionais e de segurança para o setor.

Palavras-chave: Circuitos de via ferroviários. Sistema embarcado. Processamento digital de sinais. Transformada Rápida de Fourier.

Abstract

Track circuits play a crucial role in metro-rail systems, being responsible for detecting and signaling the presence of trains. Maintaining these circuits, particularly mixed ones that combine different frequencies, poses significant challenges, such as the need to de-energize audio frequency circuits (AFO) during measurements, which negatively impacts railway operations. This study introduces a solution based on an embedded system that employs a microcontroller equipped with an ARM Cortex®-M4 core and digital signal processing (DSP) techniques to accurately measure voltage in 60 Hz circuits without requiring the AFOs to be deactivated. The methodology utilizes the Fast Fourier Transform (FFT) to ensure higher precision in identifying the RMS voltage at 60 Hz while minimizing interference from other frequencies. The results demonstrated that the proposed solution delivers reliable measurements, facilitating preventive and corrective maintenance, thereby contributing to improved operational efficiency and reduced impact on metro-railway activities. This study underscores the feasibility of using embedded systems to optimize railway maintenance, bringing economic, operational, and safety benefits to the sector.

Keywords: Neural Network. Data Analysis. Computer Vision. People Flow

Introdução

A evolução das ferrovias foi acompanhada do aumento do número de acidentes envolvendo trens. Isso tornou necessário o controle do tráfego para garantir uma circulação segura, originando a sinalização ferroviária. Esse controle evoluiu com os avanços tecnológicos, desde gesticulações manuais até a implantação dos primeiros sinais ópticos por volta de 1930 (Palumbo, 2013).

Os sistemas de sinalização têm como função garantir a movimentação segura dos trens dentro da malha ferroviária. Para isso, travam elementos móveis da via em posição apropriada, evitam movimentações conflitantes, verificam se a via está livre e regulam a circulação dos trens para manter uma distância segura entre eles (Pachl, 2024).

É essencial detectar a posição dos trens em tempo real. Uma das maneiras de se obter essa informação é através dos circuitos de via (CDV). Os CDVs estudados neste artigo aplicam tensão AC em 60 Hz nos trilhos para acionar relés do tipo Vane, que sinalizam a presença do trem. Isso garante que as seções da via estejam livres antes da passagem de um trem (Pachl, 2024).

Com o aumento da demanda por transporte metroferroviário, torna-se necessário reduzir os intervalos e o tempo de viagem, ampliando a quantidade de trens em circulação simultânea. O dimensionamento do sistema de sinalização deve considerar, entre outros fatores, o número máximo de trens previstos, impactando diretamente na necessidade de mais CDVs para detecção e controle. Entretanto, modificar esse sistema requer alterações complexas no intertravamento elétrico (Ogunsola et al., 2007), sendo viável apenas onde for seguro e tecnicamente possível.

Na Linha 12 da CPTM (Companhia Paulista de Trens Metropolitanos), a subdivisão dos circuitos de via por meio de circuitos de áudio frequência (AFO - *Audio Frequency Overlay*) foi adotada para aumentar a capacidade do sistema sem gerar grandes intervenções. Os AFOs inserem um segundo sinal no sistema, somando-se à frequência que aciona o relé Vane, possibilitando a subdivisão dos CDVs sem a necessidade de instalar novas juntas isolantes ou *bonds* de impedância, reduzindo a complexidade das modificações (Havaei; Sandidzadeh, 2022).

Entretanto, essa combinação de relés Vane e AFOs apresenta desafios, principalmente para a manutenção. Para realizar medições de tensão nos circuitos com relé Vane, é necessário desligar os

AFOs para evitar interferências causadas pelos sinais injetados. Como esses equipamentos estão geralmente a grandes distâncias, o processo se torna mais demorado e ineficiente.

Uma alternativa para resolver esse problema seria o uso de filtros passa-baixas, projetados para isolar a frequência de interesse. No entanto, quando as frequências estão muito próximas, esses filtros apresentam limitações e podem reduzir a exatidão da medição. Nesse cenário, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) se apresenta como uma alternativa promissora, permitindo a análise simultânea de todas as frequências presentes no sinal e separando com maior exatidão a componente de 60 Hz, sem a necessidade de desligar os AFOs.

Nesse contexto, o uso de sistemas embarcados em aplicações de manutenção e diagnóstico de equipamentos ferroviários tem se tornado frequente (Dórdolo et al., 2020).

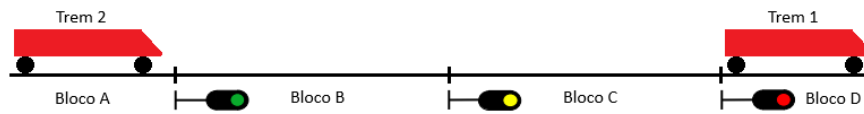
Este trabalho tem como objetivo testar a eficácia da aplicação da FFT em conjunto com um sistema embarcado dedicado à medição de tensões em 60 Hz, imunes à presença de frequências variadas geradas por equipamentos AFO em circuitos de via ferroviários. A solução proposta visa permitir medições precisas sem desligamento dos AFOs, otimizando as manutenções corretivas e preventivas desses sistemas.

Revisão de Literatura

Sinalização ferroviária

A sinalização ferroviária evoluiu dos sinais manuais aos sistemas ópticos (Palumbo, 2013), impulsionada pela necessidade de manter trens a distâncias seguras devido ao baixo coeficiente de atrito entre rodas e trilhos, que resulta em longas distâncias de frenagem (Pachl, 2024). Para controlar automaticamente a movimentação dos trens, a via é segmentada em blocos fixos protegidos por sinais visuais (aspectos) que indicam as condições da via à frente (livre, velocidade reduzida, parada). A Figura 1 ilustra essa lógica de blocos de sinalização, onde cada bloco pode ser monitorado por um Circuito De Via (CDV). O controle da velocidade do trem é realizado com base nos aspectos dos sinais e no sistema de intertravamento, que garante a segurança operacional ao impedir o avanço para blocos ocupados. Esse sistema pode ser microprocessado ou baseado em relés, sendo o último o foco principal deste estudo.

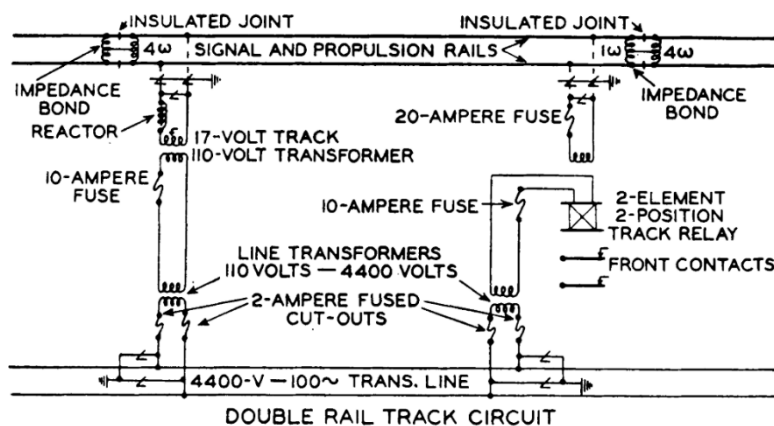
Figura 1 - Blocos de sinalização.



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

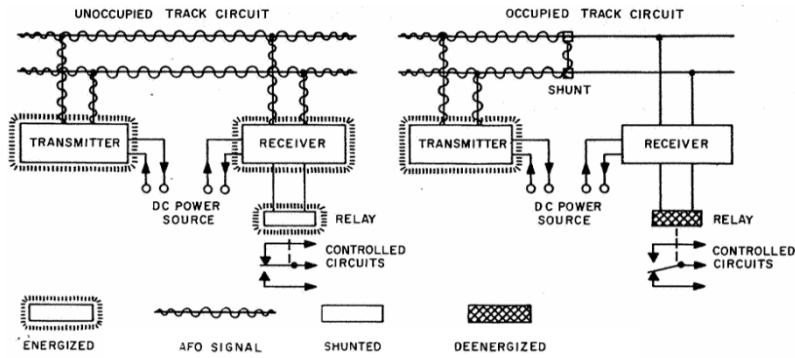
O principal elemento do intertravamento é o circuito de via, responsável por detectar a presença de trens em um bloco. Os circuitos de via convencionais (figura 2) utilizam juntas isolantes (*bonds* de impedâncias) para delimitar o trecho e operam injetando corrente elétrica alternada nos trilhos, energizando um relé na outra extremidade. A presença de um trem causa um curto-circuito, desenergizando o relé e indicando a ocupação do bloco (Reich, 1933). Essa topologia, utilizada desde a década de 1930, continua sendo essencial para a operação ferroviária moderna, com adaptações pontuais observadas em sistemas como os da Linha 12 Safira (CPTM, 2013). Já os circuitos de via de áudio frequência (*Audio Frequency Overlay - AFO*) (figura 3) operam em frequências audíveis e dispensam juntas isolantes, detectando o trem pela interrupção do sinal de frequência transmitido.

Figura 2 - Diagrama geral de um circuito de via de corrente alternada, típico em ferrovias com corrente contínua na tração dos trens.



Fonte: Reich (1933).

Figura 3 - Diagrama geral de um circuito de via de áudio frequência AFO-II.



Fonte: Westinghouse (1976).

Ambos os sistemas (relés e AFO) dependem do contato elétrico entre rodeiros e trilhos para a detecção, o que pode ser comprometido por oxidação ou no caso de veículos leves (Pachl, 2024). Nos sistemas AFO, a escolha cuidadosa das frequências é crucial para evitar interferências entre circuitos adjacentes.

Transformada de Fourier e suas implementações discretas: conceito de acessibilidade e inclusão

A Transformada de Fourier é uma técnica matemática fundamental que permite a análise de sinais contínuos no domínio da frequência. Ela transforma um sinal no domínio do tempo $f(t)$ em um espectro $F(\omega)$, que representa a distribuição de frequências que compõem o sinal (Oppenheim; Willsky, 2010), e é representada pela equação (1):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

onde $F(\omega)$ = espectro do sinal no domínio da frequência, $f(t)$ = sinal no domínio do tempo, e ω = frequência angular em rad/s e $j: \sqrt{-1}$.

Para sequências de duração finita, utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT), descrita como uma sequência de amostras em vez de uma função contínua. A DFT é fundamental para o processamento digital de sinais (Oppenheim; Schafer, 1999) e sua análise é definida pela Equação (2):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad (2)$$

onde $X[k]$ = componente no espectro da frequência no índice k , $x[n]$ = valor do sinal no domínio do tempo no índice n e N = número total de amostras do sinal no domínio do tempo

A Transformada Rápida de Fourier (FFT), um algoritmo eficiente publicado por Cooley e Tukey em 1965, revolucionou o cálculo da DFT ao reduzir significativamente seu custo computacional (Oppenheim; Schafer, 1999). Enquanto a DFT requer $O(N^2)$ operações, a FFT necessita de apenas $O(N \log N)$ operações (Souza et al., 2023), tornando-a amplamente utilizada na detecção de harmônicos e outras aplicações de processamento de sinais (Liu et al., 2011). Os algoritmos de FFT baseiam-se na decomposição recursiva da DFT em partes menores. Uma forma de implementação é dada pela Equação (3):

$$X[k] = \sum_{r=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x[2r] W_{\frac{N}{2}}^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x[2r+1] W_{\frac{N}{2}}^{rk} \rightarrow X[k] = G[k] + W_N^k H[k] \quad (3)$$

$$\text{para } k = \{0, 1, \dots, N-1\}$$

$$\text{onde: } G[k] = \sum_{r=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x[2r] W_{\frac{N}{2}}^{rk} : \text{relacionada às amostras pares e}$$

$$H[k] = \sum_{r=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} x[2r+1] W_{\frac{N}{2}}^{rk} : \text{relacionada às amostras ímpares}$$

Levando em conta o fato de que $G[k]$ e $H[k]$ são periódicas em k , com período igual a $N/2$, ambas as equações são calculadas apenas para valores de k entre 0 e $N/2 - 1$. Após o cálculo de $G[k]$ e $H[k]$, seus resultados são somados (Oppenheim; Schafer, 1999).

Metodologia

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso da FFT na medição de tensão em circuitos de via ferroviários com sinais mistos. Para isso, foi desenvolvido um instrumento de medição com sistema embarcado para aquisição e processamento desses sinais.

O protótipo apresentado na figura 4 é capaz de medir a tensão em circuitos que combinam a frequência fundamental de 60 Hz com a harmônica gerada pelo circuito de via com AFO, permitindo a análise do sinal sem a necessidade de desligar os AFOs.

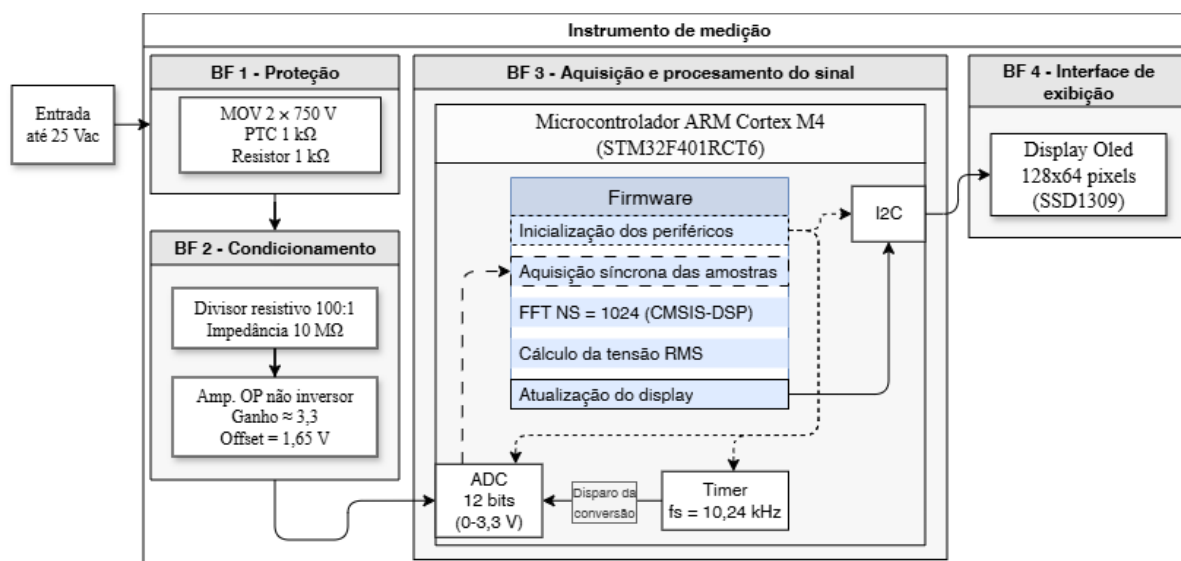
O sinal amostrado é processado por meio da FFT, e a tensão RMS em 60 Hz é exibida, facilitando a regulação correta da tensão que alimenta a bobina de controle do relé Vane.

Figura 4 - Placa eletrônica desenvolvida à esquerda e montagem final à direita.



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Figura 5 – Diagrama com os Blocos Funcionais (BF) da arquitetura do instrumento de medição.



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

A figura 5 apresenta os Blocos Funcionais (BF) com o fluxo de funcionamento do instrumento de medição, onde cada bloco é descrito a seguir:

- BF 1.Circuito de proteção: tem como objetivo limitar e absorver picos de tensão que tenham potencial de danificar o microcontrolador e atenuar a tensão de entrada para níveis seguros aos componentes seguintes;
- BF 2.Condicionamento do sinal: responsável por adequar a tensão de entrada para níveis seguros para o microcontrolador;
- BF 3.Aquisição do sinal e processamento através da FFT: parcela de software embarcado no microcontrolador, responsável pela aquisição do sinal com periodicidade precisa e processamento para o cálculo da tensão desejada;
- BF 4.Interface de exibição: composta por três telas ilustradas pela figura 6, à esquerda temos o valor medido em 60 Hz; ao centro, é exibida a forma de onda sob teste, e à direita é exibido o espectro de frequências. Neste exemplo, é possível observar a medição de um sinal de 4,75 Vrms em 60 Hz, somado a outro de 4,0 Vrms em 790 Hz.

Figura 6 - Telas da interface.



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Aplicação da FFT em software embarcado

Os cálculos da FFT foram realizados utilizando as funções das bibliotecas que integram o pacote ARM CMSIS 5.6.0, disponível ao configurar o microcontrolador utilizando o software STM32 CubeMX.

Para garantir exatidão nos cálculos, o sinal amostrado deve conter ao menos um período completo da frequência desejada. Assim, definiu-se uma janela de 0,1 s para amostragem, suficiente para medir com exatidão o sinal de 60 Hz e obter um espectro com resolução de 10 Hz.

De acordo com o teorema de Nyquist, a frequência mínima de amostragem deve ser o dobro da maior frequência presente no sinal (4000 Hz); portanto, adotou-se 8000 Hz como taxa mínima de amostragem.

O número mínimo de amostras pode ser calculado pela equação (4):

$$NS = FS * T \quad (4)$$

onde: **NS** = número de amostras; **FS** = frequência de amostragem e **T** = período de amostragem.

Assim, o número de amostras calculado será (5):

$$NS = 8000 * 0,1 = 800 \quad (5)$$

Para o cálculo correto, a FFT necessita que o número de amostras seja uma potência de 2; portanto, foi adotado o número de amostras imediatamente superior a 800 e múltiplo de 2^n (6):

$$NS = 2^{10} = 1024 \quad (6)$$

Dessa forma, a frequência de amostragem foi recalculada de modo que o período de amostragem se mantenha fixo (7):

$$FS = \frac{NS}{T} = \frac{1024}{0,1} = 10240 \text{ Hz} \quad (7)$$

Após definir o número de amostras e a frequência de amostragem, um dos temporizadores do microcontrolador foi configurado para operar nessa frequência, disparando uma conversão AD (analógico-digital) a cada ciclo na entrada correspondente. Cada valor convertido é armazenado sequencialmente em um vetor que, ao atingir 1024 posições preenchidas, pausa as conversões para a execução da FFT. Em seguida, os valores são convertidos em tensão, considerando os ganhos e variações dos circuitos externos ao microcontrolador. Essa conversão é feita aplicando-se a equação (8) para cada valor amostrado:

$$V_{entrada} = (N_{adc} * \frac{V_{ref}}{2^{n-1}} - DC_{offset}) * Fe \quad (8)$$

onde: $V_{entrada}$ = tensão analógica de entrada, N_{adc} = saída do conversor analógico digital (0 a 4095), V_{ref} = tensão de referência do conversor (3,3 V), n = resolução do conversor em bits (12 bits), DC_{offset} = tensão presente na entrada do conversor quando a tensão de entrada é igual a 0 V e Fe = fator de escala (valor para calibração das diferenças entre o valor real de tensão na entrada e o valor calculado).

Após o ajuste das tensões de amostragem, é então aplicada a FFT sobre o vetor, utilizando a função `arm_cfft_f32` presente no conjunto de bibliotecas. O resultado é a conversão de um vetor contendo os valores no domínio do tempo em valores no domínio da frequência. Porém, estes valores são representados por números complexos, contendo a parte real e imaginária para cada ponto. Então, a função `arm_cmplx_mag_f32` é aplicada, resultando em um vetor contendo os valores de magnitude de tensão para cada frequência.

Para ajustar a escala das magnitudes no domínio da frequência para que coincidam com as magnitudes no domínio do tempo, é necessário aplicar a seguinte conversão: equações (9) e (10):

$$\text{Para } \left(0 < x < \frac{N}{2}\right): \quad Mag'[x] = \frac{Mag[x]}{\frac{N}{2}} \quad (9)$$

$$\text{Para } \left(x = 0 \text{ ou } x = \frac{N}{2}\right): \quad Mag'[x] = \frac{Mag[x]}{N} \quad (10)$$

Onde:

x = índice do valor calculado.

$Mag[x]$ = magnitude calculada para o domínio da frequência.

$Mag'[x]$ = magnitude calculada equivalente para o domínio do tempo.

N = número de amostras coletadas no domínio do tempo.

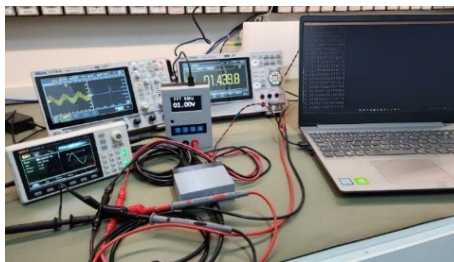
Como resultado, o valor contido em cada índice do vetor final corresponde à magnitude do sinal no domínio do tempo em intervalos de 10 Hz. Para se calcular o valor da tensão RMS associada a cada frequência presente no sinal, o valor armazenado no índice correspondente é dividido por $\sqrt{2}$. Esta abordagem foi adotada para exibir o valor da tensão RMS em 60 Hz na tela inicial da interface, conforme ilustrado na Figura 6.

Resultados e discussões

Verificação da amostragem de sinal e cálculos da FFT

A primeira etapa da validação dos circuitos e códigos desenvolvidos foi realizada através de testes em bancada. Nesses testes, dois canais de um gerador de funções foram conectados a um circuito somador, produzindo, em sua saída, sinais semelhantes aos presentes em circuitos de via ferroviários de 60 Hz com equipamentos AFO instalados.

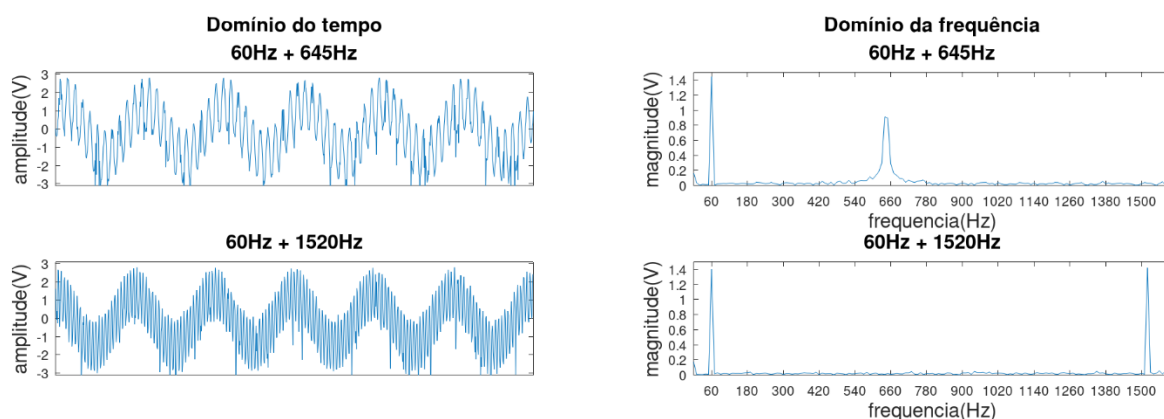
Figura 7 - Montagem em bancada com instrumentos auxiliares para validação das medições.



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Conforme ilustrado na figura 7, foi gerado um sinal de 1 Vrms a 60 Hz, somado às frequências de AFO mais comuns encontradas na Linha 12 da CPTM. O segundo sinal também foi gerado com amplitude de 1 Vrms. Para cada frequência testada, os dados medidos pelo instrumento desenvolvido foram exportados via porta USB e inseridos no software Octave. Posteriormente, os gráficos da forma de onda capturada e da FFT calculada pelo instrumento (figura 8) foram gerados e analisados.

Figura 8 - Gráficos de alguns dos sinais nos domínios do tempo e frequência capturados pelo instrumento desenvolvido.



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

A partir dos gráficos da figura 8, é possível observar que os cálculos da FFT foram realizados corretamente, permitindo distinguir claramente os picos nas frequências que compõem o sinal no domínio do tempo. Para as frequências múltiplas de 10 Hz, como 1520 Hz, a magnitude do sinal foi calculada corretamente, apresentando o pico de 1,41 V ($1 \text{ Vrms} \times \sqrt{2}$), conforme esperado. Para frequências não múltiplas de 10 Hz, observa-se o fenômeno de dispersão espectral, causado pela descontinuidade do sinal na janela de amostragem, gerando componentes espectrais adicionais na FFT, comportamento também relatado por Tian e Zhang (2025). Contudo, tal fenômeno não representa um problema para esta aplicação, uma vez que o objetivo principal de obter medições precisas na frequência de 60 Hz foi alcançado.

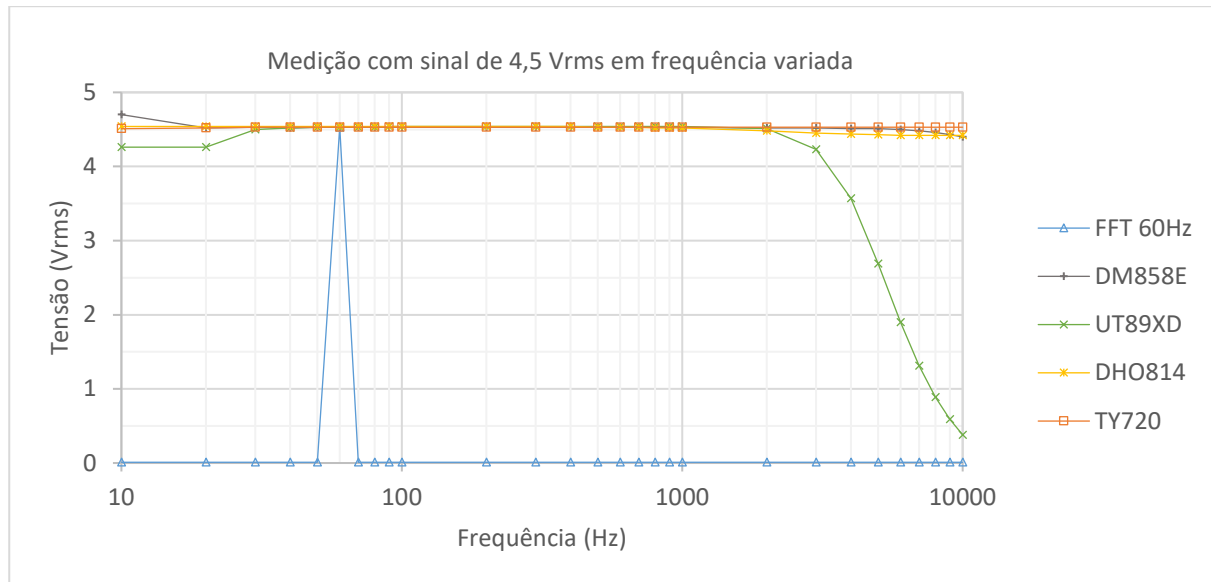
Testes comparativos entre instrumentos

Neste teste foram utilizados, além do instrumento desenvolvido, um multímetro de uso geral (Uni-T UT89XD), um multímetro de bancada (Rigol DM858E), um multímetro de aplicação industrial (Yokogawa TY720) e um osciloscópio (Rigol DHO814).

Com o objetivo de avaliar a resposta em frequência dos instrumentos, o primeiro teste foi executado com o uso de um gerador de funções conectado aos instrumentos, onde foi gerado um sinal senoidal de 4,5 Vrms com frequência ajustada manualmente em escala logarítmica, de modo a se obter um Diagrama de Bode contendo tensões medidas nas frequências de 10 Hz a 10.000 Hz. O valor de 4,5

Vrms foi escolhido por representar o valor central entre as tensões mínima (4 Vrms) e máxima (5 Vrms) aceitáveis definidas no procedimento interno da CPTM para ajuste de circuitos de via baseados no relé Vane, modelo PV-250.

Figura 9 - Resultados da medição de 4,5 Vrms em diversas frequências com os instrumentos testados.

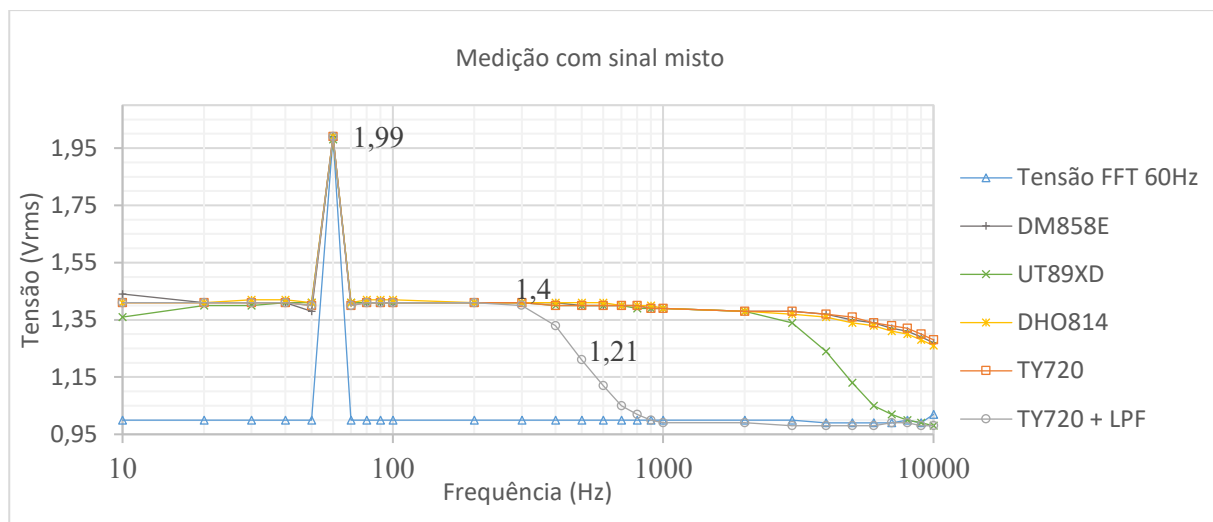


Fonte: elaborado pelos autores (2025).

No gráfico da figura 9, observa-se que o instrumento desenvolvido apresentou valor de tensão apenas quando o sinal medido estava em 60 Hz, sem ser influenciado por outras frequências. Já o multímetro UT89XD apresentou valores inconsistentes abaixo de 30 Hz e acima de 2.000 Hz, indicando que medições fora dessa faixa não são confiáveis para esse instrumento.

Para avaliar o comportamento dos instrumentos com sinais sobrepostos de diferentes frequências, dois canais do gerador de funções foram conectados a um circuito somador. O sinal 1 foi gerado em 60 Hz com 1 Vrms fixo, e o sinal 2, com a mesma amplitude, porém com frequência variando de 10 Hz a 10.000 Hz, permitindo a construção do Diagrama de Bode exibido na figura 10.

Figura 10 - Resultados das medições com a tensão de 1 Vrms em 60 Hz, somado a 1 Vrms em frequências variadas.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

A partir do gráfico na figura 10, nota-se que o instrumento desenvolvido manteve a leitura de 1 Vrms, mesmo com o segundo sinal sobreposto. Quando as duas frequências coincidiram, todos os instrumentos passaram a exibir 1,99 Vrms, como esperado. Nas demais frequências, até 2000 Hz, os instrumentos comerciais indicaram tensões entre 1,38 e 1,44 Vrms.

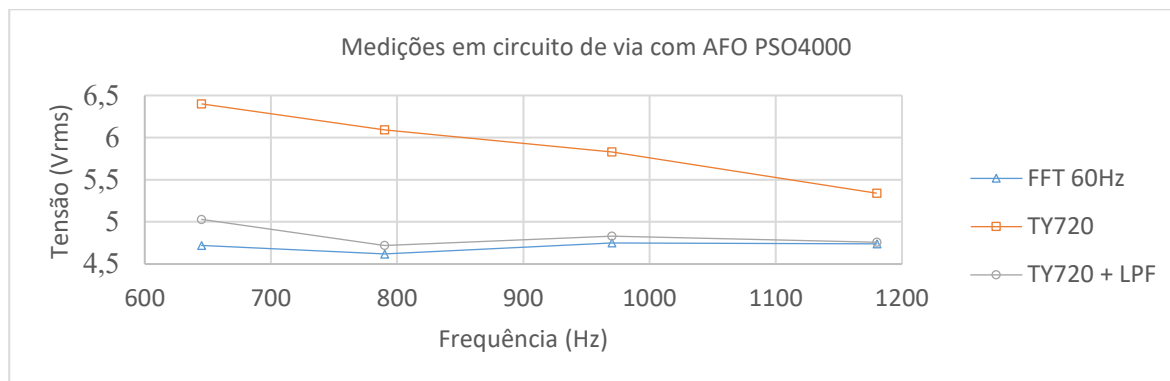
Medições realizadas em ambiente controlado

Após a análise comparativa, foram conduzidos testes em ambiente controlado, utilizando um circuito de via real com relé PV-250 sobreposto a um circuito com AFO, modelo PSO4000, fabricado pela Siemens. Este modelo de AFO permite a configuração da frequência de operação, simplificando a execução de testes com diversas frequências diferentes sem a necessidade de se substituir os equipamentos.

Para a realização do teste, o AFO foi desligado e o circuito de via ajustado de modo que a tensão na bobina de controle do relé ficou em 4,75 V e então o AFO foi religado.

Foram realizadas medições de tensão diretamente no ponto conectado à bobina de controle do relé PV-250 e a configuração de frequência foi ajustada no AFO de modo que, para cada frequência, foi coletada uma medição com o instrumento desenvolvido e o multímetro TY720 operando com e sem seu filtro passa-baixas (LPF); o resultado é exibido no gráfico da figura 11.

Figura 11 - Medições realizadas comparando o instrumento desenvolvido e o multímetro TY720 com e sem o filtro passa-baixas (LPF) ligado.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Baseando-se nas curvas apresentadas, observa-se que o multímetro TY720 apresentou uma variação de cerca de 35,6 % na tensão medida em relação à medição com FFT quando o AFO operava em frequências mais baixas. Com o filtro passa-baixas ativo (TY720+LPF), essa diferença caiu para 6,6 % na presença da frequência de 645 Hz. Conforme a frequência do AFO aumenta, as diferenças tendem a diminuir.

Testes em campo

Para validar o instrumento em condições reais, foram feitas medições em dois circuitos de via com equipamentos AFO PSO4000 operando nas frequências de 645 Hz e 790 Hz.

As medições compararam os valores exibidos pelo instrumento desenvolvido com aqueles obtidos pelo multímetro TY720 atuando com e sem seu filtro passa-baixas ativado. Como parâmetro de referência, também foram realizadas medições com os equipamentos AFO desligados. Os resultados obtidos serviram de base para a elaboração da Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados das medições em campo				
Medição		AFO Desligado (Vrms)	AFO Ligado (Vrms)	Diferença (%)
Circuito 1 (60Hz+645Hz)	FFT 60Hz	4,52	4,53	0,22
	TY720	4,49	4,60	2,45
	TY720+LPF	4,51	4,54	0,67
Circuito 2 (60Hz+790Hz)	FFT 60Hz	4,50	4,55	1,11
	TY720	4,49	5,03	12,03
	TY720+LPF	4,48	4,58	2,23

Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Para identificar as diferenças entre as medições no circuito com o AFO ligado e desligado foi aplicada a equação (11):

$$Diferença(\%) = \frac{AFO\ Ligado - AFO\ Desligado}{AFO\ Desligado} \times 100 \quad (11)$$

Os dados apresentados na Tabela 1 mostram que a medição de tensão com uso da FFT foi a que apresentou as menores diferenças percentuais entre as medições com AFO ligado e desligado, sendo menos suscetível a alterações causadas pela presença de frequências diferentes somadas ao sinal de interesse.

Além de medições de tensão, o instrumento também foi aplicado em situações de falha, nas quais o AFO não indicava circuito livre, mesmo sem a presença de trem. O gráfico espectral foi usado para verificar a existência de outra frequência, embora apenas a de 60 Hz tivesse sido detectada. Após o reparo do cabo entre o AFO transmissor e os trilhos, a frequência do AFO passou a ser visível, demonstrando mais uma aplicação prática da FFT na ferrovia.

Considerações finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação de um instrumento de medição com sistema embarcado, capaz de medir tensões RMS em circuitos de via mistos com sinais de 60 Hz combinados com harmônicas de áudio frequência (AFO). Utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), a solução demonstrou ser eficaz ao permitir medições precisas sem a necessidade de desligar os AFOs, superando um dos principais obstáculos das manutenções em sistemas com relés Vane e circuitos de áudio frequência.

Os testes mostraram que o instrumento apresentou desempenho confiável, isolando com precisão a frequência de 60 Hz mesmo na presença de outras harmônicas. Em comparação com equipamentos comerciais, atendeu às exigências técnicas do ajuste de tensões em campo, com resultados consistentes. Seu design compacto, interface intuitiva e alimentação por bateria o tornaram prático e eficiente para aplicações em campo.

Por outro lado, a aplicação da FFT exige recursos de hardware, como memória proporcional ao número de amostras e capacidade de processamento rápido, o que limita seu uso em sistemas com restrições computacionais.

O desenvolvimento foi baseado nas frequências utilizadas na linha estudada, mas AFOs podem operar em até 20.000 Hz. Assim, apesar dos resultados promissores, há espaço para melhorias que ampliem a aplicabilidade da solução no contexto ferroviário. Uma possível evolução seria a integração de algoritmos adaptativos e softwares para análise e armazenamento em tempo real, além da aplicação de uma técnica para redução da dispersão espectral, como a proposta por Tian e Zhang (2025).

Referências

CPTM. **Folha de dados para execução de regulação de CDV's nas linhas da CPTM**, Set 2013.

Documento interno não publicado.

DÓRDOLO, Lucas et al. Modular system for the monitoring of railway signaling equipment, **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 2, p. 280-287, Fev. 2020.

DOI: 10.1109/TLA.2020.9085281.

HAVAEI, Pedram; SANDIDZADEH, Mohamed. A New Design for Audio Frequency Track Circuits using Rail Resistance in Oscillator. **International Journal of Railway Research**, v. 9, n. 2, p. 47-60, Dez. 2022. DOI: 10.22068/ijrare.312.

LIU, Y.; JIANG, B.; WANG, C.; GENG, S. Power system harmonic analysis based on windowed FFT and wavelet transform. 2011 **4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)**, p. 225–228, Jul. 2011. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5993893.

OGUNSOLA, A.; REGGIANI, U.; SANDROLINI, L. Demonstrating signaling compatibility between two train control systems. 2007 **18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility**, p. 361–364, Set. 2007. DOI: 10.1109/EMCZUR.2007.4388270

OPPENHEIM A. V.; SCHAFER R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1999.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY A. S. **Sinais e sistemas**. São Paulo, Pearson, 2010.

PACHL, J. **Railway Signalling Principles**: Edition 3.0. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2024. DOI: 10.24355/dbbs.084-202405240811-0.

PALUMBO, M. **Railway Signaling since the Birth to ERTMS**. Railway Signaling Europe, p. 1–6, 2013. Disponível em: http://www.railwaysignalling.eu/wp-content/uploads/2013/11/Railway_Signalling_since_birth_to_ERTMS.pdf. Acesso em: 13 out. 2024.

REICH, E. W.; WRIGHT, G. I. Modern railway signaling. **Electrical Engineering**, v. 52, n. 10, p. 712–715, Out. 1933. DOI: 10.1109/EE.1933.6430454.

SOUZA, Gustavo et al. Implementação de FFT de 1600 pontos em microcontrolador ARM Cortex-M7 para cálculo de harmônicas em sistema elétrico trifásico. In: **COMPUTER ON THE BEACH**, 14, 2023, Florianópolis. Anais. Florianópolis: UNIVALI, 2023. p. 187–193. DOI: 10.14210/cotb.v14.p187-193.

TIAN, Yidong; ZHANG, Cheng. An Improved Accuracy Harmonic Extraction Method for Microcontrollers, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 72, n. 5, p. 5344-5352, Mai. 2025. DOI: 10.1109/TIE.2024.3472288.

WESTINGHOUSE AIR BRAKE COMPANY. **Service Manual 5906**: Installation, application and maintenance of Audio Frequency Overlay (AFO-II equipment), Jan. 1976. Disponível em: <https://globalproductssupport.sts.hitachirail.com/productsegments/waytrainsep/servicemanuals/usa/public/5906.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.