



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

FORÇA DE MOVIMENTO DAS PSD'S: CORRELAÇÃO COM A CORRENTE E APLICAÇÕES EM MONITORAMENTO CONTÍNUO

INTRODUÇÃO

O sistema de Portas de Plataforma (PSD, do inglês *Platform Screen Doors*), é uma inovação composta por fachadas, portas automáticas e portas de saída de emergência instaladas nas plataformas de estações, especialmente em sistemas de metropolitano (popularmente chamados de metrô, ou ainda do inglês, *subway*), monotrilhos e Veículo Leve sobre Trilhos (VLTs), como é mostrado por Roh et al. (2010).

Existem várias razões que justificam a implementação desse sistema nas estações, sendo as principais:

- Maior segurança para os passageiros, prevenindo quedas acidentais ou voluntárias na via, independentemente da causa;



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- Impedimento da entrada indevida de usuários nos túneis;
- Melhor preservação da via e maior disponibilidade de trens, ao evitar que usuários depositem lixo e/ou objetos que possam obstruir a circulação dos trens;
- Aperfeiçoamento da climatização da plataforma ao impedir a entrada de chuva e ventos fortes.

Dada a importância desse sistema, especialmente no que concerne à segurança dos usuários, é crucial que ele tenha um número reduzido de falhas. Assim como outros sistemas críticos para o funcionamento adequado do transporte metroferroviário, um dos principais objetivos das equipes de manutenção é evitar ao máximo a necessidade de intervenções corretivas durante o período de operação comercial. Para isso, é essencial ter um sistema de monitoramento contínuo capaz de fornecer dados sobre as condições reais dos equipamentos. Com o devido pré-processamento, tratamento e análise desses dados, é possível obter informações precisas sobre a saúde dos equipamentos. Antes de aprofundar em detalhes o funcionamento do sistema de PSD vale uma breve revisão dos principais sistemas com os quais ele interage diretamente, facilitando o entendimento da importância e relevância na qual as PSDs se encontram no sistema metroferroviário como um todo.

Este artigo será dividido em duas principais partes (experimentos com as PSDs e Sistema de monitoramento e preditivo das PSDs) e seguirá o seguinte esquema: Primeiro será



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

feita uma introdução dos principais sistemas relacionados às PSDs, bem como o próprio sistema das PSDs. Em seguida, será descrito, apresentado e analisados os experimentos relacionando a força necessária para a movimentação das PSDs e a corrente do motor responsável pelo movimento. Por fim, como esses experimentos se fazem crucial no monitoramento contínuo das PSDs e como esse sistema de monitoramento pode ser usado na manutenção preditiva e auxiliando equipes de manutenção das concessionárias de sistemas metroferroviário.

PRELIMINARES

Um sistema metroferroviário é constituído pela integração de vários subsistemas, os quais operam em conjunto para assegurar o funcionamento seguro do modal de transporte, segundo Maia (2005). Entre os principais subsistemas, merecem destaque os Sistemas de Controle e Operação de Trens e o Sistema de Portas de Plataforma.

SISTEMAS DE CONTROLE E OPERAÇÃO DE TRENS

Este sistema desempenha um papel fundamental no controle de velocidade, programação e liberação de trens nas linhas. Uma variedade de tecnologias é empregada, cada uma utilizando diferentes métodos para realizar essas funções. Segundo Alouche & Nakagawa (2013), as mais significativas e amplamente adotadas incluem: o Sistema Automático de Controle de Trens (ATC, do inglês *Automatic Train Control*), o Sistema de Operação Automática de Trens (ATO, do inglês *Automatic Train*



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Operation) e o Sistema de Controle de Trens Baseado em Comunicação (CBTC, do inglês *Communication-Based Train Control*), que serão detalhadas a seguir:

- O ATC opera com base em blocos fixos, que são segmentos ao longo da via com dimensões aproximadas às de um trem. Suas funções principais incluem:
 - Leitura da velocidade do trem e da velocidade máxima permitida no bloco;
 - Controle seguro dos freios;
 - Controle das Máquinas de Mudança de Via (também conhecidas como Máquinas de Chave), responsáveis pela alteração das rotas dos trens;
 - Comunicação com o ATO;
 - Regulação da velocidade do trem de acordo com o código de velocidade transmitido pela via.
- O ATO é encarregado da operação automática dos trens, incluindo a abertura e fechamento de portas nas estações, controle das paradas, e restrições de velocidade na via. A integração entre o ATC e o ATO possibilita a operação automática dos trens, implementando vários mecanismos de segurança, como redundâncias e intertravamentos, para garantir a operação segura dos trens.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- O CBTC é um sistema de controle de trens mais avançado que o ATC/ATO. Ao contrário do ATC, onde o trem apenas recebe informações da via, no CBTC, os trens possuem antenas e módulos que permitem a comunicação entre si, resultando em um controle baseado em comunicação. Isso permite que a operação automática dos trens seja essencialmente conduzida pela comunicação entre eles, com um sistema secundário de segurança utilizando balizas ao longo da via para atualizar a posição do trem em caso de falha na comunicação entre os trens, garantindo a distância mínima entre eles. Uma das vantagens dessa comunicação entre trens é a eliminação da necessidade de blocos fixos ao longo da via, como no ATC.

SISTEMA DE PORTAS DE PLATAFORMA (PSD)

O sistema PSD se comunica tanto com o ATC quanto com o CBTC, dependendo do tipo de sistema de controle de trens utilizado na linha em questão. Em cada plataforma, é instalada uma fachada de portas de plataforma, composta por 24 módulos PSD. Cada módulo possui os componentes mostrados na Figura 1 e descritos a seguir:

1. **Header Box:** Local onde estão os componentes responsáveis pelo controle, movimentação, segurança e sinalização do módulo PSD. Aqui fica o motor elétrico, principal componente responsável pela movimentação das portas.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2. **Porta Deslizante Motorizada (PDM):** Constituída por duas folhas deslizantes responsáveis pela abertura e fechamento, permitindo a passagem dos usuários entre o trem e a plataforma.
3. **Porta de Emergência (PEE):** Utilizada em situações de emergência, permite que o usuário a abra facilmente, por exemplo, apoiando-se na Barra Anti-Pânico, para acessar a plataforma. A barra Anti-Pânico está localizada do lado da via na PEE.
4. **Painel Fixo (PFX):** Completa o módulo, sendo uma folha fixa de vidro especial de alta resistência, garantindo o fechamento completo da fachada da plataforma.
5. **Barra Anti-Pânico:** Barra responsável pela fácil abertura da PEE.

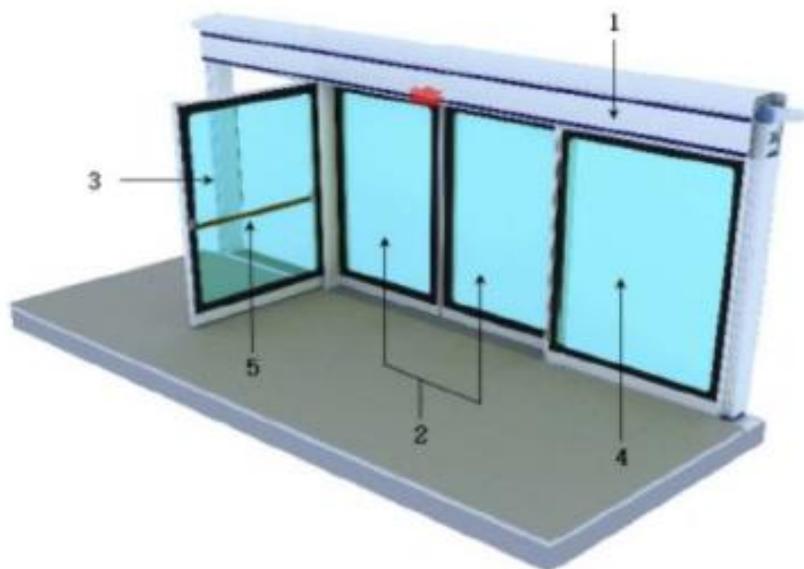


Figura 1 - Representação de uma PSD. Imagem retirada de Diniz et al. (2014)



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

OBJETIVO

A investigação das relações entre a força exigida para operar as Portas de Plataforma e a corrente elétrica de arrasto do motor responsável pelo movimento pode revelar descobertas significativas para as equipes de manutenção no contexto do transporte metroferroviário. A análise dos dados indica uma correlação linear robusta entre essas variáveis, destacando a importância dessa relação na gestão eficaz da manutenção das PSDs. Além disso, observou-se que as correntes de pico e de manutenção (quando aplicável) pouco se alteram com as variações na força necessária para o movimento. Este estudo sugere que estabelecer uma relação direta entre a corrente elétrica do motor, especialmente a corrente de arrasto, e a força requerida pode proporcionar uma base sólida para aprimoramentos na manutenção preventiva das portas. A possibilidade de coletar e enviar automaticamente dados de corrente elétrica por meio de sensores para monitoramento remoto representa um avanço significativo rumo à manutenção preditiva das PSDs, contribuindo para a otimização da mão de obra de manutenção.

O foco deste trabalho recai sobre o motor elétrico, situado no *Header Box* da PSD, responsável pela operação (abertura e fechamento) das portas. Trata-se de um motor elétrico de corrente contínua, com capacidade de rotação em ambos os sentidos e controlado por Modulação por Largura de Pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*). Essa técnica, de acordo com Dubey (2001) é uma das principais formas de



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

controlar digitalmente um atuador de corrente contínua. Através do controle do tempo em que o sinal permanece em estado *HIGH* ou *LOW*¹ é possível regular a rotação e o torque do motor por meio da média dos valores. Quando ativado, o rotor executa rotações precisas. Este rotor é conectado a um redutor, que, por sua vez, está ligado a uma correia. Ao girar, a correia movimenta as folhas da PDM. Tanto a regulação da rotação do rotor quanto o torque são controlados pelo MCP (do inglês *Motor Controller Processor*), também localizado no *Header Box* da porta. As características desse controle são configuradas no próprio *firmware* do MCP, garantindo que a curva de corrente do motor siga um padrão tanto na abertura quanto no fechamento da porta.

DIAGNÓSTICO

Com o propósito de estabelecer uma relação entre as grandezas físicas em questão (força de movimento das portas e corrente elétrica do motor), se faz necessário realizar a coleta de dados em campo para obter valores reais que permitam uma análise adequada. Esta parte experimental do trabalho está estruturada da seguinte maneira:

- Definição dos conceitos e Validação dos métodos de coleta;
- Estatísticas utilizadas;

¹ Em eletrônica digital, HIGH e LOW são termos usados para quando um sistema possui e não possui um determinado nível de tensão, respectivamente.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- Medições em campo;
- Análise e apresentação dos dados.

DEFINIÇÃO DOS CONCEITOS E VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS DE COLETA

Tão importante quanto os dados é a garantia de que os valores obtidos em campo refletem com certo grau de fidelidade as grandezas que estão sendo medidas. Para isso, foram desenvolvidos internamente no Metrô-SP, dois componentes cruciais para o restante do trabalho, são eles: Sensor de corrente, capaz de captar os valores de corrente do motor, condiciona-los para níveis adequados e envia-los e o coletor de dados (MDL, sigla para Metrô Data Logger) responsável por receber, processar e enviar os dados recebidos pelo sensor de corrente. A Figura 2 mostra o esquema de ligação entre os componentes: Motor da PSD – Sensor de corrente – Coletor de dados.

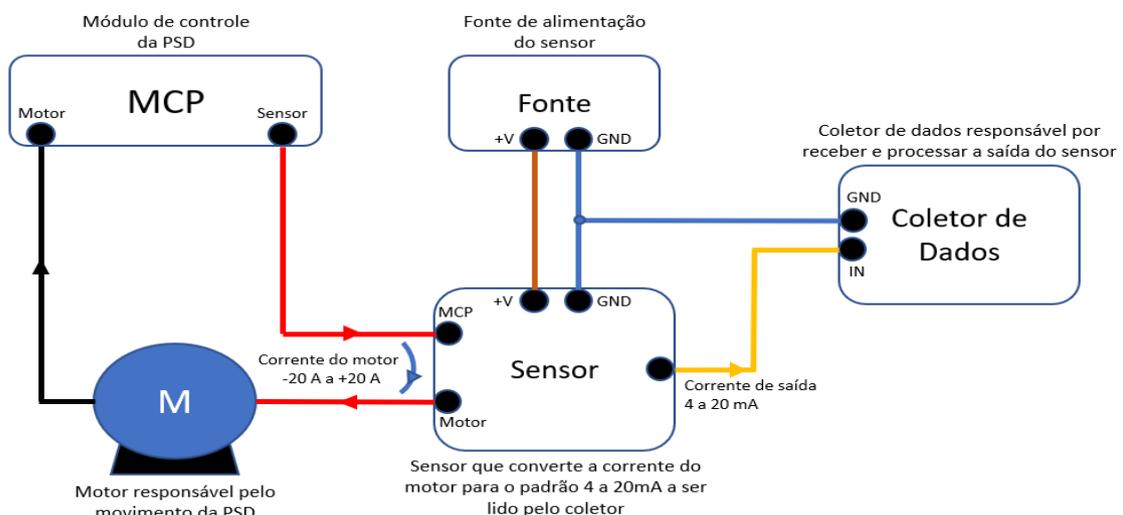


Figura 2 - Esquema de ligação do conjunto responsável pela medição e coleta da corrente do motor da PSD

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

SENSOR DE CORRENTE E COLETOR DE DADOS

Para a coleta dos dados da corrente elétrica do motor da PSD, um sensor capaz de “ler” a corrente que o motor consome e um coletor capaz de receber e interpretar este sinal são necessários. Foi então desenvolvido um sensor pela Companhia do Metropolitano de São Paulo com esse propósito. Mais objetivamente, o sensor é capaz de receber na sua entrada uma corrente elétrica contínua que pode variar de $-20A$ até $+20A$, fornecendo em sua saída uma corrente proporcional variando no padrão de 4 a $20mA$, conforme o esquema da Figura 2. A Figura 3 mostra o circuito impresso da placa do sensor e o sensor já montado e a Tabela 1 mostra os valores de conversão.

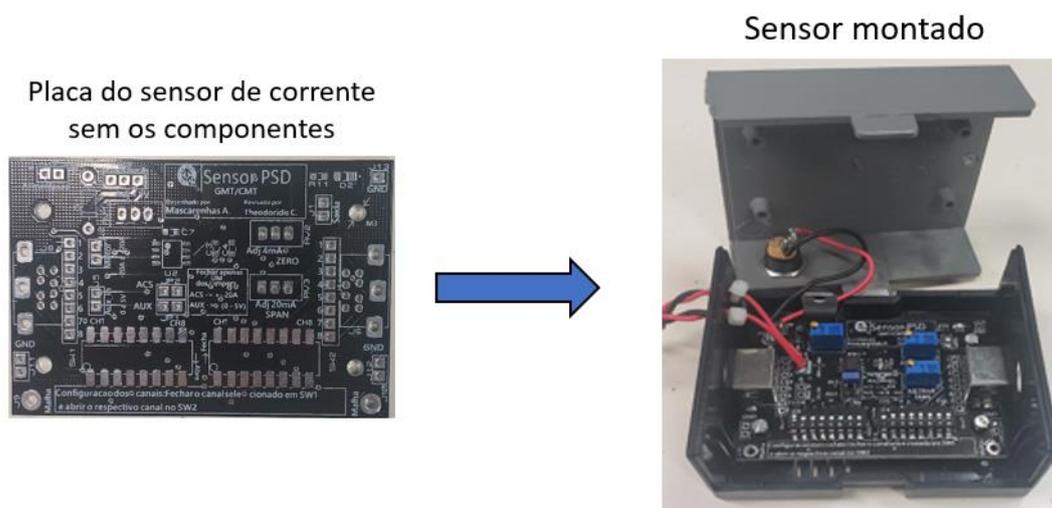


Figura 3 - Sensor de corrente para o motor das PSDs. Na esquerda, a placa do sensor sem os componentes. Na direita, o sensor montado já com os componentes e na caixa.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 1 - Correspondência entre os valores de entrada e saída do sensor de corrente

Corrente de entrada no ACS (A)	Corrente de saída do sensor (mA)
-20	4
-15	6
-10	8
-5	10
0	12
5	14
10	16
15	18
20	20

Um experimento com o intuito de testar a linearidade do sensor foi realizado, onde foi introduzida uma corrente controlada na entrada, variando de $-7A$ a $7A$ (pois essa é a faixa principal de correntes que os motores das PSDs atuam). A Figura 4 mostra um gráfico com os 71 pontos levantados e é possível ver que o comportamento do sensor foi bem próximo de uma reta.

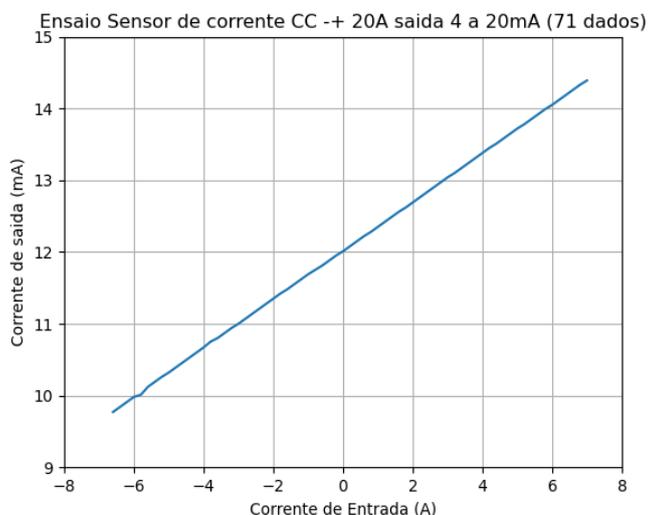


Figura 4 - Gráfico da relação da corrente de entrada com a corrente de saída do sensor, demonstrando a linearidade do mesmo.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Podemos então estabelecer a equação de conversão da corrente de saída do sensor com a corrente real de entrada, que no nosso caso equivale a corrente do motor da PSD. Esta relação é dada pela Equação abaixo:

$$CM(c) = (c - 12) * 2.5$$

Onde, $CM(c)$ (em A) é a corrente calculada no motor para determinada corrente c (em mA) na saída do sensor.

Uma vez que o sensor já foi desenvolvido e validado, o próximo componente a ser definido é o coletor de dados. Para esse, foi usado o coletor de dados também desenvolvido pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, o MDL (Metrô Data Logger). Este consiste em um coletor de dados modular baseado com processador ARM e que possui além de entradas digitais e analógicas para sensores de diferentes tipos, saídas para comunicação em rede e outros protocolos de comunicação como I2C, SPI e Bluetooth. O coletor pode ser visto na Figura 5.



Figura 5 - Coletor de dados MDL utilizado para receber, processar e enviar os dados provenientes do sensor de corrente

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A fim de validar o conjunto de hardware desenvolvido (sensor de corrente + coletor de dados), foram efetuados alguns testes comparativos utilizando um instrumento certificado e calibrado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo.

Basicamente o teste consiste em coletarmos a corrente do motor da PSD durante um ciclo de abertura e fechamento de uma porta, com tanto o nosso conjunto de monitoramento desenvolvido como o instrumento calibrado, realizando a medida ao mesmo tempo. A Figura 6 mostra a configuração do teste.

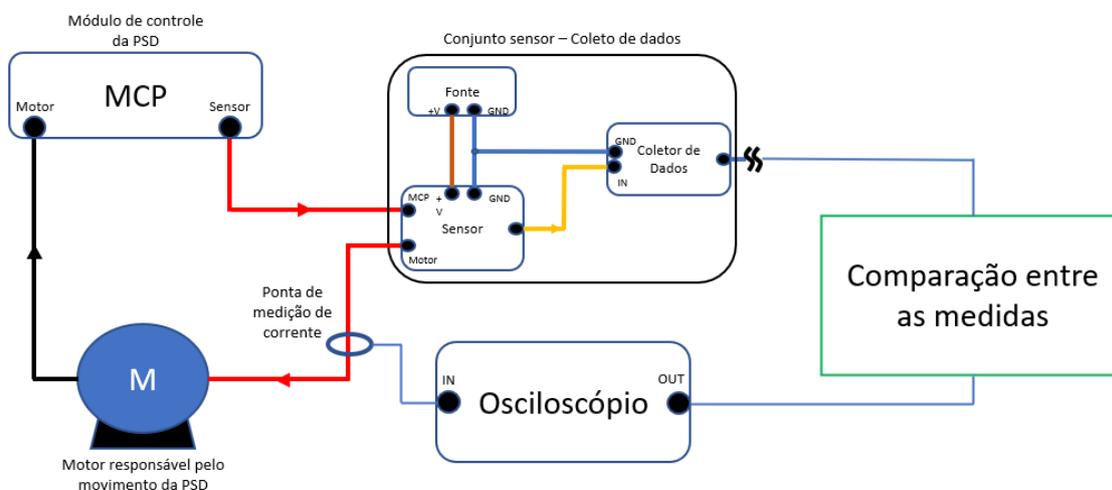


Figura 6 - Configuração do teste de comparação do conjunto desenvolvido e instrumento calibrado

O instrumento utilizado para a comparação e validação do teste foi o osciloscópio Tektronix TDS3034c. Na Figura 7 é mostrado a comparação das duas curvas de corrente levantadas por ambos os dispositivos na porta P62 da estação Vila Matilde da linha 3 – Vermelha do Metrô de São Paulo.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

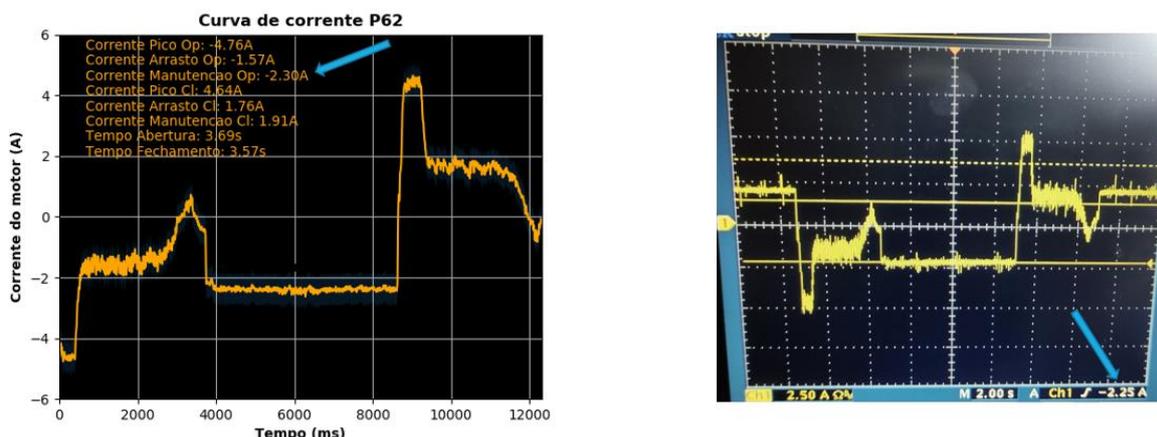


Figura 7 - Esquerda: Curva de corrente do motor obtida pelo coletor de dados MDL. Direita: Curva de corrente do motor obtida com osciloscópio Tektronix TDS3034c calibrado pelo CMSP. O coletor MDL possui circuitos de filtro passa-baixa o que retira ruídos do sinal quando comparado com o sinal medido pelo osciloscópio. As setas azuis indicam a corrente de manutenção de porta aberta nos dois casos, mostrando a confiabilidade e validando as medidas (dada as tolerâncias) obtidas pelo MDL.

Pela comparação das duas curvas de corrente e seus valores é possível constatar a validade dos valores e dados obtidos pelo conjunto sensor-coletor de dados. Sendo que a da esquerda foi processada e gerada internamente no coletor de dados, é ainda possível notar que devido aos filtros passa-baixa presentes no sensor e também nos módulos de entrada analógicos do coletor, o sinal possui menos ruído de alta frequência.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CARACTERÍSTICAS DA CURVA DE CORRENTE

Com um sistema de aquisição validado será agora falado em mais detalhes sobre a curva de corrente propriamente dita. A curva da corrente elétrica do motor responsável pela movimentação das PSDs possui um formato e intervalo de valores conhecidos e limitados. Essa curva é representada na Figura 8, onde estão demarcadas algumas regiões que correspondem às fases do ciclo de abertura e fechamento da porta.

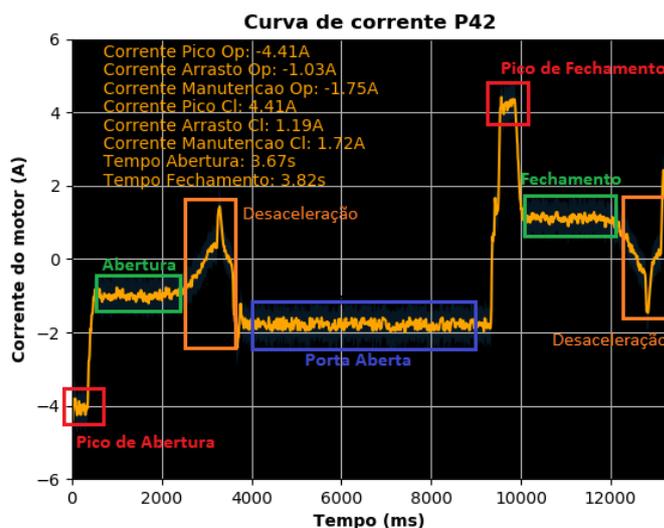


Figura 8 - Curva de corrente do motor da porta P42 de Vila Matilde (VTD) em um ciclo de abertura e fechamento, e a demarcação das regiões que representam as fases ciclo

Para o objetivo deste trabalho, as fases do ciclo da curva que são de maior importância incluem os picos, os momentos de abertura e fechamento e a fase em que a porta está aberta e fechada. Para relacionar essas regiões com a corrente elétrica do motor nelas, é estabelecida as seguintes seções:



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Picos de abertura e fechamento: Calcula-se a média simples dos valores de corrente elétrica correspondentes aos picos de abertura e fechamento do ciclo. Esse valor é denominado Corrente de pico;

Abertura e fechamento: Calcula-se a média simples dos valores de corrente elétrica correspondentes à abertura e fechamento do ciclo. Esse valor é denominado Corrente de arrasto;

Porta aberta: Calcula-se a média simples dos valores de corrente elétrica correspondentes aos momentos de porta aberta e porta fechada. Esse valor é denominado Corrente de manutenção.

ESTATÍSTICAS UTILIZADAS

A estatística utilizada para quantificar a relação entre a força necessária para a movimentação das PSDs e a corrente elétrica do motor é o coeficiente de correlação linear de Pearson. Esse coeficiente fornece um valor entre -1 e 1, onde o valor 1 representa uma forte correlação linear positiva, como explicado por Bhandari (2021). Isso significa que, se houver uma variação positiva no valor de uma variável, haverá também uma variação positiva no valor da outra variável relacionada. Por outro lado, uma relação negativa implica o oposto como explica Bewick et al. (2003). A Tabela 1 mostra as faixas possíveis do coeficiente e suas respectivas forças de correlação e tipos.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 2 - Interpretação do coeficiente de correlação linear

Coeficiente de correlação	Força da correlação	Tipo da correlação
-1 a -.7	Muito forte	Negativa
-.7 a -.5	Forte	Negativa
-.5 a -.3	Moderada	Negativa
-.3 a 0	Fraca	Negativa
0	Nenhuma	Zero
0 a .3	Fraca	Positiva
.3 a .5	Moderada	Positiva
.5 a .7	Forte	Positiva
.7 a 1	Muito Forte	Positiva

Segue abaixo as fórmulas utilizadas para calcular o coeficiente de correlação linear de Pearson e seu intervalo de confiança:

- **Coeficiente de Correlação:**

$$r_{xy} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Onde, r_{xy} é o coeficiente de correlação; n é o número de amostras; x e y são os valores das duas variáveis para cada observação; $\sum xy$ é a soma dos produtos dos valores das variáveis; $\sum x$ e $\sum y$ são as somas dos valores das variáveis x e y respectivamente e $\sum x^2$ e $\sum y^2$ são as somas dos quadrados dos valores das variáveis x e y respectivamente.

- **Intervalo de confiança para o coeficiente de correlação linear:**

$$r \pm z_{\alpha} \frac{1}{2 \sqrt{n-3}}$$



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Onde $z_{\frac{\alpha}{2}}$ é o valor crítico associado ao nível de confiança $1 - \alpha$ (por exemplo, para um nível de confiança de 95%, $\alpha = 0.05$, $z_{\frac{\alpha}{2}} = 1.96$) como explicado em NCSS (2022), e n é o número de observações.

Essas fórmulas são usadas para calcular o coeficiente de correlação linear de Pearson e seu intervalo de confiança, permitindo avaliar a força e significância da relação entre as variáveis.

MEDIÇÕES EM CAMPO

Os dados das grandezas físicas, força e corrente elétrica, foram coletados em campo por meio de medições realizadas em três PSDs diferentes (P42, P62, P64) na plataforma 2 da estação Vila Matilde, da Linha 3 - Vermelha do Metrô de São Paulo. Abaixo está descrito o método utilizado para obter esses dados:

Para medir a força necessária para movimentar as portas, foi utilizado o Dinamômetro Digital Portátil mod. DD-300 calibrado pela CMSP. Esse dispositivo opera com base na lei de Hooke, onde o alongamento de um material elástico está diretamente relacionado à força aplicada, mais informações a respeito do funcionamento deste instrumento podem ser consultadas em Dinamômetro (2017). Ao puxar a PDM de uma PSD com o dinamômetro, é possível determinar a força necessária para realizar o movimento. Já para obter a corrente relacionada ao movimento realizado, o conjunto sensor - coletor



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de dados foi instalado e deixado coletando os dados da corrente durante as movimentações.

Para obter diferentes valores de força necessária para movimentar a mesma PSD, foram realizados pequenos ajustes em seus componentes mecânicos para dificultar a movimentação da porta, aumentando assim a força necessária para realizar o movimento.

O procedimento adotado foi gradativamente aumentar a força necessária para a movimentação e, para cada mudança, coletar a curva de corrente do motor. Dessa forma, foi possível gerar um conjunto de dados para cada uma das três PSDs.

ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS DADOS DO EXPERIMENTO

Dado que o objetivo deste trabalho é investigar a relação entre as grandezas físicas - força de movimentação das PSDs e corrente elétrica do motor da porta - será calculado o coeficiente de correlação linear de Pearson, conforme explicado na seção sobre a estatística utilizada. Isso nos permitirá analisar quantitativamente a força e a natureza dessa relação, partindo do pressuposto de que ela é linear. Além disso, será realizada uma regressão linear dos valores das tabelas, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), para obter uma reta que descreva essa relação. Como temos inicialmente três correntes elétricas - corrente de pico, corrente de manutenção e



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

corrente de arrasto - serão realizados cálculos e gráficos das relações da força de movimentação com essas três correntes de forma independente.

Os valores dos coeficientes com intervalo de confiança de 95%, juntamente com os gráficos dos dados e suas respectivas retas aproximadas por MMQ, estão apresentados para cada PSD nas Figuras de 9 a 11.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

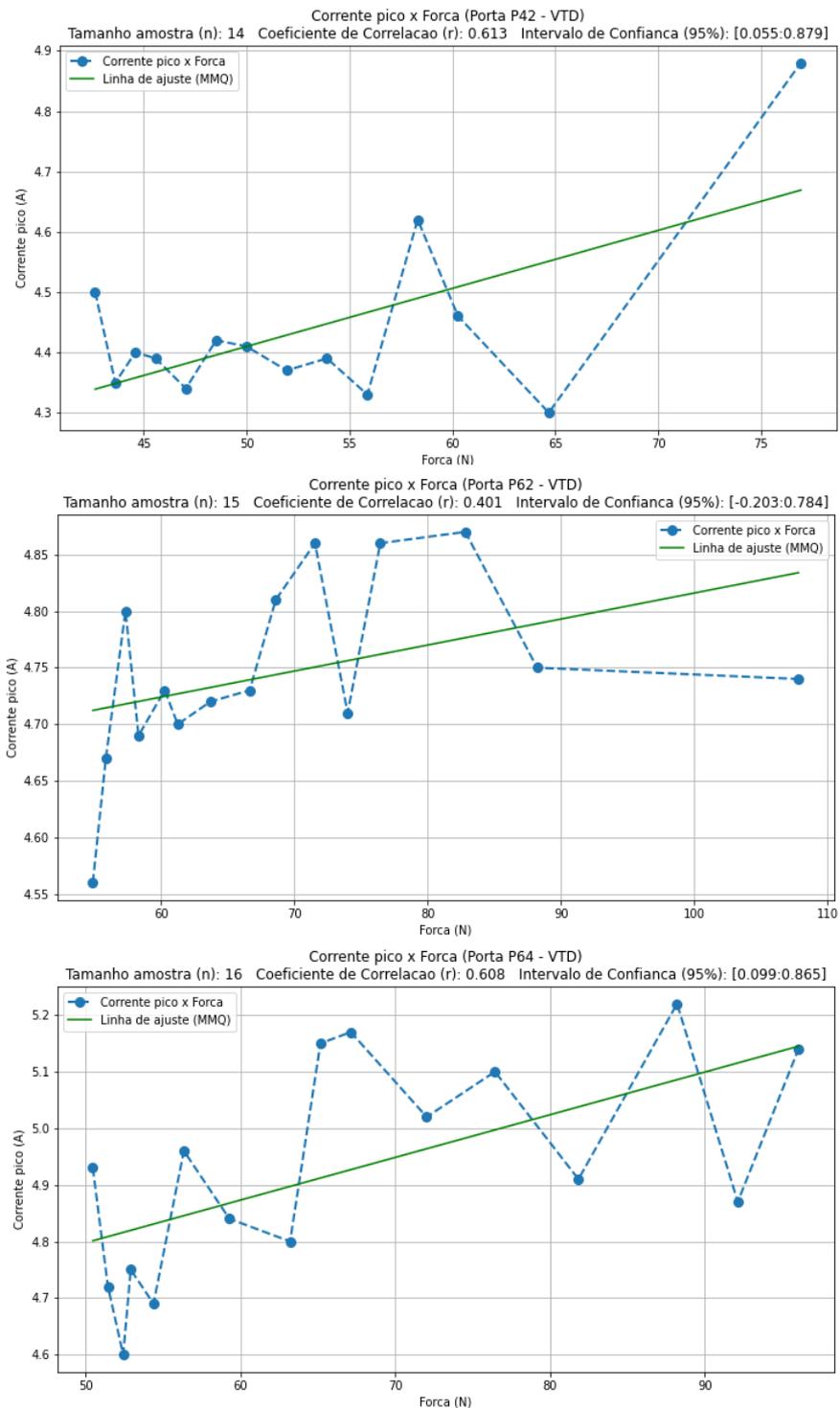


Figura 9 – Gráficos das relações entre a força e a corrente de pico das três PSDs

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

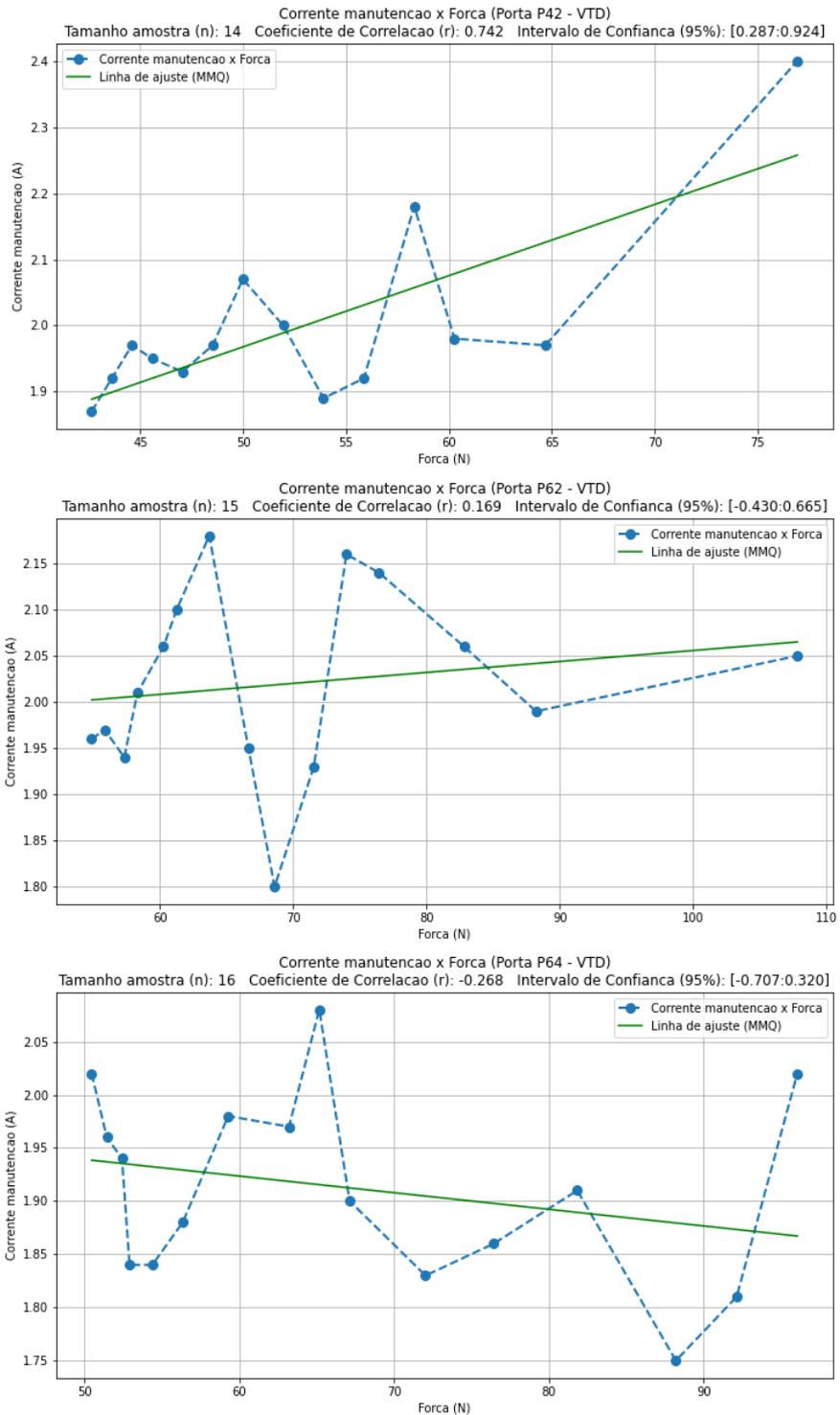


Figura 10 – Gráficos das relações entre a força e a corrente de pico das três PSDs

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

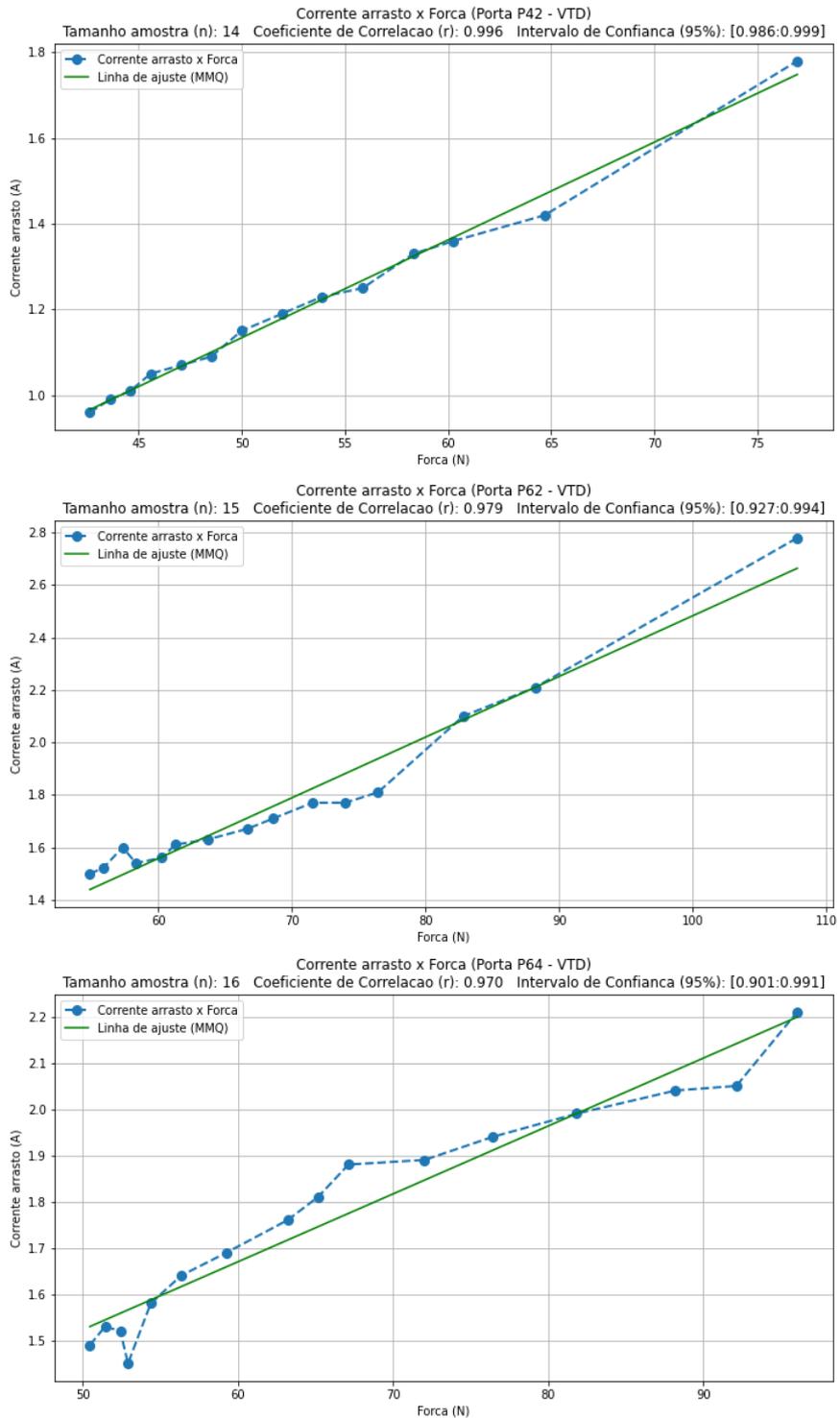


Figura 11 – Gráficos das relações entre a força e a corrente de pico das três PSDs



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Para a força da relação, será considerado o valor médio do intervalo de confiança. Ao analisar as tabelas e os gráficos, observa-se que as correlações entre a corrente de pico e a força de arrasto, bem como entre a corrente de manutenção e a força de arrasto, são geralmente moderadas a fracas e os gráficos sugerem um comportamento não linear. Portanto, para esses casos, a correlação não é justificada e utilizar essas correntes para representar a força teria uma confiabilidade muito baixa. Uma estratégia alternativa seria explorar relações não lineares para esses casos.

No entanto, isso não ocorre na correlação entre a corrente de arrasto e a força de arrasto. Conforme apresentado na Figura 11, para as três PSDs testadas, a correlação foi classificada como muito forte e positiva. Em todas as análises, o coeficiente de Pearson foi maior ou igual a 0.97, e os gráficos mostram uma linearidade clara com o aumento da força. Portanto, a corrente de arrasto parece ser uma representação confiável da força de arrasto, e utilizar esse valor de corrente para prever o peso da porta é justificável. Assim, será obtida a equação que relaciona essas duas grandezas. Como buscamos uma equação linear para representar essa correlação, ela será do tipo $f(x) = ax + b$. Minimizando o erro dos coeficientes a e b por meio do Método dos Mínimos Quadrados, obteremos a seguinte equação, cujos coeficientes se trata de uma média:

$$F(c) = -b + (a * c)$$

Onde, $F(c)$ é a força da porta em N (predita), c é a corrente de arrasto motor em A (medida pelo sistema sensor – coletor de dados) e a e b são os coeficientes encontrados.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

APLICAÇÕES NO MONITORAMENTO CONTÍNUO E MANUTENÇÃO

PREDITIVA

As portas de plataforma são equipamentos fundamentais para garantir a segurança dos usuários, prevenindo o acesso não autorizado à via e evitando que objetos que possam causar danos ao sistema ou aos usuários sejam lançados sobre os trilhos. Por serem dispositivos de segurança, é crucial que os sistemas das PSDs não apresentem falhas. No entanto, é amplamente reconhecido no setor industrial que equipamentos e sistemas estão sujeitos a falhas. É justamente na busca por um ambiente ideal, sem falhas, que diversas metodologias, tecnologias e dispositivos são desenvolvidos para reduzir ao máximo as intervenções corretivas e assegurar que máquinas e equipamentos críticos operem de forma contínua. Dessa forma, é possível prever falhas que poderiam ocorrer naturalmente e permitir que a equipe de manutenção responsável planeje e execute intervenções no momento mais oportuno.

Com o objetivo de permitir que as equipes de manutenção das PSDs implementem a manutenção preditiva do sistema, o conjunto de ferramentas desenvolvido na seção anterior, capaz de coletar a curva de corrente durante a movimentação das portas e converter esses dados em uma escala de força necessária, possibilita o monitoramento contínuo dessa força. Este é um dos principais parâmetros utilizados pelas equipes de



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

manutenção preventiva e corretiva para verificar o funcionamento adequado e a regulagem correta dos componentes das portas.

A seguir, será apresentada uma demonstração de um exemplo de aplicação do conjunto desenvolvido para o monitoramento contínuo e, conseqüentemente, a manutenção preditiva no sistema de PSDs em algumas estações do Metrô de São Paulo. Primeiramente, será fornecida uma visão geral resumida da arquitetura do sistema, seguida pelos dados e resultados já obtidos.

ARQUITETURA RESUMIDA DO SISTEMA

Para possibilitar o monitoramento contínuo e remoto de todas as PSDs de uma estação, é necessário utilizar uma aplicação para análise e visualização dos dados e informações coletadas das portas. Devido à natureza da rede metroferroviária, que cobre grandes extensões geográficas, a transmissão desses dados e informações apresenta um desafio adicional. A Figura 12, apresentada a seguir, mostra um diagrama com os principais blocos que compõem o sistema de monitoramento das PSDs. A figura exhibe um esquema simplificado da arquitetura instalada. O exemplo mostra uma estação composta por duas plataformas, cada uma com 24 PSDs, totalizando 48 portas na estação. Como cada porta possui seu próprio motor e componentes mecânicos, tornando-as independentes em relação ao movimento, um sensor de corrente é instalado em cada motor de cada porta.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

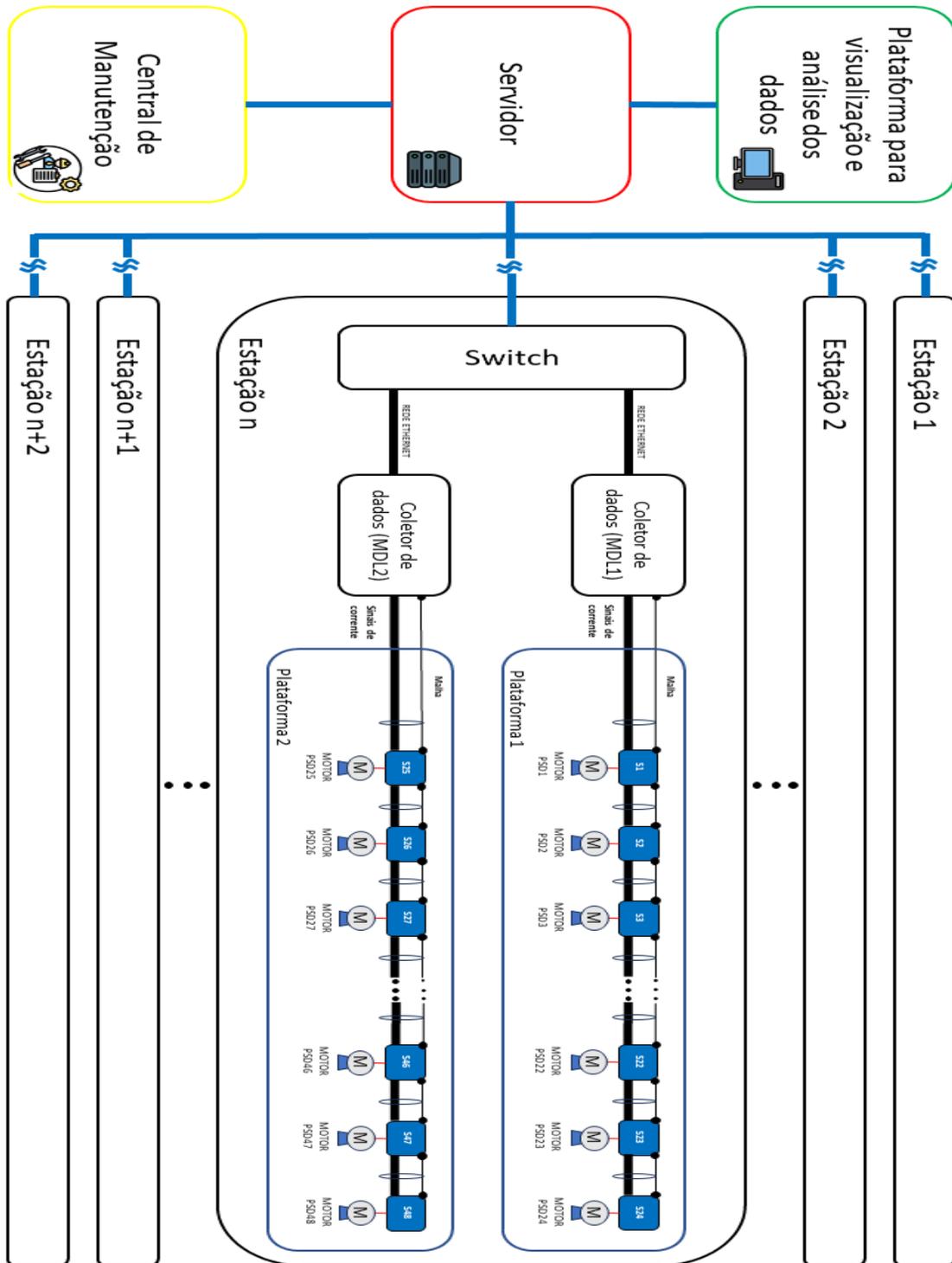


Figura 12 - Arquitetura simplificada do sistema de monitorando das PSDs



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Cada um desses sensores envia um sinal de 4 a 20 mA, conforme discutido na seção sobre o funcionamento do conjunto Sensor-Coletor de Dados. O sinal de cada sensor, responsável por medir a curva de corrente do motor, é transmitido para o coletor de dados localizado na extremidade da plataforma. Cada plataforma possui um coletor responsável por gerenciar os 24 sensores. O coletor de dados recebe o sinal analógico, converte-o em digital e o envia para um servidor situado na central de manutenção, que gerencia o monitoramento de todas as estações. Neste servidor, os dados são armazenados em uma base de dados, e uma aplicação fornece uma interface gráfica para a visualização dos dados e das curvas de corrente dos motores. Além disso, no servidor é realizada uma verificação baseada em parâmetros predefinidos: se as informações provenientes das PSDs excederem o limite definido, um alarme, cuja severidade depende do valor, é enviado para a central de manutenção. A central, por sua vez, é responsável por acionar as equipes de manutenção para tomar as medidas necessárias para solucionar o desvio.

A seguir será apresentada a parte de visualização do monitoramento da instalado em algumas estações no Metrô de São Paulo.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

VISUALIZAÇÃO E ALARMES DO MONITORAMENTO DAS PSDs

Neste capítulo, será apresentada a implementação do sistema de monitoramento atualmente em operação em algumas estações do Metrô de São Paulo que possuem portas de plataforma.

Como ilustrado na Figura 12, uma vez que os dados referentes às curvas de corrente das PSDs chegam ao servidor, eles são verificados e, caso ultrapassem os valores limites predefinidos, alarmes são gerados para informar as equipes de manutenção sobre a condição das portas. A aplicação de visualização permite acompanhar em tempo real os valores de força e corrente de cada porta, além de fornecer um alarme visual caso esses valores estejam fora de um intervalo considerado normal.

Três telas principais são utilizadas para esse fim: (I) uma que oferece uma visão geral de todas as portas da estação e seus status; (II) uma com informações detalhadas de cada porta individualmente; e (III) uma que permite visualizar a curva de corrente de um ciclo específico de uma porta específica.

A página (I) é ilustrada na Figura 13, onde é possível ver um mapa que apresenta a visão geral de todas as portas de uma estação. Nesse mapa, o status individual de cada PSD é indicado por um código de cores. Quando a porta está azul, significa que todas as variáveis medidas e calculadas estão dentro dos limites definidos; se estiver amarela, alguma variável está fora dos limites definidos, mas a porta ainda pode operar sem risco

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 13 - Mapa de visualização do sistema de monitoramento das PSDs na estação Sacomã da Linha 2 - Verde do Metrô de São Paulo

Iminente de falha; se estiver vermelha, indica que a porta necessita de uma intervenção urgente da equipe de manutenção, pois as variáveis estão significativamente fora do intervalo normal e há uma grande probabilidade de falha.

Ao clicar em uma porta, há um link para a página (II), onde é possível obter uma visão detalhada das variáveis da porta selecionada ou comparar as variáveis de mais de uma porta. A Figura 14 mostra a página (II) em duas situações diferentes: na imagem de fundo, apenas a porta 35 está selecionada, pois foi através do link dela que se chegou à página (II); na imagem em primeiro plano, as portas 36, 37 e 38 também foram selecionadas para comparação das variáveis.

Por fim, a página (III) pode ser acessada clicando no ícone "Curvas de Corrente" no mapa da página (I). Nesta página, é possível acessar e visualizar os dados de corrente, ou seja,

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

as curvas de corrente dos ciclos de abertura e fechamento das portas, de forma individual, filtrando por data e hora de acionamento da porta.

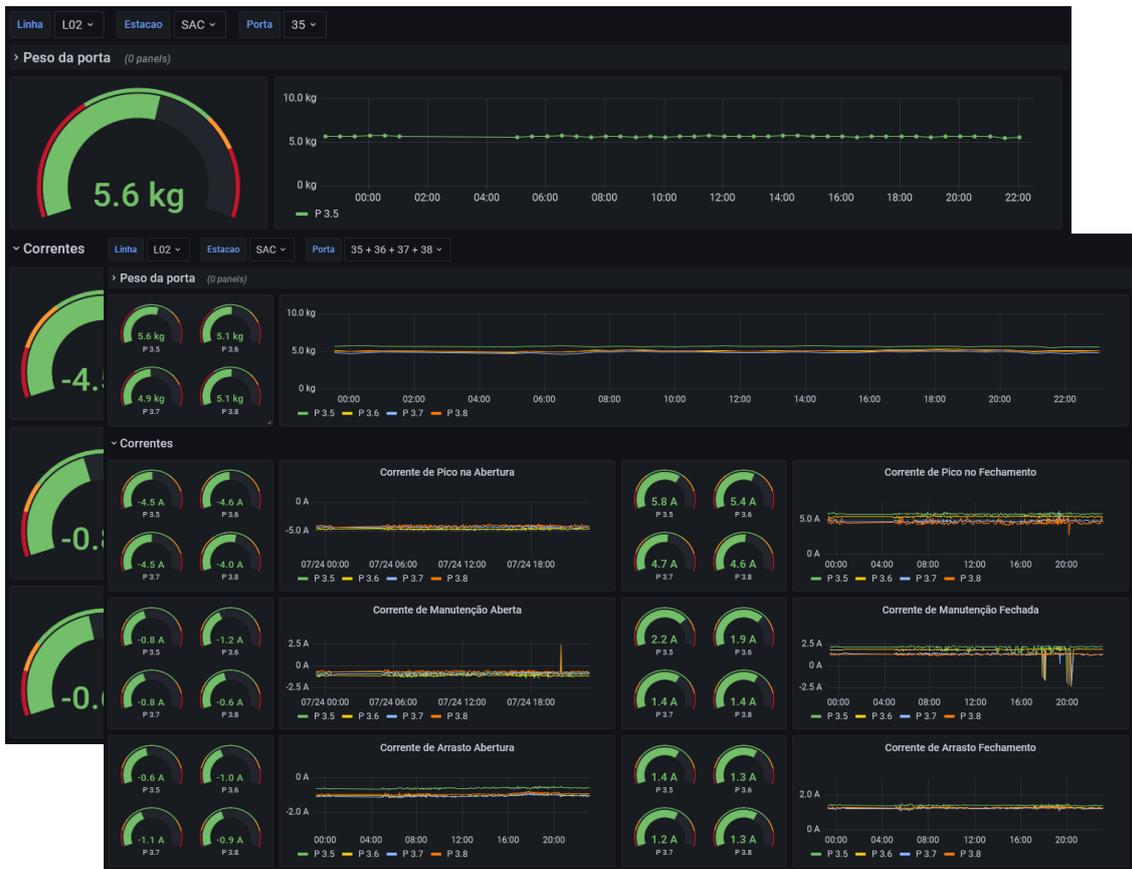


Figura 14 - Página de análise das variáveis de cada porta individualmente ou comparando mais de uma porta

A Figura 15 apresenta um exemplo de curva de abertura de porta, mostrado na página (III). Na figura, a curva em laranja representa um acionamento específico selecionado por meio dos filtros da página, enquanto a curva em verde, juntamente com sua sombra,

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

apresenta uma curva padrão e os limites aceitáveis para que a porta seja considerada em funcionamento normal.

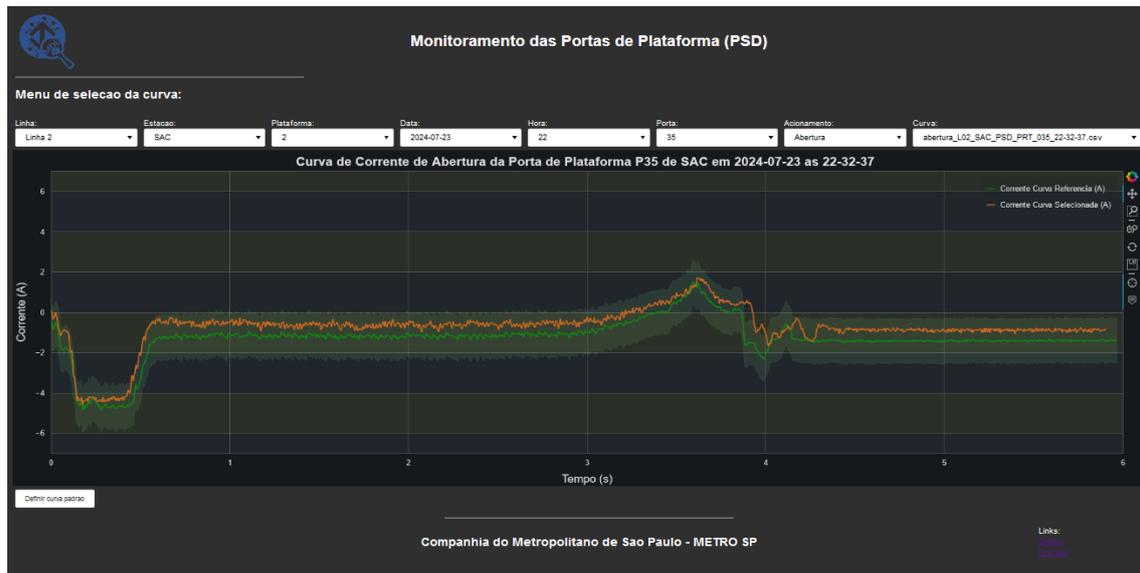


Figura 15 - Página (III) responsável por permitir a seleção de um acionamento específico de uma porta específica, mostrando a curva de corrente correspondente

EXEMPLOS DE FALHAS JÁ IDENTIFICADAS

Algumas falhas já identificadas pelo sistema de monitoramento das PSDs serão mostradas a seguir. Basicamente se tratam de curvas onde certas características da mesma permitiram o sistema identificar variáveis que estavam fora do padrão considerado normal. A Figura 16 mostra dois exemplos de desvios que não são impeditivos para funcionamento da porta, porém, se não tratados poderiam vir a causar uma falha na PSD.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

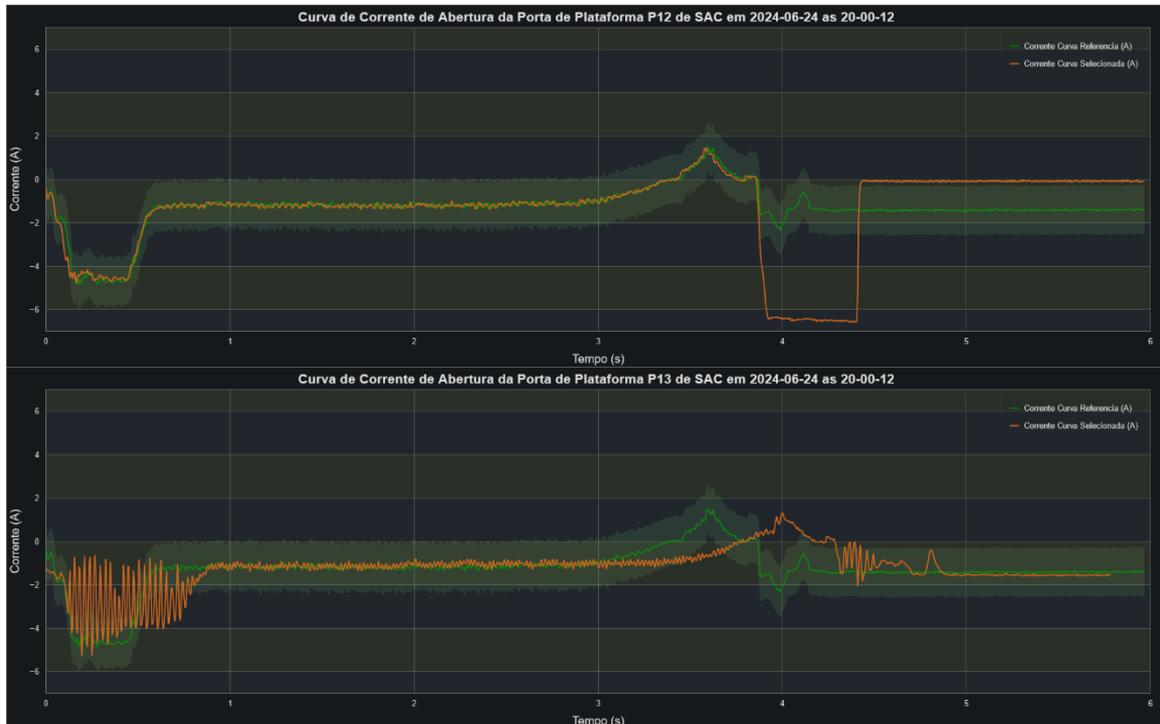


Figura 16 - Gráficos de curvas de corrente que foram detectadas pelo sistema por estarem com valores e características fora dos padrões considerados normais

Na curva de cima (porta 12 da estação Sacomã – Linha 2 Verde do Metrô de São Paulo) é possível notar que após a abertura da porta, houve um pico de corrente de aproximadamente 0.5 segundos e logo após a corrente de manutenção que deveria se manter em um valor constante com módulo maior que zero ficou zerada. Esta é uma falha causada devido a uma contagem errada do *encoder* da porta. Já na curva de baixo (porta 13 da estação Sacomã – Linha 2 Verde do Metrô de São Paulo) existe uma oscilação muito acentuada na curva durante o pico de abertura. Este desvio é causado devido as escovas do motor da porta estarem ou mal ajustadas ou desgastadas.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre a relação que a força necessária para movimentar uma porta do sistema de Portas de Plataforma (PSD) de uma estação do metrô de São Paulo necessita com a corrente do motor responsável por este movimento. Para que fosse possível estudar esta relação, um conjunto Sensor – Coletor de Dados foi desenvolvido e validado pelo Metrô de São Paulo e posteriormente utilizado na coleta de dados que permitiu a identificação da relação fortemente linear entre a corrente de arrasto da porta e a força necessária. Para isso, foi utilizado o coeficiente de linearidade de Pearson, uma estatística amplamente usada para este tipo de estudo.

O desenvolvimento do conjunto Sensor – Coletor de dados, possibilitou ainda a implementação de um sistema de monitoramento de portas de plataforma (PSD), capaz de realizar o monitoramento em tempo real dos motores responsáveis pelo acionamento destas e enviar o sinal tratado das portas de uma estação para um servidor na central de manutenção. Estes dados em tempo real possibilitam que as PSDs instaladas nas estações estejam continuamente monitoradas de forma a permitir uma identificação de tendência de desvio funcional, uma vez que as variáveis analisadas passem a se comportar de maneira anormal para o funcionamento da porta.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O estudo e desenvolvimento dos métodos e dispositivos deste artigo apresenta um grande potencial e permite um avanço na manutenção industrial, mostrando uma das diversas possibilidades que o monitoramento contínuo e consequente análise de dados na implementação da manutenção preditiva.

Este é um trabalho inicial e que em linhas gerais incentiva e esclarece alguns pontos importantes ao utilizar dados em tempo real para o gerenciamento da manutenção em indústrias de grande porte como é o caso de sistemas metroferroviário. Porém, ainda existem diversos caminhos, métodos e técnicas a serem experimentados e validados e que com o advento de técnicas de inteligência artificial tornam cada vez mais tateável a nova era da manutenção industrial que está por vir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DUBEY, Gopal. Fundamentals of Electrical Drives. Local de publicação: Alpha Science, 2001.

MAIA, A.D.G et al. As Tecnologias no Sistema Metroferroviário: Caracterização e avaliação através do Modelo Integral - Fuzzy. SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção, XII SIMPEP, 2005.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

ALOUCHE, P.L. & NAKAGAWA, T. Sistemas Inteligentes de Transportes. ITS no Setor Metroferroviário, volume 8, páginas 61-75, 2013.

ROH, J.S., RYOU, H.S. & YOON, S.W. The effect of PSD on life safety in subway station fire. J Mech Sci Technol 24, 937-942, 2010.

DINIZ, M.A. et al. Implementações para melhoria do desempenho do sistema de portas de plataforma do metro de São Paulo. AEAMESP, 20ª Semana de Tecnologia Metroferroviária, 2014.

BHANDARI, P. *Correlation Coefficient | Types, Formulas & Examples*. Scribbr, 2024. Disponível em: <https://www.scribbr.com/statistics/correlation-coefficient>. Acesso em: 10 de julho de 2024.

BEWICK, V., CHEEK, L. & BALL, J. Statistics review 7: Correlation and regression. PubMed Central, Crit Care 7(6):451-9. 5, 2003.

NCSS. Confidence Intervals for Pearson's Correlation. NCSS, 2024. Disponível em: https://www.ncss.com/wp-content/themes/ncss/pdf/Procedures/PASS/Confidence_Intervals_for_Pearsons_Correlation.pdf. Acesso em: 10 de julho de 2024.

DINAMÔMETRO. Conceito de Dinamômetro. Editora Conceitos.com, 2017). Disponível em: <https://conceitos.com/dinamometro/>. Acesso em: 10 de julho de 2024.