

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

André Luciano Rakowski

**ANÁLISE E FILTRAGEM DE SINAIS DE ACELERÔMETROS PARA
MONITORAMENTO DE LINHAS FÉRREAS**

Santa Maria, RS
2021

André Luciano Rakowski

**ANÁLISE E FILTRAGEM DE SINAIS DE ACELERÔMETROS PARA MONITORAMENTO
DE LINHAS FÉRREAS**

Trabalho Final de Graduação apresentado ao Curso de Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciência da Computação**. Defesa realizada por videoconferência.

ORIENTADOR: Prof. João Vicente Ferreira Lima

©2021

Todos os direitos autorais reservados a André Luciano Rakowski. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

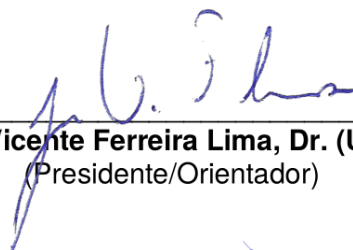
End. Eletr.: alrakowski@inf.ufsm.br

ANDRÉ LUCIANO RAKOWSKI

ANÁLISE E FILTRAGEM DE SINAIS DE ACELERÔMETROS PARA MONITORAMENTO DE LINHAS FÉRREAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciência da Computação**.

Aprovado em 10 de Fevereiro de 2021:



João Vicente Ferreira Lima, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Benhur de Oliveira Stein, Dr. (UFSM)



João Carlos Damasceno Lima, Dr. (UFSM)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais. Sem eles nada seria possível.

*Se você quer chegar onde a maioria não
chega, faça o que a maioria não faz.*

(Bill Gates)

RESUMO

ANÁLISE E FILTRAGEM DE SINAIS DE ACELERÔMETROS PARA MONITORAMENTO DE LINHAS FÉRREAS

AUTOR: André Luciano Rakowski

ORIENTADOR: João Vicente Ferreira Lima

As ferrovias têm forte participação tanto na economia nacional quanto mundial. No entanto, acidentes podem ser gerados pelas más condições de linhas férreas. Uma das principais dificuldades para empresas de transportes ferroviários é identificar os pontos nos quais existem problemas nos trilhos. Para isso utiliza-se veículos ferroviários de bitola métrica munidos de equipamentos para coleta e processamento de informações sobre as condições da via férrea, chamados de Carros Controle. Entretanto, dados obtidos de sensores inerciais instalados nesses veículos contém muito ruído, o que dificulta a correta interpretação dos sinais. Por outro lado, sensores mecânicos apresentam custo financeiro elevado. Com a remoção de ruídos presentes em sinais obtidos de acelerômetros de baixo custo instalados em carros controle, pode-se utilizá-los para o monitoramento de linhas férreas. Com isso, substitui-se sensores de maior valor por acelerômetros. Este trabalho propõe a análise e filtragem de sinais obtidos de acelerômetros instalados em carros controle. Avaliou-se técnicas de remoção de ruídos em sinais de sensores, faz-se a detecção de trechos em que o carro controle estava realizando medições em curva a partir dos dados dos acelerômetros e desenvolveu-se um método para a detecção da orientação em que os acelerômetros estão instalados, fazendo-se desse modo a calibragem automática dos sensores inerciais do carro. Ainda, fez-se a análise das acelerações laterais que influenciam no cálculo do alinhamento dos trilhos. Por fim, comparou-se os sinais filtrados com dados de sensores mecânicos LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*).

Palavras-chave: Processamento de Sinais, Acelerômetros, Monitoramento de Linhas Férreas.

ABSTRACT

ANALYSIS AND FILTERING OF ACCELEROMETER SIGNALS FOR RAILWAY TRACKING

AUTHOR: André Luciano Rakowski
ADVISOR: João Vicente Ferreira Lima

The railways have a strong participation in both the national and world economy. However, accidents can be caused by poor track conditions. One of the main difficulties for railway transport companies is to identify the points where there are problems on the tracks. For this purpose, metric-gauge railway vehicles are used, equipped with equipment for collecting and processing information about the conditions of the railroad, called Control Cars. However, data obtained from inertial sensors installed in these vehicles contains a lot of noise, which makes it difficult to correctly interpret the signals. On the other hand, mechanical sensors have a high financial cost. With the removal of noise present in signals obtained from low-cost accelerometers installed in control cars, they can be used to monitor railways. With this, higher value sensors are replaced by accelerometers. This work proposes the analysis and filtering of signals obtained from accelerometers installed in control cars. Techniques for removing noise in sensor signals were evaluated, the sections in which the control car was curved were detected from the accelerometer data and a method was developed to detect the orientation in which the accelerometers are located. installed, thus making the automatic calibration of the inertial sensors of the car. Still, the analysis of lateral accelerations that influence the calculation of the alignment of the tracks was made. Finally, the filtered signals were compared with data from LVDT (Linear Variable Differential Transformer) mechanical sensors.

Keywords: Signal Processing, Accelerometers, Track Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Seção transversal da plataforma ferroviária.	15
Figura 2.2 – Defeitos de bitola.	16
Figura 2.3 – Trilho desnivelado.	16
Figura 2.4 – Superelevação.	17
Figura 2.5 – Desalinhamento de trilhos.	17
Figura 2.6 – Empeno.	18
Figura 2.7 – Sistema de massa e usado para medir aceleração.	19
Figura 2.8 – Sensor LVDT e suas respectivas partes.	20
Figura 2.9 – Carro controle <i>Plasser Theurer EM40</i>	21
Figura 2.10 – (LEE et al., 2012): Obtenção de dados.	24
Figura 3.1 – Localização do trecho da linha férrea em análise (Curitiba-PR).	28
Figura 3.2 – Localização dos sensores instalados no carro controle.	28
Figura 3.3 – Processo de obtenção do deslocamento lateral.	32

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Detecção de curvas.	29
Gráfico 3.2 – Velocidade angular obtida através de giroscópio (trecho figura 3.1).	32
Gráfico 3.3 – Acelerômetro, dados brutos, referentes ao trecho figura 3.1.	33
Gráfico 3.4 – Acelerômetro com filtro passa-baixa (trecho figura 3.1).	33
Gráfico 3.5 – Velocidade do carro controle (trecho figura 3.1).	33
Gráfico 3.6 – Aceleração centrífuga: velocidade do carro controle multiplicada pela velocidade angular(trecho figura 3.1).	34
Gráfico 3.7 – Aceleração lateral:Aceleração centrífuga subtraída dos dados do acelerômetro com filtro passa-baixa (trecho figura 3.1).	34
Gráfico 3.8 – Velocidade lateral (trecho figura 3.1).	35
Gráfico 3.9 – Deslocamento lateral (trecho figura 3.1).	35
Gráfico 3.10 – Acelerômetro direito dianteiro (trecho figura 3.1).	36
Gráfico 3.11 – Espectro de frequências (gráfico 3.10).	36
Gráfico 3.12 – Filtro de Butterworth aplicado nos dados do acelerômetro direito frontal referente ao trecho mostrado na figura 3.1.	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Trabalhos relacionados.	26
Quadro 3.1 – Eixos dos acelerômetros.	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>DFT</i>	<i>Discrete Fourier transform</i> (Transformada Discreta de Fourier)
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
<i>IDFT</i>	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i> (Transformada Discreta de Fourier Inversa)
<i>LVDT</i>	<i>Linear Variable Differential Transformer</i> (Transdutor de Deslocamento Variável Linear)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	METODOLOGIA	13
1.4	LIMITAÇÕES	13
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	13
2	BASE TEÓRICA	14
2.1	FERROVIAS	14
2.2	MEDIÇÃO DE LINHAS FÉRREAS	17
2.3	ANÁLISE E REMOÇÃO DE RUÍDOS DE SINAIS DE SENSORES	20
3	MÉTODOS E RESULTADOS	27
3.1	MEDIÇÃO DE LINHA FÉRREA	27
3.2	DETECÇÃO DE CURVAS	27
3.3	DETECÇÃO DE EIXOS DOS ACELERÔMETROS	29
3.4	ANÁLISES DAS ACELERAÇÕES QUE INFLUENCIAM NO CÁLCULO DO ALINHAMENTO	30
3.5	FILTRAGEM DE SINAIS DE ACELERÔMETROS	35
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
4.1	TRABALHOS FUTUROS	38

1 INTRODUÇÃO

As ferrovias transportam cargas que em sua maioria são matéria-prima para aparatos básicos da sobrevivência humana. Por isso, elas têm forte participação tanto na economia nacional quanto mundial. Como consequência, tornam o mercado brasileiro mais competitivo. O transporte ferroviário tem baixo custo de frete e de manutenção, inexistência de pedágios, menor índice de roubos e acidentes, além de transportar grandes quantidades a longas distâncias. Ainda as ferrovias têm pouco gasto de energia e poluem menos o meio ambiente (VALE, 2020).

Aliado à importância das ferrovias, tem-se o crescimento da área da Internet das Coisas (IoT). Dispositivos IoT estão alterando esferas diversas da sociedade, desde o gerenciamento doméstico e os cuidados com a saúde, à implementação nas indústrias, no planejamento urbano e de transportes, e na geração de energia (CARRION et al., 2019). Conforme (ALBERTIN et al., 2017), isso se dá por meio da coleta, do processamento e da análise de dados gerados pelos sensores da IoT, que estarão presentes em todas as coisas e se integrarão por meio da rede pública de comunicação.

A malha ferroviária é um sistema dinâmico. Os mais diversos fatores, tais como a circulação de trens, a natureza do subsolo, flutuações de temperatura ou precipitações são causas de mudanças constantes. Por esta razão, as medidas de manutenção somente podem ser planejadas com eficiência quando se conhece as condições reais da via, e sobretudo, quando puderem ser detectadas possíveis tendências de deterioração (PLASSER, 2020).

Os veículos de medição dos parâmetros geométricos da linha, denominados carros controle, fornecem uma enorme quantidade de informações, dependendo das necessidades e do equipamento. Esses carros são equipados por sensores, que são basicamente dispositivos que fazem a detecção e respondem com eficiência à algumas entradas provenientes de um ambiente físico. Assim, quando um sensor recebe uma entrada específica proveniente do ambiente, ele emite uma saída, que geralmente é um sinal capaz de ser convertido e interpretado por outros dispositivos.

Entretanto, dados obtidos de sensores instalados em carros controle contém muito ruído, o que dificulta a correta interpretação dos sinais. O sensor mecânico LVDT (transdutor de deslocamento variável linear) apresenta menor ruído se comparado à acelerômetros. Entretanto, sensores LVDT apresentam alto custo financeiro em relação aos acelerômetros. De acordo com (MELO et al.), o principal problema no sinal fornecido pelo acelerômetro é o ruído, de modo que é necessário usar um filtro.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar dados obtidos de uma rede de sensores inerciais de baixo custo instalados em um carro controle, amenizar o ruído presente nesses dados e obter informações no que refere à detecção de curvas, orientação dos sensores e acelerações laterais que influenciam no cálculo do alinhamento dos trilhos.

1.1.2 Objetivos específicos

Mais especificamente, este projeto objetiva:

- Realizar revisão bibliográfica sobre técnicas de remoção de ruídos em sinais de sensores.
- Aplicar técnicas de processamento de sinais para amenizar ruídos em dados de acelerômetros;
- Detectar os trechos em que o carro controle está em curva.
- Distinguir a orientação dos eixos (x, y, z) dos sensores.
- Analisar as acelerações laterais que influenciam no cálculo do alinhamento dos trilhos a partir de acelerômetros e giroscópios.

1.2 JUSTIFICATIVA

Acidentes podem ser gerados pelas más condições de linhas férreas. Uma das principais dificuldades para empresas de transportes ferroviários é identificar os pontos onde existem problemas nos trilhos. Para isso utiliza-se veículos ferroviários de bitola métrica munidos de equipamentos para coleta e processamento de informações sobre as condições da via férrea. Esses veículos são chamados de Carro Controle. O carro controle possui uma série de sensores dedicados que são conectados através de placas de capturas de dados.

Com a remoção de ruídos presentes em sinais obtidos de acelerômetros de baixo custo instalados em carros controle, pode-se utilizá-los para o monitoramento de linhas férreas. Com isso, substitui-se sensores de maior valor por acelerômetros.

1.3 METODOLOGIA

Inicialmente realizou-se pesquisa bibliográfica aprofundada, com foco na revisão do estado da arte e na comparação de trabalhos relacionados. Em seguida analisou-se dados de acelerômetros, avaliou-se técnicas de remoção de ruídos em sinais de sensores e aplicou-se técnicas para remoção de ruídos em dados de acelerômetros com o intuito de estimar os deslocamentos laterais, que são utilizados para o cálculo do alinhamento de linhas férreas. Por fim, analisou-se os resultados em comparação com sensores LVDT.

1.4 LIMITAÇÕES

O presente trabalho tem como base um estudo de caso de análise de dados de um carro controle para monitoramento de linhas férreas em zona urbana. Ainda, analisa-se a aceleração lateral medida por cada acelerômetro e não o deslocamento lateral, uma vez que a integração dupla do sinal acumula erros. Logo, para a aplicação da integral dupla e análise de diversos tipos de trechos de ferrovias faz-se necessário aprofundamento no que se refere à filtragem de sinais de sensores inerciais.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho está disposto da seguinte forma. No Capítulo 2, foram revisados conceitos relacionados à ferrovias e possíveis defeitos, medição de linhas férreas, filtragem de sinais e trabalhos relacionados. No capítulo 3 descreve-se a metodologia adotada para a obtenção de dados referentes ao monitoramento de linhas férreas, filtragem de sinais de acelerômetros, detecção de curvas e eixos de acelerômetros, acelerações laterais, assim como os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 4, contém a discussão e considerações finais a cerca do que foi desenvolvido neste trabalho, bem como trabalhos futuros.

2 BASE TEÓRICA

O interesse na capacidade de monitorar a integridade de estruturas e detectar danos o mais cedo possível é persistente em todas as comunidades de engenharia civil, mecânica e aeroespacial. Devido ao fato de muitos desses sistemas serem complexos, dinâmicos e variáveis no tempo, o pré-processamento de sinal faz-se necessário e as técnicas de análise são indispensáveis para extrair informações úteis de dados brutos. Os métodos de pré-processamento de sinais são utilizados para condicionar os dados brutos e fazer todos os esforços para eliminar o ruído indesejado, enquanto as técnicas de análise de sinal são utilizadas para extrair características dos sinais brutos condicionados (LIANG et al., 2015).

Nesse capítulo são abordados conceitos e trabalhos relacionados no que se refere à obtenção de dados do estado de conservação de linhas férreas através de sensores e técnicas para remoção de ruídos desses sinais.

2.1 FERROVIAS

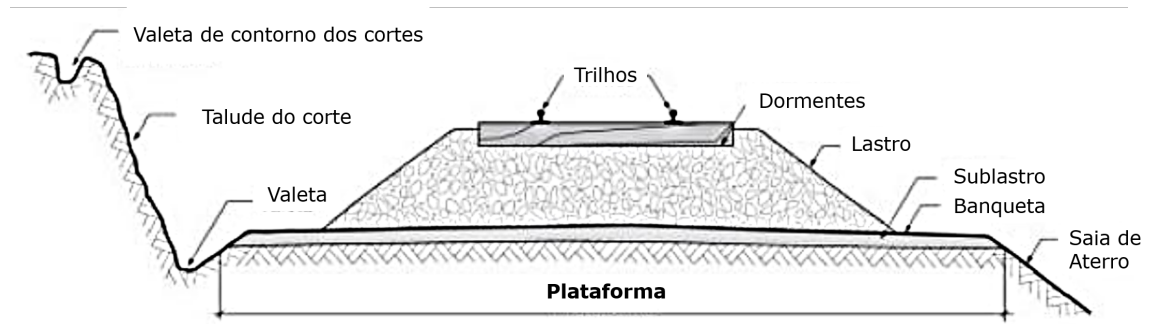
As ferrovias brasileiras são responsáveis pelo transporte de aproximadamente 165 milhões de toneladas úteis de carga anualmente o que representa pouco mais de um quinto da movimentação de cargas no país por sobre uma malha férrea composta por quase 30 mil quilômetros entre trechos concedidos e não concedidos e que é percorrida por mais de 2,9 mil locomotivas e 92 mil vagões (ILDENFONSO, 2013).

Ferrovia (figura 2.1) é um sistema de transporte terrestre, autoguiado, em que os veículos (motores e rebocados) se deslocam com as rodas metálicas sobre duas vigas contínuas longitudinais, também metálicas, denominadas de trilhos. Os apoios transversais dos trilhos, os dormentes, são regularmente espaçados e repousam geralmente sobre um colchão amortecedor de material granular denominado lastro. O lastro, por sua vez, absorve e transmite ao solo as pressões correspondentes às cargas suportadas pelos trilhos, distribuindo-as, com taxa compatível à sua capacidade de suporte para a infraestrutura ferroviária. A ferrovia é composta de dois subsistemas: o de material rodante, do qual fazem parte os veículos tratores e rebocados, e o de via permanente, formada pela infra e superestrutura ferroviárias longitudinais, também metálicas, denominadas de trilho (PEREIRA, 2016).

A via permanente pode ser entendida como o conjunto que forma a superestrutura de uma via férrea e que está sujeito ao desgaste pelas intempéries e pelo contato com as rodas dos veículos (ILDENFONSO, 2013). As ações do clima e do tráfego interferem diretamente no desempenho das ferrovias, muitas vezes gerando defeitos nas vias. Esta

degradação se fará sentir nos componentes que constituem a via permanente, tão mais aceleradamente quanto maior for a sua utilização e mais agressivo for o meio ambiente (PEREIRA, 2016)

Figura 2.1 – Seção transversal da plataforma ferroviária.



Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2016).

As ferrovias estão sujeitas à ação das intempéries e à pressão exercida pelos veículos. As ações do clima e do tráfego interferem diretamente no desempenho das ferrovias, muitas vezes gerando defeitos nas vias (PEREIRA, 2016).

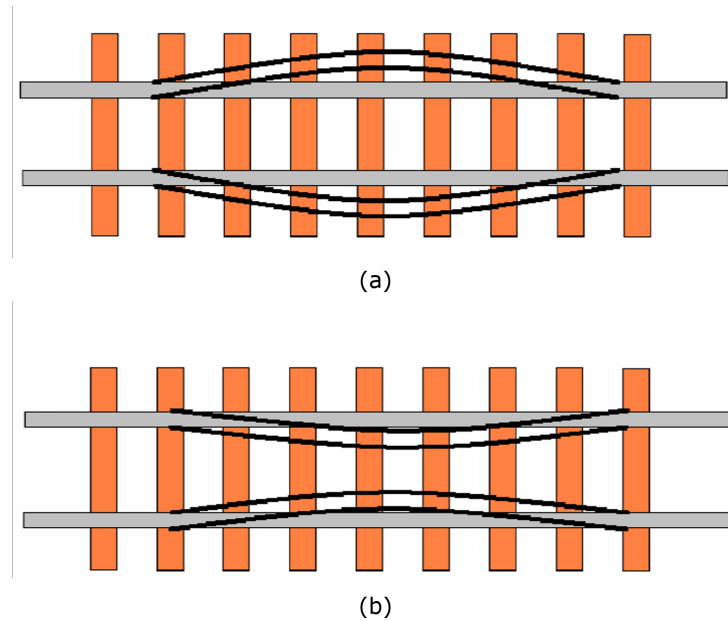
Existem máquinas e equipamentos especiais usados para identificar os defeitos, que medem as características da via e identificam os trechos problemáticos. No entanto, essa análise pode ser feita, também, de forma visual, por caminhamento ou em veículo. Embora a inspeção visual tenha rendimento muito menor que a automatizada (PEREIRA, 2016). Quando o desvio que o trilho sofre com relação à posição original ou à posição para a qual foi projetado acontece fora de limites aceitáveis dá-se o nome de defeito geométrico (ILDENFONSO, 2013).

Os defeitos geométricos podem ocorrer transversalmente, longitudinalmente e verticalmente em relação à via ou em forma de torção. Em cada um desses planos é possível dividir os defeitos com relação a variações na bitola, no nivelamento, no alinhamento ou no empeno.

O comprimento da bitola muitas vezes sofre alterações em suas medidas, as quais podem ser divididas em negativas ou positivas. Quando as alterações nas medidas da bitola forem positivas, dá-se o nome de alargamento da bitola (figura 2.2a) e quando as medidas forem negativas, de estreitamento da bitola (figura 2.2b). Variações excessivas na bitola podem fazer com que o trem descarrile ou tenha perda de estabilidade, por isso essas alterações devem ser controladas de forma criteriosa (ILDENFONSO, 2013).

A diferença de nível entre a posição original do trilho e a deslocada, medida ao longo de uma determinada corda, mostra o quão desnivelado está o trilho (figura 2.3) (ILDENFONSO, 2013). Quando em curva o desnivelamento transversal é simplesmente chamado de defeito de superelevação. A superelevação não é propriamente caracterizada como defeito, ela existe em curvas como forma de equilibrar o efeito da força centrífuga (figura 2.4) (PEREIRA, 2016).

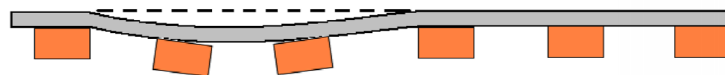
Figura 2.2 – Defeitos de bitola.



Fonte: Adaptado de (ILDENFONSO, 2013).

O alinhamento é o eixo de referência para cada trilho ou o local onde a via deve passar. Desvios no alinhamento são permitidos, desde que dentro limite, além do qual são considerados defeitos. Desalinhamentos (figura 2.5) podem ser medidos separadamente para cada trilho (ILDENFONSO, 2013).

Figura 2.3 – Trilho desnivelado.

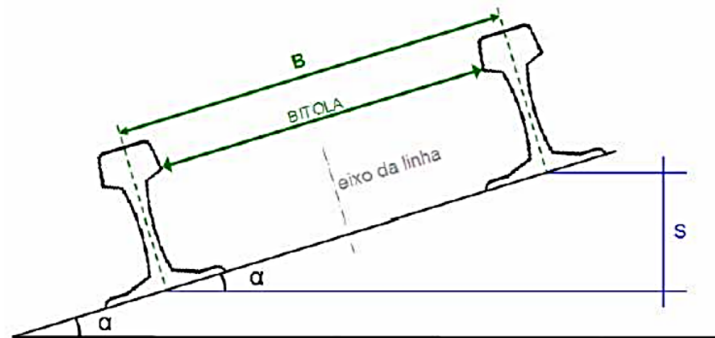


Fonte: Adaptado de (ILDENFONSO, 2013).

Outro importante defeito geométrico sob o aspecto da segurança é o empeno (figura 2.6). Para medir-se o empeno usa-se uma corda de 20 metros e toma-se 4 ou 6 pontos (2 ou 3 em cada trilho) de forma a obter-se um retângulo e o valor do empeno é a diferença que um desses pontos apresenta com relação aos outros que formam o retângulo. Pode-se, também, entender empeno como sendo a máxima diferença entre superelevações medidas dentro de uma determinada corda, normalmente 20 m (ILDENFONSO, 2013).

A próxima seção aborda como pode-se realizar a medição de linhas férreas para a identificação destes e outros defeitos na via.

Figura 2.4 – Superelevação.



Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2016).

Figura 2.5 – Desalinhamento de trilhos.



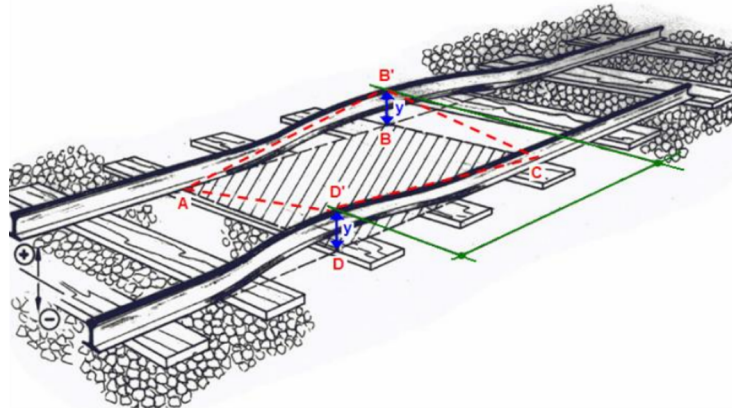
Fonte: Adaptado de (SILVA JÚNIOR et al., 2010).

2.2 MEDIÇÃO DE LINHAS FÉRREAS

O computador extrapolou os limites físicos de sua estrutura, fazendo com que os objetos comuns do cotidiano assumissem sinais digitais. Em suma, a Internet das Coisas trata-se de um ecossistema que conecta objetos físicos, para trocar, armazenar e coletar dados para consumidores e empresas através de uma aplicação de *software*. Os sensores "sentem o entorno do ambiente e coletam dados (CARRION et al., 2019).

A condição necessária para a obtenção de dados relevantes sobre o estado de conservação de linhas férreas é a medição regular executada por carros controle (figura 2.9). Estes veículos medem a malha ferroviária completa várias vezes por ano. Os dados coletados podem ser compilados em um banco de dados geométricos da linha, onde permanecem disponíveis para análises de longo prazo. Com isto, os departamentos de planejamento dispõem de uma ferramenta de trabalho valiosa. As taxas de deterioração fornecem informações para tomada de decisão com relação às medidas a serem tomadas para restabelecer a geometria nominal da linha e mantê-la pelo máximo tempo possível (PLASSER, 2020).

Figura 2.6 – Empeno.



Fonte: Adaptado de (ILDENFONSO, 2013).

Defeitos na linha férrea causam vibrações nos trens. De acordo com (DINIZ, 2011), a vibração mecânica é definida como a oscilação mecânica de um corpo em relação a uma posição de referência. Como oscilação, pode ser descrita pelos parâmetros de amplitude e frequência. O primeiro parâmetro corresponde ao módulo da intensidade da oscilação em um determinado instante de tempo. O segundo parâmetro corresponde ao número de ciclos do movimento que ocorrem no intervalo de tempo de um segundo, medido em unidades de Hertz. Tratando-se de uma oscilação mecânica, a amplitude do sinal vibratório pode ser representada pelas grandezas mecânicas 'deslocamento' (medida em unidades de milímetros, mm), 'velocidade' (em mm/s) ou 'aceleração' (em mm/s^2 ou fração/múltiplo da aceleração da gravidade, g).

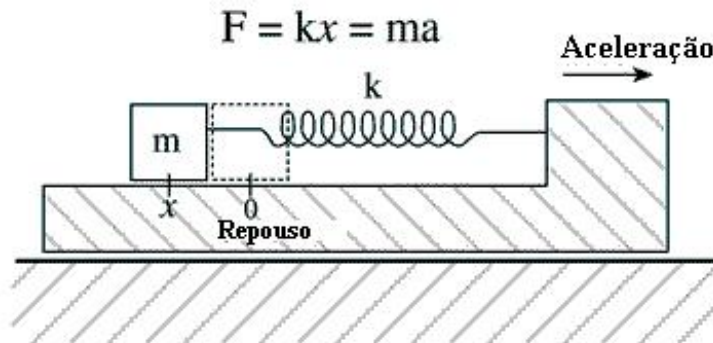
A aceleração é uma grandeza física cinemática que mede quão rapidamente a velocidade de um corpo varia ao longo do tempo (ROCHA et al., 2013). A aceleração da gravidade normalmente é usada para se referir a força de atração de corpos celestes, já que é necessário grande concentração de massa para gerar um campo gravitacional significativo. E em cada corpo essa força muda de acordo com o local, distância, massa desse corpo, entre outros fatores. Nesse caso a gravidade referida é a da superfície da Terra, aproximadamente $9,81 m/s^2$, algumas vezes denotada também pela letra g , onde a gravidade da terra é o referencial usado para $1g$ (MENEGUZZI et al., 2016).

De modo geral um acelerômetro pode ser definido como um dispositivo que mede a vibração ou a aceleração estática/dinâmica do movimento de uma estrutura. Podem ser usados para medir inclinação, forças inercias (velocidade, deslocamento ou força) e choque ou vibração (PEREIRA, 2018).

O princípio básico de funcionamento por trás deste acelerômetro é o sistema de massa e mola (figura 2.7). As molas, enquanto dentro da sua região linear, são governadas pela lei de Hooke, que diz que o deslocamento da mola é proporcional à força aplicada, ou seja, $F = kx$, onde k é uma constante inerente à mola.

Outro princípio físico envolvido é a Segunda Lei de Newton, que relaciona força com

Figura 2.7 – Sistema de massa e usado para medir aceleração.



Fonte: Adaptado de <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/1999/joao/funcionamento.htm>>.

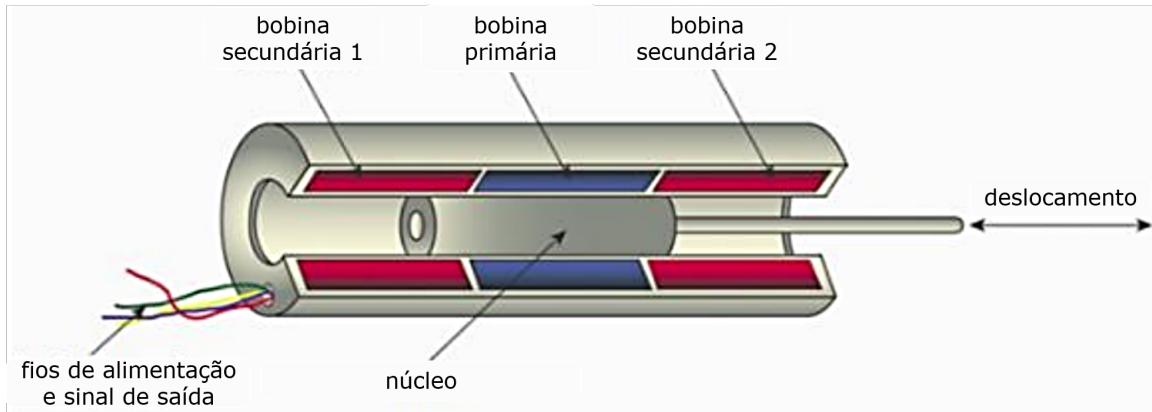
massa e aceleração através da equação $F = ma$. Igualando as duas equações obtém-se $ma = kx$, e portanto pode-se perceber que uma aceleração a causa um deslocamento da massa de $x = (ma)/k$, ou, alternativamente, se a massa sofreu um deslocamento x , significa que a massa está sob uma aceleração de $a = (kx)/m$. Desta maneira o problema de medir aceleração tornou-se um problema de medir o deslocamento de uma massa. Note que este acelerômetro só mede a aceleração ao longo da mola. Este é, portanto, um acelerômetro de eixo único. Para cada eixo ao longo do qual quer-se medir a aceleração é necessário um sistema como este¹.

Outro tipo de sensor utilizado no monitoramento de linhas férreas é o LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*, Transdutor de Deslocamento Variável Linear) (figura 2.8). LVDTs são transdutores eletromecânicos, ou seja, dispositivos que possuem a capacidade de converter movimentos especificamente retilíneos ou vibrações mecânicas em corrente elétrica, tensão ou sinais elétricos. São mecanismos geralmente utilizados em sistemas de controle que necessitam de sensores mecânicos para medição de deslocamento. A Figura 2 mostra um sensor LVDT e suas respectivas partes que o compõem. Possui uma bobina primária que se localiza centralizada em relação às outras duas secundárias que se encontram nas extremidades. Além disso, também há o núcleo móvel, em cujo terminal está conectado mecanicamente ao dispositivo que se quer medir. A bobina primária é excitada por meio de uma corrente senoidal de alta frequência para que possa gerar um campo magnético dentro do núcleo. Portanto, ao se movimentar o núcleo, o campo magnético que está incidido sobre cada uma das bobinas secundárias é modificado de maneira proporcional e inversa, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui. Com isso, ao condicionar o sinal do sensor obtém-se uma tensão de saída proporcional à diferença entre as tensões induzidas em cada bobina do secundário (FELICIANO et al., 2019).

(LEE et al., 2012) propõe um método para monitoramento de irregularidades em vias férreas através de dados obtidos de acelerômetros capacitivos instalados em trens de alta velocidade e aborda a filtragem mista para comprimentos de onda de até 200 metros.

¹<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/1999/joao/funcionamento.htm>

Figura 2.8 – Sensor LVDT e suas respectivas partes.



Fonte: Adaptado de (FELICIANO et al., 2019).

Entretanto essa abordagem mostrou-se ineficiente para faixas de onda de 3 a 25 metros.

(WESTON et al., 2007) descrevem um método para estimar irregularidades em linhas ferroviárias usando dados de aceleração medidos a partir de trens de alta velocidade com a utilização de acelerômetros e giroscópios. (NAGANUMA et al.) descreve uma nova técnica de processamento inercial digital para sistemas de monitoramento de condições de vias férreas, entretanto com a utilização de dispositivo de medição denominado *RAIDARSS*. (PEREIRA et al., 2016) utiliza um instrumento de medição chamado *Trolley*. Contudo, locais que contenham passagem de nível, em centros urbanos, ou onde exista muito material sobre a via (até mesmo lixo na linha), por exemplo, impõem obstáculos ao seu uso, por restrição física. (ILDENFONSO, 2013) analisa dados obtidos de um carro controle *Plasser & Theurer EM40* (figura 2.9), de alto custo financeiro. Este trabalho propõe a utilização de acelerômetros de baixo custo instalados em um carro controle para o monitoramento de linhas férreas.

As medições realizadas em vias férreas apresentam ruído, em especial nos acelerômetros, que estão sujeitos à um maior número de fontes de interferência no sinal se comparados aos sensores mecânicos. A próxima seção aborda a remoção ou amenização desses ruídos.

2.3 ANÁLISE E REMOÇÃO DE RUÍDOS DE SINAIS DE SENSORES

Uma das técnicas para a análise dos sinais consiste em observá-los no domínio da frequência. A Transformada Discreta de Fourier (DFT) transforma sinal discreto (amostrado) no domínio do tempo em sinal discreto no domínio da frequência. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é um método para calcular de forma eficiente a DFT de uma série temporal (amostras de dados discretos) (CHOCHRAN et al., 1967). Já a Transformada

Figura 2.9 – Carro controle *Plasser Theurer EM40*.



Fonte: Adaptado de <<http://www.rpicturearchives.net/showPicture.aspx?id=1422401>>.

Discreta Inversa de Fourier (IDFT) é um algoritmo para desfazer o processo de DFT.

De acordo com (VANDERPLAS et al., 2012) Para uma função n -dimensional $g(\vec{x})$, podemos definir a Transformada de Fourier por

$$\hat{g}(\vec{k}) = \int x g(\vec{x}) e^{-i\vec{x}\cdot\vec{k}} \quad (2.1)$$

A transformação inversa de Fourier correspondente é

$$g(\vec{x}) = \int \frac{n k}{(2\pi)^n} \hat{g}(\vec{k}) e^{i\vec{k}\cdot\vec{x}}. \quad (2.2)$$

Destes, podemos ver que a função delta de Dirac n -dimensional pode ser escrita

$$\delta_D^n(\vec{x} - \vec{x}') = \frac{1}{(2\pi)^n} \int^n k e^{-i\vec{k}\cdot(\vec{x}-\vec{x}')} \quad (2.3)$$

de tal modo que

$$\int^n x f(\vec{x}) \delta_D^n(\vec{x} - \vec{x}') = f(\vec{x}') \quad (2.4)$$

Observe que a convenção de transformação de Fourier nas equações 2.1-2.2 é útil porque leva a uma forma particularmente simples do teorema da convolução, sem quaisquer fatores livres de $\sqrt{2\pi}$:

$$h(\vec{x}) = \int^n x' f(\vec{x}') g(\vec{x} - \vec{x}') \iff \hat{h}(\vec{k}) = \hat{f}(\vec{k}) \hat{g}(\vec{k}) \quad (2.5)$$

Para fins computacionais, é mais útil considerar a transformada discreta de Fou-

rier. É útil definir alguma notação para tornar as seguintes expressões mais compactas. Primeiro considere que um elemento do array n -dimensional G_{j_1, j_2, \dots, j_n} seja escrito $G_{\mathbf{j}}$, no qual \mathbf{j} é entendido como um vetor n -dimensional de inteiros, com $0 \leq j_i < N_i$. Também definiremos a soma múltipla

$$\sum_{\mathbf{j}} \equiv \sum_{j_1=0}^{N_1-1} \sum_{j_2=0}^{N_2-1} \cdots \sum_{j_n=0}^{N_n-1} \quad (2.6)$$

Usando esta notação, podemos escrever a transformada discreta de Fourier n -dimensional como

$$\hat{G}_{\mathbf{k}} = \sum_{\mathbf{j}} G_{\mathbf{j}} e^{(-2\pi i/N)\mathbf{j} \cdot \mathbf{k}}, \quad 0 \leq k_m < N_m \quad (2.7)$$

A transformada discreta inversa de Fourier correspondente é dada por

$$G_{\mathbf{j}} = \left[\prod_m \frac{1}{(N_m)^n} \right] \sum_{\mathbf{k}} \hat{G}_{\mathbf{k}} e^{(2\pi i/N)\mathbf{j} \cdot \mathbf{k}}, \quad 0 \leq j_\ell < N_\ell \quad (2.8)$$

A partir disso, vemos que a função delta de Kronecker pode ser escrita como

$$\delta_{\mathbf{j}\mathbf{j}'}^n = \left[\prod_m \frac{1}{(N_m)^n} \right] \sum_{\mathbf{k}} e^{(2\pi i/N)\mathbf{k} \cdot (\mathbf{j} - \mathbf{j}')} \quad (2.9)$$

de tal modo que

$$G_{\mathbf{j}} = \sum_{\mathbf{j}'} \delta_{\mathbf{j}\mathbf{j}'}^n G_{\mathbf{j}'} \quad (2.10)$$

As expressões nas equações 2.7 e 2.8 podem ser rapidamente calculadas usando o algoritmo Fast Fourier Transform.

A transformada rápida de Fourier (FFT) tornou-se conhecida como um algoritmo muito eficiente para calcular a transformada discreta de Fourier (DFT). A publicação do algoritmo FFT como um meio de calcular o DFT foi um ponto de virada no processamento de sinal digital e em certas áreas da análise numérica. Eles mostrou que o DFT, que se pensava anteriormente que requeria operações aritméticas n^2 , poderia ser calculado pelo novo algoritmo FFT usando um número de operações proporcionais a $n \log n$ (HEIDMAN et al., 1985).

Os filtros digitais são caracterizados em duas classes, dependendo da duração da sequência $y[n]$ quando aplicado em sua entrada um sinal do tipo impulso: filtros digitais cuja resposta ao impulso apresenta duração finita (*FIR Finite Impulse Response*) e filtros digitais cuja resposta ao impulso apresenta duração infinita (*IIR Infinite Impulse Response*). O filtro Butterworth é um exemplo de IIR.

O filtro Butterworth é um tipo de projeto de filtros eletrônicos. Ele é desenvolvido de modo a ter uma resposta em frequência o mais plana, o quanto for matematicamente pos-

sível na banda passante. A resposta em frequência de um filtro Butterworth é muito plana (não possui ripple, ou ondulações) na banda passante, e se aproxima do zero na banda rejeitada. Quando visto em um gráfico logarítmico, esta resposta desce linearmente até o infinito negativo. É o único filtro que mantém o mesmo formato para ordens mais elevadas (porém com uma inclinação mais íngreme na banda atenuada) ². Pode-se projetar filtros passa-alta, passa-baixa, passa-faixa, entre outros através do Butterworth.

No filtros passa-baixa Butterworth as características da fase são não lineares. A não linearidade das características de fase faz com que as propriedades dinâmicas do filtro projetado sejam indesejáveis. Para efeitos de compensação de atraso de grupo, pode-se usar os deslocadores de fase (filtros passa-tudo) (PISKOROWSKI, 2006).

Outro filtro também utilizado para a remoção de ruído em sinais é a média móvel. De uma forma geral, um sistema de média móvel (SMM) tem a função de calcular o n-ésimo valor da sequência de saída $y[n]$ por meio da média simples de M_T valores da sequência de entrada $x[n]$. Isso é matematicamente definido por

$$y[n] = (x[n - M_2] + x[N - (M_2 - 1)] + \dots + x[n(M_1 + 1)] + x[nM_1])/M_T \quad (2.11)$$

No que se refere à análise estatística dos sinais, além da média (equação 2.12), tem-se a variância (equação 2.13), uma medida de dispersão que mostra quão distantes os valores estão da média e o desvio padrão (equação 2.14) que é simplesmente o resultado positivo da raiz quadrada da variância. Na prática, o desvio padrão indica qual é o erro se se um dos valores coletados fosse substituído pelo valor da média.

$$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{n} \quad (2.12)$$

$$var(x) = \sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2.13)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.14)$$

Acelerômetros fornecem dados de aceleração. Para obter a posição, uma integral dupla deve ser aplicada ao sinal. Para obter uma integração dupla, uma integração simples deve ser feita duas vezes. A aceleração é a taxa de variação da velocidade de um objeto. Ao mesmo tempo, a velocidade é a taxa de mudança da posição desse mesmo objeto. Em outras palavras, a velocidade é a derivada da posição e a aceleração é a derivada da

² https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/PI-1/2011_1/Filtros.pdf

velocidade, assim

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad e \quad \vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad \therefore \quad \vec{a} = \frac{d(d\vec{v})}{dt^2} \quad (2.15)$$

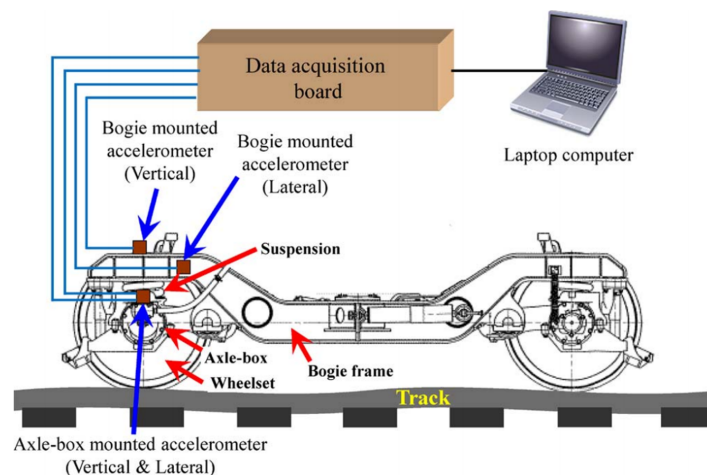
A integração é o oposto da derivada. Se a aceleração de um objeto for conhecida, podemos obter os dados de posição

$$v = \int (\vec{a}) dt \quad e \quad \vec{s} = \int (\vec{v}) dt \quad \therefore \quad \vec{s} = \int \left(\int (\vec{a}) dt \right) dt \quad (2.16)$$

O quadro 2.1 compara os trabalhos relacionados nos aspectos de medição das vias e filtragem de sinais obtidos de acelerômetros que visam o monitoramento de linhas férreas.

(LEE et al., 2012) utiliza a filtragem mista para a remoção dos ruídos presentes no sinal, através dos seguintes filtros: *State-Space Model*, filtro de *Kalman*, filtro passa-banda e filtro de compensação de amplitude e fase. A obtenção de dados de acelerômetros instalados em trens de alta velocidade é mostrada na figura 2.10. Na abordagem de filtragem mista para estimar a irregularidades laterais da pista, os filtros de compensação foram muito eficazes no que diz respeito aos resultados obtidos da caixa de eixo e dos acelerômetros de bogie nas bandas de onda de 25 a 70 m e 70 a 200 m, e eles são moderadamente eficazes na faixa de onda de 3 a 25 m, presumivelmente devido à conicidade das rodas e ao comportamento da suspensão sob movimento lateral. Na abordagem de filtragem mista para estimar a irregularidades verticais da pista, os filtros de compensação são pouco eficazes nas bandas de onda de 3 a 25 m para acelerômetros de caixa de eixo e de 25 a 70 m para acelerômetros de caixa de eixo e bogie. No entanto, os filtros são insignificantes nas faixas de onda de 3 a 25 m para os acelerômetros do bogie e de 25 a 70 m para a caixa de mancal e os acelerômetros do bogie.

Figura 2.10 – (LEE et al., 2012): Obtenção de dados.



Fonte: (LEE et al., 2012).

No trabalho de (WESTON et al., 2007), demonstrou-se que a irregularidade média da via vertical pode ser estimada usando um giroscópio de taxa de inclinação montado em um veículo (trem de alta velocidade) em serviço. Foi demonstrado o uso de um giroscópio de taxa de inclinação para estimar o alinhamento vertical médio da pista em comprimentos de onda acima daqueles onde a filtragem geométrica da distância entre eixos do bogie e a filtragem dinâmica do sistema de suspensão primário afetam os resultados, resultando em boas estimativas para comprimentos de onda maiores que 6 m a velocidades do veículo acima de alguns metros por segundo. O trabalho propôs além da dupla integração, a aplicação do filtro passa-alta e a qualidade RMS.

(NAGANUMA et al., 2008) aplica a integração digital utilizando um filtro passa-alta, o *inertial mid-chord offset method* e o *versine composite calculation* em dados obtidos de um dispositivo denominado RAIDARSS. O trabalho propôs um método que estabiliza a integração: o Frequency Variable Difference Filter. A carga de processamento mostrou-se muito leve utilizando-se este método.

(SUWANDI et al., 2019) utiliza o filtro LMS (mínimo erro médio quadrático) combinado com o passa-baixa. O sistema de filtragem abordado no trabalho é capaz de adaptar-se às mudanças nas frequências de vibração do veículo.

Por fim, (LIANG et al., 2015) buscou utilizar a técnica ANC (Cancelamento de Ruído Ativo) como pré-processamento do sinal a fim de aumentar a relação sinal-ruído. Os resultados dos experimentos demonstraram que, se um rodado está girando em baixa velocidade, o método ANC é menos atraente por causa da boa relação sinal-ruído original no sinal de vibração. No entanto, se um rodado estiver à uma velocidade relativamente alta, há um significativo nível de ruído apresentado. Por exemplo, os contatos entre a roda e o trilho podem contaminar o sinal desejado causado por defeitos na superfície do trilho e dificultar a detecção. Os experimentos provaram que ANC pode ser uma forma eficaz de eliminar esse ruído indesejado.

Quadro 2.1 – Trabalhos relacionados.

TRABALHO	MEDIÇÃO	FILTRAGEM DOS SINAIS
(LEE et al., 2012)	Acelerômetros capacitivos instalados em trens de alta velocidade	State-Space Model, filtro de Kalman, filtro passa-banda e filtro de compensação de amplitude e fase
(WESTON et al., 2007)	Dados de aceleração medidos a partir de trens de alta velocidade com a utilização de acelerômetros e giroscópios	Dupla integração, filtro passa-alta e qualidade RMS
(NAGANUMA et al., 2008)	Dispositivo RAIDARSS	Integração digital, filtro passa-alta, inertial mid-chord offset method e versine composite calculation
(SUWANDI et al., 2019)	Sensor IMU de 9 eixos, leitor OBD-II, e microcontrolador	Filtro LMS (mínimo erro médio quadrático) combinado com o passa-baixa
(LIANG et al., 2015)	Dados de aceleração medidos em trens de alta velocidade	Técnica ANC (Cancelamento de Ruído Ativo) como pré-processamento do sinal a fim de aumentar a relação sinal-ruído

Fonte: Autor.

O presente trabalho utiliza acelerômetros e giroscópios de baixo custo financeiro instalados em um carro controle *Plasser & Theurer EM40* (figura 2.9), de baixa velocidade. No que se refere aos sinais, remove-se ruídos dos dados desses sensores através de filtros de média móvel e filtro de Butterworth, entre outras técnicas descritas a seguir. Ainda, apresenta um método para detectar quando o carro controle está em curva a partir de acelerômetros e um método para detecção da orientação dos eixos dos acelerômetros.

No próximo capítulo são apresentados os métodos abordados nesse trabalho para análise e remoção de ruídos em sinais de acelerômetros bem como a análise de resultados.

3 MÉTODOS E RESULTADOS

Neste capítulo, mostram-se a metodologia abordada no presente trabalho para a medição de linhas férreas, filtragem de dados e resultados obtidos através da análise desses dados.

3.1 MEDIÇÃO DE LINHA FÉRREA

A linha férrea analisada pertence à empresa Rumo¹. O trecho da linha férrea referente aos gráficos deste capítulo é mostrado na figura 3.1. Os dados foram coletados de uma rede de sensores (MPU6050) instalados em um carro controle de monitoramento de linhas férreas *Plasser & Theurer EM40* (figura 2.9). Os sensores foram instalados no *axle-box* das rodas (figura 3.2). Todavia os dados de sensores preexistentes no carro foram utilizados apenas fins comparativos. A velocidade média do carro controle durante a medição foi de 4 m/s.

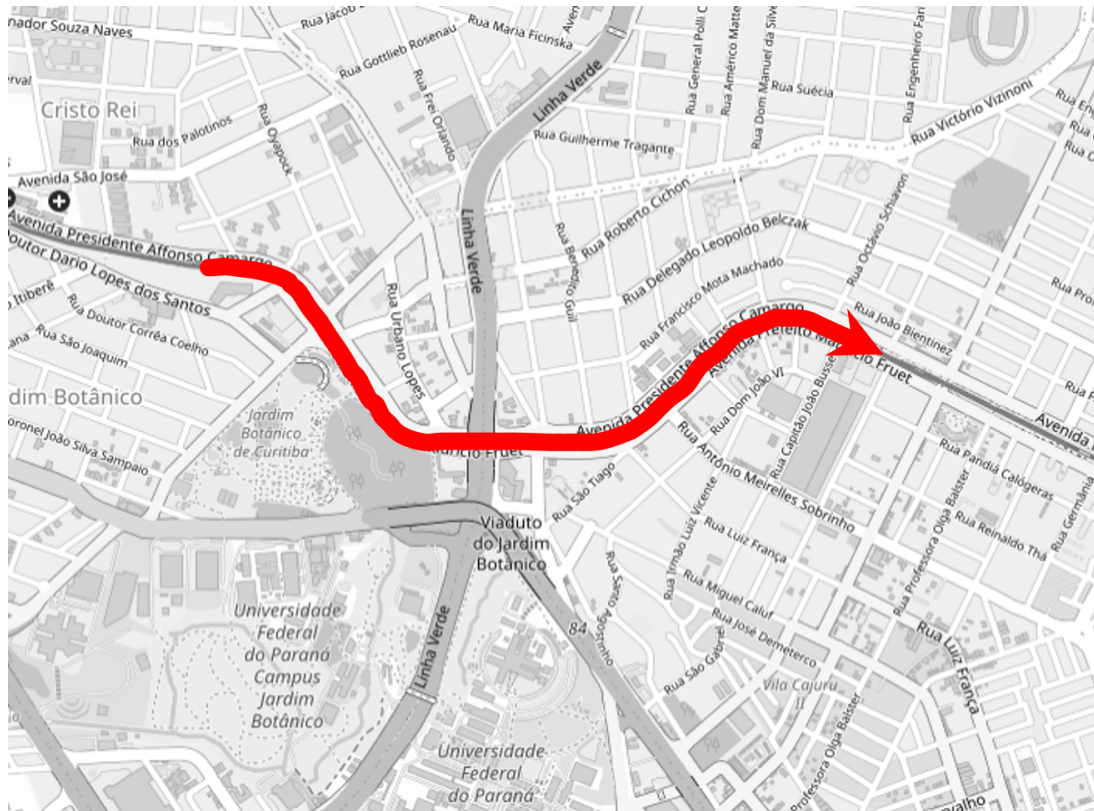
O MPU6050 é uma tecnologia de processamento de movimento compacta baixo custo e baixa potência (3,3 Volts) (PRINCE et al., 2014). O circuito integrado MPU-6050 é um sensor fabricado pela empresa *IvenSense Inc.*, que reúne três sensores giroscópio (1 para cada eixo X, Y e Z), três sensores acelerômetros (também um para cada eixo) e um Processador Digital de Movimentos (*Digital Motion Processor* ou DMP) em um único chip. Ele utiliza a comunicação I2C para a transmissão dos dados, possui internamente três conversores analógico/digital de 16 bits para a discretização dos valores dos acelerômetros e dos giroscópios internos. O sensor possui boa precisão para movimentos rápidos ou lentos. O giroscópio possui escalas de ± 250 , ± 500 , ± 1000 ou ± 2000 graus por segundo (muitas vezes chamados de dps - *degrees per second*). Já os acelerômetros possuem faixas de medição de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ ou $\pm 16g$, sendo 1g a aceleração da gravidade, que corresponde a aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$ (LAGE et al., 2016).

3.2 DETECÇÃO DE CURVAS

Os dados apresentam comportamento diferente quando o carro controle está em curva. Logo, fazem-se necessários ajustes nos cálculos e filtros de ruídos. Ainda, na aplicação da integral nos dados dos acelerômetros, sabe-se que em retas o sinal, em média, deveria ser próximo de zero. Portanto, a detecção de curvas é crucial para análise

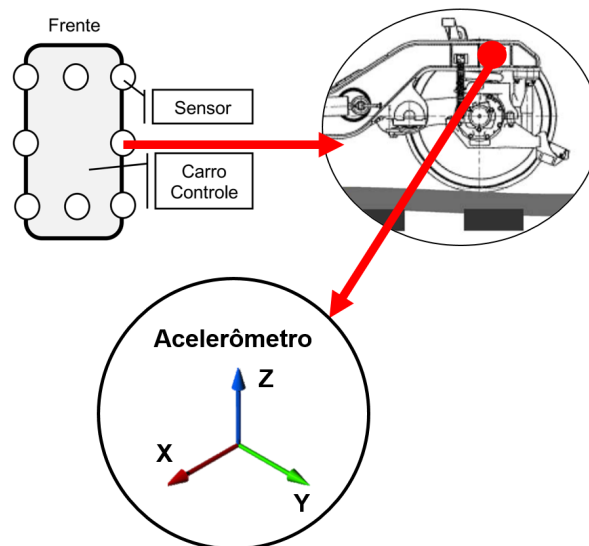
¹<https://rumolog.com/>

Figura 3.1 – Localização do trecho da linha férrea em análise (Curitiba-PR).



Fonte: Adaptado de *OpenStreetMap*.

Figura 3.2 – Localização dos sensores instalados no carro controle.



Fonte: Autor.

dos dados de medições de linhas férreas a partir de acelerômetros.

Um método para detectar trechos em que o carro controle está realizando medições em curva é proposto neste trabalho. Inicialmente faz-se a média dos eixos Y de todos

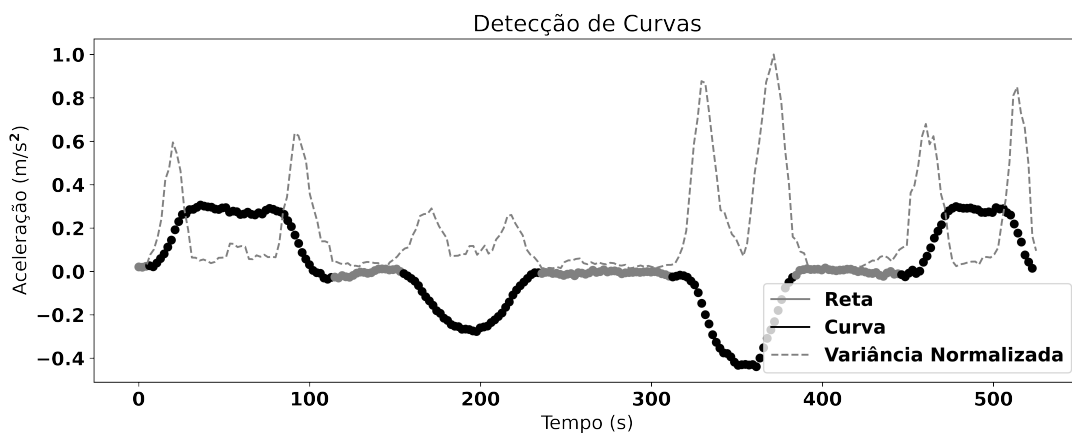
acelerômetros e aplica-se o filtro de média móvel para atenuação de ruídos. Em seguida, calcula-se a variância de pequenas janelas do sinal e após aplica-se o filtro de média móvel.

No gráfico 3.1 observa o sinal médio dos acelerômetros para o trecho mostrado na figura 3.1 e a respectiva variância (normalizada para o intervalo [0..1]). Identifica-se os picos relevantes na variância. Um pico é interpretado como a transição entre uma reta e uma curva ou entre uma curva e uma reta. Logo, intercala-se os picos em entrada e saída de curvas. Para o trecho mostrado na figura 3.1, o gráfico 3.1 mostra as curvas/retas que foram detectadas.

Para um pico ser considerado uma transição entre curva/reta deve ter uma considerável distância de duração e amplitude. Esses parâmetros variam de acordo com a geografia do local. Por exemplo, em trechos de serra as curvas tendem a ser mais acentuadas.

Analisando-se o mapa (figura 3.1) e o gráfico 3.1, observa-se que a metodologia proposta detecta corretamente os trechos nos quais o carro controle está em curva ou em reta, bem como as transições curva/reta.

Gráfico 3.1 – Detecção de curvas.



Fonte: Autor.

3.3 DETECÇÃO DE EIXOS DOS ACELERÔMETROS

Para a correta análise das condições das vias férreas, faz-se necessária a calibração dos sensores antes das medições. Entretanto, esta calibração pode não ser realizada de maneira correta ou precisa pelo operador do carro controle. Ainda, a orientação dos sensores instalados no carro controle (acelerômetros) não é a padrão. Logo, faz-se necessária a correta detecção dos eixos dos acelerômetros, bem como o respectivo sinal.

Tendo como base o desvio padrão dos dados de cada eixo dos acelerômetros, normalizados no intervalo de 0 à 1, observou-se que o eixo Z apresenta valores próximos à zero, o eixo X apresenta valores intermediários e o eixo Y apresenta valores superiores à 0.9. Desse modo, analisando-se todo o trecho, pode-se identificar a orientação dos eixos dos acelerômetros. Os sinais (positivo/negativo) do eixo Z puderam ser identificados pela média dos valores e do eixo X pela aceleração inicial, uma vez que o carro inicia a medição parado e em seguida começa a se locomover. Essa aceleração inicial é detectada e utilizada para a detecção do sinal. A partir do eixo X e Z, pode-se obter a projeção do eixo Y.

Realizou-se experimentos com apenas uma parte inicial do trecho, que mostraram resultados idênticos à análise de todo trecho, entretanto alterando-se os limites de desvio padrão. A detecção de eixos apenas com o carro controle parado mostrou-se insatisfatória.

No quadro 3.1, mostra-se a detecção da orientação dos eixos dos acelerômetros através da metodologia proposta no presente trabalho, que após análises, mostrou-se ser a correta, em comparação com a calibragem manual, que apresenta erros.

Quadro 3.1 – Eixos dos acelerômetros.

Acelerômetro	Manual			Detecção		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Esquerdo Dianteiro	+z	-y	-x	+z	-y	+x
Esquerdo Central	-z	-y	+x	+z	+y	-x
Esquerdo Traseiro	+y	-x	-z	+z	+y	-x
Meio Dianteiro	+z	-y	-x	+z	-y	+x
Meio Traseiro	+z	+x	-y	+z	-x	+y
Direito Dianteiro	+z	-y	-x	+z	-y	+x
Direito Central	-z	-y	+x	+z	-y	+x
Direito Traseiro	+y	-x	-z	+z	+x	-y

Fonte: Autor.

3.4 ANÁLISES DAS ACELERAÇÕES QUE INFLUENCIAM NO CÁLCULO DO ALINHAMENTO

O alinhamento (equação 3.1) é uma medida de quão alinhado está um trilho. Se ele está reto, o alinhamento é 0; se ele está torto (como em uma curva), o alinhamento é diferente de zero. Por convenção, com a curva para um lado o alinhamento é positivo e para o outro é negativo. Ainda por convenção, usa-se como medida de alinhamento o

número de milímetros que o centro de uma linha de 10 m está distante do ponto onde deveria estar se a linha fosse reta. Se estivesse reta, no centro teria a média entre os dois extremos, se não for reta, o alinhamento é a distância entre a medida no centro e a média nos dois extremos. Essas medidas nos extremos e no centro são medidas de deslocamento lateral. A medida do alinhamento também é chamada de flecha (considerando que a linha curva é um arco de um círculo).

$$\text{alinhamento} = \text{central} - \frac{\text{dianteiro} + \text{traseiro}}{2} \quad (3.1)$$

Um acelerômetro mede aceleração, que é um sinal que varia muito. Com o carro controle parado, a aceleração deve ser 0, mas os sensores não são perfeitos, eles apresentam um valor diferente de 0 quando está parado (esse valor está em constante variação, em volta de um valor que deveria ser 0). Para se descobrir o valor do 0, calcula-se a média de vários valores enquanto o carro está parado, para obter uma aproximação do valor que o acelerômetro lê quando deveria ler 0. Esse valor é então subtraído de todas as leituras.

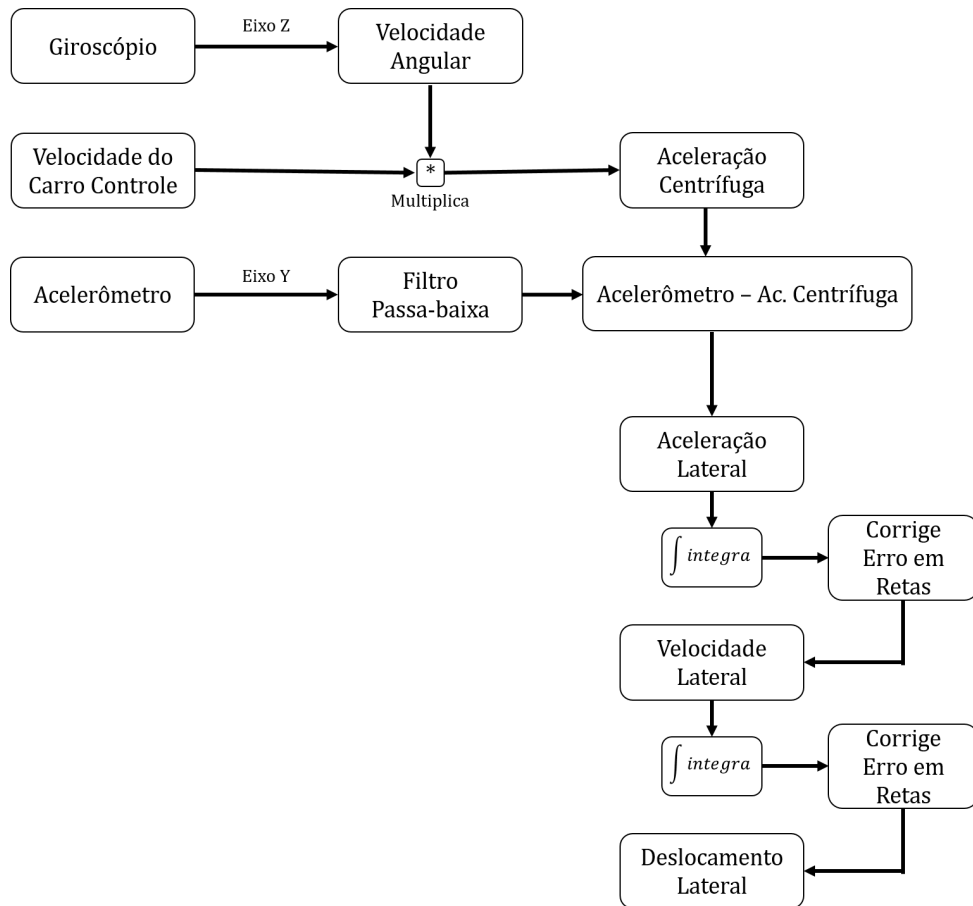
Quando se integra os valores do acelerômetros, soma-se todos os valores do acelerômetro. Se o zero não for perfeito, o pequeno valor diferente de zero vai ser somado várias vezes, e o que deveria ser 0 (a velocidade do carro que está parado) não é mais. Quando se integra a segunda vez, acumula-se o erro novamente, e conseqüentemente o deslocamento de algo que tá parado, que deveria ser constante, não é mais. Entretanto pode-se melhorar os resultados, a partir de algumas constantes. Uma abordagem para minimizar o erro acumulado ao calcular-se a integral, consiste em aproximar de zero a média dos sinais quando o carro controle está em reta.

Outro detalhe importante é que o acelerômetro mede a aceleração centrífuga junto com a aceleração lateral. Para isolar a aceleração lateral deve-se retirar a aceleração centrífuga, que é a velocidade linear multiplicada pela velocidade angular. A velocidade angular pode ser obtida a partir de giroscópios e a aceleração centrífuga consiste em multiplicar a velocidade do carro controle pela velocidade angular.

A figura 3.3 mostra a metodologia abordada neste trabalho para o cálculo do deslocamento lateral. Os dados utilizados nesta seção são referentes ao trecho mostrado na figura 3.1. O gráfico 3.2 mostra a velocidade angular medida pelo giroscópio, no gráfico 3.3 observa-se os sinais brutos do acelerômetro e no gráfico 3.4 os dados do acelerômetro com filtro passa-baixa.

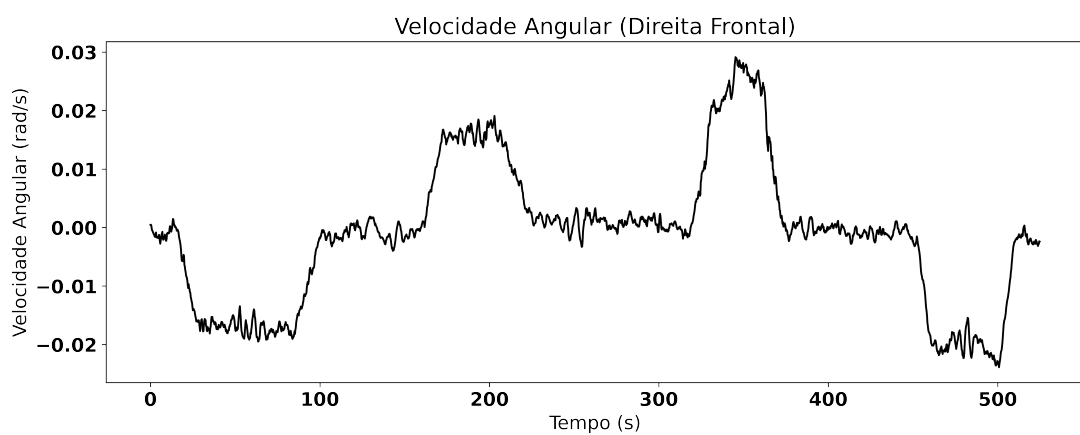
O gráfico 3.5 exhibe a velocidade do carro controle durante a medição da linha férrea (figura 3.1). A aceleração centrífuga para o mesmo trecho é mostrada no gráfico 3.6. No gráfico 3.7 pode-se observar a aceleração lateral e no gráfico 3.8 a velocidade lateral. No gráfico 3.9 compara-se o deslocamento lateral calculado a partir de acelerômetros com o deslocamento lateral obtido através de sensores LVDT.

Figura 3.3 – Processo de obtenção do deslocamento lateral.



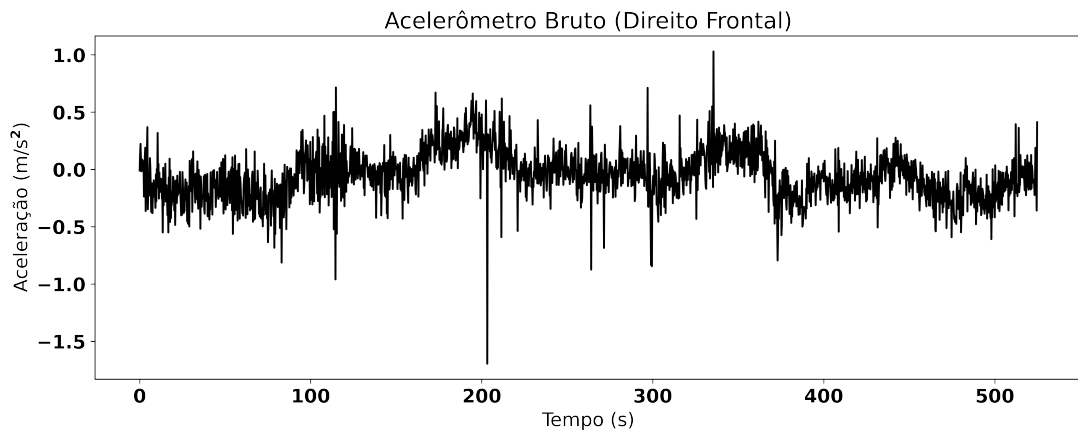
Fonte: Autor.

Gráfico 3.2 – Velocidade angular obtida através de giroscópio (trecho figura 3.1).



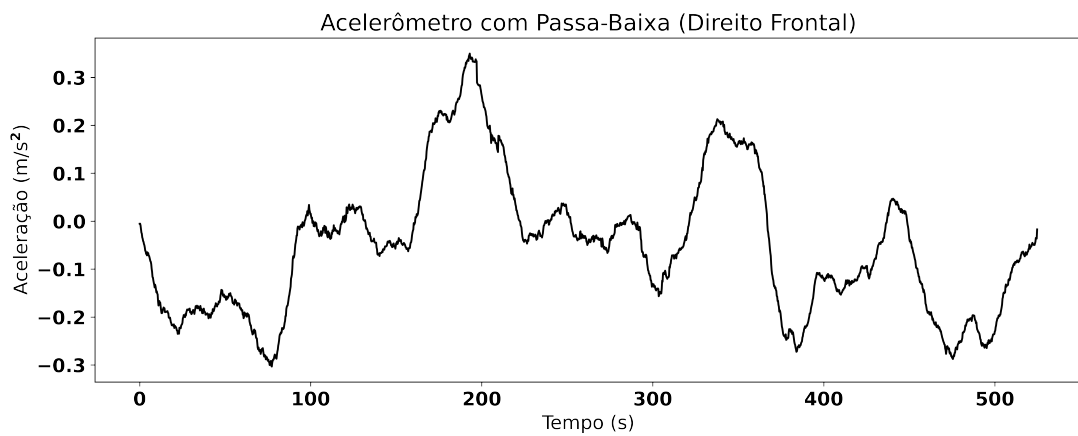
Fonte: Autor.

Gráfico 3.3 – Acelerômetro, dados brutos, referentes ao trecho figura 3.1.



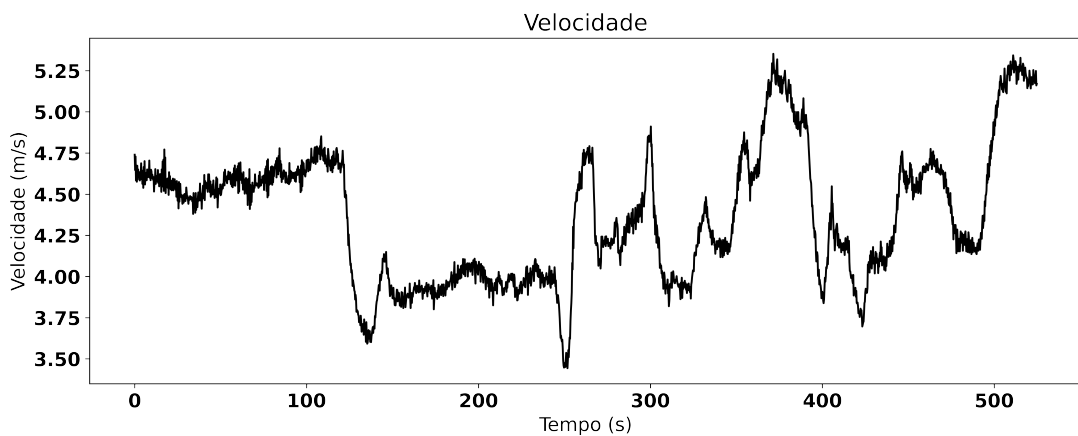
Fonte: Autor.

Gráfico 3.4 – Acelerômetro com filtro passa-baixa (trecho figura 3.1).



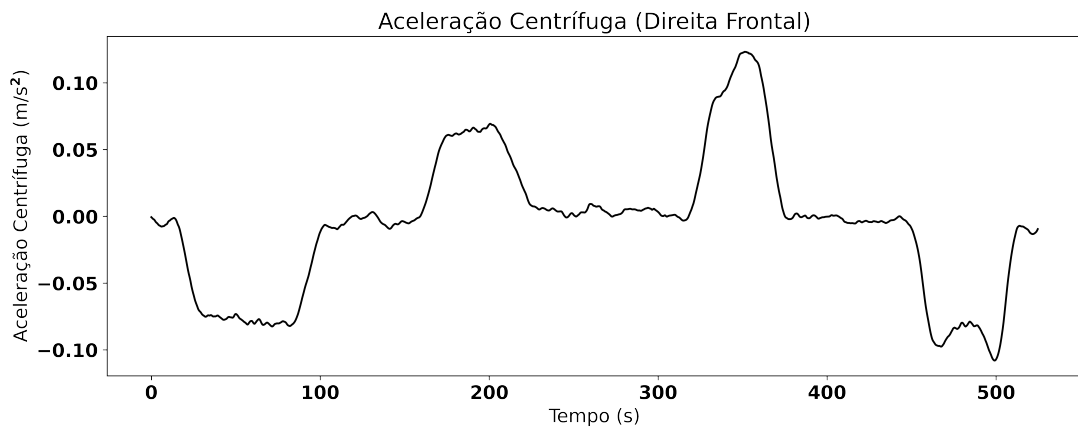
Fonte: Autor.

Gráfico 3.5 – Velocidade do carro controle (trecho figura 3.1).



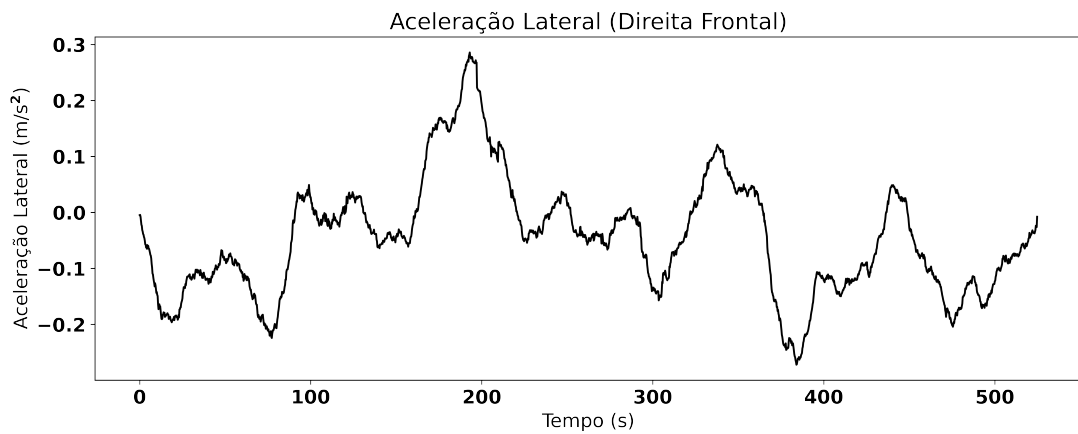
Fonte: Autor.

Gráfico 3.6 – Aceleração centrífuga: velocidade do carro controle multiplicada pela velocidade angular (trecho figura 3.1).



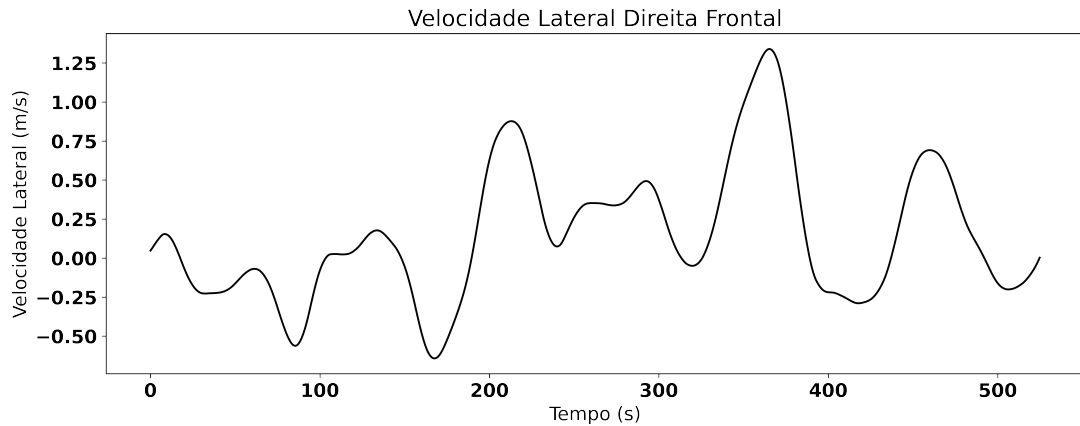
Fonte: Autor.

Gráfico 3.7 – Aceleração lateral: Aceleração centrífuga subtraída dos dados do acelerômetro com filtro passa-baixa (trecho figura 3.1).



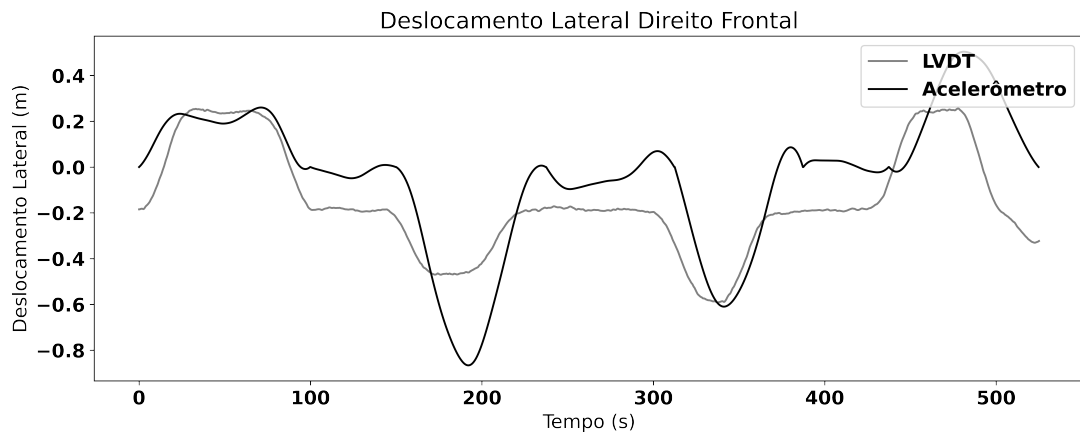
Fonte: Autor.

Gráfico 3.8 – Velocidade lateral (trecho figura 3.1).



Fonte: Autor.

Gráfico 3.9 – Deslocamento lateral (trecho figura 3.1).



Fonte: Autor.

Na comparação dos deslocamentos laterais calculados a partir dos acelerômetros e giroscópios com o deslocamento lateral medido pelos sensores LVDT, constata-se ambos seguem as mesma tendência. Entretanto, para maior riqueza de detalhes nos resultados, fazem-se necessárias maiores análises e filtragens dos sinais.

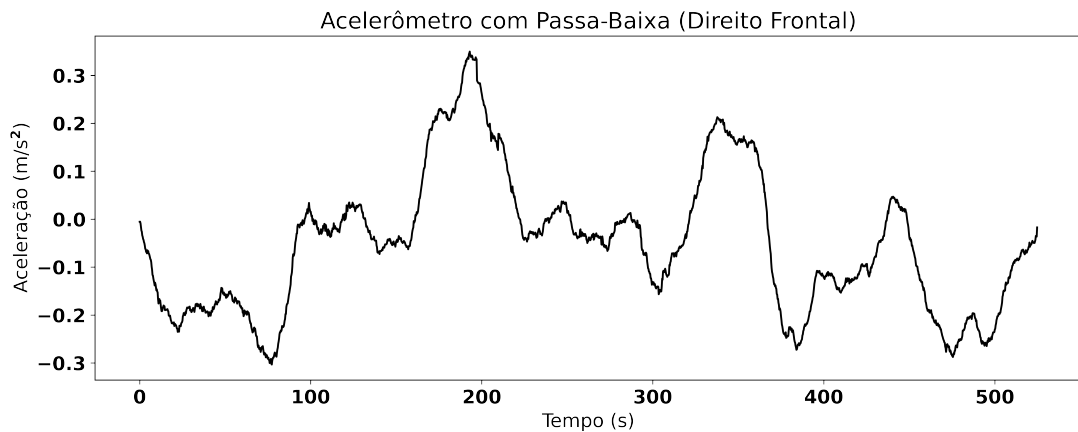
3.5 FILTRAGEM DE SINAIS DE ACELERÔMETROS

Uma breve análise dos dados e filtragem de sinais é mostrada nesta seção. O gráfico 3.10 apresenta o sinal de um acelerômetros apenas com filtro passa-baixa e o gráfico 3.11 mostra o respectivo espectro de frequências. A frequência é definida como um número de ciclos por unidade de tempo. A unidade para a frequência é o hertz (Hz), de modo que 1 Hz significa que o evento se repete uma vez por segundo.

Ao analisar-se o espectro de frequências, projetou-se um filtro Butterworth passa-baixa de 5º ordem à 16 Hz. O filtro de Butterworth é desenvolvido de modo a ter uma resposta em frequência o mais plana o quanto for matematicamente possível na banda passante. No gráfico 3.12 compara-se o sinal do gráfico 3.10 com e sem filtro de Butterworth.

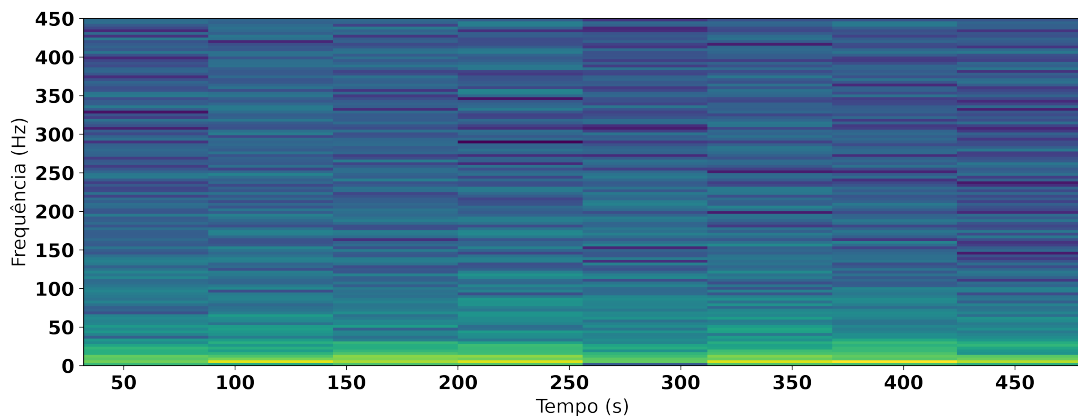
Observa-se que o filtro de Butterworth é promissor para a filtragem de sinais de acelerômetros obtidos de carros controle de monitoramento de linhas férreas. Entretanto, a comparação da filtragem proposta neste trabalho com outras técnicas de remoção de ruídos bem como a aplicação desses dados para a obtenção de alinhamento e bitola pode ser abordada em trabalhos futuros.

Gráfico 3.10 – Acelerômetro direito dianteiro (trecho figura 3.1).



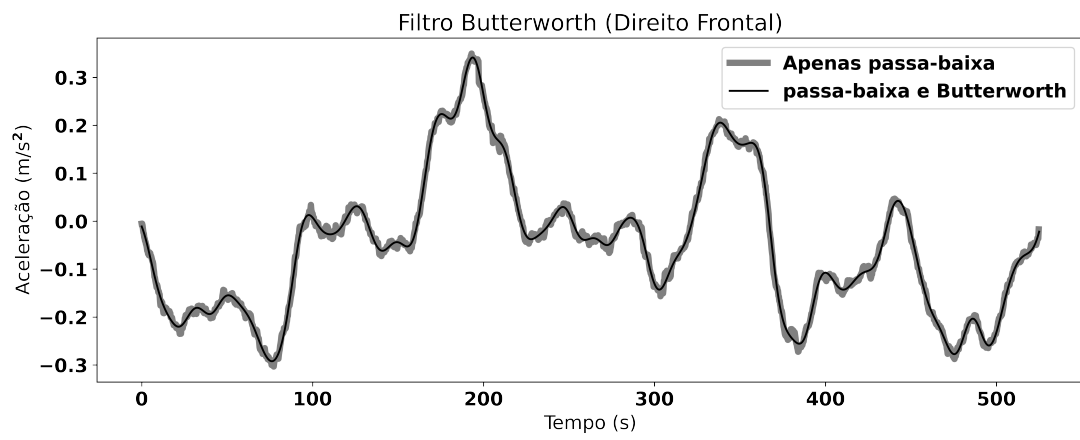
Fonte: Autor.

Gráfico 3.11 – Espectro de frequências (gráfico 3.10).



Fonte: Autor.

Gráfico 3.12 – Filtro de Butterworth aplicado nos dados do acelerômetro direito frontal referente ao trecho mostrado na figura 3.1.



Fonte: Autor.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Defeitos em linhas férreas podem ocasionar graves acidentes e problemas em trens. Logo, faz-se necessário o constante monitoramento das ferrovias. Entretanto, geralmente a verificação das vias é realizada através de sensores de alto custo financeiro. O presente trabalho propôs a utilização de acelerômetros de baixo custo para realizar essa tarefa.

O presente trabalho apresentou uma metodologia eficaz para a detecção em que o carro controle está realizando medições em curva a partir de dados de acelerômetros. Essa detecção é importante para ajustes de cálculos, melhor filtragem dos dados e correções ao calcular integrais (evitando-se o acúmulo de erros).

A detecção automatizada da orientação dos eixos de acelerômetros instalados no carro também foi desenvolvida no presente trabalho, fazendo-se assim, a calibragem automática dos sensores do carro, o que proporciona maior confiabilidade na aferição das linhas férreas.

Ainda, o trabalho apresentou a análise das acelerações que influenciam no cálculo do alinhamento dos trilhos de vias férreas, obtidas através de acelerômetros. Estas apresentaram, para o mesmo trecho, a mesma tendência dos dados de sensores LVDTs, mostrando-se deste modo que com o aprofundamento das técnicas de filtragem de sinais, pode-se obter alinhamento dos trilhos a partir de acelerômetros. Por fim, apresentou uma técnica promissora para a filtragem de sinais de acelerômetros no contexto do presente trabalho.

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, pode-se realizar análises dos dados mais detalhadas e aplicar diferentes técnicas de filtragem dos sinais para obter melhores dados de alinhamento e a partir desses, o cálculo da bitola dos trilhos. É válido analisar novos parâmetros de conservação de vias férreas, tais como empeno e nivelamento. Da mesma forma, pode-se automatizar a detecção de pontos com irregularidades nas vias. Ainda, pode-se adaptar os cálculos para melhor análise de dados em curvas.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, A.; DAS, S.; PAN, I. DAS, S. **Extending the Concept of Analog Butterworth Filter for Fractional Order Systems**. *Signal Processing*, v. 94, p. 409420, 2014.

ALBERTIN, A. L.; ALBERTIN R. M. M. **A Internet Das Coisas Irá Muito Além Das Coisas**. *GVEXECUTIVO*, v. 16, n. 2, p. 13-17, 2017.

CARRION, P.; QUARESMA, M. **Internet da Coisas (IoT): Definições e aplicabilidade aos usuários finais**. *HFD*, v.8, n.15, p. 49-66, mar. 2019.

CHOCHRAN, W. T. et al. **What Is the Fast Fourier Transform?**. *Proceedings of the IEEE*, v. 55. n. 10, p. 1664-1674, out. 1967.

DINIZ, ARIANO O.. **Monitor de Vibração Contínua com uso de Acelerômetro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011. 168 p.

FELICIANO, CHRISTIAN S.; NOLL, VALDIR; SOUSA, ANDRÉ. **Desenvolvimento de um Módulo de Condicionamento e Monitoramento de Sinais para Sensores LVDT**. *Metrologia*, Florianópolis-SC, 8 p., 2019.

HEIDMAN, MICHAEL T.; JOHNSON, DON H.; BURRUS, C. SIDNEY. **Gauss and the History of the Fast Fourier Transform**. *Archive for History of Exact Sciences*, v. 34, n. 3, p. 265-277, 1985.

ILDENFONSO, J. S. **Proposta de um Sistema de Gerência para Vias Férreas Brasileiras**. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, 2013. 171 p.

LAGE, V. N.; SEGUNDO, A. K. R. **O uso de Giroscópios e Acelerômetros Para a Modelagem Matemática de uma Plataforma com Dois Graus de Liberdade**. XXI Congresso Brasileiro de Automática, 5 p., 2016.

LAGHARI, W. M.; BALOCH, M. U.; MENGAL, M. A.; SHAH, S. J. **Performance Analysis of Analog Butterworth Low Pass Filter as Compared to Chebyshev Type-I Filter, Chebyshev Type-II Filter and Elliptical Filter**. *Circuits and Systems*, v. 5, n. 9, p. 209-216, 2014.

LEE, J. S.; CHOI, S.; KIM, S.; PARK, C.; KIM, Y. G. **A Mixed Filtering Approach for Track Condition Monitoring Using Accelerometers on the Axle Box and Bogie**. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 61, n. 3, p. 749-758, 2012.

LIANG, B.; IWNIKI, S.; BALL, A.; YOUNG, A. E. **Adaptive noise cancelling and time-frequency techniques for rail surface defect detection**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 41-51, 2015.

MELO, M. A. A.; Kim, H. Y. **Filtragem de Sinais do Acelerômetro pela Difusão Anisotrópica**. Disponível em: <<http://www.lps.usp.br/hae/cba04-aceler.pdf>>. Acesso em 06 dez, 2020.

MENEGUZZI, LEONARDO; TREIS, ROGER F.; CENDRON, MARCELO M. **Utilização de Giroscópio e Acelerômetro para Identificação de Movimentação em Ambientes Tridimensionais**. FICE, Blumenau-SC, 5 ed., 9 p., 2016.

NAGANUMA, Y.; KOBAYASHI, M.; NAKAGAWA, M.; OKUMURA T. **Condition Monitoring of Shinkansen Tracks using Commercial Trains**. International Conference on Railway Condition Monitoring, 4 ed., p. 1-6, 2008.

PEREIRA, J. A. **Impactos das Condições das Vias Permanentes na Operação Ferroviária: Avaliação de um Método de Inspeção das Condições de Manutenção e Reabilitação de Ferrovias**. Monografia (Curso de Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza-CE, 2016. 43 p.

PEREIRA, MARCELO. **Anuário da Produção Acadêmica Docente**. Faculdade Anhangera de Jaraguá do Sul SC, Brasil, 10 p., 2018.

PISKOROWSKI, JACEK. **Phase-Compensated Time-Varying Butterworth Filters**. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, v. 47, p. 233-241, 2012.

PLASSER, 2020. Acesso em 10 ago. 2020. **Dados Relevantes para Trabalhos de Manutenção Programada**, Disponível em: <<https://www.plasser.com.br/pt/maquinas-sistemas/trabalhos-de-medicao.html>>.

PRINCE, P. G. K.; HEMAMALINI, R.; RAJKUMAR, R. I. **LabVIEW based Abnormal Muscular Movement and Fall Detection using MEMS Accelerometer during the Occurrence of Seizure**. Indian Journal of Science and Technology, v. 7, p. 16251631, out. 2014.

ROCHA, FÁBIO S.; MARRAGHELLO, GUILHERME F. **Propriedades de um Acelerômetro Eletrônico e Possibilidades de uso no Ensino de Mecânica**. Latin-American Journal of Physics Education, p. 37-46, 2013.

SEIFERT, K.; CAMACHO, O. **Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers**. Freescale Semiconductor, 13 p., 2007.

SILVA JÚNIOR, ELISEU C.; LOPES, LUIZ A. S.; CASTRO, CARMEN D. **Metodologia para Prevenção da Flambagem Lateral de Trilho**. Monografia (Instituto Militar de Engenharia - Departamento de Ciência e Tecnologia), Rio de Janeiro-RJ, 13 p., 2016.

SUWANDI, BONDAN; KITASUKA, TERUAKI; ARITSUGI, MASAYOSHI. **Vehicle Vibration Error Compensation on IMU-accelerometer Sensor Using Adaptive Filter and Low-pass Filter Approaches**. Journal of Information Processing, v. 27, p. 33-40, 2019.

VALE, 2020. Acesso em 10 ago. 2020. **Qual a importância das ferrovias para o desen-**

volvimento socioeconômico?. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/qual-a-importancia-das-ferrovias-para-o-desenvolvimento-socioeconomico-de-um-pais.aspx>>.

VANDERPLAS, JACOB T. **Karhunen-Loève Analysis for Weak Gravitational Lensing**. 153 p. Tese (Doutorado em Astronomia) - University of Washington, 2012.

WESTON, P. F.; LING, C. S.; ROBERTS, C.; GOODMAN, C. J.; LI, P.; GOODAL, R. M. **Monitoring Vertical Track Irregularity from In-Service Railway Vehicles**. Proc. IMechE, v. 221, Part F: J. Rail and Rapid Transit, p. 75-88, 2007.