

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WILLIAN GAUSS SAMPAIO MACHADO
JHONATHAN WILLIAN PEREIRA CAMARGO

**SISTEMA DE ANÁLISE DE NIVELAMENTO LONGITUDINAL PARA
SEGURANÇA DAS FERROVIAS**

CURITIBA

2018

WILLIAN GAUSS SAMPAIO MACHADO
JHONATHAN WILLIAN PEREIRA CAMARGO

**SISTEMA DE ANÁLISE DE NIVELAMENTO LONGITUDINAL PARA
SEGURANÇA DAS FERROVIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas Embarcados da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e Eletrônico.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicio Haas Rambo

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

**WILLIAN GAUSS SAMPAIO MACHADO
JHONATHAN WILLIAN PEREIRA CAMARGO**

**SISTEMA DE ANÁLISE DE NIVELAMENTO LONGITUDINAL PARA
SEGURANÇA DAS FERROVIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas Embarcados da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e Eletrônico:

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicio Haas Rambo
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Ph.D. Henri Frederico Eberspacher
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 26 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter nos dados sabedoria, saúde e força para superar as dificuldades.

Às nossas famílias que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que nós chegássemos até este momento, e tiveram paciência para abdicar do nosso tempo livre para que pudéssemos nos dedicar ao curso.

Ao nosso amigo e orientador, Dr. Marcos Vinicio Haas Rambo, pelo comprometimento, paciência e incentivos.

Aos amigos que fizemos dentro do curso e que são parte da nossa vida e à todos os profissionais e funcionários do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná pelo apoio recebido ao longo desses seis anos e meio.

A empresa Serra Verde Express, na pessoa do Engenheiro Daniel, por ter disponibilizado o seu tempo, o espaço e os vagões para testes e nos atendendo de forma cortês.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

RESUMO

A manutenção preventiva sempre será um fator preponderante quanto a segurança dos passageiros e a produtividade de uma companhia de transportes. O objetivo é buscar meios mais rápidos e seguros de se locomover e transportar grandes quantidades de carga.

Pensando na produtividade e segurança, existem vários parâmetros que são de extrema importância para a manutenção da ferrovia. Além de existirem veículos de inspeção que possibilitam determinar esses erros. Nesse trabalho será abordado apenas o nivelamento longitudinal da ferrovia. Baseado em valores tabelados pela FRA e que também são utilizados pelos órgãos reguladores brasileiros.

O intuito deste trabalho é proporcionar uma solução eficaz para análise do nivelamento longitudinal, coletando os dados utilizando acelerômetros, armazenando em uma central e posteriormente processando e filtrando essas informações para determinar o deslocamento. Dessa forma auxiliará na manutenção e aumentará a segurança.

Palavras Chave: Ferrovia, Nivelamento longitudinal, Acelerômetro, Deslocamento, MQTT, Filtro, FFT, FIR.

ABSTRACT

Preventive maintenance will always be a preponderant factor as to passenger safety and the productivity of a transport company. The objective is to find faster and safer way to getting around and carrying large quantities of cargo.

Thinking about productivity and safety, there are several parameters that are extremely important for the maintenance of the railroad. In addition there are inspection vehicles that make it possible to determine these errors. In this work only the longitudinal leveling of the railway will be aborted. Based on values tabulated by the FRA and also used by Brazilian regulatory agencies.

The purpose of this work is to provide an efficient solution for longitudinal leveling analysis, collecting the data using accelerometers, storing in a central and later processing and filtering this information to determine the displacement. This will help maintain and increase safety.

Key-words: Rail, Longitudinal leveling, Accelerometer, displacement, MQTT, Filter, FFT, FIR.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Mapa Comparativo das Ferrovias pelo Mundo	13
2.2	TrackStar	18
2.3	Desnívelamento Longitudinal	19
2.4	Rock Roll Crosslevel ou Balanço da Via	21
2.5	Efeito Dinâmico do Desnívelamento Longitudinal	21
2.6	Efeito Dinâmico do Desnívelamento Transversal	22
2.7	Estrutura acelerômetro de dois eixos	23
2.8	Raspberry Pi 3 modelo B	26
2.9	NodeMCU	28
2.10	MPU 6050	28
3.1	Diagrama de Blocos do Sistema	32
3.2	Módulo secundário fixado na barra de carga do lado direito do trem . .	34
3.3	Módulo secundário fixado na barra de carga lado esquerdo do trem . .	34
3.4	Percurso de 152 m com o trem	35
3.5	Percurso de 190 m com o carro	35
3.6	Fluxograma para obter a frequência de corte	36
3.7	Fluxograma para obter a posição	36
4.1	Roteamento e esquemático da placa de circuito	37
4.2	Placa de circuito impresso	37
4.3	Coleta de dados do MPU-6050	38
4.4	Dados recebidos pelo módulo principal	38
4.5	Gráfico aceleração do eixo Y no trem	39
4.6	FFT do sinal da aceleração	40
4.7	Integralização do sinal	40

LISTA DE TABELAS

2.1	Comparativo entre Países	13
2.2	Classes da via	19
2.3	Limites de nivelamento	20

LISTA DE SIGLAS

ADC	Analog Digital Converter
ANTF	Associação Nacional dos Transportes Ferroviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BIBO	Bounded Input Bounded Output
BLE	Bluetooth Low Energy
BNSF	Burlington Northern Santa Fé
CP Rail	Canadian Pacific Railway
CPU	Central Processing Unit
DC	Direct Current
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EDL	Eclipse Distribution License
EPL	Eclipse Public License
FFT	Fast Fourier transform
FIR	Finite Impulse Response
FRA	Federal Railroad Administration
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
I2C	Inter-Integrated Circuit
IBM	International Business Machines
IOT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
LAN	Local Area Network
MATLAB	MATrix LABoratory
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MRS	MRS Logística S.A.
PSF	Python Software Foundation
PWM	Pulse Width Modulation
TC	Transport Canada
TFD	Transformada Discreta de Fourier
TrackSTAR	Track Stress Test Analysis Recording
SD	Secure Digital
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VALEC	VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias S.A.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo	10
1.1.1	Objetivo Geral	10
1.1.2	Objetivos Específicos	10
1.1.3	Desafio	10
1.2	Justificativa	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Ferrovias	12
2.2	Ferrovias no Brasil	14
2.3	Contexto Histórico	15
2.4	Segurança e Manutenção das Ferrovias	16
2.4.1	Reguladores	17
2.4.2	Tecnologia Atual	18
2.4.3	Parâmetros de Nivelamento de Linha	19
2.5	Processos de Análise	20
2.6	Tecnologias utilizadas	22
2.6.1	Acelerômetro	23
2.6.2	Transformada Rápida de Fourier	24
2.6.3	Filtro FIR	24
2.6.4	Cálculo Diferencial e Integral	25
2.6.5	Aplicação de sensores inerciais para medir deslocamento	25
2.6.6	Raspberry Pi 3	26
2.6.6.1	Sistema Operacional	27
2.6.7	NodeMCU ESP8266	27
2.6.8	MPU6050	28
2.6.9	Python	29
2.6.10	MATLAB	29
2.6.11	ARDUINO	29
2.6.12	MQTT	29
2.6.13	Mosquitto	30
2.6.14	SSH	30
2.6.15	PuTTY	31
3	METODOLOGIA	32
3.1	Escolha dos materiais e componentes	32
3.2	Aquisição de dados do acelerômetro	33
3.3	Comunicação entre os módulos	33
3.4	Coleta dos dados	34
3.5	Tratamento do sinal	36
4	RESULTADOS	37
4.1	Confecção da placa de circuito impresso do módulo secundário	37
4.2	Coleta dos dados	38

4.3	Tratamento dos Dados	39
5	CONCLUSÃO	41
5.1	Dificuldades encontradas	41
5.2	Conclusão	41
5.3	Trabalhos Futuros	42

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A segurança e a manutenção nas vias férreas têm se tornado cada dia mais importante, justificado pelo crescimento no setor ferroviário e desenvolvimento de novas tecnologias. Garantir a segurança no tráfego, reduzir os danos ao veículo e também na via, aumentar a velocidade comercial e a capacidade de produção e reduzir ao mínimo o custo da conservação da via, são desafios do cotidiano dos engenheiros ferroviários brasileiros (DIAS et al., 2016).

Fatores como a modernização da construção de estradas de ferro e componentes e o avanço dos sistemas de controles proporcionaram a melhoria na segurança e na manutenção ferroviária. Em contra partida, o Brasil possui uma malha ferroviária antiga o desenvolvimento do setor praticamente parou em 1991, o que dificulta a manutenção e gera problemas de insegurança (DANTAS, 2018).

A linha férrea, também chamada de via permanente tem sua manutenção predominantemente executada preventivamente, de maneira sistemática e dentro de critérios predefinidos. O diagnóstico preliminar é feito com o auxílio de carros controle, mas para isso o trecho diagnosticado precisa ter suas operações interrompidas, o que gera custos e muitas vezes atrasos na logística.

Este trabalho propõe a criação de um protótipo funcional que possa medir o nivelamento longitudinal da via permanente. Também será tratado a análise dos dados com o métodos de análise da FRA (Federal Railroad Administration), para criar um método que possa identificar falhas longitudinais no trilho, auxiliando assim a execução da manutenção preventiva ou corretiva da via. O modo da FRA compara o valor medido com uma tabela de valores definidos, já o modelo do TC (Transport Canada) mede a variação de valores dos efeitos criados por essa imperfeição, esses dados juntos podem ajudar a definir ações que serão tomadas na manutenção da via.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de análise para nivelamento longitudinal de linhas férreas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Utilizar sensores acelerômetros para coleta de dados de aceleração;
- Escolher o melhor protocolo de comunicação entre os sensores e a central de armazenamento;
- Utilizar técnicas de filtragem do sinal coletado;
- Processar o sinal e calcular o desnível;
- Apresentar graficamente os resultados encontrados.

1.1.3 Desafio

O desafio será criar um protótipo funcional e que possa ser utilizado junto com qualquer veículo, sem a necessidade de suspender o funcionamento da via, para coleta e análise de dados de nivelamento longitudinal. Será utilizado um par de sensores acelerômetros, um em cada lateral do vagão, podendo então medir o nivelamento longitudinal, ou seja, ao longo do mesmo trilho. Ao fim das análises será gerado um relatório para tomada de decisão do responsável técnico da malha ferroviária diagnosticada.

1.2 Justificativa

Historicamente o ser humano sempre buscou meios mais rápidos e seguros de se locomover e transportar grandes quantidades de carga. O intuito deste trabalho é proporcionar uma solução eficaz e de baixo custo para auxiliar na manutenção preventiva das linhas férreas e aumentar a segurança do deslocamento sobre elas.

Para a atuação no setor ferroviário, o primeiro passo para o desenvolvimento do projeto é sempre entender bem a área de pesquisa. Portanto, qual a necessidade de fazer a manutenção nas ferrovias? Não são apenas trilhos de ferros paralelos? Quais problemas podem ocorrer recorrentes do desnivelamento no prolongamento do trilho? Para o projeto será abordado o conceito de um método de aquisição de dados, o qual terá baixo custo e sustentável. Desta forma, será apresentado um protótipo que vai além do *hardware* e *software*.

O alto valor de mercado e a exclusividade de equipamento são os principais motivos que freiam o uso de tecnologias mais atuais na manutenção das vias. Por exemplo, apenas a MRS possui o TrackSTAR para coleta de dados no Brasil. Esse equipamento tem um custo elevado. Em pesquisas em sites especializados em comercialização deste tipo de veículos, foram encontrados diversos modelos com preços chegando à casa das centenas de milhares de dólares. O alto preço se justifica quando se leva em consideração a confiabilidade e os vários parâmetros de análise que o sistema deve ter.

Como o objetivo geral é apresentação do protótipo, os esforços serão voltados para tal, usando conexão sem fio, microcontrolador e sensores, integrados de forma compacta. Para atingir os objetivos propostos, faz-se necessário integrar as diversas áreas do conhecimento desse curso, tais como, eletrônica, telecomunicação e eletrotécnica, propiciando uma oportunidade na criação de novos campos da engenharia, arquitetura e computação.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ferrovias

As vias férrea, estrada-de-ferro ou, ainda, ferrovias, são um sistema de transporte baseado em trens e/ou comboio correndo sobre trilhos, carris, paralelos anteriormente dispostos perpendicularmente sobre dormentes de madeira ou concreto. A função dos dormentes é manter os trilhos na mesma bitola, evitando distâncias diferentes, o que poderá acarretar em descarrilamentos (WIKIPEDIA, 2018).

As ferrovias foram criadas pelo engenheiro inglês Richard Trevithick no século XIX, no entanto, os vagões eram levados por cavalos. A primeira locomotiva da história pesava 10 toneladas, puxava cinco vagões e carregava 70 passageiros. O primeiro trecho de ferrovia foi criado em 27 de setembro de 1825, na Inglaterra. A partir daí, o meio de transporte se espalhou por todo o mundo (DANTAS, 2018).

O transporte ferroviário é utilizado em regiões industrializadas, como a Europa e Ásia e ainda em locais altamente populosos como a Índia e China. As ferrovias são o meio de transporte terrestre com maior capacidade de transporte de carga e de passageiros. Em alguns locais em desenvolvimento da América Latina e da África, as rodovias são mais utilizadas que as ferrovias como tipo de transporte terrestre predominante (WIKIPEDIA, 2018).

Bitola é a distância entre as faces internas da cabeça dos trilhos de uma via-férrea. As bitolas mais comuns no Brasil são a bitola métrica, 1.000 mm, e a bitola irlandesa, 1.600 mm. A bitola internacional com 1.435 mm de largura representa atualmente uma parte mínima das ferrovias existentes. Apenas a estrada de ferro de Amapá possui essa bitola em seu percurso (DANTAS, 2018). A figura 2.1 apresenta a distribuição da malha férrea em quilômetros pelo mundo.

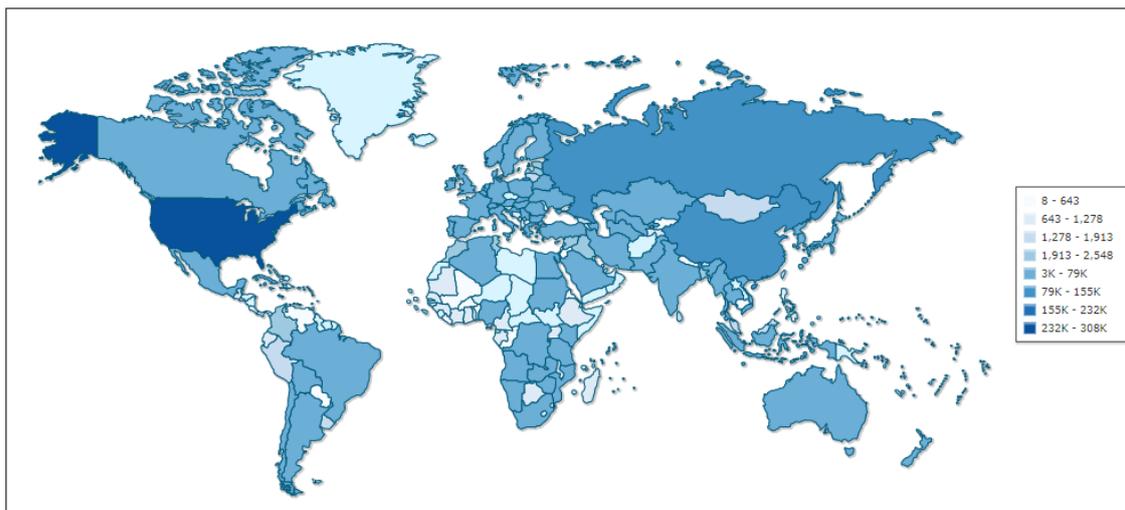


Figura 2.1: Mapa Comparativo das Ferrovias pelo Mundo

Fonte: IndexMundi (2017)

Tabela 2.1: Comparativo entre Países

País	Ferrovias (km)	Ano
Estados Unidos	293.564	2014
China	124.000	2017
Rússia	87.157	2014
Canadá	77.932	2014
Índia	68.525	2014
Alemanha	43.468	2014
Austrália	36.968	2014
Argentina	36.917	2014
Brasil	29.850	2014
França	29.640	2014
Japão	27.311	2015

Fonte: IndexMundi (2017)

A Figura 2.1 e a Tabela 2.1 indicam o comprimento de rota total da rede ferroviária. Os quatro tipos típicos de medidores são: amplo, padrão, estreito e dual. Outros indicadores estão listados em note. Cerca de 60% das ferrovias do mundo usam o indicador padrão de 1,4 m, 4,7 pés. Os indicadores variam de acordo com o país e às vezes dentro dos países. A escolha do medidor durante a construção inicial foi principalmente em resposta às condições locais e à intenção do construtor. Os trilhos de bitola estreita eram mais baratos de construir e poderiam negociar curvas

mais nítidas. As ferrovias de calibre largo dão maior estabilidade e permitiram velocidade mais elevadas. As ferrovias de calibre padrão eram um compromisso entre medidores estreitos e amplos (INDEXMUNDI, 2017).

2.2 Ferrovias no Brasil

É comum brasileiros que utilizaram o sistema ferroviário da Europa voltarem ao Brasil se perguntando por que aqui essa opção de transporte não é tão utilizado, assim como eram as viagens interestaduais em meados da década de 50 no Brasil. A rede ferroviária brasileira, exceto transporte urbano, tem aproximadamente 29 mil quilômetros de extensão e 6% do total são para transporte de passageiros. Os outros 94% da rede são utilizados para transporte de carga. Há dois motivos principais que explicam essa diferença: uma escolha política de priorizar as rodovias a partir dos anos 1940, e a maior rentabilidade do transporte de cargas do que o de pessoas nas ferrovias (LUPION, 2016).

O país possui atualmente, dados de 2007, aproximadamente 31 mil quilômetros de extensão de vias férreas. Essa malha é considerada pequena em comparação ao território e das necessidades de transporte em nosso país (SETTI, 2008a).

No país, a falta de investimentos, talvez provocada pela pressão da indústria automobilística, fez com que a indústria ferroviária praticamente parasse desde 1991 (DANTAS, 2018).

Especialistas em logística afirmam que o Brasil deveria investir mais no transporte ferroviário, pois este é mais econômico e menos poluente em comparação ao transporte rodoviário. Além disso, as ferrovias de cargas são extremamente importantes para a infraestrutura do país (SETTI, 2008a).

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o custo do frete ferroviário é 50% mais barato em relação ao transporte rodoviário. Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), as

principais ferrovias de carga em construção no Brasil são:

- ferrovia Nova Transnordestina (1.728 km): ligará o Porto de Pecém (Ceará) ao Porto de Suape (Pernambuco);
- ferrovia Norte-Sul (4.155 km): ligará os estados do Pará e de São Paulo;
- estrada de Ferro Vitória a Minas (664 km): ligação entre a Grande Vitória (Espírito Santo) a cidade de Belo Horizonte (Minas Gerais);
- ferrovia do Pantanal (734 km): ligará Mato Grosso do Sul ao interior de São Paulo;
- ferroeste: ligação entre os municípios paranaenses de Cascavel e Guarapuava.

O Brasil possui apenas duas estradas de ferro para transporte de passageiros de longas distâncias que são:

- estrada de Ferro Vitória a Minas (664 km): ligação entre a Grande Vitória (Espírito Santo) a cidade de Belo Horizonte (Minas Gerais);
- estrada de Ferro Carajás (892 km): ligação entre as cidades de São Luís (Maranhão) e Parauapebas (Pará).

O país ainda possui uma extensa malha ferroviária nos grandes centros urbanos utilizado para o transporte de passageiros, compostos de trem e metrô, nas cidades de: São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Distrito Federal, Fortaleza, Porto Alegre, Salvador, Recife, Teresina, Maceió, Natal e João Pessoa (DANTAS, 2018).

Além de diversos trechos de ferrovias turísticas e culturais para passageiros, como é o caso da linha turística Curitiba-Morretes (DANTAS, 2018).

2.3 Contexto Histórico

A primeira linha brasileira de trem foi inaugurada em 1854, no Rio de Janeiro, e a malha ferroviária do país se expandiu fortemente entre 1875 e 1920, sendo a opção mais comum para longos deslocamentos de pessoas. Esse cenário começou a mudar com o presidente Washington Luís, que governou o país de 1926 a 1930 e

era "rodoviarista"— alguns historiadores atribuem a ele a frase "governar é abrir estradas". Ele priorizou a construção de rodovias para o transporte de passageiros, modelo seguido por Getúlio Vargas até 1940, e Juscelino Kubitschek nos anos 1950, que buscou estimular as montadoras de automóveis para o crescimento do parque industrial brasileiro. O regime militar (1964 a 1985) reestruturou a malha ferroviária, diminuindo o número de servidores públicos no setor e manteve apenas os ramais economicamente viáveis para o transporte de cargas. Atualmente, existe apenas duas linhas de trem de longa distância transportando passageiros. Duas são administradas pela mineradora Vale: uma liga Belo Horizonte (MG) a Vitória (ES), a outra de São Luís (MA) a Parauapebas (PA). O transporte de passageiros nessas linhas foi assumido pela mineradora no contrato de concessão assinado com o governo em 1997. Existe ainda 24 linhas turísticas, a maioria de curta distância, mantidas pelo seu valor histórico, por exemplo, a que liga São João Del Rei (MG) a Tiradentes (MG) (LUPION, 2016).

De forma geral, o transporte de cargas é mais rentável do que o de passageiros em ferrovias de longo trajeto, segundo Guilherme Grandi, professor da Faculdade de Economia e Administração da USP e especialista na temática dos transportes.

Em 2011, o governo criou uma licitação para construção de um trem de alta velocidade entre São Paulo e Rio de Janeiro, mas nenhuma empresa se interessou pelo projeto. Houve mais duas outras tentativas, também sem sucesso devido ao custo envolvido na empreitada, à necessidade de transferir tecnologia ao país e a incerteza sobre o retorno financeiro. O governo estimou que a obra custaria cerca de R\$ 34 bilhões, mas analistas do setor privado estimaram R\$ 50 bilhões (LUPION, 2016).

2.4 Segurança e Manutenção das Ferrovias

Nos dias de hoje, a manutenção de um sistema ferroviário pode ser considerada estratégica, onde os resultados estão diretamente interligados ao

desempenho, confiabilidade, segurança e redução dos custos, aproximadamente 70% do custo total da ferrovia durante o ciclo de vida são despendidos em manutenção de material rodante e via permanente (DIAS et al., 2016).

A maior parte das ferrovias brasileiras possui um tempo de uso alto e também possui características técnicas que revela uma urgência por modernização. Nem sempre os recursos disponíveis são suficientes para um programa completo nesse sentido e, dessa maneira, devem buscar alternativas mais viáveis.

Após as privatizações da malha ferroviária brasileira, principalmente a de carga, os acidentes ferroviários diminuíram consideravelmente, porém ainda não é o ideal quando comparado com outros países, por isto é importante o emprego de técnicas que viabilizem a melhoria nos transportes de cargas (DIAS et al., 2016).

Uma das preocupações dos engenheiros ferroviários do mundo todo é possibilitar uma via permanente tão satisfatória quanto possível, para minimizar os gastos e aumentar a segurança. Este é um dos problema complexos que se apresentam cotidianamente nas estradas de ferro, quer sejam de carga ou de passageiros. Pois depois que uma ferrovia é implantada, ela começa a se degradar pelo uso e pela ação do tempo (LEONARDO, 2006).

2.4.1 Reguladores

Existem diversos órgãos e agências responsáveis para regular e promover assistência para as ferrovias em todo o mundo. Grande parte dos países se baseiam em dois órgãos para implementar e regulamentar suas normas, esses órgãos são o TC do Canadá e o FRA dos Estados Unidos da América. No Brasil os responsáveis são o DNIT a ANTT e o VALEC.

- Federal Railroad Administration (FRA): é uma agência do Departamento de Transporte do Governo dos EUA, com o intuito de publicar e implantar os regulamentos de segurança das ferrovias
- Transport Canada (TC): órgão do governo do Canadá, responsável por desenvolver e administrar políticas, regulações e serviços para um melhor

sistema de transporte.

- DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é uma autarquia federal vinculada ao Ministério dos Transportes.
- ANTT: Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT, é entidade integrante da Administração Federal indireta, com a qualidade de órgão regulador da atividade de exploração da infra-estrutura ferroviária e rodoviária federal e da atividade de prestação de serviços de transporte terrestre.
- VALEC: VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. é uma empresa pública, sob a forma de sociedade por ações, cabe a ela o planejamento econômico e administrativo de engenharia de uma estrada de ferro no Brasil.

2.4.2 Tecnologia Atual

Atualmente a MRS Logística S.A. utiliza o veículo de avaliação de via TrackSTAR, pode ser observado na figura 2.2, que é um equipamento rodoferroviário, o qual pode circular sob os trilhos ou estradas. Criado nos anos 90, nos EUA, pela Holland Company em conjunto com a Burlington Northern Santa Fé (BNSF) é homologado pela Federal Railroad Administration (FRA). Ele é um veículo auto-propulsor construído sob a plataforma de um caminhão volvo. O TrackSTAR faz uma avaliação das condições da via com a aquisição simultânea de dados da geometria da linha, da medida de bitola, do alinhamento e o desgaste dos trilhos.



Figura 2.2: TrackStar

Fonte: MRS Logística S.A.

2.4.3 Parâmetros de Nivelamento de Linha

O Nivelamento Longitudinal é medido sobre a superfície de rolamento de um trilho. Para medi-lo estende-se uma corda de 20 metros em linha reta entre dois pontos, o desnível é medido conforme mostrado na figura 2.3. Medido em ambos os trilhos, dá-se o nome de base de medição do nivelamento à distância entre os dois pontos que definem a reta (LEONARDO, 2006).

De acordo com a FRA, um dos métodos de cálculo do nivelamento longitudinal é o SURF 20, que mede a superfície do trilho medida numa corda de 62 pés, 18,90m. Esse será o método utilizado nesse trabalho.



Figura 2.3: Desnívelamento Longitudinal

Fonte: CP Rail

A FRA estabelece uma divisão por classes de via e seus limites de velocidade conforme a tabela 2.2:

Tabela 2.2: Classes da via

Classe de via	Velocidade máxima - carga (km/h)	Velocidade máxima - passageiro (km/h)
Via excepcional	16	Circulação proibida
Classe 1	16	24
Classe 2	40	48
Classe 3	64	96
Classe 4	96	128
Classe 5	128	144

Fonte: Federal Railroad Administration (FRA)

De acordo com essas informações da norma da FRA, é válida a utilização

dessas informações para limitação de velocidade autorizada em trecho no caso de apresentar algum defeito na via.

Os limites de nivelamento na tabela 2.3 tendem a ser mais rígidos a medida que se aumenta a classe da ferrovia, ou seja, quando se aumenta a velocidade de circulação. Esses limites podem ser considerados como fatores limitantes da velocidade nos termos de nivelamento da via.

Tabela 2.3: Limites de nivelamento

Requisitos	Classe 1 (cm)	Classe 2 (cm)	Classe 3 (cm)	Classe 4 (cm)	Classe 5 (cm)
Elevação máxima produzida por gradiente de superelevação ao final de um comprimento de trilho de 9,3 m	8,9	7,6	5,1	3,8	2,5
Desvio máximo no nivelamento longitudinal em qualquer dos trilhos, no ponto médio de uma corda de 18,6 m	7,6	7,0	5,7	5,1	3,2

Fonte: Federal Railroad Administration (FRA)

2.5 Processos de Análise

Tanto a MRS quanto o TrackStar analisam, de forma independente, cada parâmetro medido e identificam quais os valores ultrapassam as tolerâncias predefinidas. Dessa forma, não levam em conta a atuação simultânea de mais de um parâmetro na circulação dos veículos nem a influência que a repetição sucessiva e próxima de um mesmo parâmetro pode acarretar. Por exemplo, as variações das amplitudes de alguns parâmetros provocam movimentos oscilatórios nos veículos que podem, dependendo de sua intensidade, provocar seu descarrilamento (LEONARDO, 2006).

Realmente existe uma interdependência entre os parâmetros que não ocorrem isoladamente como é o caso do nivelamento longitudinal, nivelamento transversal,

empeno e torção. A ocorrência de um, necessariamente, provocará os demais (SETTI, 2008b).

A ocorrência de variações bruscas e sucessivas do nivelamento pode causar efeitos harmônicos no movimento dos veículos, principalmente no balanço transversal, podendo provocar o seu descarrilamento mesmo com valores inferiores aos limites de segurança. Esse fenômeno também é conhecido como “Rock and Roll Crosslevel” ou “Balanço da Via” (LEONARDO, 2006), como pode ser observado na Figura 2.4.

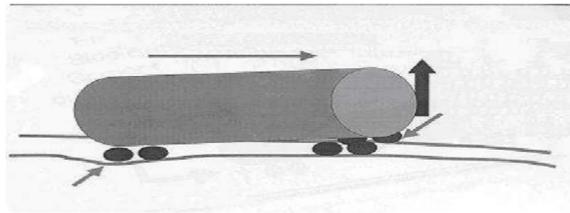


Figura 2.4: Rock Roll Crosslevel ou Balanço da Via

Fonte: Rail Sciences Inc

Essas irregularidades podem gerar prejuízos para o veículo e para a via, pois conforme sua intensidade e repetibilidade aumentam, podem criar o alívio de rodas ou variação na carga vertical estática e, com isso, provocar descarrilamentos, sem que o grau de crítico dessas irregularidade tenham sido detectado. A figura 2.5 apresenta o efeito dinâmico do desnivelamento longitudinal num vagão.



Figura 2.5: Efeito Dinâmico do Desnivelamento Longitudinal

Fonte: Walter Vidon Júnior (IME), 2011

Na figura 2.6, pode-se observar o feito dinâmico transversal num vagão.

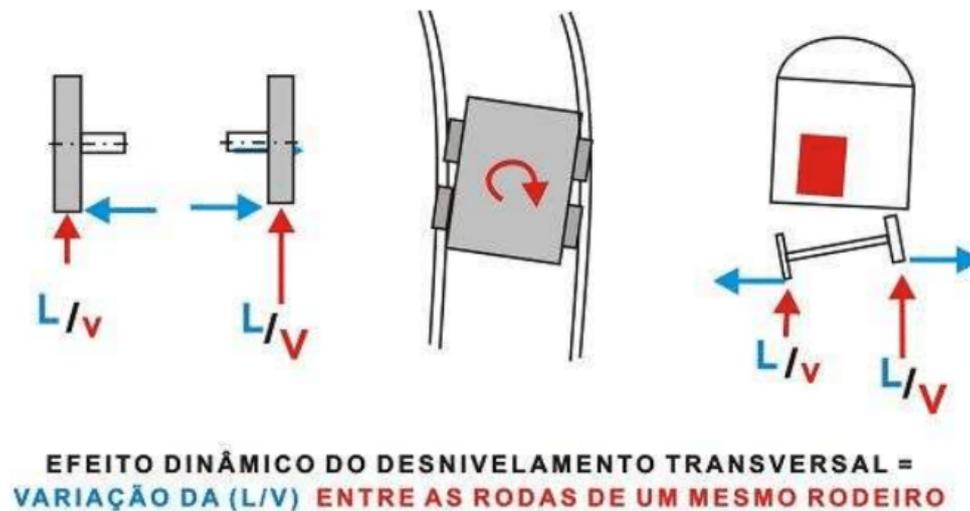


Figura 2.6: Efeito Dinâmico do Desnivelamento Transversal

Fonte: Walter Vidon Júnior (IME), 2011

Existe um método específico para identificar este defeito. Simula-se a circulação de um vagão típico, identificam-se as características mínimas de uma sequência de variações do nivelamento longitudinal, à partir do qual os efeitos dos harmônicos geram riscos inaceitáveis. Com base nestas características:

- Amplitude do parâmetro
- Quantidade de ocorrências
- Distância entre as ocorrências

Desenvolve-se uma rotina para análise e possibilitar a detecção e correção do defeito.

2.6 Tecnologias utilizadas

O projeto será baseado na leitura de sensores acelerômetros. Esses dados serão enviados remotamente via protocolo de comunicação MQTT à uma central que os armazenará, os dados armazenados na central serão processados pelo MATLAB. Esta seção abordará as tecnologias de *hardware* e *software* utilizadas no projeto.

2.6.1 Acelerômetro

Acelerômetro é um dispositivo usado para medir a aceleração própria de um sistema. Essa aceleração é medida em relação a outro sistema em queda livre, de modo que esta está atrelada à sua sensação de peso. Acelerômetros são dispositivos que podem funcionar a partir de diversos efeitos físicos, com destaque para os piezoelétricos (TORRES, 2015). A figura 2.7 apresenta a estrutura de um acelerômetro de dois eixos.

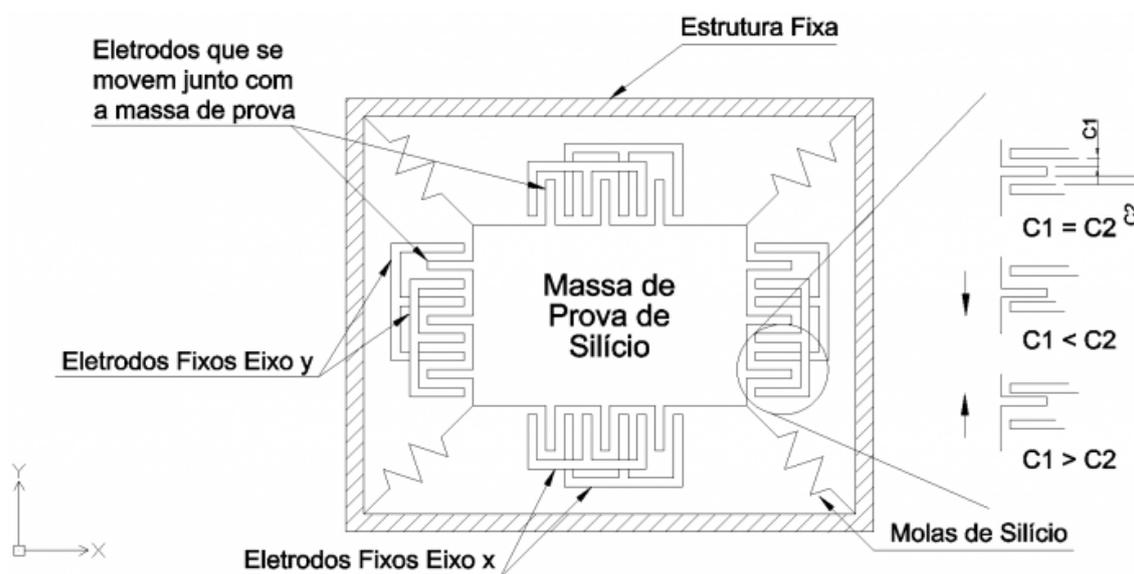


Figura 2.7: Estrutura acelerômetro de dois eixos

Fonte: (TORRES, 2015)

Uma massa de prova de silício é suportada por molas também de silício, dessa forma a mobilidade da massa de prova é conhecida. O acelerômetro sofre a ação das mesmas forças impostas ao sistema onde ele será fixado. As variações de velocidade provocam uma variação na distância entre os eletrodos fixos e os móveis. Em repouso ambas as capacitâncias são iguais. Sob movimento as capacitâncias $C1$ e $C2$ se alteram, dessa forma circuitos eletrônicos fazem a análise e processamento dessa variação de capacitância (TORRES, 2015).

2.6.2 Transformada Rápida de Fourier

A Transformada rápida de Fourier ou *FFT - Fast Fourier transform* é um algoritmo utilizado para calcular a Transformada Discreta de Fourier, TFD, e a sua inversa. Além de grande importância no processamento digital de sinais para a resolução de equações diferenciais parciais (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011).

Para alcançar a máxima eficiência, os algoritmos de FFT precisam calcular todos os N valores da TFD. A eficiência dos algoritmos de FFT é tão alta que o procedimento mais eficiente para implementar uma convolução consiste no cálculo da transformada das sequências a serem convoluídas, multiplicar suas transformadas e depois calcular a transformada inversa do produto das transformadas (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011).

2.6.3 Filtro FIR

Filtro com resposta ao impulso finito (FIR - *Finite Impulse Response*) é um filtro digital caracterizado por uma resposta ao impulso que se torna nula após um tempo finito, ao contrário dos filtros IIR - *Infinite Impulse Response* (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011).

Os filtros do tipo FIR apresentam ainda as seguintes características:

- memória finita, portanto qualquer transitório tem duração limitada;
- são sempre BIBO estáveis;
- podem implementar uma resposta em módulo desejada com resposta em fase linear.

Uma vez que os filtros FIR apresentam resposta em frequência com fase linear, o projeto deste filtros resume-se a aproximar a resposta em módulo desejada. A forma mais fácil de projetá-lo é o método de janela. Esse método iniciasse com uma resposta em frequência ideal desejada (OPPENHEIM; SCHAFER, 2011).

2.6.4 Cálculo Diferencial e Integral

Para determinar uma tangente num certo ponto P, Fermat fez o seguinte: ele imaginou outro ponto Q localizado em uma curva, formando a reta PQ e fazendo-a secante em relação a esta curva. Fazendo o ponto Q ir até o ponto P, sobre essa curva, ele obteve uma reta PQ aproximada de uma reta t, que Fermat chamou de tangente em relação a curva no ponto P (STEWART, 2017).

Foi observado por Fermat que, em certas funções, nos pontos onde a curva detinha valores extremos, a tangente ao gráfico deveria se caracterizar como sendo uma reta do tipo horizontal, uma vez que comparada ao valor assumido por tal função num dos pontos. Deste modo, ele relacionou a determinação de tangentes à curvas e de extremos (STEWART, 2017).

A inversa da derivada é chamada de antiderivada ou integral. A partir do deslocamento é possível calcular a velocidade média, mas para o problema inverso: sabendo a velocidade e precisa descobrir a distância percorrida. Se for coletado num intervalo de tempo a velocidade dada pelo velocímetro e depois dispor essas informações em um gráfico pode-se deduzir que o deslocamento é representado pela área em baixo da curva. Então tem-se a definição de integral.

Dessa análise pode-se concluir que através de dados sobre aceleração é possível obter o deslocamento se for integrado duas vezes.

2.6.5 Aplicação de sensores inerciais para medir deslocamento

Medir a aceleração é uma abordagem adequada para analisar movimento e deslocamento (ou seja, mudança de posição) porque aceleração é proporcional à força externa e, portanto, pode refletir a intensidade e frequência do movimento. Informações sobre velocidade e deslocamento podem ser obtidas integrando dados do acelerômetro com relação ao tempo (FERRERO et al., 2016). Técnicas de medição baseadas na inércia são comuns para estimar o deslocamento em engenharia automotiva, a ampla frequência e faixa dinâmica do acelerômetros

facilitam o estudo de vibrações. A vibração padrão e o movimento do veículo na estrada são principalmente caracterizado por dados de aceleração aleatória de baixa frequência. Com estas bandas predominantes de frequências, três abordagens de filtragem digital baseada em resposta ao impulso finito, infinito resposta ao impulso, e o inverso da transformada rápida de Fourier são investigados para reduzir erros de integração (TAN et al., 2008).

2.6.6 Raspberry Pi 3

Raspberry Pi 3 é um microcomputador desenvolvido pela Fundação Raspberry Pi, lançado em fevereiro de 2016 (ASSOCIATION, 2016). Suas especificações são:

- Quad Core 1,2GHz Broadcom BCM2837 64 bit CPU;
- 1GB RAM;
- BCM43438 *wireless LAN and Bluetooth Low Energy (BLE) on board*;
- 40 pinos de GPIO;
- 4 portas USB;
- Porta Micro SD;
- 2,5A de alimentação.

A figura 2.8 apresenta a versão física do Raspberry Pi 3.



Figura 2.8: Raspberry Pi 3 modelo B

Fonte: (ASSOCIATION, 2016)

2.6.6.1 Sistema Operacional

O Sistema Operacional oficial utilizado no Raspberry Pi 3 é o Raspbian. Ele vem pré instalado e possui alguns softwares nativos voltados à educação, como por exemplo o Mathematica. O Raspberry pode utilizar outros sistemas operacionais, como o Ubuntu Mate e o Windows 10 IOT Core, a aplicação para o microcomputador influencia na escolha do sistema utilizado.

2.6.7 NodeMCU ESP8266

O módulo Wi-Fi ESP8266 NodeMCU é uma placa de desenvolvimento que combina o chip ESP-12, uma interface USB-SERIAL e um regulador de tensão 3,3 V. Sua programação pode ser feita via linguagem LUA ou a linguagem ARDUINO, possui antena embutida e possui ADC de 10 bits. O microcontrolador embarcado é o Tensilica L106 32-bit, seu clock de operação é de 80 MHz. O chip ESP8266 possui conexão *Wireless* padrão 802.11 b/g/n (CURVELLO, 2015). A figura 2.9 apresenta a versão física do NodeMCU.

Suas especificações técnicas são:

- tensão de operação: 5V – 9V (Via MicroUSB e pino VIN);
- corrente de operação: em média 70 mA (com picos de 200 mA);
- alcance da antena: 90m;
- wireless padrão 802.11 b/g/n;
- taxa de transferência: 110-460800bps;
- micro controlador de ultra baixo consumo de 32 bits;
- ADC 10 bits;
- memória FLASH: 4 MB;
- memória RAM: 20 kB;
- dez portas GPIO's: funções de MISO, MOSI, SCK, PWM, I2C, SPI e RX, TX.
- Protocolo TCP/IP integrado
- Wi-Fi 2,4 GHz, supporta WPA/WPA2



Figura 2.9: NodeMCU

Fonte: (CURVELLO, 2015)

2.6.8 MPU6050

Sensor acelerômetro e giroscópio com 6 eixos de liberdade possui também sensor de temperatura integrado, medindo temperaturas entre -40° e 85°C (INVENSENSE, 2013). Suas especificações técnicas são:

- chip: MPU-6050;
- tensão de Operação: 3 à 5V;
- conversor AD: 16 bits;
- comunicação: I2C;
- faixa do Giroscópio: 250, 500, 1000, 2000°/s;
- faixa do Acelerômetro: 2, 4, 8, 16g.

A figura 2.10 apresenta a versão física do NodeMCU.

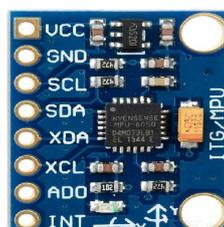


Figura 2.10: MPU 6050

Fonte: (INVENSENSE, 2013)

2.6.9 Python

Criada em 1991 por Guido van Rossum como sucessora da linguagem de programação ABC. Em 2001, formou-se a Python Software Foundation (PSF), uma organização sem fins lucrativos criada especificamente para possuir propriedade intelectual relacionada a Python. Todas as versões do Python são Open Source, a versão atual do software em questão é a 3.6.5 lançada em 28/03/2018 (FOUNDATION, 2018b).

2.6.10 MATLAB

O MATLAB é uma plataforma de programação projetada especificamente para engenheiros e cientistas, é uma linguagem e ambiente interativo para desenvolvimento de algoritmos, analisar e visualizar dados e realizar computação numérica. (COHAN, 2018) A proprietária do MATLAB é a MathWorks, empresa fundada na Califórnia em 1984 por Cleve Moler, Jack Little e Steve Bangert (MOLER, 2004).

2.6.11 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software. As placas compatíveis são capazes de ler entradas e convertê-las em saídas, sua utilização se dá através da linguagem de programação e seu software, ambos chamados de Arduino. Criado em 2002 pela Ivrea Interaction Design Institute, seu principal idealizador foi Massimo Banzi (ARDUINO, 2018).

2.6.12 MQTT

MQTT significa MQ Telemetry Teleport. É um protocolo de comunicação leve e simples, de publicação / assinatura, projetado para dispositivos restritos e redes de baixa largura de banda, alta latência ou não confiáveis. Os princípios de design são minimizar a largura de banda da rede e os requisitos de recursos do dispositivo, ao

mesmo tempo em que tentam garantir a confiabilidade e um certo grau de garantia de entrega. O MQTT foi inventado pelo Dr. Andy Stanford-Clark, da IBM, e Arlen Nipper, da Arcom (atual Eurotech), em 1999 (MQTT.ORG, 2018).

2.6.13 Mosquitto

O Eclipse Mosquitto é um intermediário de mensagens de código-fonte aberto (licenciado por EPL / EDL) que implementa as versões 3.1 e 3.1.1 do protocolo MQTT. O Mosquitto é leve e adequado para uso em todos os dispositivos, desde computadores de mesa única de baixa potência até servidores completos.

O projeto Mosquitto também fornece uma biblioteca C para implementar clientes MQTT, e os populares clientes MQTT da linha de comando `mosquitto_pub` e `mosquitto_sub`. O Mosquitto faz parte da Eclipse Foundation e é um projeto do iot.eclipse.org (FOUNDATION, 2018a).

2.6.14 SSH

O protocolo SSH usa criptografia para proteger a conexão entre um cliente e um servidor. Todas as autenticações de usuário, comandos, saída e transferências de arquivos são criptografadas para proteger contra ataques na rede (SECURITY, 2018).

O protocolo Secure Shell foi originalmente desenvolvido pela Tatu Ylonen em 1995. É usado para gerenciar mais da metade dos servidores da web do mundo e praticamente todos os computadores Unix ou Linux, no local e na nuvem. Especialistas em segurança da informação e administradores de sistemas o utilizam para configurar, gerenciar, manter e operar a maioria dos *firewalls*, roteadores, *switches* e servidores em milhões de redes e ambientes de missão crítica do mundo digital. Ele também é incorporado em muitas soluções de transferência de arquivos e gerenciamento de sistemas (SECURITY, 2018).

O novo protocolo substituiu várias ferramentas e protocolos legados, incluindo telnet, ftp, FTP / S, rlogin, rsh e rcp (SECURITY, 2018).

2.6.15 PuTTY

PuTTY é um programa cliente para os protocolos de rede SSH, Telnet e Rlogin. Esses protocolos são usados para executar uma sessão remota em um computador, através de uma rede. O PuTTY implementa o final do cliente daquela sessão: o final no qual a sessão é exibida, em vez do final no qual ela é executada (ORG, 2017).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Escolha dos materiais e componentes

A escolha dos materiais se deu pelo tamanho compacto, preço acessível e confiabilidade. Para a criação do módulo secundário foi desenvolvida uma placa de circuito impresso no *software* CAD Eagle. Essa placa contém um sensor acelerômetro MPU-6050, um módulo Wi-Fi NodeMCU e Leds de controle, a alimentação do módulo secundário é fornecida por uma bateria conectada diretamente à entrada micro USB do NodeMCU, a placa de circuito foi confeccionada utilizando o método de corrosão.

O módulo principal será constituído de um Raspberry Pi 3, utilizando um micro cartão SD de 16 GB de memória, não houve alteração no *hardware* do Raspberry Pi 3.

A figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos referente à interação entre os módulos. O protocolo MQTT permite 1024 conexões de clientes ao *broker*, este projeto integrou dois módulos secundários a um módulo principal.

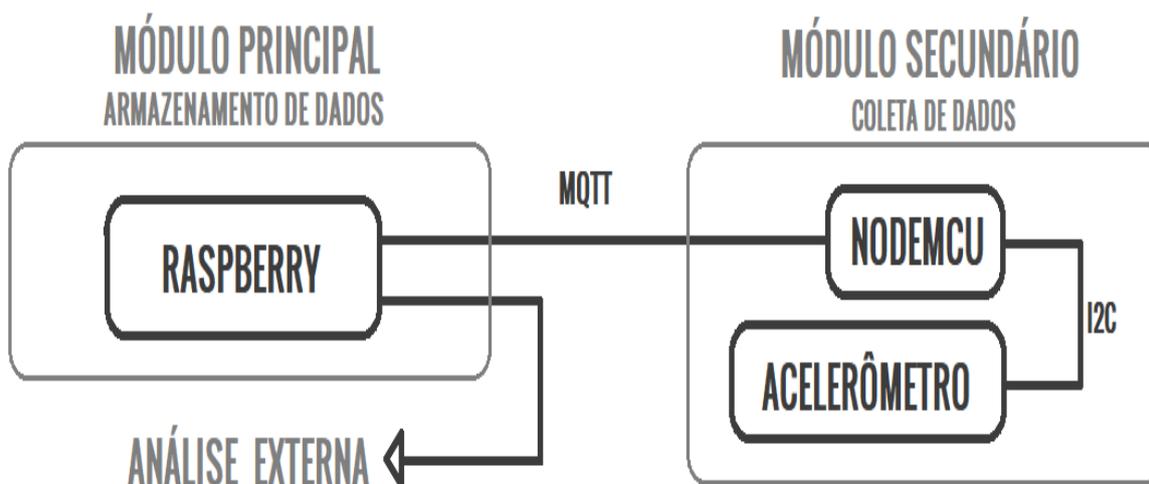


Figura 3.1: Diagrama de Blocos do Sistema

3.2 Aquisição de dados do acelerômetro

A programação para a comunicação entre o microcontrolador e o sensor acelerômetro é feita no *software* Arduino, o protocolo de comunicação entre os dispositivos é o I2C, o período de amostras de aceleração foi definido em 250 amostras por segundo. O microcontrolador faz a requisição dos dados e o sensor envia os dados previamente tratados. O MPU-6050 possui uma central lógica que converte os valores analógicos recebidos pelo sensor acelerômetro em sinal digital. O microcontrolador não armazena nenhum desses valores, apenas os transmite via Wi-Fi, a transmissão é constante à partir do momento que existe a conexão entre os módulos secundários e o módulo principal.

3.3 Comunicação entre os módulos

O protocolo utilizado para comunicar os módulos secundários ao módulo principal é o MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), e o broker instalado no Raspberry é o Mosquitto. O módulo secundário age como cliente, ou seja, ele está associado ao *broker*, essa associação se dá da seguinte forma: os clientes se conectam ao *broker* e publicam tópicos pré estabelecidos contendo mensagens. O *broker* por sua vez, age como servidor conectando todos os clientes, seja recebendo mensagens ou também enviando dados para eles.

Tanto os módulos secundários quanto o módulo principal estão conectados à uma rede externa, o endereço IP do Raspberry Pi 3 foi fixado para facilitar a comunicação entre os nós, e não necessitar de alteração do endereço todas as vezes em que o sistema for inicializado. O código escrito para o NodeMCU foi escrito em linguagem Arduino com a biblioteca Adafruit_MQTT, no módulo principal foi utilizada a linguagem python com a biblioteca paho-mqtt.

3.4 Coleta dos dados

O acesso ao sistema se dá via protocolo de comunicação SSH pelo software PuTTY. Para a aquisição dos dados foram utilizados dois módulos secundários de coleta de dados, eles foram fixados nas laterais da barra de carga de um vagão de passageiros da empresa Serra Verde Express como pode ser observado nas figuras 3.2 e 3.3. O sensor acelerômetro foi fixado com o eixo Y direcionado verticalmente ao movimento do trem.



Figura 3.2: Módulo secundário fixado na barra de carga do lado direito do trem



Figura 3.3: Módulo secundário fixado na barra de carga lado esquerdo do trem

Foram feitos testes no percurso interno do pátio da empresa, a distância percorrida foi de 152,50 metros e pode ser observada na figura 3.4. O teste foi executado duas vezes, inicialmente foram coletados dados com o trem em repouso e então foram coletados os dados da ida e da volta ao local de origem, ao todo foram percorridos 610 metros e contabilizados 8 minutos de dados coletados, os resultados dos testes serão apresentados no próximo capítulo.



Figura 3.4: Percurso de 152 m com o trem

O módulo secundário também foi utilizado em um carro de passeio, fixando-o na parte interna do carro. A distância percorrida foi de 190 metros com duas lombadas de aproximadamente 10 centímetros cada, a figura 3.5 mostra o percurso e a localização dos desníveis.



Figura 3.5: Percurso de 190 m com o carro

3.5 Tratamento do sinal

Os dados armazenados pelo módulo principal foram tratados no MATLAB, dessa forma foi possível realizar o processamento e apresentar o resultados graficamente. Antes de realizar qualquer tratamento foi necessário multiplicar todas as amostras pela constante da gravidade, $9,81 \text{ m/s}^2$, pois o acelerômetro fornece os dados do sensor em função da gravidade.

Inicialmente foi calculada a média para retirar o nível DC do sinal amostrado e submetido à Transformada Rápida de Fourier, com isso pode-se analisar o espectro do mesmo no domínio da frequência e então escolher a melhor frequência de corte para o filtro. Apesar dos testes serem feitos em locais controlados, a sensibilidade do sensor gera ruído indesejado no sistema e faz com que seja necessário filtrar o sinal amostrado para se obter precisão nos cálculos.

Após a escolha da frequência de corte, o sinal passou por um filtro passa-baixas do tipo FIR, a ordem do filtro foi feita empiricamente e no percurso deste trabalho foram feitos testes em diversos filtros porém esse foi o mais satisfatório. O filtro FIR possui fase linear e não possui realimentação, conseqüentemente os erros de arredondamento não se acumulam.

Em seguida o sinal da aceleração foi integrado para obter os dados da velocidade e novamente para obter o deslocamento, mas apenas no intervalo de interesse para evitar o erro acumulado. Dessa forma, foi possível obter os valores do deslocamento em metros. Para melhor exemplificar foi desenvolvido o fluxograma que pode ser visto na figura 3.7.

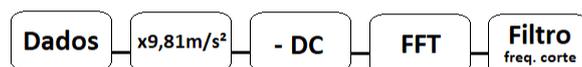


Figura 3.6: Fluxograma para obter a frequência de corte



Figura 3.7: Fluxograma para obter a posição

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Confeção da placa de circuito impresso do módulo secundário

A figura 4.1 apresenta o roteamento e o esquemático do módulo secundário.

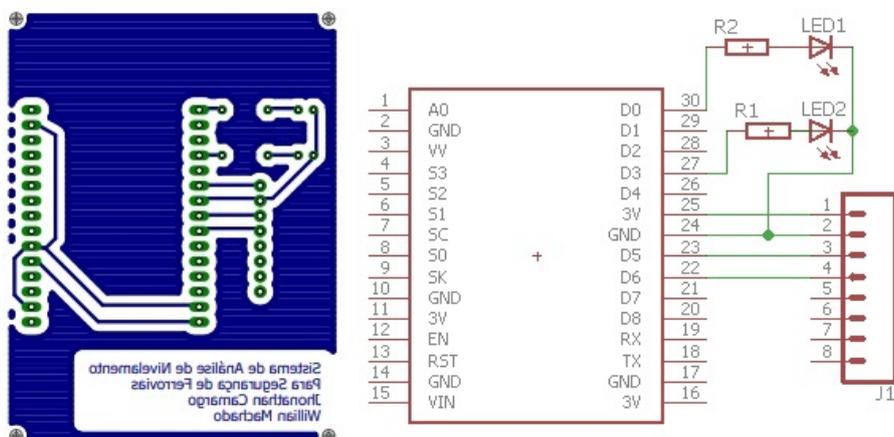


Figura 4.1: Roteamento e esquemático da placa de circuito

O resultado da placa corroída pode ser visto na figura 4.2.

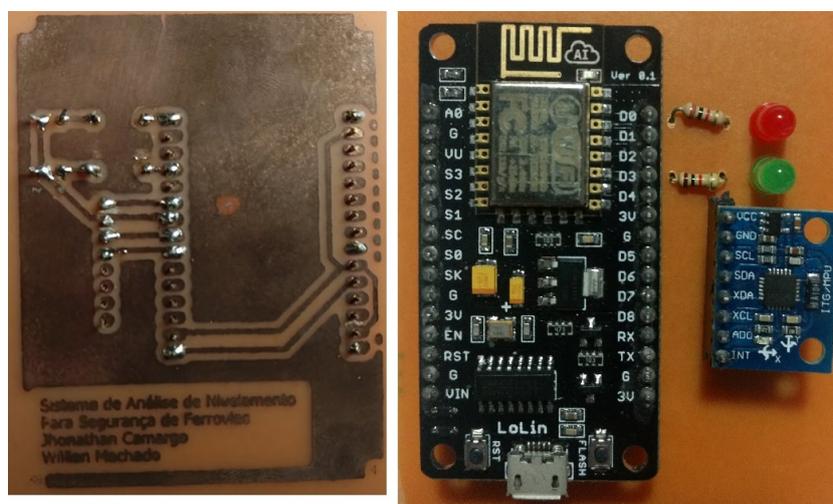


Figura 4.2: Placa de circuito impresso

4.2 Coleta dos dados

A figura 4.3 apresenta o monitor serial com os dados recebidos do MPU-6050 pelo NodeMCU e prontos para envio via Wi-Fi. O sensor coleta os dados referentes aos três eixos simultaneamente, a escolha do eixo de interesse se dá posteriormente. Isso demonstra que a placa está funcional e com o comportamento esperado.

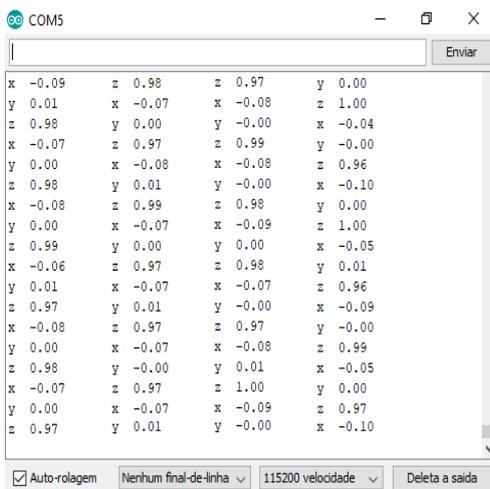


Figura 4.3: Coleta de dados do MPU-6050

A figura 4.4 apresenta os dados recebidos pelo módulo principal, com isso pode-se observar que a comunicação entre os módulos foi bem sucedida. Os dados enviados estão sendo recebidos e gravados conforme esperado.

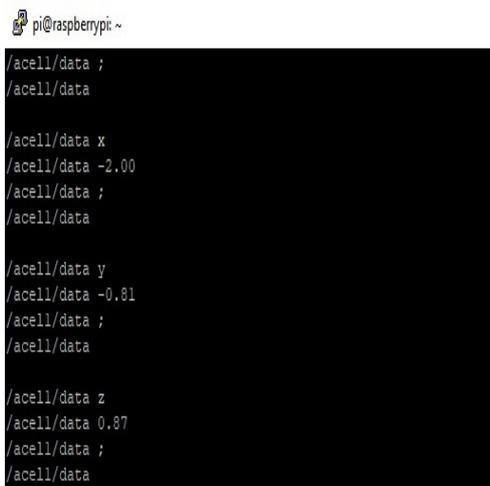


Figura 4.4: Dados recebidos pelo módulo principal

4.3 Tratamento dos Dados

A figura 4.5 apresenta os gráficos gerados com as amostras coletadas no trem. O primeiro gráfico mostra o sinal sem nenhum tratamento, o segundo gráfico apresenta a transformada de Fourier do sinal, o terceiro mostra o sinal coletado e com a componente DC retirada e finalmente o quarto gráfico mostra a transformada de Fourier do sinal amostrado sem a componente DC.

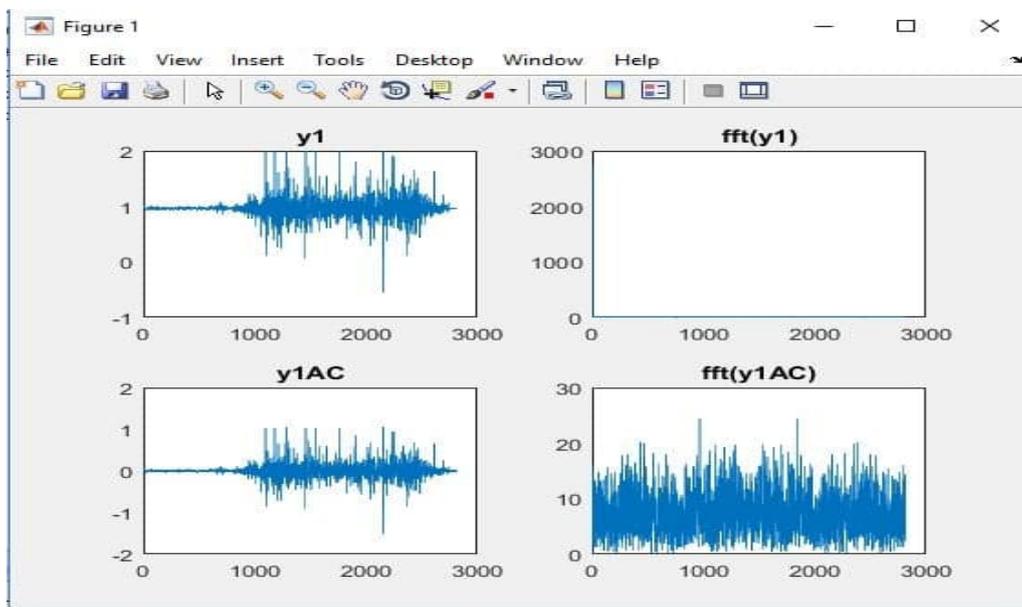


Figura 4.5: Gráfico aceleração do eixo Y no trem

É possível observar que mesmo num ambiente controlado e com manutenção permanente como o pátio em que ocorreram os testes, o sinal fica caracterizado praticamente como ruído. Não tendo utilidade prática na aplicação deste trabalho. No capítulo de conclusão serão levantadas questões dos motivos referentes à este obstáculo e possíveis soluções dos mesmos.

Com os problemas encontrados no sinal amostrado no trem, voltaram-se as atenções ao sinal coletado no veículo de passeio na figura 4.6 pode-se observar que depois desses dados serem importados para o MATLAB foi utilizado o *script* responsável por realizar a FFT no sinal para visualizar o mesmo no domínio da frequência e escolher a melhor frequência de corte para a filtragem do sinal.

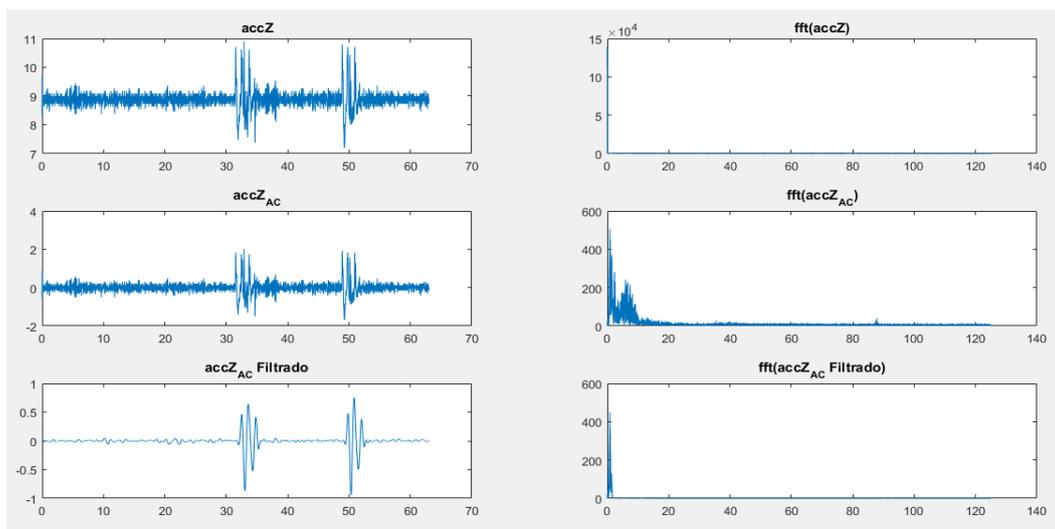


Figura 4.6: FFT do sinal da aceleração

Diferente do sinal coletado no trem é possível observar claramente os obstáculos propostos no percurso de coleta do sinal, as lombadas localizadas no percurso podem ser observadas no gráfico 5 aos 33 segundos e aos 48 segundos.

Filtrado o sinal foram escolhidos pontos de interesse para evitar o erro acumulado característico da integralização discreta do sinal. A figura 4.7 apresenta o resultado da integralização dos sinais escolhidos. A medida máxima encontrada para a lombada 1 foi de 9,404 cm e para a lombada 2 foi de 9,727 cm, isso corresponde à um erro de 6,33% para a lombada 1 e 2,806% para a lombada 2.

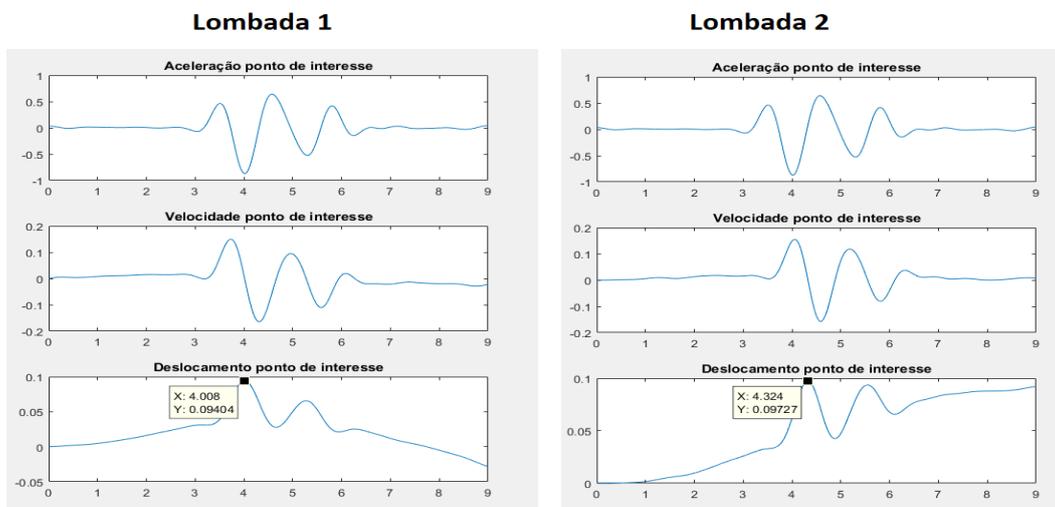


Figura 4.7: Integralização do sinal

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 Dificuldades encontradas

A escolha dos componentes necessitou de extremo cuidado, uma vez que o sistema é relativamente complexo e sensível às variações. Após diversas discussões à respeito do foco do projeto, aliado ao custo e confiabilidade, a decisão tomada parece ter sido acertada. A interação entre os componentes não tem complicações, o principal desafio é filtrar os dados realmente relevantes da leitura dos sensores e então aplicar as devidas tomadas de decisão ao sistema. O trabalho em campo também se tornou um entrave, apesar da empresa Serra Verde Express ter gentilmente cedido espaço e auxílio nos testes, a logística se torna uma dificuldade extra no desenvolvimento do projeto, pois os veículos possuem calendários e planejamentos rigorosos, além de constante manutenção preventiva em seus componentes. Dessa forma, não foram possíveis

5.2 Conclusão

Finalizado o trabalho, observou-se que os resultados foram alcançados e abriram uma gama de opções para desenvolvimento futuro do projeto. O trabalho foi de grande importância para a aplicação do conhecimento adquirido durante o curso, tanto nas disciplinas teóricas, práticas e no conhecimento adquirido pelas pesquisas feitas nos livros, *datasheet* e nos artigos publicados online.

O desenvolvimento do protótipo, juntamente com a escolha certa dos componentes propiciou ao projeto atingir seu objetivo de coletar os dados e integrar as tecnologias aqui empregadas.

A comunicação sem fio entre o módulo secundário e principal foi de extrema

importância para o projeto, pois foi possível ter uma portabilidade e independência entre os módulos, facilitando a manutenção das vias férreas

A nova proposta de análise dos dados de nivelamento se deu a partir da filtragem do sinal com o filtro FIR, a FFT e a integração do sinal coleta para obter a variação do deslocamento no ponto de interesse, levando em consideração os parâmetros da FRA para a medida de uma corda de 20 metros.

Através dessa análise foi possível gerar relatório com gráficos no MATLAB para facilitar a visualização das falhas.

Os conhecimentos aqui obtidos demonstram que a manutenção de um sistema ferroviário pode ser considerada estratégica e impacta principalmente a questão econômica. Porém foi possível obter um resultado final do projeto positivo: baixo custo e portabilidade do projeto. Que facilidade as manutenções e evita a parada da via desnecessariamente para uso do carro controle, o qual só seria usado quando esse projeto detecta-se falhas no nivelamento da via permanente. Prevenir acidentes tem um impacto financeiro e humano totalmente relevantes.

5.3 Trabalhos Futuros

Existem três pontos principais que valem ser ressaltados para os trabalhos futuros que o tornaria mais completo: aprimorar a coleta de dados, integrar a análise de dados e utilização do GPS.

É importante minimizar os ruídos em excesso, blindando o módulo secundário contra as variações externas e aumentar a sensibilidade do acelerômetro ou substituí-lo por um que permita uma coleta de informações mais sensíveis. Com isso, será possível ter um produto mais confiável.

Para otimização do projeto, a análise de dados deverá ser integrada ao módulo principal. Atualmente a análise é realizada externa ao módulo principal utilizando o MATLAB. A integração permitirá ao operador coletar os dados juntamente com as análises, permitindo que a tomada de decisão seja realizada rapidamente e

preventivamente.

Também será válido a integração do GPS para uma melhor aproximação do local do defeito, pois sem isso tornará difícil a localização do erro e efetiva manutenção da via permanente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Ed.). *NBR 6023 Informação e documentação - Referências*. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

ARDUINO. *What is Arduino*. 2018. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acessado em: 08/06/2018.

ASSOCIATION, R. P. *Raspiberry Pi 3 Model B*. 2016. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. Acessado em: 07/02/2018.

COHAN, K. *MATLAB overview*. 2018. <https://www.mathworks.com/videos/matlab-overview-61923.html>. Acessado em: 08/06/2018.

CURVELLO, A. *Apresentando o módulo ESP8266*. 2015. <https://www.embarcados.com.br/modulo-esp8266/>. Acessado em: 06/02/2018.

DANTAS, T. *Ferrovia*. 2018. <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/ferrovia.htm>. Acessado em: 16/01/2018.

DIAS, T. M. da S. et al. *Manutenção centrada na confiabilidade em ferrovias de cargas em área urbana*. Instituto Militar de Engenharia, 2016.

FERRERO, R. et al. *Exploiting accelerometers to estimate displacement*. 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing, 2016.

FOUNDATION, E. *Eclipse Mosquitto An open source MQTT broker*. 2018. <http://mqtt.org/faq>. Acessado em: 08/06/2018.

FOUNDATION, P. S. *History of the software*. 2018.

<https://docs.python.org/3/license.html>. Acessado em: 28/05/2018.

INDEXMUNDI. *Ferrovias - Mundo*. 2017.

<https://www.indexmundi.com/map/?v=113l=pt>. Acessado em: 16/01/2018.

INVENSENSE. *MPU-6000 and MPU-6050 Register*

Map and Descriptions Revision 4.2. 2013.

<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>.

Acessado em: 12/03/2018.

LEONARDO, A. da S. Uma contribuição para a melhoria do processo de análise dos dados coletados na inspeção da via da mrs. Instituto Militar de Engenharia, 2006.

LUPION, B. *Por que no Brasil há menos ferrovias*

que transportam passageiros do que na Europa. 2016.

<https://www.nexojornal.com.br/expresso/2016/12/31/Por-que-no-Brasil-h%C3%A1>

[-menos-ferrovias-que-transportam-passageiros-do-que-na-Europa](https://www.nexojornal.com.br/expresso/2016/12/31/Por-que-no-Brasil-h%C3%A1). Acessado em:

16/01/2018.

MOLER, C. *The Origins of MATLAB*. 2004.

<https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-origins-of-matlab.html>.

Acessado em: 08/06/2018.

MQTT.ORG. *What is MQTT*. 2018. <http://mqtt.org/faq>. Acessado em: 08/06/2018.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. [S.l.]:

Pearson Education, 2011.

ORG, P. <https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/faq.html>. 2017.

<https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/latest.html>. Acessado em:

08/06/2018.

SECURITY, I. S. C. *SSH (SECURE SHELL)*. 2018.

<https://www.ssh.com/ssh/sec-The-SSH-protocol>. Acessado em: 08/06/2018.

SETTI, J. B. *Ferrovias no Brasil - um século e meio de evolução*. 2008.

https://www.suapesquisa.com/economia/principais_ferrovias_brasil.htm. Acessado em: 16/01/2018.

SETTI, J. B. *Ferrovias no Brasil - um século e meio de evolução*. [S.l.: s.n.], 2008.

STEWART, J. *Cálculo: Volume I*. [S.l.]: Cengage Learning, 2017.

TAN, U.-X. et al. Estimating displacement of periodic motion with inertial sensors. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 2008.

TORRES, H. *Sensores Inerciais*. 2015.

<https://www.embarcados.com.br/sensores-inerciais-parte-2/>. Acessado em: 23/01/2018.

UFPR (Ed.). *Normas para apresentação de documentos científicos, 2 - Teses, dissertações, monografias e outros trabalhos acadêmicos*. [S.l.]: Universidade Federal do Paraná, 2007.

WIKIPEDIA. *Ferrovia*. 2018. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ferrovia>. Acessado em: 16/01/2018.