



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

SUPERVISOR DE INCLINAÇÃO PARA PONTES ROLANTÉS

VICTOR DUARTE NASCIMENTO

João Monlevade, MG
2023

VICTOR DUARTE NASCIMENTO

**SUPERVISOR DE INCLINAÇÃO PARA
PONTES ROLANTÉS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof. Dr. Glauco F. G. Yared

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2023



FOLHA DE APROVAÇÃO

Victor Duarte Nascimento

Supervisor de Inclinação para Pontes Rolantes

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 20 de março de 2023

Membros da banca

Doutor Glauco Ferreira Gazel Yared - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre Romeu Yukio Takeda - Coorientador(DiEletrons)
Doutor Marcelo Moreira Tiago (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutora Aline Rocha de Assis (Universidade Federal de Ouro Preto)

Glauco Ferreira Gazel Yared, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Glauco Ferreira Gazel Yared, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/03/2023, às 20:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0500800** e o código CRC **C7E9AC46**.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, a Deus, que sempre me abençoou e me deu forças para que meus objetivos fossem alcançados durante todos meus anos de estudos. Agradeço ao meu pai que sempre me motivou, e acima de tudo esteve presente sempre que necessário durante toda esta trajetória. Agradeço aos meus irmãos e mãe, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto me dedicava à este curso. Agradeço ao professor Glauco, não somente por ter me orientado neste trabalho, mas também por me proporcionar diversos conhecimentos durante todo o curso. Aos meus colegas de curso, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como profissional. E por fim, agradeço também a instituição de ensino UFOP, essencial ao meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

"Na vida somos o que a mente enxerga e a capacidade nos permite"
– José Sergio Nascimento

Resumo

O supervisor de inclinação para pontes rolantes é um equipamento que monitora a inclinação dos cabos de içamento de carga das pontes rolantes. Este equipamento é capaz de fornecer os dados via Wi-Fi em tempo real ao supervisor, para que se evitem acidentes devido a erros de operação deste sistema. No contexto de segurança do trabalho nas indústrias, a procura por estes tipos de dispositivos teve um aumento muito grande nos últimos anos. Desta forma, este trabalho visa desenvolver um supervisor de inclinação por meio da utilização de uma unidade de medição inercial, que contém sensores acelerômetros e giroscópio, cujos sinais devem ser tratados e processados, afim de que as informações obtidas possam ser enviadas ao centro de controle operacional. Ao longo deste trabalho serão discutidos quais dispositivos são necessários para implementação deste projeto, os métodos de filtragem dos sinais recebidos e os resultados obtidos até o presente momento, que indicam que é possível realizar a medição de inclinação com uma precisão de 97% da faixa de medição.

Palavras-chave: Supervisor de Inclinação, Ponte Rolante, Unidade de Medição Inercial, Inclinômetro, Filtro Complementar, Sistemas Microeletromecânicos, Acelerômetro, Giroscópio, Indústria 4.0.

Abstract

The tilt supervisor for overhead cranes is a device that monitors the inclination of the load hoisting cables of overhead cranes. This equipment is capable of providing real-time data via Wi-Fi to the control center, in order to avoid accidents due to operating errors in this system. In the context of workplace safety in industries, the demand for these types of devices has increased greatly in recent years. Therefore, this work aims to develop a tilt supervisor through the use of an inertial measurement unit, which contains accelerometers and gyroscopes sensors, whose signals must be processed and analyzed so that the obtained information can be sent to the operational control center. Throughout this work, the necessary devices for the implementation of this project, signal filtering methods, and the results obtained to date will be discussed, which indicate that it is possible to perform tilt measurement with 97% accuracy within the measurement range.

Keywords: Tilt Supervisor, Overhead Crane, Inertial Measurement Unit, Inclinator, Complementary Filter, Microelectromechanical Systems, Accelerometer, Gyroscope, Industry 4.0..

Lista de ilustrações

Figura 1 – Principais causas e resultados dos acidentes	2
Figura 2 – Baseline Inclinômetro	3
Figura 3 – Posicionamento dos sensores de inclinação no guindaste	3
Figura 4 – Boia Lightweight IMU	4
Figura 5 – Ponte Rolante.	7
Figura 6 – Carro Trolley.	8
Figura 7 – Sistema de Içamento.	8
Figura 8 – Ilustração esquemática de Componentes MEMS.	10
Figura 9 – Um motor de silício MEMS juntamente com um fio de cabelo humano.	10
Figura 10 – Sensor IMU	12
Figura 11 – Princípio de funcionamento Giroscópio x Acelerômetro	12
Figura 12 – Princípio de funcionamento acelerômetro	13
Figura 13 – Giroscópio	14
Figura 14 – MPU GY-521	16
Figura 15 – ATMEGA328P-PU	17
Figura 16 – Módulo de comunicação wifi	18
Figura 17 – Módulo Display OLED	19
Figura 18 – Resposta em frequência do filtro complementar (magnitude)	20
Figura 19 – Resposta Filtro Complementar	22
Figura 20 – Arquitetura Blynk	25
Figura 21 – Anel graduado giratório	27
Figura 22 – Centralização do sensor no eixo X	28
Figura 23 – Centralização do sensor no eixo Y	28
Figura 24 – Teste inicial Eixo X a 2°.	29
Figura 25 – Teste inicial eixo Y a 2°.	30
Figura 26 – Sistema de calibração do sensor a 30° eixo X	31
Figura 27 – Placa eletrônica Sensor de Inclinação	34
Figura 28 – Módulo de comunicação do Sensor	34
Figura 29 – Console Web Blynk Inclinômetro	35
Figura 30 – Interface Aplicativo Supervisório	36

Lista de Siglas

ADM	Amplitude de Movimento Articular
CCI	Coefficiente de correção intraclasse
IMU	Unidade de Medição Inercial
DOF	Grau de Liberdade
OMC	Captura ótica de movimento
MEMES	<i>Micro-Electro-Mechanical-Systems</i>
MST	<i>Microsystem Technology</i>
IC	Circuito Integrado
HARM	<i>High Aspect Ratio Micromachining</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
CPS	Sistemas Ciber Físico
EC	Computação evolutiva

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Estado da Arte	2
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Objetivos Gerais	5
1.3.2	Objetivos Específicos	5
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO TEÓRICA	7
2.1	Pontes Rolantes	7
2.2	Sistemas de Sensores Tri-eixos	8
2.2.1	MEMS	9
2.2.2	Unidade de Medição Inercial (IMU)	11
2.2.2.1	Acelerômetro	12
2.2.2.2	Giroscópio	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	Componentes Eletrônicos	16
3.1.1	Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos ITG/ MPU GY-521	16
3.1.2	Amel - ATMEGA328P-PU	17
3.1.3	Módulo Wi-fi - ESP8266 ESP-07	18
3.1.4	Módulo Display 128X64 I2C SSD1306 12864	18
3.2	Filtro Complementar	19
3.2.1	Filtro Complementar Aplicado na Computação para Sistemas IMU	20
3.3	Processamento	21
3.3.1	Observações de Processamento ao Trabalhar com Sistemas IMU	22
3.3.2	Combinação de Proporções entre Acelerômetro e Giroscópio	24
3.4	Sistema Supervisório Interface Remota	25
3.5	Testes de Precisão do Acelerômetro e Giroscópio	26
4	RESULTADOS	32
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38
6	APÊNDICES	40

6.1	Apêndice A - Algoritmo Microcontrolador	40
------------	--	-----------

1 Introdução

Durante as fases iniciais de setores industriais no Brasil, assim como no mundo, os regimentos e regulamentos internos de operação tinham uma única visão, que era a lucratividade. Neste contexto, não se aplicava, ou sequer existia, algum tipo de norma de segurança de operação de maquinário que não visasse apenas o funcionamento do sistema (CHAGAS, 2011). Entretanto, em vista do cenário atual que é atento às condições de trabalho e aos incidentes ocorridos em todo território nacional, é notório o grande investimento financeiro e a preocupação das indústrias brasileiras e mundiais com a segurança de operação e saúde no trabalho (CNI, 2019).

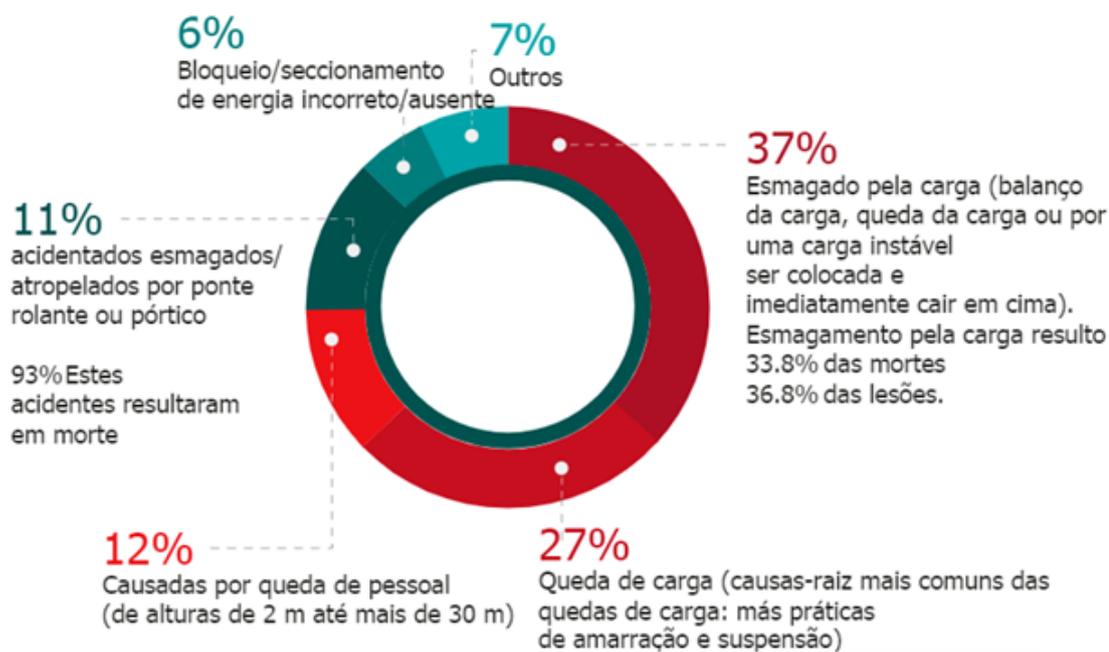
A utilização de pontes rolantes para elevação e transporte de carga é de extrema importância nos setores de produção, pois além de viabilizar de forma rápida e eficiente o processo de movimentação de carga, também oferece segurança no procedimento, quando bem executado. Considerando que o principal fator de risco de operação deste equipamento é a queda das cargas durante o transporte, foram desenvolvidos em todo o mundo estudos e equipamentos para evitar incidentes durante a operação de pontes rolantes.

O Instituto de Treinamento da Konecranes realizou um estudo junto ao Departamento de Administração de Trabalho, Segurança Ocupacional e Saúde dos EUA (OSHA, do inglês *Occupational Safety and Health Administration*), analisando 249 acidentes industriais com pontes rolantes suspensas em um período de 10 anos (KOLBANL, 2016). Durante esse levantamento, foram constatadas 823 violações OSHA, totalizando em 133 lesões corporais e 117 mortes, causando em média um prejuízo direto e indireto de mais de 1 milhão de dólares por acidente. A Figura 1 apresenta um gráfico mostrando as principais causas e resultados dos acidentes.

Segundo dados também informados por esta instituição, percebe-se que o principal fator de incidentes no transporte por pontes rolantes é devido ao manuseio incorreto do equipamento, acarretando em despejo da carga no processo de elevação e translação. Porém, é fato que as pontes devem ser operadas corretamente para que haja o mínimo de acidentes possíveis, dado o grande volume de material que transportam, e por estarem em um meio onde há fluxo de trabalhadores. Este trabalho consiste no desenvolvimento de um equipamento capaz de monitorar em tempo real toda a operação destas pontes rolantes e tem como objetivo auxiliar o operador para que ocorram o mínimo de acidentes possíveis.

Dessa forma, considerando a preocupação com a segurança do ofício, (TST, 2021), o projeto desenvolvido neste trabalho de Conclusão de Curso visa implementar um equipamento de supervisão de inclinação de pontes rolantes, com a finalidade de reduzir os inúmeros prejuízos causados pela queda de material durante o processo de operação destes equipamentos, além de assegurar um ambiente de trabalho seguro para os colaboradores.

Figura 1 – Principais causas e resultados dos acidentes



Fonte: <https://www.konecranes.com/pt-br>

1.1 Estado da Arte

Segundo o trabalho de Grotli e Gravdahl (2008), vários algoritmos de fusão de sensores para medir a elevação do braço em relação à gravidade (ou seja, deslocamento angular e medidas resumidas de velocidade), em diferentes velocidades de movimento, podem ser empregados juntamente com o acelerômetro e giroscópio. Neste sentido Grotli e Gravdahl (2008) apresenta que treze participantes completaram uma tarefa de trabalho cíclica, de curta duração e com uso intensivo do braço, que envolveu a transferência de cavilhas de madeira em três ritmos de trabalho (lento, médio e rápido). As medidas de deslocamento angular e velocidade de elevação do braço foram medidas simultaneamente usando uma unidade de medida inercial (IMU) e um sistema de captura ótica de movimento (OMC).

Os resultados indicaram que as soluções de inclinômetro baseadas em IMU podem reduzir erros de raiz quadrática média, em comparação com as estimativas de inclinação baseadas em acelerômetro, em até 87%, dependendo da taxa de trabalho e da abordagem de fusão de sensor aplicada. Os resultados sugerem que os inclinômetros baseados em IMU podem melhorar substancialmente a precisão da medição em comparação com os que são usados tradicionalmente, com base em acelerômetros. Os ergonomistas podem usar os algoritmos de fusão de sensores não proprietários fornecidos neste trabalho para estimar com mais precisão a elevação do braço.

De acordo com Jouybari A. A. Ardalan (2017), as medições de angulações de-

semprenham um papel crítico em uma gama de aplicações, como por exemplo: marinha, aeroespacial, robótica, navegação, análise de movimento humano e interação de máquina.

No que tange as aplicações de movimento humano, temos a utilização de inclinômetros para a análise da amplitude de movimento articular (ADM) (Felício (2012)). Segundo este artigo, foi utilizado um inclinômetro digital da marca *Baseline*, o qual após a apuração dos testes, obteve melhores resultados na medida da ADM do que o goniômetro, que é o atual equipamento comumente utilizado para este tipo de aplicação. A utilização para este tipo de exame seria mais relevante, uma vez que no inclinômetro o posicionamento não depende de referências anatômicas, e seu coeficientes de correlação intraclasse (CCI) é superior. Entretanto, este equipamento ainda é pouco utilizado nas clínicas devido ao custo superior quando comparado com o goniômetro. A Figura 2 apresenta o modelo de inclinômetro utilizado pela empresa Access Health.

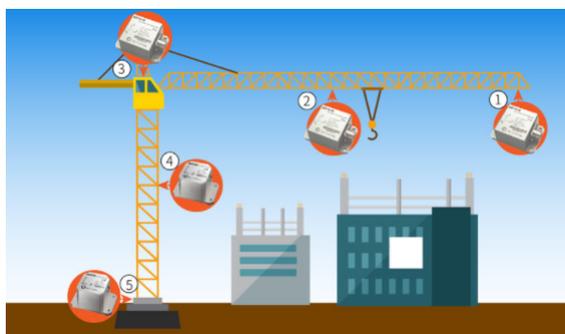
Figura 2 – Baseline Inclinômetro



Fonte: <https://accesshealth.com.au/product>

A utilização de inclinômetros tem sido frequente em diversas aplicações (TECHNOLOGY, 2021). Em comparação a este projeto, a aplicação mais próxima é o emprego do inclinômetro para guindastes, no qual destaca-se principalmente a medição da parte estrutural da torre do guindaste. Como ilustração, pode-se ver de forma mais clara a posição de instalação dos inclinômetros na Figura 3.

Figura 3 – Posicionamento dos sensores de inclinação no guindaste



Fonte: (TECHNOLOGY, 2021)

Assim, pode-se notar que a aplicação de inclinômetros para supervisionar inclinações é uma prática já consolidada, principalmente no mercado internacional. Porém, é

incomum encontrar, tanto nacionalmente quanto no exterior, um equipamento que forneça diretamente esta aplicação para pontes rolantes, e não menos importante, que tenha também um custo acessível às indústrias brasileiras.

A fim de enaltecer mais a utilização dos inclinômetros, existem aplicações onde estes dispositivos são acoplados em boias, com a finalidade de medir o comportamento marítimo e prever tsunamis. Os sinais adquiridos pelos sensores que se encontram nestas boias são enviados ao centro de controle para serem tratados e processados, permitindo que a central consiga mapear o desempenho marítimo e se precaver, antes da chegada de qualquer incidente na costa. A Figura 4 apresenta um exemplo de boia para medir este comportamento.

Figura 4 – Boia Lightweight IMU



Fonte: (JOUYBARI A. A. ARDALAN, 2017)

Logo, utilizar tecnologias que sejam capazes de realizar a supervisão de inclinação, fornecendo os dados de angulação dos cabos das pontes rolantes em tempo real, é um desafio no âmbito da pesquisa e da indústria. Estes dados portam informações de grande valor e serão utilizados para comunicar, principalmente, se o operador está ultrapassando os limites de operação da ponte rolante, concedendo assim uma maior confiabilidade de operação do sistema.

1.2 Motivação

A motivação por trás deste trabalho de conclusão de curso é oferecer uma solução prática e eficiente para a indústria, a fim de atender às demandas atuais de produção em larga escala e com baixo custo, sem comprometer a segurança dos trabalhadores. Além disso, o objetivo é fornecer uma tecnologia que possa ser utilizada por empresas de todos os portes.

A segurança é uma preocupação crescente em todos os setores industriais, e a utilização de equipamentos que minimizem os erros e possibilitem uma melhoria no desempenho do serviço entregue é fundamental. O monitoramento de inclinação de pontes

rolantes é uma área crítica onde a segurança é fundamental e a precisão é essencial. As pontes rolantes são usadas para transportar cargas pesadas, e um desalinhamento ou inclinação incorreta pode resultar em sérios acidentes de trabalho.

A construção de um equipamento que atenda essas necessidades industriais pode ser a chave para garantir a segurança dos trabalhadores e ao mesmo tempo aumentar a eficiência e a produtividade das empresas. O monitoramento da inclinação dos cabos de pontes rolantes é uma solução inovadora e valiosa que pode trazer benefícios significativos para a indústria.

Portanto, este trabalho de conclusão de curso é motivado por uma necessidade clara do mercado e da indústria em geral. O objetivo é fornecer uma solução prática e eficiente para o monitoramento de inclinação de pontes rolantes, que possa ser utilizada por empresas de todos os portes e que possa melhorar a segurança no local de trabalho e a eficiência do serviço entregue.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

Este projeto tem como objetivo geral desenvolver um equipamento para realizar a medição de inclinação e o monitoramento de operação dos cabos das pontes rolantes, no intuito de evitar acidentes durante a operação. Este aparelho, além de conter um custo acessível de fabricação, também deverá estar inserido no contexto da Indústria 4.0.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Definição da abordagem para medição da inclinação dos cabos da ponte rolante;
- Análise de viabilidade técnica e econômica do produto;
- Definir dispositivos eletrônicos necessários para implementação do sistema de medição da inclinação dos cabos, projetar e fabricar uma placa de circuito impresso;
- Definir métodos de processamentos;
- Confeção da placa protótipo;
- Implementação inicial do algoritmo no sistema;
- Validação e abordagem inicial do sistema;
- Calibração do equipamento;

- Verificação de erro do sistema;
- Inserção na Indústria 4.0.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos que dão suporte ao desenvolvimento deste trabalho. No Capítulo 2, será apresentada a teoria que embasa a metodologia aplicada, a fim de proporcionar uma base sólida para a compreensão do processo de desenvolvimento do sistema. Já o Capítulo 3 apresenta as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do sistema, descrevendo detalhadamente as etapas do processo de construção.

No Capítulo 4, serão apresentados os resultados das medições realizadas com o inclinômetro, demonstrando a eficácia do sistema e a precisão das medições obtidas. Por fim, o Capítulo 5 trará as conclusões deste trabalho, destacando os principais pontos obtidos e os possíveis caminhos para futuras pesquisas e aprimoramentos.

No Apêndice A, será anexado o algoritmo do microcontrolador, proporcionando uma visão detalhada da lógica por trás do funcionamento do sistema, e possibilitando uma compreensão mais aprofundada do processo de desenvolvimento.

2 Revisão Teórica

2.1 Pontes Rolantes

Pontes rolantes são equipamentos eletromecânicos que têm a finalidade de elevar, transportar e abaixar cargas de pequeno, médio e grande porte (de 0,5 toneladas até 350 toneladas) (ABNT (1984)). Sua principal aplicação é no setor industrial, no qual estes equipamentos têm a função de cobrir toda a área de trabalho em suas três dimensões, oferecendo condições de movimento de cargas posicionadas neste espaço. Estes dispositivos são capazes de operar em elevados ciclos de trabalho e as dimensões ocupadas por uma determinada ponte rolante abrangem o seu deslocamento longitudinal ao longo da área em questão, o movimento transversal e enfim a elevação ou içamento de seu caminho de rolamento em relação ao nível do piso (TAMASAUSKAS (1994)).

Uma ponte rolante pode ser descrita através de seus três principais componentes principais: ponte, *Trolley* e sistema de içamento (carro guicho). Essas componentes combinadas realizam o transporte de grandes cargas em curtas distância (PASSOS (2011)).

- Ponte: Principal meio estrutural usado para cobrir toda a área em sua extensão e realiza o movimento de translação (Figura 5). Neste componente são colocados os trilhos que permitem a movimentação do *Trolley*.

Figura 5 – Ponte Rolante.



Fonte: <https://cmk.com.br>

- *Trolley*: Também conhecido como carro, realiza a movimentação com os roletes, que opera o deslocamento sobre as abas da viga, sendo um modelo apresentado na Figura 6. A função deste componente é efetuar o deslocamento vertical e transversal da carga.

Figura 6 – Carro Trolley.



Fonte: <https://cmk.com.br>

- Sistema de Içamento: Representado pela Figura 7, este importante sistema tem como função acoplar a carga e erguer a mesma, com a finalidade de deixá-la acima do nível do chão do local, permitindo locomover a carga livremente.

Figura 7 – Sistema de Içamento.



Fonte: <https://cmk.com.br>

2.2 Sistemas de Sensores Tri-eixos

A utilização de sensores para garantir a segurança do ambiente de trabalho é uma realidade cada vez mais comum no cotidiano da indústria como um todo, onde também são vistos para o manuseio de pontes rolantes.

Diferentes tipos de tecnologias permitem a medição de orientação, sendo um dos exemplos mais comuns sistemas sensoriais com base inercial, que utilizam o princípio da inércia para realizar a detecção de padrões de movimento. Sua principal vantagem está

relacionada ao fato de que são completamente autocontidos, ou seja, a medição é realizada de forma a não depender de variações ocorridas em ambientes externos. Entretanto, como qualquer dispositivo, o mesmo está sujeito a interferência de ruídos externos, que podem ser atenuados utilizando técnicas de filtragem (AHMAD, 2013).

2.2.1 MEMS

Os Sistemas Microeletromecânicos (MEMS, do inglês *Micro electro Mechanical Systems*) são uma tecnologia de processo que permite a criação de dispositivos ou sistemas integrados que combinam componentes mecânicos e elétricos em uma escala reduzida. Utilizando técnicas de processamento em lote de circuito integrado (IC), esses dispositivos podem variar em tamanho entre alguns micrômetros a milímetros, e possuem a capacidade de detectar, controlar e atuar na escala micro, gerando efeitos em escala macro. (PRIME, 2002).

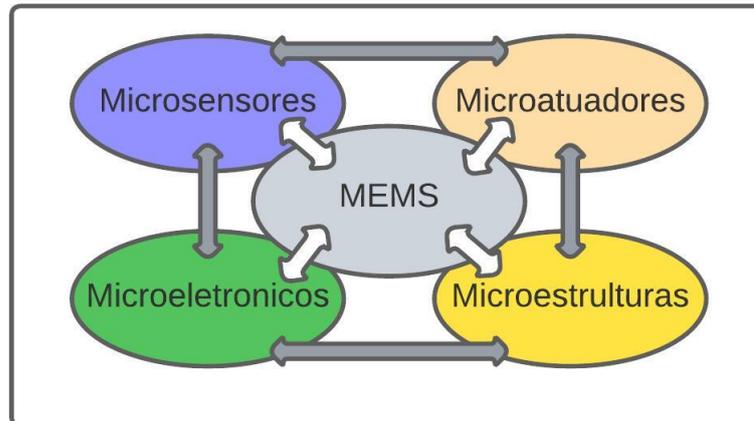
O termo MEMS é um acrônimo originado nos Estados Unidos. Também é conhecido como *Microsystems Technology (MST)* na Europa e *Micromachines* no Japão. Independentemente da terminologia, o fator que define um dispositivo MEMS está na maneira como é produzido. Enquanto os aparelhos eletrônicos são fabricados usando tecnologia IC, os componentes micromecânicos são fabricados por sofisticadas manipulações com silício e outros substratos usando processos de microusinagem.

Processos como microusinagem a granel e de superfície, bem como micromaqui-
nação de alta proporção (*HARM, do inglês High Aspect Ratio Micromachining*) remove seletivamente partes do silício ou adiciona camadas estruturais para formar os componentes mecânicos e eletromecânicos. Enquanto circuitos integrados são projetados para explorar as propriedades elétricas do silício, os MEMS aproveitam as propriedades mecânicas do silício ou suas propriedades eletromecânicas (PRIME, 2002).

Na forma mais geral, os MEMS consistem em microestruturas mecânicas, micros-
sensores, micro-atuadores e microeletrônica, todos integrados no mesmo chip de silício, como mostrado no diagrama esquemático apresentado na Figura 8. Microsensores detectam mudanças no sistema ambiente por medição mecânica, térmica, informação magnética, química ou eletromagnética. A microeletrônica processa tais informações e sinaliza aos micro-atuadores para reagirem e criarem alguma forma de alteração no ambiente.

Os dispositivos MEMS são muito pequenos e seus componentes são geralmente microscópicos. Alavancas, engrenagens, pistões, bem como motores e até motores a vapor foram todos fabricados por MEMS (Figura 9). No entanto, MEMS não são utilizados em aplicações que envolvem miniaturização de componentes mecânicos ou fabricar produtos de silício (na verdade, o termo MEMS é realmente enganoso, pois muitos dispositivos microusinados não são mecânicos em nenhum sentido). Trata-se é uma tecnologia de manufatura; um paradigma para projetar e criar dispositivos e sistemas mecânicos complexos bem como sua eletrônica integrada usando técnicas de fabricação em lote (PRIME, 2002).

Figura 8 – Ilustração esquemática de Componentes MEMS.



Fonte: do Autor

Figura 9 – Um motor de silício MEMS juntamente com um fio de cabelo humano.



Fonte:retirado de PRIME, 2002

MEMS tem várias vantagens distintas como tecnologia de fabricação. Em primeiro lugar, a natureza interdisciplinar da tecnologia MEMS e suas técnicas de microusinagem, bem como sua diversidade de aplicações resultou em uma gama sem precedentes de dispositivos e sinergias em campos anteriormente não relacionados (por exemplo, biologia e microeletrônica). Em segundo lugar, MEMS com suas técnicas de fabricação em lote permite que componentes e dispositivos sejam fabricados com maior desempenho e confiabilidade, combinado com vantagens de tamanho físico reduzido, volume, peso e custo. Em terceiro lugar, MEMS fornece a base para a fabricação de produtos que não podem ser produzidos por outros métodos. Esses fatores proporcionam que esta tecnologia seja mais difundida do que os microchips de circuito integrado. No entanto, existem muitos desafios e obstáculos tecnológicos associados à miniaturização que precisam ser abordados

e superadas antes que os MEMS possam realizar seu verdadeiro potencial (PRIME, 2002).

Como uma parte importante da internet das coisas (IoTs) e dos sistemas ciberfísicos (CPS), os MEMS estão desempenhando um papel cada vez mais insubstituível na comunidade industrial atual e na próxima era da Indústria 4.0 (WANG P., 2019). Uma tendência recente na otimização de *design* de MEMS é inspirada no mecanismo de evolução natural. Muitas técnicas poderosas, especialmente a computação evolutiva (EC), têm sido usadas para a otimização do projeto de MEMS (WANG P., 2019).

2.2.2 Unidade de Medição Inercial (IMU)

A utilização de uma IMU não está presente apenas na indústria, possuindo uma diversidade de escolhas para as aplicações a serem desenvolvidas (ZHOU et al., 2020). Diversas aplicações do cotidiano tem empregado a identificação de movimentos para diferentes finalidades, como por exemplo:

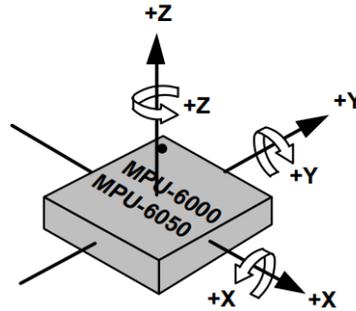
- Direção dentro de um sistema GPS.
- Rastrear o movimento dentro da eletrônica do usuário, como telefones celulares, controles remotos do videogame e robôs domésticos.
- Suporte no posicionamento de objetos como antenas, chapas, esteiras, entre outros.
- Cálculos de campos magnéticos.
- Cálculos de velocidade angular e aceleração
- Auxílio em manobras de aeronaves com ou sem piloto.

Como em todas estas aplicações, os sensores IMU mais comuns possuem 6 graus de liberdade, compostos por 3 medidas de aceleração linear a partir do acelerômetro e 3 medidas de aceleração angular feitas pelo giroscópio (Figura 11) sendo capazes de medir diversas variáveis, como a determinação da direção, movimento e orientação.

A utilização deste tipo de IMU traz como uma vantagem muito marcante para aplicações em pontes rolantes, pelo fato de não sofrer a interferência de campos magnéticos do sistema externo em torno do sensor quando é usado próximo demais de material ferromagnético. Por outro lado, dependendo do acelerômetro e do giroscópio, pode não ser suficiente para aumentar a precisão da medição devido ao ruído dos sensores e à questão do desvio do giroscópio. Os dados adquiridos pelo IMU são integrados como mostrado na Figura 11 (AHMAD, 2013).

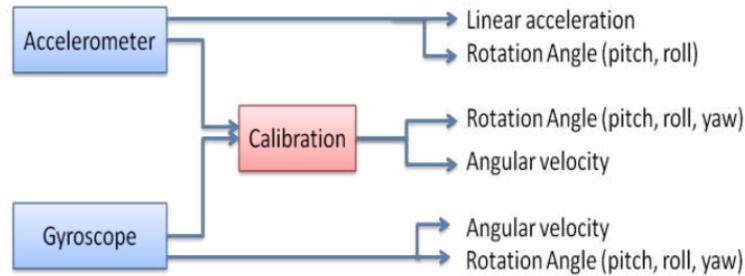
Isso pode ser realizado através da utilização de um algoritmo de fusão de sensores que interligam em determinada proporção os dois componentes que serão descritos na próxima subseção.

Figura 10 – Sensor IMU



Fonte: <https://cmk.com.br>

Figura 11 – Princípio de funcionamento Giroscópio x Acelerômetro



Fonte: retirado de <https://cmk.com.br>

2.2.2.1 Acelerômetro

Segundo (NUSSENZVEIG, 2013), os sensores de movimento são feitos para aferir taxa de variação de posição em relação ao tempo, ou seja, o deslocamento que estiver ocorrendo dentro de um determinado intervalo de tempo. Assim, se a posição $x(t)$ de um corpo varia ao longo do tempo, então será obtida sua velocidade, $v(t)$, derivando essa mudança de posição ao longo do tempo como mostra a Equação (2.1). Para encontrar a aceleração do corpo, basta derivar novamente $v(t)$. A Equação (2.2) mostra que ao derivar a variação de velocidade ao longo do tempo será calculada a aceleração $a(t)$ do corpo (NUSSENZVEIG, 2013)

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \tag{2.1}$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \tag{2.2}$$

Para encontrar os valores de velocidade e posição, basta fazer a operação da derivada inversa (integração) dos dados do sensor acelerômetro recebidos em $a(t)$ segundo as

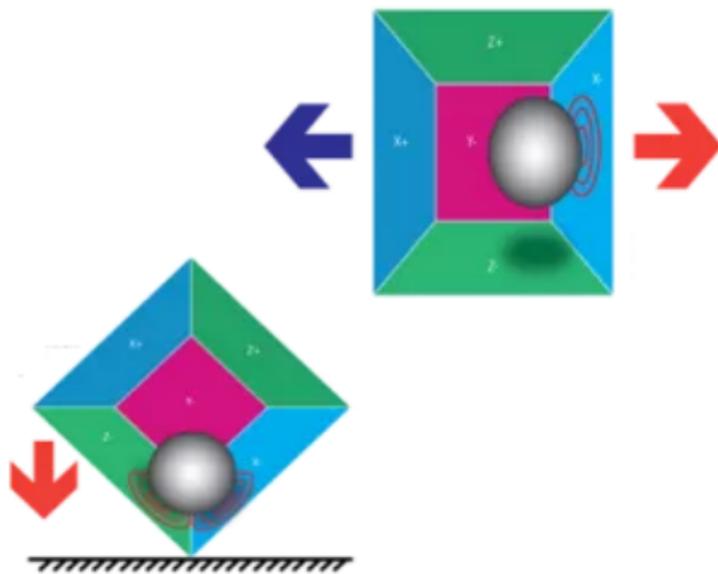
equações 2.3 e 2.4 (NUSSENZVEIG, 2013).

$$v(t) = v(0) + \int_0^1 (a(t)dt) \quad (2.3)$$

$$x(t) = x(0) + \int_0^1 (v(t)dt) \quad (2.4)$$

Acelerômetros são amplamente utilizados em diversas áreas, incluindo navegação, indústrias, automotivas, monitoramento de máquinas, desenvolvimento de jogos computacionais, equipamentos médicos, dentre outras. Existem diversos processos físicos utilizados para desenvolver um sensor capaz de medir a aceleração. Em aplicações relacionadas à aviação, aviões e satélites, os acelerômetros são baseados em propriedades de massas rotativas. Já na indústria, o design mais comum é obtido a partir da combinação da Lei de Newton de aceleração de massa e da Lei de Hooke de ação de mola (CARNEIRO, 2003).

Figura 12 – Princípio de funcionamento acelerômetro



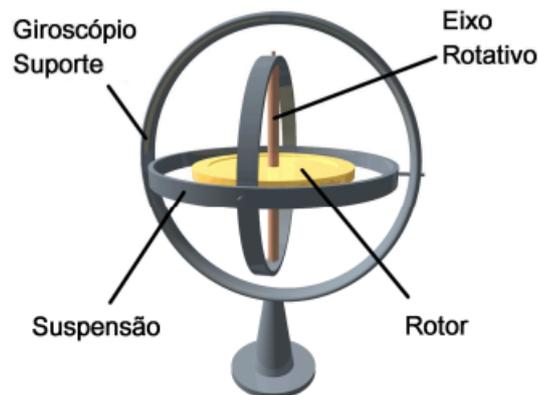
Fonte: SANJEEV, 2018

Existem aqueles que funcionam a partir do efeito de cristais piezoelétricos, cujo princípio consiste na geração de uma corrente elétrica pelo cristal como resposta a uma pressão mecânica. Então, o acelerômetro funciona conforme ilustrado na Figura 12, como uma pequena caixa com uma esfera em seu interior, e as paredes são os cristais piezoelétricos. Sempre que a posição da caixa é alterada, a esfera é forçada a se mover em direção de uma das paredes devido a força da gravidade ou de qualquer outra força de aceleração em outro sentido que não a normal. Cada par de paredes paralelas correspondem a um eixo no espaço. Assim, a partir da corrente gerada em cada parede é possível determinar a direção do movimento acelerado e sua magnitude (ALAMAR, 2018).

2.2.2.2 Giroscópio

Assim como os acelerômetros, os giroscópios são sensores de movimento, porém eles não medem a aceleração linear como os acelerômetros, mas sim à velocidade angular entorno de um eixo. Os giroscópios tipo MEMS, utilizam o princípio do efeito Coriolis para seu funcionamento, no qual um objeto que se encontra em um movimento de rotação imprime na massa um deslocamento ortogonal com relação à direção de rotação. O princípio de funcionamento dos giroscópios é mais complexo do que o dos acelerômetros. Este é um dos motivos que dificultam a implementação dos giroscópios fizeram que eles demorassem mais a surgir como dispositivos MEMS (ALMEIDA, 2014). A Figura 13 ilustra um giroscópio mecânico criado por Jean Bernard Léon Foucault em 1852 (MCGINNIS, 2002a)

Figura 13 – Giroscópio



Fonte: N.C. Perkins, 2007

Segundo Coriolis, ao acontecer uma rotação, a força exercida (Força de Coriolis) gera uma vibração ortogonal ao sentido de cada massa. Sendo assim, a amplitude desse movimento pode ser medida de forma capacitiva. O físico também detectou que a utilização de dois giroscópios na mesma direção e em sentidos opostos aumentam a precisão da medição. Com a medida da força de Coriolis F_c , a medida das massas paralelas m , movendo-se a uma determinada velocidade v , com relação a um referencial fixo que possua uma velocidade angular w (rad/s) é possível obter a aceleração de Coriolis a_c como mostram as Equações 2.8 e 2.9 (FORHAN, 2010).

$$F_c = 2mvw \quad (2.5)$$

$$a_c = 2vw \quad (2.6)$$

Com aceleração de Coriolis, que é obtido pelo sensor, a unidade de processamento do sensor é capaz de calcular a velocidade angular em rad/s . Com a velocidade angular em

relação a cada eixo do espaço tridimensional sendo obtida, é possível encontrar a posição angular do sensor e do objeto, ou corpo, em que ele estiver acoplado (MCGINNIS, 2002a). Então, com o intuito de converter o valor obtido para o sistema internacional de unidade SI, tem-se as Equações (2.7), (2.8), (2.9) e (2.10):

$$1\pi rad = 180^\circ, \quad (2.7)$$

$$1\pi rad/s = 180^\circ/s, \quad (2.8)$$

$$\frac{\pi}{180} rad/s = \frac{180^\circ}{180} /s, \quad (2.9)$$

$$\frac{\pi}{180} rad/s = 1^\circ/s, \quad (2.10)$$

A combinação do sistema giroscópio e acelerômetro, permite que sejam efetuadas medições nas três dimensões ortogonais. Sendo assim, cabe ressaltar que a IMU por si só mede apenas uma altitude, em relação à direção da gravidade. As proporções de leitura de sinais para o acelerômetro e giroscópio serão mais aprofundados no capítulo 3 deste mesmo trabalho. Assim, pode-se definir que o sistema IMU é um sistema que possibilita o sensoriamento triaxial (NUSSENZVEIG, 2013).

3 Metodologia

Com o objetivo de desenvolver um projeto com baixo custo financeiro e alta resolução angular, em comparação aos sistemas disponíveis no mercado, optou-se pela utilização de componentes eletrônicos amplamente conhecidos e uma linguagem de programação simples para o tratamento dos dados adquiridos. Dessa forma, pretende-se atenuar eventuais ruídos e valorizar as informações relevantes, visando à obtenção de resultados mais precisos e confiáveis.

3.1 Componentes Eletrônicos

3.1.1 Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos ITG/ MPU GY-521

Neste trabalho, utilizou-se um MPU (InvenSense Inc., modelo GY-521), abundante no comércio, o MPU GY-521 (apresentado na Figura 14) realiza a medição de orientação com sensores inerciais, contendo, em um único chip, um acelerômetro e um giroscópio.

Sendo ambos sistemas microeletromecânicos (MEMS) e de 3 eixos, por consequência, esse conjunto permite ao todo 6 *degrees of freedom* (6DOF). Além disso, esta placa possui sensor de temperatura embutido no CI MPU6050, permitindo medições entre -40 e +85 °C. A precisão do MPU GY-521 para a aplicação desenvolvida permite que o projeto tenha precisão, devido ao conversor analógico digital de 16-bits para cada eixo, tornando possível a coleta simultânea. A Tabela 1 apresenta os dados referentes ao acelerômetro.

Figura 14 – MPU GY-521

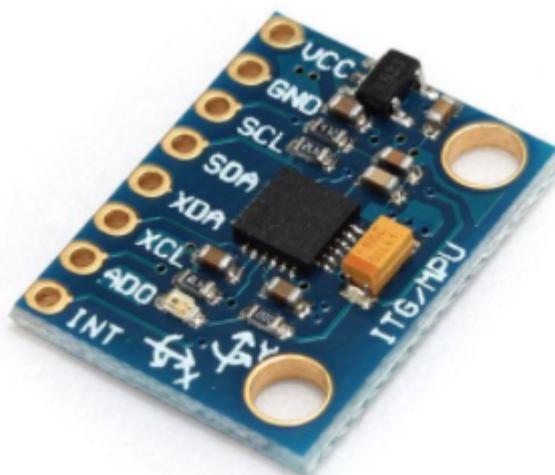


Tabela 1 – Tabela com Informações de Operação do MPU GY-521

Dados	Valores
Tensão de Operação	3 a 5 V
Conversor AD	16 bits
Protocolo de Comunicação	I2C
Faixa do Giroscópio	$\pm 250^\circ$, $\pm 500^\circ$, $\pm 1000^\circ$, $\pm 2000^\circ$ /s
Faixa do Acelerômetro	± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 g

3.1.2 Amel - ATMEGA328P-PU

O ATmega328P-PU (apresentado na Figura 15) é um microcontrolador Arduino programável em linguagem C, que trabalha com altas velocidades de processamento. Este microcontrolador tem um preço base de R\$ 28,00.

Figura 15 – ATMEGA328P-PU



Fonte: www.eletrogate.com/microcontrolador-atmel-atmega328p

O microcontrolador é o responsável por comunicar e processar os dados do acelerômetro. Além disso, tem a função de realizar a análise e eliminação dos ruídos presentes nos sinais dos sensores acelerômetro e giroscópio por meio da filtragem digital.

Tabela 2 – Tabela com Informações de Operação do ATMEGA328P-PU

Dados	Valores
Tensão de Operação	1,8 a 5 V
Pinos PWM	6
Pinos Analógicos	6
Memória Flash	32 KB
Memória EEPROM	1 KB
Clock	Até 20 MHz

3.1.3 Módulo Wi-fi - ESP8266 ESP-07

Para posterior envio das informações do inclinômetro ao centro de controle operacional (CCO), foi usado o Módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-12E para conectar o equipamento à redes de dados sem fio, onde é possível trocar informações entre os microcontroladores, sensores ou até mesmo enviá-las a um *smartphone*. Este módulo Wi-Fi tem um custo de R\$32,90.

Figura 16 – Módulo de comunicação wifi



Fonte: <https://bityli.com/74JXp>

O Módulo ESP8266 ESP-12E WiFi é um componente eletrônico altamente tecnológico, desenvolvido especialmente para conectar projetos robóticos ou de automação residencial à Rede Mundial de Computadores (Internet), com maior facilidade e baixo custo.

Tabela 3 – Tabela com Informações de Operação do ESP8266 ESP-07

Dados	Valores
Módulo Wireless	ESP8266 ESP-12F
Wireless padrão	802.11 b/g/n
Protocolo	TCP/IP embutido
Tensão de operação	3,3V
Taxa de transferência	110-460800bps
Contém	Conversor analógico digital (ADC)

3.1.4 Módulo Display 128X64 I2C SSD1306 12864

O display 128X64 I2C SSD1306, assim como o módulo wi-fi, devem compor a unidade remota do equipamento. Sendo ela a responsável pelo gestor de operações setar

os parâmetros de limite de operação da ponte rolante (ângulos máximos), e comunicar os sinais encontrados com o CCO. Este display de 0,96 polegas tem o módulo de exibição OLED com comunicação para Arduino, que é exatamente o microcontrolador usado neste projeto.

Figura 17 – Módulo Display OLED



Fonte: www.mouser.com

Este módulo de exibição de OLED para Arduino suporta diferentes chips de controle, como Arduino, série 51, série Osmo, stm32/2, etc. Com um consumo de energia máximo de 0,08W, brilhos ajustáveis e driver/controlador embutido, este display será de grande valia para a composição do equipamento.

Tabela 4 – Tabela com Informações de Operação do ESP8266 ESP-07

Dados	Valores
Interface	I2C
Definição de Pinos	Gnd, VCC, SCL, SDA
Resolução	128x64
Tensão de operação	3V a 5V
Temperatura de trabalho	-30 °C a 70 °C

3.2 Filtro Complementar

Um sistema IMU depende da comunicação e processamento entre o acelerômetro e giroscópio, razão pela qual optou-se por utilizar o filtro complementar, que além de simples implementação também se mostra muito eficiente para este tipo de aplicação (ISLAM MD.SAIFUL ISLAM, 2017).

O filtro complementar realiza a filtragem de dados discretos em um sistema linear, com base nos valores medidos pelo acelerômetro (situações de comportamento estático) e do giroscópio (usado para caracterizar situações dinâmicas) (NETO DOUGLAS GUIMARÃES MACHARET, 2009).

Considerando os valores da velocidade angular obtida através do acelerômetro combinados com giroscópio, é possível realizar a filtragem do sinal com ganho unitário. É importante ressaltar que o acelerômetro está relacionado às baixas frequências, e a integral do sinal de velocidade do giroscópio está relacionada às altas frequências, e logo, a ideia da utilização destes filtros é atenuar o ruído destes sensores (FOXLIN, 1996). Considerando a frequência de variação para a aplicação desenvolvida, é possível determinar o comportamento do filtro considerando a Equação 3.1 para baixas frequências e 3.2 para altas frequências.

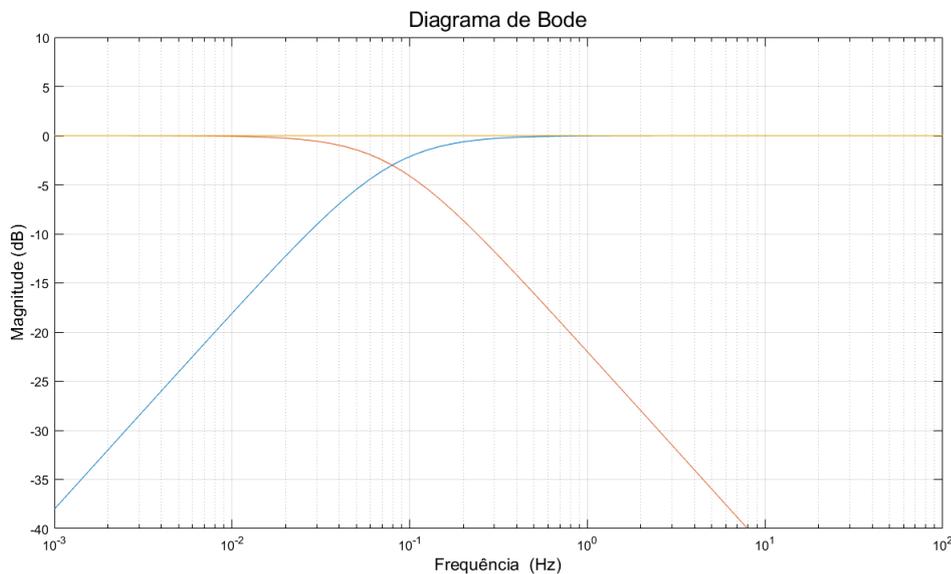
$$LP(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (3.1)$$

$$HP(s) = \frac{s}{s + \omega_c} \quad (3.2)$$

Sendo ω_c a frequência de corte do filtro.

A Figura 18 ilustra a resposta em frequência do filtro passa-alta (linha azul) combinado com o filtro passa-baixa (linha vermelha), sendo possível realizar uma análise gráfica da resposta em frequência do filtro, onde é apresentado na Figura 18 para magnitude.

Figura 18 – Resposta em frequência do filtro complementar (magnitude)



Fonte: Do autor.

3.2.1 Filtro Complementar Aplicado na Computação para Sistemas IMU

O filtro complementar combina os dados de um acelerômetro e um giroscópio para estimar a orientação de um dispositivo. A ideia básica é usar as leituras do acelerômetro

para corrigir a estimativa da orientação fornecida pelo giroscópio. A equação matemática que define o filtro complementar pode ser definida como:

$$\theta = \alpha \times (\theta_{gyro} + d(t) \times \omega_{gyro}) + (1 - \alpha) \times \theta_{accel} \quad (3.3)$$

onde:

- θ é a estimativa da orientação resultante
- θ_{gyro} é a estimativa da orientação fornecida pelo giroscópio
- ω_{gyro} é a velocidade angular medida pelo giroscópio
- θ_{accel} é a estimativa da orientação fornecida pelo acelerômetro
- $d(t)$ é o intervalo de tempo entre duas amostras
- α é um fator de ponderação que determina a contribuição relativa de cada sensor na estimativa da orientação.

Dessa forma, acelerômetro fornece uma estimativa precisa da orientação quando o dispositivo está estável, enquanto o giroscópio fornece uma estimativa precisa da orientação durante as mudanças de movimento. O fator de ponderação α é ajustado para equilibrar essas duas fontes de informação.

O valor típico de α para o filtro complementar é de 0,98 porque isso permite que as estimativas do acelerômetro e do giroscópio sejam equilibradas na solução final. Se α for muito próximo de 1, a estimativa da orientação será dominada pelo giroscópio, o que é inapropriado em situações em que o dispositivo está estável e o acelerômetro fornece uma estimativa mais precisa. Se α for muito próximo de 0, a estimativa da orientação será dominada pelo acelerômetro, o que é inapropriado em situações em que o dispositivo está se movendo rapidamente e o giroscópio fornece uma estimativa mais precisa. Portanto, o valor típico de 0,98 equilibra essas duas fontes de informação de forma adequada para a maioria das aplicações. No entanto, esse valor pode ser ajustado de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação.

Para este trabalho, também serão testados e discutidos, no capítulo de resultados, outros parâmetros de proporção entre o acelerômetro e o giroscópio. Por exemplo, será analisado o sinal proveniente apenas do acelerômetro ($\alpha=0$), a combinação entre os dois sinais ($\alpha =0,98$) e também apenas o sinal proveniente do giroscópio ($\alpha =1,00$).

3.3 Processamento

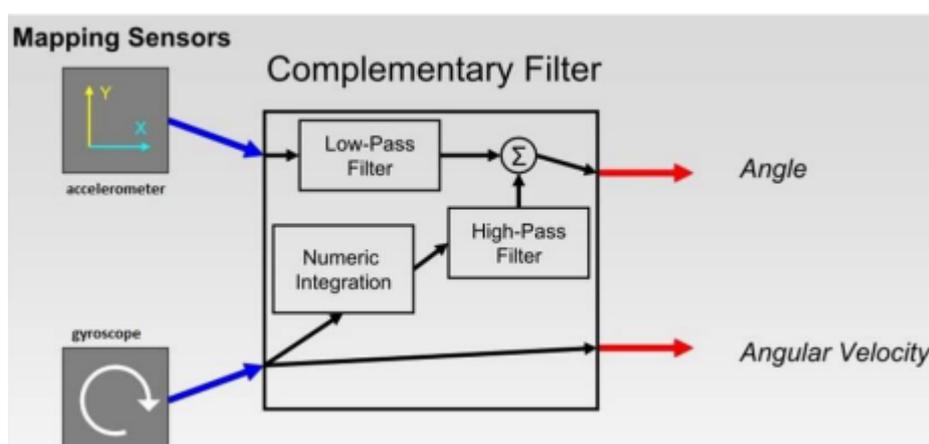
Sabendo que o acelerômetro fornece um bom indicador de orientação em condições estáticas (frequências baixas), e que o giroscópio é um bom indicador de inclinação em

condições dinâmicas (JOUYBARI A. A. ARDALAN, 2017), utilizar ambos para definir o ângulo e a velocidade angular (frequências altas) se torna essencial para um processo real de baixo custo. Portanto, a ideia é passar os sinais do acelerômetro por um filtro passa-baixas e os sinais do giroscópio por um filtro passa-altas, e combiná-los para dar a taxa final, a fim de atenuar os ruídos do sistema.

No projeto aqui desenvolvido, os dados do acelerômetro são combinados com o giroscópio para o mesmo propósito, que é obter a altitude do objeto que será carregado pela Ponte Rolante. O giroscópio pode fazer isso integrando a velocidade angular em um intervalo de tempo. Através dessa manipulação matemática, e combinando com a posição de vetor gravidade obtida pelo acelerômetro, torna-se possível realizar a medição desejada, considerando a tangente formada.

A Figura 19 ilustra a combinação de todos os sinais adquiridos e os sinais obtidos através da combinação do giroscópio, acelerômetro e filtro complementar.

Figura 19 – Resposta Filtro Complementar



Fonte: Jouybari A. A. Ardalan (2017)

A ideia por trás do filtro complementar implementado no microcontrolador é, através de sinais das medidas de movimento lento do acelerômetro, e sinais de movimento rápido de um giroscópio, combiná-los. Ao conjugar os filtros, o ganho do sinal medido final será unitário e, na frequência onde ocorre o efeito não desejado, o mesmo realizará a atenuação.

3.3.1 Observações de Processamento ao Trabalhar com Sistemas IMU

Neste tópico, será discutido os itens mais importantes a serem considerados ao processar os dados dos sensores de acelerômetro e giroscópio para aplicações de inclinômetro (OBERLANDER, 2015).

1. Calibração dos sensores:

A calibração dos sensores é uma das etapas mais importantes ao processar os dados dos sensores de acelerômetro e giroscópio. Isso envolve comparar as leituras dos sensores com valores conhecidos de orientação ou força gravitacional, por exemplo, e ajustar as leituras conforme necessário. A calibração é crucial para garantir a precisão das estimativas da orientação do objeto.

2. Filtragem de interferências:

As fontes de interferência, como vibrações ou mudanças na temperatura, podem afetar significativamente as leituras dos sensores. É necessário considerar essas interferências e utilizar técnicas de filtragem para minimizar seus efeitos. Uma técnica comum é o filtro complementar, que combina as leituras dos dois sensores de forma a minimizar os erros na estimativa da orientação.

3. Ajuste da taxa de amostragem:

A taxa de amostragem dos sensores deve ser ajustada de forma adequada para garantir que sejam capturadas as variações de orientação do objeto, sem causar sobrecarga no processamento dos dados. A taxa de amostragem ideal deve ser baseada no uso específico da aplicação de inclinômetro. É importante lembrar que uma taxa de amostragem muito baixa pode resultar em uma estimativa da orientação imprecisa, enquanto uma taxa de amostragem muito alta pode causar sobrecarga no processamento, para este trabalho a taxa de amostragem definida foi de 150 amostras.

4. Avaliação constante das medidas:

Por fim, é importante avaliar continuamente as leituras dos sensores e ajustar os parâmetros de processamento conforme necessário para garantir a precisão das medidas. Isso inclui verificar se as leituras dos sensores estão de acordo com as expectativas e corrigir quaisquer desvios.

Em conclusão, esses são os itens mais importantes a serem considerados ao processar os dados dos sensores de acelerômetro e giroscópio para aplicações de inclinômetro. A calibração dos sensores, a seleção da taxa de amostragem adequada, a aplicação de filtros complementares, a sincronização dos dados e a validação constante das medidas são todos aspectos críticos que precisam ser cuidadosamente gerenciados para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados gerados pelos inclinômetros. Ao levar em consideração esses fatores, é possível garantir resultados precisos e confiáveis em aplicações que dependem de medidas precisas de inclinação.

3.3.2 Combinação de Proporções entre Acelerômetro e Giroscópio

A combinação de dados de acelerômetros e giroscópios é uma técnica amplamente utilizada para estimar a orientação de dispositivos móveis, como *smartphones*, drones e sensores embarcados. A combinação desses dois tipos de sensores permite a obtenção de uma estimativa precisa da orientação, compensando as limitações de cada um individualmente.

Os acelerômetros medem a aceleração linear de um objeto e são mais precisos em situações em que o dispositivo está estável. Por outro lado, os giroscópios medem a velocidade angular de um objeto e são mais precisos em situações em que o dispositivo está se movendo rapidamente. Para combinar essas duas fontes de informação, é usado o filtro complementar descrito na sub-seção 3.2.

O valor típico de α de 0,98 é utilizado em filtros complementares para equilibrar as estimativas dos sinais de acelerômetro e giroscópio na solução final. Esse valor atribui ao sinal captado pelo giroscópio 98% de peso na solução, enquanto apenas 0,02% são destinados ao sinal do acelerômetro para correção. Embora esses valores possam ser ajustados de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação, para inclinômetros dinâmicos, a proporção mencionada acima é considerada a mais adequada.

Quanto às frequências de aquisição, geralmente os giroscópios possuem frequências mais altas do que os acelerômetros. Isso ocorre porque o giroscópio mede a velocidade angular de um objeto, o que requer amostragem mais alta para obter uma boa estimativa da orientação. Já o acelerômetro mede a aceleração linear de um objeto, o que requer uma amostragem mais baixa. A frequência de amostragem ideal para cada sensor depende das especificidades da aplicação, como a velocidade de rotação esperada e a precisão da estimativa da orientação desejada.

No filtro complementar, a soma das medidas angulares do giroscópio e do acelerômetro é realizada utilizando uma base de tempo comum para ambas as leituras. Isso significa que é necessário sincronizar as leituras dos sensores de modo que as leituras correspondentes no tempo possam ser combinadas corretamente (SANTOS C. P.; VIEIRA, 2016).

Se as amostras dos sensores acelerômetro e giroscópio estiverem sendo coletadas com frequências diferentes, é necessário interpolar os dados para que eles estejam na mesma base de tempo antes de combiná-los no filtro complementar. Por exemplo, se o acelerômetro estiver sendo amostrado a uma frequência de 100 Hz e o giroscópio a uma frequência de 200 Hz, será necessário interpolar os dados do acelerômetro para uma frequência de 200 Hz antes de combiná-los com os dados do giroscópio no filtro complementar (MCGINNIS, 2002b).

Para garantir que as medidas angulares sejam combinadas corretamente, é importante que a base de tempo utilizada no filtro complementar seja consistente com a base de tempo utilizada na amostragem dos sensores. Após a combinação dos dados, a resposta

é calculada com base em uma média de 150 amostras coletadas pela combinação dos sensores para obter um resultado mais consistente com a taxa de amostragem utilizada.

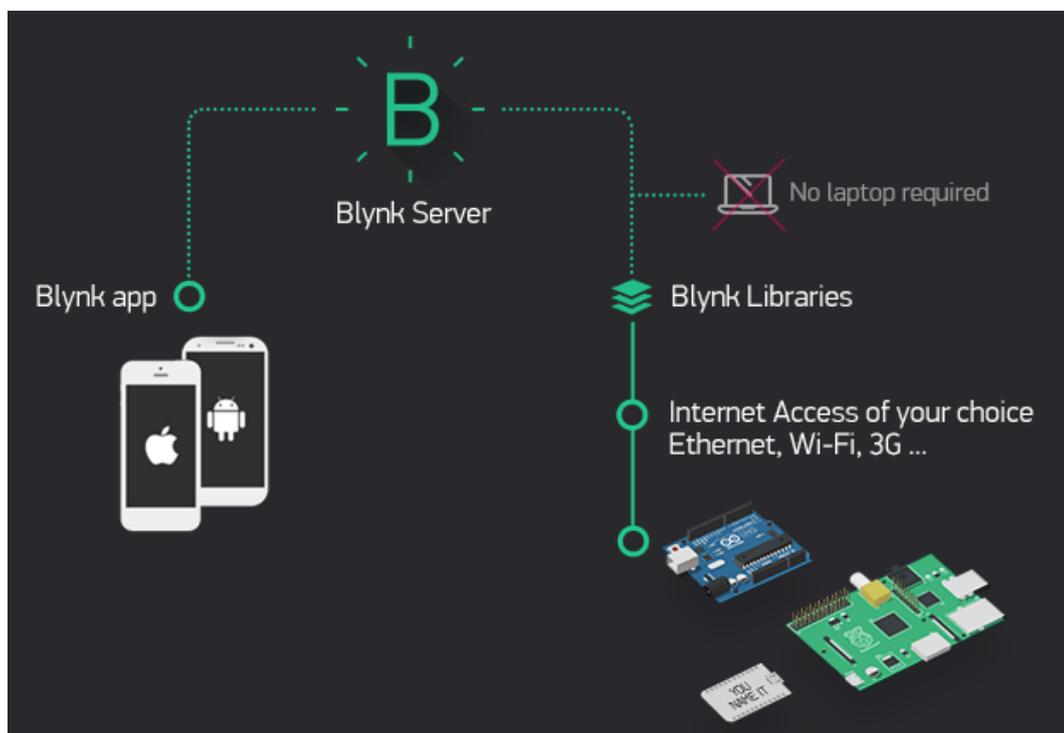
3.4 Sistema Supervisor Interface Remota

O equipamento desenvolvido conta com um sistema supervisor para comunicação com o microcontrolador de forma remota baseado na aplicação *blynk*. Esta aplicação permite que sejam construídas interfaces capazes de controlar e monitorar um *hardware* remotamente de forma rápida e intuitiva, e operam em sistemas para plataformas Android e iOS.

O aplicativo permite a interação direta do usuário com o hardware remoto, fornecendo uma interface fácil de usar e configurável. O servidor é responsável por todas as comunicações entre o aplicativo e o hardware, armazenando e processando os dados coletados pelo hardware através da plataforma *cloud Blynk*. Esta plataforma também oferece acesso aos dados através de uma Interface de Programação de Aplicação (API) e protocolos http.

A arquitetura *Blynk* também conta com um sistema supervisor para comunicação com o microcontrolador remotamente, oferecendo uma ampla gama de possibilidades para o usuário. A arquitetura *Blynk* pode ser ilustrada na Figura 20 abaixo:

Figura 20 – Arquitetura Blynk



Fonte: <https://blynk.io/>

Principais recursos fornecidos pela plataforma são:

- API e interface do usuário semelhantes para todos os hardwares e dispositivos compatíveis.
- Conexão com a nuvem usando Wi-fi, Bluetooth, Ethernet e USB (série).
- Fácil de integrar e adicionar novas funcionalidades usando pinos virtuais.
- Conjunto de *widgets* fáceis de usar.
- Monitoramento de dados históricos via widget SuperChart.
- Comunicação dispositivo a dispositivo usando Bridge Widget.
- Possibilidade de alertas através de envio de e-mails, tweets, notificações push, etc.

Esta plataforma permite que um alerta dinâmico por e-mail seja enviado caso a inclinação medida seja maior do que o limite setado do processo. Podendo assim, ser extremamente útil para supervisão no processo de operação.

3.5 Testes de Precisão do Acelerômetro e Giroscópio

Este teste tem como objetivo avaliar a precisão da medida de inclinação, obtida por meio do inclinômetro de acordo com os componentes e softwares descritos neste trabalho. Para isto, houve inicialmente toda a montagem do Hardware, bem como a programação do Arduíno para a leitura e processamento de dados do acelerômetro/giroscópio. Os resultados serão discutidos no Capítulo 4.

Neste experimento foi definido que seriam medidas as inclinações dos eixos X e Y através do inclinômetro para os seguintes ângulos: 0 °, 2 °, 4 °, 6 °, 8 °, 30 °, 45 ° e 60 °.

Para isso, a primeira etapa é a construção de um sistema simples e prático para os testes. Foi utilizado o Anel graduado giratório para fresadora 0° a 360° para calibração e comparação entre as medidas fornecidas pelo equipamento. Este instrumento pode ser visto na figura 21:

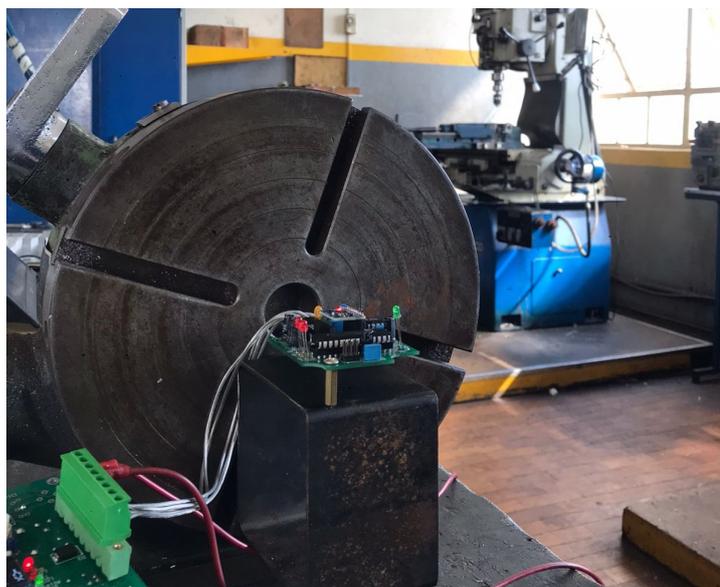
Figura 21 – Anel graduado giratório



Fonte: Do autor.

Sendo assim, com o sistema montado de acordo com a Figura 22, foi feita a calibração do sensor na referência de ângulo zero, através da função *void exCommand(char cmd)*. Um dos principais pontos de atenção, durante a montagem do aparelho para calibração dos eixos, foi centralizar o sensor acelerômetro/giroscópio no centro de rotação do anel graduado, que podem ser vistos nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Centralização do sensor no eixo X



Fonte: Do autor.

Figura 23 – Centralização do sensor no eixo Y



Fonte: Do autor.

Após este sistema ser calibrado em zero e alinhado, tem-se então o início das

variações das angulações. O primeiro teste de erro foi medido com ângulo de 2° para o eixo X, Figura 24.

Figura 24 – Teste inicial Eixo X a 2° .



Fonte: Do autor.

Após a medição para o eixo X, foi medido para o ângulo de 2° o eixo Y, demonstrado na Figura 25 .

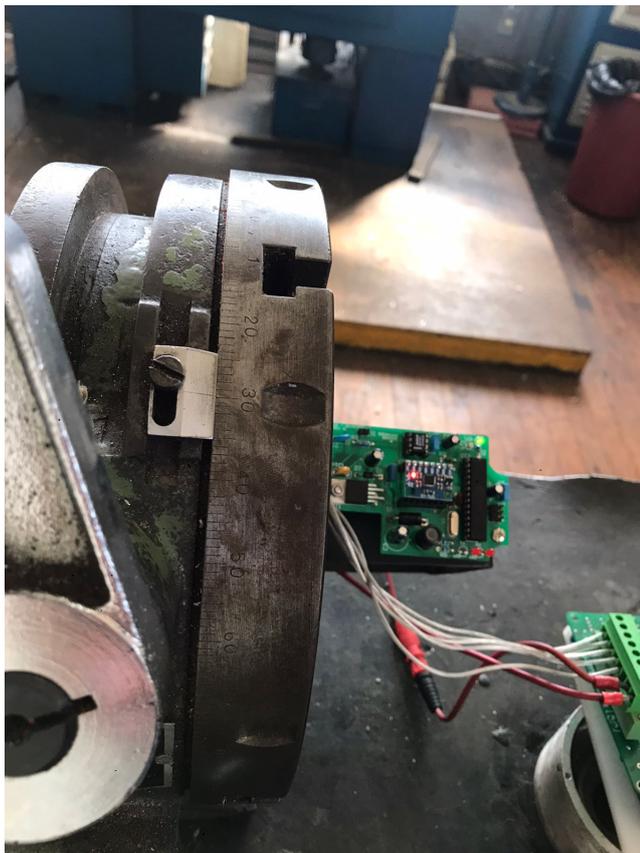
Figura 25 – Teste inicial eixo Y a 2°.



Fonte: Do autor.

Sendo assim, este mesmo experimento foi realizado para todos os outros demais ângulos citados no início desta sessão. É importante mencionar que os ângulos de oscilações comuns e aceitáveis nos cabos da ponte rolante durante o processo de translação e içamento são até no máximo de 7°. Entretanto, como apresentado nos capítulos anteriores, o inclinômetro tem as suas mais diversas aplicações no mercado, e logo, foi sugerido que este trabalho também abordasse a funcionalidade do sensor em inclinações superiores a 7°. Para isto foi adotada a aferição para ângulos comumente utilizados na geometria, 30°, 45° e 60°. A Figura 26 demonstra a continuidade do processo.

Figura 26 – Sistema de calibração do sensor a 30° eixo X



Fonte: Do autor.

4 Resultados

Através das metodologias abordadas no Capítulo 3, foi possível obter resultados satisfatórios com relação a precisão dos sensores. Segundo análises das Tabelas 5 e Tabela 6, pode ser observado a precisão dos sensores com relação ao giro real do anel.

É válido considerar que durante as modificações de posição da angulação do giro do anel é possível que este não esteja alinhado no ponto exato, uma vez que sua medição angular é de precisão de apenas 1° , deixando assim, parte da medição de acordo com a sensibilidade de manuseio do operador.

Tabela 5 – Resultados de teste utilizando $\alpha=0,98$

Ânel Gir. Graduado	0°	2°	4°	6°	8°	30°	45°	60°
Ângulo Sensor Eixo X	0,00	2,02	4,05	6,07	8,11	30,82	46,03	61,44
Erro Sensor Eixo X (%)	0,00	1,00	1,25	1,16	1,37	2,73	2,28	2,40
Ângulo Sensor Eixo Y	0,00	2,01	4,03	6,06	8,08	30,98	46,21	61,79
Erro Sensor Eixo y (%)	0,00	0,50	0,75	1,00	1,00	3,26	2,68	2,98

Tabela 6 – Resultados de teste utilizando $\alpha=0$

Ânel Gir. Graduado	0°	2°	4°	6°	8°	30°	45°	60°
Ângulo Sensor Eixo X	0,00	1,90	3,85	6,15	8,23	30,7	46,0	61,64
Erro Sensor Eixo X (%)	0,00	-10,00	3,75	2,53	2,87	2,33	2,22	2,73
Ângulo Sensor Eixo Y	0,00	2,20	4,14	6,25	8,28	30,66	46,10	61,41
Erro Sensor Eixo y (%)	0,00	10,00	3,5	4,16	3,50	2,20	2,44	2,35

Ao analisar os resultados obtidos na Tabela 5, conclui-se que o sensor que combina os sinais do giroscópio e do acelerômetro ($\alpha=0,98$) apresenta, de forma geral, uma boa correspondência entre o ângulo medido e o real, especialmente para os ângulos de menor amplitude, onde o erro máximo é de 1,37%. Isso é especialmente válido para os ângulos próximos ao de calibração/referência, ou seja, 0° . No entanto, é importante destacar a presença de um pequeno erro linear de cerca de $0,024^\circ$ que se acumula à medida que os ângulos variam após a calibração, resultando em um erro de até 3,23% para a medição dos ângulos de maiores amplitudes.

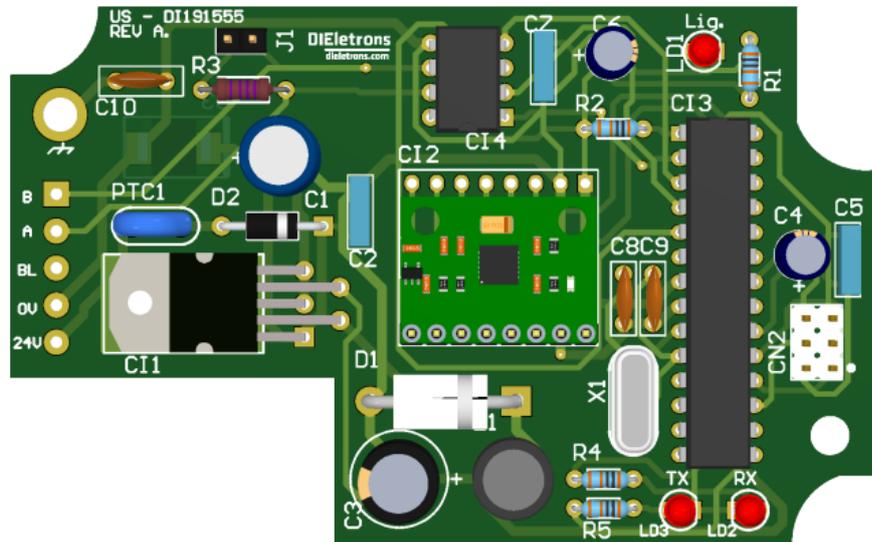
Após a análise dos resultados obtidos por meio da coleta apenas do sinal do acelerômetro ($\alpha=0,98$), conforme apresentado na Tabela 6, constatou-se um índice de erro elevado para pequenas amplitudes de medição angular, podendo chegar a 10%. Entretanto, para medições com amplitudes maiores, esse erro foi consideravelmente reduzido, situando-se na casa dos 2%. Esses dados permitem inferir que o método em questão pode ser considerado como uma alternativa viável para aplicações em que a medição angular envolva amplitudes elevadas.

Utilizando apenas os sinais provenientes do giroscópio com $\alpha = 1$, verificou-se que não foi possível obter resultados precisos, devido à alta instabilidade dos sinais processados e à impossibilidade de calibração do sistema. Essa instabilidade pode ter sido causada pelo processo de média de aquisição dos sinais, que consiste na aplicação de um filtro de baixa frequência em sinais de alta frequência. Essa limitação do método pode ser considerada uma limitação importante a ser superada em estudos futuros, a fim de aprimorar a técnica de medição angular utilizando apenas o giroscópio como sensor.

Como abordado no Capítulo 3, para a medição em pontes rolantes nas quais as variações dentro na normalidade estão em até 7° , este sensor não demonstra muitas preocupações com relação ao erro medido na combinação dos sinais provenientes do acelerômetro e giroscópio ($\alpha = 0,98$). Porém, para outras aplicações em que a amplitude de movimento seja maior, este erro poderá ser prejudicial para o processo. Portanto, esta imprecisão encontrada poderá ser melhor abordada e tratada durante a continuidade deste projeto.

A Placa eletrônica do sensor inclinômetro (Figura 27) desenvolvida durante este trabalho é composta por vários componentes eletrônicos que trabalham juntos para fornecer medições precisas e confiáveis de inclinação e posição. A figura abaixo (Figura 27) ilustra a placa e seus principais componentes, que são descritos em detalhes na Subseção 3.1.1. O microcontrolador ATMEGA328P-PU é o responsável por controlar o funcionamento dos demais componentes e processar os sinais recebidos do sensor de inclinação. O sensor de inclinação MPU GY-521, por sua vez, é responsável por medir a inclinação do objeto em relação à gravidade. Além disso, a placa inclui capacitores e resistores para garantir a estabilidade e o desempenho do circuito eletrônico. Esses componentes trabalham em conjunto para fornecer medições precisas e confiáveis, tornando a placa eletrônica do sensor inclinômetro uma ferramenta valiosa para aplicações que exigem medições precisas de inclinação e posicionamento.

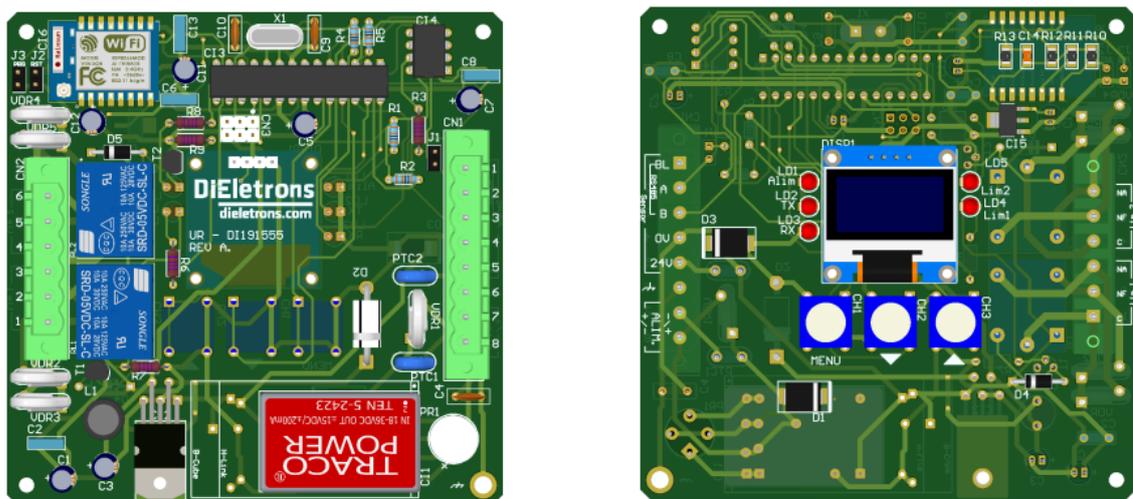
Figura 27 – Placa eletrônica Sensor de Inclinação



Fonte: Do autor.

Para possibilitar a comunicação entre a placa principal, responsável por todo o processo de coleta e processamento de dados, e o operador, foi desenvolvido o controlador remoto ilustrado na Figura 28. Esse dispositivo atua como uma interface para os dados coletados pela placa principal e permite a interação com o operador.

Figura 28 – Módulo de comunicação do Sensor



Fonte: Do autor.

As Figuras 29 e 30 ilustram os resultados das interfaces desenvolvidas para este projeto, exibindo a inclinação dos dois eixos medidos pelo sensor, e também um *Datalogger*

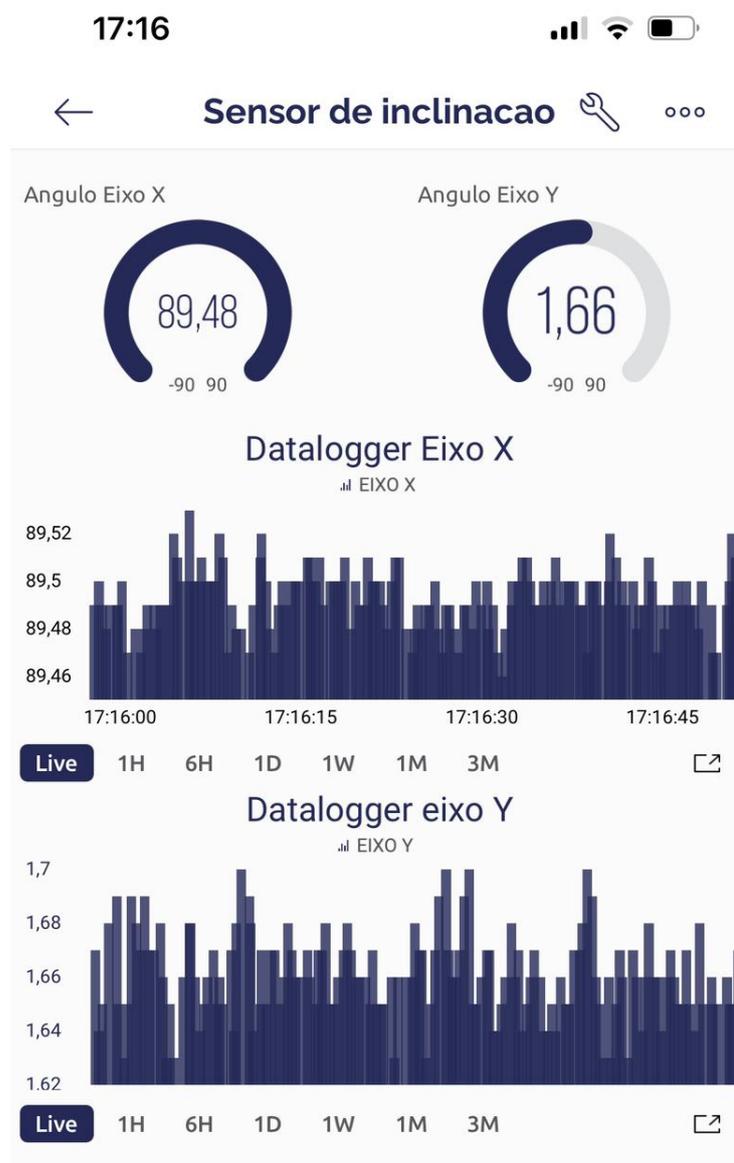
de informações das medições durante um período que pode ser determinado pelo usuário.

Figura 29 – Console Web Blynk Inclinômetro



Fonte: Do autor.

Figura 30 – Interface Aplicativo Supervisório



Fonte: do autor

5 Conclusão

Com base nas análises realizadas, pode-se concluir que o projeto teve um desempenho acima do esperado, apresentando um índice de erros baixo na medição de inclinação dos eixos X e Y. Isso se deve à escolha eficiente dos componentes utilizados, que até o momento não apresentaram nenhum tipo de problema. Além disso, o baixo valor investido é um aspecto positivo que contribui para tornar o equipamento final acessível às indústrias.

Este trabalho demonstra a importância de uma pesquisa cuidadosa e bem planejada na escolha de componentes e na implementação de sistemas. Com um erro máximo de 3,23%, o resultado final foi uma medida precisa e confiável de inclinação, que pode ser utilizada em diversas aplicações industriais. Portanto, é possível afirmar que este projeto foi bem-sucedido e tem potencial para ser aprimorado e aplicado em diferentes setores.

Como trabalhos futuros, podem ser realizados estudos para aprimorar a precisão das medidas de inclinação, como o uso de técnicas de fusão de dados de diferentes sensores, como o magnetômetro, para melhorar a precisão e a robustez do sistema. Além disso, podem ser realizados estudos para expandir a capacidade do sistema, como a medição de inclinações em mais de dois eixos, ou a integração com outros sistemas de controle de movimento, como motores de passo.

Em resumo, este projeto demonstrou que a medição de inclinação é uma aplicação viável e importante para diversas indústrias. Trabalhos futuros podem explorar aprimoramentos que tornem o sistema mais preciso, robusto, expansível e portátil, possibilitando a sua utilização em diferentes áreas, como a robótica, a automação industrial e a navegação, entre outras.

Referências

- ABNT, . Cálculo de equipamentos para levantamento e movimentação de cargas. 07 1984. 7
- AHMAD, N. Reviews on various inertial measurement unit (imu) sensor applications. international journal of signal processing systems. 08 2013. 9, 11
- ALAMAR, S. How to interface arduino and the mpu 6050 sensor. 08 2018. 13
- ALMEIDA, V. M. Sensores inerciais disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/imobilis/sensores-inerciais/>>,. 07 2014. 14
- CARNEIRO, F. M. Levantamento bibliográfico das tecnologias dos acelerômetros comerciais. 2003. acesso em: 05/07/2021. disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/lota-vio/tgs/2003_bibliografiadeacelerometros_tgf_elipecarneiro.pdf> .072003.13
- CHAGAS, C. M. A. Saúde e Segurança no Trabalho no Brasil: Aspectos Institucionais, Sistema de informações e Indicadores. In: IPEA (Ed.). *Saúde e Segurança no Trabalho no Brasil: Aspectos Institucionais, Sistema de informações e Indicadores*. [S.l.]: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2011. p. 233–289. 1
- CNI. *Confederação Nacional da Indústria*. 2019. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/qualidade-de-vida/investimento-em-saude-e-seguranca-no-trabalho-da-retorno-as-empresas/>>. 1
- FELÍCIO, C. M. S. G. F. P. L. M. G. S. S. G. F. S. M. D. C. Confiabilidade Intra e Interexaminadores e Erro da Medição no Uso do Goniômetro e Inclinoômetro Digital . *Biological psychology*, Rev Bras Med. Esporte, v. 7, n. 3, p. 1–6, 2012. 3
- FOXLIN, E. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias kalman filter. 09 1996. 20
- GROTLI, C.; GRAVDAHL, J. Output control of spacecraft in leader follower formation. 07 2008. 2
- ISLAM MD.SAIFUL ISLAM, M.-U.-M. M. H.-E.-H. T. Comparison of complementary and kalman filter based data fusion for attitude heading reference system. 09 2017. 19
- JOUYBARI A. A. ARDALAN, M.-H. R. A. Experimental Comparison Between Mahoney and Complementary Sensor Fusion Algorithm for Attitude Determination by Raw Sensor Data of XSENS IMU On Buoy. *Biological psychology*, The International Archives of the Photogrammetry, v. 7, n. 3, p. 1–6, 2017. 2, 4, 22
- KOLBANL. On. kolban's book on esp8266. [s.l.: s.n.]. p. 436, 07 2016. 1
- MCGINNIS. N. a. e. giroscópios mems. são josé dos campos. p. 421, 07 2002. 14, 15
- MCGINNIS. R. s. advancing applications of imus in sports training and biomechanics). p. 421, 07 2002. 24

NETO DOUGLAS GUIMARÃES MACHARET, V. C. M. F. M. C. A. A. Adaptive complementary filtering algorithm for mobile robot localization. 09 2009. 19

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica: Mecânica. [s.l.]: Blucher. 07 2013. 12, 13, 15

OBERLANDER, K. D. Inertial measurement unit (imu) technology: Inverse kinematics: Joint considerations and the maths for deriving anatomical. tese (doutorado) — university of koblenz-ladau. 07 2015. 22

PASSOS. Técnicas de instalação, operação, manutenção testes e inspeção: pontes rolantes, guindastes giratórios e acessórios de movimentação de cargas. 07 2011. 7

PRIME. An introduction to mems (micro-electromechanical systems). technology watch,. 07 2002. 9, 11

SANTOS C. P.; VIEIRA, M. E. M. J. S. L. S. Sea-seminário de eletrônica e automação, sea-seminário de eletrônica e automação. 07 2016. 24

TAMASAUSKAS, A. Máquinas de elevação e transporte de cargas, material didático de apoio da disciplina máquinas de elevação e transporte de cargas. 07 1994. 7

TECHNOLOGY, V. *About Company*. 2021. Disponível em: <<https://www.vigordigital.com/applications/106.html>>. 3

TST. *About Company*. 2021. Disponível em: <<https://www.tst.jus.br/saude-e-seguranca-do-trabalho>>. 1

WANG P., L. Q. . F. Z. Evolutionary design optimization of mems: a review of its history and state-of-the-art. 07 2019. 11

ZHOU, L. et al. How we found our imu: Guidelines to imu selection and a comparison of seven imus for pervasive healthcare applications. *Sensors*, v. 20, n. 15, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/15/4090>>. 11

6 Apêndices

6.1 Apêndice A - Algoritmo Microcontrolador

```

#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <EEPROM.h>
#include "MPU6050.h"
MPU6050 accelgyro; // sensor acelerometro // nome do CI accelgyro
#include <TimerOne.h>

// bibliotecas MPU ( é o sensor)

void CarregaROM(); // memoria de calibração do próprio inclinometro
// que pode ser feita no instrumento

//Gain of Proportional and integral
int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;
#define G_GAIN 0.00875
#define AA 0.98

//Variables for MPU work integral valuer
float accelx, acely, accelz, rate_gyr_x,
rate_gyr_y, rate_gyr_z, gyroXangle, gyroYangle, gyroZangle;
// giroscópio: mede a velocidade de rotação do eixo
// velocidade angular // aceleração
float AccXangle, AccYangle, AccZangle, CFangleX,
CFangleY, CFangleZ;
//flange quantos graus esta deslocado da superficie (final do calculo)
float const_calibx = 16071.82;
float const_caliby = 16071.82;
float const_calibz = 16071.82;
float calX, calY, calZ;
float Lim1Y, Lim2Y, Lim1Z, Lim2Z, HistY, HistZ;

```

```
float const_gravid = 9.81; //força g
const int MPU=0x68; // endereço comunicação i2c
unsigned long pT = 0; // contador para determinar tempo de inicialização

//Variables for absolute angle
float mCFangleX = 0;
float mCFangleY = 0;
float mCFangleZ = 0;
char command = 'N';

void setup()
{
  Wire.begin();
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(MPU);
  Wire.write(0x6B);
  Serial.begin(9600);

  //Inicializa o MPU-6050
  Wire.write(0);
  Wire.endTransmission(true);
  pinMode(A0, INPUT); // Sensor de Preset
  CarregaROM();
}

//This function will write a 4 byte (16bit) long to the eeprom at
//the specified address to address + 1.
//This function will write a 4 byte (32bit) long to the eeprom at
//the specified address to address + 3.
void EEPROMWritelong(int address, long value)
{
  //Decomposition from a long to 4 bytes by using bitshift.
  //One = Most significant -> Four = Least significant byte
  byte four = (value & 0xFF);
  byte three = ((value >> 8) & 0xFF);
  byte two = ((value >> 16) & 0xFF);
  byte one = ((value >> 24) & 0xFF);

  //Write the 4 bytes into the eeprom memory.
```

```
EEPROM.write(address, four);
EEPROM.write(address + 1, three);
EEPROM.write(address + 2, two);
EEPROM.write(address + 3, one);
}

long EEPROMReadlong(long address)
{
    //Read the 4 bytes from the eeprom memory.
    long four = EEPROM.read(address);
    long three = EEPROM.read(address + 1);
    long two = EEPROM.read(address + 2);
    long one = EEPROM.read(address + 3);

    //Return the recomposed long by using bitshift.
    return ((four << 0) & 0xFF) + ((three << 8) & 0xFFFF) + ((two << 16) & 0xFFFFFFF);
}

void EEPROMWrite16(int address, int16_t value)
{
    //Decomposition from a long to 2 bytes by using bitshift.
    //One = Most significant -> two = Least significant byte
    byte two = (value & 0xFF);
    byte one = ((value >> 8) & 0xFF);

    //Write the 2 bytes into the eeprom memory.
    EEPROM.write(address, two);
    EEPROM.write(address + 1, one);
}

int16_t EEPROMRead16(long address)
{
    //Read the 2 bytes from the eeprom memory.
    int16_t two = EEPROM.read(address);
    int16_t one = EEPROM.read(address + 1);

    //Return the recomposed long by using bitshift.
    return ((two << 0) & 0xFF) + ((one << 8) & 0xFFFF);
}
```

```
}

void get_angle()
{
    int med = 150; // valor da media/ do filtro
    for (int i=0;i<med;i++)
    {
        unsigned long cT = micros(); // contar tempo de loop

        // obtem valores brutos dos sensores
        accelgyro.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);

        unsigned long dT = cT - pT;
        pT = cT;

        acelx = ax * const_gravid / const_calibx;
        acely = ay * const_gravid / const_caliby;
        acelz = az * const_gravid / const_calibz;

        // Converte valor do acelerometro com base nos 3 eixos
        AccXangle = (atan2(ax, sqrt(pow(ay,2) + pow(az,2)))*180) / 3.14;
        AccYangle = (atan2(ay, sqrt(pow(ax,2) + pow(az,2)))*180) / 3.14;
        AccZangle = (atan2(az, sqrt(pow(ax,2) + pow(ay,2)))*180) / 3.14;

        // Converte valor do giro em graus por seg
        // multiplicando uma contante relacionada à taxa de amostragem do sensor
        // nesse caso, a taxa é +-250g -> 0.00 vide datasheet
        rate_gyr_x = gx*G_GAIN;
        rate_gyr_y = gy*G_GAIN;
        rate_gyr_z = gz*G_GAIN;

        // Calcula a distância percorrida por integração simples
        // com base no tempo de loop (dT = cT - pT)
        gyroXangle+=rate_gyr_x*dT;
        gyroYangle+=rate_gyr_y*dT;
        gyroZangle+=rate_gyr_z*dT;

        // Fusão dos dados: giro + accel
        // Métodos: filtro complementar ou filtro de kalman
    }
}
```

```

// Eficiencia bastante satisfatoria, segundo teoria
// Atribui peso de 0.98 ao valor do giro e 0.02 ao acelerometro
// Acelerômetro, por outro lado, é muito ruidoso, mas o desvio é zero.

//condigo do filtro!!!
CFangleX=AA*(CFangleX+rate_gyr_x*(dT/1000000)) +(1 - AA) * AccXangle;
CFangleY=AA*(CFangleY+rate_gyr_y*(dT/1000000)) +(1 - AA) * AccYangle;
CFangleZ=AA*(CFangleZ+rate_gyr_z*(dT/1000000)) +(1 - AA) * AccZangle;
mCFangleX += CFangleX;
mCFangleY += CFangleY;
mCFangleZ += CFangleZ;
}
mCFangleX = (mCFangleX/med)+calX;
mCFangleY = (mCFangleY/med)+calY;
mCFangleZ = (mCFangleZ/med)+calZ;
}

void send_angle()
{
Serial.println('x'+(String)mCFangleZ+' '+'y'+(String)mCFangleY);
//Serial.println(mCFangleZ);
//Serial.readBytesUntil
//Serial.println('y'+(String)mCFangleY);
//Serial.println(mCFangleY);
}

void CarregarROM()
{
calX = ((float)EEPROMReadlong(0))/10;
calY = ((float)EEPROMReadlong(4))/10;
calZ = ((float)EEPROMReadlong(8))/10;
}

void calibra_zero()
{
calZ = -(mCFangleZ-calZ);
calY = -(mCFangleY-calY);
int romZ = (long)((calZ*10));
int romY = (long)((calY*10));
}

```

```
    EEPROMWritelong(8,romZ);
    EEPROMWritelong(4,romY);
    CarregaROM();
}

void exCommand(char cmd)
{
    if (cmd == 'C')
        calibra_zero();
    command = 'N';
}

void loop()
{
    get_angle();
    send_angle();
    if(Serial.available()>0)    //Checks is there any data in buffer
    {
        command = Serial.read(); //Read serial data
        //byte and send back to serial monitor
    }
    exCommand(command);
}
```