

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR MURILO KOSTYCHA

**ESTUDO DE VIABILIDADE: DESENVOLVIMENTO INCLINÔMETRO IN-PLACE
DE CUSTO REDUZIDO**

CURITIBA

2022

VICTOR MURILO KOSTYCHA

**ESTUDO DE VIABILIDADE: DESENVOLVIMENTO INCLINÔMETRO IN-PLACE
DE CUSTO REDUZIDO**

**FEASIBILITY STUDY: LOW-COST IN-PLACE INCLINOMETER
DEVELOPMENT**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletônica do Curso de Bacharelado em Engenharia Eletônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Hermes Irineu del Monego

Coorientador: Bruno Sens Chang

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VICTOR MURILO KOSTYCHA

**ESTUDO DE VIABILIDADE: DESENVOLVIMENTO INCLINÔMETRO IN-PLACE
DE CUSTO REDUZIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletônica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Eletônica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná.

Data de aprovação: 27/Junho/2022

Hermes Irineu Del Monego
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Bruno Sens Chang
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme Peron
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Kleber Kendy Horikawa Nabas
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2022**

AGRADECIMENTOS

É impossível prestar, nesses poucos parágrafos, os devidos agradecimentos a todos que tiveram importância nessa longa caminhada.

Agradeço a todos os tutores que me guiaram durante essa longa caminhada, com destaque aos professores Guilherme Peron, Cícero Martelli, Omero Francisco Bertol, Hermes Irineu del Monego e Bruno Sens Chang, docentes que além de transmitir conhecimento teórico, orientam as decisões de seus alunos.

Levanto também a importância dos meus familiares e amigos para a conclusão deste ciclo, por estarem sempre ao meu lado, me dando apoio, sabedoria e discernimento. Aos meus pais, Fabio Pereira Kostycha e Cassiana Strobel, meus maiores e mais sinceros agradecimentos, já que são a razão e o motivo do meu conhecimento, do meu caráter e da minha vida.

Ressalto, também meu reconhecimento pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a todos os servidores envolvidos.

RESUMO

Embora consagrado pela área geotécnica, o Inclinômetro In-Place ainda não é amplamente utilizado no Brasil devido à escassez de empresas nacionais que produzem esse tipo de produto e ao alto custo de importação e manutenção dos equipamentos importados. Este trabalho propõe um modelo economicamente acessível de Inclinômetro In-Place capaz de mensurar parâmetros compatíveis com os requerimentos do mercado. Para isso, o estudo analisa a possibilidade de desenvolver o instrumento de medição através de tecnologias que podem ser facilmente adquiridas ou implementadas, como a utilização de acelerômetros comuns (MPU-6050), comunicação de longa distância, interface gráfica disponibilizada pela Adafruit Industries de forma gratuita e materiais que permitem a proteção do sistema. Além disso, alguns métodos de melhoria e tratamento de dados são discutidos, como a calibração do equipamento e a implementação de filtros para a obtenção de medidas mais fiáveis. Como resultado do estudo, o trabalho fornece tabelas e gráficos comparativos entre os dados recolhidos a partir do modelo proposto e os dados de produtos já comercializados.

Palavras-chave: instrumentação; iot; big data; smart sensors; .

ABSTRACT

Although recognized by the geotechnical area, the In-Place Inclinometer is still not widely used in Brazil due to the shortage of local companies that produce this type of product and the high cost of importing and maintaining the imported equipment. This study seeks to propose an accessible model of In-Place Inclinometer capable of measuring parameters compatible with market requirements. To this end, the study examines the possibility of developing the measuring instrument through technologies that can be easily acquired or implemented, such as the use of common accelerometers (MPU-6050), long distance communication, graphical interface made available by Adafruit Industries and materials that allow the protection of the system. In addition, some methods of data improvement and processing are discussed, such as equipment calibration and the implementation of filters to obtain more reliable measurements. As a result, the study provides tables and graphics comparing the data collected from the proposed model and the data from products already marketed.

Keywords: instrumentation; iot; big data; smart sensors; .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sonda inclinométrica	15
Figura 2 – Inclinômetro tipo torpedo	15
Figura 3 – Instrumento de S. D. Wilson	18
Figura 4 – Detalhamento de um Inclinômetro In-Place	19
Figura 5 – Diagrama de funcionamento do módulo proposto	25
Figura 6 – Circuito de chaveamento de alimentação	26
Figura 7 – Face superior do módulo escravo	28
Figura 8 – Face Inferior do módulo escravo	29
Figura 9 – Dashboard Adafruit	32
Figura 10 – Especificações do sensor cotado	34
Figura 11 – Forma de funcionamento de um IPI e um ShapeArray	35
Figura 12 – Dados recolhidos do sensor MPU6050	45

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Luva de proteção e conectores impermeáveis	28
Fotografia 2 – Teste de temperatura no interior das luvas	36
Fotografia 3 – Experimento de impermeabilidade das luvas	38
Fotografia 4 – Comunicação entre módulo mestre e dashboard	44
Fotografia 5 – Transmissão e recepção de dados RS485 (LED TXD e RXD)	44
Fotografia 6 – Circuito do módulo escravo fixado e em funcionamento	45
Fotografia 7 – Marcadores de orientação entre os tubos-guia	46
Fotografia 8 – Circuito do módulo escravo fixado e em funcionamento no interior da luva	46
Fotografia 9 – Módulo mestre	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação da temperatura ao longo do tempo no interior da luva	37
Gráfico 2 – Valores de aceleração sem calibração no eixo X	39
Gráfico 3 – Valores de aceleração sem calibração no eixo Y	39
Gráfico 4 – Valores de aceleração sem calibração no eixo Z	40
Gráfico 5 – Valores de aceleração com calibração no eixo X	40
Gráfico 6 – Valores de aceleração com calibração no eixo Y	41
Gráfico 7 – Valores de aceleração com calibração no eixo Z	41
Gráfico 8 – Valores de aceleração filtrados no eixo X	42
Gráfico 9 – Valores de aceleração filtrados no eixo Y	42
Gráfico 10 – Valores de aceleração filtrados no eixo Z	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de inclinômetros disponíveis no mercado	18
Tabela 2 – Resistividade dos materiais	22
Tabela 3 – Comparação entre os sensores MPU6050 e ADXL355	29
Tabela 4 – Estimativa de consumo do circuito	31
Tabela 5 – Custo estimado do projeto	34
Tabela 6 – Comparativo entre pontos de dados de IPI e ShapeArray	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ANA	Agencia Nacional de Águas
CI	Circuito Integrado
IPI	<i>In-Place Inclínometer</i>
LDO	<i>Low-Dropout Regulator</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

a	Aceleração	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$
A	Area da secção transversal	$[\text{m}^2]$
L	Comprimento	$[\text{m}]$
k	Constante elástica	$\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$
I	Corrente elétrica	$[\text{A}]$
x	Deformação sofrida pela mola	$[\text{m}]$
V	Diferença de potencial	$[\text{V}]$
M	Massa	$[\text{kg}]$
Q	Quantidade de calor dissipado	$[\text{J}]$
R	Resistência	$[\Omega]$
t	tempo	$[\text{s}]$

Letras Gregas

ρ	Resistividade	$[\Omega]$
--------	---------------	------------

Notações

I_{bat}	Corrente elétrica máxima no condutor	$[\text{A}]$
P_{total}	Potência total consumida pelo sistema	$[\text{W}]$
R_{total}	Resistência total	$[\Omega]$
V_{bat}	Tensão fornecida pela bateria	$[\text{V}]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Inclinômetros	18
2.2	Acelerômetros	20
2.3	Dissipação da energia	21
2.4	Calibração de sensores	22
2.5	Filtro Média movel	23
2.6	Filtro de Kalman	24
3	MODELAGEM DO INCLINÔMETRO IN-PLACE	25
3.1	Diagrama de funcionamento	25
3.2	Projeto do sistema	25
3.2.1	Módulo Mestre	25
3.2.1.1	Materiais utilizados	25
3.2.1.2	Funcionamento detalhado	26
3.2.2	Módulo Escravo	27
3.2.2.1	Materiais utilizados	27
3.2.2.2	Funcionamento detalhado	27
3.2.3	Dimensionamento da alimentação do sistema	30
3.2.3.1	Materiais utilizados	30
3.2.3.2	Funcionamento detalhado	30
3.2.4	Interface gráfica	32
3.2.5	Firmwares	33
3.3	Custo do projeto e análise de mercado	33
4	ANÁLISE DO MODELO PROPOSTO DO INCLINÔMETRO	36
4.1	Estudo térmico do conjunto	36
4.1.1	Descrição do teste	36

4.1.2	Resultados obtidos	37
4.2	Estudo de impermeabilidade das luvas	37
4.2.1	Descrição do teste	37
4.2.2	Resultados obtidos	38
4.3	Influência da calibração	38
4.3.1	Descrição do teste	38
4.3.2	Resultados obtidos	39
4.4	Influência do filtro Média Móvel	42
4.4.1	Descrição do teste	42
4.4.2	Resultados obtidos	42
4.5	Integração do sistema	43
4.5.1	Descrição do teste	43
4.5.2	Resultados obtidos	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Segundo artigo publicado no site governamental www.ipea.gov.br, o setor minerador brasileiro foi responsável pela contribuição superior a 3,18% (SANTOS, 2021) do PIB nacional nos últimos dois anos. Esta atividade acabou gerando grandes benefícios ao país, como a criação de um grande número de empregos e alto impacto na economia nacional. Entretanto, a exploração de recursos naturais também foi responsável por grandes desastres naturais que marcaram a história do Brasil.

Vítima de uma catástrofe, a cidade de Mariana (MG) foi o cenário do rompimento da barragem Fundão, controlada pela mineradora Samarco Mineração S.A, deixando 19 mortos (CARMO *et al.*, 2017) e um prejuízo estimado em 1,2 Bilhões de reais (GLOBO, 2016). Onze dias após o desastre, o ministro Carlos Eduardo Ferreira Pinto publicou em laudo pericial atestando que a tragédia não foi um acidente e tampouco uma fatalidade, mas sim uma sequência de erros de operação e negligência no monitoramento da barragem (GLOBO, 2015).

Depois de ser vítima de outros desastres provocados por movimentos laterais do solo e deterioração em estruturas adjacentes a escavações, como o desastre de Brumadinho em janeiro de 2019, é possível notar um enrijecimento nas exigências de segurança das atividades mineradoras (LEGISLATIVO, 2020) e o aumento progressivo dos investimentos destinados ao monitoramento de solo e estruturas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL), 2019).

Visando proporcionar soluções para suprir o aumento na demanda de equipamentos para à análise do comportamento de solos, causado pelas empresas mineradoras, petrolíferas e de infraestrutura, o seguinte estudo tem como objetivo principal o desenvolvimento de um inclinômetro In-place para o acompanhamento remoto de dados em aplicações geotécnicas. Para isso, serão analisados materiais, circuitos, cabos e ferramentas programáveis que possuam uma aplicabilidade condizente com o protótipo a ser criado.

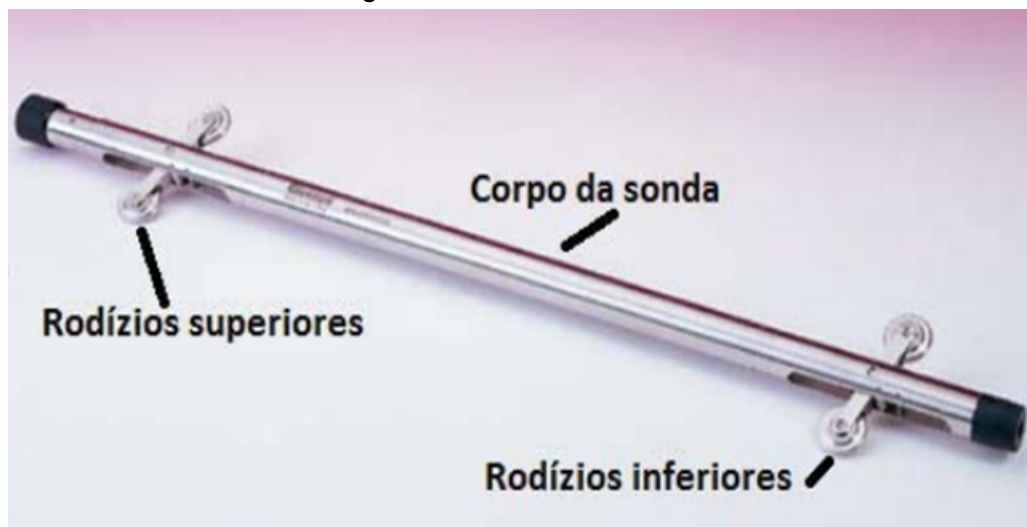
Como resultado, pretende-se obter uma interface gráfica capaz de representar as medidas recolhidas, e também um protótipo de baixo custo do equipamento mencionado, capaz de obter dados fiáveis e tratados referentes ao comportamento do solo na região de estudo.

1.1 Justificativa

Apesar do maior enfoque dado nos últimos anos para a gestão de riscos nas áreas que envolvem estudos geotécnicos, o último relatório anual disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL), 2020) mostra que apenas 2168 barragens foram vistoriadas no ano de 2019, representando menos de 62% das 3543 barragens classificadas em categoria de alto risco pelo documento de 2017 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL), 2018). Em meio a esse cenário, é inevitável a preocupação com novas falhas em barragens e estruturas, até porque o Brasil registra mais de 3 acidentes com barragens por ano, segundo a Agência Pública (FONSECA, 2019).

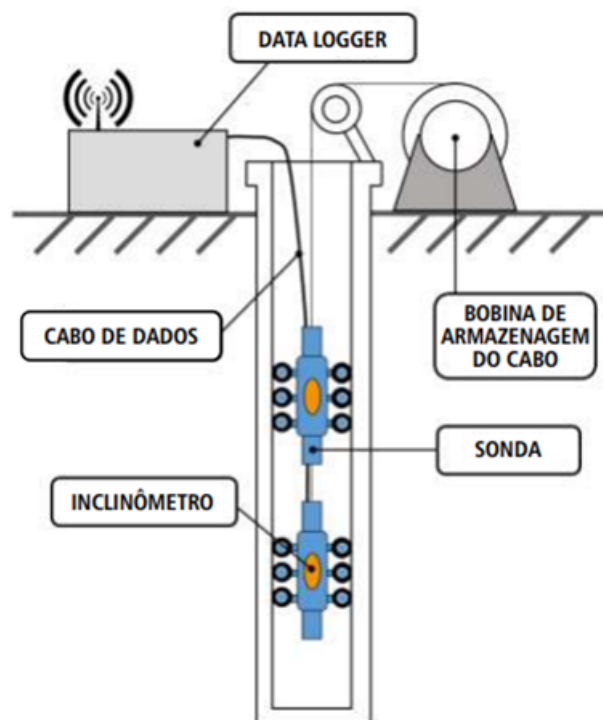
Em estudo levantado sobre o mercado de inclinômetros, foi observada a predominância de dois tipos: Torpedo e In-Place. O primeiro é caracterizado por uma sonda composta de roldanas (sonda inclinométrica) e um corpo rígido com espaço reservado para o acoplamento do circuito eletrônico, como mostra a figura 1. Este objeto é anexado a um cabo que movimentará o sensor verticalmente dentro de um tubo guia e transmitirá o dado a um módulo central ou interface gráfica, formando o conjunto representado pela figura 2, divulgada pela empresa EngeGround para promover seu produto.

Figura 1 – Sonda inclinométrica



Fonte: Geokon (2011).

Figura 2 – Inclinômetro tipo torpedo



Fonte: Engeground (2011).

Rodrigo Siqueira Penz explica em seu artigo (DESENVOLVIMENTO... , 2014) que esse tipo de equipamento não permanece no local de estudo e, por esse motivo, busca executar o maior número de medidas em diferentes altitudes para poder caracterizar a inclinação sob a qual o tubo guia está sujeito.

Já a outra opção de equipamento disponível no mercado (IPI) possui um custo mais elevado, mas é capaz de proporcionar monitoramento contínuo e mais conforto ao usuário final por conservar-se em loco. Além disso, o preço desse equipamento pode ser reduzido consideravelmente quando o solo requer o monitoramento a longo prazo, já que não há a necessidade de mão de obra especializada para operar o instrumento.

Levando em consideração algumas limitações do modelo In-Place, como o esforço computacional para o tratamento do grande número de dados gerados, John Lemke mostra em seu artigo (LEMKE, 2006) que a escolha correta do tipo de inclinômetro depende da aplicação. Segundo ele, essa decisão não depende apenas do cenário em que os sensores devem ser incorporados, mas também da frequência de captação dos dados referentes ao solo, do número de pontos a serem estudados, do e do benefício em se monitorar de forma contínua a região.

Visto que a versão In-Place é capaz de proporcionar uma análise mais refinada, o seguinte projeto tenta solucionar a grande desvantagem desse tipo de equipamento: o custo.

A importação desse tipo de produto ocorre por ser um mercado ainda pouco explorado no Brasil, onde as empresas do ramo dão maior relevância a Inclinômetros do tipo Torpedo, não sendo encontrado nenhum produto nacional em pesquisa realizada. A nacionalização da produção e manutenção desses equipamentos permitirá com que clientes de menor orçamento possam garantir um bom nível de confiabilidade estrutural, sem possuir o custo exorbitante para a implementação de um sistema de monitoramento.

Outro fator que trará economia aqueles que buscam a aquisição de um IPI de baixo custo é a composição do instrumento, já que os fabricantes utilizam materiais com tecnologia de ponta para cobrir todos os segmentos de mercado. Um produto com foco em utilizações que não requerem grande resolução, mas que não deixe de suprir as condições necessárias para aplicação, pode ser desenvolvido com materiais mais acessíveis, barateando o valor de comércio do equipamento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O seguinte projeto tem como objetivo principal viabilizar o uso de Inclinômetros In-Place para o estudo de deslocamentos laterais do solo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver de circuito microcontrolado para a interpretação e envio do dado coletado. Podendo ser replicado diversas vezes para a expansão do comprimento da sonda.
- Desenvolver um módulo mestre para o envio dos registros provenientes dos módulos citados no item anterior à interface gráfica.
- Verificar se os resultados provenientes do protótipo desenvolvido atendem as condições para obter o monitoramento de forma fiável.

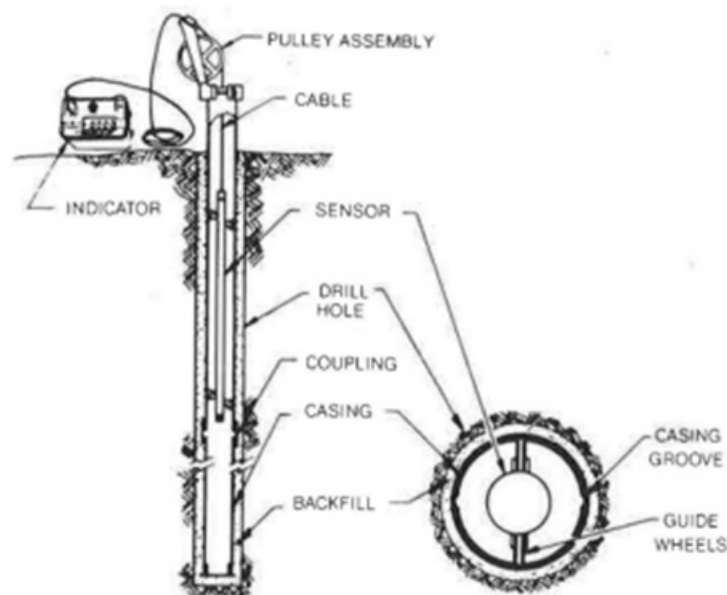
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Inclinômetros

Segundo Dunicliff (DUNNICLIFF, 1993) e Stark e Choi (STARK; CHOI, 2008), Inclinômetros são instrumentos que nos auxiliam a entender a causa, o comportamento e a correção de um deslizamento de terra, mensurando a magnitude, a direção e a profundidade dos movimentos que a superfície terrestre pode sofrer.

Em seu artigo, GREEN e MIKKELSEN (GREEN; MIKKELSEN, 1988) relatam que a ideia de Inclinômetro tipo torpedo, hoje muito utilizado no mercado, é proveniente de um instrumento desenvolvido por S. D. Wilson, o qual foi posteriormente comercializado pela companhia Slope Indicator. Esse aparato (figura 3) composto por um tubo-guia, uma sonda inclinométrica, um aparelho indicador de medidas e outros componentes mecânicos foi aprimorado ao longo do tempo, e atualmente, empresas como Geokon e Encardiorite são capazes de fornecer instrumentos com grande precisão e resolução, como mostra a tabela comparativa 1 (SILVEIRA, 2006).

Figura 3 – Instrumento de S. D. Wilson



Fonte: GREEN e MIKKELSEN (1988).

Tabela 1 – Comparação de inclinômetros disponíveis no mercado

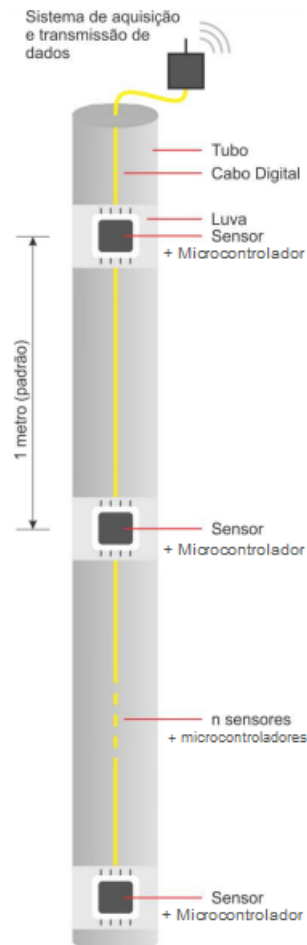
<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Precisão</i>	<i>Resolução</i>
Slope Indicator	Digitilt Classic	$\pm 6\text{mm}/25\text{m}$	0,01mm/500mm
Slope Indicator	Digitilt AT	—	0,005mm/500mm
Geokon	GK-604D	$\pm 3\text{mm}/30\text{m}$	0,025mm/500mm
Encardiorite	EAN-26M	$\pm 4\text{mm}/30\text{m}$	0,008mm/500mm

Fonte: Silveira (2006).

Embora eficazes, muitas vezes as sondas inclinométricas não nos permitem conclusões completas devido à falta de monitoramento contínuo. Por esse motivo, algumas aplicações como barragens, escavações e aterros costumam utilizar inclinômetros In-Place em seus estudos.

Conforme explicado por T. F de Souza Junior em sua tese (JUNIOR, 2021), esse tipo de equipamento é composto por um conjunto de sensores igualmente espaçados no interior de um corpo metálico, sendo na maioria das vezes conectados através de cabos para a troca de informação e possuindo um módulo mestre localizado na superfície, responsável pelo envio de dados. Conjunto demonstrado pela figura 4.

Figura 4 – Detalhamento de um Inclinômetro In-Place



Fonte: Autoria própria (2022).

Algumas propostas de aparatos parecidos foram publicadas buscando fornecer uma instrumentação que possibilitasse a previsão de possíveis deslizamentos de solo em tempo real, como o estudo de D. HANTO (HANTO *et al.*, 2011), que utilizou o sensor MEMS ADXL330 e o e a aplicação de MISHRA (MISHRA *et al.*, 2011) que propõe a implementação de um inclinômetro In-Place de baixo custo utilizando a tecnologia Zigbee para comunicação à distância.

Com o aumento de pesquisas nesse domínio, logo o aparato ganhou um espaço no mercado e passou a ser amplamente comercializado por empresas globais, como a Soil Instruments. Mas apesar de sua grande popularidade no exterior, o produto ainda se encontra em fase de testes nas mineradoras brasileiras e possui um alto custo para o mercado interno.

2.2 Acelerômetros

Segundo Tevez (TEVES, 2013), a definição de acelerômetro é: “.... um dispositivo eletromecânico capaz de medir aceleração, isto é, taxa de variação de velocidade. Estas acelerações podem ser estáticas, como força da gravidade, ou dinâmicas, causadas por movimentação ou vibração.”.

Por ser um dos sensores para mensurar aceleração mais difundidos no mercado, o acelerômetro foi alvo de vários estudos ao decorrer da história e, conseqüentemente, diversas formas de construção desses dispositivos foram desenvolvidas. Cada tipo de acelerômetro possui um conjunto de prós e contras devido ao transdutor utilizado, impactando nos parâmetros intrínsecos do sensor, como (JUNIOR, 2021)(VINHAIS, 2005):

- Sensibilidade: O valor mínimo do parâmetro físico de entrada que possa produzir uma resposta detectável.
- Gama: Valores máximos e mínimos de aceleração que pode ser medido pelo sensor.
- Precisão: Grau de reprodutibilidade das medidas executadas quando em mesmas situações.
- Linearidade: Grandeza que expressa o quanto a curva de valores medidos se afasta da curva dos valores ideais quando sujeito a diferentes circunstâncias, como em variações de temperatura, pressão, humidade.
- Entre outras.

Essas especificações tornam alguns modelos mais adequados para determinadas aplicações como, por exemplo, o tipo piezoelétrico para casos de ampla faixa de medição com dinâmicas elevadas (KLECKERS, 2018); o piezoresistivo para teste de velocidade e deslocamento em baixas variações de temperatura (SMITH, 2021); os capacitivos para aplicações de baixo orçamento e espaço limitado; E o tipo MEMS, que é ideal para medições estáticas ou de baixa frequência.

Apesar dessas diferenças, Rodrigo Siqueira Penz (PENZ *et al.*, 2014) explica que o princípio básico que rege esses tipos de dispositivos pode ser comparado com um sistema massa-mola, descrito pela equação:

$$F = k.x \quad (1)$$

Em que a força é igual uma relação entre distância e a constante elástica da mola. Ao levar em consideração a segunda lei de Newton, pode-se relacionar a aceleração com uma variação de deslocamento, como mostra a equação 2:

Isolando as constantes:

Aplicação da segunda lei de Newton no sistema massa-mola:

$$F = k.x = m.a \quad (2)$$

Isolando as constantes:

$$\frac{k}{m} = \frac{a}{x} \quad (3)$$

Além disso, as leis de Newton ainda permitem a obtenção da inclinação sofrida pelo sensor em cada eixo:

$$\theta_x = \arctan \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (4)$$

$$\theta_y = \arctan \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \quad (5)$$

$$\theta_z = \arctan \left(\frac{a_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2}} \right) \quad (6)$$

Em que θ e a representam, respectivamente, o ângulo (radianos) e a aceleração (g) resultante em cada eixo.

2.3 Dissipação da energia

Nascido em 16 de março de 1789, o professor de matemática e físico experimental George Simon Ohm definiu o conceito de resistência elétrica. Submetendo diversos materiais a diferentes tensões elétricas, Ohm verificou que a corrente também variava de forma constante para cada objeto com diferentes composições. Para essa alteração, o físico deu o nome de resistência elétrica, grandeza que posteriormente recebeu a nomeação de sua unidade de medida de Ohm.

Definido como “uma grandeza física que mede a oposição oferecida pelas partículas que os constituem à passagem da corrente elétrica, transformando energia elétrica exclusivamente em calor”, por Ronqui Junior (TEIXEIRA, 2017), a resistência elétrica é inversamente proporcional à corrente, como mostra a primeira lei de Ohm:

$$V = R.I \quad (7)$$

Isso faz com que materiais com maior condutibilidade elétrica, ou seja, que apresentam um número maior de elétrons livres ou lacunas livres para o movimento ordenado de elétrons, conduza uma corrente maior que um material de baixa condutibilidade. Geralmente, os ele-

mentos metálicos apresentam uma resistência menor que os outros tipos de elementos, como mostra a tabela 2 (TEIXEIRA, 2017). Por isso, materiais como cobre, ouro e prata são utilizados como condutores de eletricidade.

Tabela 2 – Resistividade dos materiais

<i>Material</i>	<i>Resistividade(Ω.m)</i>
Prata	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Cobre	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Ouro	$2,4 \cdot 10^{-8}$
Carbono	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Silício	$2,5 \cdot 10^2$
Vidro	De 10^{10} a 10^{14}
Borracha	10^{13}

Fonte: Brasil Escola (2022).

A resistência em condutores pode ser calculada pela segunda lei de Ohm, descrita por:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (8)$$

Em que ρ é a resistividade do condutor, L é o comprimento e A é a área da seção transversal do cabo.

Mesmo que baixa, a resistência no condutor dissipa a energia elétrica em forma de calor, isso por que existe o choque entre átomos e elétrons no interior do material, provocando o aumento da temperatura (ARAÚJO *et al.*,). Fenômeno chamado de efeito Joule e regido pela equação:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (9)$$

Onde Q é a quantidade de calor dissipado (J), I é a corrente elétrica (A); R é a resistência elétrica (Ω) e t é o tempo que a corrente elétrica leva para atravessar o condutor (s).

2.4 Calibração de sensores

Apesar de muito populares, os sensores baseados em sistemas microEletroMecânicos (MEMS) são muito afetados por erros aleatórios e sistemáticos graças a sua forma de construção (CAI *et al.*, 2016).

Esse tipo de erro pode ser definido como a parcela imprevisível do erro, tendo como origem as variações temporais ou espaciais e possuindo grande complexidade para ser reduzido. Já outra classificação de erro é o sistemático, que corresponde a parcela previsível do erro (ACC,), podendo ser causado por (PARANHOS, 2009):

- Offset ou valor em zero: Um valor constante que difere a medição do valor real, medido pelo sensor quando a entrada é nula.

- Escala: Valor constante que difere de forma proporcional a medição do valor real.
- Dead-zone: Faixa na qual o sensor não consegue operar.
- Quantização: Quantidade de valores numéricos disponíveis para representar um valor analógico.
- Assimetria: desigualdade nas medidas positivas e negativas do sensor.
- Não-linearidade: fator de correção que relaciona a medida com uma função linear.
- Entre outros.

Além disso, os sensores ainda sofrem influência térmica graças as propriedades do silício usado na fabricação, resultando em valores diferentes de saída mesmo quando o valor real de medição se mantém constante.

Para aumentar a confiabilidade desse tipo de sensor, é fortemente recomendado que o instrumento passe por uma fase de calibração. Porém, essa etapa do projeto pode ser muitas vezes demorada e mais cara que o próprio sensor (KHANKALANTARY; RANJBARAN; EBA-DOLLAHI, 2021), isso devido a instrumentação de ponta e a confiabilidade que o processo requer. Por esse motivo, algumas abordagens que buscam reduzir a imprecisão do sensor são muito conhecidas como, por exemplo, o método dos mínimos quadrados lineares (ESPINDOLA *et al.*, 2014) e splines cúbicas interpoladas (A,), podendo muitas vezes ser implementadas via software.

2.5 Filtro Média movel

Tendo como objetivo atenuar variações bruscas de medição, o filtro média móvel é geralmente aplicado para eliminar ruídos aleatórios de alta amplitude. Para isso, essa ferramenta atribui a nova medida a um histórico com tamanho pré-definido de valores anteriormente mensurados, descartando o dado mais antigo. Logo em seguida, a média desse conjunto de informações é calculada, reduzindo o peso da medida realizada, como mostra a equação:

$$y[n] = \left(\frac{1}{N+1} \right) \sum_{k=1}^N x[n-k] \quad (10)$$

Onde n é o índice, $N+1$ representa o número de amostras usadas para a filtragem, $x[n-k]$ é o conjunto de valores a serem somados e $y[n]$ é o próprio sinal(LIMA, 2012).

Muito utilizado no tratamento de dados, esse filtro mostra-se eficaz em diversos estudos. Em seu artigo, Cheng Li (LI *et al.*, 2014) relata o emprego desse método para a suavização de medidas de deformação do solo obtidas por acelerômetros do tipo MEMS, aplicação muito similar ao trabalho em questão. Além disso, outros trabalhos constataam a imprecisão na utilização

do sensor MPU6050, obtendo resultados satisfatórios com a implementação de filtros média móvel, como é o caso do artigo publicado em 2015 por Tùng, Huỳnh Thanh, and Vũ Vân Thanh (TÙNG; THANH, 2015).

2.6 Filtro de Kalman

Criado por Rudolf Kalman, esse método matemático tem como objetivo gerar resultados que tendam a se aproximar dos valores reais, filtrando as incertezas e ruídos contidos no sinal primário através da medição de outras grandezas. Para isso, o filtro estima os futuros resultados e incertezas baseando-se em outros valores relacionados, em seguida, calcula a média ponderada entre o dado estimado e medido, atribuindo o maior peso ao valor de menor incerteza (WELCH; BISHOP *et al.*, 1995).

Descrevendo e equacionando as etapas desse método, Rio Ikhsan, Alfian Ma'arif e Sunardi Sunardi (ALFIAN; MA'ARIF; SUNARDI, 2021) realizaram em seu artigo um experimento utilizando acelerômetro/giroscópio com tecnologia MEMS e a implementação do filtro via software. Como resultado, os pesquisadores mostram que a técnica pode ser muito eficaz para a suavização das medidas obtidas.

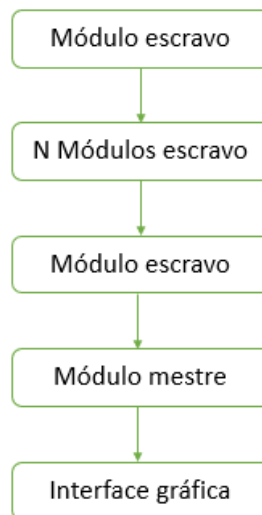
Outro estudo publicado em 2017 (ISLAM *et al.*, 2017) afirma que o filtro de Kalman possui maior precisão em suas medidas quando comparado com um filtro complementar aplicado em um sistema dinâmico como em dispositivos de AHRS. Ainda sobre o método, Aline Grotebold Bueno e Rodrigo Alvite Romano estudaram em seu artigo (BUENO¹; ROMANO, 2014) a aplicação de um filtro complementar para obtenção de dados mais fiáveis utilizando um acelerômetro para estimar inclinação. Obtendo resultados positivos, os autores destacam que a implementação de um filtro de Kalman traria resultados ainda melhores para o experimento.

3 MODELAGEM DO INCLINÔMETRO IN-PLACE

3.1 Diagrama de funcionamento

O diagrama de funcionamento desse projeto pode ser dividido em três partes: módulos escravos, módulo mestre e interface gráfica, como mostra o diagrama abaixo:

Figura 5 – Diagrama de funcionamento do módulo proposto



Fonte: Autoria própria (2022).

O primeiro módulo contém um sensor, um microprocessador e um circuito para a transmissão de dados de forma cabeada. Ao receber o dado do sensor, o microcontrolador fará a validação e a transmissão do dado para o próximo módulo. Ao alcançar o módulo mestre, o dado será enviado via 2G para um broker, responsável por encaminhar os valores recebidos à Interface gráfica, tornando o dado visível e compreensível ao usuário.

3.2 Projeto do sistema

3.2.1 Módulo Mestre

3.2.1.1 Materiais utilizados

- 1 x Caixa PVC 20cm x 20 mm x 10 cm.
- 1 x módulo Esp32 DevKit.
- Módulo SIM800C.
- Módulo RS485.
- Módulo de chaveamento de alimentação.

- Módulo regulador de tensão 5V.
- Bateria indicada na seção 3.2.3.1.
- Antena GSM GPRS 5dBi 824-960Mhz 1800-1900Mhz

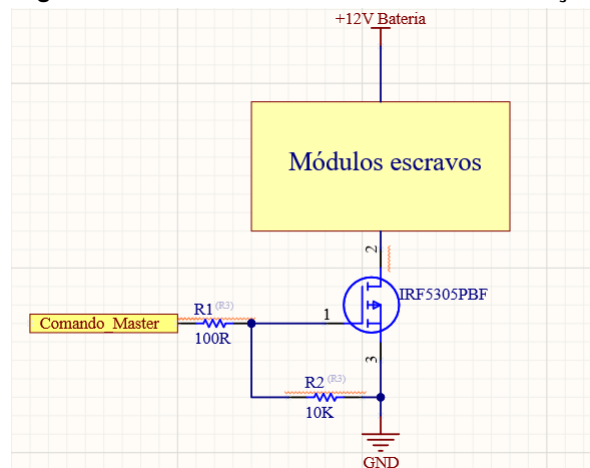
3.2.1.2 Funcionamento detalhado

Sendo responsável pelo controle do inclinômetro e pelo envio de dados para o broker da interface gráfica, o módulo mestre será posicionado sob o solo, em uma caixa plástica ou metálica, à prova d'água, para a proteção do circuito. Esse compartimento possui dimensões de 20cm X 20cm X 10cm e armazena em seu interior a bateria que irá alimentar o circuito, um microprocessador ESP-32, um conversor RS485 e um módulo GPRS SIM800C. Além da funcionalidade anteriormente citada, a caixa pode servir de suporte para um painel solar, ideia não implementada no projeto mas que será incorporada em uma aprimoração do modelo para aumentar a duração das baterias, já que muitas vezes os inclinômetros são instalados em locais de difícil acesso.

Para a parte de troca de dados entre módulos, optou-se pelo protocolo RS485, pois esse tipo de comunicação é capaz de transmitir dados à uma distância de 1200 m (JUNIOR *et al.*, 2021), com baixa susceptibilidade a ruídos. Diferentemente da tecnologia RS232, o RS485 ainda possui a vantagem de estabelecer comunicação com até 32 módulos escravos, mas limitando, por outro lado, o comprimento máximo do inclinômetro a 32m de profundidade, já que a distância entre as luvas é de um metro para esse projeto.

O módulo de chaveamento de alimentação tem a função de ligar/desligar a os módulos escravos, poupando a energia do sistema enquanto esses equipamentos não estão realizando nenhuma medição. Este circuito utiliza um conjunto de resistores e um FET do tipo NPN para realizar essa função, e é representado pelo esquemático abaixo:

Figura 6 – Circuito de chaveamento de alimentação



Fonte: Autoria própria (2022).

Controlando o módulo de conversão TTL / RS485, o ESP-32 é responsável por comandar a comunicação com os módulos escravos e, para isso, o microprocessador dá o comando de ativação para o circuito de chaveamento da alimentação dos outros módulos e envia as instruções de requerimento de dados. Esse processo se repete a cada 30 minutos. Quando respondido, o microprocessador valida a integridade da mensagem, desliga a alimentação dos módulos escravos, liga o módulo GPRS e faz o envio de dados para o broker caso um intervalo de tempo pré-determinado no firmware tenha sido atingido. Esse tempo pode ser regulado conforme a necessidade de cada aplicação, atualizando os dados fornecidos ao usuário com maior frequência ou prezando pelo aumento da duração da bateria, visto que a conexão 2G exige um consumo de energia relativamente alto.

Como o tipo de comunicação de longa distância escolhido utiliza frequências de 900MHz e 1800 MHz, foi necessário selecionar uma antena condizente com os requerimentos da tecnologia GSM. Tendo uma impedância de 50 Ohms e um ganho de 5dBi, a antena utilizada no projeto possui dimensões pequenas e revestimento plástico para a proteção contra o meio externo, permitindo a instalação da mesma fora da caixa que protege o módulo mestre.

Uma vez que o 2G vem caindo cada vez mais em desuso (TELECO,), o projeto pode ser executado utilizando métodos mais modernos de comunicação, como o 4G ou até mesmo tecnologias de baixo consumo de energia (LoRa), mas por já possuir um módulo GSM, o modelo em questão foi proposto com esse tipo de tecnologia.

3.2.2 Módulo Escravo

3.2.2.1 Materiais utilizados

- 1 x PCB do módulo escravo.
- 1 x Luva 40mm de diâmetro com trava de orientação.
- 1 x Conector Ip68 6pin 250v/5a Cabo Ø8mm com Tampa M20

3.2.2.2 Funcionamento detalhado

Anexado ao módulo mestre, o tubo-guia de plástico ABS com 4.8 cm de diâmetro interno protege os cabos do meio externo. Possuindo a mesma espessura de tubos-guia já utilizados no mercado, o cano é capaz de sofrer deformação quando há a ocorrência de movimentos laterais de solo.

Coladas ao tubo-guia, as luvas são responsáveis por proteger o circuito do módulo escravo. Esses compartimentos possuem tem 4mm de diâmetro interno e uma superfície em forma de círculo em sua lateral superior e inferior, permitindo que esses invólucros sejam posicionados

sempre na mesma orientação quando conectados ao tubo-guia. Além disso, os conectores do tipo Ip68 6pin 250v/5a tornam as luvas impermeáveis, o que fornece durabilidade para o módulo escravo que se encontrará parafusado em seu interior.

Fotografia 1 – Luva de proteção e conectores impermeáveis

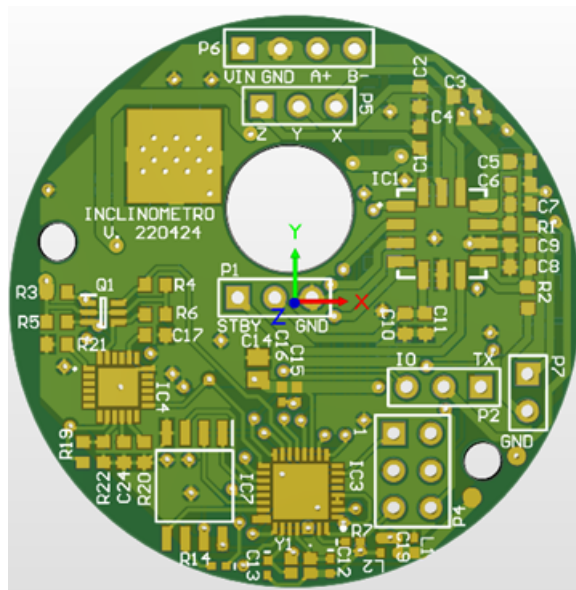


Fonte: Autoria própria (2022).

Por possuir espaço reduzido no interior da luva para o acoplamento de todos os componentes eletrônicos responsáveis pela composição desse módulo, optou-se por criar uma PCB com peças de encapsulamento SMD.

O projeto desenvolvido através do software Altium Designer conta com 2 camadas de footprints e é representado pelas imagens abaixo:

Figura 7 – Face superior do módulo escravo



Fonte: Autoria própria (2022).

Além da possibilidade de compensar parcialmente a não-linearidade dos acelerômetros com os sensores de temperatura, o módulo MPU6050 ainda apresenta o giroscópio, que é de extrema importância para verificar se houve rotação do tubo-guia e ainda pode servir de enriquecimento para o filtro de Kalman. Caso o sensor MPU6050 se mostre ineficiente para a aplicação, pode ser estudado futuramente a implementação do ADXL355 com métodos de calibração e filtragem, o que encarecerá o custo do produto final, mas sendo ainda compensatório quando comparado com o valor dos inclinômetros disponíveis no mercado, assunto abordado na seção 3.4. Além desse custo adicional, para esse caso, será relevante o estudo da adição de um giroscópio ao sistema.

Na outra face, já que a tensão proveniente da bateria é superior ao suportado pelos circuitos integrados do módulo (assunto abordado na seção 3.2.3), foi inserido um regulador de tensão do tipo “low dropout voltage” (LDO) capaz de suportar uma tensão máxima de entrada de 15V, regulando a saída em 3.3V (IC6).

No verso do dispositivo encontramos também um módulo RS485 (IC1) para a comunicação com os outros módulos, completando assim, o escopo de funcionalidades que o módulo escravo deve possuir.

Buscando a redução de ruídos, cada circuito responsável por uma determinada funcionalidade foi cuidadosamente espaçado dos demais. Já para reduzir a impedância entre os componentes, as trilhas buscam respeitar os seguintes dimensionamentos: 40 mil para alimentação; 20 mil para trilhas de comunicação; 10 mil para as demais trilhas. Entretanto, nem todas as trilhas obedecem a regra, já que a placa possui uma área de roteamento restrita. Os conectores P6 e P4 são responsáveis pela conexão entre os módulos escravo e a gravação do microprocessador, respectivamente.

3.2.3 Dimensionamento da alimentação do sistema

3.2.3.1 Materiais utilizados

- 3 Baterias Li-ion 9800mAh.
- 32 metros de cabo AWG 19.

3.2.3.2 Funcionamento detalhado

Para estimar o consumo de energia teórico de cada módulo escravo, realizou-se um levantamento a partir da documentação de cada CI do circuito, o que possibilitou a criação da tabela 4 (INVENSENSE, 2013)(DEVICES, 2019)(AKINTADE *et al.*, 2019).

Tabela 4 – Estimativa de consumo do circuito

<i>Subcircuito</i>	<i>Consumo</i>
RS485	250 mW
Esp8266 e circuitos complementares	234 mW
MPU6050	13 mW
ADXL355	0.5W
Dissipação de LDO e outros circuitos	20% do consumo
Potência por módulo ($\frac{P_{total}}{32}$)	597 mW

Fonte: Autoria própria (2022).

Levando em consideração que a tensão de alimentação dos circuitos integrados presente no módulo é de 3.3V e a tensão de Dropout do LDO é de 1.2 V, deve-se alimentar módulo com uma tensão superior a 4.5 V para o funcionamento ideal.

Por se tratar de um projeto que possui aplicação em lugares muitas vezes distantes de cabos de distribuição de energia, uma solução coerente para a alimentação do inclinômetro é a utilização de baterias.

Localizada no módulo master, a bateria é responsável por fornecer a potência necessária para o funcionamento cada módulo escravo através do fio VCC e GND, que partem da caixa localizada sobre o solo e percorrem toda a extensão do tubo-guia. Buscando reduzir as perdas causadas por efeito Joule, optou-se por uma bateria de tensão mais elevada, com $V_{bat} = 12V$. Com esse valor definido, conseguimos calcular a corrente máxima fornecida pela bateria e conduzida pelo fio através da equação:

$$I_{max} = \frac{P_{total}}{V_{bat}} = 1,592A \quad (11)$$

Para suportar essa corrente, a escala americana normalizada ou American Wire Gauge (AWG) indica a utilização de um fio de no mínimo 0,9116 mm de diâmetro e seção transversal de 0,65 mm², capaz de conduzir uma corrente de até 2 ampères.

Classificado também como AWG 19, esse cabo impõe uma resistência quando aplicado ao circuito. Procurando estimar o decréscimo de tensão sofrido pela transformação de energia elétrica em energia térmica para que a energia alcance o ultimo módulo, utilizou-se a segunda lei de ohm com os seguintes valores: $\rho = 0.172 \times 10 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ e $L = 32\text{m}$:

$$R_{total} = \frac{\rho \cdot L}{A} = 0,846769\Omega \quad (12)$$

Esse valor de resistência provoca uma queda de tensão de quase 0,695 V para o módulo escravo mais distante da bateria. Decréscimo que não interfere na operabilidade do circuito.

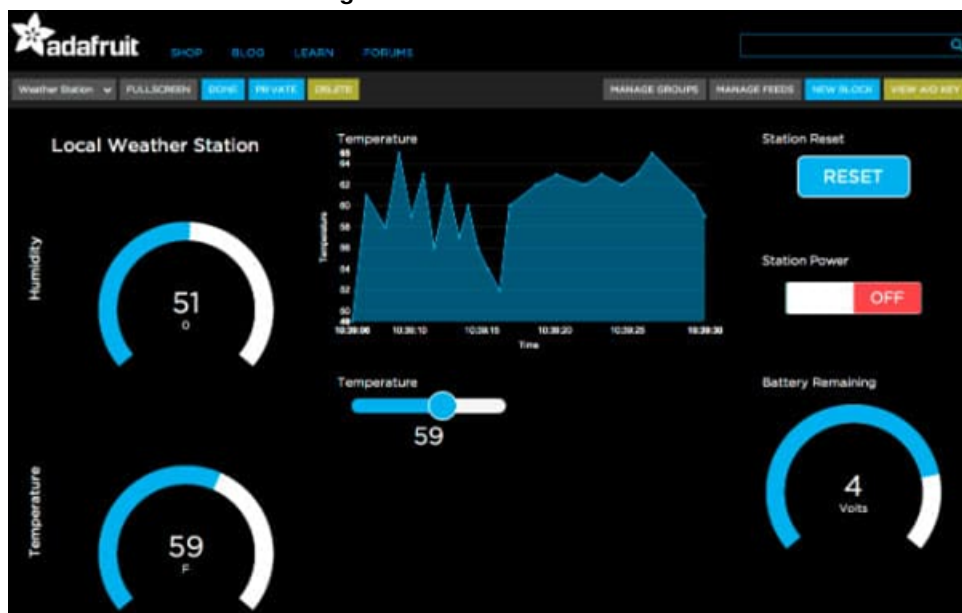
Como cada circuito consome teoricamente cerca de 597 mW, estima-se que o circuito total consumirá 19.404 mW quando totalmente ativo. Levando em consideração que os módulos escravos são acionados a cada 30 minutos e levam cerca de 5 segundos para realizar a medição e enviar os dados ao módulo mestre, uma bateria de 12V/9800 mAh é capaz de alimentar o circuito por aproximadamente 3 meses. Para aumentar ainda mais o tempo de vida do sistema,

existe a possibilidade de conectar até 4 baterias em paralelo (fator limitante: dimensões da caixa do módulo mestre), alimentando o sistema por até 1 ano sem a necessidade de recarga da bateria. Por opção, o modelo proposto conta com 3 baterias em paralelo, fornecendo cerca de 8 a 9 meses de energia para o funcionamento dos circuitos.

3.2.4 Interface gráfica

Fornecendo alta praticidade e fácil administração, os dashboards são uma ótima maneira de expor os dados coletados de forma analítica. Por esse motivo, essa ferramenta disponibilizada pela Adafruit Industries foi implementada no projeto para promover a interação máquina/ usuário. Essa plataforma é gratuita e pode ser encontrada no site <https://io.adafruit.com/>.

Figura 9 – Dashboard Adafruit



Fonte: Maker.io (2018).

Viabilizando o recebimento dos dados, os dashboards contam com um broker baseado em protocolo MQTT. Para estabelecer a comunicação entre módulo mestre e interface gráfica, os parâmetros MQTT_Host, MQTT_Port, MQTT_Username e MQTT_Password, disponibilizados no site da empresa, foram implementados no código de programação do ESP32:

Possuindo um banco de dados que permite obter um histórico de 30 dias, o serviço também fornece a possibilidade de aumentar o período de armazenamento adquirindo um plano premium, alternativa que pode ser usada caso haja a necessidade essa necessidade na aplicação.

3.2.5 Firmwares

Para ambos os módulos que contém microprocessadores os firmwares foram desenvolvidos em linguagem de programação C#. Além de possuir um grande número de materiais didáticos e projetos criados para essa linguagem, ela ainda nos permite o desenvolvimento do código de programação em uma interface de desenvolvimento consolidada e de fácil manuseio, a Arduino IDE.

O Firmware para o módulo mestre contém as bibliotecas:

- Wire: Para a comunicação com dispositivos I2C/TWI.
- TinyGsmClient: Para estabelecer a comunicação GSM, possibilitando a transmissão de dados para o broker.
- ModbusRTU: Para a comunicação via RS485.
- PubSubClient: Responsável pela parte do protocolo MQTT.

Já o firmware do módulo escravo utiliza:

- Wire.
- ModbusRTU.
- Adafruit_MPU6050: para a calibração e comunicação com o sensor via I2C.
- Adafruit_Sensor: Comunicação com o sensor MPU6050.

3.3 Custo do projeto e análise de mercado

Sabendo que o custo do projeto é um fator determinante para a sua viabilidade, a seção em questão tem como objetivo abordar o valor de desenvolvimento do inclinômetro proposto e comparar o modelo com os produtos disponíveis no mercado geotécnico.

Embora em fase de desenvolvimento, algumas estimativas já podem ser realizadas para levantar o custo total de fabricação do modelo de inclinômetro em estudo. Através de pesquisas de mercado e contato com prestadores de serviço levantou-se os valores de cada módulo do projeto, mostrados na tabela 5:

Sendo responsável pelo maior custo do projeto, os módulos escravos possuem em sua composição o CI ADXL355. Esse sensor é responsável por cerca de 60% do custo da placa. Caso comprovada a eficácia do MPU6050 para a aplicação, não haverá a necessidade de utilizar o sensor fabricado pela Analog Devices, reduzindo o custo total do projeto em cerca de R\$ 5.433,00 reais.

Tabela 5 – Custo estimado do projeto

<i>Item</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Valor individual</i>	<i>Valor Total</i>
Caixa de PVC 20x20x10cm	1	R\$25,43	R\$25,43
Tubo guia em plástico ABS Ø 4mm	32 metros	R\$91,10	R\$91,10
módulo Esp32 DevKit.	1	R\$ 34,99	R\$ 34,99
Conversor 24V/5V	1	R\$ 12,99	R\$ 12,99
Módulo SIM800C.	1	R\$ 55,96	R\$ 55,96
Módulo RS485.	1	R\$ 18,20	R\$ 18,20
Bateria Li-ion 9800mAh	3	R\$ 145,52	R\$ 436,56
PCB do módulo escravo	32	R\$ 277,74	R\$ 8.887,68
Luva Ø40mm	32	R\$ 13,49	R\$ 431,68
Antena GSM GPRS 5dBi 824-960Mhz 1800-1900Mhz	1	R\$ 26,90	R\$ 26,90
Conector Ip68 6pin 250V/5 A	32	R\$ 19,71	R\$ 630,72
cabo AWG 19	50 metros	R\$ 308,89	R\$ 308,89
cabo AWG 24 blindado	50 metros	R\$ 235,16	R\$ 235,16
Margem de erro	15%		
TOTAL			R\$ 12.875,70

Fonte: Aatoria própria (2022).

Com base em um levantamento feito entre as principais empresas responsáveis pela venda de inclinômetros In-Place no Brasil, foi possível verificar que o custo do modelo proposto de projeto é, substancialmente, inferior ao valor comercial desses equipamentos. Em orçamento realizado pela empresa RST Instruments, um sistema de medição para deslocamentos laterais de solo utilizando inclinômetros In-Place capaz de monitorar 40 metros de profundidade custa cerca de 67 mil reais. Esse conjunto utiliza sensores do tipo IPI27050, e possui as seguintes características:

Figura 10 – Especificações do sensor cotado

Range	± 30°
Resolution	0.0002° (0.004 mm/m) ¹
Sensor Accuracy	± 0.002° (0.03 mm/m) ¹
Sensor Precision	± 0.0013° (0.02 mm/m) ¹ ± 0.0005° (0.01 mm/m) ²
Sensor 24 h Stability	± 0.03° mm/m ¹ ± 0.01° mm/m ²
System Precision	± 0.5 mm for 30 m IPI (15 sensors @ 2 m, 6 months, repeatability conditions in borehole)
Sensor	MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) Accelerometer
Temperature Dependent Uncertainty	± 0.016 mm/m/°C (±0.001°/°C), for ± 5° from vertical ± 0.033 mm/m/°C (±0.002°/°C), for ± 15° from vertical
Temperature Accuracy	± 0.5 °C (0°C to 60°C) ± 1.0 °C (-40°C to 60°C)
Temperature Resolution	0.06°C

Fonte: RST Instruments. MEMS Digital In-Place (2022) Inclinometer System.

Além disso, o orçamento ainda inclui um datalogger, tubo-guia em plástico ABS, hastes metálicas para o inclinômetro, cabeamento, protetor de surto e kit de olhal superior.

Outras tecnologias também permitem executar o monitoramento desses deslocamentos, como por exemplo, os ShapeArray's. Esse tipo de equipamento se diferencia dos inclinômetros In-Place por fornecer maior resolução espacial, maior precisão de deformação, maior resistência e maior facilidade e versatilidade de instalação. Isso graças a sua forma de funcionamento, já

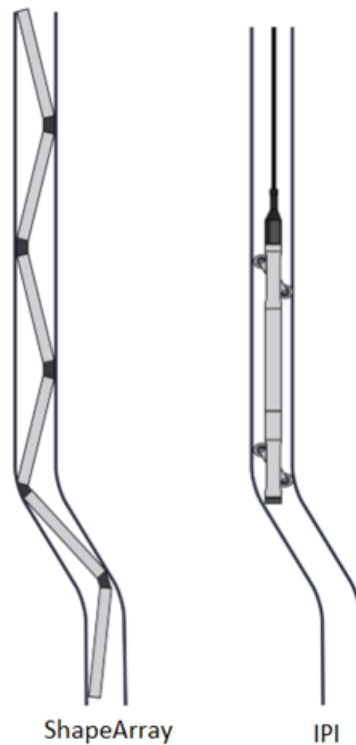
que o aparelho possui mais pontos de medição e a capacidade de “serpentear” um invólucro deformado (MESURAND, 2022), como mostra a figura 11:

Tabela 6 – Comparativo entre pontos de dados de IPI e ShapeArray

<i>aplicação vertical</i>	<i>Pontos de dados</i>
IPI (2 M de comprimento de bitola)	25
ShapeArray SAAV (0,5 m de comprimento de segmento)	100
ShapeArray SAAV (0,25 m de comprimento de segmento)	200

Fonte: Mesurand (2020).

Figura 11 – Forma de funcionamento de um IPI e um ShapeArray



Fonte: Mesurand (2020).

Mas apesar de suas vantagens, novamente o custo inviabiliza a grande acessibilidade do sistema. Por possuir uma tecnologia mais complexa e maiores benefícios ao usuário, esses equipamentos chegam a custar cerca de duas vezes mais que um Inclinômetro In-Place comum. Ao orçar o produto SAAV500/1 da empresa Measurand para dois cenários diferentes, foram obtidos os seguintes valores: 104 mil reais para opção de 18 metros de medição; 124 mil reais para opção de 29 metros de medição.

4 ANÁLISE DO MODELO PROPOSTO DO INCLINÔMETRO

4.1 Estudo térmico do conjunto

4.1.1 Descrição do teste

Levando em consideração a dissipação térmica proveniente do efeito Joule em componentes eletrônicos e o ambiente quase adiabático no qual os sensores e microcontroladores se encontram, determinou-se necessário o estudo térmico no interior das luvas. Essa análise tem como objetivo principal evitar possíveis danos causados ao sistema e imprecisões nas leituras provocados pela variação de temperatura.

Buscando obter resultados práticos relacionados a temperatura no interior da luva, um teste utilizando um módulo escravo (Microprocessador, sensor, conversor RS485) foi elaborado. Este experimento consiste em manter o sistema ligado dentro de uma luva completamente selada com silicone junto a um sensor de temperatura para captar o aumento de calor. Para isso, o próprio sensor MPU6050 foi utilizado como instrumento de medição.

Como características, o estudo possui como critério de fim de teste o momento em que o sistema alcança a estabilidade térmica ou excede a temperatura de 80°C. Além disso, definiu-se a taxa de amostragem de 30 segundos. Já com o intuito de produzir um teste com maior fiabilidade, a luva foi colocada em uma embalagem de isopor, isolando o conjunto do meio externo.

Visando obter resultados que pudessem garantir, ou não, a integridade do circuito, o módulo foi exposto ao cenário mais extremo possível, permanecendo permanentemente ligado ao longo do teste com todos os seus subcircuitos em operação.

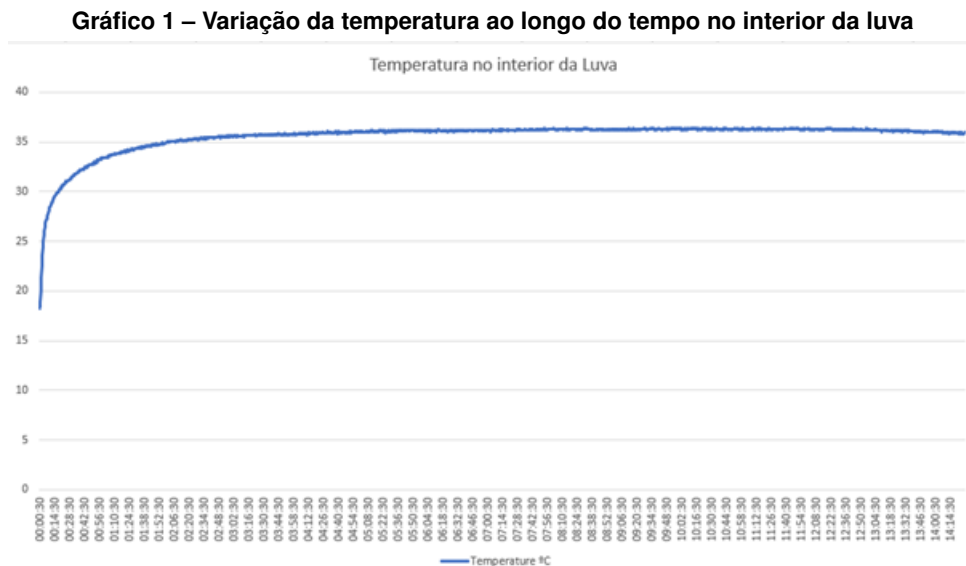
Fotografia 2 – Teste de temperatura no interior das luvas



Fonte: Autoria própria (2022).

4.1.2 Resultados obtidos

Após a coleta e o tratamento dos dados provenientes do estudo, obteve-se o seguinte gráfico:



Fonte: Autoria própria (2022).

Através do gráfico, é possível verificar que nos instantes iniciais após a alimentação do circuito houve um aumento de temperatura de forma logarítmica, alcançando, depois de aproximadamente 5 horas, a estabilidade térmica no interior da luva.

Segundo o artigo “Gradiente geotérmico” de Germán Portillo (PORTILLO,), nas camadas superficiais, o valor médio do gradiente é de 33 metros, ou seja, a cada 33 metros de profundidade, ocorre-se a elevação de 1°C.

Sabendo que o aumento da profundidade é outro fator que interfere no aumento da temperatura, foi incrementado aos valores do experimento prático, a variação térmica sofrida pelo sensor mais distante do módulo master (32 metros). Visto que essa variação é relativamente pequena para a aplicação em estudo, essa consideração não causou grandes impactos a temperatura absoluta do sistema.

Graças a isso, o estudo permitiu concluir que mesmo em um caso excepcional em que o módulo escravo permaneça ligado durante todo o tempo de funcionamento do inclinômetro, o aumento de temperatura gerado não será uma ameaça para a integridade do circuito.

4.2 Estudo de impermeabilidade das luvas

4.2.1 Descrição do teste

Por estarem posicionados em locais em que a depreciação dos materiais ocorre de maneira muito acelerada, algumas partes do sistema requerem maior nível de proteção, como

é o caso dos módulos escravos, que se encontram debaixo da terra, expostos a umidade e a variações climáticas.

Buscando comprovar a impermeabilidade do conjunto responsável por proteger os sensores do meio externo, foi proposto um teste capaz de mensurar o nível de umidade relativa do ar em ambientes extremos. Para isso, uma luva completamente selada com os conectores Ip68 e silicone foi submersa em água. No interior desse compartimento, um sensor DHT22 realizou as medidas da grandeza a ser estudada, para que, posteriormente, os valores fossem comparados com a umidade em meio externo.

Fotografia 3 – Experimento de impermeabilidade das luvas



Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.2 Resultados obtidos

Tendo o ambiente de teste montado, o conjunto foi submerso em um balde e após a coleta dos dados, foi notado um leve aumento de umidade, variando de 58.7% para 59,2%. Depois de 8 horas, o tubo plástico foi retirado do meio que se encontrava e aberto. Não foi constatado nenhum dano ao circuito ou qualquer indicativo de água no interior do compartimento.

4.3 Influência da calibração

4.3.1 Descrição do teste

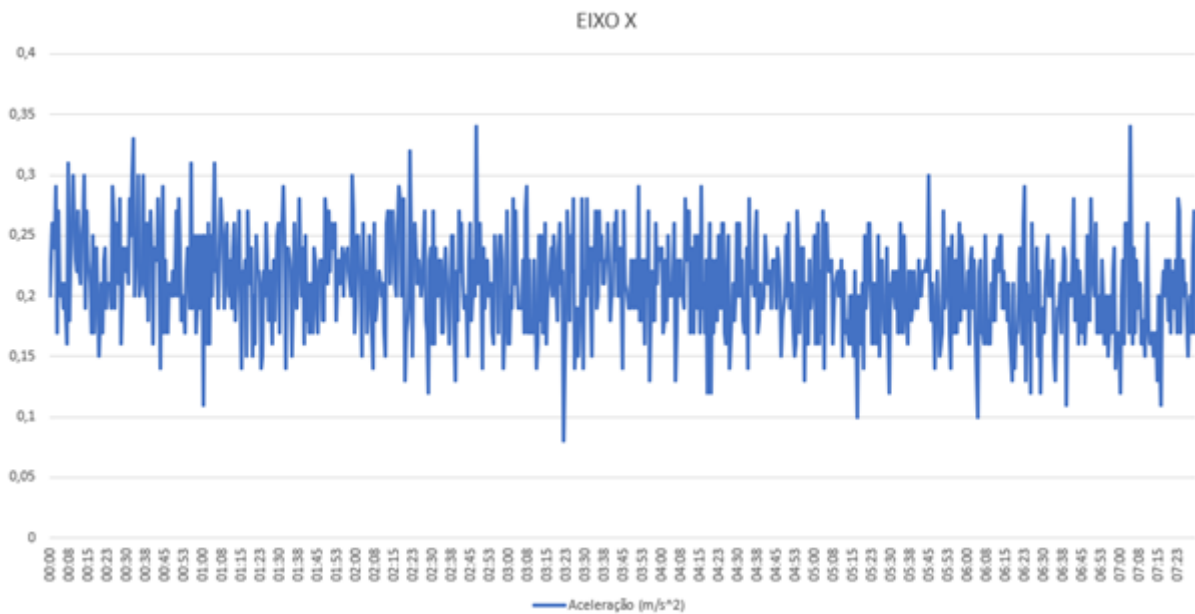
Como o objetivo do modelo proposto de inclinômetro é obter medidas confiáveis e precisas de um eventual deslocamento de solo, foi realizado um experimento para verificar a influência da etapa de calibração dos sensores.

Para a execução do teste, um acelerômetro MPU6050 foi posicionado sob uma superfície plana e nivelada, realizando medições antes e após a calibração do instrumento.

4.3.2 Resultados obtidos

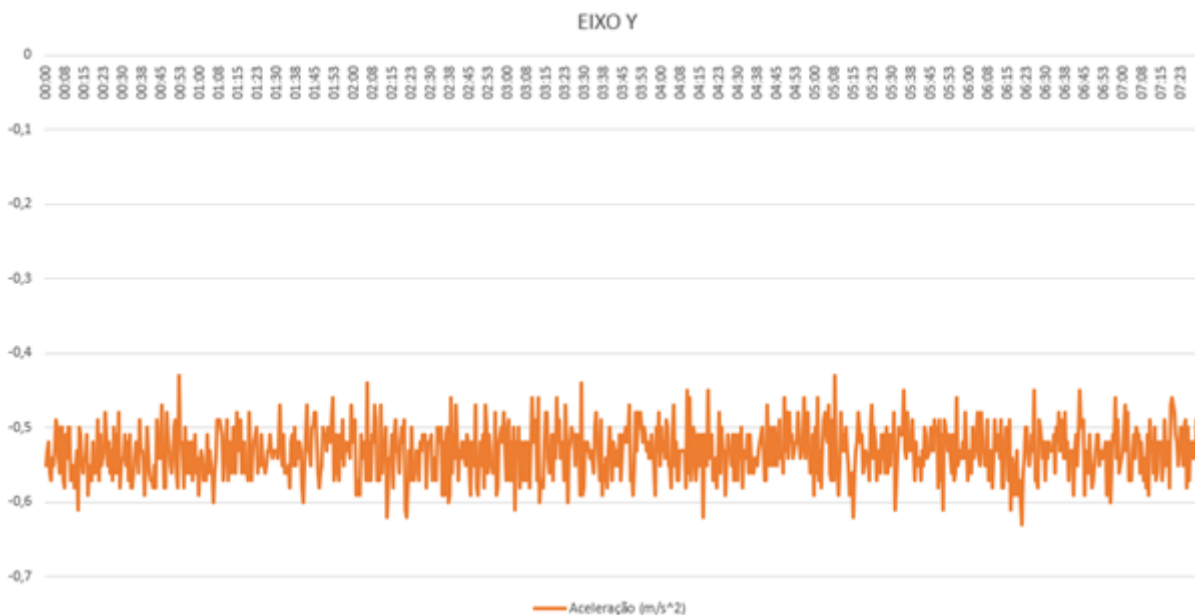
Caracterizando o funcionamento do sensor utilizando o firmware sem calibração, a primeira etapa de teste perdurou 7 horas e 30 minutos, e resultou no seguinte conjunto de dados:

Gráfico 2 – Valores de aceleração sem calibração no eixo X



Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 3 – Valores de aceleração sem calibração no eixo Y



Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 4 – Valores de aceleração sem calibração no eixo Z

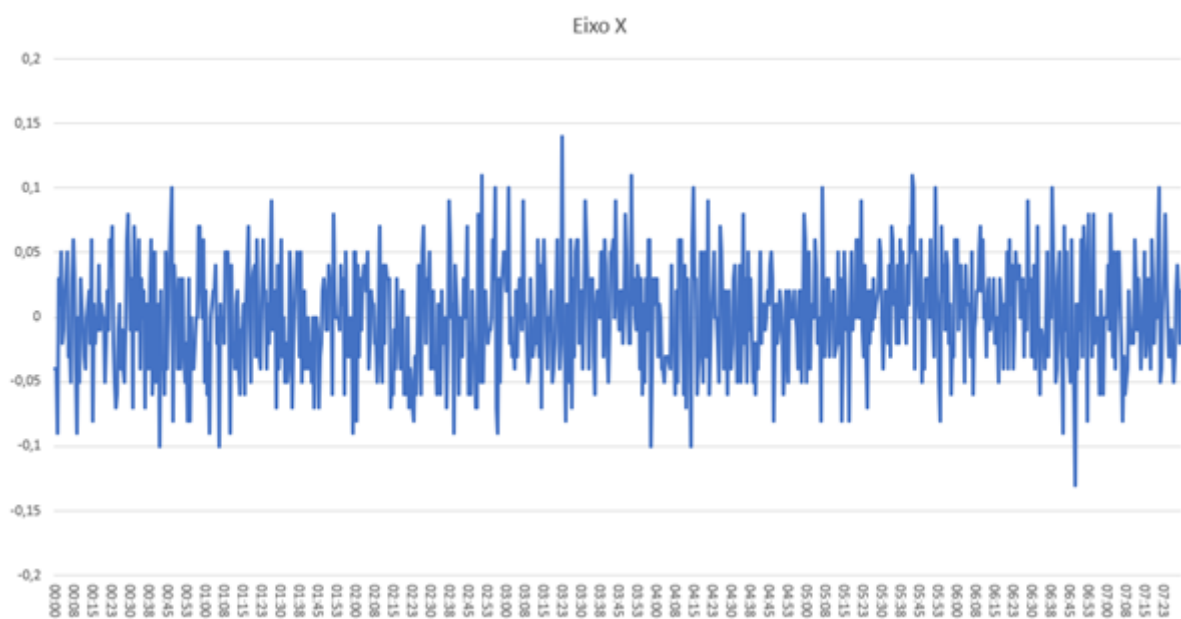


Fonte: Autoria própria (2022).

Analisando os gráficos, podemos observar que existe um desvio entre o valor obtido e esperado, já que os eixos X e Y deveriam supostamente apresentar medidas que contornam o zero absoluto e o eixo Z teria de indicar o valor da aceleração da gravidade em Curitiba-PR.

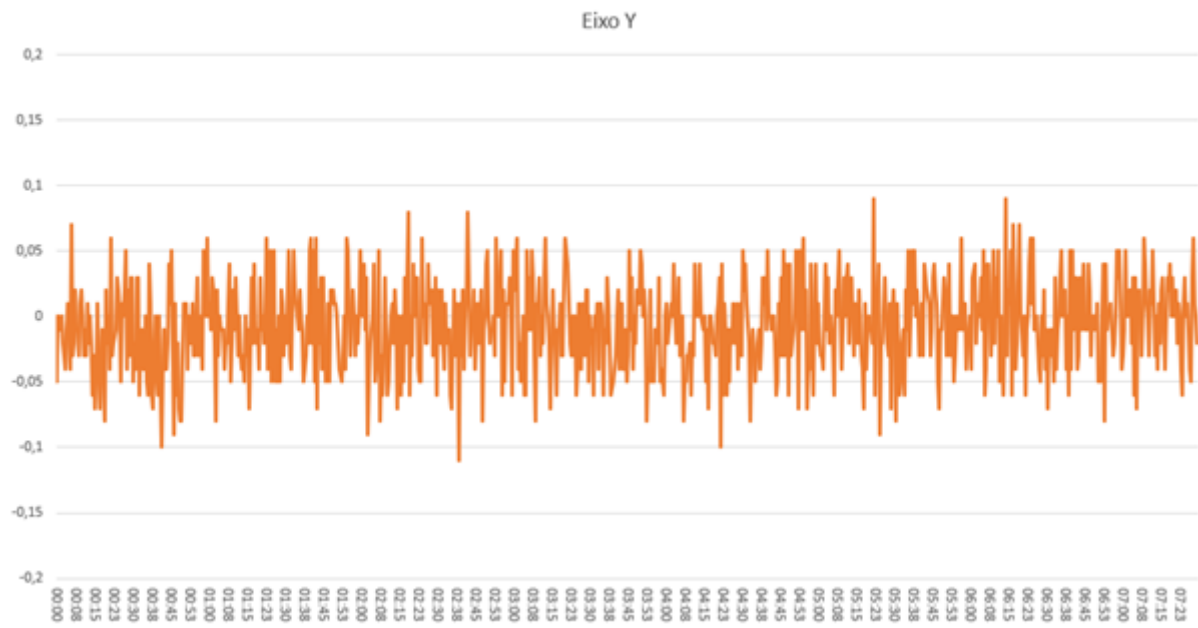
Atendendo-se para o fato de que essa diferença é potencialmente causada por um erro sistemático classificado como “Offset” na seção 2.4, a segunda parte do teste foi executada, colocando em prova a influência da calibração para a correção de falhas referentes ao zero absoluto. Os resultados foram os seguintes:

Gráfico 5 – Valores de aceleração com calibração no eixo X



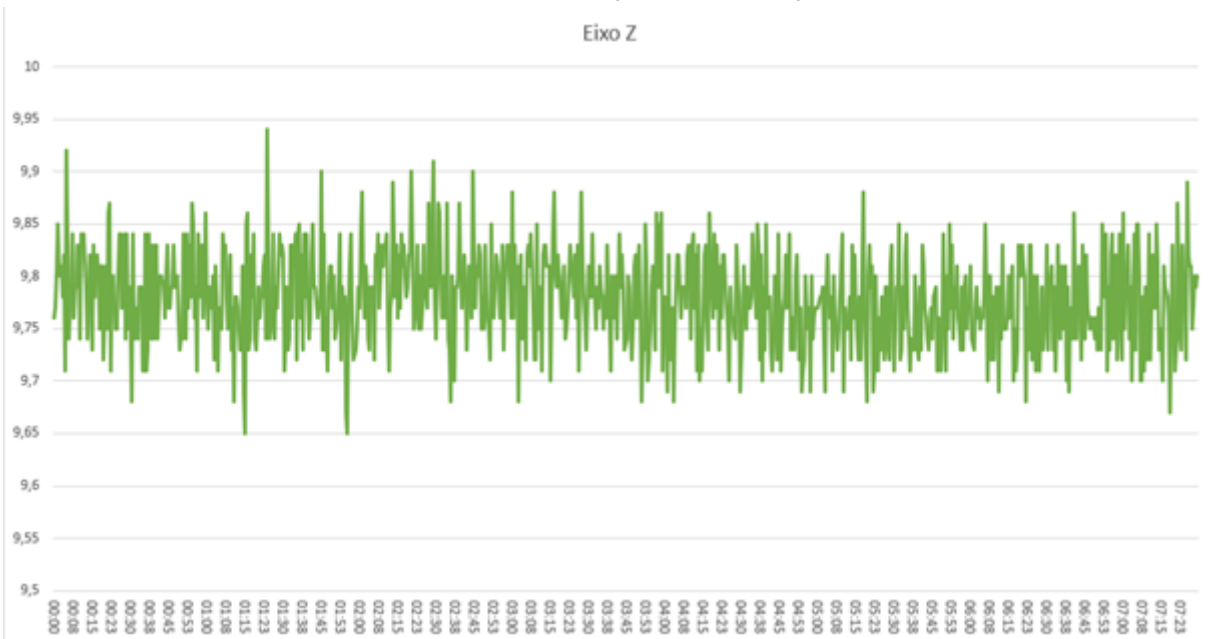
Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 6 – Valores de aceleração com calibração no eixo Y



Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 7 – Valores de aceleração com calibração no eixo Z



Fonte: Autoria própria (2022).

Com base no que foi obtido, é notável que a calibração foi bem sucedida e os erros puderam ser parcialmente corrigidos. Por outro lado, ainda é perceptível uma oscilação entre as leituras, fator analisado na seção 4.4.

4.4 Influência do filtro Média Móvel

4.4.1 Descrição do teste

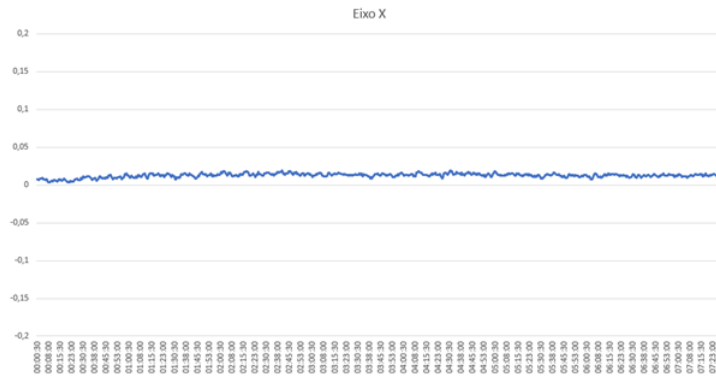
Por possuir resultados positivos no tratamento dos dados adquiridos pelos sensores em outros estudos (LI *et al.*, 2014)(LIMA, 2012), o filtro média móvel pode ser um método de grande importância para melhorar a precisão e confiabilidade das medidas. Por esse motivo, o acelerômetro MPU6050 foi submetido a um teste de filtragem.

Expondo o sensor sob os mesmos parâmetros de teste do experimento da seção 4.3, monitorou-se o comportamento do instrumento após a etapa de calibração e a implementação do filtro média móvel.

4.4.2 Resultados obtidos

Através do cálculo de desvio padrão dos gráficos anteriormente obtidos e dos resultados referentes a esse experimento (Gráfico 8, 9 e 10), foi verificado que após a filtragem o sistema indica valores mais lineares e precisos de aceleração.

Gráfico 8 – Valores de aceleração filtrados no eixo X



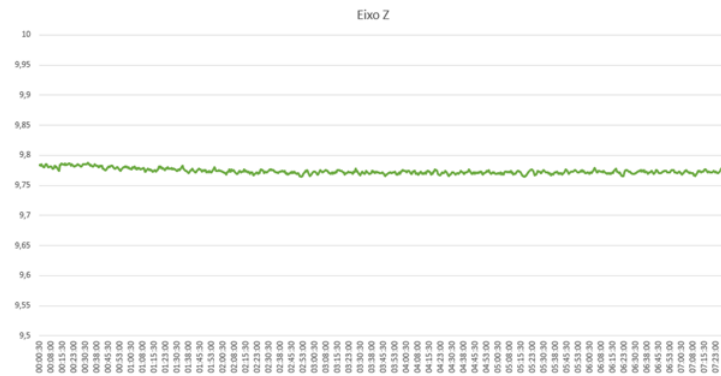
Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 9 – Valores de aceleração filtrados no eixo Y



Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 10 – Valores de aceleração filtrados no eixo Z



Fonte: Autoria própria (2022).

Com os valores de máximo e mínimo de cada eixo, constata-se que a variação de inclinação sofrida quando o sensor não realiza movimento para o eixo X, Y e Z é de $-0,0903^\circ$, $-0,0594^\circ$ e $-0,0193^\circ$, respectivamente. Esses resultados mostram uma redução muito significativa quando comparados aos valores de variação obtido no experimento da seção 4.3, que são de $-1,578^\circ$, $-0,653^\circ$ e $-0,0517$ para os mesmos eixos, evidenciando a eficácia do filtro. Por se tratar de uma angulação muito pequena para identificar um movimento de solo, a oscilação nas medições não foi considerada uma ameaça ao conjunto, apontando também, que o inclinômetro se mostra estável e é capaz de detectar mudanças de inclinação superiores a esse valor de imprecisão.

4.5 Integração do sistema

4.5.1 Descrição do teste

Por se tratar de um sistema que depende diversas funcionalidades para seu funcionamento, é de grande importância comprovar que todos os subcircuitos que compõem o conjunto estejam funcionando de forma adequada. Para isso, cada módulo foi testado separadamente, alcançando os seguintes indicadores.

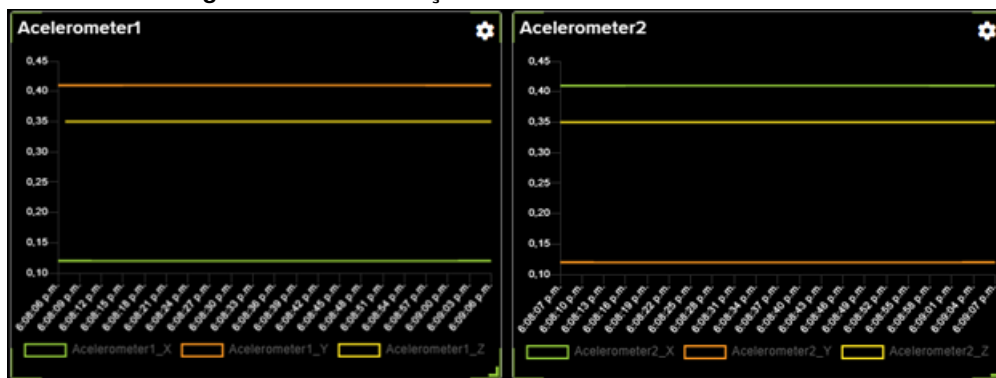
- 1. Comunicação entre o Módulo mestre e o ESP32, verificando se um dado inserido manualmente no firmware do microcontrolador foi exibido no gráfico da Adafruit.
- 2. Comunicação entre módulo mestre e módulo escravo, observando se um dado inserido implementado diretamente no firmware do ESP32 é recebido pelo ESP32 e se a resposta enviada pelo ESP32 é recebida pelo módulo mestre.
- 3. Aquisição de dados mostrando os dados recolhidos pelo sensor no terminal serial da Arduino IDE.

- 4. Verificação geral do circuito integrando o módulo master, 2 módulos escravos, a comunicação GPRS e o Dashboard para verificar se o dado coletado pelo sensor é exibido no gráfico.

4.5.2 Resultados obtidos

Começando o desenvolvimento pelo módulo mestre, as funcionalidades de conexão 2G e interfaceamento de dados foram as primeiras a serem testadas. Como resultado, obteve-se o resultado expresso na foto abaixo, cumprindo assim, o indicador 1.

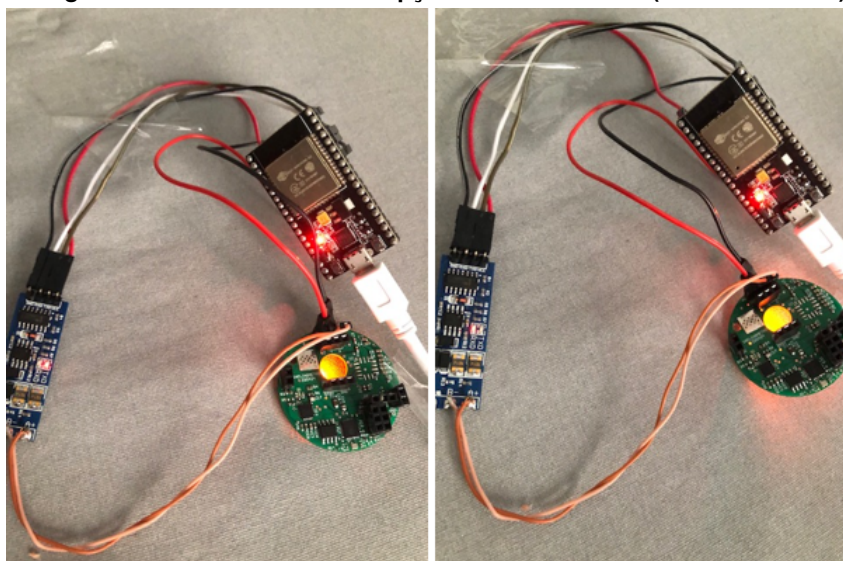
Fotografia 4 – Comunicação entre módulo mestre e dashboard



Fonte: Autoria própria (2022).

Após essa fase de elaboração, o código de programação referente a comunicação RS485 foi elaborado tanto para o módulo mestre quanto para os módulos escravos. Quando finalizado, o firmware mostrou que a etapa pôde ser concluída com sucesso, como mostra a foto a seguir:

Fotografia 5 – Transmissão e recepção de dados RS485 (LED TXD e RXD)



Fonte: Autoria própria (2022).

Em seguida, o foco foi dado ao sensor MPU e seu comportamento. Nesta etapa do projeto, foram executadas as etapas de captação de dados, calibração e filtragem, possibilitando a coleta de valores aceitáveis para a aplicação.

Figura 12 – Dados recolhidos do sensor MPU6050

```

-0.001113;0.003190;9.801227
-0.002215;0.001526;9.801178
-0.001616;0.002125;9.799336
-0.000102;0.003142;9.800492
-0.001993;0.004148;9.802043
-0.001030;0.004896;9.803287
-0.002011;0.003304;9.805215
-0.002945;0.003723;9.804138
-0.003657;0.004543;9.802863
-0.003849;0.005531;9.802815
-0.003406;0.006674;9.802994
-0.002825;0.005578;9.802784
-0.001897;0.003705;9.803353
-0.000545;0.001448;9.800103
0.000257;0.000443;9.798666
0.001053;0.000611;9.799145
    
```

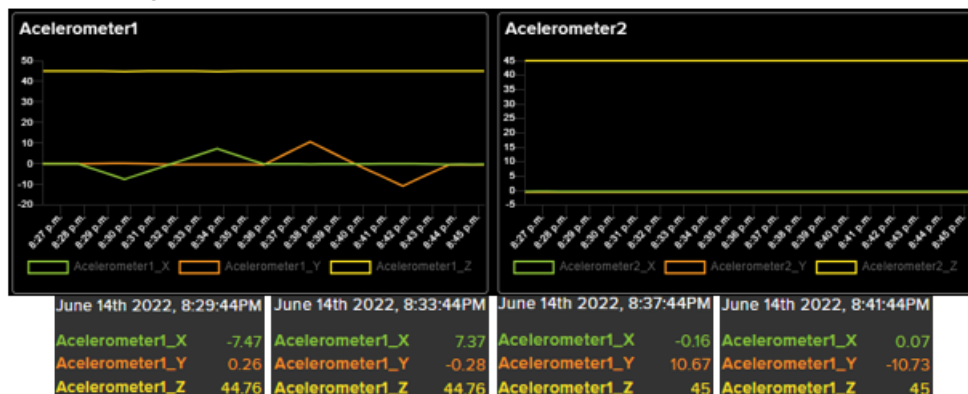
Fonte: Autoria própria (2022).

Por fim, todos os circuitos que compõem o inclinômetro foram integrados e um teste do sistema completo foi realizado.

Esse experimento contou com dois módulos escravos, um posicionado sob um caderno e outro em uma superfície plana e estática. O objetivo do estudo, além de comprovar a integração dos componentes, foi de verificar a capacidade dos sensores se manterem estáveis quando parados ou de detectar variações de inclinação.

Submetendo o sensor que se encontrava sob o caderno à uma inclinação de $\pm 7,35^\circ$ para o eixo X e $\pm 10,83^\circ$ para o eixo Y, as medidas recolhidas foram enviadas, juntas as do outro sensor, ao módulo mestre, que se encarregou da transmissão dos dados para o dashboard. A imagem a seguir mostra o resultado desse processo.

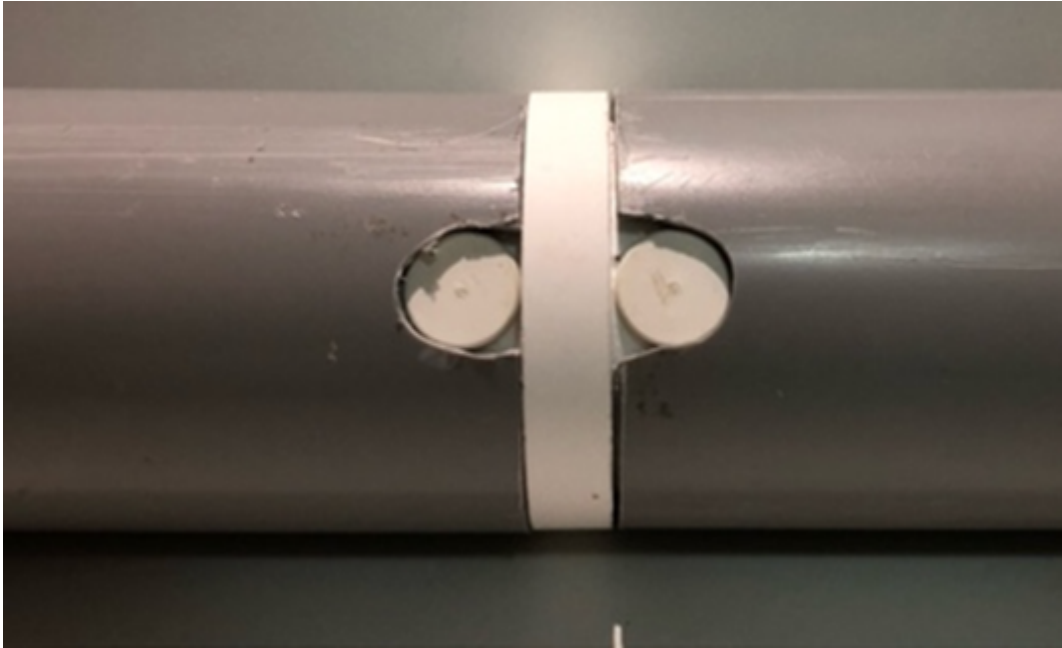
Fotografia 6 – Circuito do módulo escravo fixado e em funcionamento



Fonte: Autoria própria (2022).

Além disso, as fotos 7, 8 e 9 mostram, respectivamente, o encaixe entre os tubos-guia, o módulo escravo completo e o módulo mestre completo.

Fotografia 7 – Marcadores de orientação entre os tubos-guia



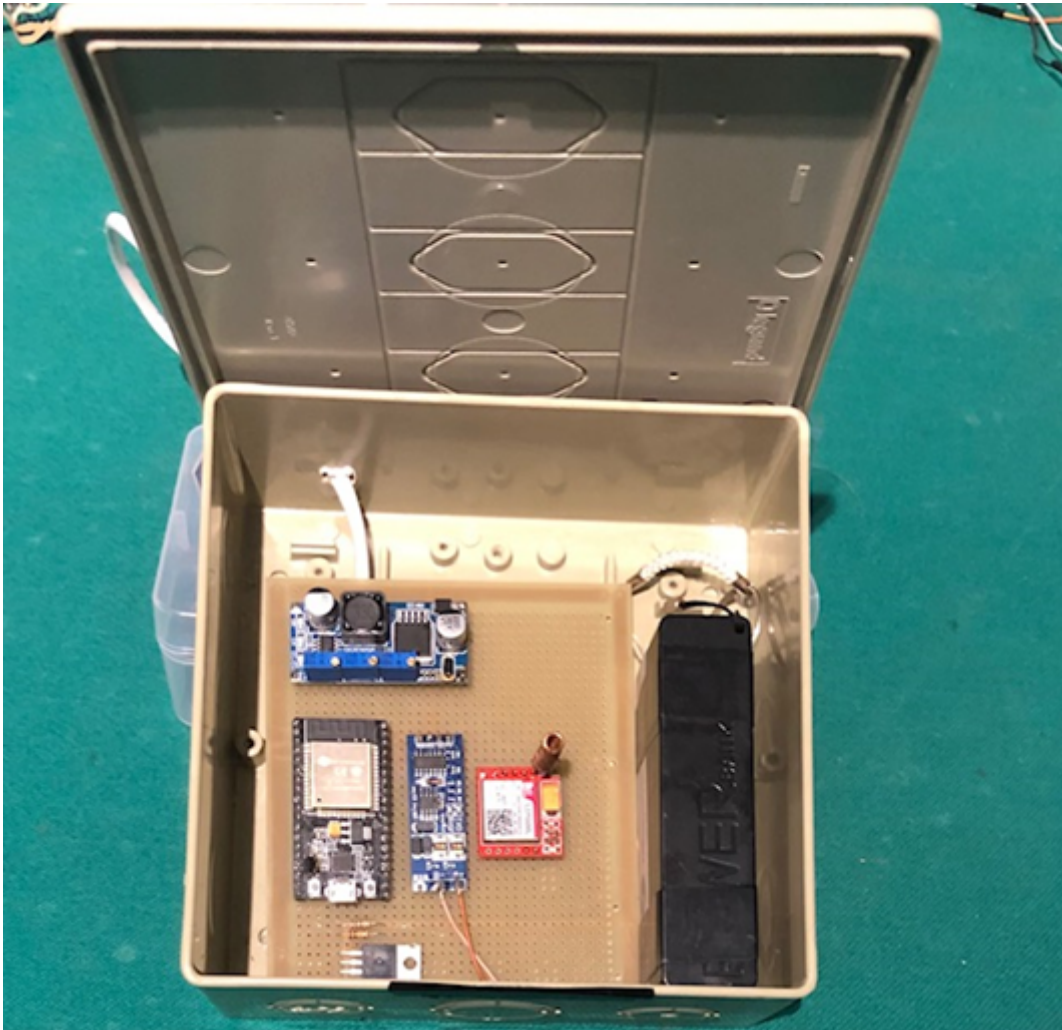
Fonte: Autoria própria (2022).

Fotografia 8 – Circuito do módulo escravo fixado e em funcionamento no interior da luva



Fonte: Autoria própria (2022).

Fotografia 9 – Módulo mestre



Fonte: Autoria própria (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Finalizado o processo de desenvolvimento do inclinômetro In-Place, podemos destacar que o protótipo pode ser instalado em aplicações que não requerem alta precisão de monitoramento. Os sensores são capazes de permanecer estáveis, detectar variações de inclinação próximas as reais e ainda são cerca de oito vezes mais baratos que os inclinômetros e 13 vezes mais acessíveis que os ShapeArray's presentes no mercado.

Por contar com um circuito projetado para a adição do sensor ADXL355, a análise de implementação desse circuito integrado ao módulo escravo será brevemente feita, suprimindo, possivelmente, os parâmetros requisitados pelo segmento de mercado que busca alta resolução.

Além disso, como os módulos MPU6050 possuem em sua composição giroscópio e sensor de temperatura, a implementação do filtro de Kalman para a redução de erros e a correção da não-linearidade em função do calor será realizada.

Devido à falta de instrumentação analítica para a execução de testes rigorosos, alguns estudos não foram realizados, mas serão executados quando possível. São eles: A susceptibilidade a ruído, precisão do inclinômetro, comparação com a instrumentação presente no mercado, interferência magnética causada pela bateria, entre outros.

REFERÊNCIAS

- A, L. *INTERPOLAÇÃO POLINOMIAL SPLINES CÚBICOS*. Disponível em: <<https://www.ime.usp.br/mat/2458/textos/splines.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2022.
- ACC, e. d. m. **Erros aleatórios e sistemático: O que é isso?** Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/resistividade-eletrica.htm>. Acesso em: 15 mai. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Relatório de segurança de barragens 2017**. Brasília, Brasil, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Relatório de segurança de barragens 2018**. Brasília, Brasil, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Relatório de segurança de barragens 2019**. Brasília, Brasil, 2020.
- AKINTADE, O. O. *et al.* Development of power consumption models for esp8266-enabled low-cost iot monitoring nodes. **Advances in Internet of Things**, Scientific Research Publishing, v. 9, n. 01, p. 1, 2019.
- ALFIAN, R. I.; MA'ARIF, A.; SUNARDI, S. Noise reduction in the accelerometer and gyroscope sensor with the kalman filter algorithm. **Journal of Robotics and Control (JRC)**, v. 2, n. 3, p. 180–189, 2021.
- ARAÚJO, G. R. de *et al.* Leis de ohm.
- BUENO¹, A. G.; ROMANO, R. A. Filtro complementar aplicado a medida de inclinação de plataformas móveis. 2014.
- CAI, Q. *et al.* Systematic calibration for ultra-high accuracy inertial measurement units. **Sensors**, MDPI, v. 16, n. 6, p. 940, 2016.
- CARMO, F. F. do *et al.* Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 145–151, 2017. ISSN 2530-0644. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1679007316301566>.
- DESENVOLVIMENTO de um inclinômetro com tecnologia mems aplicado ao monitoramento de obras geotécnicas. 2014. Dissertação (Mestrado), 2014. Engenharias. Disponível em: <http://10.0.217.128:8080/jspui/handle/tede/299>.
- DEVICES, I. A. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4**. 2019. Disponível em: <https://br.mouser.com/new/analog-devices/adi-adxl354-adxl355-accelerometers>. Acesso em: 24 mai. 2022.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1993.
- ESPINDOLA, M. O. *et al.* Método de mínimos quadrados no ensino médio. Universidade Federal da Grande Dourados, 2014.
- FONSECA, B. **Brasil registra mais de três acidentes em barragens por ano**. 2019. Disponível em: <https://apublica.org/2019/01/brasil-registra-mais-de-tres-acidentes-em-barragens-por-ano/#:~:text=No\%20Brasil>

%2C%20h%C3%A1%20em%20m%C3%A9dia,anualmente%20e%20encaminhado%20ao%20Congresso. Acesso em: 20 dez. 2020.

GLOBO. 'Houve negligência', diz MP sobre rompimento de barragens em MG. 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

GLOBO. Prejuízo com lama de barragem é de R\$ 1,2 bi para 35 cidades, diz MG. 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

GREEN, G. E.; MIKKELSEN, P. E. Deformation measurements with inclinometers. **Transportation Research Record**, n. 1169, 1988.

HANTO, D. *et al.* Real-time inclinometer using accelerometer mems. **arXiv preprint arXiv:1103.1678**, 2011.

INVENSENSE, I. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4**. 2013. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2022.

ISLAM, T. *et al.* Comparison of complementary and kalman filter based data fusion for attitude heading reference system. *In: AIP PUBLISHING LLC. AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2017. v. 1919, n. 1, p. 020002.

JUNIOR, F. P. L. *et al.* Proposta de uma rede industrial supervisionada com o modbus rs-485 utilizando o raspberry pi. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2021.

JUNIOR, T. F. d. S. Método da substituição dinâmica aplicado a solo laterítico argiloso. 2021.

KHANKALANTARY, S.; RANJBARAN, S.; EBADOLLAHI, S. Simplification of calibration of low-cost mems accelerometer and its temperature compensation without accurate laboratory equipment. **Measurement Science and Technology**, IOP Publishing, v. 32, n. 4, p. 045102, 2021.

KLECKERS, T. **Sensores piezoelétricos: qual é o ideal para minha aplicação**. 2018. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6810/sensores-piezoelétricos-qual-o-ideal-para-minha-aplicacao/>>. Acesso em: 11 mai. 2022.

LEGISLATIVO, A. D. P. **LEI Nº 14.066**. 2020.

LEMKE, J. In-place inclinometer using low-g accelerometer network. *In: GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6.

LI, C. *et al.* Use of mems accelerometers/inclinometers as a geotechnical monitoring method for ground subsidence. **Acta Geodyn. Geomater**, v. 11, n. 4, p. 337–349, 2014.

LIMA, C. V. M. V. M. Borges de. **AVR e Arduino: Técnicas de Projeto**. BRA: Clube de Autores, 2012. v. 2.

MESURAND. **ADX354/ADX355 3-Axis MEMS Accelerometers**. 2022. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2022.

MISHRA, P. *et al.* Detection of landslide using wireless sensor networks. **Central Institute of Mining and Fuel Research, Barwa Road, Dhanbad–826015, Jharkhand, India**, 2011.

PARANHOS, P. M. **Sensores GPS e Inercial por um Filtro de Kalman**. 2009. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2009.

PENZ, R. S. *et al.* Desenvolvimento de um inclinômetro com tecnologia mems aplicado ao monitoramento de obras geotécnicas. Universidade de Passo Fundo, 2014.

PORTILLO, G. **Gradiente Geotérmico**. Disponível em: <https://www.meteorologiaenred.com/pt/gradiente-geotermico.html>. Acesso em: 11 jun. 2022.

SANTOS, R. C. D. V. D. **Contribuição do setor mineral no produto interno bruto brasileiro**. 2021. Radar. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/radar/temas/mineracao/811-contribuicao-do-setor-mineral-no-produto-interno-bruto-brasileiro#:~:text=O%20trabalho%20%20C3%A9%20todo%20realizado,de%203%2C190%25%20e%203%2C182%25>. Acesso em: 17 abr. 2021.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2006.

SMITH, G. M. **Medindo choque e vibração com sensores de acelerômetro**. 2021. Disponível em: <https://dewesoft.com/br/aquisicao-de-dados/medir-choque-vibrao-com-acelermetros#piezoresistive-accelerometers>. Acesso em: 11 mai. 2022.

STARK, T. D.; CHOI, H. Slope inclinometers for landslides. **Landslides**, Springer, v. 5, n. 3, p. 339–350, 2008.

TEIXEIRA, M. M. **Resistividade elétrica**. 2017. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/resistividade-eletrica.htm>. Acesso em: 13 mai. 2022.

TELECO. **Redes 5G II: Comparativo entre as Redes Móveis Atuais e a Futura**. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredes5g2/pagina_4.asp. Acesso em: 24 mai. 2022.

TEVES, A. d. C. **Otimização de acelerômetros MEMS eletroestáticos de alto desempenho**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.

TÙNG, H. T.; THANH, V. V. Human-computer interaction based on imu sensors. **Tp chí Khoa hc và Công ngh-Đi hc Đà Nng**, p. 71–74, 2015.

VINHAIS, C. A. C. **Sistemas de Aquisição de Dados**. [S.l.]: Bookman Editora, 2005. ISBN DEF1/ISEP. Acesso em: 11 mai. 2022.

WELCH, G.; BISHOP, G. *et al.* An introduction to the kalman filter. Chapel Hill, NC, USA, 1995.

ZHU, J. *et al.* An improved calibration technique for mems accelerometer-based inclinometers. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 2, p. 452, 2020.