



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Felipe Tavares Ribeiro

Desenvolvimento de um inclinômetro para monitoramento de barragens

Blumenau
2024

Felipe Tavares Ribeiro

Desenvolvimento de um inclinômetro para monitoramento de barragens

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Ciro André Pitz, Dr.

Blumenau

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Ribeiro, Felipe Tavares

Desenvolvimento de um inclinômetro para monitoramento de barragens / Felipe Tavares Ribeiro ; orientador, Ciro André Pitz, 2024.

56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Acelerômetro.
3. Inclinômetro. 4. Monitoramento de barragens. I. Pitz,
Ciro André. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Felipe Tavares Ribeiro

Desenvolvimento de um inclinômetro para monitoramento de barragens

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 19 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Ciro André Pitz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Adão Boava, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Daniel Alejandro Ponde Saldías, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente aos meus pais, Rosenilda Santos Tavares e Carlos Aparecido Ribeiro dos Santos, que, sob muito esforço, sempre colocaram os meus estudos em primeiro lugar e permitiram que hoje eu pudesse estar finalizando este ciclo tão importante e valioso em minha vida. Mesmo distante, sempre se fizeram presente em todos os momentos e sem eles nada disso seria possível.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Ciro André Pitz, por todas as orientações e ensinamentos valiosos. Sua pronta disponibilidade e conhecimento foram imprescindíveis para me guiar no desenvolvimento e execução deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um inclinômetro para o monitoramento de barragens. O objetivo principal consiste em desenvolver um inclinômetro baseado em acelerômetros, capaz de monitorar alterações na inclinação das estruturas de barragens. É projetada uma estrutura mecânica modular e implementado um sistema embarcado que estima os ângulos de inclinação a partir de dados de aceleração. Um protótipo funcional é desenvolvido e submetido a ensaios controlados que simulam situações semelhantes às encontradas em um ambiente de medição de inclinação em barragens. Os resultados demonstram que o dispositivo é capaz de identificar cenários distintos de inclinação por meio do algoritmo de detecção desenvolvido, emitindo os alertas correspondentes a cada um dos cenários considerados.

Palavras-chave: acelerômetro; inclinômetro; monitoramento de barragens.

ABSTRACT

The present work addresses the development of an inclinometer for monitoring dams. The main objective is to develop an inclinometer based on accelerometers, capable of monitoring changes in the inclination of dam structures. A modular mechanical structure is designed, and an embedded system is implemented that estimates inclination angles from acceleration data. A functional prototype is developed and subjected to controlled tests that simulate situations similar to those found in an inclination measurement environment in dams. The results show that the device is capable of identifying distinct inclination scenarios through the developed detection algorithm, issuing the corresponding alerts for each of the considered scenarios.

Keywords: accelerometer; dam monitoring; inclinometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Posicionamento do tubo.	13
Figura 2 – Método a Jusante.	16
Figura 3 – Método por Montante.	16
Figura 4 – Método por Linha de Centro.	17
Figura 5 – Projeto original de inclinômetro de Leonardo da Vinci.	18
Figura 6 – Inclinômetro GDX 3A1.	19
Figura 7 – Inclinômetro <i>in-place</i> ZCT-CX300.	20
Figura 8 – MPU-6050	23
Figura 9 – Desenvolvimento 3D.	25
Figura 10 – Guias no tubo.	25
Figura 11 – Tubos de PVC.	26
Figura 12 – Processo de montagem.	27
Figura 13 – Estrutura finalizada.	27
Figura 14 – Esquemático do sistema.	28
Figura 15 – Conexão no módulo MPU6050.	30
Figura 16 – Vista lateral da sonda de medição.	30
Figura 17 – Vista frontal da sonda de medição.	30
Figura 18 – Inserção da primeira sonda no tubo.	31
Figura 19 – Inserção da segunda sonda no tubo com todos os fios em seu interior.	31
Figura 20 – Sondas inseridas.	32
Figura 21 – Medições obtidas no ângulo de 25°.	33
Figura 22 – Medições obtidas no ângulo de 25° após filtragem e correção do erro sistemático.	35
Figura 23 – Inclinação gradual.	36
Figura 24 – Inclinação rápida e retorno.	37
Figura 25 – Inclinação rápida e permanência.	38
Figura 26 – Fluxograma do funcionamento do sistema.	39
Figura 27 – Curva de medição obtida no primeiro ensaio de inclinação gradual.	43
Figura 28 – Curva de medição obtida no segundo ensaio de inclinação gradual.	43
Figura 29 – Curva de medição obtida no terceiro ensaio de inclinação gradual.	44
Figura 30 – Alerta emitido durante a detecção de inclinação gradual.	44
Figura 31 – Curva de medição obtida no primeiro ensaio de inclinação rápida e retorno.	45
Figura 32 – Curva de medição obtida no segundo ensaio de inclinação rápida e retorno.	45
Figura 33 – Curva de medição obtida no segundo ensaio de inclinação rápida e retorno.	46
Figura 34 – Alerta emitido durante a detecção de inclinação rápida e retorno.	46

Figura 35 – Curva de medição obtida no primeiro ensaio de inclinação rápida e permanência.	47
Figura 36 – Curva de medição obtida no segundo ensaio de inclinação rápida e permanência.	47
Figura 37 – Curva de medição obtida no terceiro ensaio de inclinação rápida e permanência.	48
Figura 38 – Alerta emitido durante a detecção de inclinação rápida e permanência.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre métodos tradicionais de monitoramento de barragens e um inclinômetro baseado em acelerômetros.	21
Tabela 2 – Média, erro sistemático e desvio padrão para cada faixa angular.	34
Tabela 3 – Média, erro sistemático e desvio padrão para ângulos compreendidos entre 0° e 80° , com intervalos de 10° , após correção do erro sistemático e filtragem.	41
Tabela 4 – Média, erro sistemático e desvio padrão para ângulos compreendidos entre $2,5^\circ$ e $82,5^\circ$, com intervalos de 10° , após correção do erro sistemático e filtragem.	41
Tabela 5 – Média, erro sistemático e desvio padrão para ângulos compreendidos entre 5° e 85° , com intervalos de 10° , após correção do erro sistemático e filtragem.	42
Tabela 6 – Média, erro sistemático e desvio padrão para ângulos compreendidos entre $7,5^\circ$ e $87,5^\circ$, com intervalos de 10° , após correção do erro sistemático e filtragem.	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	BARRAGEM DE MINERAÇÃO	15
2.1.1	Métodos Construtivos	15
2.1.1.1	<i>Método a jusante</i>	15
2.1.1.2	<i>Método por montante</i>	16
2.1.1.3	<i>Método por linha de centro</i>	17
2.2	INCLINÔMETROS	17
2.2.1	Inclinômetros convencionais	18
2.2.2	Inclinômetro <i>In-Place</i> (IIP)	19
2.3	COMPARATIVO COM OS MÉTODOS ATUALMENTE UTILIZADOS NA MINERAÇÃO	21
2.4	ACELERÔMETRO, GIROSCÓPIO E SENSOR MPU-6050	21
3	SISTEMA PROPOSTO	24
3.1	PROJETO E MONTAGEM MECÂNICA	24
3.1.1	Projeto 3D	24
3.1.2	Montagem mecânica	26
3.2	DESENVOLVIMENTO ELETRÔNICO	28
3.2.1	Esquemático de conexão do sistema	28
3.2.2	Montagem das sondas	29
3.3	SOFTWARE	32
3.3.1	Situação 1 - Inclinação gradual	35
3.3.2	Situação 2 - Inclinação rápida e retorno aos valores iniciais	36
3.3.3	Situação 3 - Inclinação rápida e permanente	36
3.4	ALGORITMO DE DETECÇÃO DE EVENTOS	37
4	RESULTADOS	41
4.1	ESTIMAÇÃO DOS ÂNGULOS	41
4.2	DETECÇÃO DE EVENTOS	42
4.2.1	Inclinação gradual	42
4.2.2	Inclinação rápida e retorno	44
4.2.3	Inclinação rápida e permanência	46
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50

ANEXO A – Código do sistema proposto 53

1 INTRODUÇÃO

Barragens de rejeito de mineração são estruturas geotécnicas construídas a fim de realizar o armazenamento dos resíduos provenientes do processo de extração ou beneficiamento do minério (WERNECK, 2019). Observa-se, nos últimos anos, um aumento no número de acidentes decorrentes deste processo de armazenamento dos rejeitos de mineração, como o rompimento das barragens, gerando perdas humanas e ambientais irreparáveis (SILVA, 2019).

Conforme estabelecido pela lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010), a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) tem por objetivo garantir a segurança e a integridade das barragens de rejeitos, assegurando monitoramento constante, controle e determinações envolvendo essas estruturas. Esta lei estabelece as responsabilidades dos órgãos fiscalizadores, dos empreendedores e dos usuários em relação à segurança das barragens, prevê a elaboração de planos de segurança e emergências, além de estabelecer requisitos técnicos que visam diminuir os riscos associados a essas obras de engenharia.

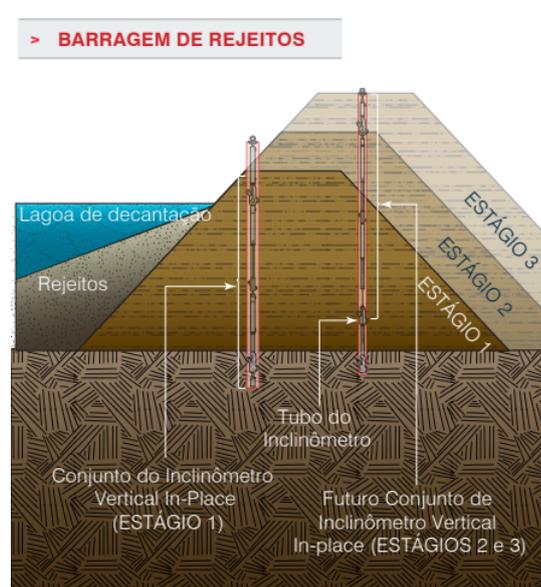
Segundo a Lei Federal nº 12.334/2010, as barragens são classificadas por categorias de risco, dano potencial associado (DPA) e pelo seu volume, por meio de critérios e métodos estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (BRASIL, 2010). Nesse contexto, se torna imprescindível e obrigatório que as empresas que possuem barragens realizem o processo de monitoramento, análise e controle sobre a situação em que se encontram essas estruturas. Esse monitoramento se dá de diversas maneiras e métodos, com instrumentos manuais e/ou automatizados.

A Resolução nº 95 da Agência Nacional de Mineração (ANM) (ANM, 2022) determina que, barragens de mineração classificadas com DPA alto, o empreendedor deve manter um sistema automatizado de monitoramento de instrumentação. Esse sistema deve ser adequado à complexidade da estrutura e operar em tempo real de forma contínua, incluindo redundância na alimentação de energia, conforme os critérios do projetista. A responsabilidade pela definição da tecnologia, dos instrumentos e dos processos de monitoramento é do empreendedor (ANM, 2022).

Um dos métodos de monitoramento mais utilizados por empresas de mineração consiste na realização de um furo no corpo da barragem a fim de instalar um tubo perpendicular ao topo da barragem, o qual pode ter comprimentos variados. Na Figura 1 é possível observar a barragem e o posicionamento do tubo. É nesta estrutura de tubo que os instrumentos de medição são instalados com o objetivo de coletar dados sobre a integridade das estruturas. Os inclinômetros são normalmente instalados nos tubos inseridos na barragem para detectar deslocamentos e inclinações ao longo do tempo. A implementação de inclinômetros baseados em acelerômetros e giroscópios oferece vantagens significativas no monitoramento de barragens. Esses sensores apresentam alta sensibilidade, permitindo a detecção de pequenas variações na inclinação e vibração, o que é crucial para identificar

deslocamentos iniciais que podem indicar riscos estruturais (PENZ, 2013). Além disso, acelerômetros e giroscópios, especialmente os do tipo MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), têm um baixo consumo de energia, possibilitando operações contínuas em locais remotos que dependem de fontes de energia limitadas. Outra vantagem importante é a robustez desses dispositivos, que são projetados para resistir a interferências como ruídos e vibrações (BENEDETTI; RUWER, 2020), garantindo medições precisas mesmo em condições adversas, como as encontradas em ambientes de mineração em que estão inseridas as barragens de rejeito.

Figura 1 – Posicionamento do tubo.



Fonte: (RST INSTRUMENTS, 2021).

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo que proporcione, em tempo real, medições de inclinação existentes numa estrutura de barragem de mineração. O dispositivo proposto será implementado através de uma estrutura modular em que sondas contendo acelerômetros e giroscópios são acopladas em série no interior de um tubo. A partir das medições de aceleração dessas sondas, será possível estimar a inclinação total do tubo, permitindo avaliar a integridade da barragem. Para o processamento dos sinais provenientes dos acelerômetros e giroscópios, será desenvolvido um algoritmo para estimar o ângulo de inclinação, que será implementado em um sistema embarcado utilizando a placa de desenvolvimento Arduino Uno R3. Assim, o desenvolvimento deste protótipo não apenas visa proporcionar medições precisas e em tempo real da inclinação da barragem, mas também contribui significativamente para a segurança das operações de mineração. Com o uso de um protótipo capaz de identificar inclinações de maneira precisa, o dispositivo permitirá uma resposta rápida a alterações na integridade da barragem como possíveis colapsos, minimizando riscos e promovendo a segurança de

trabalhadores e comunidades ao redor.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um inclinômetro baseado em acelerômetros para o monitoramento de barragens, contribuindo para a prevenção de falhas e aumento da segurança em barragens de mineração.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- Projetar a estrutura mecânica do inclinômetro, garantindo um *design* modular;
- Desenvolver um sistema embarcado capaz de estimar o ângulo de inclinação a partir dos sensores de aceleração;
- Implementar um protótipo funcional do inclinômetro projetado;
- Avaliar o desempenho do protótipo no contexto de monitoramento de barragens.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 2 será abordada a fundamentação teórica, com uma revisão de literatura sobre o monitoramento de barragens, com ênfase no uso de sensores, como acelerômetros. O Capítulo 3 detalha o sistema proposto, que consiste em um protótipo de um inclinômetro para a detecção de movimentações em barragens. O Capítulo 4 é dedicado à discussão dos resultados, analisando os dados coletados durante os testes com o protótipo e comparando-os com a literatura existente. Por fim, o Capítulo 5 apresenta a conclusão, onde são destacadas as contribuições do trabalho, as dificuldades e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BARRAGEM DE MINERAÇÃO

Segundo a ANM, as barragens de mineração são estruturas projetadas para armazenar e conter líquidos ou misturas de líquidos e sólidos gerados durante o processo de beneficiamento de minérios. Essas barragens podem ser construídas com aterros convencionais ou com os próprios rejeitos produzidos pelas operações mineradoras, dependendo da técnica e dos materiais disponíveis. A escolha do método construtivo visa garantir tanto a estabilidade quanto a segurança da estrutura ao longo de sua vida útil, minimizando riscos operacionais e ambientais.

De acordo com (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016), em comparação com barragens comuns ou convencionais, que realizam o processo de barrar água, as barragens de rejeito de mineração são responsáveis por conter/armazenar rejeitos de processos minerais diversos, podendo abranger um leque que vai desde rejeitos granulares como materiais arenosos até os popularmente conhecidos por lama, os solos de granulometria fina e alta plasticidade.

2.1.1 Métodos Construtivos

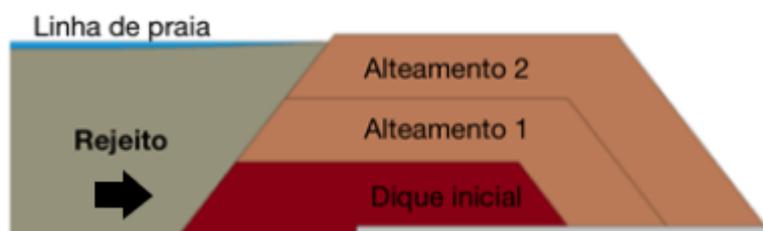
Conforme a ANM, existem três métodos principais para a construção de barragens de mineração: alteadas a jusante, por montante e por linha de centro. Cada um desses métodos apresenta características específicas que influenciam tanto o processo construtivo quanto a segurança e a estabilidade ao longo da vida útil da barragem. Nas seções a seguir, serão abordados os princípios de funcionamento, as vantagens e as limitações de cada técnica, destacando como essas escolhas impactam na gestão dos rejeitos e na integridade estrutural da barragem. Segundo a ANM, dentre os métodos descritos a seguir, o mais estável é o método de construção a jusante, método em que o alteamento da estrutura da barragem é realizado em direção oposta ao de reservatório de rejeitos, proporcionando uma estrutura mais estável. Por outro lado, o método que apresenta maior risco é o método por montante, uma vez que a barragem é alteada em direção ao rejeito, utilizando-o de maneira compactada de modo a ir elevando aos níveis em que é necessário.

2.1.1.1 Método a jusante

No método a jusante, a construção se inicia com um dique de partida, e, nas etapas seguintes, os rejeitos e a fração de areia são lançados para a área localizada a jusante do dique. Segundo (ARAÚJO, 2006), esse método oferece vantagens importantes, como maior controle sobre o lançamento e a compactação dos materiais. Um dos principais benefícios é que o alteamento da barragem não ocorre sobre os rejeitos previamente depositados, o que reduz o risco de instabilidades. Além disso, durante o processo de alteamento, é

possível estender os sistemas de drenagem interna, garantindo o controle da linha de saturação. Essa abordagem contribui significativamente para aumentar a estabilidade da estrutura, minimizando o risco de falhas ao longo do tempo. Na Figura 2 tem-se o método de construção a jusante.

Figura 2 – Método a Jusante.



Fonte: Adaptado de (CARDOZO; RUVÉR; GEHLING, 2019).

2.1.1.2 Método por montante

No método por montante, o alteamento é feito por meio de degraus construídos com os próprios rejeitos, o que faz com que o volume depositado aumente à medida que a barragem se eleva. Segundo (ARAÚJO, 2006), apesar de ser amplamente utilizado pelas mineradoras, esse método apresenta limitações no controle do processo construtivo, o que eleva significativamente os riscos para a segurança da estrutura. A estabilidade depende dos rejeitos já depositados, o que pode resultar em maior vulnerabilidade a falhas ao longo do tempo. Através da Figura 3 pode-se observar o método de construção de barragens por montante.

Figura 3 – Método por Montante.



Fonte: Adaptado de (CARDOZO; RUVÉR; GEHLING, 2019).

2.1.1.3 Método por linha de centro

O método de linha de centro envolve a construção e o alteamento da barragem tanto no sentido a montante quanto a jusante, seguindo um eixo vertical conhecido como linha de centro. Esse eixo é posicionado sobre os rejeitos depositados a montante e também sobre a estrutura do próprio barramento a jusante. Esse método é considerado uma alternativa intermediária, buscando equilibrar as vantagens e minimizar as limitações dos métodos exclusivamente a montante e a jusante, garantindo maior controle construtivo e estabilidade (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016). Através da Figura 4 observa-se a representação do método construtivo por linha de centro.

Figura 4 – Método por Linha de Centro.



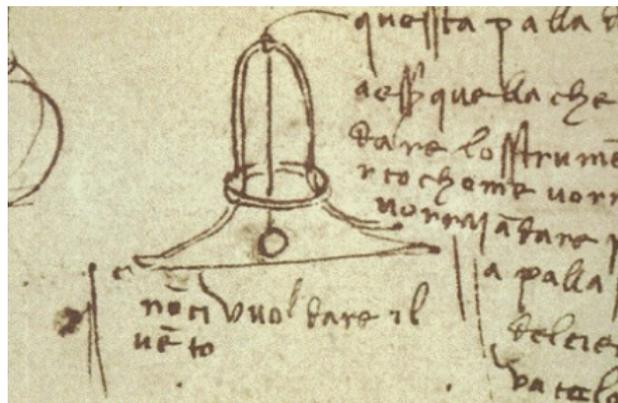
Fonte: Adaptado de (CARDOZO; RUVIER; GEHLING, 2019).

2.2 INCLINÔMETROS

Conforme (GARZEDIN, 2022), inclinômetros são instrumentos utilizados para medir deslocamentos laterais em solos e rochas, desempenhando um papel essencial no monitoramento da estabilidade de diversas estruturas. Além de serem aplicados na análise de encostas e escavações, também são amplamente empregados em diques, aterros e outras obras de engenharia geotécnica. Sua função é detectar deformações que possam indicar riscos de instabilidade, permitindo intervenções preventivas e garantindo maior segurança estrutural.

O uso de inclinômetros gera interesse há bastante tempo. Um exemplo clássico é o dispositivo criado por Leonardo da Vinci entre os anos de 1483 e 1486, cuja réplica foi preservada até hoje. Da Vinci desenvolveu o inclinômetro para monitorar a posição das correntes de ar em suas máquinas voadoras. O funcionamento dependia de uma pequena esfera, alojada no interior de uma cúpula de vidro, que precisava permanecer no centro da cúpula para que a estrutura atingisse e mantivesse a posição horizontal, essencial para o equilíbrio durante o voo (KRELLING, 2006). Por meio da Figura 5, é possível observar o inclinômetro desenvolvido por Leonardo da Vinci.

Figura 5 – Projeto original de inclinômetro de Leonardo da Vinci.



Fonte: (KRELLING, 2006).

Com os avanços tecnológicos, os inclinômetros mais utilizados atualmente são desenvolvidos com técnicas de microeletrônica. A maioria desses dispositivos baseia sua construção em acelerômetros, que se destacam por sua alta precisão, tamanho compacto e confiabilidade técnica. O princípio de funcionamento dos acelerômetros está relacionado à aceleração gravitacional exercida sobre os corpos. Essa ação é percebida pela força de equilíbrio que um corpo exerce na tentativa de retornar ao estado de repouso. A inclinação pode ser determinada diretamente, com base no deslocamento relativo entre dois pontos – um fixo na vertical devido à gravidade. Alternativamente, o cálculo pode ser indireto, considerando a força necessária para manter o corpo fora do seu estado natural de repouso (PENZ, 2013).

2.2.1 Inclinômetros convencionais

Nos inclinômetros convencionais, as leituras são realizadas manualmente por meio de sondas conhecidas como inclinômetros torpedos. Esses dispositivos são inseridos no interior do tubo inclinométrico até alcançar sua base. Durante a subida (o dispositivo é inserido até o final dos tubos), os dados de inclinação são coletados em intervalos regulares, geralmente a cada metro. Após a coleta, essas informações são processadas e convertidas em valores de deslocamento horizontal, permitindo a análise da estabilidade da estrutura monitorada (GARZEDIN, 2022). Através da Figura 6, observa-se um inclinômetro comumente utilizado na mineração não magnética, hidrologia, campo petrolífero, campo de carvão e geologia, o GDX 3A1. Este inclinômetro é capaz de transmitir valores a longas distâncias de forma precisa e estável, podendo ir a profundidades de até 1200 metros.

Figura 6 – Inclinômetro GDX 3A1.



Fonte: (MECHANICAL, s.d.).

2.2.2 Inclinômetro *In-Place* (IIP)

O inclinômetro *in-place* é composto por um ou dois sensores de inclinação instalados em um tubo de aço inoxidável. Esses sensores são fixados em suportes com rodas, que permitem sua movimentação suave no interior do tubo inclinométrico para medir continuamente deformações. Os módulos são conectados entre si por meio de cabos de aço inox, formando uma coluna de instrumentos que realiza monitoramento continuamente. Os inclinômetros *in-place* são muito utilizados para acompanhar deslizamentos de terra e deslocamentos do solo, além de monitorar a estabilidade estrutural de barragens, muros, anteparas, postes e mastros (NOVATEST, 2020). A Figura 7 apresenta um inclinômetro *in-place* produzido pela empresa Shanghai Zhichuan Electronic Technology, modelo ZCT-CX300. Este inclinômetro é composto por uma sonda sensora e tem faixa de medição de ± 30 graus.

Figura 7 – Inclinômetro *in-place* ZCT-CX300.



Fonte: (iZC-Tech, 2023).

2.3 COMPARATIVO COM OS MÉTODOS ATUALMENTE UTILIZADOS NA MINE- RAÇÃO

A fim de compreender a inovação proposta neste trabalho, a Tabela 1 compara os métodos de monitoramento de barragens tradicionalmente utilizados com o inclinômetro proposto, destacando os benefícios técnicos e econômicos da solução apresentada.

	Métodos tradicionais	Inclinômetro a base de acelerômetros
Custo	Elevado (equipamentos especializados e instalação complexa)	Baixo (componentes acessíveis, como acelerômetros e microcontroladores)
Instalação	Necessita mão de obra especializada e equipamentos robustos.	Pode ser instalado em estruturas existentes sem grandes adaptações.
Precisão	Alta, com instrumentos como piezômetros e radares de deslocamento.	Alta, dependendo da calibração e sensibilidade do sensor utilizado.
Monitoramento	Depende de sistemas adicionais para comunicação e processamento.	Possível com sistemas simples, integrando comunicação sem fio, como Wi-Fi ou LoRa.
Manutenção	Complexa e geralmente realizada por especialistas.	Simples, com substituição fácil de componentes em caso de falha.
Energia	Necessidade de haver infraestrutura de energia dedicada.	Baixo consumo; pode ser alimentado por baterias ou painéis solares.
Escalabilidade	Expansão envolve custos elevados e trabalho complexo.	Alta; novos sensores podem ser adicionados ao sistema com baixo custo.
Inovação	Métodos tradicionais, amplamente utilizados.	Fácil integração com novas tecnologias, como IoT e sistemas inteligentes.

Tabela 1 – Comparação entre métodos tradicionais de monitoramento de barragens e um inclinômetro baseado em acelerômetros.

2.4 ACELERÔMETRO, GIROSCÓPIO E SENSOR MPU-6050

Acelerômetros são dispositivos projetados para medir a aceleração de corpos em movimento (dinâmico) e em repouso (estático). Eles são amplamente empregados em sistemas de posicionamento, sensores de inclinação e vibração. Um exemplo prático e

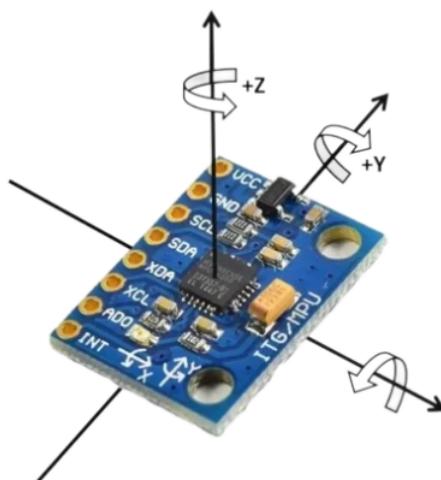
familiar de seu uso está nos smartphones, onde a tela se ajusta automaticamente de acordo com o ângulo em que o dispositivo é posicionado em relação à gravidade. Esse recurso permite que o display alterne entre os modos retrato e paisagem, melhorando a usabilidade e adaptando-se às preferências do usuário (LAGE; SEGUNDO, 2015).

Conforme (LAGE; SEGUNDO, 2015), ao colocar um acelerômetro em posição horizontal numa mesa, ele medirá uma força de 1G, onde G representa a aceleração da gravidade. Entretanto, quando há alguma inclinação no sensor, a força g distribui-se em dois eixos, permitindo com que seja possível medir os ângulos através da trigonometria.

De acordo com (FERREIRA, 2013), o giroscópio trata-se de um dispositivo capaz de medir a velocidade ou posição angular de um objeto em torno do seu eixo de rotação. Além disso, os seus ângulos de orientação são definidos no sistema de coordenadas global Z, Y e X como guinada, arfagem e rolagem. Ele opera com base no princípio da conservação do momento angular, permitindo que o eixo de rotação do giroscópio permaneça estável mesmo quando a base se move ou muda de direção. Esse funcionamento é crucial em diversas aplicações tecnológicas, desde sistemas de navegação em aeronaves e navios até a estabilização de satélites e o funcionamento de sensores em smartphones. Ao medir a velocidade angular e a orientação, os giroscópios fornecem dados precisos que são essenciais para a navegação e a estabilização, garantindo a precisão e a segurança dos sistemas em que são integrados.

O MPU-6050 é um circuito integrado desenvolvido pela IvenSense Inc., que combina três giroscópios (um para cada eixo: X, Y e Z), três acelerômetros (também distribuídos nos mesmos eixos) e um Processador Digital de Movimentos (*Digital Motion Processor* ou DMP) em um único chip (TDK, 2013). Ele utiliza o protocolo de comunicação I2C para transmissão de dados e conta com três conversores analógico-digital de 16 bits, responsáveis pela discretização dos sinais dos acelerômetros e giroscópios. O sensor se destaca por sua precisão tanto em movimentos rápidos quanto em lentos, tornando-o ideal para aplicações que exigem medições precisas de aceleração e rotação em múltiplos eixos. O giroscópio possui faixas dinâmicas de ± 250 , ± 500 , ± 1000 ou $\pm 2000^\circ$ por segundo (*degrees per second* - dps) com uma resolução mínima de 0,0076 dps para ± 250 dps e de 0,061 dps para ± 200 dps. Já o acelerômetro possui faixas dinâmicas de $\pm 2G$, $\pm 4G$, $\pm 8G$ ou $\pm 16G$, com resolução mínima de $61 \mu G$ para $\pm 2G$ e de $490 \mu G$ para $\pm 16G$. Na Figura 8 é representado o circuito integrado MPU-6050.

Figura 8 – MPU-6050



Fonte: SASTRON.

3 SISTEMA PROPOSTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto de um inclinômetro para monitoramento de barragens. O sistema proposto visa identificar alterações na inclinação das estruturas, que podem ser indicadores de possíveis instabilidades, como futuros rompimentos ou colapsos dessas estruturas.

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em etapas que abrangem desde a concepção mecânica do protótipo até a integração e programação dos sensores responsáveis pela coleta de dados. Inicialmente, foi realizado o projeto da estrutura física em escala reduzida, representando o tubo em que são inseridos os instrumentos de medição de inclinação em uma barragem. Em seguida, desenvolveram-se as sondas em que serão fixados os módulos MPU6050 que, através das medições obtidas com o acelerômetro, identificam o ângulo de inclinação.

Após o desenvolvimento do inclinômetro proposto, foram realizados ensaios com o objetivo de detectar padrões de distúrbios em barragens. As seções a seguir detalham cada etapa do desenvolvimento, com foco na descrição das soluções técnicas adotadas e as justificativas para as escolhas realizadas ao longo do projeto.

3.1 PROJETO E MONTAGEM MECÂNICA

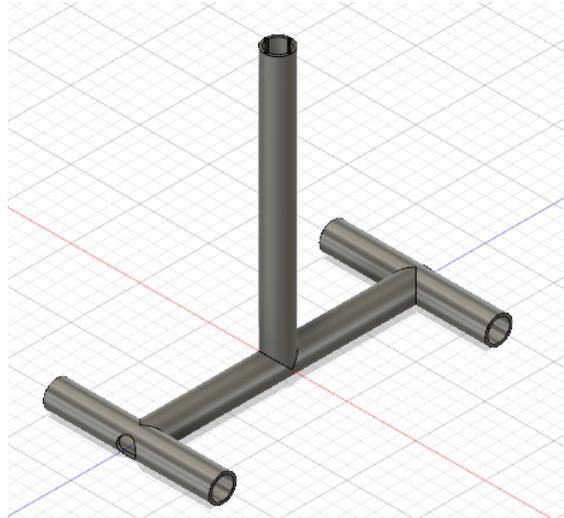
O projeto mecânico foi imaginado com o objetivo de desenvolver uma estrutura que possibilitasse o monitoramento de inclinações em um modelo representativo de tubos de medições existentes em uma barragem de mineração.

3.1.1 Projeto 3D

A fim de representar a estrutura desejada, foi projetado em software 3D, o desenvolvimento de um tubo oco. A ideia é que essa estrutura possibilite a inclinação do tubo. Além disso, o projeto mecânico prevê a inserção de sondas contendo os sensores responsáveis por essa medição, os módulos MPU6050. A Figura 9 traz o projeto realizado no software de modelagem 3D, o Autodesk Fusion.

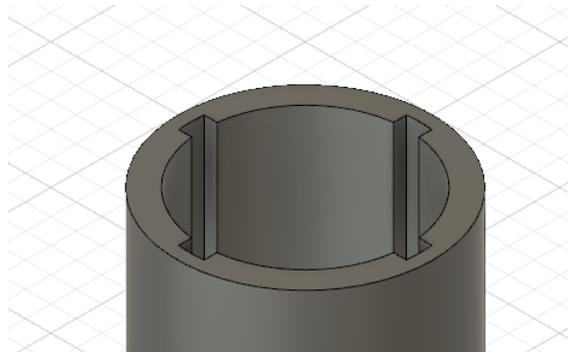
Inicialmente, a concepção do projeto previa que o tubo fosse equipado com guias internas que facilitassem o encaixe e o alinhamento da sonda contendo os sensores de inclinação. Essas guias seriam projetadas para manter a sonda estável e corretamente posicionada ao longo do comprimento do tubo, garantindo que as medições realizadas pelos sensores não fossem afetadas por deslocamentos ou desalinhamentos. A ideia era que as guias funcionassem como trilhos, proporcionando um encaixe firme, mas permitindo a remoção e reposicionamento da sonda quando necessário. Essa abordagem visava simplificar o processo de montagem e manutenção do protótipo, além de assegurar maior consistência nos ensaios experimentais. Na Figura 10 é representada a ideia inicial.

Figura 9 – Desenvolvimento 3D.



Fonte: o autor.

Figura 10 – Guias no tubo.



Fonte: o autor.

No entanto, com o início da montagem física utilizando os tubos de PVC, optou-se por não implementar as guias internas devido à simplicidade e praticidade do processo de fabricação. Em vez disso, decidiu-se ajustar as dimensões das sondas para que elas apresentassem um encaixe firme e justo no interior do tubo. Essa abordagem eliminou a necessidade de componentes adicionais, como as guias, sem comprometer a estabilidade das sondas durante os ensaios. Com esse ajuste, foi possível garantir que as sondas permanecessem estáticas e bem alinhadas, preservando a precisão das medições e facilitando a montagem do protótipo.

3.1.2 Montagem mecânica

Conforme citado na seção anterior, optou-se por utilizar tubos de PVC na construção da estrutura física do protótipo. O PVC traz uma combinação de baixo custo, qualidade e rigidez que a estrutura necessita, e uma boa flexibilidade de montagem. O material oferece leveza, facilitando o transporte e a manipulação durante os ensaios, além de apresentar boa resistência mecânica para suportar as forças envolvidas sem deformações significativas. Além disso, o PVC é fácil de manusear, permitindo cortes e adaptações com ferramentas simples, o que otimiza o processo de fabricação e personalização do protótipo. Essas vantagens tornam o PVC uma escolha eficiente e econômica para o desenvolvimento do sistema de monitoramento de inclinação.

Iniciou-se, então, a montagem física da estrutura do tubo com a medição e cortes nos tubos de PVC de modo que a montagem se assemelhasse ao idealizado no projeto 3D. Por meio das Figuras 11, 12 e 13 é possível observar o processo de montagem.

Figura 11 – Tubos de PVC.



Fonte: o autor.

Figura 12 – Processo de montagem.



Fonte: o autor.

Figura 13 – Estrutura finalizada.



Fonte: o autor.

3.2 DESENVOLVIMENTO ELETRÔNICO

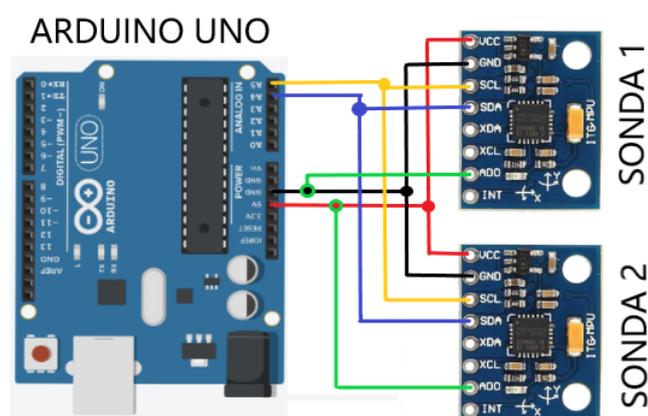
A etapa de desenvolvimento eletrônico concentrou-se na integração dos componentes que compõem o inclinômetro, com foco na conexão dos módulos sensores MPU6050 ao microcontrolador Arduino Uno e na montagem física dos sensores nas sondas que serão inseridas no interior do tubo. Essa fase foi essencial para garantir a funcionalidade do protótipo, assegurando que os dados de inclinação fossem coletados e transmitidos de forma confiável para análise posterior.

3.2.1 Esquemático de conexão do sistema

Definiu-se a utilização de dois módulos MPU6050 no protótipo a fim de conseguir representar a escalabilidade do sistema em cenários reais, onde várias sondas poderiam ser distribuídas (empilhadas) ao longo do interior do tubo para realizar medições de inclinação em diferentes pontos. Essa abordagem permite avaliar a capacidade do protótipo de monitorar, simultaneamente, múltiplas regiões de uma barragem, proporcionando um panorama mais abrangente sobre a estabilidade da estrutura.

No projeto, os dois sensores foram configurados no mesmo barramento I2C para trabalhar em conjunto, possibilitando a medição combinada das inclinações registradas pelas duas sondas. Essa configuração permite calcular um único ângulo de inclinação, considerando as variações ao longo do comprimento do tubo. Na Figura 14 é observada a conexão realizada entre os módulos e o Arduino.

Figura 14 – Esquemático do sistema.



Fonte: o autor.

Essa abordagem melhora a veracidade das medições ao integrar os valores obtidos de dois pontos distintos da estrutura, simulando um comportamento mais realista de como a inclinação de uma barragem poderia ser monitorada em campo. Além disso, a implementação do sistema foi concebida de forma modular, permitindo que quantas

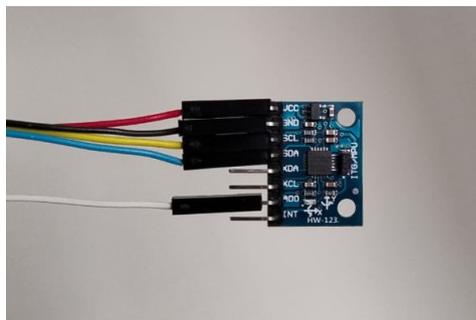
sondas forem necessárias sejam adicionadas ao tubo, expandindo sua capacidade de medir inclinações com maior abrangência e em diferentes trechos da estrutura monitorada, replicando um cenário que é encontrado na instrumentalização de barragens. As sondas foram desenvolvidas de tubo de PVC, porém com um diâmetro menor, permitindo a sua inserção ao interior do tubo do inclinômetro. Estas sondas foram revestidas de EVA a fim de ficarem encostando na parede interna do tubo, mas sem prejuízo ao seu deslocamento vertical. Também vale destacar que o esquemático ilustrado na Figura 14 pode ser, teoricamente, estendido para até 128 sondas, que é o limite de endereçamento do protocolo I2C. Destaca-se que o Arduino oferece diversas alternativas para ampliar o número de dispositivos conectados além do limite do protocolo I2C. Entre as opções mais comuns estão o uso do protocolo SPI, que permite a conexão de múltiplos dispositivos com alta velocidade, utilizando pinos dedicados para seleção; expansores de I/O, como PCF8574 ou MCP23017, que aumentam o número de endereços disponíveis no barramento I2C; e protocolos mais robustos, como CAN ou RS485, que suportam redes maiores e são ideais para aplicações industriais, embora exijam módulos adicionais. Além disso, o protocolo 1-Wire permite conectar vários sensores em um único fio, sendo útil para aplicações mais simples. Essas alternativas viabilizam a criação de sistemas mais escaláveis e adaptados às necessidades específicas do projeto.

3.2.2 Montagem das sondas

Após a realização das conexões elétricas, foi efetuada a montagem das sondas, nas quais os módulos MPU6050 foram fixados diretamente nas paredes internas das sondas de PVC, sondas essas que possuem 30cm de comprimento. Cada sonda foi confeccionada com um diâmetro menor para se encaixar no interior do tubo principal, e suas superfícies externas foram revestidas com uma camada de EVA. Esse revestimento garantiu um encaixe firme no tubo, eliminando folgas e evitando deslocamentos durante os ensaios.

Os módulos MPU6050 foram posicionados e fixados na parede interna das sondas utilizando fita dupla face, assegurando que permanecessem estáveis e alinhados com o eixo do tubo, e também permitindo a retirada dos módulos para possíveis adaptações e alterações. A fixação na parede foi escolhida para otimizar o espaço interno das sondas e permitir que os fios da sonda mais inferior passem pelo interior da outra sonda, não interferindo no posicionamento da sonda imediatamente acima. A partir das Figuras 15, 16, 17, 18, 19 e 20 é possível observar a representação do processo de conexão dos módulos, fixação destes nas sondas e inserção das sondas no interior do tubo.

Figura 15 – Conexão no módulo MPU6050.



Fonte: o autor.

Figura 16 – Vista lateral da sonda de medição.



Fonte: o autor.

Figura 17 – Vista frontal da sonda de medição.



Fonte: o autor.

Figura 18 – Inserção da primeira sonda no tubo.



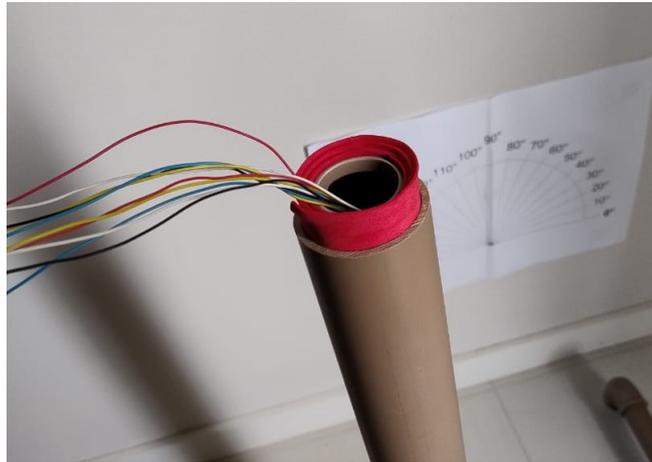
Fonte: o autor.

Figura 19 – Inserção da segunda sonda no tubo com todos os fios em seu interior.



Fonte: o autor.

Figura 20 – Sondas inseridas.



Fonte: o autor.

3.3 SOFTWARE

A fim de realizar a obtenção do ângulo de inclinação, desenvolveu-se o software através da IDE do Arduino com a combinação dos dois módulos sensores MPU6050. Esse código faz uso das leituras do acelerômetro, que fornecem as variações nos eixos X, Y e Z. Com essas informações, é calculado o ângulo de inclinação do sensor em relação à gravidade, utilizando a função arco tangente para obter o valor do ângulo em graus. O código do sistema proposto é apresentado no Anexo A. Especificamente, na linha correspondente à variável `inc_total`, dentro do laço de repetição, é realizado o cálculo da inclinação.

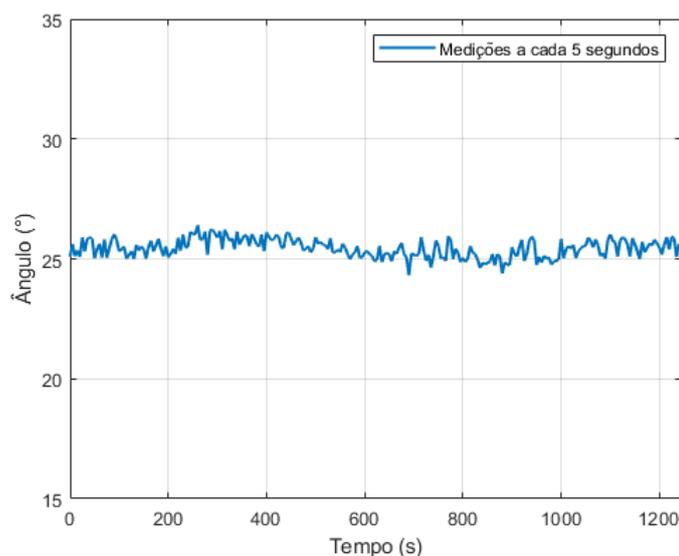
Os ângulos de inclinação são obtidos a partir das leituras de aceleração. O acelerômetro mede a aceleração em três eixos (X, Y e Z), que é proporcional à força gravitacional que atua sobre o sensor. Quando o módulo está inclinado, a distribuição dessa aceleração muda, permitindo que, por meio da função `atan2()`, seja possível determinar o ângulo de inclinação. Para calcular o ângulo de inclinação de forma adequada, o valor da aceleração é normalizado, dividindo os valores de aceleração dos eixos X, Y e Z pela sensibilidade do sensor, que é 16384 para o MPU6050. Isso transforma as leituras de números inteiros para *float* em unidades de G (aceleração gravitacional). A inclinação é então calculada levando em consideração o vetor resultante das acelerações nos três eixos.

A segunda etapa do desenvolvimento do inclinômetro trata-se do processo de calibração por faixas de medição. O processo de verificação de erro sistemático do sistema proposto foi realizado através de medições comparativas entre os valores obtidos pela medição através das sondas e os valores de referência que eram esperados. Para avaliar a precisão e a veracidade em torno dos ângulos de calibração definidos (múltiplos de 10°), foram realizadas medições com ângulo na metade de cada faixa de teste, com o objetivo de verificar a consistência do sistema em diferentes pontos da faixa de inclinação. Para

cada ângulo de teste, foram realizadas diversas medições com intervalo de amostragem de 5 s, garantindo tempo suficiente para a estabilização do sensor e evitando interferências provenientes de oscilações transitórias. Esse método permitiu identificar possíveis erros sistemáticos e avaliar a precisão através do cálculo do desvio padrão.

A primeira faixa avaliada no processo de verificação foi a correspondente entre 20° e 30° . Para isso, foram realizadas 250 medições no ângulo de referência de 25° , localizado no ponto central dessa faixa. Essa alta quantidade de medições foi adotada para garantir uma análise estatisticamente significativa, permitindo avaliar o desvio padrão e o erro sistemático de forma confiável. Na Figura 21 têm-se os valores obtidos nas medições. Através dessa figura, é possível observar que os valores ficaram próximos dos valores esperados, resultando em uma média de $25,43^\circ$ e desvio padrão de $0,389^\circ$.

Figura 21 – Medições obtidas no ângulo de 25° .



Fonte: o autor.

O procedimento realizado para a faixa de 30° , utilizando o ângulo de referência de 25° , foi replicado para as demais faixas de ângulos, abrangendo intervalos de 10° entre 0° e 90° . Para cada uma das faixas, realizou-se o mesmo processo de 250 medições espaçadas com um intervalo de 5 s entre cada, possibilitando calcular a média e o desvio padrão das medições para cada faixa. Os valores obtidos com as medições foram analisados por meio do Matlab e os valores de média, erro sistemático e desvio padrão são apresentados na Tabela 2.

	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°
Média	5,42°	16,26°	25,43°	35,62°	45,51°	56,12°	66,04°	75,47°	85,44°
Erro Sistemático	0,42°	1,26°	0,43°	0,62°	0,51°	1,12°	1,04°	0,47°	0,44°
Desvio Padrão	0,403°	0,409°	0,389°	0,406°	0,412°	0,404°	0,410°	0,392°	0,399°

Tabela 2 – Média, erro sistemático e desvio padrão para cada faixa angular.

Os valores medidos pelo sistema mostraram-se próximos dos valores de referência em todas as faixas avaliadas, resultando em um pequeno erro sistemático em cada faixa. Além disso, as oscilações observadas na Figura 21, juntamente com o desvio padrão de cada faixa apresentado na Tabela 2, indicam a necessidade de um refinamento adicional para garantir maior estabilidade nas leituras. Esses resultados justificam o desenvolvimento e a implementação de um filtro, como o filtro EWMA (*Exponential Weighted Moving Average*), cujo objetivo é suavizar as medições ao reduzir a influência de flutuações momentâneas. Realizou-se a implementação do filtro EWMA a partir da seguinte equação:

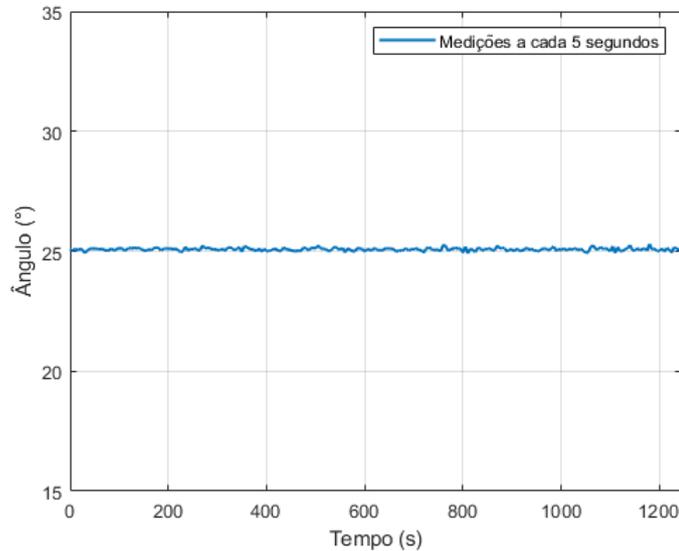
$$y(n) = \beta x(n) + (1 - \beta)y(n - 1) \quad (1)$$

em que $y(n)$ é o valor filtrado atual, $x(n)$ é o valor medido atual, $y(n - 1)$ é o valor filtrado anterior e β é o fator de suavização, que realiza o controle do peso atribuído ao valor mais recente em relação ao histórico das medições anteriores. Para o filtro implementado, considerou-se inicialmente $\beta = 0,1$. Após a implementação do filtro EWMA no código do Arduino, foi realizada uma nova simulação para a faixa de 30° (em 25°) com o objetivo de avaliar a efetividade do filtro na estabilização das medições. Essa implementação do filtro EWMA juntamente com a correção do erro sistemático em cada faixa de medição pode ser observada no Anexo A.

Utilizando os mesmos parâmetros da simulação anterior, foram coletadas 250 medições com um intervalo de 5 s, agora processadas pelo filtro antes de serem registradas. Na Figura 22 é possível observar as novas medições realizadas com a implementação do filtro em conjunto com a correção do erro sistemático. Pode-se verificar nessa figura a redução nas oscilações em torno do valor de referência, evidenciando a eficácia do filtro, juntamente com a correção do erro sistemático, em suavizar as leituras e aproximá-las do ângulo esperado.

Para verificar a eficiência do sistema desenvolvido e sua capacidade de emitir alerta de forma confiável, foram gerados três cenários controlados que representam diferentes condições de inclinação do protótipo. Esses cenários foram elaborados com base em possíveis situações reais de instabilidade em uma barragem, abrangendo desde condições normais até situações críticas. Cada cenário foi testado para avaliar a resposta do sistema, permitindo gerar um sistema de alertas com base no comportamento de cada curva.

Figura 22 – Medições obtidas no ângulo de 25° após filtragem e correção do erro sistemático.

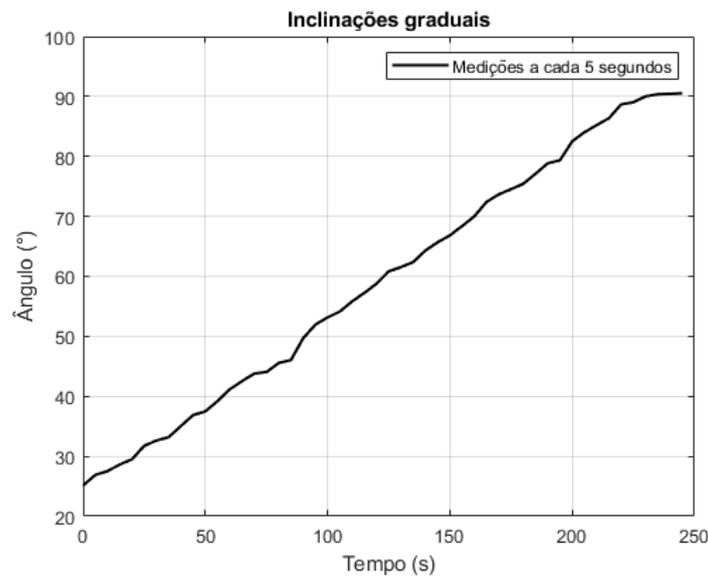


Fonte: o autor.

3.3.1 Situação 1 - Inclinação gradual

Um tipo de situação que pode ser encontrado em barragens de mineração é a alteração lenta da inclinação, representando um processo gradual de deformação, como pode ser observado em casos de erosão ou movimentações iniciais de desestabilização. O ângulo da inclinação varia de maneira contínua ao longo do tempo, com pequenas variações a cada intervalo de medição. Esse tipo de comportamento é característico de alterações que ocorrem ao longo de um período mais longo, permitindo que o sistema de monitoramento detecte pequenas modificações na estrutura. Esse cenário é fundamental para identificar sinais precoces de deformações, como pequenos deslocamentos ou subsídios da fundação, que podem ser indicativos de problemas em estágios iniciais, possibilitando intervenções preventivas. A fim de representar esta situação, iniciou-se a inclinação em 25° e lentamente foi-se aumentando a inclinação até se chegar em torno do valor de 90° durante um intervalo de 250 segundos (50 medidas). Com a Figura 23 observa-se esse procedimento. A partir dessa figura é possível identificar a capacidade do sistema em registrar variações graduais de inclinação ao longo do tempo. Os resultados evidenciam uma progressão dos ângulos de maneira uniforme e gradual, alinhada ao comportamento esperado para este tipo de situação, validando a sensibilidade do sistema proposto. Essa resposta consistente reforça a eficácia do protótipo em capturar alterações estruturais sutis, como aquelas que podem ocorrer em estágios iniciais de deformação de barragens.

Figura 23 – Inclinação gradual.



Fonte: o autor.

3.3.2 Situação 2 - Inclinação rápida e retorno aos valores iniciais

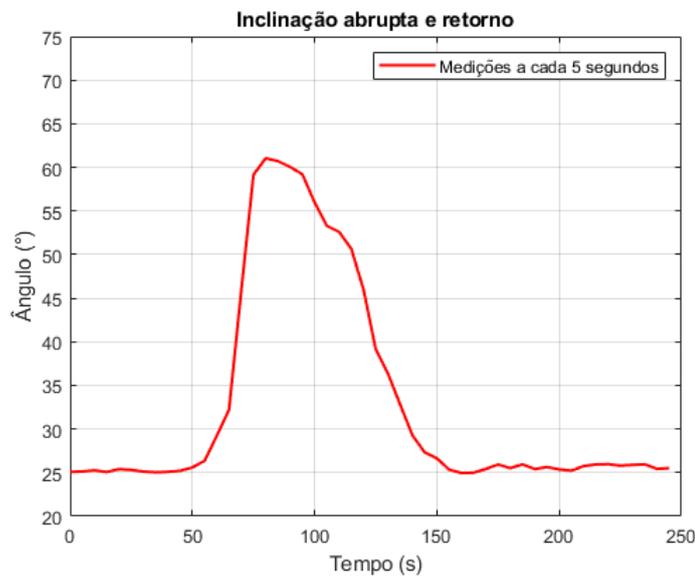
Um segundo cenário que pode ser observado em barragens de mineração são variações abruptas (diferença de mais de 20 graus num intervalo de três medições) na medição, representando eventos repentinos como a sobrecarga devido a chuvas intensas, maquinários em circulação em obras no entorno ou na própria estrutura, aumento inesperado de pressão interna ou até falhas temporárias em partes da estrutura. Nesse cenário, a barragem pode apresentar variações repentinas, mas rapidamente retorna aos valores de medição previamente estabilizados. Essa situação é típica de eventos que causam picos de pressão ou deslocamentos rápidos, mas que não geram danos permanentes à estrutura em si.

Nesse sentido, iniciou-se um ensaio partindo dos 25° e, a partir de 50 s, inclina-se o protótipo com a mão de maneira rápida a valores próximos aos 60°. Logo após um curto período, o sistema é retornado para próximo de sua inclinação inicial. A partir da Figura 24 é possível observar a representação do cenário.

3.3.3 Situação 3 - Inclinação rápida e permanente

Já o terceiro cenário considera uma variação abrupta (diferença maior que 20° em um intervalo de três medições) e os valores de medição não voltam a ser próximos dos medidos inicialmente. Esse tipo de comportamento pode ocorrer em situações mais graves, como falhas estruturais, ruptura de componentes ou deslocamento substancial de materiais. Após a movimentação inicial de variação, o inclinômetro se estabiliza em um novo estado de inclinação que permanece por um período prolongado. Esse cenário

Figura 24 – Inclinação rápida e retorno.



Fonte: o autor.

é crítico, pois representa uma deformação permanente e pode indicar o risco de falhas maiores, como rompimentos, colapsos parciais ou totais das estruturas. Para esse tipo de situação, é crucial que o sistema detecte não apenas o pico de alteração, mas também a permanência no novo ângulo, permitindo ações corretivas urgentes.

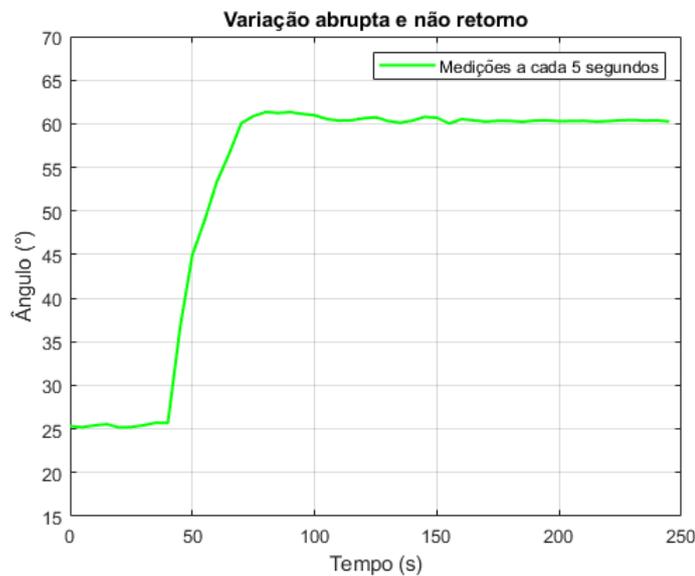
Nesse contexto, realizou-se a medição com o inclinômetro posicionado em 25° e, a partir de 40 s, há uma variação brusca na inclinação e não ocorre um retorno para próximo dos valores medidos no início da simulação. A curva de medição é apresentada na Figura 25. Através dessa figura, é possível observar o comportamento do sistema diante de uma variação abrupta de inclinação, seguida por uma permanência em valores significativamente diferentes das medições iniciais. Os resultados mostram que o inclinômetro proposto é capaz de registrar rapidamente a mudança repentina e acompanhar a estabilização em um novo patamar, sugerindo uma alteração permanente na estrutura monitorada.

3.4 ALGORITMO DE DETECÇÃO DE EVENTOS

Nesta seção, é apresentado o algoritmo desenvolvido para identificar os diferentes cenários de variação de inclinação em barragens e emitir alertas conforme as condições detectadas. O algoritmo foi projetado para analisar os dados do inclinômetro em tempo real, identificando três padrões de eventos:

- variação gradual.
- variação abrupta seguida de retorno aos valores normais.
- variação abrupta com permanência em um novo patamar.

Figura 25 – Inclinação rápida e permanência.



Fonte: o autor.

A descrição verbal do algoritmo é apresentada a seguir:

1. Inicialização:

O sistema é inicializado, configurando os sensores inerciais e preparando-os para iniciar as medições.

2. Leitura de dados:

Os módulos MPU6050 realizam as leituras de aceleração nos eixos X, Y e Z e enviam para o Arduino através do barramento I2C.

3. Conversão dos valores lidos em graus.

4. Correção do erro sistemático para cada faixa de medição.

5. Aplicação do filtro EWMA.

6. Detecção dos cenários:

Inclinação gradual.

Inclinação rápida e retorno aos valores iniciais.

Inclinação rápida e permanente.

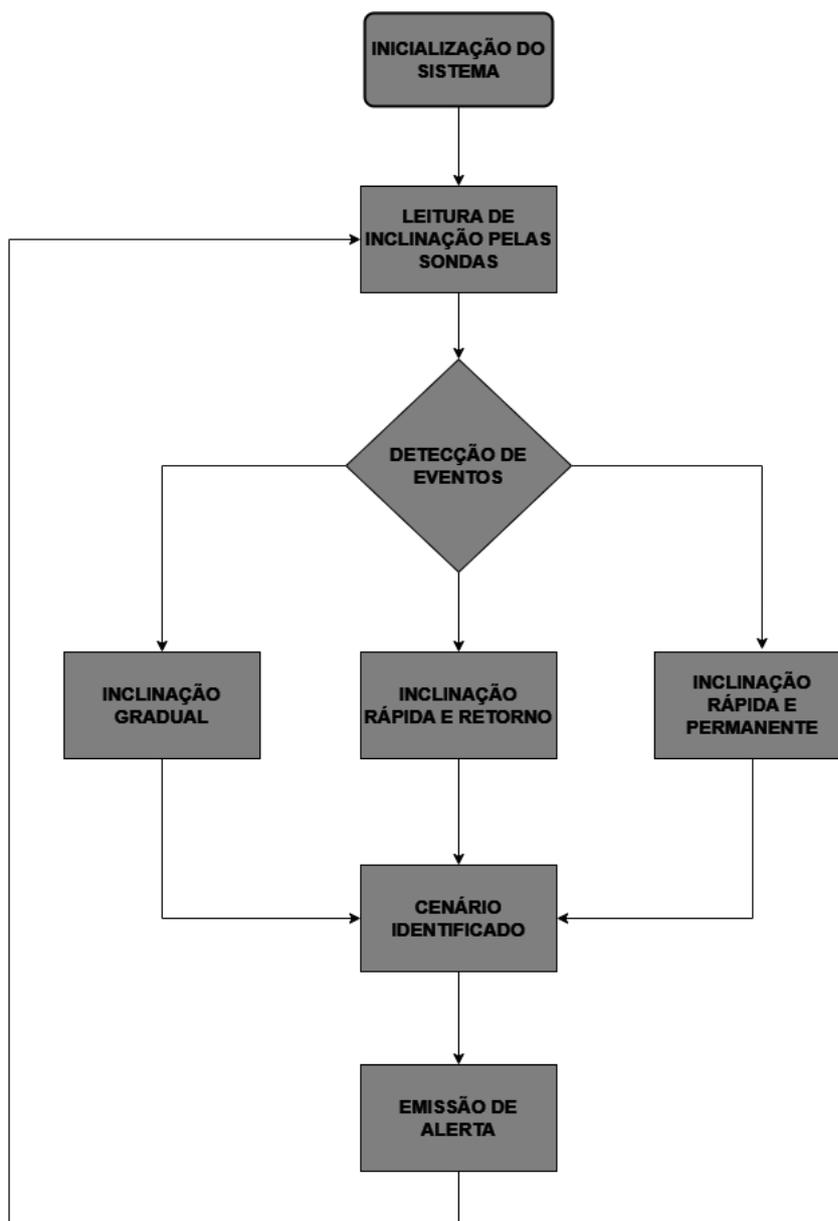
7. Emissão de alertas, caso determinadas condições forem atendidas.

8. Retorna ao item 2.

Na Figura 26, é apresentado um fluxograma contendo o funcionamento base do algoritmo de detecção de eventos.

Para realizar a detecção de cada evento, o algoritmo analisa as características das inclinações. No caso do primeiro evento, a condição é a ausência de variações abruptas

Figura 26 – Fluxograma do funcionamento do sistema.



Fonte: o autor.

durante o processo de inclinação. Dessa forma, entende-se que a inclinação medida ocorre de forma gradual, seja ela crescente ou decrescente, e, por isso, o alerta referente a este evento é emitido. Para o segundo evento, é realizada uma comparação entre os valores medidos. Inicialmente, verifica-se se há variações abruptas (diferenças maiores que 20° entre as medições). Em seguida, comparam-se os valores iniciais com os últimos para identificar se, após a variação abrupta, as medições retornaram a valores próximos aos iniciais. Quando isso ocorre, o segundo evento é identificado, e o alerta correspondente é emitido. Já no caso do terceiro evento, a análise é semelhante à do segundo, mas com a diferença de que, após as variações abruptas, os valores medidos permanecem

significativamente diferentes dos iniciais, indicando uma inclinação permanente.

Para determinar os limiares que definem as condições de cada evento, estabeleceu-se que uma variação abrupta corresponde a uma diferença maior que 20° entre três medições consecutivas. Além disso, para identificar que os valores retornaram próximos aos iniciais, a diferença absoluta entre os últimos valores e os primeiros deve ser inferior a 5° , o que caracteriza a ocorrência do segundo evento. Por outro lado, para identificar o terceiro evento, essa diferença deve ser maior que 20° , indicando uma inclinação permanente. Esses valores foram escolhidos por ajudarem a separar claramente os comportamentos e podem ser ajustados conforme o tipo de aplicação do sistema.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com o inclinômetro, detalhando como ele pode ajudar a identificar os diferentes cenários propostos. Tais resultados são fundamentais para validar o desempenho do protótipo e discutir as possíveis melhorias e aplicações futuras do sistema.

4.1 ESTIMAÇÃO DOS ÂNGULOS

Após a implementação da correção do erro sistemático juntamente com a aplicação do filtro EWMA para aumentar a exatidão do sistema proposto, são realizadas novas medições com o objetivo de analisar detalhadamente a qualidade da estimação dos ângulos fornecidos pelo inclinômetro. Os valores obtidos com as novas medições foram analisados por meio do Matlab e os valores de média, erro sistemático e desvio padrão são apresentados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. Essas tabelas corroboram para a conclusão de alta precisão, veracidade e exatidão do inclinômetro desenvolvido. Os valores baixos de desvio padrão nas medições indicam uma reduzida dispersão dos valores em torno da média. Houve uma significativa redução nos valores de erros sistemáticos encontrados, o que reflete uma calibração adequada e a correção eficaz dos desvios nos ângulos medidos. Dessa forma, os resultados confirmam que o sistema é capaz de fornecer medições confiáveis, com alta reprodutibilidade e alinhadas aos valores reais de inclinação, evidenciando sua aplicabilidade para o monitoramento de barragens de mineração.

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Média	0,11°	10,08°	20,09°	30,05°	40,12°	50,10°	60,13°	70,09°	80,07°
Erro Sistemático	0,11°	0,08°	0,09°	0,05°	0,12°	0,10°	0,13°	0,09°	0,07°
Desvio Padrão	0,209°	0,197°	0,214°	0,211°	0,168°	0,187°	0,223°	0,194°	0,189°

Tabela 3 – Média, erro sistemático e desvio padrão para ângulos compreendidos entre 0° e 80°, com intervalos de 10°, após correção do erro sistemático e filtragem.

	2,5°	12,5°	22,5°	32,5°	42,5°	52,5°	62,5°	72,5°	82,5°
Média	2,54°	12,57°	22,61°	32,59°	42,58°	52,53°	62,56°	72,60°	82,57°
Erro Sistemático	0,04°	0,07°	0,11°	0,09°	0,08°	0,03°	0,06°	0,10°	0,07°
Desvio Padrão	0,112°	0,143°	0,157°	0,134°	0,152°	0,167°	0,139°	0,183°	0,194°

Tabela 4 – Média, erro sistemático e desvio padrão para ângulos compreendidos entre 2,5° e 82,5°, com intervalos de 10°, após correção do erro sistemático e filtragem.

	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°
Média	5,09°	15,06°	25,08°	35,13°	45,09°	55,11°	65,08°	75,04°	85,09°
Erro Sistemático	0,09°	0,06°	0,08°	0,13°	0,09°	0,11°	0,08°	0,04°	0,09°
Desvio Padrão	0,181°	0,176°	0,183°	0,192°	0,179°	0,208°	0,186°	0,203°	0,201°

Tabela 5 – Média, erro sistemático e desvio padrão para ângulos compreendidos entre 5° e 85°, com intervalos de 10°, após correção do erro sistemático e filtragem.

	7,5°	17,5°	27,5°	37,5°	47,5°	57,5°	67,5°	77,5°	87,5°
Média	7,57°	17,59°	27,55°	37,59°	47,62°	57,57°	67,54°	77,60°	87,58°
Erro Sistemático	0,07°	0,09°	0,05°	0,09°	0,12°	0,07°	0,04°	0,10°	0,08°
Desvio Padrão	0,201°	0,186°	0,197°	0,193°	0,204°	0,202°	0,196°	0,188°	0,198°

Tabela 6 – Média, erro sistemático e desvio padrão para ângulos compreendidos entre 7,5° e 87,5°, com intervalos de 10°, após correção do erro sistemático e filtragem.

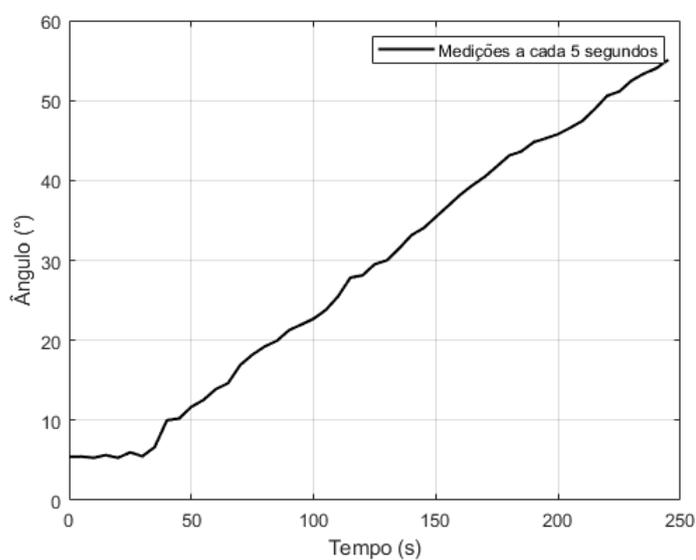
4.2 DETECÇÃO DE EVENTOS

A fim de validar o algoritmo de detecção descrito no capítulo anterior, foram realizadas situações que se assemelham com as situações em que um inclinômetro pode estar submetido num ambiente de medição de inclinação em barragens. Neste sentido, foram criados cenários que se enquadram em cada um dos três eventos descritos no Capítulo 3.

4.2.1 Inclinação gradual

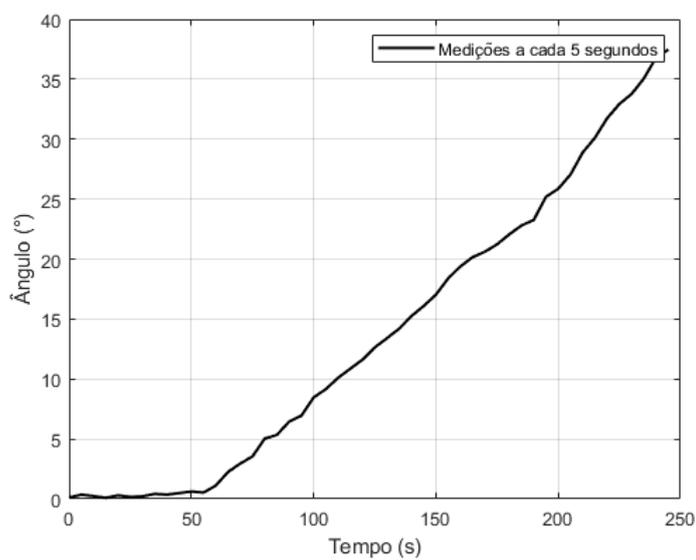
Para o evento de inclinação gradual, realizaram-se três ensaios distintos cujas respectivas curvas são apresentadas nas Figuras 27, 28 e 29. EA partir destas figuras, juntamente com a Figura 30, é possível notar que o inclinômetro é capaz de registrar a inclinação gradual, emitindo o alerta correspondente ao evento. Vale mencionar que, dentre os resultados obtidos, a Figura 29 pode não representar a realidade em uma estrutura de barragem e suas possíveis inclinações, servindo apenas para validar o funcionamento do inclinômetro desenvolvido.

Figura 27 – Curva de medição obtida no primeiro ensaio de inclinação gradual.



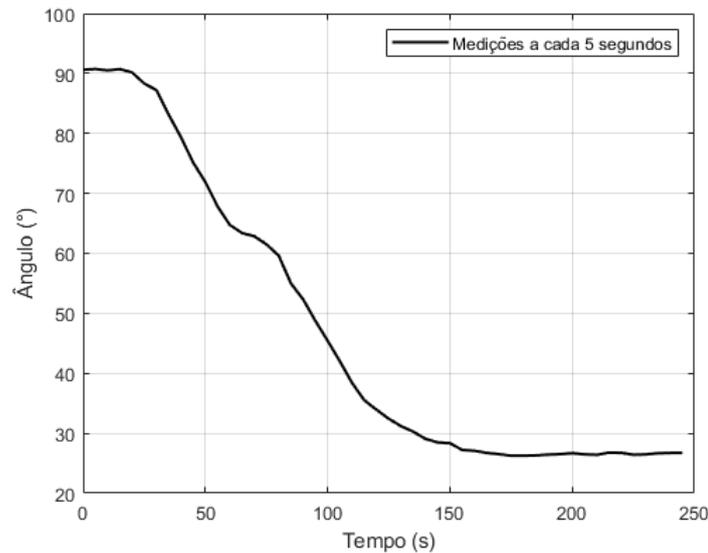
Fonte: o autor.

Figura 28 – Curva de medição obtida no segundo ensaio de inclinação gradual.



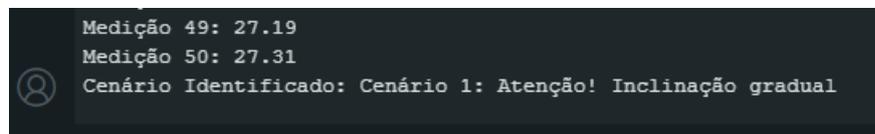
Fonte: o autor.

Figura 29 – Curva de medição obtida no terceiro ensaio de inclinação gradual.



Fonte: o autor.

Figura 30 – Alerta emitido durante a detecção de inclinação gradual.



Fonte: o autor.

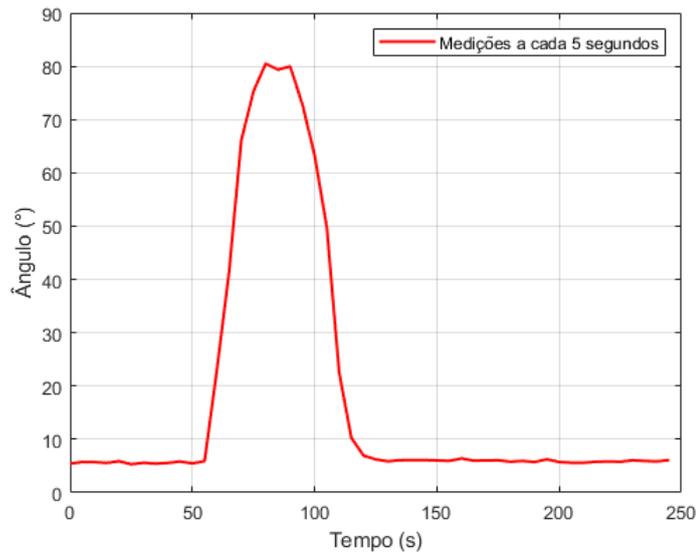
Através da Figura 28 é possível observar que a medição inicia com valores próximos do ângulo 5° e, após 30 segundos de ensaio, inicia-se uma variação gradual crescente no valor de inclinação. Essa inclinação é realizada até valores próximos de 55° . O procedimento ocorre de forma semelhante na Figura 28, agora com os valores de medição partindo próximos ao valor de 0° , e após os 50 segundos, inicia-se a variação gradual no valor medido de inclinação. Já o que pode ser observado por meio da Figura 29 é um ensaio com valores partindo do ângulo de 90° e, após decorridos 25 segundos do tempo de ensaio, os valores medidos começam a decair de forma gradual até chegar próximos a valores de 27° .

4.2.2 Inclinação rápida e retorno

De forma similar à seção anterior, foram gerados três ensaios, agora considerando o evento de inclinação rápida e retorno. Nesses ensaios, foram geradas variações rápidas e retorno ao ângulo inicial, simulando pequenas anomalias ou perturbações na barragem.

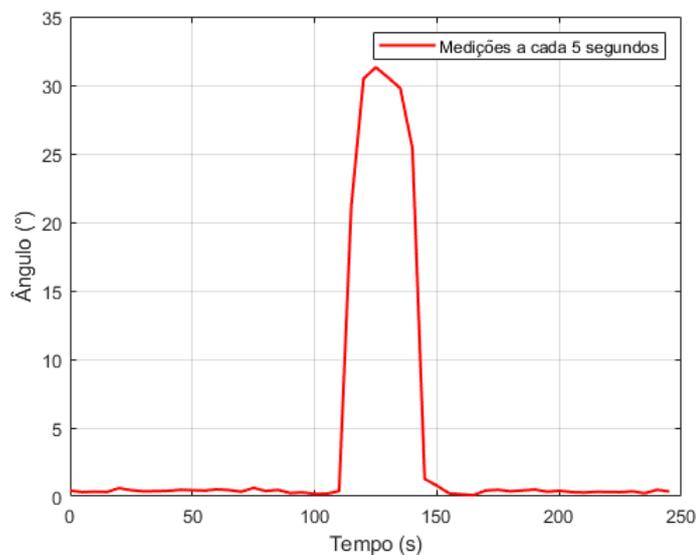
Os resultados obtidos para a identificação desta situação podem ser observados por meio das Figuras 31, 32, 33 e 34. Assim como a Figura 29, o resultado apresentado na Figura 33 não corresponde a uma situação realista, mas serve para confirmar o funcionamento adequado do algoritmo proposto.

Figura 31 – Curva de medição obtida no primeiro ensaio de inclinação rápida e retorno.



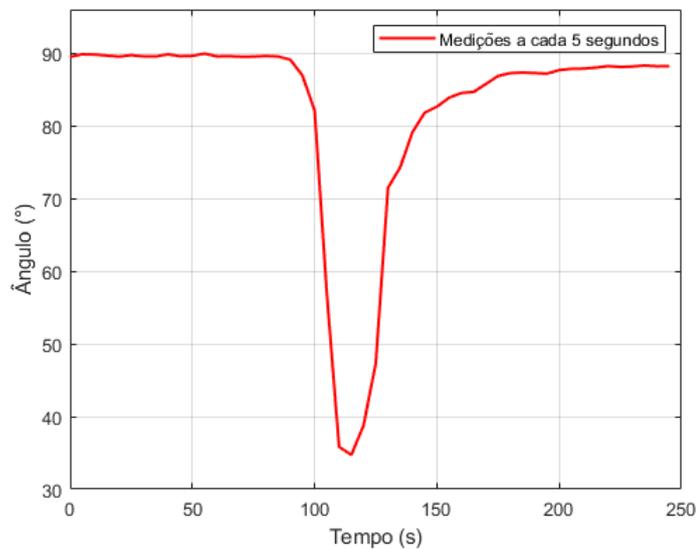
Fonte: o autor.

Figura 32 – Curva de medição obtida no segundo ensaio de inclinação rápida e retorno.



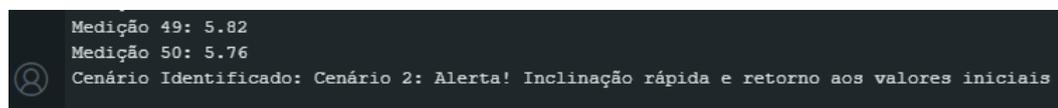
Fonte: o autor.

Figura 33 – Curva de medição obtida no segundo ensaio de inclinação rápida e retorno.



Fonte: o autor.

Figura 34 – Alerta emitido durante a detecção de inclinação rápida e retorno.

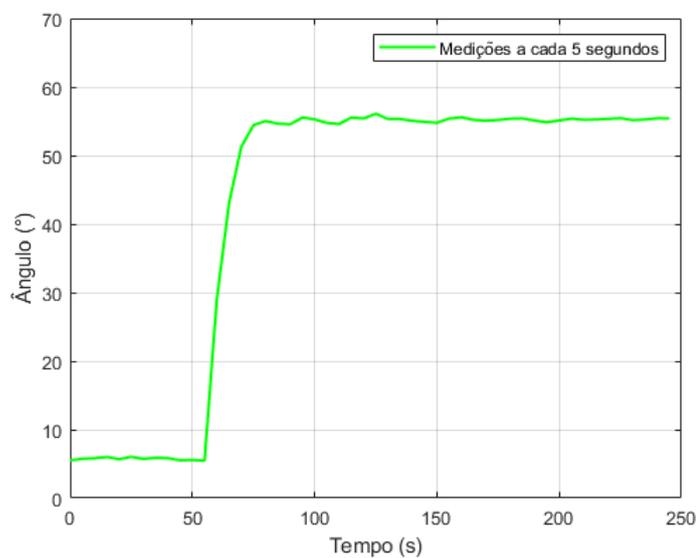


Fonte: o autor.

4.2.3 Inclinação rápida e permanência

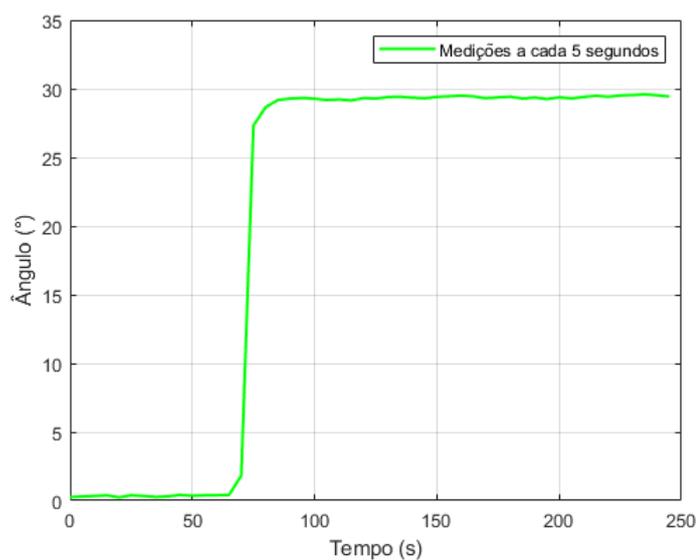
Por fim, para o evento de inclinação rápida e permanência, foram realizados os mesmos procedimentos descritos nas duas seções anteriores. Especificamente, neste caso, foram realizados ensaios com uma variação abrupta do ângulo, permanecendo no novo ângulo obtido no final da perturbação. As curvas de medição podem ser observadas nas Figuras 35, 36 e 37. A saída do algoritmo proposto pode ser observada na Figura 38, confirmando a identificação adequada do evento em questão.

Figura 35 – Curva de medição obtida no primeiro ensaio de inclinação rápida e permanência.



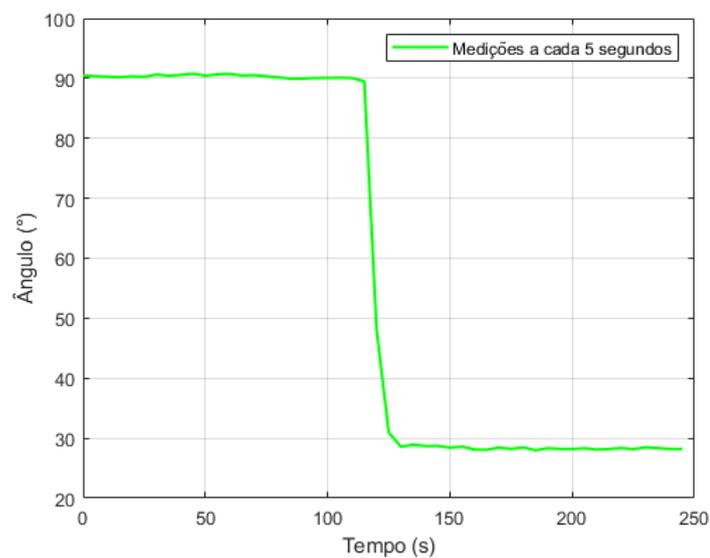
Fonte: o autor.

Figura 36 – Curva de medição obtida no segundo ensaio de inclinação rápida e permanência.



Fonte: o autor.

Figura 37 – Curva de medição obtida no terceiro ensaio de inclinação rápida e permanência.



Fonte: o autor.

Figura 38 – Alerta emitido durante a detecção de inclinação rápida e permanência.

```
Medição 49: 32.31
Medição 50: 32.14
Cenário Identificado: Cenário 3: Emergência! Inclinação rápida e permanente
```

Fonte: o autor.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um inclinômetro baseado em acelerômetros, com o propósito de contribuir para a prevenção de falhas e o aumento da segurança em barragens de mineração. Foi possível projetar uma estrutura mecânica modular, desenvolver um sistema embarcado funcional para a estimativa de ângulos de inclinação, implementar um protótipo funcional e avaliar seu desempenho em condições que simulam o contexto de monitoramento de barragens.

Os resultados obtidos demonstraram que o protótipo desenvolvido possui potencial para a identificação de inclinações em estruturas de barragens, oferecendo um método eficaz para o monitoramento preventivo. Os sensores utilizados, em conjunto com as estratégias de processamento de dados, apresentaram desempenho satisfatório na estimativa dos ângulos em diferentes cenários, comprovando a viabilidade do sistema. Ensaios controlados, representando diferentes condições de inclinação, permitiram que o protótipo fosse testado em situações que representassem ao nível de protótipo às encontradas em barragens de mineração, corroborando a validação do algoritmo de detecção e demonstrando sua aplicabilidade em ambientes com essas características.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de sistemas de comunicação remota, como tecnologias de baixo consumo energético, para possibilitar o envio de dados em tempo real em áreas de difícil acesso. Além disso, a integração de giroscópios e outros sensores inerciais poderia aprimorar a robustez e a confiabilidade do sistema, permitindo uma análise ainda mais completa das estruturas e auxiliando as equipes de monitoramento. Outra linha de evolução seria a otimização do consumo energético, aumentando a autonomia do dispositivo e reduzindo a necessidade de manutenções frequentes em ambientes de risco, como as barragens de mineração.

REFERÊNCIAS

- ANM, Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 95**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>.
- ARAÚJO, Cecília Bhering de. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://docplayer.com.br/3306129-Contribuicao-ao-estudo-do-comportamento-de-barragens-de-rejeito-de-mineracao-de-ferrocecilia-bhering-de-araujo.html>.
- BENEDETTI, Luiz Guilherme Terrassan; RUWER, Sherfis Gibran. Uma revisão sobre conceitos e usos de acelerômetros e giroscópios. **11º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP**, 2020. Acesso em: 13 de outubro de 2024.
- BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. [S.l.: s.n.], 2010. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm.
- CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração - Uma revisão. **HOLOS**, v. 8, p. 77–85, 2016. Acesso em: 09 de outubro de 2024.
- CARDOZO, Fernando Alves Cantini; RUVER, Cesar ALberto; GEHLING, Wai Ying Yuk. Considerações a riscos geotécnicos em barragens de rejeito. **TECNOLÓGICA**, 2019. Acesso em: 09 de outubro de 2024.
- FERREIRA, Anderson Henrique Rodrigues. **Análise Eletromecânica do Giroscópio MEMS**. 2013. Dissertação de mestrado (Faculdade de Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1621267>.
- GARZEDIN, Letícia Cerqueira. **Sensor à base de acelerômetros MEMS para monitoramento de barragens: Estudo de caso**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/4292>.

KRELLING, Paulo Cesar Lopes. **Concepção de um inclinômetro foto-mecânico para controle geodésico de estruturas**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/7361>.

LAGE, Vinícius Nunes; SEGUNDO, Alan Kardek Rêgo. **O uso de giroscópios e acelerômetros para a modelagem matemática de uma plataforma com dois graus de liberdade**. Ouro Preto, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329738052>.

MECHANICAL, Gold. **Inclinômetro Digital Portátil**. s.d. Disponível em: <http://pt.cqgeoequip.com/borehole-equipment/inclinometer/portable-digital-inclinometer.html>.

NOVATEST, Testing Solutions. **In-Place Tiltmeter**. Acesso em: 22 de outubro de 2024. 2020. Disponível em: <https://www.novatest.it/wp-content/uploads/2020/08/049-IN-PLACE-TILTMETER-Eng.pdf>.

PENZ, Rodrigo Siqueira. **Desenvolvimento de um inclinômetro com tecnologia MEMS aplicado ao monitoramento de obras geotécnicas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/299>.

RST INSTRUMENTS. **Sistema de Inclinômetro In-Place MEMS Digital**. Acessado em: 7 de outubro de 2024. 2021. Disponível em: https://rstinstruments.com/wp-content/uploads/Sistema-de-Inclinometro-In-Place-MEMS-Digital-ICB0083A_PORT-1.pdf.

SILVA, Márcio Flávio Sousa. **Sistema de Monitoramento Online de Barragens de Mineração**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1818/11/MONOGRAFIA_SistemaMonitoran

TDK, InvenSense Inc. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4**. [S.l.: s.n.], 2013. Datasheet. Acesso em: 22 de outubro de 2024. Disponível em: https://product.tdk.com/en/search/list#part_no=MPU-6050&site=FBNXDO0R&charset=UTF-

8&group=tdk_pdc_en&design=producttdkcom-
en&fromsyncsearch=1&_l=20&_p=1&_c=part_no-part_no&_d=0.

WERNECK, Márcio de Souza. **O que é e para que serve uma barragem de rejeitos?** Acessado em: 26 de setembro de 2024. 2019. Disponível em:
<https://www.ufabc.edu.br/artigos/o-que-e-e-para-que-serve-uma-barragem-de-rejeitos>.

ANEXO A – Código do sistema proposto

```
#include <Wire.h>
#include <math.h>

const int SENSOR1end = 0x68;
const int SENSOR2end = 0x69;

int acelX1, acely1, acelZ1, acelX2, acely2, acelZ2;
float inc_total;
float leituras_filt[50];
int contador = 0;
const float beta = 0.1;
float leituras[50];
int leituraIndex = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();

  iniciarSensor(SENSOR1end);
  iniciarSensor(SENSOR2end);
}

void loop() {
  lerValores(SENSOR1end, acelX1, acely1, acelZ1);
  lerValores(SENSOR2end, acelX2, acely2, acelZ2);

  float acelX = (acelX1 + acelX2) / 2.0;
  float acely = (acely1 + acely2) / 2.0;
  float acelZ = (acelZ1 + acelZ2) / 2.0;

  float accelXg = acelX / 16384.0;
  float accelYg = acely / 16384.0;
  float accelZg = acelZ / 16384.0;

  inc_total = atan2(sqrt(accelXg * accelXg +
    accelYg*AccelYg), accelZg) * 180.0 / PI;
```

```
if (inc_total >= 0 && inc_total <= 10) {
    inc_total += -0.42;
} else if (inc_total > 10 && inc_total <= 20) {
    inc_total += -1.26;
} else if (inc_total > 20 && inc_total <= 30) {
    inc_total += -0.43;
} else if (inc_total > 30 && inc_total <= 40) {
    inc_total += -0.62;
} else if (inc_total > 40 && inc_total <= 50) {
    inc_total += -0.51;
} else if (inc_total > 50 && inc_total <= 60) {
    inc_total += -1.12;
} else if (inc_total > 60 && inc_total <= 70) {
    inc_total += -1.04;
} else if (inc_total > 70 && inc_total <= 80) {
    inc_total += -0.47;
} else if (inc_total > 80 && inc_total <= 90) {
    inc_total += -0.44;
}

// Aplicando o filtro EWMA
if (contador == 0) {
    leituras_filt[contador] = inc_total;
} else {
    leituras_filt[contador] = beta * inc_total +
        (1 - beta) * leituras_filt[contador - 1];
}

leituras[leituraIndex] = leituras_filt[contador];
leituraIndex++;

if (leituraIndex >= 50) {
    analyzeReadings();
    leituraIndex = 0;
}

Serial.print("Inclinação filtrada (EWMA): ");
Serial.println(leituras_filt[contador]);
```

```
    contador++;

    delay(5000);
}

void iniciarSensor(int endereco) {
    Wire.beginTransmission(endereco);
    Wire.write(0x6B);
    Wire.write(0);
    Wire.endTransmission(true);
}

void lerValores(int endereco, int &acelX, int &acelY, int &acelZ) {
    Wire.beginTransmission(endereco);
    Wire.write(0x3B);
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(endereco, 6, true);

    acelX = (Wire.read() << 8 | Wire.read());
    acelY = (Wire.read() << 8 | Wire.read());
    acelZ = (Wire.read() << 8 | Wire.read());
}

void analyzeReadings() {
    float initial = leituras[0];
    float last = leituras[49];
    float maxDiff = 0;
    int variacao_abrupta = 0;
    bool retorno_normal = false;

    for (int i = 1; i < 50; i++) {
        float diff = abs(leituras[i] - leituras[i - 1]);
        maxDiff = max(maxDiff, diff);

        if (diff > 20) {
            variacao_abrupta++;
        }
    }
}
```

```
        if (abs(last - initial) <= 5) {
            retorno_normal = true;
        }

String scenario;
if (variacao_abrupta == 0) {
    scenario = "Cenário 1: Atenção! Inclinação gradual";
} else if (retorno_normal) {
    scenario = "Cenário 2: Alerta! Inclinação rápida e
    retorno aos valores iniciais";
} else if (variacao_abrupta > 0 && abs(last - initial) > 20) {
    scenario = "Cenário 3: Emergência! Inclinação rápida e permanente";
} else {
    scenario = "Medições normais.";
}

for (int i = 0; i < 50; i++) {
    Serial.print("Medição ");
    Serial.print(i + 1);
    Serial.print(": ");
    Serial.println(leituras[i]);
}

Serial.println("Cenário Identificado: " + scenario);
}
```