



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

Fabricio Roskowski

Predição de deslizamentos de terra com sensores inerciais

Blumenau
2024

Fabricao Roskowski

Predição de deslizamentos de terra com sensores inerciais

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.

Roskowski, Fabricio
Predição de deslizamentos de terra com sensores
inerciais / Fabricio Roskowski ; orientador, Ciro André
Pitz, 2024.
64 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. Sistemas
embarcados. I. Pitz, Ciro André . II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e
Automação. III. Título.

Fabricio Roskowski

Predição de deslizamentos de terra com sensores inerciais

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, 04 de julho de 2024.

Banca Examinadora:

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

Prof. Carlos Roberto Moratelli, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Marcos Vinícius Matsuo, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina.

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos
meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus professores, que ao longo da graduação me proporcionaram um aprendizado valioso e inspirador. Agradeço por cada ensinamento, orientação e pelo suporte oferecido, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus familiares, meu eterno agradecimento pelo apoio incondicional ao longo de todo este processo. Sem a compreensão, paciência e incentivo de vocês, não teria sido possível alcançar esta conquista. Cada palavra de encorajamento e gesto de carinho fez toda a diferença.

Aos meus amigos e colegas, sou imensamente grato pela camaradagem e pelo apoio mútuo. Vocês tornaram esta jornada mais leve e prazerosa, e contribuíram de maneira significativa para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Um agradecimento especial ao Gerson Lange Filho da Defesa Civil Municipal, que se dispôs a ajudar, sanar dúvidas e acompanhar o desenvolvimento deste trabalho. Sua colaboração foi essencial para a realização deste projeto, e sou profundamente grato pela sua dedicação e disponibilidade.

RESUMO

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um protótipo destinado à predição de deslizamentos de terra por meio da utilização de sensores inerciais. O objetivo principal consiste na avaliação do desempenho do protótipo em experimentos, visando detectar precocemente movimentações de terra, principalmente do tipo rastejo. Inicialmente, é desenvolvido um ambiente de testes formado por um protótipo em escala reduzida, permitindo a criação de cenários controlados de deslizamento de terra. Em seguida, diversos cenários são analisados e, então, dados provenientes de sensores inerciais e de umidade são coletados. Esses dados são analisados para fundamentar o algoritmo de predição de deslizamentos de terra proposto neste trabalho. Resultados obtidos no ambiente de testes corroboram a eficácia do algoritmo proposto.

Palavras-chave: Sistemas embarcados; deslizamento de terra; IoT.

ABSTRACT

The present work addresses the development of a prototype aimed at predicting landslides using inertial sensors. The main objective is to evaluate the prototype's performance in experiments aimed at early detection of earth movements, particularly creep-type movements. Initially, a test environment is developed consisting of a scaled-down prototype, enabling the creation of controlled landslide scenarios. Next, multiple scenarios are analyzed, and data from inertial and moisture sensors are collected. These data are analyzed to support the landslide prediction algorithm proposed in this study. Results obtained in the test environment corroborate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: Embedded systems; landslide; IoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Identificação de movimento tipo rastejo.	19
Figura 2 – Protótipo de encosta inclinada.	20
Figura 3 – Bomba de água DC.	21
Figura 4 – Corpos de teste.	21
Figura 5 – módulo GY-521.	22
Figura 6 – Esquemático dispositivo proposto.	24
Figura 7 – Início do experimento.	25
Figura 8 – Fim do experimento.	25
Figura 9 – Curvas de movimentação geradas no primeiro experimento.	26
Figura 10 – Curvas de rotação geradas no primeiro experimento.	26
Figura 11 – Curvas de movimentação filtradas obtidas no primeiro experimento.	27
Figura 12 – Curvas de rotação filtradas obtidas no primeiro experimento.	27
Figura 13 – Curva de umidade do solo gerada no primeiro experimento.	28
Figura 14 – Momento inicial do segundo experimento.	29
Figura 15 – Final do experimento 2.	30
Figura 16 – Curvas de movimentação filtradas geradas no segundo experimento.	31
Figura 17 – Curvas de rotação filtradas obtidas no segundo experimento.	32
Figura 18 – Curva de umidade do solo gerada no segundo experimento.	33
Figura 19 – Momento inicial do experimento de perturbação por umidade.	34
Figura 20 – Momento intermediário do experimento de perturbação por umidade.	35
Figura 21 – Momento final do experimento de perturbação por umidade.	36
Figura 22 – Curvas de movimentação filtradas geradas no terceiro experimento.	36
Figura 23 – Curvas de rotação filtradas obtidas no terceiro experimento.	37
Figura 24 – Curva de umidade do solo gerada no terceiro experimento.	37
Figura 25 – Fluxograma do princípio de funcionamento do dispositivo.	38
Figura 26 – Curvas de movimentação obtidas no primeiro teste de nível 1 de alerta.	39
Figura 27 – Curvas de rotação obtidas no primeiro teste de nível 1 de alerta.	40
Figura 28 – Classificação resultante no primeiro teste de nível 1 de alerta.	41
Figura 29 – Curva de umidade do solo gerada no primeiro teste de nível 1 de alerta.	42
Figura 30 – Imagem do protótipo no estágio inicial do segundo teste de nível 1 de alerta.	43
Figura 31 – Imagem do protótipo no estágio final do segundo teste de nível 1 de alerta	44
Figura 32 – Curvas de classificação e movimentação obtidas no segundo teste de nível 1 de alerta.	45
Figura 33 – Curvas de movimentação obtidas no segundo teste de nível 1 de alerta.	46
Figura 34 – Curvas de rotação obtidas no segundo teste de nível 1 de alerta.	46

Figura 35 – Curva de umidade do solo gerada no segundo teste de nível 1 de alerta.	47
Figura 36 – Imagem do protótipo no estágio inicial do teste de nível 2 de alerta. . .	47
Figura 37 – Imagem do protótipo no estágio final do teste de nível 2 de alerta. . . .	48
Figura 38 – Curvas de classificação e movimentação obtidas no teste de nível 2 de alerta.	48
Figura 39 – Curvas de movimentação obtidas no teste de nível 2 de alerta.	49
Figura 40 – Curvas de rotação obtidas no teste de nível 2 de alerta.	49
Figura 41 – Curvas de umidade do solo gerada no teste de nível 2 de alerta.	50
Figura 42 – Imagem do protótipo no estágio inicial do teste de nível 3 de alerta. . .	50
Figura 43 – Imagem do protótipo no estágio final do teste de nível 3 de alerta. . . .	51
Figura 44 – Curvas de classificação e movimentação obtidas no teste de nível 3 de alerta.	51
Figura 45 – Curvas de movimentação obtidas no teste de nível 3 de alerta.	52
Figura 46 – Curvas de rotação obtidas no teste de nível 3 de alerta.	52
Figura 47 – Curva de umidade do solo gerada no teste de nível 3 de alerta.	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.0.1	Objetivo Geral	12
1.0.2	Objetivos Específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	SISTEMAS QUE UTILIZAM GIROSCÓPIO	13
2.2	SISTEMAS COM FIBRA ÓPTICA	14
2.3	SISTEMAS COM SENSOR ULTRASSÔNICO	15
2.4	SISTEMAS COM VISÃO COMPUTACIONAL	16
3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	18
3.1	AMBIENTE DE TESTES	18
3.2	SISTEMA DE PERTURBAÇÕES	19
3.3	SISTEMA AQUISIÇÃO DE DADOS	19
3.3.1	Microcontrolador	21
3.3.2	Módulo GY-521	22
3.3.3	Sensor de umidade solo	23
3.3.4	Dispositivo proposto	23
3.4	REQUISITOS DE SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E ENVIO DE DADOS	23
3.4.1	Análise em solo seco	24
3.4.2	Análise em solo úmido	30
3.4.3	Definição de parâmetros de software	33
4	RESULTADOS	39
4.1	NÍVEL 1 DE ALERTA	39
4.2	NÍVEL 2 DE ALERTA	41
4.3	NÍVEL 3 DE ALERTA	44
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55
	ANEXO A – Descrição	58

1 INTRODUÇÃO

Os deslizamentos de terra representam um perigo natural de considerável magnitude, com potencial para causar consequências devastadoras, incluindo perda de vidas e danos materiais significativos (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2015). Devido às características de seu meio físico, clima tropical e alta pluviosidade, o Brasil apresenta um conjunto de fatores que favorecem, em algumas regiões, o desencadeamento de fenômenos de deslizamentos. Adicionalmente, a dinâmica de uso e ocupação da terra, muitas vezes desordenada, potencializa a incidência de deslizamentos e agrava seus impactos (GUERRA *et al.*, s.d.). Nos últimos anos, pesquisadores têm dedicado esforços consideráveis ao estudo de métodos para prever e mitigar deslizamentos de terra. Em Santa Catarina, 33,7% do território tem suscetibilidade a deslizamentos de terra classificada como muito alta (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2024).

Diversas tecnologias, tais como sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT), têm sido amplamente utilizadas para monitorar e avaliar a suscetibilidade a deslizamentos de terra (TSAI *et al.*, 2012). Como resultado, essas soluções têm fornecido dados capazes de auxiliar no processo de monitoramento e acompanhamento de áreas de risco. Nos últimos anos, o interesse crescente na utilização de sistemas embarcados e dispositivos eletrônicos para a coleta de dados tem sido evidente, como exemplo o projeto RedeGeo do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, no qual possui estações embarcadas para coleta de dados e informações em encostas. Essas tecnologias têm se mostrado extremamente versáteis e eficazes, oferecendo uma série de vantagens significativas para aquisição de dados, auxílio na tomada de decisões e emissão de alertas.

Dentre as tecnologias utilizadas na prevenção de desastres, destacam-se os sensores associados à sistemas de processamento de sinais. Um sensor pode ser definido como um componente ou circuito eletrônico capaz de mensurar alguma grandeza física, como temperatura e velocidade de rotação do eixo de um motor. (WENDLING, 2010). Esses dispositivos desempenham um papel fundamental ao fornecer dados críticos em tempo real, permitindo monitorar e avaliar diversas grandezas físicas. Sensores de nível, por exemplo, são amplamente utilizados para medir a altura de rios e represas, fornecendo informações essenciais para a prevenção de enchentes. Diversos sensores são utilizados para medir parâmetros climáticos como temperatura, umidade e pressão atmosférica, contribuindo para a previsão de eventos extremos. Em suma, a aplicação desses sensores em sistemas de monitoramento contribui significativamente para a segurança das populações em áreas de risco, além de auxiliar na implementação de medidas preventivas e na minimização dos danos causados por desastres naturais.

Neste contexto, o presente trabalho propõe analisar dados obtidos por meio de sensores inerciais para prever deslizamentos de terra do tipo rastejo, caracterizados por movimentos lentos e superficiais. O dispositivo proposto, embarcado, realizará a coleta de

dados por meio de sensores como giroscópio e acelerômetro. Para o desenvolvimento do protótipo, optou-se pela utilização de uma placa de desenvolvimento baseada no ESP32, que possibilita a comunicação com sensores e atuadores, além de possuir um excelente custo benefício. A programação do dispositivo é realizada em C++, proporcionando praticidade na prototipagem e desenvolvimento de soluções.

1.0.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto consiste no desenvolvimento e avaliação de um dispositivo para detecção e monitoramento de deslocamentos de terra, utilizando sensores inerciais em um sistema embarcado. Este dispositivo visa fornecer alertas antecipados para mitigar riscos associados a deslizamentos de terra. Adicionalmente, o projeto busca demonstrar a aplicabilidade abrangente de sensores inerciais no contexto de monitoramento e prevenção de desastres naturais, destacando sua eficácia na coleta de dados e na geração de informações cruciais para tomada de decisões em áreas vulneráveis.

1.0.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são listados a seguir:

- implementar um sistema embarcado com sensores inerciais;
- analisar os dados adquiridos pelo dispositivo em diferentes cenários;
- desenvolver e implementar um algoritmo para predição de deslizamentos de terra do tipo rastejo;
- avaliar o desempenho do dispositivo proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dedicado à discussão de trabalhos relacionados e metodologias utilizadas na implementação de soluções semelhantes e que podem ser utilizadas para solucionar o problema abordado no presente trabalho.

2.1 SISTEMAS QUE UTILIZAM GIROSCÓPIO

Para o monitoramento e eventual predição de um deslizamento de terra, em (BRITO *et al.*, 2013) é proposto um dispositivo multiparamétrico para monitorar movimentações do solo. Esse dispositivo consiste em uma haste de metal equipada com sensores de deformação (*strain gauge*), acelerômetro, sensor de umidade do solo e sensor acústico piezoelétrico, distribuídos ao longo de seu comprimento para permitir a análise em diferentes camadas do solo. Para poder analisar os dados obtidos através do sistema em questão, foram definidos alguns experimentos que deveriam ser realizados. Primeiramente, foi analisado o comportamento do dispositivo sem interferências, ou seja, o sistema foi deixado por alguns dias no laboratório, situação na qual o solo foi compactado em uma inclinação de aproximadamente 40°. Durante esse experimento, observou-se pouca interferência nos resultados, exceto por um ruído detectado no eixo X do giroscópio, proveniente das ondas sonoras do laboratório de teste. Além disso, foram registradas variações no sensor de som. Em seguida, pequenas pedras foram soltas sobre o protótipo para simular um impacto. Nesse cenário, foram observadas variações nos dados coletados pelo *strain gauge*, no eixo X do giroscópio e no sensor de som. Durante picos sonoros mais intensos, os dados dos sensores tendem a saturar e se sobrepor. Na última excitação para análise do sistema, o solo foi cortado com uma inclinação de aproximadamente 50° e submetido a uma simulação de chuva com 80mm de volume. Após duas horas, um vibrador foi acionado, resultando no início do desprendimento da parte frontal da encosta. Nesse último cenário, os sinais mais proeminentes foram registrados pelo sensor giroscópio e acelerômetro, com variações significativas no eixo X. O sensor de som também registrou variações durante o momento do desprendimento. Com base nos experimentos realizados, constatou-se que o dispositivo multiparamétrico desenvolvido demonstrou eficácia na detecção de movimentações do solo nos diferentes cenários testados.

Já o sistema proposto em (SEMIONE *et al.*, s.d.), consiste em um módulo MPU (Unidade de Medição Inercial) para a aquisição de dados. Os dados coletados são submetidos a um filtro Kalman, visando atenuar os ruídos de medição. No ambiente de testes, foi desenvolvido um protótipo que possibilita a configuração com diferentes inclinações da encosta, além da adição controlada de água sobre o solo. Ao longo do tempo, o solo é submetido a inundações, resultando em instabilidade e eventual deslocamento do equipamento. Durante os testes, foram posicionados três sensores no protótipo. Observou-se que, em casos de deslizamento, apenas um sensor foi capaz de detectar variações momentos

antes do desprendimento do bloco, enquanto os demais sensores perceberam a ocorrência de forma abrupta. A justificativa para a capacidade de detecção de apenas um sensor reside no fato de que a perturbação causada pela adição de água provocou um deslocamento localizado. Esses resultados destacam a importância da precisão na localização e posicionamento dos sensores em sistemas de monitoramento de encostas, a fim de garantir uma detecção eficiente de movimentações do solo e prevenir potenciais deslizamentos.

2.2 SISTEMAS COM FIBRA ÓPTICA

Os métodos desta categoria baseiam-se na capacidade sensitiva da fibra óptica a macro curvaturas, onde a fibra é sujeita a deformações causadas pelo solo, resultando na atenuação da luz que se propaga através dela.

A tecnologia de fibra óptica para detecção de deslizamentos fundamenta-se no princípio da detecção distribuída de fibra óptica (ZHENG *et al.*, 2019). Utiliza o cabo de fibra óptica para medir mudanças nas propriedades físicas, como temperatura, deformação e vibração, a fim de identificar os primeiros indícios de deslizamentos. Comumente instalado ao longo da encosta ou no solo, o cabo de fibra óptica monitora a deformação e movimentação do terreno.

O modelo de monitoramento funciona da seguinte forma: um transceptor óptico microprocessado emite um sinal que é inserido em uma extremidade da fibra. A potência recebida na outra extremidade é então comparada com a potência inicialmente emitida. Quando ocorre um deslizamento de terra, o deslocamento da fibra resulta em uma queda na potência recebida, indicando a ocorrência do evento.

Como destacado em (FARIA JUNIOR; BERALDO FILHO; CELASCHI, 2016), um sistema baseado em fibra óptica para monitoramento de deslizamento de terra, tem vantagens como:

- Simplicidade: baseia-se na emissão e recepção de sinais, facilitando sua implementação.
- Facilidade de instalação: pode ser instalado de forma simples e rápida.
- Ampla escalabilidade: pode ser utilizado em diferentes escalas, desde pequenas áreas até grandes extensões de terreno.

Ao desenvolver um protótipo, foi apresentado em (FARIA JUNIOR; BERALDO FILHO; CELASCHI, 2016) um processo experimental envolvendo a instalação da fibra óptica em estacas de madeira posicionadas em linha reta. Um emissor é colocado em uma extremidade da fibra, enquanto o receptor é posicionado na outra extremidade. Como há estacas intermediárias entre as extremidades, qualquer variação em alguma delas gera uma distorção na fibra, resultando na atenuação do sinal. No experimento em questão, a fibra foi posicionada a uma altura de 50cm acima do solo, fixada nas estacas. Como resultado, ao provocar uma variação de aproximadamente 20cm em uma estaca, observou-se uma

atenuação inicial de 10% do sinal. Essa informação poderia ser utilizada para identificar o incidente e tomar medidas preventivas ou corretivas conforme necessário.

Em síntese, a fibra óptica oferece uma solução confiável para sistemas de monitoramento devido à sua alta sensibilidade, grande alcance, flexibilidade e capacidade de proporcionar monitoramento em tempo real. Entretanto, é importante considerar algumas desvantagens. A implementação inicial pode acarretar um custo mais elevado devido ao preço relativamente alto do material e do sistema de aquisição de dados. Ademais, a fragilidade da fibra óptica em relação à curvatura pode resultar em falhas no sistema após interferências ou curvaturas, tornando essencial uma avaliação cuidadosa do ambiente de instalação antes de sua aplicação.

2.3 SISTEMAS COM SENSOR ULTRASSÔNICO

Os sistemas que empregam sensores ultrassônicos propõem-se a analisar a distância entre o sensor e um objeto específico. Essa distância é medida por meio da emissão e reflexão de ondas sonoras. Embora haja uma variedade de modelos de sensores ultrassônicos disponíveis, todos compartilham o mesmo princípio fundamental: a propagação de ondas sonoras no ambiente.

O dispositivo proposto em (TAQWA *et al.*, 2021) emprega um sensor de umidade do solo e um sensor ultrassônico. O sensor ultrassônico é responsável por medir a distância entre o dispositivo e um objeto fixo posicionado à sua frente. Em caso de deslizamento ou movimentação do objeto fixo, o sensor ultrassônico registra uma alteração na distância medida em relação ao padrão, indicando a ocorrência de deslizamentos. Durante testes realizados em um pequeno protótipo, foi possível detectar o momento em que houve movimentação no obstáculo fixo posicionado à frente do dispositivo. No entanto, foram observadas interferências provenientes de sinais de outros objetos próximos. Isso ocorre devido ao fato de que o sinal emitido pelo sensor ultrassônico do modelo HC-SR04 possui uma propagação cônica. Consequentemente, se o objeto estiver muito distante, a reflexão da onda sonora no próprio solo pode gerar ruídos e interferir na aquisição de dados. Essa característica do sensor ultrassônico HC-SR04 ressalta a importância de considerar as condições ambientais e a distância entre o dispositivo e os objetos de referência ao realizar o monitoramento de deslizamentos de terra.

Em (GUNAWAN *et al.*, 2019) é proposto um sistema que envolve a instalação de um sensor ultrassônico em uma haste vertical, apontado para o solo. Em resumo, a identificação de erosão ocorre por meio da variação na distância captada pelo sensor ultrassônico entre a altura inicial do sistema e o solo. O sensor ultrassônico SRF-05 possibilita uma detecção eficiente e confiável de objetos em diversas condições ambientais. Além disso, sua operação com baixo consumo de corrente elétrica, entre 30 mA e 50 mA, e a capacidade de gerar ondas em um intervalo mínimo de 10 μ s contribuem significativamente para a eficiência energética do sistema.

A utilização de sensores ultrassônicos apresenta vantagens significativas para o desenvolvimento de sistemas embarcados, destacando-se o baixo custo de implementação e o consumo reduzido de energia. No entanto, é importante considerar algumas limitações inerentes a esses dispositivos. Fatores como variações de temperatura, umidade e ruído ambiente podem afetar a precisão das medições realizadas pelos sensores ultrassônicos. Além disso, a natureza da superfície do ambiente influencia diretamente na reflexão das ondas sonoras, podendo comprometer a confiabilidade dos dados obtidos, especialmente em superfícies irregulares. Para mitigar esses desafios, é necessário calibrar e configurar os sensores de acordo com as características de cada ambiente em que são instalados. No entanto, mesmo com esses procedimentos, ainda podem ocorrer interferências causadas pelas condições ambientais específicas. Portanto, ao adotar sensores ultrassônicos em sistemas embarcado, é essencial estar ciente desses possíveis problemas.

2.4 SISTEMAS COM VISÃO COMPUTACIONAL

O método de detecção e previsão de deslizamentos de terra utilizando visão computacional é baseado no processamento de imagens por meio de algoritmos, com possível emprego de inteligência artificial.

Conforme evidenciado em (LV *et al.*, 2023), uma das principais vantagens desse método é sua capacidade de extrair e combinar informações, possibilitando uma identificação robusta, especialmente em áreas com formas complexas, tamanhos variados e de difícil acesso. Entretanto, é importante destacar como desvantagem o elevado custo computacional envolvido no processo de análise de imagens. Por exemplo, no caso dos experimentos realizados, a placa gráfica utilizada foi uma RTX3090, tendo um custo elevado. Também cabe citar a complexidade na extração de características em diferentes escalas, demandando recursos computacionais mais robustos.

No estudo conduzido em (BAO *et al.*, 2022), é abordada a utilização da visão computacional em conjunto com redes neurais convolucionais para mapear a probabilidade de deslizamentos em áreas específicas. A integração desses dois métodos demonstra resultados promissores, capazes de identificar áreas com altas probabilidades de deslizamentos de maneira abrangente, além de possibilitar a exploração de diversas técnicas de aprendizado de máquina em variados cenários. No entanto, como mencionado, a eficácia desse método requer uma quantidade substancial de dados de treinamento para os modelos baseados em visão computacional. Além disso, é importante ressaltar que sua aplicação pode ser limitada em contextos com recursos de dados e processamento restritos.

De maneira geral, é inegável que a aplicação da visão computacional e outras ferramentas de inteligência artificial representam abordagens promissoras, capazes de oferecer excelentes resultados em uma variedade de áreas de estudo e análise. No entanto, a principal limitação reside na demanda por uma significativa quantidade de recursos computacionais, o que resulta em um custo mais elevado para essa solução. Além disso, é

importante ressaltar que sua aplicabilidade pode ser restrita em determinados contextos.

3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias empregadas no desenvolvimento do sistema proposto, abrangendo tanto o protótipo físico quanto o software correspondente. Primeiramente, é detalhado o processo de criação do protótipo físico, abordando a escolha dos materiais, a arquitetura do hardware, bem como os procedimentos de montagem e testes. Em seguida, é detalhado o desenvolvimento do software, com ênfase nas técnicas de programação adotadas, nas ferramentas utilizadas e na integração com o hardware. A descrição destes processos visa proporcionar uma compreensão abrangente e detalhada das etapas envolvidas na materialização do sistema, desde a concepção inicial até a implementação final.

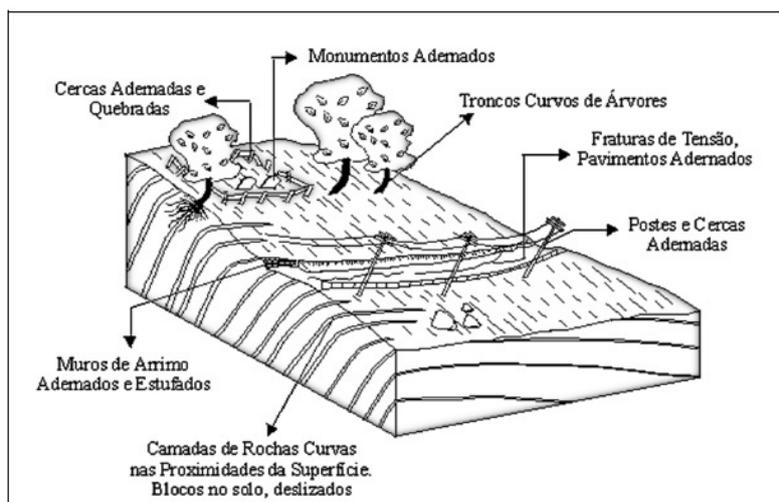
3.1 AMBIENTE DE TESTES

Uma das frentes de desenvolvimento do sistema proposto envolveu a criação de um ambiente de testes para simular deslizamentos de terra, com ênfase nos deslizamentos do tipo rastejo. Segundo (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2015), o rastejo caracteriza-se por um movimento lento, porém contínuo, que envolve grandes volumes de solo, sem uma distinção clara entre o material em repouso e o em movimento. Nesse processo, a força gravitacional desempenha um papel significativo, juntamente com fatores como a umidade e a temperatura do terreno. As variações de temperatura e umidade provocam processos de contração e expansão na massa do solo, que, combinados com a gravidade, resultam no deslocamento do terreno. É importante destacar que, uma vez iniciado, esse movimento pode evoluir para corridas, potencialmente desencadeando catástrofes.

Um movimento de rastejo é desencadeado principalmente pela força da gravidade, embora possa ter várias causas adicionais, como pisoteio de gado, crescimento de raízes, construções ou tráfego de veículos pesados sobre o solo. Conforme ilustrado na Figura 1, os sinais associados a um deslizamento do tipo rastejo frequentemente apresentam dificuldades na distinção de variações no solo, porém, destacam-se claramente os movimentos de objetos situados na superfície. Dada a natureza gradual desse tipo de movimento, que pode evoluir para um deslizamento de maior magnitude, a detecção de seus estágios iniciais possibilita a prontidão e a intensificação da vigilância na área em questão.

Com base nessas considerações, o protótipo em escala reduzida foi desenvolvido utilizando uma caixa de madeira. Essa estrutura permite a adição de terra de modo a modelar um terreno inclinado, viabilizando a criação de perturbações, especialmente no que se refere à umidade do solo. Dessa forma, é possível provocar deslizamentos de terra e analisar os eventos resultantes, contribuindo para um melhor entendimento dos processos envolvidos. Como resultado, o protótipo construído possui 100cm x 45cm x 45cm de espessura, sendo apresentado na Figura 2.

Figura 1 – Identificação de movimento tipo rastejo.



Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/riscos/risco11b.html>. Acesso: 04 mai 2015.

Fonte: (IGEOLÓGICO, 2024)

3.2 SISTEMA DE PERTURBAÇÕES

Visando reproduzir perturbações que reflitam as condições reais de movimentação do solo, o principal foco foi a perturbação causada pela umidade do solo, especificamente devido à precipitação. Para assegurar uniformidade nos testes, desenvolveu-se um sistema capaz de simular a influência da água na umidade do solo, imitando a chuva. Para tanto, utilizou-se uma mangueira de aquário perfurada ao longo de seu comprimento. Essa mangueira, conectada a uma pequena bomba de água como a apresentada na Figura 3, realiza uma irrigação sobre o protótipo, simulando a precipitação. O acionamento desta bomba de água é controlado por um microcontrolador ESP8266, que, em conjunto com um relé, gerencia a operação do sistema de irrigação.

Além do sistema de irrigação para simular precipitações de chuva, foram adquiridos três corpos de ferro com massas de 500 g, 700 g e 1 kg apresentados na Figura 4. Esses pesos são utilizados para impactar sobre o solo inclinado, provocando movimentos que podem resultar em deslizamentos.

Para garantir a repetitividade e a precisão dos testes, foi definida uma altura de 120 cm acima da base do protótipo para a liberação dos corpos de ferro. Essa altura foi escolhida para reproduzir uniformemente a intensidade do impacto em todas as simulações, permitindo uma análise consistente dos deslizamentos gerados.

3.3 SISTEMA AQUISIÇÃO DE DADOS

Para definir a arquitetura do sistema de aquisição de dados, com base nas revisões bibliográficas apresentadas, foram estabelecidos dois critérios principais que o sistema deve atender:

Figura 2 – Protótipo de encosta inclinada.



Fonte: O autor.

- Sistema Embarcado: O sistema de monitoramento deve ser capaz de operar em morros e locais de difícil acesso, sem depender de infraestruturas externas complexas.
- Custo e Confiabilidade: O desenvolvimento do sistema deve ser economicamente viável, mantendo um custo reduzido sem comprometer a confiabilidade na aquisição de informações.

Considerando esses critérios, decidiu-se que o sistema deveria incluir um microcontrolador para realizar o processamento embarcado e transmitir as informações via comunicação sem fio. Além disso, para monitorar os parâmetros necessários, o sistema foi equipado com um giroscópio e um acelerômetro. Esses sensores, conforme demonstrado no trabalho de (GUNAWAN *et al.*, 2019), permitem verificar a aceleração e a movimentação angular nos eixos x, y e z. Também foi incorporado um sensor de umidade do solo, essencial para avaliar as condições que podem levar a deslizamentos. Essa configuração garante que o sistema seja adequado para o monitoramento em locais remotos e de difícil acesso, ao mesmo tempo em que mantém a precisão e confiabilidade na coleta de dados, tudo isso a um custo acessível.

Figura 3 – Bomba de água DC.



Fonte: (MINI..., 2024)

Figura 4 – Corpos de teste.



Fonte: O autor.

3.3.1 Microcontrolador

De acordo com a literatura de (IBRAHIM, 2002), os microcontroladores são circuitos integrados que incorporam todos os componentes necessários para operar, dependendo exclusivamente de uma fonte de alimentação externa. Em termos simples, os microcontroladores podem ser entendidos como computadores encapsulados em um único chip.

Ao pesquisar opções comerciais de microcontroladores que atendessem aos requisitos estabelecidos para o desenvolvimento do projeto, foi escolhido o ESP32. Conforme destacado na literatura (GRIDLING; WEISS, 2007), o ESP32 é capaz de operar em amplas variações de temperatura e demonstra alta confiabilidade na aquisição de dados, juntamente com um rápido tempo de processamento, consolidando-se como uma escolha

confiável para aplicações industriais. Além disso, o ESP32 apresenta uma combinação poderosa de recursos, incluindo um processador dual-core, módulos integrados de comunicação Wi-Fi e Bluetooth, uma ampla variedade de portas de entrada e saída, e baixo consumo de energia. Com um extenso conjunto de portas de uso geral, o ESP32 pode ser facilmente conectado a dispositivos externos, como sensores e atuadores, para troca de informações.

Levando em consideração as informações anteriormente apresentadas e a relação custo benefício do dispositivo, o ESP32 foi escolhido como microcontrolador para o desenvolvimento do dispositivo.

3.3.2 Módulo GY-521

Ao buscar por opções de sensores que atendessem a esses requisitos, foi possível identificar o módulo GY-521, veja em (ANDRES; BATISLA-ONG; AIS, 2021) como uma escolha adequada. Tal módulo é amplamente utilizado em sistemas de monitoramento e controle devido à sua capacidade de fornecer dados precisos sobre movimento e orientação. O principal componente do GY-521 é um sistema microeletromecânico (*micro-electromechanical system* - MEMS) modelo MPU-6050, que combina um acelerômetro de três eixos e um giroscópio de três eixos em um único chip, oferecendo uma solução completa para aplicações que requerem medições de aceleração linear e rotação. Na Figura 5 é apresentada uma fotografia do módulo GY-521.

Figura 5 – módulo GY-521.



Fonte: (ANDRES; BATISLA-ONG; AIS, 2021)

Um acelerômetro é um sensor triaxial capaz de detectar movimentos nos três eixos cartesianos X, Y e Z (BRITO *et al.*, 2013). Este dispositivo mede a aceleração específica a que um objeto está sujeito, seja em movimento ou em repouso, permitindo determinar a orientação do objeto.

Giroscópios, são dispositivos mecânicos utilizados para medir a orientação e a estabilidade angular de um objeto em movimento, capazes de detectar a velocidade angular

quando montados em uma estrutura em rotação, baseando-se no princípio de conservação do momento angular (PASSARO *et al.*, 2017).

O MPU-6050 possui um recurso interno denominado DMP (*Digital Motion Processor*), que permite que o algoritmo de detecção de movimento seja processado pelo próprio circuito integrado, aliviando essa tarefa do microcontrolador. O DMP realiza a aquisição dos dados do acelerômetro e do giroscópio, processa esses dados, e o resultado pode ser lido diretamente ou adicionado a um buffer do tipo FIFO (*First In, First Out*). Além do acelerômetro e do giroscópio, o MPU-6050 inclui um sensor interno de temperatura, capaz de medir temperaturas no intervalo -40°C a 85°C . É importante destacar que o MPU-6050 possui conversores A/D (analógico para digital) de 16 bits de resolução para cada canal, permitindo que todos os sinais sejam amostrados simultaneamente.

3.3.3 Sensor de umidade solo

O sensor resistivo de umidade do solo opera monitorando a variação da resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos no solo. A resistência elétrica medida pelo sensor é inversamente proporcional à umidade do solo, ou seja, quanto maior a quantidade de água presente no solo, menor será a resistência elétrica registrada. Conseqüentemente, o valor de tensão fornecido pelo sensor diminuirá conforme a umidade aumenta.¹

3.3.4 Dispositivo proposto

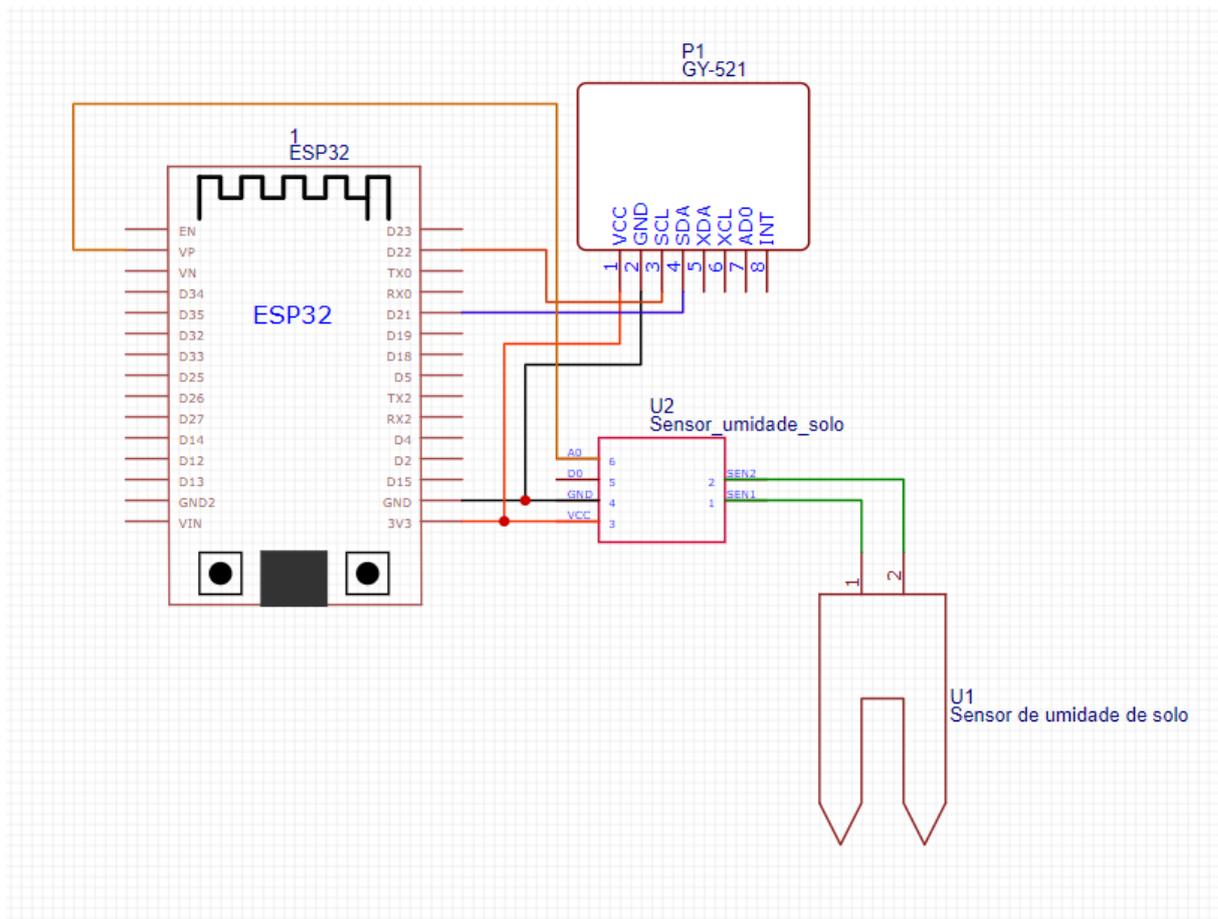
O dispositivo proposto incorpora o módulo GY-521 juntamente com um sensor de umidade do solo, ambos conectados a um microcontrolador ESP32. Para garantir o correto funcionamento e a precisão das medições, o dispositivo deve ser fixado na parte superior de uma haste de metal, que será enterrada no solo a uma determinada profundidade. A escolha da haste de metal se justifica por sua rigidez, que permite manter a forma e não se deforma facilmente sob pressão ou movimentos do solo. Isso garante que as vibrações e movimentações do terreno sejam transmitidas para o módulo GY-521 sem perdas significativas de energia ou distorção. A integridade estrutural da haste é essencial para que o sensor de movimento registre informações sobre os deslocamentos e vibrações. Assim, o sistema completo é capaz de monitorar tanto a umidade do solo quanto às movimentações, proporcionando dados essenciais para a avaliação de deslizamentos de terra. O esquemático do dispositivo pode ser observado na Figura 6.

3.4 REQUISITOS DE SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E ENVIO DE DADOS

Com a arquitetura de hardware projetada, o desenvolvimento de um software capaz de analisar dados e emitir alertas requer uma compreensão detalhada da dinâmica

¹ O sensor de umidade escolhido neste trabalho é o FC-28 (MÓDULO... , 2024), o qual é utilizado para estimar, aproximadamente, se o solo está muito úmido, pouco úmido ou seco.

Figura 6 – Esquemático dispositivo proposto.



Fonte: O autor

do sistema de aquisição de dados. Para isso, uma série de experimentos foi conduzida no ambiente de testes, visando analisar os dados obtidos pelos sensores. Esses experimentos permitiram coletar informações detalhadas sobre o comportamento dos sensores em diferentes condições, as quais foram utilizadas para ajustar parâmetros e desenvolver algoritmos de análise que identificam padrões de movimentação e variações de umidade do solo. Com base nessas análises, o software foi projetado para processar os dados em tempo real, identificar situações de risco e emitir alertas oportunos, contribuindo para a prevenção de deslizamentos de terra e outras instabilidades do terreno.

3.4.1 Análise em solo seco

O primeiro experimento consistiu na modelagem de um protótipo de terreno inclinado, configurado com uma inclinação de aproximadamente 50° no topo e 90° próximo à base como pode ser observado na Figura 7, com o solo inicialmente seco. A perturbação escolhida foi a queda de corpos de prova sobre o topo do morro, próximo à base da haste de metal contendo o dispositivo de monitoramento. Os corpos de testes foram soltos em ordem crescente de peso, com um intervalo de aproximadamente 15 segundos entre cada

queda. Este procedimento foi projetado para observar como o impacto de diferentes massas afeta o solo e provoca movimentações detectáveis pelo dispositivo. O protótipo após a atuação das perturbações pode ser observado na Figura 8.

Figura 7 – Início do experimento.



Fonte: O autor

Figura 8 – Fim do experimento.

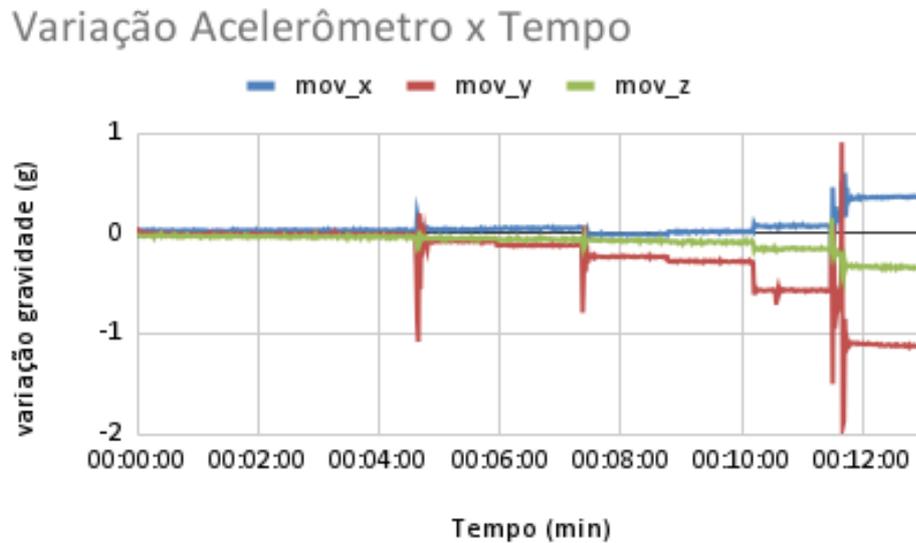


Fonte: O autor

Como resultado, as curvas obtidos pelo acelerômetro ao longo do tempo estão apresentados na Figura 9. Tais curvas demonstram que uma mudança na aceleração

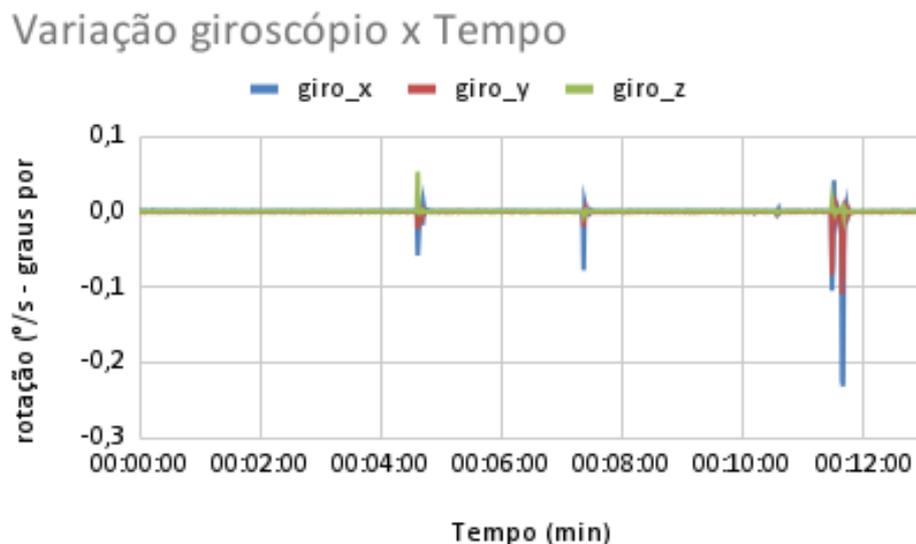
corresponde a uma movimentação no espaço. As curvas obtidas através do giroscópio são visualizadas na Figura 10. O giroscópio identifica movimentos rotacionais, fornecendo informações detalhadas sobre a rotação dos eixos. Cabe ressaltar que ao ligar o dispositivo, os valores do sensor são zerados, ou seja, apenas será analisado a variação dos dados em relação à posição inicial de repouso.

Figura 9 – Curvas de movimentação geradas no primeiro experimento.



Fonte: O autor

Figura 10 – Curvas de rotação geradas no primeiro experimento.

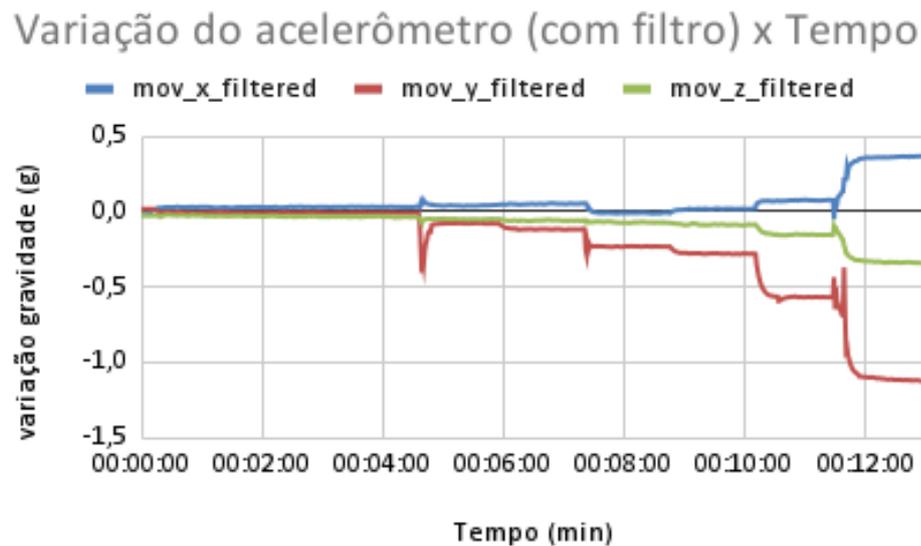


Fonte: O autor

A fim de eliminar possíveis perturbações durante a aquisição de dados, foi implementado um filtro digital de média móvel exponencial, conhecido como EWMA (*Exponential*

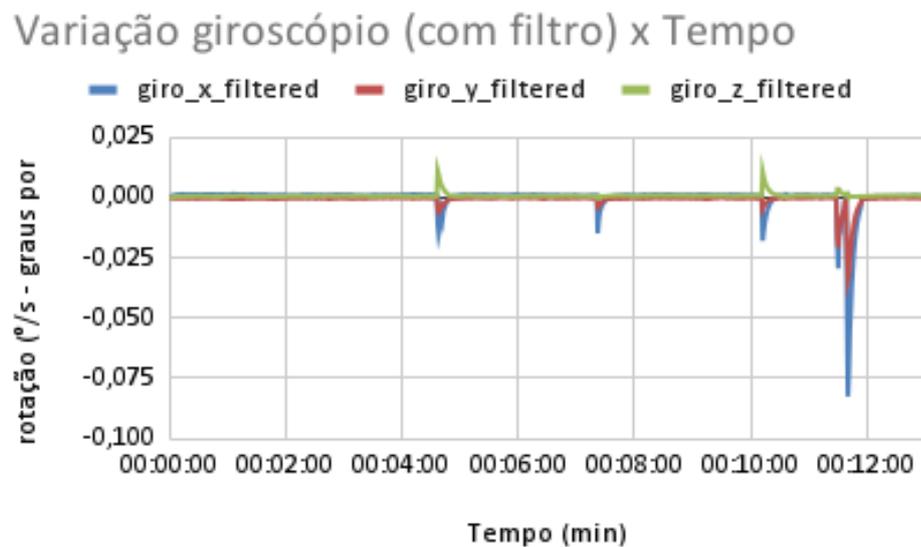
Weighted Moving Average). Esse filtro é eficaz na suavização dos dados, reduzindo o ruído e destacando as tendências nas medições. Como resultado, os dados de movimentação e rotação foram processados utilizando o filtro EWMA. As Figuras 11 e 12 mostram os resultados filtrados, ilustrando claramente como o filtro melhorou a qualidade dos dados e diminuiu a amplitude de variação, proporcionando uma análise mais precisa e confiável das variações de aceleração e rotação detectadas durante os experimentos.

Figura 11 – Curvas de movimentação filtradas obtidas no primeiro experimento.



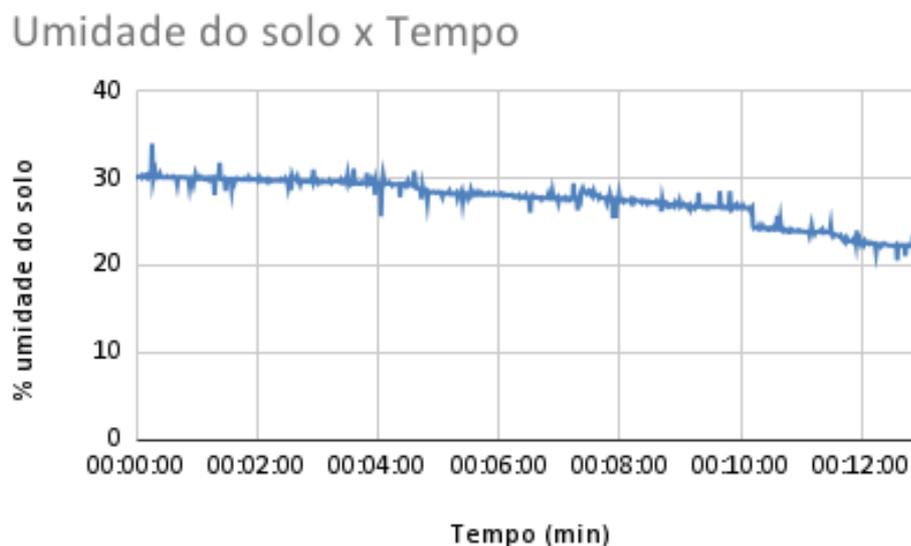
Fonte: O autor

Figura 12 – Curvas de rotação filtradas obtidas no primeiro experimento.



Fonte: O autor

Figura 13 – Curva de umidade do solo gerada no primeiro experimento.



Fonte: O autor

Ao analisar os gráficos apresentados, identificamos vários pontos de interesse. No gráfico de movimentação da Figura 11, é evidente uma deformação nos valores registrados pelo acelerômetro nos três eixos, causada pela queda dos pesos sobre o protótipo, resultando em um impacto no solo. Após essa deformação, os valores não retornam à posição inicial, indicando um deslocamento em relação à posição original, o que sugere uma movimentação significativa do solo após o impacto, destacando a sensibilidade do sensor em detectar até pequenas variações na posição.

Nos gráficos de rotação, com e sem filtro apresentados nas Figuras 12 e 10, observa-se uma variação de sinal em momentos específicos, coincidindo com a queda dos corpos de teste sobre o protótipo, resultando em uma ligeira rotação do sistema. No entanto, em regime permanente, os valores do giroscópio tendem a zero nos três eixos, sugerindo a capacidade do giroscópio em identificar a ocorrência de um impacto próximo à área onde está fixada a haste de metal, o que é crucial para alertar sobre eventos que possam comprometer a estabilidade do solo.

Ao analisar a curva referente à umidade do solo, apresentada na Figura 13, observa-se a presença de ruído, que pode ser mitigado utilizando um filtro digital. No entanto, nota-se também uma ligeira variação nos valores da umidade do solo nos mesmos instantes em que ocorrem movimentações do solo. Essa variação não retorna ao valor anterior após o evento, sugerindo que pode ser causada por uma movimentação do sensor, resultante da movimentação do solo, destacando a importância de interpretar os dados da umidade do solo com cautela, considerando possíveis interferências externas. Contudo, pode-se concluir que uma brusca variação na porcentagem de umidade do solo pode indicar uma forte movimentação no solo.

Para validar as considerações anteriores, o experimento foi repetido, desta vez lançando apenas o corpo de maior peso sobre o protótipo, três vezes consecutivas. Esse procedimento foi realizado para observar com maior precisão os efeitos do impacto do corpo mais pesado sobre o solo e os sensores. As Figuras 14 e 15 apresentam o protótipo antes e após a perturbação causada pela queda dos pesos, ilustrando as condições iniciais e as deformações subsequentes no solo, proporcionando uma comparação visual direta entre o estado do protótipo antes e depois dos impactos.

Figura 14 – Momento inicial do segundo experimento.



Fonte: O autor

Como resultado do experimento, as curvas geradas com o filtro são apresentadas nas Figuras 16 e 17 e a curva de umidade do solo é apresentada na Figura 18.

Como pode ser observado, no momento do impacto há movimentação e rotação nos três eixos, com cada impacto do corpo sobre o protótipo provocando uma resposta significativa nos sensores, registrando mudanças tanto na aceleração quanto na rotação. Adicionalmente, ao analisar o gráfico gerado pelo sensor de umidade do solo, nota-se uma leve variação a partir do instante em que o peso atinge o protótipo pela primeira vez. Essa variação sugere que o impacto também pode influenciar a leitura da umidade, possivelmente devido à compactação do solo ou à redistribuição da umidade no local do impacto.

Figura 15 – Final do experimento 2.



Fonte: O autor

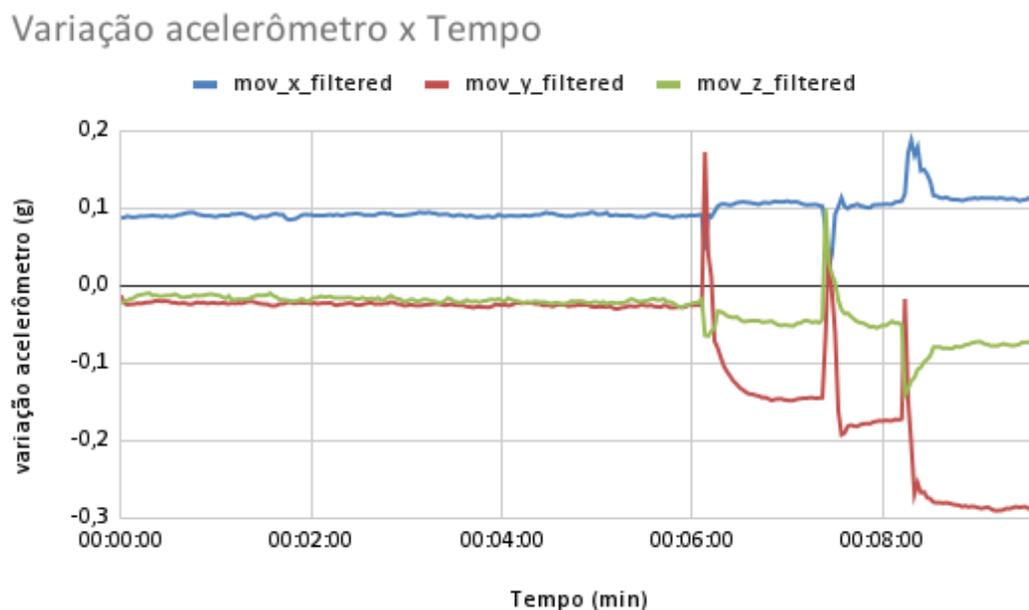
3.4.2 Análise em solo úmido

Nas condições de solo úmido, foi realizado um experimento, capaz de produzir efeitos mais semelhantes aos enfrentados em grande parte dos deslizamentos de terra, no qual o principal fator é a perturbação por umidade causada por chuvas intensas. Para simular essa condição, o sistema de irrigação foi acionado de maneira contínua. Foram disponibilizados 10 litros de água, gradualmente distribuídos pelo sistema de irrigação sobre o protótipo do terreno inclinado. Este procedimento teve como objetivo saturar o solo, aumentando a umidade até níveis críticos, semelhantes aos que podem desencadear deslizamentos de terra em situações reais. O tempo em que o sistema de irrigação ficou em execução foi de aproximadamente 1h e 30min, momento no qual ocorreu um grande deslizamento no protótipo. As Figuras 19, 20 e 21 apresentam o protótipo antes, durante e após a realização do experimento, respectivamente.

Os resultados do experimento podem ser observados nas Figuras 22, 23 e 24 que representam, movimentação, rotação e umidade do solo respectivamente.

Os resultados obtidos nos gráficos de movimentação mostram uma perturbação crescente ao longo do tempo nos três eixos. Considerando que o experimento teve a duração de aproximadamente 1 hora e 30 minutos, conclui-se que a movimentação do solo ocorreu de forma lenta, característica típica do deslizamento do tipo rastejo, objeto principal deste estudo. Observando a Figura 20, que apresenta o protótipo após 43 minutos do início do experimento, é quase imperceptível qualquer sinal visível de movimentação do solo

Figura 16 – Curvas de movimentação filtradas geradas no segundo experimento.



Fonte: O autor

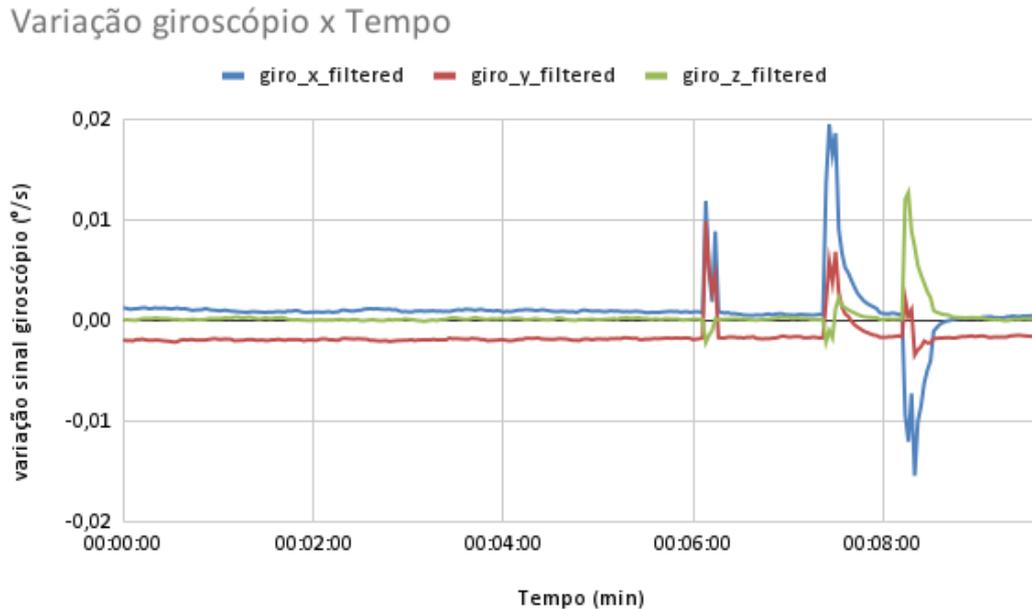
na região próxima a base da haste. No entanto, o gráfico de movimentação, Figura 22 já indicava variações crescentes nos valores registrados pelo sensor, demonstrando que, mesmo sem alterações visíveis a olho nu, o solo estava se movendo de maneira gradual e contínua.

O gráfico de velocidade angular da Figura 23 não apresenta grandes picos ou variações bruscas, mantendo uma tendência constante ao longo do experimento. Isso se deve à ausência de impactos ou ações abruptas sobre o sensor, apenas pequenas e lentas movimentações do solo. Essa observação é crucial para compreender a sensibilidade e a utilidade do giroscópio no contexto deste estudo. Enquanto o giroscópio é eficiente para detectar variações bruscas e repentinas, como impactos ou movimentos rápidos, ele é menos eficaz em captar movimentos graduativos e contínuos.

Ao analisar o gráfico da umidade do solo apresentado na Figura 24, observa-se um aumento na umidade detectada logo no início do experimento, a qual é atribuída à saturação do solo pela irrigação inicial. Posteriormente, a umidade do solo apresenta pouca variação, mantendo uma tendência constante. Essa estabilidade é significativa, indicando que uma vez que o solo atinge um determinado nível de umidade, tende a permanecer nesse estado por um período prolongado. Isso sugere que, em condições naturais, a umidade do solo pode se manter relativamente constante mesmo sob influência de chuvas intermitentes. Essa observação é crucial, pois evidencia que quanto maior a umidade do solo, maiores são as chances de ocorrência de deslizamentos do tipo rastejo.

Com base nas informações analisadas e apresentadas anteriormente a respeito da dinâmica do sistema é possível estimar um algoritmo no qual possa ser utilizado para

Figura 17 – Curvas de rotação filtradas obtidas no segundo experimento.



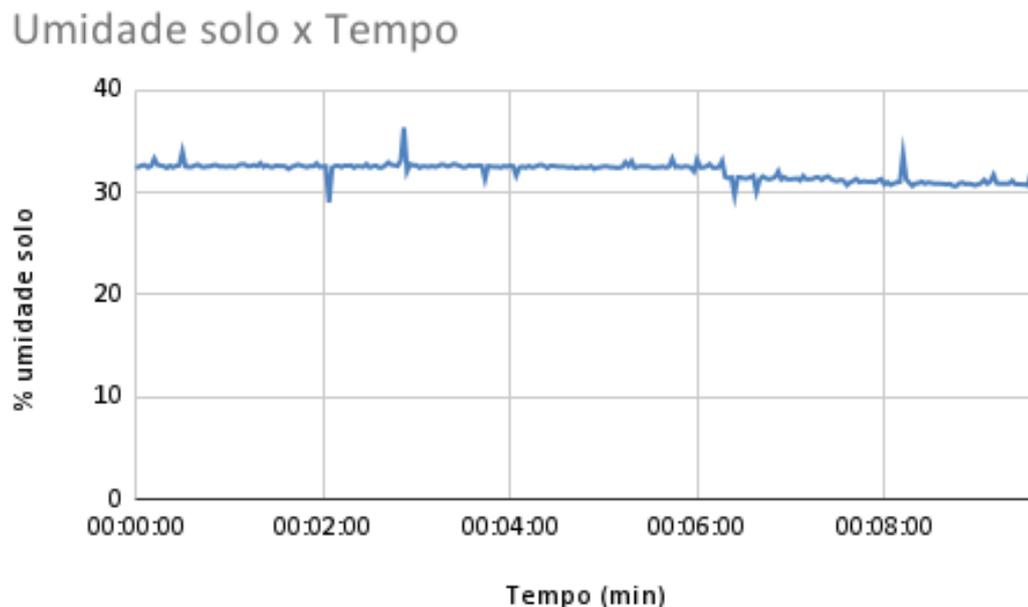
Fonte: O autor

emitir alertas e detectar o início de movimentações de solo. Na Figura 25 é apresentado um fluxograma ilustrando de forma simples o funcionamento esperado do algoritmo, no qual irá identificar os valores dos sensores e classificar em 3 níveis de alerta.

O primeiro nível de alerta visa detectar pequenas movimentações, indicando um estágio inicial que não representa um risco iminente. Neste cenário, o solo encontra-se seco, e ocorre uma pequena variação entre a posição atual e a inicial em mais de um eixo. Outra situação que atinge este nível de alerta é uma variação em algum eixo de rotação. A fundamentação desta escolha baseia-se no fato de que a umidade exerce grande influência nos deslizamentos de terra, quando o solo está mais seco, a probabilidade de movimentação é menor. Pequenas variações podem indicar a presença de interferências externas, como a passagem de um animal, uma pessoa ou um veículo próximo ao sensor. Quando analisada a rotação, podemos identificar a queda de algum objeto próximo ao sensor, como uma pedra, que pode ter se deslocado devido a uma movimentação de solo mais acima do posicionamento do sensor. Portanto, o primeiro nível de alerta serve como uma medida preventiva, identificando movimentos que, embora não sejam imediatamente perigosos, indicam condições que precisam ser monitoradas com maior atenção.

O segundo nível de alerta considera o estado úmido do solo, pois as probabilidades de desencadear deslizamentos de terra são maiores nessas condições. Este nível busca identificar variações significativas na movimentação do solo, desconsiderando o sinal do giroscópio. Uma brusca variação no sensor de umidade do solo em curto intervalo de amostras pode indicar movimentação do sensor localizado na base da haste. O acionamento deste nível de alerta ocorre quando há uma variação média na posição inicial e final do

Figura 18 – Curva de umidade do solo gerada no segundo experimento.



Fonte: O autor

acelerômetro em qualquer dos três eixos. Outro ponto que pode acionar este nível de alerta é uma brusca variação na umidade do solo em um curto intervalo de amostras.

O terceiro nível de alerta é acionado quando há uma grande variação entre a posição inicial e a posição atual em mais de um eixo do acelerômetro, indicando uma movimentação significativa. Este nível de alerta, sinalizando que um deslizamento de terra pode estar prestes a ocorrer ou já ter iniciado, é ativado independentemente da umidade do solo ou das condições climáticas. Se uma variação de rotação for detectada simultaneamente, inicialmente considera-se apenas o sinal de movimentação. Após algumas amostras de tempo, é verificado se a variação persiste para identificar se ocorreu um impacto que gerou ruído no sensor de movimentação. Caso a grande variação de posição permaneça após essas amostras, o nível 3 é definitivamente acionado.

3.4.3 Definição de parâmetros de software

Para definir os parâmetros de acionamento de cada nível do algoritmo, analisaram-se os gráficos gerados nos experimentos anteriores para verificar o comportamento do solo antes, durante e após as perturbações. Para reduzir o ruído nos dados, utilizou-se o filtro digital EWMA. A arquitetura básica do algoritmo considera as variações entre os valores iniciais e atuais gerados pelos sensores. No caso do acelerômetro, os valores representam a movimentação entre a posição atual e a posição inicial do dispositivo, enquanto os sinais do giroscópio indicam a rotação entre dois eixos. Ao ligar o dispositivo, ocorre um processo de setup inicial, momento no qual se identifica os valores dos sensores e se definem os pontos

Figura 19 – Momento inicial do experimento de perturbação por umidade.



Fonte: O autor

de referências dos sensores. Todas as variações subsequentes são calculadas em relação a esse ponto inicial de referência, permitindo um monitoramento preciso das movimentações e rotações do solo.

Para o primeiro nível de alerta, definiu-se um delta de 0,02 para a movimentação, sinal gerado pelo acelerômetro, e um delta de rotação de 0,009, gerado pelo giroscópio. Além disso, o percentual de umidade do solo deve estar abaixo de 40%. Nessas condições, o solo está seco e uma pequena perturbação pode ser detectada, indicando um impacto na região próxima ao dispositivo.

Para o segundo nível de alerta, o percentual de umidade do solo deve estar acima de 40%, e o delta de variação entre a posição atual e a inicial deve ser maior que 0,005. Isso é baseado na premissa de que, em condições de solo encharcado, as chances de ocorrer um deslizamento do tipo rastejo são maiores. Assim, qualquer variação na posição deve ser um sinal de preocupação. Quanto à variação de umidade do solo entre amostras, definiu-se um limite de 6 pontos percentuais. Ou seja, uma brusca variação no percentual de umidade do solo em três amostras coletadas pode indicar uma movimentação do sensor ou um acúmulo repentino de água no solo.

Por fim, para o nível 3 de alerta, a variação entre a posição atual e a inicial deve ser maior que 0,08. Neste caso, independente da umidade do solo, caso haja uma movimentação de tamanha grandeza, considera-se que há um risco muito alto de deslizamento e o mesmo deve ser averiguado.

Figura 20 – Momento intermediário do experimento de perturbação por umidade.



Fonte: O autor

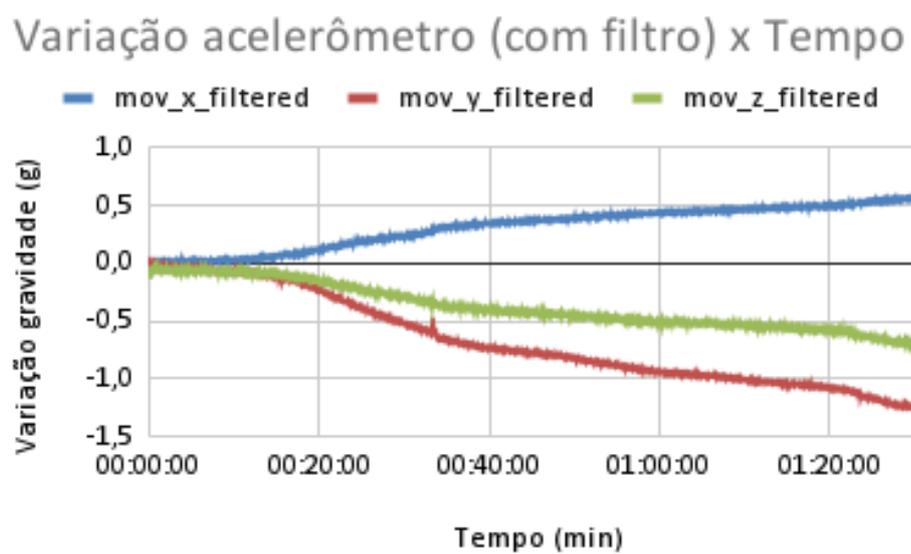
A definição dos parâmetros foi baseada nos dados coletados durante os testes e excitações do protótipo, visando minimizar a interferência de ruídos e desconsiderar perturbações que possam gerar falsos alertas. Além disso, uma vez que um nível de alerta é detectado, ele permanecerá ativo até que um nível de maior magnitude seja observado. Isso assegura que, ao menor sinal de um possível evento, ele seja detectado e continue a ser monitorado e informado. A implementação em Arduino do algoritmo proposto pode ser consultada no Anexo A deste trabalho.

Figura 21 – Momento final do experimento de perturbação por umidade.



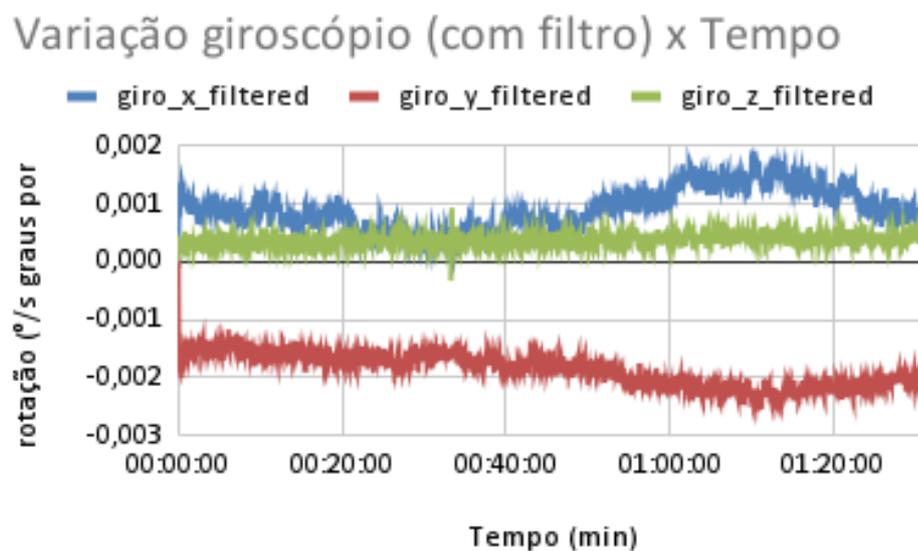
Fonte: O autor

Figura 22 – Curvas de movimentação filtradas geradas no terceiro experimento.



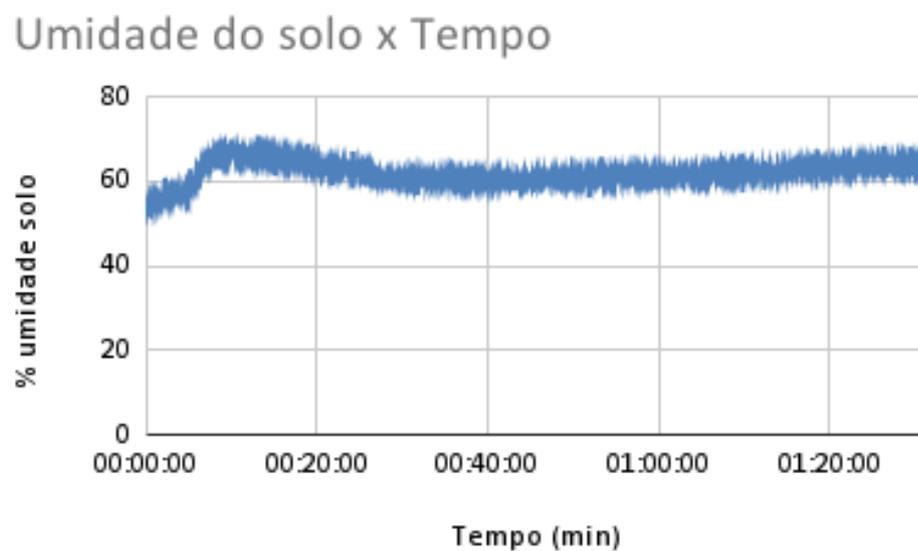
Fonte: O autor

Figura 23 – Curvas de rotação filtradas obtidas no terceiro experimento.



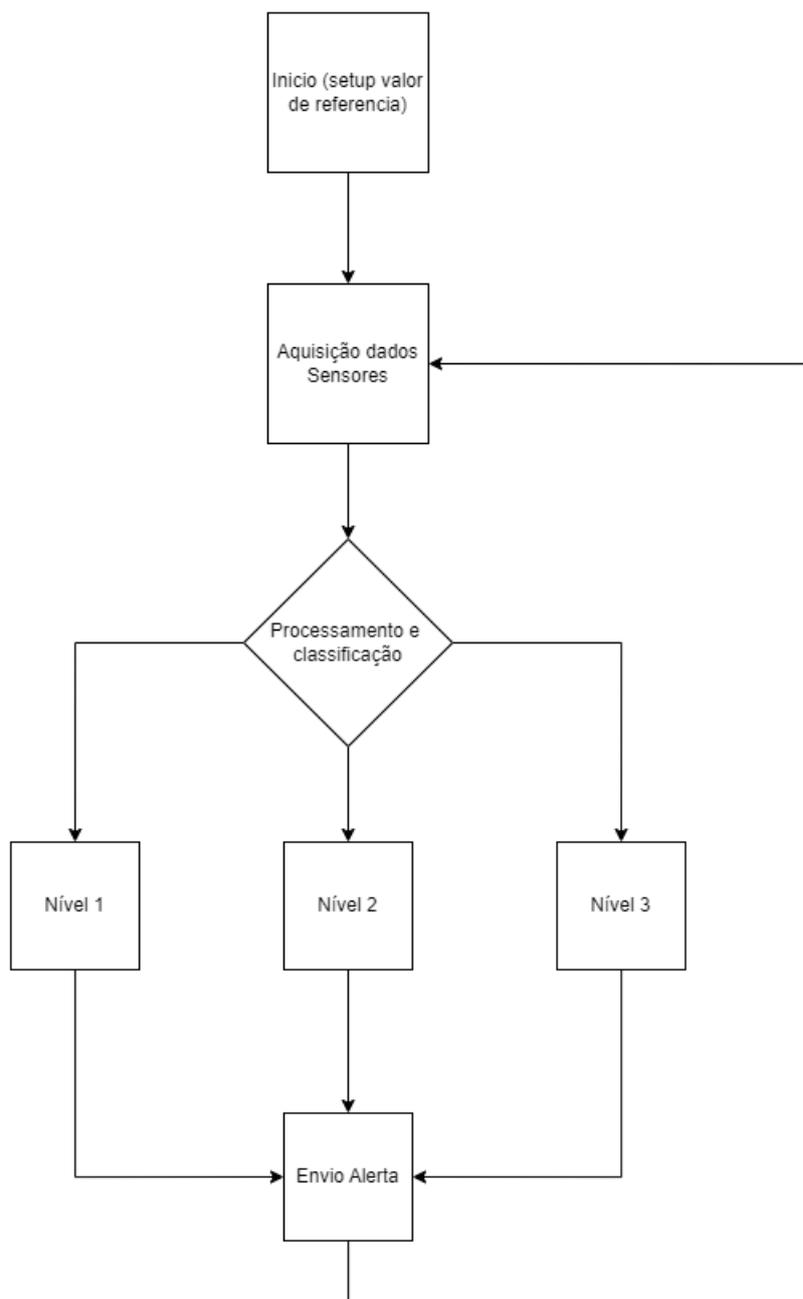
Fonte: O autor

Figura 24 – Curva de umidade do solo gerada no terceiro experimento.



Fonte: O autor

Figura 25 – Fluxograma do princípio de funcionamento do dispositivo.



Fonte: O autor

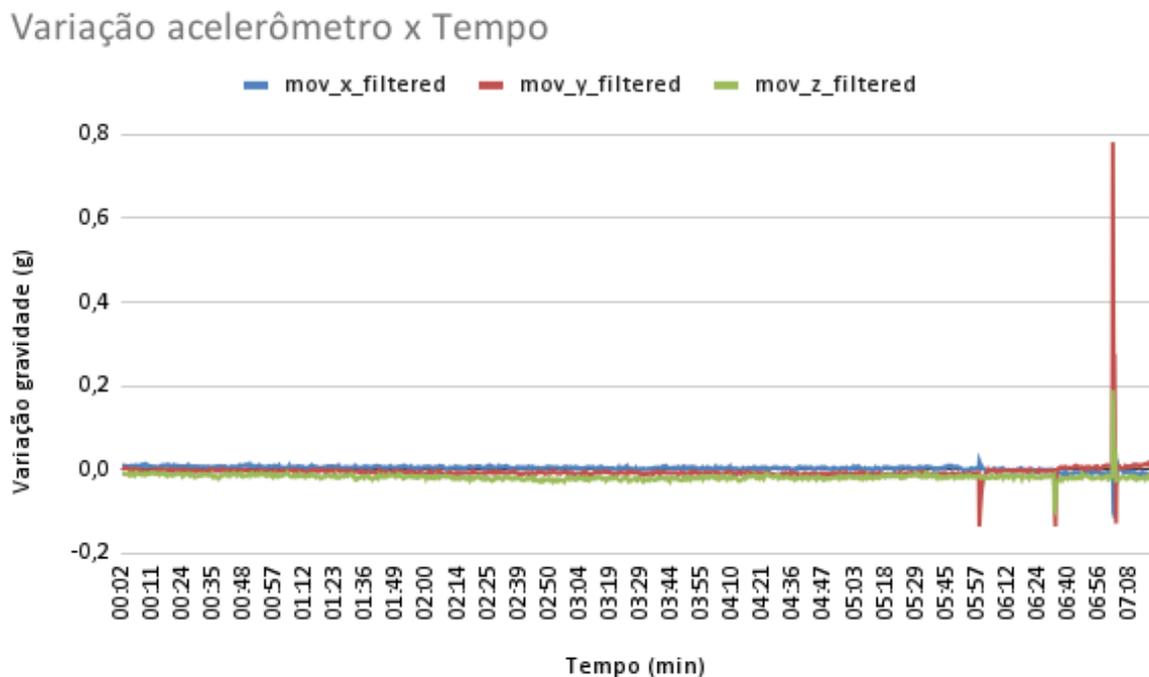
4 RESULTADOS

Para verificar o desempenho do sistema proposto, foram realizados novos testes no protótipo, com o objetivo de analisar sua confiabilidade. Para tanto, busca-se analisar o comportamento do sistema para cada um dos níveis de alerta, neste caso, foram desenvolvidos testes buscando realizar as excitações necessárias para ativar cada um dos 3 níveis de alerta e observar os resultados.

4.1 NÍVEL 1 DE ALERTA

O nível 1 pode ser acionado em condições em que o solo apresenta percentual de umidade abaixo de 40% e uma variação entre a posição inicial e final é identificada em mais de um eixo, ou ainda quando ocorre uma variação de rotação em algum eixo. Sabendo disso, primeiro teste foi conduzido com o solo seco, seguindo a padronização previamente mencionada. O terreno da plataforma de validação foi disposto com uma inclinação de aproximadamente 50°, simulando um terreno inclinado. Nesse cenário, as massas foram soltas em ordem crescente, replicando condições propensas a deslizamentos de terra. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 26, 27, 28 e 29, permitindo uma análise detalhada do desempenho do algoritmo.

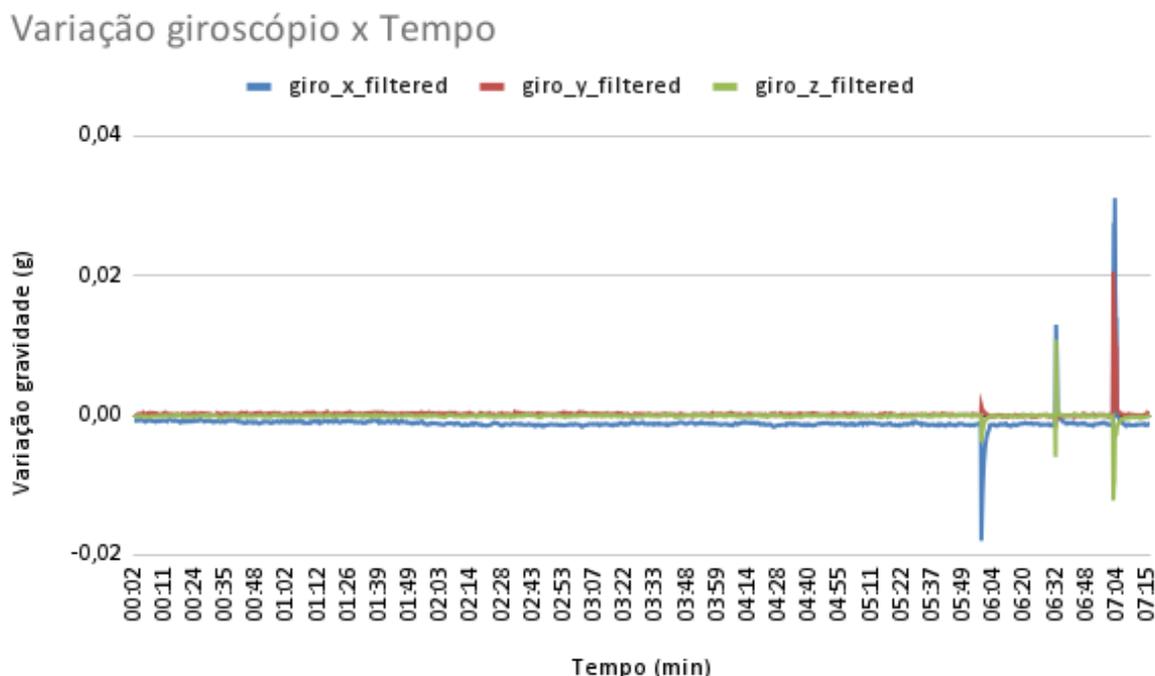
Figura 26 – Curvas de movimentação obtidas no primeiro teste de nível 1 de alerta.



Fonte: O autor

Observando o gráfico de movimentação da Figura 26 e de rotação da Figura 27, é visível que aproximadamente 6 minutos após o início da aquisição de dados ocorre uma

Figura 27 – Curvas de rotação obtidas no primeiro teste de nível 1 de alerta.



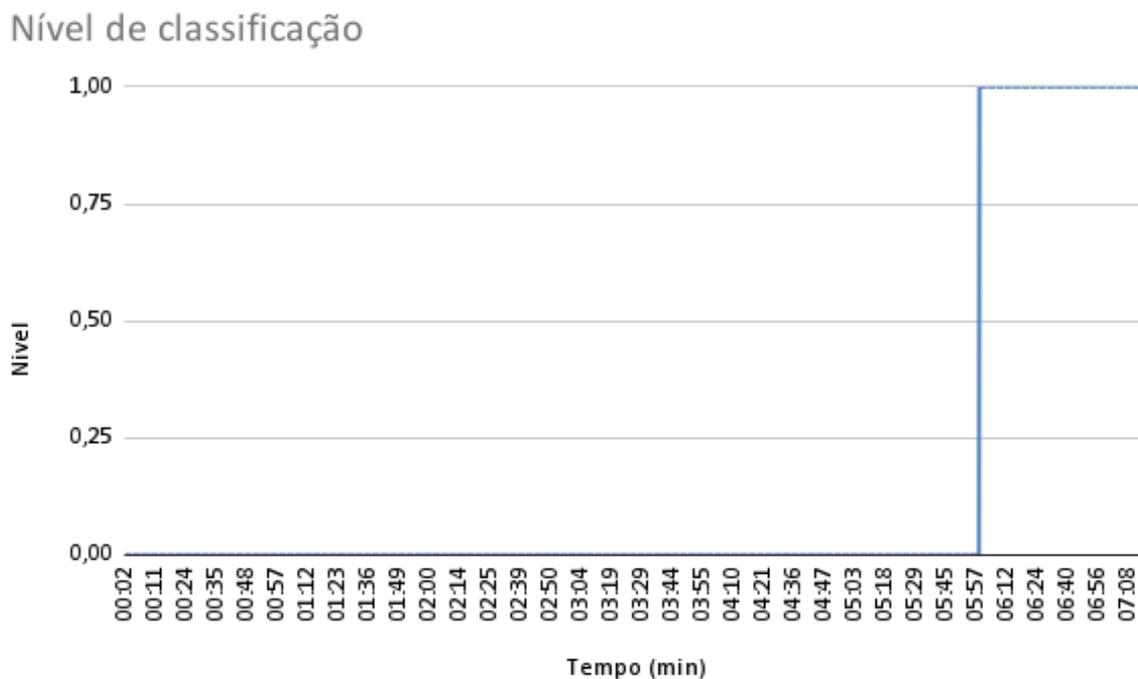
Fonte: O autor

perturbação caracterizada por uma pequena variação em relação à posição inicial e uma rotação. Ambas as condições acionam o nível 1 de classificação, conforme mostrado na Figura 28. Em cerca de 7 minutos, uma brusca variação na movimentação é detectada, mas logo retorna próximo à posição inicial. Embora essa variação pudesse acionar o nível 3 de alerta, isso não ocorre devido à rotação simultânea detectada. O algoritmo desconsidera o sinal de movimentação por 10 amostras para evitar falsas detecções causadas por interferências externas, como a queda de objetos. Esse resultado demonstra a eficácia do algoritmo em filtrar movimentações temporárias e ignorar possíveis interferências externas, garantindo a precisão na detecção de deslizamentos de terra.

Outro teste foi realizado com as mesmas especificações do teste anterior, porém, ao ligar o sistema de aquisição de dados, o dispositivo foi forçado a iniciar uma perturbação inicial suficiente para acionar o nível 1 de alerta. O objetivo deste experimento foi analisar se, após o acionamento do nível 1, o algoritmo seria capaz de desprezar bruscas variações causadas por interferências externas, como a queda dos pesos que provocam uma rotação. Verificou-se especificamente se o algoritmo poderia ignorar essas variações bruscas caso retornassem próximo ao estado inicial, mantendo-se inferiores ao delta de variação que acionaria o nível 3 de classificação. As imagens do protótipo antes e após o experimento estão apresentadas nas Figuras 30 e 31.

Os resultados podem ser observado nas Figuras 32, 33, 34 e 35 que apresentam Nível de classificação, movimentação, rotação e umidade do solo referente ao novo experimento

Figura 28 – Classificação resultante no primeiro teste de nível 1 de alerta.



Fonte: O autor

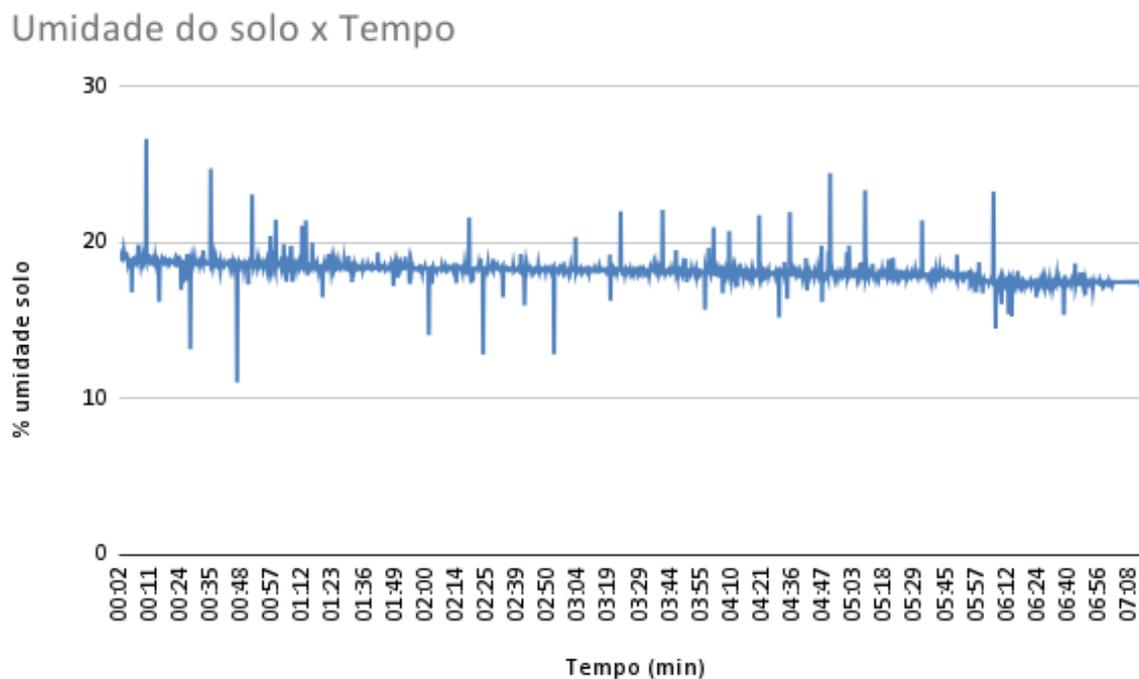
realizado.

No gráfico da Figura 32, que apresenta tanto o nível de classificação quanto o sinal de movimentação, observa-se que, enquanto o sistema estava no nível 1 de alerta, ocorreram grandes perturbações nos eixos x, y e z do acelerômetro, indicando uma movimentação significativa, estando mais evidente na Figura 33. No entanto, em poucas amostras subsequentes, os valores retornaram próximos aos valores iniciais, mantendo uma variação menor que a necessária para ativar o nível 3. A Figura 34 evidencia que rotações ocorreram simultaneamente. Dessa forma, o nível 3 de alerta não foi acionado, confirmando a eficácia do algoritmo em desprezar perturbações momentâneas

4.2 NÍVEL 2 DE ALERTA

Para replicar uma situação em que o nível 2 de alerta seja acionado, é necessário que a umidade do solo esteja acima de 40%. O protótipo foi preparado seguindo as condições descritas anteriormente, com uma inclinação de aproximadamente 50° e solo seco, conforme ilustrado na Figura 36. Instantes após o início do experimento, o sistema de irrigação foi ativado para aumentar a umidade do solo. Durante esse processo, o sistema de aquisição de dados monitorou continuamente as variáveis de movimentação e umidade, visando observar as alterações na movimentação do solo uma vez que a umidade superasse o limiar de 40%. A Figura 37 apresenta o estado final do protótipo, evidenciando as mudanças

Figura 29 – Curva de umidade do solo gerada no primeiro teste de nível 1 de alerta.



Fonte: O autor

ocorridas no solo devido ao aumento de umidade e às subsequentes movimentações.

As Figuras 38, 39, 40 e 41 apresentam os resultados obtidos a partir deste experimento. A Figura 41, que exibe a porcentagem de umidade do solo, revela que inicialmente o solo estava seco. Logo após a ativação do sistema de irrigação, observa-se um aumento expressivo na porcentagem de umidade, devido à proximidade do sensor à superfície onde o sistema de irrigação atua diretamente. Quando o sistema de irrigação é desligado, a umidade do solo diminui, ao ser religado, a umidade aumenta abruptamente novamente. Ao longo do experimento, a umidade do solo permaneceu próxima a 60%, superando o limiar de 40% estabelecido como critério para o acionamento do nível 2 de alerta.

Ao analisar o gráfico da Figura 38, referente ao nível de classificação e movimentação, observa-se que o sistema identificou os três níveis de alerta. O primeiro nível foi detectado logo após o início da aquisição de dados, enquanto o solo ainda estava seco. Esta perturbação não planejada inicialmente ocorreu ao ligar o sistema de irrigação, provocando uma pequena vibração no protótipo, suficiente para gerar um sinal de alerta. Algum tempo após a identificação do nível 1, o nível 2 foi acionado. Neste momento, a umidade do solo já estava acima de 40%, e a variação entre a posição atual e a inicial ultrapassou o limite estabelecido para solo úmido, ativando o alerta. O nível 2 permaneceu em alerta até a identificação do nível 3, quando a variação entre a posição atual e a inicial superou o limiar crítico, indicando altas ou iminentes chances de deslizamento. Finalmente, uma grande movimentação foi observada, resultando no deslizamento de terra, melhor

Figura 30 – Imagem do protótipo no estágio inicial do segundo teste de nível 1 de alerta.



Fonte: O autor

evidenciado no gráfico da Figura 39. Durante este processo, o dispositivo se desprende da bateria, desligando o sistema de aquisição de dados. Devido a esse fato, o gráfico não atinge um valor em regime permanente, refletindo o desligamento durante o processo de movimentação.

O gráfico da Figura 40, referente à rotação do sistema, não apresenta informações muito relevantes para este experimento. Como mencionado anteriormente, a rotação é quase desconsiderada quando o solo está úmido. Isso ocorre porque, em condições de solo úmido, não há grandes variações na rotação, exceto no momento específico em que ocorre o deslizamento de terra. Ao final do experimento, é evidente um movimento de rotação em dois eixos, indicando o deslizamento. Contudo, durante a maior parte do experimento, a rotação permanece estável e sem variações significativas, confirmando a menor relevância desse parâmetro na identificação do nível 2 de alerta.

Este experimento evidencia a eficácia do nível 2 em alertar antecipadamente sobre a possibilidade de deslizamentos de terra. Movimentos de terra do tipo rastejo, causados pela umidade do solo devido a chuvas, possuem uma dinâmica lenta. Assim, em áreas propensas a esse tipo de deslizamento, seria possível identificar e monitorar tais movimentos com um sistema de alerta baseado nos critérios do nível 2.

Figura 31 – Imagem do protótipo no estágio final do segundo teste de nível 1 de alerta



Fonte: O autor

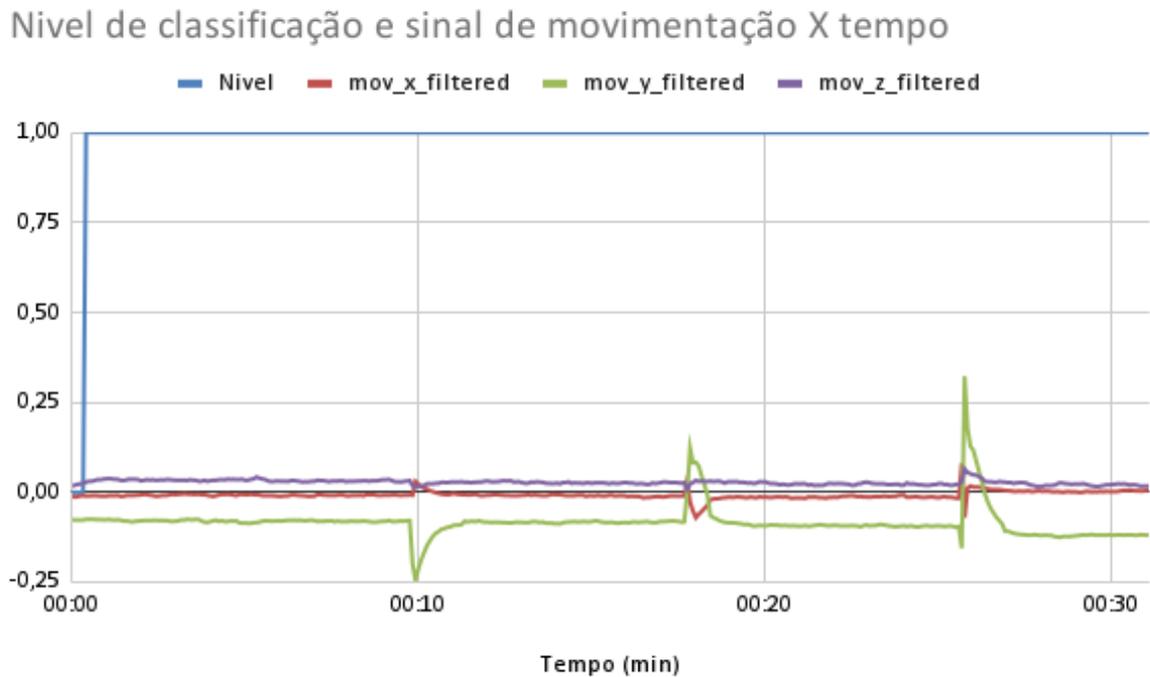
4.3 NÍVEL 3 DE ALERTA

O nível 3 de alerta é acionado quando a variação entre a posição atual e a inicial é suficientemente grande para gerar preocupação, independentemente da condição do solo. Esse nível é ativado se uma variação significativa ocorrer em mais de um eixo. Caso haja uma rotação simultânea, o algoritmo descarta as próximas 10 amostras coletadas pelo acelerômetro, o que equivale a um período de 10 segundos, já que o dispositivo coleta amostras a cada 1 segundo. Se, após essas 10 amostras, a variação de posição em mais de um eixo continuar acima do limite estabelecido, o nível 3 de alerta é confirmado; caso contrário, ele não é acionado.

Para realizar o experimento para tentar detectar o nível 3 de alerta, definiu-se que o solo estaria seco, o terreno com inclinação de aproximadamente 50° como pode-se observar na Figura 42. A perturbação foi realizada pela queda das massas, porém, desta vez a queda concentrou-se na parte do solo logo abaixo da base da haste de metal. Deste modo, ao final do experimento, como apresentado na Figura 43, houve um deslocamento de terra, buscando garantir que houvesse uma variação grande entre a posição final e atual, acionando assim o nível 3.

Ao analisar os resultados, observa-se no gráfico de movimentação da Figura 45 uma variação inicial que se mantém constante, levando ao acionamento do nível 1 de alerta nos primeiros momentos, conforme mostrado na Figura 44. No instante da queda da primeira

Figura 32 – Curvas de classificação e movimentação obtidas no segundo teste de nível 1 de alerta.

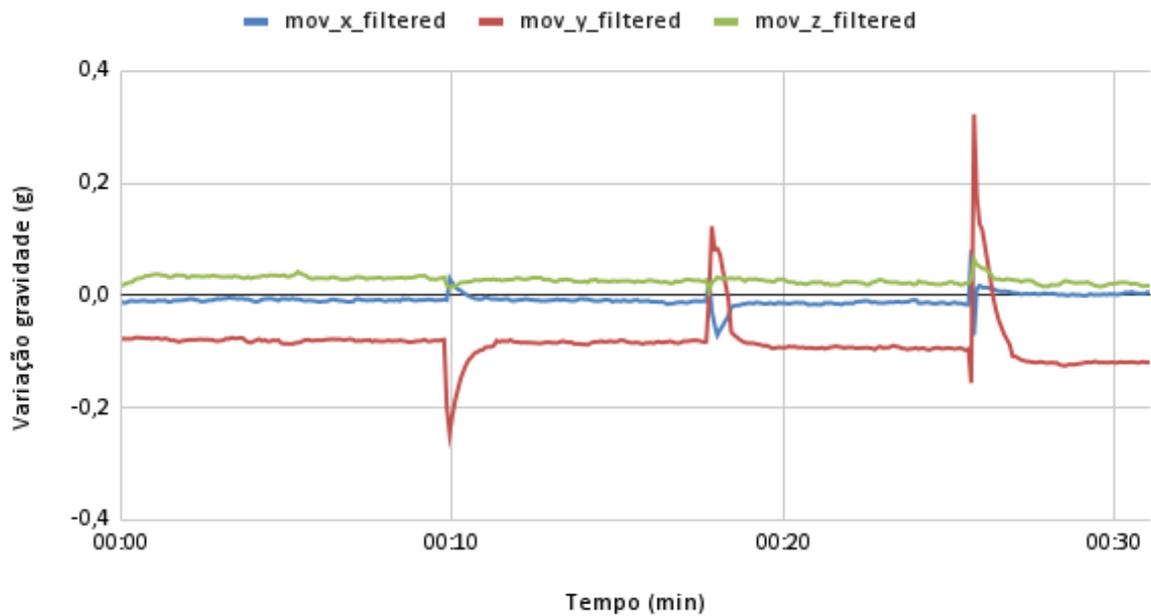


Fonte: O autor

massa, os três eixos do dispositivo registram uma rotação, como evidenciado na Figura 46. Simultaneamente, ocorre uma movimentação abrupta, porém os valores não retornam aos níveis anteriores à queda da massa, indicando um deslocamento considerável do solo. Essa situação resulta no acionamento do nível 3 de alerta devido à variação substancial detectada pelos sensores. Já a umidade presente no solo não apresenta grandes variações, como apresentado na Figura 47.

Figura 33 – Curvas de movimentação obtidas no segundo teste de nível 1 de alerta.

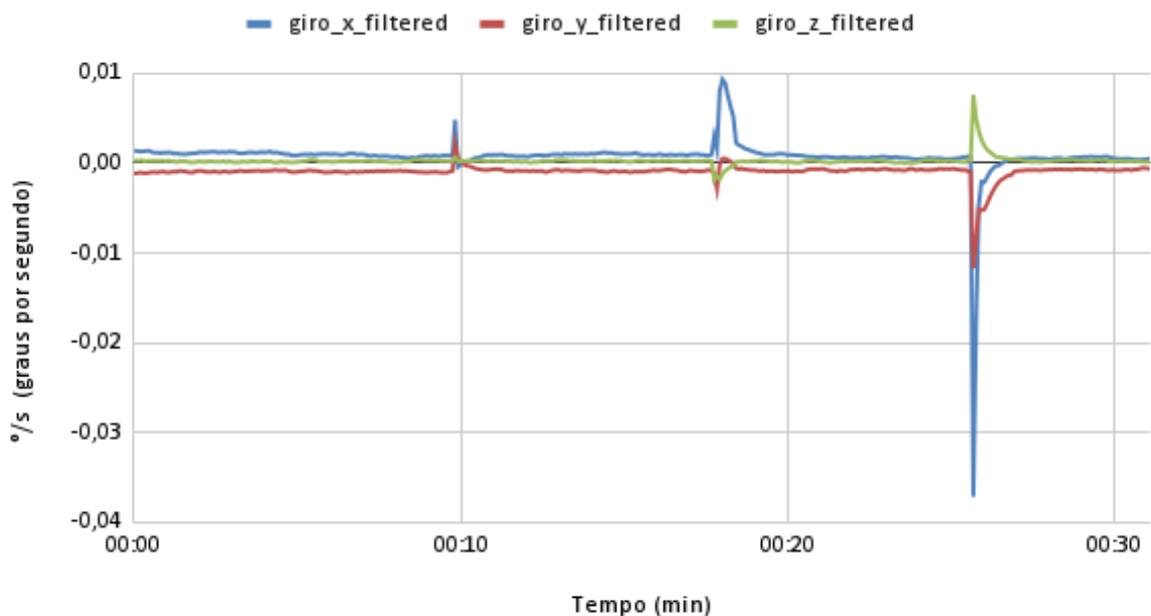
Variação acelerômetro x Tempo



Fonte: O autor

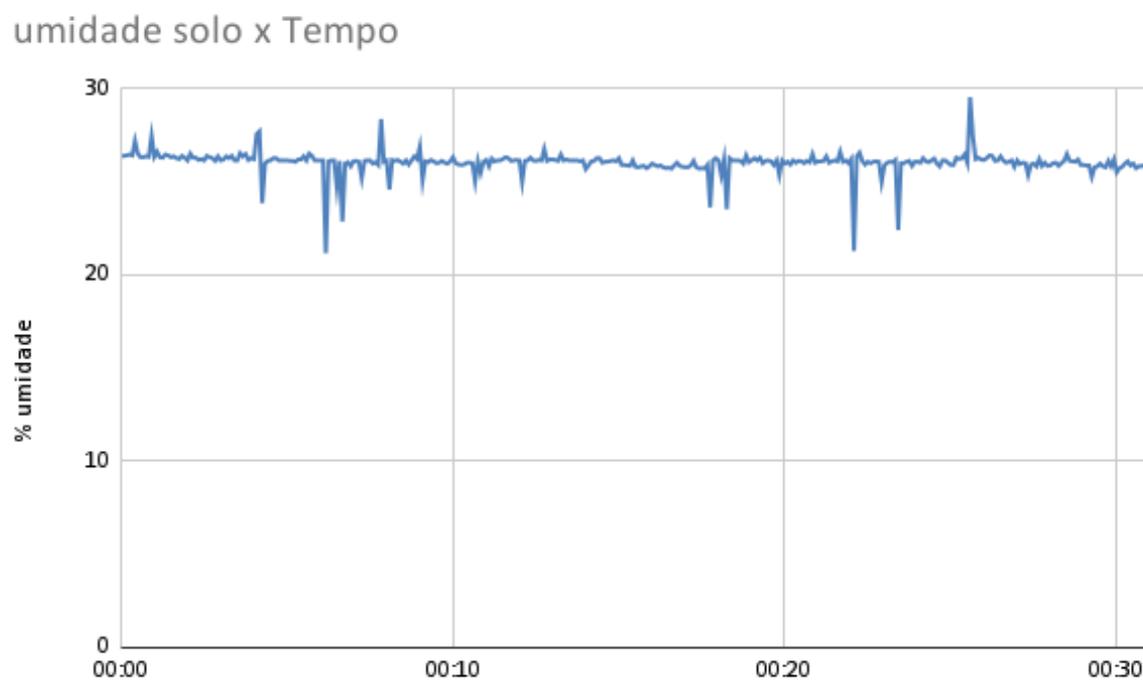
Figura 34 – Curvas de rotação obtidas no segundo teste de nível 1 de alerta.

Variação giroscopio x Tempo



Fonte: O autor

Figura 35 – Curva de umidade do solo gerada no segundo teste de nível 1 de alerta.



Fonte: O autor

Figura 36 – Imagem do protótipo no estágio inicial do teste de nível 2 de alerta.



Fonte: O autor

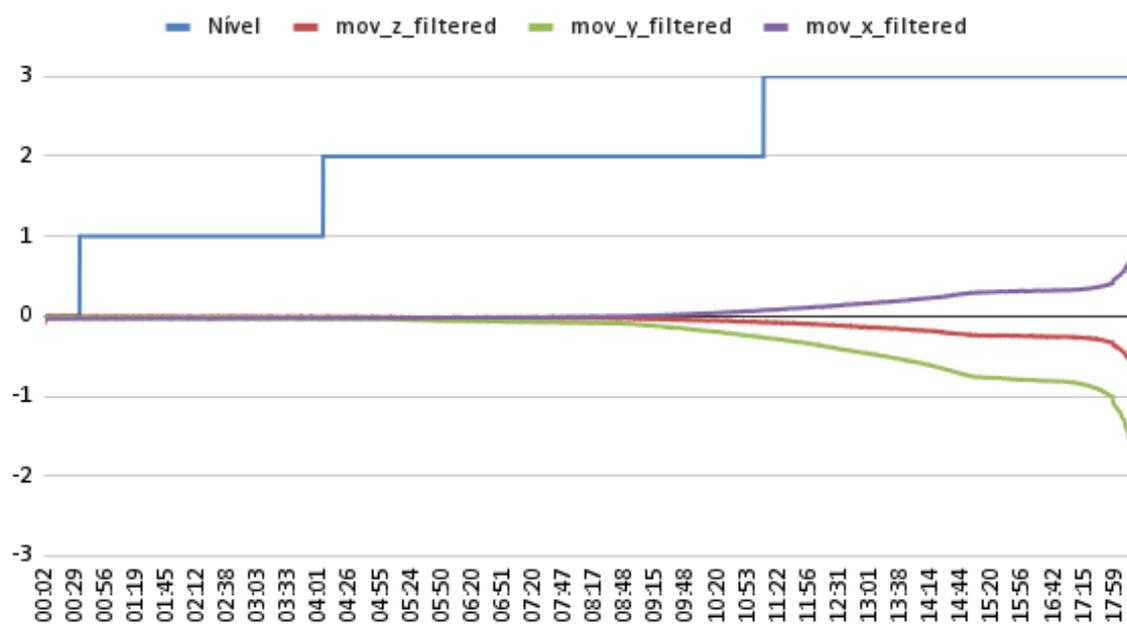
Figura 37 – Imagem do protótipo no estágio final do teste de nível 2 de alerta.



Fonte: O autor

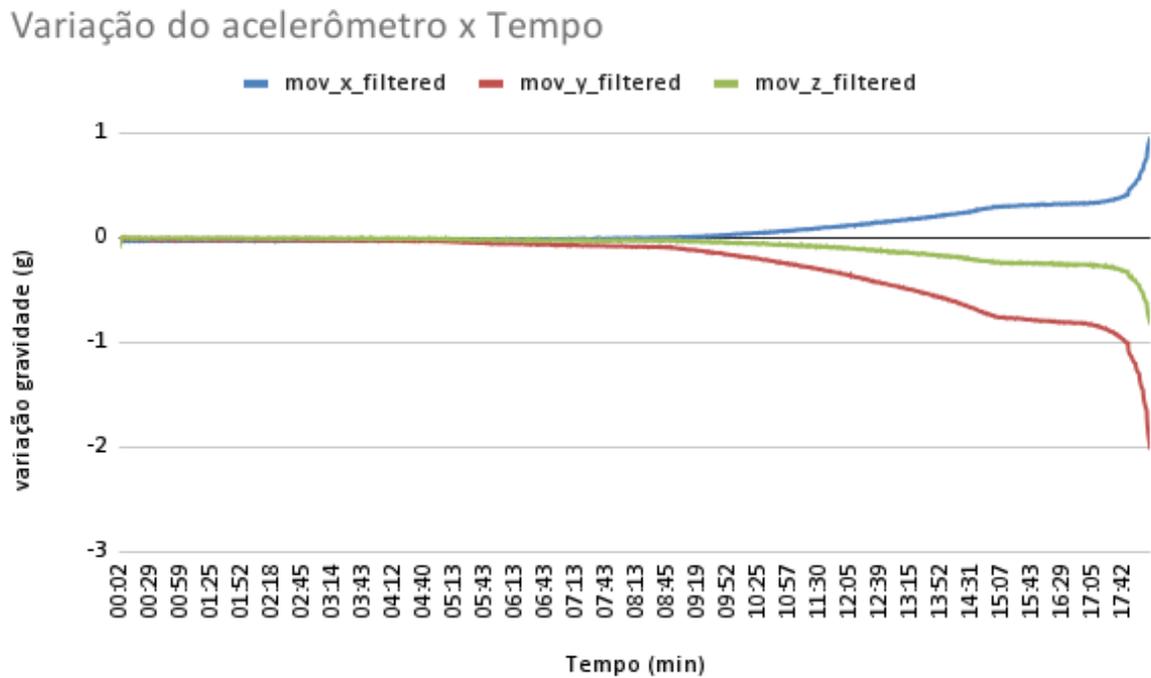
Figura 38 – Curvas de classificação e movimentação obtidas no teste de nível 2 de alerta.

Nível de classificação e movimentação



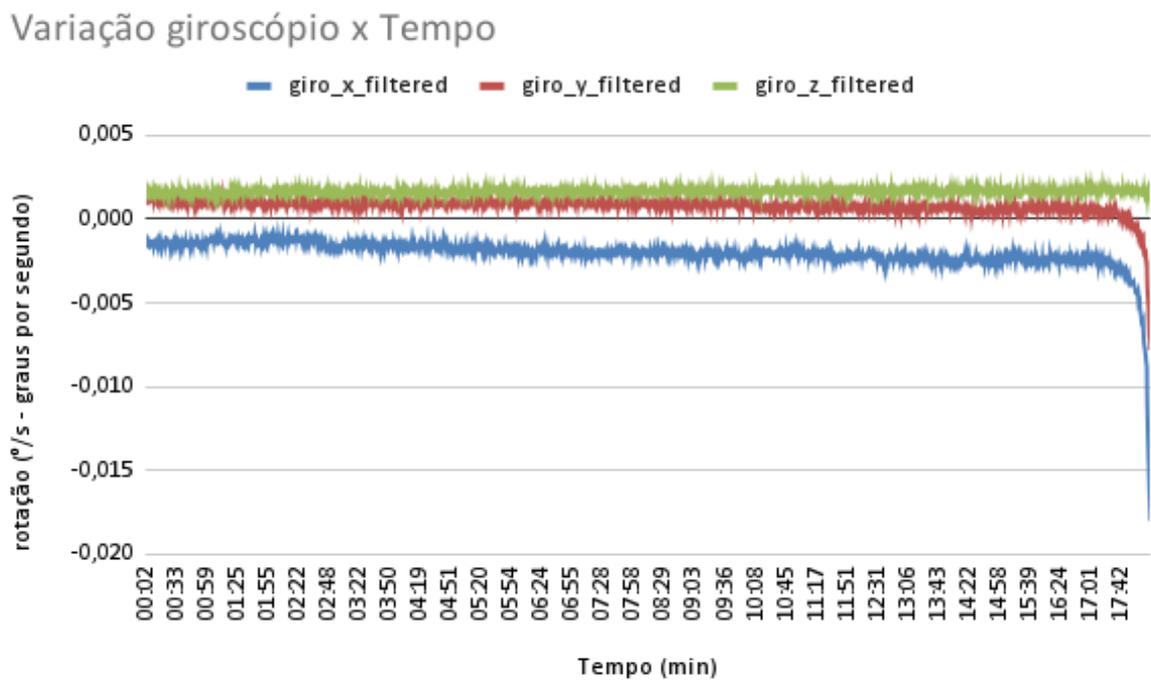
Fonte: O autor

Figura 39 – Curvas de movimentação obtidas no teste de nível 2 de alerta.



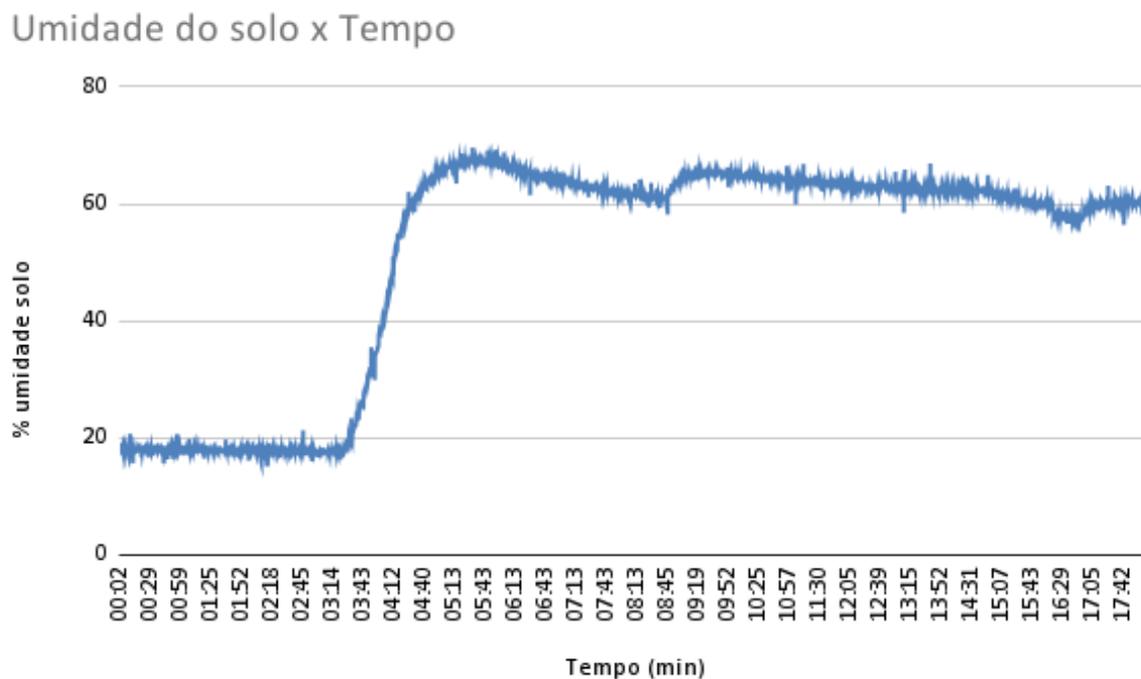
Fonte: O autor

Figura 40 – Curvas de rotação obtidas no teste de nível 2 de alerta.



Fonte: O autor

Figura 41 – Curvas de umidade do solo gerada no teste de nível 2 de alerta.



Fonte: O autor

Figura 42 – Imagem do protótipo no estágio inicial do teste de nível 3 de alerta.



Fonte: O autor

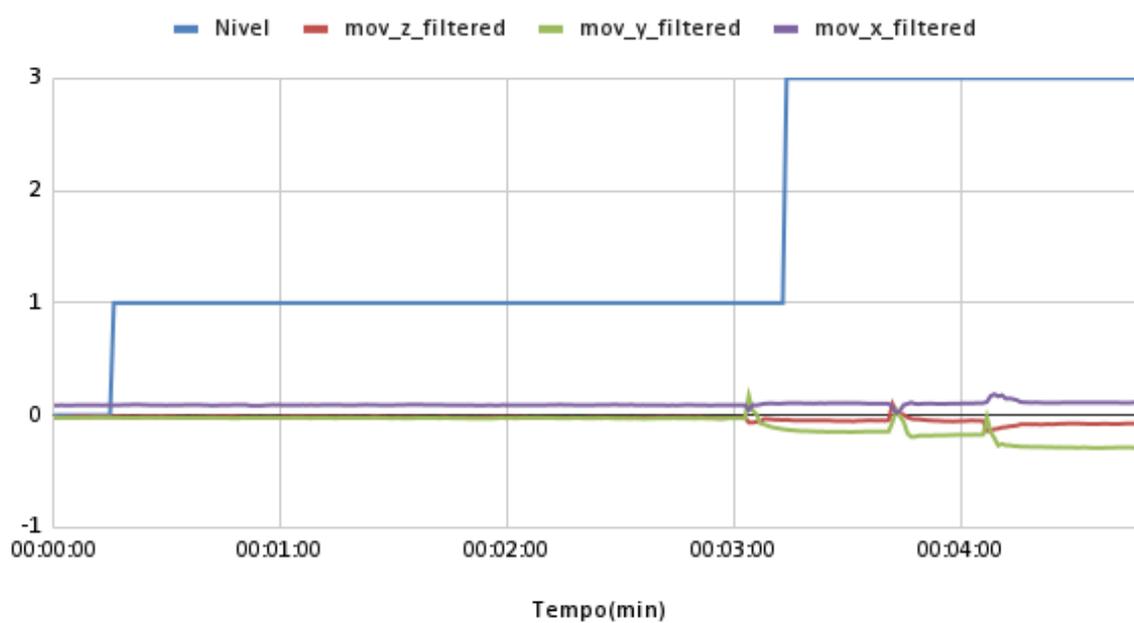
Figura 43 – Imagem do protótipo no estágio final do teste de nível 3 de alerta.



Fonte: O autor

Figura 44 – Curvas de classificação e movimentação obtidas no teste de nível 3 de alerta.

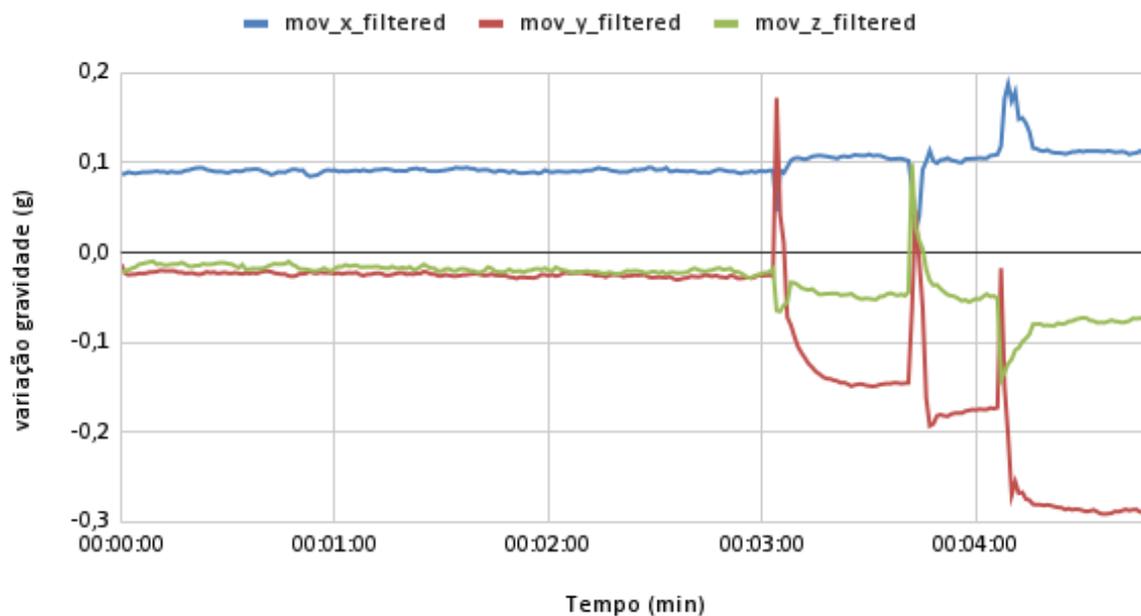
Nível de classificação e movimentação



Fonte: O autor

Figura 45 – Curvas de movimentação obtidas no teste de nível 3 de alerta.

Variação acelerômetro x Tempo



Fonte: O autor

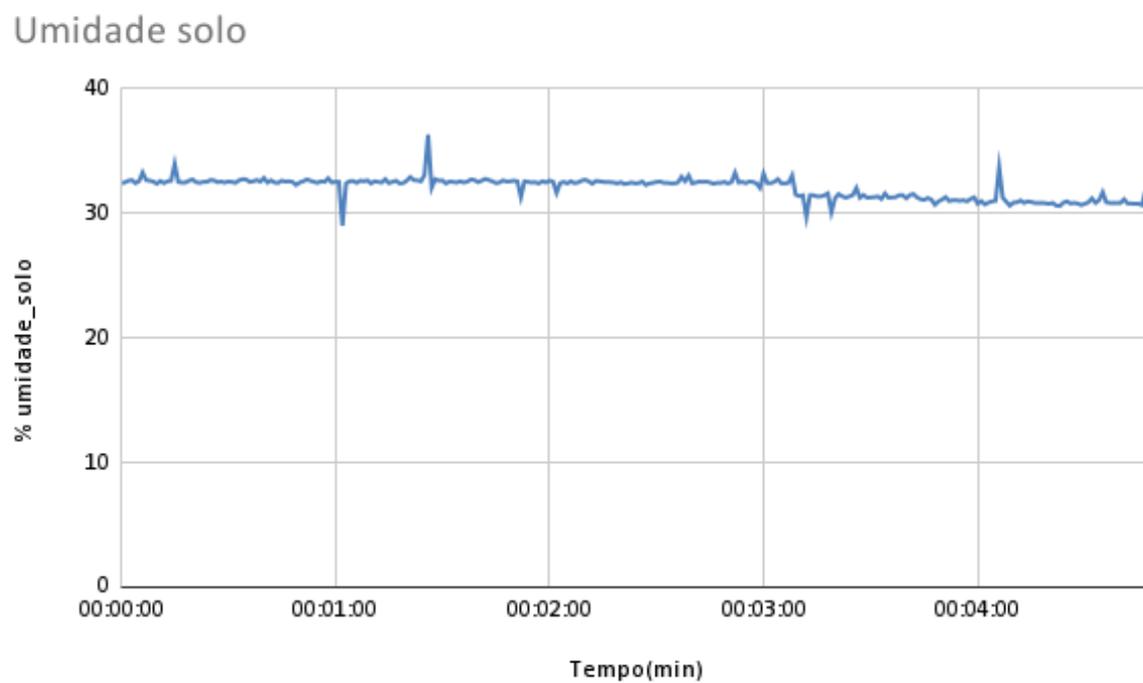
Figura 46 – Curvas de rotação obtidas no teste de nível 3 de alerta.

Variação do giroscópio x Tempo



Fonte: O autor

Figura 47 – Curva de umidade do solo gerada no teste de nível 3 de alerta.



Fonte: O autor

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de sensores na previsão de deslizamentos de terra, com ênfase nos sensores giroscópio, acelerômetro e umidade do solo. A metodologia de testes padronizada possibilitou uma análise confiável dos resultados do dispositivo em diferentes cenários.

De acordo com os resultados apresentados, o dispositivo desenvolvido neste trabalho demonstra potencial para implementação em áreas onde há conhecimento prévio do terreno e de suas dinâmicas de movimentação, como por exemplo em locais que possam ocorrer deslocamentos de terra do tipo rastejo, que se caracterizam por uma movimentação gradual e lenta. Isso permite alertar sobre situações que podem evoluir para deslizamentos de terra. As estratégias desenvolvidas para evitar alarmes falsos mostraram-se eficazes na maioria dos casos, reduzindo as chances de acionamentos desnecessários. É importante destacar que, embora promissor, o dispositivo ainda apresenta vulnerabilidades, especialmente diante de interferências externas que podem resultar em falsos alertas, como o trânsito de pessoas ou animais nas proximidades. Além do mais, em questão de movimentos repentinos, embora o dispositivo não consiga antecipar esses eventos com precisão, pode identificá-los e sinalizá-los no momento em que ocorrem, comprovando a utilidade dos sensores inerciais no papel de alerta de ocorrências.

Como sugestão para trabalhos futuros, é recomendável aprimorar a comunicação do dispositivo, buscando utilizar tecnologias de baixo consumo energético e alcance de longa distância, como a tecnologia LoRa. Isso possibilitaria uma comunicação robusta e eficiente em áreas remotas e de difícil acesso. Além disso, seria interessante explorar a integração de outros sensores inerciais, como sensores de geolocalização de alta precisão, para obter informações mais detalhadas sobre as condições do terreno. Outro aspecto a ser considerado é a adaptação de um microcontrolador com um sistema de gerenciamento de energia eficiente. Isso é crucial para garantir a autonomia do dispositivo em condições adversas e garantir seu funcionamento contínuo em locais remotos. A eficiência energética é fundamental para maximizar a vida útil das baterias e reduzir a necessidade de manutenção constante, aspectos essenciais para a aplicação prática do dispositivo em monitoramento de deslizamentos de terra.

REFERÊNCIAS

- ANDRES, Dexter Blair E; BATISLA-ONG, John Franky Nathaniel V; AIS, Eugene. A Prototype of DIY Landslide Alarm, 2021.
- BAO, Shuai; LIU, Jiping; WANG, Liang; KONEČNÝ, Milan; CHE, Xianghong; XU, Shenghua; LI, Pengpeng. Landslide susceptibility mapping by fusing convolutional neural networks and vision transformer. **Sensors**, MDPI, v. 23, n. 1, p. 88, 2022.
- BRITO, Gilmar Gonçalves de *et al.* Modelo de monitoramento de deslizamento de encostas por meio de sensor multiparamétrico. Universidade Católica de Pernambuco, 2013.
- FARIA JUNIOR, Ildefonso Felix de; BERALDO FILHO, Germano; CELASCHI, Sergio. Monitoramento de Deslizamento de Terra Usando Sensor Simples de Fibra Óptica, 2016.
- GRIDLING, Gunther; WEISS, Bettina. Introduction to microcontrollers. **Vienna University of Technology Institute of Computer Engineering Embedded Computing Systems Group**, p. 25, 2007.
- GUERRA, Susana Cordeiro; ARAÚJO ABRANTES, Fernando José de; NETO, Eduardo Luiz G Rios; AZEVEDO, João Bosco de; TAI, David Wu; FERREIRA, Marise Maria; MAGALHÃES, Maysa Sacramento de. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE.
- GUNAWAN, G; RAHMAN, A; SEPUTRO, B Purwo; ELSERA, M. Design of Early Warning System Flood and Landslide Mitigation Sensor Based on Internet of Thing. *In: IOP PUBLISHING*, 1. JOURNAL of Physics: Conference Series. [*S.l.*: *s.n.*], 2019. v. 1361, p. 012062.
- IBRAHIM, Dogan. **Microcontroller-based temperature monitoring and control**. [*S.l.*]: Elsevier, 2002.
- IGEOLÓGICO. **Movimentos de massa: tombamento de blocos, rastejos...** 2024. Disponível em:
<https://igeologico.com.br/processos-de-dinamica-superficial-movimentos-de-massa/>.
 Acesso em: 23 jun. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estudo inédito do IBGE mostra Sul e Sudeste como regiões que concentram as maiores áreas de suscetibilidade a deslizamentos**. Acesso em: 23 jun. 2024. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/26118-estudo-inedito-do-ibge-mostra-sul-e-sudeste-como-regioes-que-concentram-as-maiores-areas-de-suscetibilidade-a-deslizamentos>.

LV, Pengyuan; MA, Lusha; LI, Qiaomin; DU, Fang. ShapeFormer: a shape-enhanced vision transformer model for optical remote sensing image landslide detection. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, IEEE, v. 16, p. 2681–2689, 2023.

MINI Bomba Submersível p/ Água. 2024. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/mini-bomba-submersa-5v-p-agua>. Acesso em: 23 jun. 2024.

MÓDULO Sensor de Umidade de Solo. 2024. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-sensor-de-umidade-de-solo>. Acesso em: 26 jun. 2024.

PASSARO, Vittorio MN; CUCCOVILLO, Antonello; VAIANI, Lorenzo; DE CARLO, Martino; CAMPANELLA, Carlo Edoardo. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective. **Sensors**, MDPI, v. 17, n. 10, p. 2284, 2017.

SEMIONE, Arthur; HOFFMANN, Kleyton; ZAMPIERI, Lucas Quiocca; NIENOV, Fabiano Alexandre; LINS, Nathan. Desenvolvimento de Módulos para Monitoramento de Encostas com o Uso de Sensoriamento Wireless.

TAQWA, Ahmad; FADHLI, Mohammad; SOIM, Sopian; HANDAYANI, Ade Silvia *et al.* Prototype Design of Landslide Early Detection System Using LoRa and IoT. *In: ATLANTIS PRESS. 4TH Forum in Research, Science, and Technology (FIRST-T1-T2-2020)*. [S.l.: s.n.], 2021. P. 495–499.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais**. São Paulo: Editora Instituto Geológico, 2015. P. 13–18, 27–37. (4).

TSAI, Zong-Xian; YOU, Gene J.-Y.; LEE, Hong-Yuan; CHIU, Yu-Jia. Use of a total station to monitor post-failure sediment yields in landslide sites of the Shihmen reservoir watershed, Taiwan. **Geomorphology**, v. 139-140, p. 438–451, 2012. ISSN 0169-555X.

WENDLING, Marcelo. Sensores. **Universidade Estadual Paulista. São Paulo**, v. 2010, p. 20, 2010.

ZHENG, Yong; ZHU, Zheng-Wei; LI, Wan-Jie; GU, Dong-Ming; XIAO, Wang. Experimental research on a novel optic fiber sensor based on OTDR for landslide monitoring. **Measurement**, Elsevier, v. 148, p. 106926, 2019.

ANEXO A – Descrição

O código fonte utilizado no dispositivo proposto neste trabalho é apresentado a seguir

```
1 #include <Adafruit_MPU6050.h>
2 #include <Adafruit_Sensor.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include <WiFi.h>
5 #include <WiFiClientSecure.h>
6 #include <HTTPClient.h>
7 #include <ArduinoJson.h>
8
9 Adafruit_MPU6050 mpu;
10 sensors_event_t a1, g1, temp1;
11 WiFiClient client;
12
13 const char* ssid = "*****";
14 const char* password = "*****";
15 const char* serverUrl = "http://127.0.0.1:5000/receive_data";
16
17 float aceleracao_x, aceleracao_y, aceleracao_z;
18 float rotacao_x, rotacao_y, rotacao_z;
19 float mov_x, mov_y, mov_z, temperatura;
20 float giro_x, giro_y, giro_z;
21 int LED_BUILTIN = 2;
22
23 float mov_x_filtered = 0;
24 float mov_y_filtered = 0;
25 float mov_z_filtered = 0;
26 float giro_x_filtered = 0;
27 float giro_y_filtered = 0;
28 float giro_z_filtered = 0;
29 float alpha = 0.2;
30
31 float mov_x_filtered_abs = 0;
32 float mov_y_filtered_abs = 0;
33 float mov_z_filtered_abs = 0;
34 float giro_x_filtered_abs = 0;
35 float giro_y_filtered_abs = 0;
36 float giro_z_filtered_abs = 0;
37
38 float delta_N1 = 0.02;
39 float delta_amostra_N1 = 0.02;
40 float delta_rotacao = 0.009;
41
42 float delta_N2 = 0.005;
43 float delta_umidade_solo = 6;
```

```
44 float umidade_2_ant = 0;
45 float umidade_1_ant = 0;
46
47 float delta_N3 = 0.08;
48 int Nivel = 0;
49 int flag_rotacao = 0;
50 int contador_flag = 0;
51
52 struct Data {
53     float mov_x;
54     float mov_y;
55     float mov_z;
56     float giro_x;
57     float giro_y;
58     float giro_z;
59     float temperatura;
60     float mov_x_filtered;
61     float mov_y_filtered;
62     float mov_z_filtered;
63     float giro_x_filtered;
64     float giro_y_filtered;
65     float giro_z_filtered;
66     float solo_umidade;
67     int Nivel;
68 };
69
70 Data data_list[20];
71 int count_data = 0;
72 float umidade_solo;
73
74 void get_soil_data(){
75     float temp_soil = analogRead(36);
76     umidade_solo = 100 - ((100*temp_soil)/4095);
77     Serial.println("solo");
78     Serial.println(umidade_solo);
79     Serial.println(temp_soil);
80 }
81
82 void send_server() {
83     HTTPClient http;
84     http.begin(serverUrl);
85     http.addHeader("Content-Type", "application/json");
86
87     StaticJsonDocument<4096> jsonDoc;
88     JsonArray dataArray = jsonDoc.createNestedArray("data");
89
90     for (int i = 0; i < count_data; i++) {
```

```
91     JsonObject dataObject = dataArray.createNestedObject();
92     dataObject["mov_x"] = data_list[i].mov_x;
93     dataObject["mov_y"] = data_list[i].mov_y;
94     dataObject["mov_z"] = data_list[i].mov_z;
95     dataObject["giro_x"] = data_list[i].giro_x;
96     dataObject["giro_y"] = data_list[i].giro_y;
97     dataObject["giro_z"] = data_list[i].giro_z;
98     dataObject["temperatura"] = data_list[i].temperatura;
99     dataObject["mov_x_filtered"] = data_list[i].mov_x_filtered;
100    dataObject["mov_y_filtered"] = data_list[i].mov_y_filtered;
101    dataObject["mov_z_filtered"] = data_list[i].mov_z_filtered;
102    dataObject["giro_x_filtered"] = data_list[i].giro_x_filtered;
103    dataObject["giro_y_filtered"] = data_list[i].giro_y_filtered;
104    dataObject["giro_z_filtered"] = data_list[i].giro_z_filtered;
105    dataObject["umidade_solo"] = data_list[i].solo_umidade;
106    dataObject["Nivel"] = data_list[i].Nivel;
107 }
108
109 String jsonData;
110 serializeJson(jsonDoc, jsonData);
111 Serial.println(jsonData);
112 int httpResponseCode = http.POST(jsonData);
113 if (httpResponseCode > 0) {
114     String response = http.getString();
115     Serial.println(httpResponseCode);
116     Serial.println(response);
117 } else {
118     Serial.print("Error on sending POST: ");
119     Serial.println(httpResponseCode);
120 }
121
122 http.end(); // Close connection
123 }
124
125 void setup(void) {
126     Serial.begin(115200);
127     Serial.println("Inicializando");
128     pinMode(36, INPUT);
129     WiFi.begin(ssid, password);
130     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
131         delay(1000);
132         Serial.println("Conectando ao WiFi...");
133     }
134
135     Serial.println("Conectado ao WiFi");
136     pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
137
```

```
138 Serial.println("Adafruit MPU6050 test!");
139
140 if (!mpu.begin()) {
141     Serial.println("Failed to find MPU6050 chip");
142     while (1) {
143         delay(10);
144     }
145 }
146
147 Serial.println("MPU6050 Found!");
148 digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
149 delay(3000);
150 digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
151 delay(1000);
152 digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
153 delay(1000);
154 digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
155 delay(1000);
156 digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
157 delay(1000);
158 digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
159 delay(1000);
160 digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
161 delay(1000);
162 digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
163 delay(1000);
164 digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
165 delay(1000);
166
167 mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_8_G);
168 mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_500_DEG);
169 mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_5_HZ);
170 digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
171 delay(3000);
172 mpu.getEvent(&a1, &g1, &temp1);
173 rotacao_x = g1.gyro.x;
174 rotacao_y = g1.gyro.y;
175 rotacao_z = g1.gyro.z;
176
177 aceleracao_x = a1.acceleration.x;
178 aceleracao_y = a1.acceleration.y;
179 aceleracao_z = a1.acceleration.z;
180 delay(2000);
181 digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
182 }
183
184 void loop() {
```

```
185 sensors_event_t a, g, temp;
186 mpu.getEvent(&a, &g, &temp);
187
188 mov_x = a.acceleration.x - aceleracao_x;
189 mov_y = a.acceleration.y - aceleracao_y;
190 mov_z = a.acceleration.z - aceleracao_z;
191
192 giro_x = g.gyro.x - rotacao_x;
193 giro_y = g.gyro.y - rotacao_y;
194 giro_z = g.gyro.z - rotacao_z;
195 temperatura = temp.temperature;
196
197 mov_x_filtered = (alpha * mov_x) + (1 - alpha) * mov_x_filtered;
198 mov_y_filtered = (alpha * mov_y) + (1 - alpha) * mov_y_filtered;
199 mov_z_filtered = (alpha * mov_z) + (1 - alpha) * mov_z_filtered;
200
201 giro_x_filtered = (alpha * giro_x) + (1 - alpha) * giro_x_filtered;
202 giro_y_filtered = (alpha * giro_y) + (1 - alpha) * giro_y_filtered;
203 giro_z_filtered = (alpha * giro_z) + (1 - alpha) * giro_z_filtered;
204
205 get_soil_data();
206
207 if (count_data < 20) {
208     data_list[count_data].mov_x = mov_x;
209     data_list[count_data].mov_y = mov_y;
210     data_list[count_data].mov_z = mov_z;
211     data_list[count_data].giro_x = giro_x;
212     data_list[count_data].giro_y = giro_y;
213     data_list[count_data].giro_z = giro_z;
214     data_list[count_data].temperatura = temperatura;
215
216     data_list[count_data].mov_x_filtered = mov_x_filtered;
217     data_list[count_data].mov_y_filtered = mov_y_filtered;
218     data_list[count_data].mov_z_filtered = mov_z_filtered;
219     data_list[count_data].giro_x_filtered = giro_x_filtered;
220     data_list[count_data].giro_y_filtered = giro_y_filtered;
221     data_list[count_data].giro_z_filtered = giro_z_filtered;
222     data_list[count_data].solo_umidade = umidade_solo;
223     data_list[count_data].Nivel = Nivel;
224     count_data++;
225
226     mov_x_filtered_abs = abs(mov_x_filtered);
227     mov_y_filtered_abs = abs(mov_y_filtered);
228     mov_z_filtered_abs = abs(mov_z_filtered);
229
230     giro_x_filtered_abs = abs(giro_x_filtered);
231     giro_y_filtered_abs = abs(giro_y_filtered);
```

```
232     giro_z_filtered_abs = abs(giro_z_filtered);
233
234     if ((mov_x_filtered_abs > delta_N1) || (mov_y_filtered_abs >
235         delta_N1) || (mov_z_filtered_abs > delta_N1)) {
236         Nivel = max(Nivel, 1);
237     }
238     if ((mov_x_filtered_abs > delta_N2) || (mov_y_filtered_abs >
239         delta_N2) || (mov_z_filtered_abs > delta_N2)) {
240         Nivel = max(Nivel, 2);
241     }
242     if (umidade_solo <= 30) {
243         Nivel = max(Nivel, 3);
244     }
245
246     if (umidade_solo >= umidade_2_ant + delta_umidade_solo ||
247         umidade_solo >= umidade_1_ant + delta_umidade_solo) {
248         Nivel = max(Nivel, 3);
249     }
250     umidade_1_ant = umidade_2_ant;
251     umidade_2_ant = umidade_solo;
252
253     if ((giro_x_filtered_abs > delta_rotacao) || (giro_y_filtered_abs >
254         delta_rotacao) || (giro_z_filtered_abs > delta_rotacao)) {
255         flag_rotacao = 1;
256         contador_flag = 0;
257     }
258     if (flag_rotacao == 1) {
259         Nivel = max(Nivel, 3);
260         contador_flag++;
261     }
262
263     if (contador_flag > 10) {
264         flag_rotacao = 0;
265         contador_flag = 0;
266     }
267
268     if ((giro_x_filtered_abs > delta_N3) || (giro_y_filtered_abs >
269         delta_N3) || (giro_z_filtered_abs > delta_N3)) {
270         Nivel = max(Nivel, 4);
271     }
272 } else {
273     send_server();
274     count_data = 0;
```

```
274 }  
275  
276 delay(50);  
277 }  
278  
279 }
```

Listing A.1 – Exemplo de código C