

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

Alison Fabricio Bilha Wioppiold

**Sistema de rede de sensores sem fio para monitoramento de deslizamentos  
de terra**

São Paulo  
2023

Alison Fabricio Bilha Wioppiold

**Sistema de rede de sensores sem fio para monitoramento de deslizamentos  
de terra**

**Versão revisada**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Seabra

São Paulo

2023



Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Assinatura do autor:



Documento assinado digitalmente

ALISON FABRICIO BILHA WIOPPIOLD

Data: 03/09/2023 16:57:46-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

### Catálogo-na-publicação

Wioppiold, Alison

Sistema de rede de sensores sem fio para monitoramento de deslizamentos de terra / A. Wioppiold -- versão corr. -- São Paulo, 2023.  
100 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Redde de sensores sem fio 2.Monitoramento ambiental 3.Deslizamento de terra 4.Umidade do solo 5.Sensor inercial I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

Nome: WIOPIOLD, Alison Fabricio Bilha

Título: Sistema de rede de sensores sem fio para monitoramento de deslizamentos de terra

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.

Antonio Carlos Seabra (presidente)

---

Instituição:

EP - USP

---

Julgamento:

---

---

Prof. Dr.

Fernando Antonio Medeiros Marinho

---

Instituição:

EP - USP

---

Julgamento:

---

---

Prof. Dr.

Ricardo Alexandre Diogo

---

Instituição:

PUC-PR - Externo

---

Julgamento:

---

---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Flavia Bilha, que batalhou muito para que eu tivesse a oportunidade de chegar até aqui.

À Larissa Silva, pela companhia, carinho e compreensão.

Aos colegas Armando e Ticiane, pelo companheirismo durante essa trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Carlos Seabra, pelo apoio e confiança.

A todos os demais professores, em especial ao Alex Kenya Abiko, Fernando Antônio Medeiros Marinho, Gustavo Pamplona Rehder e Ronaldo Domingues Mansano, que durante essa trajetória compartilharam seus conhecimentos e experiências comigo.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Engenharia Elétrica), pela infraestrutura.

Também a todos que, direta ou indiretamente, auxiliaram na realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

WIOPIOLD, A. F. B. **Sistema de rede de sensores sem fio para monitoramento de deslizamentos de terra**. 2023. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Deslizamentos de terra são problemas frequentes em diversas regiões do Brasil e do mundo, deixando milhares de pessoas desabrigadas e, inclusive, causando mortes. O desenvolvimento de redes de sensores sem fio (RSSFs) é uma alternativa para o monitoramento de áreas de risco de deslizamento. Contudo, é imprescindível que esses sistemas atendam a requisitos essenciais, como um consumo de energia eficiente, tamanho reduzido e custo acessível, a fim de facilitar sua adoção e implementação. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo demonstrar, através da síntese de circuitos comerciais de hardware e da adoção de códigos abertos, um sistema capaz de detectar movimentos do solo, operar sem a necessidade de energia externa e transmitir dados sem a necessidade de fios. Para tanto, é feita uma revisão da literatura para encontrar evidências tecnológicas para concepção de um protótipo, seguida pela realização de testes funcionais e de autonomia energética para verificação e mensuração da disponibilidade do sistema. Os resultados revelam que o desempenho energético do sistema excedeu as expectativas em cerca de 35%, o que o torna promissor para a difusão do monitoramento e prevenção de desastres.

Palavras-chave: Rede de sensores sem fio. Monitoramento ambiental. Deslizamento de terra. Umidade do solo. Sensor inercial.

## ABSTRACT

WIOPIOLD, A. F. B. **Wireless sensor network system for landslide monitoring**. 2023. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Landslides are frequent problems in several regions of Brazil and the world, leaving thousands of people homeless and even causing deaths. The development of wireless sensor networks (WSNs) is an alternative for monitoring landslide risk areas. However, it is imperative that these systems meet essential requirements, such as efficient energy consumption, reduced size, and affordable cost, in order to facilitate their adoption and implementation. Thus, this work aims to demonstrate, through the synthesis of commercial hardware circuits and the adoption of open-source codes, a system able of detecting ground movements, operating without the need for external energy, and transmitting data without the need for wires. Therefore, a literature review is carried out to find technological evidence for the design of a prototype, followed by functional and energy autonomy tests to verify and measure the system's availability. The results reveal that the energy performance of the system exceeded expectations by about 35%, which makes it promising for the dissemination of monitoring and disaster prevention.

Keywords: Wireless sensor network. Environmental monitoring. Landslide. Soil moisture. Inertial sensor.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Deslizamento de terra na região norte do litoral paulista.....	16
Figura 2: Mapa de vulnerabilidade a desastres naturais envolvendo movimentos de massa, considerando tipologias do relevo, declividade, índices sociais do IBGE e índices de extremos climáticos pluviométricos.....	24
Figura 3: Mapa de incremento (aumento ou diminuição) da vulnerabilidade aos desastres relacionados a movimento de massa, comparando o período de 2071-2100 com a base de referência (1961-1990).....	25
Figura 4: Desenho esquemático de um deslizamento translacional.....	29
Figura 5: Desenho esquemático de um deslizamento rotacional.....	29
Figura 6: Desenho esquemático de uma corrida de Massa.....	29
Figura 7: Desenho esquemático de uma queda de bloco.....	29
Figura 8: Diferentes tecnologias sem fio em termos de consumo de energia e distância de comunicação.....	32
Figura 9: Representação de nós sensores com falha.....	37
Figura 10: Arquitetura preliminar do nó sensor (RevA).....	41
Figura 11: Representação dos itens da arquitetura preliminar do nó sensor (RevA).....	41
Figura 12: Arquitetura atual do dispositivo de detecção (RevB).....	45
Figura 13: Representação de local de interesse para aplicação de monitoramento.....	46
Figura 14: Representação de limite de abrangência de movimentos de massa sobre área de interesse.....	47
Figura 15: Representação de um acúmulo de água no solo de um talude no decorrer do tempo. 47	
Figura 16: Representação da rede de sensores sem fio instalada em pontos estratégicos nas imediações de uma área de interesse.....	48
Figura 17: Classes texturais do solo.....	49
Figura 18: Representação do dispositivo de detecção (RevB).....	51
Figura 19: Representação parcial dos itens do nó sensor (RevB) e o protótipo equivalente montado.....	51
Figura 20: Princípio de funcionamento do sistema.....	53
Figura 21: Exemplos de visualizações de dados criada para o MPU-6050 na plataforma ThingSpeak.....	59
Figura 22: Parte de painel privado criado para o Soil MTEC-02A na plataforma ThingSpeak... 60	
Figura 23: Amostras de terra utilizadas nos ensaios.....	63
Figura 24: Amostra B (+10% de água).....	63
Figura 25: Amostras prontas.....	64
Figura 26: Execução do teste sobre a amostra B.....	64

Figura 27: Sensor posicionado ao fundo (MTEC Bottom).....	64
Figura 28: Sensor posicionado ao topo (MTEC Up).....	64
Figura 29: Área de testes para avaliação de respostas sobre a infiltração de água no solo.....	65
Figura 30: Morrote alto em local de baixa suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa.....	66
Figura 31: Ocorrência de evento anterior no talude escolhido para estudo.....	67
Figura 32: Talude de corte utilizado para simulação de fluxos de detritos.....	68
Figura 33: Resultados do teor volumétrico de água medidos nos ensaios A, B, C e D.....	69
Figura 34: Resposta à penetração de água no solo: parte superior/topo.....	72
Figura 35: Resposta à penetração de água no solo: parte inferior/fundo.....	72
Figura 36: Conteúdo volumétrico de água e constante dielétrica de ambas as partes.....	74
Figura 37: Medidas inerciais (em campo): aceleração.....	75
Figura 38: Medidas inerciais (em campo): taxa de rotação.....	75
Figura 39: Gráficos do painel MPU-6050: início do experimento.....	77
Figura 40: Experimento em campo envolvendo fluxos de detritos (antes e depois do movimento).....	77
Figura 41: Experimento em campo envolvendo fluxos de detritos (antes e depois do movimento).....	78
Figura 42: Ensaios laboratoriais no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGC-USP).....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Etapas do DSRM adaptadas para a pesquisa.....	18
Tabela 2: Conceitos das Ações de Proteção e Defesa Civil.....	22
Tabela 3: Processos da GRD.....	23
Tabela 4: Matriz de níveis de alerta.....	26
Tabela 5: Tipos de processos brasileiros de movimentos de massa passíveis de monitoramento e características gerais.....	28
Tabela 6: Diferentes tecnologias de comunicação sem fio.....	31
Tabela 7: Comparativo de trabalhos relacionados.....	39
Tabela 8: Custo de componentes do nó sensor preliminar (RevA, por fornecedores nacionais)..	43
Tabela 9: Custo de componentes do nó sensor atual (RevB, por fornecedores nacionais, exceto *).....	45
Tabela 10: Configuração do filtro passa baixa digital para o giroscópio e acelerômetro.....	54
Tabela 11: Principais registros utilizados do Soil MTEC-02A.....	57
Tabela 12: Especificações de consumo energético dos componentes do nó sensor.....	79



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BLE	-	Bluetooth Low Energy
CEMADEN	-	Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CENAD	-	Centro Nacional de Gerenciamento de Desastres
CPRM	-	Serviço Geológico do Brasil
DCM	-	Defesa Civil Municipal
DLPF	-	Digital Low Pass Filter
DMP	-	Digital Motion Processor
DSRM	-	Design Science Research Methodology
EC	-	Electrical conductivity
EH	-	Energy harvesting
EUA	-	Estados Unidos da América
GIS	-	Geographic Information System
GPRS	-	General Packet Radio Service
GRD	-	Gestão de riscos e desastres
GSM	-	Global System for Mobile Communications
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	-	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMU	-	Inertial measurement unit
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MEMS	-	Micro Electro Mechanical Systems
MIN	-	Ministério da Integração Nacional
OSI	-	Open Systems Interconnection
PNPDEC	-	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
RevA	-	Revisão A
RevB	-	Revisão B
RSSF	-	Rede de sensores sem fio (do inglês wireless sensor network – WSN)
RTU	-	Remote Terminal Unit
SEDEC	-	Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil
SEH	-	Solar energy harvesting
SMS	-	Short message service
TDR	-	Reflectometria no domínio do tempo
TDS	-	Total dissolved solids

TTL	-	Transistor-Transistor Logic
UE	-	União Europeia
Un.	-	Unidade
UWB	-	Ultra wide-band
VWC	-	Volumetric water content

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Contextualização.....	14
1.2 Motivação do problema.....	15
1.3 Objetivos do projeto.....	17
1.4 Abordagem de pesquisa.....	17
1.5 Organização do texto.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Introdução.....	21
2.2 Gestão de risco de desastres.....	21
2.3 Movimentos de massa.....	27
2.4 Rede de sensores sem fio.....	30
2.5 Trabalhos anteriores.....	34
2.6 Discussão dos trabalhos anteriores.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 Introdução.....	40
3.2 Arquitetura do sistema.....	40
3.3 Processo de instalação.....	46
3.4 Pré-processamento e comunicação.....	52
3.5 Apresentação de dados.....	58
4 TESTES DE LABORATÓRIO E DE CAMPO.....	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
6 CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICE A – Plano de Gestão de Dados (PGD).....	90
APÊNDICE B – Links úteis.....	92
APÊNDICE C – Trechos de código fonte utilizados.....	93
APÊNDICE D – Testes complementares em laboratório.....	98
ANEXO A – Curso: Sistemas de monitoramento e alerta como suporte à gestão local de riscos e desastres (Turma FEV/2023).....	100

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Eventos meteorológicos extremos ocasionam desastres em todos os continentes, mas em países em desenvolvimento observa-se um número de vítimas geralmente maior em relação a países desenvolvidos (CONSONI et al., 2018). Isso está relacionado a diversas concepções socioeconômicas, o aumento demográfico e o crescimento das cidades que modificaram diversos aspectos naturais existentes, aumentando a vulnerabilidade e o risco a que a sociedade está exposta. Além disso, as características do meio físico brasileiro, seu clima tropical com alta pluviosidade, apresenta um conjunto de fatores que favorecem, em algumas regiões e dentre outros eventos, o desencadeamento de deslizamentos de terra. Esses eventos, quase todos os anos, trazem diversos problemas à sociedade, tais como destruição de infraestruturas urbanas, prejuízos em atividades produtivas, danos ambientais e perdas de vidas humanas. A ocupação de encostas, por exemplo, é um fator catalisador e torna as moradias nelas instaladas mais propensas aos efeitos desses fenômenos adversos (PELECH et al., 2019).

A responsabilidade de instituir políticas no que tange o desenvolvimento urbano local é de competência dos municípios, devendo contemplar medidas de planejamento e gestão do território, considerando os riscos associados aos deslizamentos de terra e outros fenômenos naturais (BRASIL, 1988). Também, no que diz respeito às questões de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação voltadas à proteção e defesa civil, os municípios devem, dentre outras ações, monitorar os eventos meteorológicos, hidrológicos, geológicos e outros potencialmente causadores de desastres; produzir alertas antecipados sobre a possibilidade de ocorrência de desastres naturais; orientar as comunidades a adotar comportamentos adequados de prevenção e de resposta em situação de desastre e promover a autoproteção (BRASIL, 2012). Assim, o monitoramento contínuo e a previsão meteorológica desempenham um papel fundamental na redução dos impactos causados pelos deslizamentos de terra. Essas informações permitem o estabelecimento de estados de alerta, tanto para manter a população informada sobre áreas de risco e ocorrência de eventos extremos, quanto para permitir que as equipes de defesa civil cheguem a setores de risco a tempo de efetuar a retirada preventiva de

moradores e encaminhá-los, por rotas seguras, para locais de refúgio previamente estabelecidos, onde poderão ficar abrigados até que a situação se normalize (e.g. KRAUSE; MORAIS; NETO, 2016 e SULAIMAN et al., 2021).

## 1.2 Motivação do problema

A recorrência de desastres envolvendo deslizamentos de terra e que causam impactos sociais e ambientais enormes ainda é uma realidade no Brasil. Apenas nos meses iniciais de 2022, foram muitas as declarações de emergência por desastres naturais no país. Como exemplo, as chuvas volumosas do início do ano, com alagamentos e deslizamentos, deixaram as populações de Franco da Rocha (SP), Petrópolis (RJ), Recife e região metropolitana (PE) e de diversos municípios da Bahia em situação de risco e de extrema vulnerabilidade. O número de pessoas que perderam a vida nesse período em decorrência de desastres é o maior desde o ano de 2013 (CNM, 2022). Dentre os eventos mais recentes e amplamente divulgados na mídia nacional em 2023 está a tragédia no litoral norte de São Paulo (Figura 1). Uma forte tempestade atingiu severamente seis municípios nessa região: Bertiooga, Caraguatatuba, Guarujá, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba. Estima-se que os prejuízos contabilizem mais de R\$ 7,9 milhões de reais, sendo que: R\$ 7,2 milhões foram causados em obras de infraestrutura, como pontes, asfaltos, bueiros, canais, valas, fossos, entre outros; R\$ 450 mil em limpeza urbana e remoção de lixos e escombros e; R\$ 320 mil no comércio (CNM, 2023). Um levantamento feito pela prefeitura de São Sebastião aponta que essa catástrofe, ocorrida em 19 de fevereiro, ocasionou a morte de 23 crianças e 41 adultos, totalizando 64 vítimas (CIRINO, 2023).

Embora tecnologias de monitoramento e alerta precoce para desastres envolvendo deslizamentos de terra estejam sendo desenvolvidas, muitos municípios apresentam demandas técnicas relacionadas à temática. No que tange o contexto tecnológico, as redes de sensores sem fio (RSSFs), do inglês wireless sensor networks (WSNs), tem apresentado uma série de vantagens no suporte à detecção e previsão ambiental visto a sua capacidade de extração de dados em tempo real (MUCCHI et al., 2018). As RSSFs são ferramentas poderosas para monitorar fenômenos físicos e naturais em ambientes hostis e remotos. Elas oferecem uma oportunidade substancial de um conhecimento mais preciso dos fenômenos ambientais, pelo

aproveitamento das capacidades de amostragem da rede de detecção como um todo (FASCISTA, 2022).

Figura 1: Deslizamento de terra na região norte do litoral paulista.



Fonte: Prefeitura de São Sebastião, 2023.

No monitoramento de regiões propensas a deslizamentos há uma forte necessidade de equipamentos que não sejam demasiadamente caros para uma ampla implementação em campo pelos municípios (custos não devem exigir financiamento estadual e/ou federal). Preferencialmente, tais equipamentos precisam abranger medidas de proteção para os instrumentos instalados, seja por interferências acidentais ou intencionais, mas ainda devem estar rapidamente prontos para uso, ser de fácil instalação, visto as áreas remotas envolvidas. Ainda, como eventualmente não haverá uma rede de distribuição de energia elétrica próxima disponível, é fundamental que o sistema apresente alguma autonomia, um consumo de energia eficiente. Embora as RSSFs não estejam isentas de limitações significativas no que se refere a recursos reduzidos de processamento, armazenamento, entre outros, elas atendem muito bem a esses requisitos.

Outro ponto é que a pesquisa não abrange medidas de proteção para os instrumentos instalados. Isso significa que não são consideradas possíveis interferências acidentais, causadas por animais ou seres humanos, que poderiam resultar em alterações abruptas nos dados registrados (BAGWARI et al., 2022). Tampouco são contempladas interferências intencionais, como atos de vandalismo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), que possivelmente tirariam o dispositivo de seu adequado funcionamento.

Face ao exposto, o problema desta pesquisa caracteriza-se pela carência de monitoramento de áreas suscetíveis a deslizamentos de terra, a partir da geração de dados sobre as condições do terreno em nível local em tempo real, para uma posterior análise e tomada de decisão. Assim, esta dissertação se propõe a responder a seguinte questão de pesquisa: “Como contribuir com a resiliência, a preparação de municípios brasileiros, em relação à capacidade de monitoramento de desastres envolvendo movimentos de massa?”

### 1.3 Objetivos do projeto

Para responder a questão de pesquisa, esta dissertação tem como objetivo: Desenvolver um nó sensor de uma RSSF para monitoramento de deslizamentos de terra, onde o fator deflagrador principal é a chuva, apresentando custos financeiros acessíveis à municípios brasileiros, escala reduzida e eficiência energética.

Em virtude disso, para alcançar o objetivo geral, faz-se necessário definir alguns objetivos específicos:

- Prover dados para análise dos condicionantes dos deslizamentos, para o entendimento da dinâmica dos processos físicos envolvidos;
- Fornecer diferentes mensagens sobre as condições do terreno (a partir de limiares pré-definidos), favorecendo assim ações antecipadas de mitigação, preparo e de resposta por parte dos tomadores de decisão municipais e da população das áreas em risco; e
- Manter o sistema disponível pelo maior tempo possível, mesmo em condições ambientais desfavoráveis.

### 1.4 Abordagem de pesquisa

Para que esses objetivos sejam alcançados o procedimento metodológico definido para o desenvolvimento de artefatos de hardware e software é a Metodologia de Pesquisa em Ciência do Design (Design Science Research Methodology - DSRM)(PEFFERS et al., 2007). Esse método consiste em um conjunto de técnicas analíticas que permitem o desenvolvimento de pesquisas nas diversas áreas, em particular na engenharia. Em outros termos, é uma

abordagem em que, além de produzir ciência sobre a realidade, tem como propósito delinear uma realidade diferente, modificada por artefatos projetados para resolver problemas em determinados contextos (PIMENTEL; FILIPPO; SANTORO, 2020).

A DSRM é composta por seis etapas processuais que visam garantir o rigor e a relevância da pesquisa. Embora tenha-se uma ordem específica sugerida, elas podem ser executadas de acordo com as necessidades demandadas pelo projeto.

Tabela 1: Etapas do DSRM adaptadas para a pesquisa.

Diretriz	Aplicação da Diretriz
I. Identificação do problema e motivação	O problema desta pesquisa está voltado ao uso mais amplo de tecnologias de monitoramento no contexto de movimentos de massa. Implementar um sistema e sucessivamente gerar dados sobre as condições do terreno em tempo real para tomada de decisão é um grande desafio.
II. Definição dos objetivos	<p>Prover dados para análise dos condicionantes dos deslizamentos, para o entendimento da dinâmica dos processos físicos envolvidos;</p> <p>Fornecer diferentes mensagens sobre as condições do terreno (a partir de limiares pré-definidos), favorecendo assim ações antecipadas de mitigação, preparo e de resposta por parte dos tomadores de decisão municipais e da população das áreas em risco;</p> <p>Manter o sistema disponível pelo maior tempo possível, mesmo em condições ambientais desfavoráveis.</p>
III. Concepção e desenvolvimento (o artefato)	O artefato resultante desta pesquisa consiste em um sistema de monitoramento, um produto baseado em hardware e software, destinado à melhoria da capacidade de previsão e à tomada de decisões mais ágeis no contexto de movimentos de massa, beneficiando a população civil.
IV. Demonstração	<p>Simulação de casos de uso, em laboratório, sobre todos os sensores e funcionalidades do dispositivo de monitoramento.</p> <p>Testes em ambiente real, em campo, visando maior satisfação aos requisitos da pesquisa.</p>



Diretriz	Aplicação da Diretriz
V. Avaliação	Foram realizadas avaliações de usabilidade, dados gerados, comunicação e consumo de energia pelo dispositivo de monitoramento, utilizando a análise de observação de uso e a análise de utilização de componentes (registros e interfaces).
VI. Comunicação	Visa a socialização do conhecimento produzido através de publicações científicas, ou outro meio, com a finalidade de divulgar os avanços obtidos. Descrever os dados coletados, qual a metodologia e padrões utilizados nos processos, e como podem ser acessados pela comunidade de pesquisa por meio da disponibilização de um Plano de Gestão de Dados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A definição conceitual dessas etapas é apresentada a seguir, sendo estas ajustadas de acordo com os objetivos da presente pesquisa na Tabela 1. São elas (adaptado de PEFFERS et al., 2007):

- I. Identificação do problema e motivação: Este passo é dedicado para a definição do problema de pesquisa e apresentação de justificativa(s) para investigação.
- II. Definição dos objetivos para a solução: Através de conhecimentos acerca do problema definido deve-se considerar as possíveis formas de resolvê-lo. Aqui é interessante verificar o estado da arte sobre o assunto e/ou o conhecimento das possíveis soluções já previamente apresentadas.
- III. Concepção e desenvolvimento: No terceiro passo o artefato é projetado com o objetivo de resolver o problema observado. Assim que determinadas as funcionalidades e arquitetura há a criação do próprio artefato.
- IV. Demonstração: Na etapa de demonstração o artefato gerado na etapa anterior precisa ser aplicado, de alguma forma, de modo a demonstrar que de fato mostra-se útil para a resolução do problema.
- V. Avaliação: Pelas demonstrações deve-se observar e mensurar como o artefato atende a solução do problema. Com a análise dos objetivos propostos frente aos resultados gerados pela utilização do artefato, é possível que seja necessário retornar às etapas anteriores, especialmente às etapas 3 ou 4, para melhorar o desempenho do mesmo.

VI. Comunicação: O último passo é reservado para a divulgação dos resultados alcançados pela pesquisa, além da apresentação do artefato desenvolvido.

### 1.5 Organização do texto

A dissertação abrange um total de 6 capítulos, cada um abordando aspectos específicos do trabalho. Neste capítulo foi apresentado o contexto em que se insere o trabalho, as motivações que impulsionaram seu desenvolvimento e os objetivos a serem alcançados. No capítulo 2 está aprofundada principalmente a etapa II da DSRM, pois aborda o marco teórico para a sustentação do projeto, bem como um panorama sobre trabalhos relacionados. No capítulo 3 é apresentado o artefato projetado para contribuir para a resolução do problema observado. Já no capítulo 4 encontram-se detalhes da fase de demonstração, onde o protótipo gerado na etapa anterior é aplicado para verificar sua utilidade na resolução do problema. Ao final, no capítulo 5, são apresentados os resultados alcançados frente aos objetivos propostos e, em seguida no capítulo 6, as conclusões gerais do estudo, juntamente com recomendações para trabalhos futuros, visando a continuidade e aprimoramento da pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Introdução

Nesta seção são apresentados conceitos necessários para um melhor entendimento deste trabalho. Primeiramente são abordados os temas gestão de risco de desastres, movimentos de massa e redes de sensores sem fio. Por fim, são apresentados e discutidos trabalhos correlatos, destacando os diferenciais em relação a esta pesquisa.

### 2.2 Gestão de risco de desastres

É possível definir gestão de riscos e desastres (GRD) como um processo social duradouro e ininterrupto, apoiado por estruturas institucionais e comunitárias, com o objetivo de enfrentar vulnerabilidades e ameaças presentes no território. A GRD, no Brasil, é instituída pela Lei nº 12.608/2012, que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e visa ações para reduzir os riscos e a ocorrência de desastres no contexto brasileiro (e.g. BRASIL, 2012 e SULAIMAN et al., 2021).

De forma complementar à criação dessa política para gerenciamento de riscos de desastres houve a formação do Centro Nacional de Gerenciamento de Desastres (CENAD), que é coordenado pelo Ministério da Integração Nacional, e o Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Esses centros são responsáveis por gerenciar ações estratégicas de preparação e resposta a desastres e por alertas e monitoramento de eventos naturais. Além disso, as atribuições do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) foram redefinidas para abordar a pesquisa e o mapeamento de áreas de riscos geológicos. Ainda foi criada a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC), responsável por coordenar ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação nas esferas federal, estaduais e municipais (e.g. BRASIL, 2017 e PIMENTEL et al., 2018). Os conceitos comumente atrelados a esse conjunto de ações estão expostos na Tabela 2.

Cada uma dessas agências governamentais atua em torno de quatro eixos fundamentais, que são: conhecimento do risco, monitoramento do risco, comunicação do risco

e capacidade de resposta (MARCHEZINI; LONDE, 2018). Encontra-se no primeiro eixo, por exemplo, o CPRM, cuja missão é a de realizar o mapeamento de áreas de risco de deslizamentos e inundações em municípios prioritários. O CEMADEN é uma das diversas as agências da União que atuam no eixo de monitoramento do risco. O CENAD é a agência brasileira responsável por centralizar, a nível federal, todas as ações voltadas à comunicação do risco. A ativa atuação dos órgãos municipais de proteção e defesa civil, como por exemplo a Defesa Civil Municipal, o Serviço Municipal de Proteção Civil, a Secretaria Municipal de Defesa Civil, a Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil, entre outros órgãos a depender da cidade, são de extrema importância no que tange a capacidade de resposta, tendo em vista que os desastres ocorrem no município.

Tabela 2: Conceitos das Ações de Proteção e Defesa Civil.

PREVENÇÃO	Medidas e atividades prioritárias, anteriores à ocorrência do desastre, destinadas a evitar ou reduzir a instalação de novos riscos de desastre.
MITIGAÇÃO	Medidas e atividades imediatamente adotadas para reduzir ou evitar as consequências do risco de desastre.
PREPARAÇÃO	Medidas e atividades, anteriores à ocorrência do desastre, destinadas a otimizar as ações de resposta e minimizar os danos e as perdas decorrentes do desastre.
RESPOSTA	Medidas emergenciais, realizadas durante ou após o desastre, que visam ao socorro e à assistência da população atingida e ao retorno dos serviços essenciais.
RECUPERAÇÃO	Medidas desenvolvidas após o desastre para retornar à situação de normalidade, que abrangem a reconstrução de infraestrutura danificada ou destruída, e a reabilitação do meio ambiente e da economia, visando ao bem-estar social.

Fonte: BRASIL (2017).

Em termos simples, o risco de desastres pode ser dito como a relação entre a potencialidade de ocorrer um acidente ou evento físico que gere consequências e as consequências em perdas e danos sociais ou econômicos decorrentes desse evento. Isso, porém, propõe um foco às consequências e não às causas. Deixa-se de considerar o contexto no qual os desastres ocorrem, a vulnerabilidade de pessoas, bens e infraestrutura atingidas. Ao trazer a vulnerabilidade como ponto de partida é possível entender por que os mesmos

processos físicos causam danos mais amplos e consequências mais profundas nos territórios mais pobres e menos organizados socialmente (e.g. PIMENTEL et al., 2018 e SULAIMAN et al., 2021). Moradias construídas em áreas com suscetibilidade a deslizamentos de terra são um exemplo de condição insegura e estão mais frágeis a ameaça de um processo físico danoso. As perspectivas fundamentais para a efetiva execução da GRD são expostas na Tabela 3.

Tabela 3: Processos da GRD.

Processos-chave	Passos indispensáveis
1. Gerar conhecimento sobre risco de desastres em suas diferentes áreas	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Identificar as principais ameaças presentes no território</li> </ul>
2. Prevenir o risco futuro	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Entender suas causalidades e dinâmica de evolução temporal e espacial</li> </ul>
3. Reduzir o risco existente	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Delimitar espaços de origem e atingimento dos eventos</li> </ul>
4. Preparar a resposta	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Avaliar as vulnerabilidades e a capacidade de resiliência das instituições públicas e população em perigo</li> </ul>
5. Responder e reabilitar	
6. Recuperar e reconstruir	

Fonte: Adaptado de SULAIMAN et al. (2021).

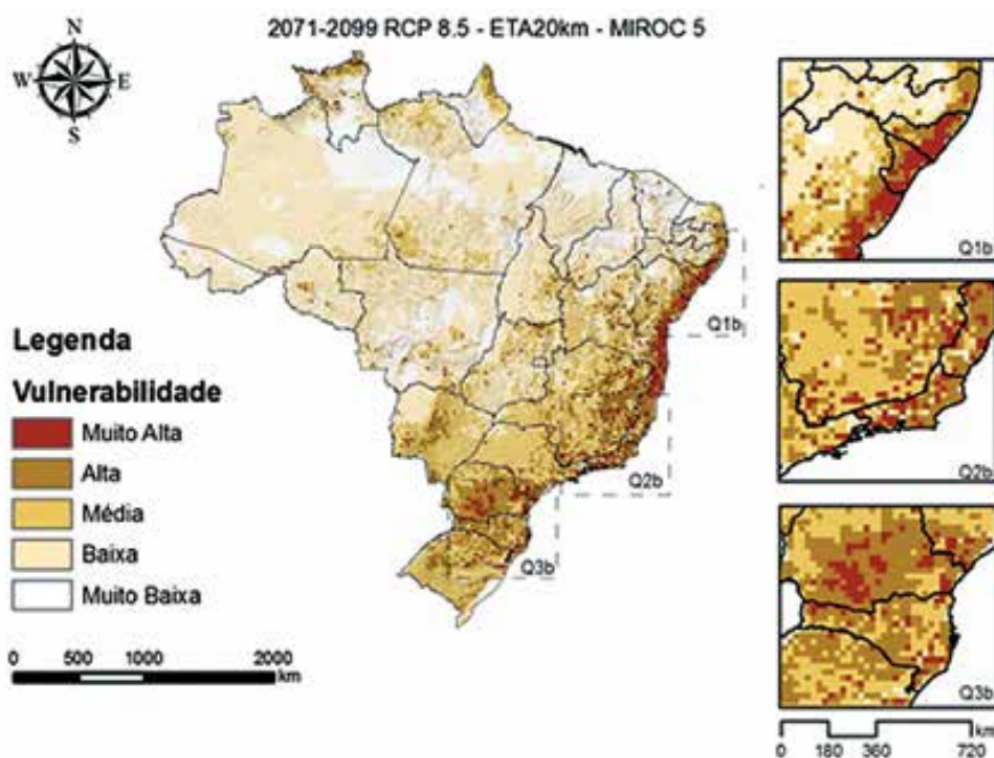
O caminho mais eficiente e sustentável para enfrentamento e redução de desastres se dá pela identificação de cenários de risco. Para tanto é preciso compreender as causas e os fatores causais que compõem esses cenários. A causa de um desastre ou a causa da evolução de uma ameaça é o que conduz à potencialidade de ocorrência de um desastre. Isto é, pode ser um evento, uma condição, uma característica do meio biofísico ou urbano. Já o que se diz por fatores causais são uma combinação desses elementos. Afinal, quase sempre a causa de um risco é constituída de múltiplos elementos que propiciam o desastre (SULAIMAN et al., 2021).

Dentre os principais elementos de agravamento dos riscos de deslizamento, que originam-se sobretudo graças a ocupações indevidas do solo, estão: lançamento de águas residuais; vazamento de redes de abastecimento de água; lançamento concentrado de água pluviais; infiltração de água de fossas sanitárias; cortes realizados com declividade e altura

excessivas; execução inadequada de aterros; deposição inadequada de lixo; e remoção descontrolada da cobertura florestal (BRASIL, 2016).

Com o diagnóstico das causas e dos fatores causais podem ser estabelecidas medidas mais adequadas ao controle e à redução do risco. É possível ainda reunir dados para discutir cenários futuros, realizar estimativas de longo prazo que são fundamentais para tomadas de decisão e planejamento urbano. Projeções para cenários de 2071 a 2100 apontam incrementos do índice de vulnerabilidade da ordem de até 40%, que tornarão diversas áreas atualmente consideradas tidas como “baixa” para “alta” vulnerabilidade (Figura 2 e Figura 3). Esses locais têm fortes indícios de que poderá haver intensificação da ocorrência de desastres envolvendo movimentos de massa no futuro (BRASIL, 2016).

Figura 2: Mapa de vulnerabilidade a desastres naturais envolvendo movimentos de massa, considerando tipologias do relevo, declividade, índices sociais do IBGE e índices de extremos climáticos pluviométricos.



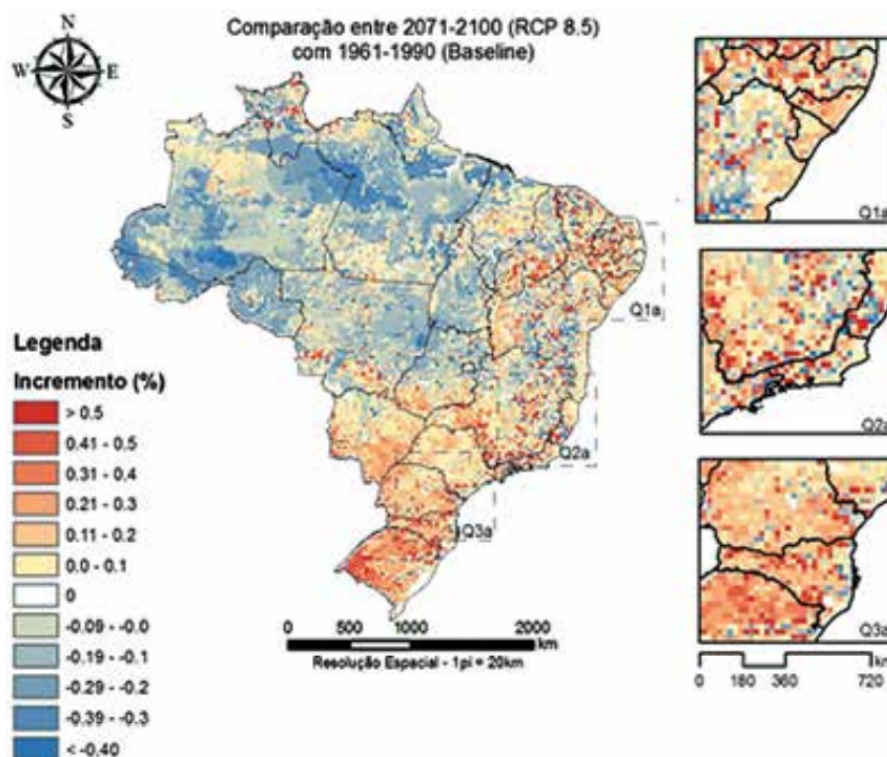
Fonte: BRASIL (2016).

Ainda se tratando da capacidade de enfrentamento e gerenciamento, além de avaliações periódicas das situações de risco por meio de mapeamentos, outros parâmetros como a existência de sistemas de monitoramento, sistemas de alerta e plano de contingência

são fundamentais. Em linhas gerais, o monitoramento tem a função de gerenciar informações preliminares às ocorrências potenciais, pois permite o acompanhamento de características técnicas relacionadas a determinado tipo de risco. Por conseguinte, são estabelecidos níveis de alerta que subsidiam ações de contingência de preparação e resposta (e.g. BRASIL, 2017 e CASTRO et al., 2018).

Os níveis de alerta para risco de ocorrência de processos geológicos no Brasil são estabelecidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e são divididos em três categorias: baixo risco, risco moderado e alto risco. O CEMADEN, que também emite alertas e notificações sobre eventos de riscos naturais para a população e órgãos governamentais, tem ainda a categoria: risco muito elevado. É importante mencionar que essas classificações de alertas são baseadas sobretudo na Portaria n. 314, de 17 outubro de 2012 que determina que as autoridades de proteção e defesa civil devem estabelecer alertas com base na intensidade e na probabilidade de ocorrência de um evento, bem como na capacidade de resposta e preparação das comunidades locais (veja Tabela 4).

Figura 3: Mapa de incremento (aumento ou diminuição) da vulnerabilidade aos desastres relacionados a movimento de massa, comparando o período de 2071-2100 com a base de referência (1961-1990).



Fonte: BRASIL (2016).

Em detalhe, no nível de observação ou baixo risco existem condições estáveis, sem indícios imediatos de um evento perigoso. Essa categoria geralmente não requer ações específicas por parte das comunidades locais ou dos órgãos governamentais, mas é importante manter a vigilância e monitoramento contínuo para detectar possíveis mudanças nas condições de riscos hidrológicos e geológico-geotécnicos. Quando o nível de risco é considerado moderado nota-se que as condições estão mudando e que é necessário um monitoramento mais atento e ações preventivas. Aqui os valores pluviométricos acumulados nas últimas horas estão moderados e há previsão meteorológica para a continuidade de chuvas de intensidade forte ou muito forte, indicando assim uma probabilidade razoável de ocorrência de deslizamentos com potencial moderado de causar vítimas e danos. Já quando o nível de risco é considerado alto, a ocorrência de um desastre natural é considerada elevada. Isso significa que há uma ameaça clara e iminente de um evento perigoso ocorrer, pois tem-se valores pluviométricos acumulados altos com e previsão meteorológica de continuidade de chuvas de intensidade forte ou muito forte. Há portanto a expectativa de ocorrência de deslizamentos com alto potencial de causar vítimas e danos, o que exige que ações preventivas e de preparação tornem-se mais intensas. Ainda mais, no risco muito elevado, os valores de acumulados atingem índices excepcionais e indicam probabilidade muito alta de deslizamentos generalizados com muito alto potencial de causar grande número de vítimas e alto grau de danos. Tendo em vista esses aspectos, é importante notar que esses níveis de alerta são dinâmicos e podem ser atualizados à medida que novas informações são disponibilizadas (Portaria n. 314, de 17 outubro de 2012).

Tabela 4: Matriz de níveis de alerta.

		Impacto potencial		
		Moderado	Alto	Muito alto
Possibilidade de ocorrência	Muito alto	Moderado	Alto	Muito alto
	Alto	Moderado	Alto	Alto
	Baixa	Observação	Moderado	Moderado

Fonte: Portaria n. 314, de 17 de outubro de 2012.

Um ponto importante que deve ser destacado é que, além de informar o nível e o tipo de processo envolvido, o alerta também contém um período de vigência. Esse valor baseia-se



principalmente na expectativa de volume e forma com que a chuva irá ocorrer nas próximas horas. Logicamente, como o monitoramento prossegue, a situação de risco pode ser reavaliada e o período de vigência pode ser alterado a qualquer momento.

### 2.3 Movimentos de massa

Os movimentos de massa são eventos que envolvem o deslocamento de grandes quantidades de material, como terra, rochas, entre outros, de uma área para outra sob ação direta da gravidade. Além disso, existem vários outros fatores que também influenciam nesses movimentos, como a geologia, os aspectos climáticos e hidrológicos, cobertura vegetal, entre outros. Trata-se de um processo natural que faz parte da evolução geomorfológica de regiões serranas (e.g. SULAIMAN et al., 2021 e ARAÚJO et al., 2018).

Entretanto, a ação do homem e suas formas de uso e ocupação do solo contribuem expressivamente para ocorrência desses movimentos. Isso ocorre principalmente devido ao crescimento da ocupação urbana em áreas suscetíveis, sem a adoção de técnicas adequadas de estabilização. Ações antrópicas como a inclusão de maiores volumes de líquidos no solo, mudanças na geometria das encostas, execução inadequada de aterros, deposição inadequada do lixo, remoção descontrolada da cobertura vegetal, são importantes agentes modificadores da dinâmica natural do relevo e, conseqüentemente, da estabilidade das encostas (e.g. PIMENTEL et al., 2018 e ARAÚJO et al., 2018).

Os movimentos de massa frequentemente possuem um grande potencial de destruição, e a elevada velocidade de deslocamento dos materiais em alguns tipos de movimentos torna muito difícil quaisquer ações reativas, uma vez iniciado o processo. No Brasil, os tipos de movimentos de massa mais comuns são: deslizamentos de terra (planares e rotacionais), fluxos de detritos e quedas de blocos (CARVALHO et al., 2018) (veja Tabela 5).

Os deslizamentos classificados como planares ou translacionais ocorrem segundo planos de fraqueza associadas às heterogeneidades dos solos e/ou rochas que representam discontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas (Figura 4). Isto é, são aqueles em que o material se move na superfície, como se fosse uma camada ou uma lâmina. Caracterizam-se por uma curta duração e rápido deslocamento. Predominantemente acontecem durante ou logo após intensos episódios de chuva, em solos pouco desenvolvidos em áreas com altas declividades, podendo atingir dezenas de metros. Normalmente possui um alto poder de

destruição, uma vez que isso é diretamente proporcional ao volume e material deslocado (PIMENTEL et al., 2018).

Tabela 5: Tipos de processos brasileiros de movimentos de massa passíveis de monitoramento e características gerais.

Processos		Principais características				
Classificação	Monitoração aplicável	Duração total do evento	Velocidade da massa mobilizada	Distância atingida pela massa mobilizada	Frequência dos eventos	Vítimas por desastre
Deslizamento planar	Chuva	Muito curto (segundos)	Alta (m/s)	Pequena (dezenas de metros)	Muito alta (milhares/ano)	Poucas
Deslizamento rotacional	Deslocamento do solo/rocha	Longo (dias a anos)	Baixa (cm/dia) (m/h)	Grande (centenas de metros)	Baixa (menos de uma dezena/ano)	Raras
Fluxo de detritos (detritos ou lama)	Chuva	Curto (horas)	Média (m/h) a alta (m/s)	Muito grande (alguns quilômetros)	Muito baixa (menos de uma dezena/década)	Muitas

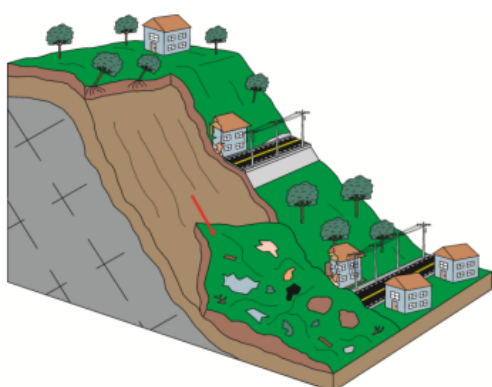
Fonte: Adaptado de CONSONI et al. (2018).

Os deslizamentos circulares ou rotacionais estão associados aos mesmos fatores que os movimentos planares, mas caracterizam-se por uma superfície de ruptura curva, ao longo da qual ocorre um movimento rotacional (Figura 5). Por outro lado, são apontados como movimentos mais lentos e ocorrem de maneira contínua ou intermitente. São mais comuns em encostas com espessos pacotes homogêneos de solo, rochas sedimentares ou maciços rochosos intensamente fraturados (PIMENTEL et al., 2018).

Os fluxos de detritos ou corridas de massa são movimentos complexos caracterizados por deslizamentos sucessivos que alcançam uma drenagem e se propagam ao longo de seu eixo (Figura 6). Eles têm início em áreas de relevo mais elevado, especialmente durante períodos de chuvas intensas, a partir do transporte de sedimentos provenientes de deslizamentos recentes e/ou pela remobilização de depósitos sedimentares antigos que se acumularam ao longo dos canais de drenagem. Considerando a probabilidade do raio de

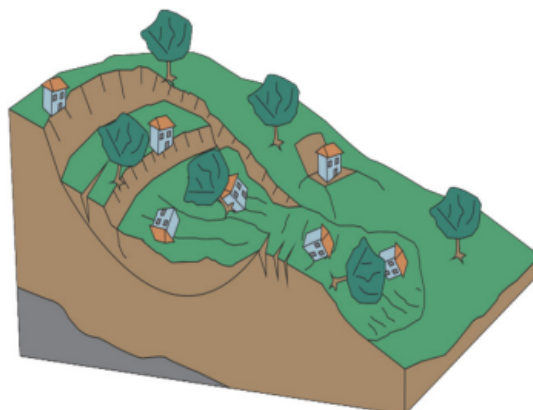
alcance ser extenso, a grande quantidade de material transportado e a alta energia do processo, os fluxos de detritos estão incluídos no grupo dos mais catastróficos tipos de movimento de massa (PIMENTEL et al., 2018).

Figura 4: Desenho esquemático de um deslizamento translacional.



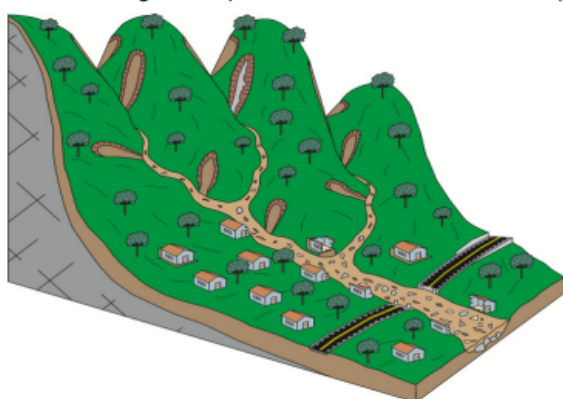
Fonte: PIMENTEL et al. (2018).

Figura 5: Desenho esquemático de um deslizamento rotacional.

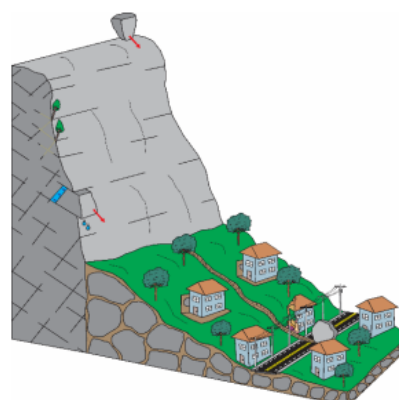


Fonte: PIMENTEL et al. (2018).

Figura 6: Desenho esquemático de uma corrida de Massa. Figura 7: Desenho esquemático de uma queda de bloco.



Fonte: PIMENTEL et al. (2018).



Fonte: PIMENTEL et al. (2018).

Ao contrário dos movimentos já observados, a queda de blocos não é passível de monitoramento pela chuva efetiva, a previsão antecipada do momento da deflagração é muito difícil (CARVALHO et al., 2018). São eventos que ocorrem quando uma camada de solo ou rocha se desloca ou desaba para baixo, geralmente como resultado de condições instáveis ou instabilidade de taludes ou encostas (Figura 7). Existe uma alta mobilidade atrelada a esse

tipo de movimento de massa, sendo o modo de movimentação do bloco depende basicamente de sua geometria e da configuração da encosta (PIMENTEL et al., 2018).

## 2.4 Rede de sensores sem fio

As redes de sensores sem fio (RSSFs) são sistemas compostos por um grande número de dispositivos pequenos e inteligentes, chamados de "nós", que possuem sensores para medir diversas grandezas do ambiente em que estão inseridos, parâmetros ambientais como temperatura, pressão, nível de pH, condutividade da água, entre muitos outros. Esses nós são equipados com dispositivos de comunicação sem fio, que permitem que eles se comuniquem uns com os outros e com uma estação base ou um computador central. Muito influenciadas pelos avanços no campo da miniaturização de sensores, microeletrônica e comunicações sem fio de baixa potência, as tecnologias envolvendo RSSFs desenvolveram-se rapidamente ao longo dos anos (e.g. JAWAD et al., 2017 e FASCISTA, 2022).

As RSSFs podem ser usadas em diversas aplicações, como monitoramento ambiental, monitoramento de tráfego, monitoramento de saúde, monitoramento industrial, entre outras. Geralmente, os principais elementos existentes em cada nó incluem (e.g. JAWAD et al., 2017, WILLIAMS et al., 2021 e FASCISTA, 2022):

1. Sensores: Podem coletar diferentes tipos de dados ambientais em diferentes formatos e resoluções, por exemplo, analógicos ou digitais, estáticos ou dinâmicos, espaciais ou temporais, imagens ou sequências de vídeo, etc.
2. Dispositivos de comunicação sem fio: Os nós da RSSF precisam de dispositivos de comunicação sem fio para transmitir dados entre si. Os principais protocolos de comunicação sem fio usados em RSSFs incluem ZigBee, Bluetooth, GPRS/3G/4G, Wi-Fi e LoRa (Tabela 6).
3. Dispositivos de processamento: Necessários para controlar e gerenciar as tarefas locais e realizar cálculos básicos sobre os dados adquiridos. Comumente são microcontroladores ou microprocessadores de baixo consumo, como o Arduino, Raspberry Pi e ESP32.
4. Fonte de energia: A maioria dos nós da RSSF é alimentada por baterias, portanto, podem requerer manutenção frequente e periódica na forma de recarga ou substituição.

Tabela 6: Diferentes tecnologias de comunicação sem fio.

Parâmetros	ZigBee	BLE	Bluetooth	GPRS	Wi-Fi	LoRa
Padrão	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4g	IEEE 802.11a,b,g,n	IEEE 802.15.4g
Faixa de frequência	868/915 MHz e 2,4 GHz	2.4 GHz	2,4 GHz	900–1800 MHz	2,4 GHz	869/915 MHz
Número de canais de RF	1, 10 e 16	40	79	124	11	10 na UE, 8 nos EUA
Largura de banda do canal	2 MHz	1 MHz	1 MHz	200 kHz	22 MHz	<500 KHz
Consumo de energia no modo Tx	Baixo 36,9 mW	Ultra Baixo 10 mW	Médio 215 mW	Médio 560 mW	Alto 835 mW	Baixo 100 mW
Latência	(20–30) ms	6ms	100 ms	<1 s	50 ms	-
Faixa de comunicação	100 m	10 m	10–50 m	1–10 km	100 m	5 km
Custo	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Limitações	Caminho direto de um transmissor para o receptor deve estar disponível	Alcance de comunicação curto	Alcance de comunicação curto	Problema de consumo de energia	Alto consumo de energia e longo tempo de acesso (13,74 s)	Tamanho da rede (escalabilidade), taxa de dados e capacidade de mensagem

Fonte: Adaptado de JAWAD et al. (2017).

A arquitetura de uma RSSF pode variar de acordo com a aplicação e os requisitos específicos do sistema, mas geralmente segue uma estrutura que se assemelha ao modelo OSI (Open Systems Interconnection). O modelo OSI é uma referência abstrata, formada por sete camadas, que descreve como diferentes componentes de software e hardware envolvidos em uma comunicação de rede dividem o trabalho e interagem uns com os outros. Analogamente, a arquitetura de uma RSSF reflete uma estrutura adaptada, consistindo em pelo menos três camadas principais: física, de rede e de aplicação (ISLAM et al., 2023).

1. Camada física: É composta pelos dispositivos de hardware que formam a rede, incluindo, por exemplo, os principais elementos citados anteriormente. Os dispositivos nesta camada são responsáveis por coletar dados, transmiti-los e processá-los.
2. Camada de rede: É responsável pelo gerenciamento da comunicação entre os dispositivos na rede. Essa camada inclui protocolos de comunicação sem fio,

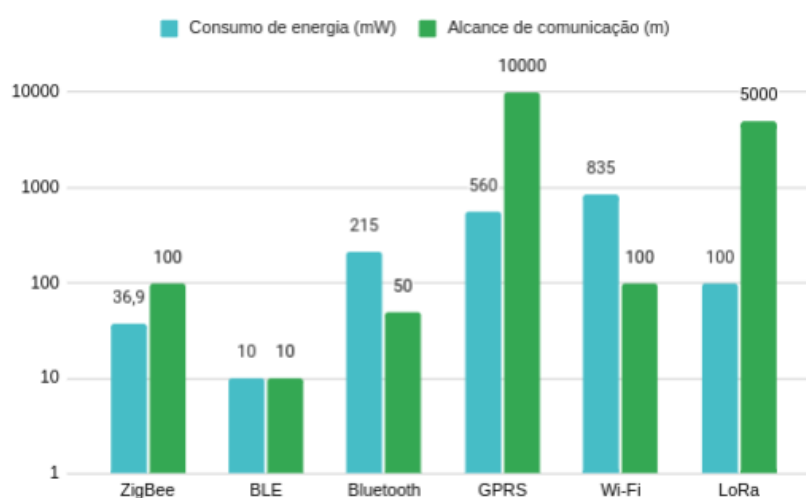
algoritmos de roteamento e técnicas de gerenciamento de energia para garantir que os dispositivos de baixo consumo de energia tenham vida útil prolongada.

3. Camada de aplicação: É onde os dados coletados pelos sensores são processados e usados para tomar decisões ou gerar informações úteis. Os dados podem ser armazenados em um banco de dados, processados em tempo real ou usados para gerar alertas e notificações.

Uma consideração comum e fundamental das RSSFs é a eficiência energética. O ambiente de monitoramento relacionado a movimentos de massa é severo e complexo, e geralmente possui um longo período de monitoramento (e.g. MEI et al., 2020 e BAGWARI et al., 2022). Apesar de tais tipos de aplicações tenham melhorado em relação a esse aspecto, o consumo de energia e a capacidade de comunicação em longas distâncias seguem sendo desafios (BAGWARI et al., 2022). Logo, a fim de gerenciar a energia e vida útil do nó, duas abordagens principais são normalmente seguidas (FASCISTA, 2022):

1. Desenvolvimento de algoritmos e protocolos de comunicação energeticamente eficientes.
2. Uso de técnicas de captação de energia, para restaurar a energia com base em calor, luz, fluxo de ar, vibrações, ondas eletromagnéticas e outros fenômenos.

Figura 8: Diferentes tecnologias sem fio em termos de consumo de energia e distância de comunicação.



Fonte: Adaptado de JAWAD et al. (2017).

Sobre as tecnologias de comunicação sem fio, diferentes parâmetros podem ser comparados, incluindo consumo de energia, alcance de comunicação, taxa de dados, custo, complexidade do sistema, entre outros. Atentando-se especialmente para a questão energética, a tecnologia Zigbee e BLE são adequados para dispositivos alimentados por bateria. Bluetooth, GPRS, Wi-Fi e LoRa têm um consumo de energia maior. Já no que se refere ao alcance, o BLE tem curta distância de comunicação. Por outro lado, GPRS e LoRa apresentam conectividade para atuar em grandes distâncias (Figura 8).

Embora a tecnologia LoRa prometa uma conectividade de área ampla com baixo consumo, uma solução racional ainda é um desafio nessa área (BAGWARI et al., 2022). Segundo dados de TELECO (2023a e 2023b), a cobertura LoRa em janeiro de 2023 no Brasil abrange 51,1% dos municípios, um crescimento de 9,1% nos últimos 3 anos. Quanto à tecnologia GSM/GPRS (2G/2.5G), 99,93% dos municípios brasileiros são atendidos, o que corresponde a 100% da população nacional.

Ainda, considerando as necessidades específicas e as condições do presente trabalho, a tecnologia 2G apresenta vantagens frente aos seus sucessores, como a tecnologia 3G ou a 4G. Além de apresentar uma cobertura mais ampliada, cobrindo áreas remotas ou rurais onde as redes 3G e 4G podem não estar disponíveis ou podem ter uma cobertura limitada, a tecnologia 2G tem menos largura de banda. Por apresentar velocidade inferior, consome menos energia, o que é uma característica vantajosa para dispositivos que operam com restrições de energia.

Adicionalmente, sobre o uso de técnicas de captação, fazer uso de sistemas de coleta de energia (energy harvesting - EH), é algo muito promissor no desenvolvimento de uma geração de RSSFs autossustentáveis, reduzindo ou até eliminando as limitações de vida útil da bateria. Muitas fontes de energia são exploráveis por vários métodos, mas a energia fotovoltaica (SEH) está entre as mais maduras e usadas atualmente. Sendo mais apropriada para ambientes externos, essa tecnologia tem uma potência de saída intimamente ligada a intensidade da luz e da temperatura das células fotovoltaicas. Por esta razão, a maioria das implementações de SEH empregam uma arquitetura de coleta-armazenamento-uso devido a variações de irradiância relacionadas ao tempo e durante a noite, quando não há luz disponível (WILLIAMS et al., 2021).

## 2.5 Trabalhos anteriores

Muitas soluções envolvendo RSSFs no monitoramento de deslizamentos de terra já foram propostas na literatura. Apesar dessa variedade, sempre há novos elementos ou novas abordagens que podem ser aplicadas para se obter maiores benefícios em determinados aspectos. A seguir são destacados estudos anteriores que possuem semelhanças com o presente trabalho. As técnicas de monitoramento que foram buscadas baseiam-se no solo (não terrestre-aéreas ou aéreas), mais precisamente com um levantamento de dados de superfície e subsuperfície com disponibilidade de dados em tempo real.

Gian et al. (2017) propõem e implementam um sistema sem fio de monitoramento e alerta para deslizamentos de terra, onde o fator deflagrador principal é a chuva. O estudo destaca que a infiltração de água no solo pela chuva causa um aumento da pressão da água nos poros e a diminuição da resistência ao cisalhamento. Ou seja, para deslizamentos de terra induzidos pelas chuvas, os principais influenciadores são a intensidade das chuvas, as propriedades do solo, e a condição das águas subterrâneas.

Assim, é realizado um estudo de caso no norte do Vietnã onde são observados parâmetros como: precipitação, nível de água subterrânea, umidade, pressão de água nos poros e também a movimentação da encosta com sensores inerciais. Os dados detectados foram enviados para um computador para análise, onde é calculado um fator de segurança para determinar o estado de instabilidade da encosta. Um ponto muito importante sobre o sistema proposto é que ele tem a flexibilidade de mudar de topologia de conexão entre nós, de árvore para estrela, seja automaticamente conforme um nível de segurança estabelecido ou por comandos dados ao sistema (GIAN et al., 2017).

Em seus resultados há destaque para preservação de confiabilidade. Os autores apontam que um problema crítico nesse contexto de aplicação é a possibilidade dos sensores enterrados serem quebrados, destruídos, devido ao movimento do deslizamento. Pela alternância de topologia é possível, por um lado, preservar energia e ter mais confiabilidade, por outro. No entanto, a principal limitação destacada envolve a escala. O sistema requer uma investigação geotécnica detalhada para estabelecer o fator de segurança e, portanto, pode envolver custos expressivos para uma instalação que vá além de uma escala local (GIAN et al., 2017).



Mucchi et al. (2018) propõem uma RSSF inovadora baseada na adoção da tecnologia de banda ultralarga (UWB) para o monitoramento da superfície do solo. A ideia principal é adquirir a posição de muitos nós sensores distribuídos pela área monitorada e medir a distância entre eles, mensurando assim os movimentos da superfície. A partir dessas periódicas medidas que são realizadas por nós escravos é realizado um pré-processamento dos sinais recebidos por um nó mestre. A informação obtida é então transmitida a um servidor remoto através de um link 3G para um pós-processamento completo de todos os dados. Convém destacar que esse sistema de medidas de distância requer uma referência de tempo, para cálculo e avaliação dos movimentos do solo. Uma frequência de medição que pode ser suficiente para um fluxo terrestre vai de 2 a 4 aquisições de dados por dia, devido à lenta evolução temporal de alguns movimentos. No entanto, alertam os autores, no caso de monitoramento por RSSF de um deslizamento de terra por longos períodos de tempo, a bateria de cada nó precisará ser trocada, mas sem a necessidade de mover o nó correspondente.

O sistema foi testado para alerta precoce de deslizamento em um contexto real, em Florença, Itália. São apresentadas vantagens como uma instalação fácil e rápida, custo-benefício no desenvolvimento da rede, flexibilidade e capacidade de adaptação diante da obstrução parcial por objetos físicos. Já as principais limitações levantadas sobre o sistema em comparação a algumas outras tecnologias semelhantes envolvem uma baixa precisão, alcance máximo e durabilidade (MUCCHI et al., 2018).

Jeong, Ko e Kim (2020) estudam a aplicabilidade de uma RSSF para monitoramento de escorregamentos em Seul, na Coreia, projetando e aplicando um sistema com base em medições em uma bancada de teste. Neste estudo os nós sensores consistem em um transceptor sem fio de acordo com o padrão ZigBee, fonte de alimentação, módulos de gerenciamento de energia e um microcontrolador recebendo sinal analógico dos sensores (tensiômetro, sensor de umidade do solo e inclinômetro). Além disso, para fazer uma topologia de rede razoável entre os nós, o trabalho citado realiza uma análise de suscetibilidade usando um modelo de inclinação (YS-slope) baseado em sistemas de informações geográficas (Geographic Information System - GIS).

Os resultados da aplicação do modelo apontaram três bacias hidrográficas representativas, com alta possibilidade de ocorrência de deslizamentos de terra entre 110 áreas em Seul. Os resultados de medições feitas pela RSSF nesses locais e os obtidos em

laboratório foram semelhantes. No entanto, houve um teor de água volumétrico um pouco menor do que os testes de laboratório pois os resultados em campo são medidos durante a saturação do solo com o tempo, diferente das condições dos testes de laboratório. Ainda assim, é possível confirmar que os resultados das medições usando a RSSF refletem bem a resposta do solo pela chuva (JEONG; KO; KIM, 2020).

No trabalho de Dikshit, Satyam e Towhata (2018) o objetivo principal é monitorar os ângulos de inclinação de taludes para formular um sistema de alerta confiável com baixa probabilidade de falsos alarmes na região de Chibo Pashyor, no estado indiano de Bengala Ocidental. O sistema proposto é principalmente adequado para detectar os estágios primários de falhas superficiais com superfícies de deslizamento rasas. Composto principalmente por um sensor de inclinação em 2 eixos, cada nó possui quatro baterias alcalinas tamanho C que funcionam bem em campo por mais de um ano.

Embora nenhum incidente de deslizamento de terra na região tenha ocorrido, houve casos visíveis de deslocamento do solo. Os resultados observados tiveram uma diferença significativa tanto na inclinação do eixo x quanto na inclinação do eixo y dos sensores. Esses deslocamentos começaram a partir do topo do talude e, gradualmente, também no centro. Na base do talude nenhum sinal de movimento foi observado. Assim, visto que o sistema é capaz de detectar variações incomuns no ângulo de inclinação das encostas, ele ajudará na validação de modelos de limites de precipitação num sistema de alerta precoce (DIKSHIT; SATYAM; TOWHATA, 2018).

Marino et al. (2023) propõe atualizações a uma rede hidrometeorológica convencional, localizada em um talude em Campânia, Itália. A proposta usa componentes de baixo custo para o desenvolvimento da rede, para mostrar que o monitoramento ambiental disperso é facilmente acessível. Nessa rede, os nós foram equipados com sensores para medições de umidade e para temperatura do solo no campo. Cada nó da malha ainda teve cada componente eletrônico colocado dentro de uma caixa hermeticamente fechada, para proteção.

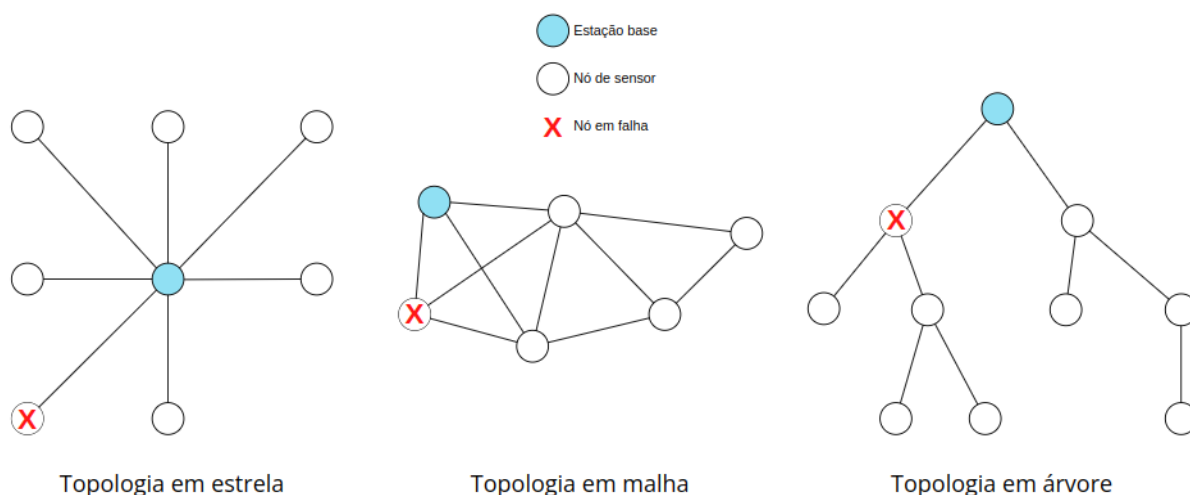
Os resultados obtidos mostram tendências semelhantes em termos de teor de água e temperatura, sem diferença significativa entre os nós durante o período monitorado. Logo, o protótipo desta rede mostra um potencial para geração de mais dados hidrológicos, adequados para a criação de sistemas de alerta precoce em áreas propensas a deslizamentos (MARINO et al., 2023).

## 2.6 Discussão dos trabalhos anteriores

Após o levantamento dos trabalhos citados na seção anterior pode-se perceber que os diferentes estudos utilizaram diferentes técnicas e tecnologias para o monitoramento de deslizamentos de terra. Na maioria dos casos nota-se a complexidade e o custo envolvido. Não tanto no desenvolvimento da rede em si, mas para mantê-la funcionando em longo prazo. Isto é, os nós sensores não possuem um sistema de coleta de energia (EH) e, assim, é necessária a manutenção do nó após o esgotamento das baterias. Por outro lado é importante destacar que, embora não utilizados juntos aos nós sensores da rede, alguns autores usaram sistemas de EH junto a nós coletores, ou estações bases, por serem responsáveis pela transferência de um volume maior de dados.

Ainda no quesito comunicação, a presença de estações bases para transferência de informações à internet insere riscos à operabilidade da rede. Independentemente da topologia de rede adotada, a falha de algum nó sensor pode não trazer grandes prejuízos ao funcionamento global da rede (Figura 9). Entretanto, caso algum tipo de falha ocorra com a estação base, a rede como um todo pode ser comprometida. Dos trabalhos analisados somente em Gian et al. (2017) foi dada ênfase a essas questões de confiabilidade e disponibilidade.

Figura 9: Representação de nós sensores com falha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Em contraste, um trabalho significativo foi conduzido sobre consumo energético reduzido. Embora muitos desses estudos não forneçam valores específicos de consumo

energético, é evidente que houve preocupação em relação às decisões de arquitetura, seleção de topologias, frequência de leituras e transmissão de dados, entre outros aspectos relevantes.

De maneira semelhante a esses trabalhos, outras pesquisas também voltadas a análises locais ou casos específicos de deslizamento de terra, fazem uso de técnicas numéricas quantitativas para avaliação da situação de risco. Acerca disso, uma vez que é preciso um banco de dados consolidado ao longo do tempo para se conseguir análises estatísticas e parâmetros físicos, Dikshit, Satyam e Towhata (2018) enfatizam que procedimentos como estes forneceram conclusões em circunstâncias bastante restritas.

Assim, a RSSF proposta no presente trabalho toma como ponto de partida os pontos fracos e pontos fortes de soluções anteriores, visando atingir o objetivo geral e específicos apresentados. A seguir, é mostrado na Tabela 7 um resumo de características importantes observadas nos trabalhos anteriores.

Tabela 7: Comparativo de trabalhos relacionados.

	A presente pesquisa	(GIAN et al., 2017)	(MUCCHI et al., 2018)	(JEONG; KO; KIM, 2020)	(DIKSHIT; SATYAM; TOWHATA, 2018)	(MARINO et al., 2023)
Principal parâmetro/tecnologia utilizada no monitoramento	Teor volumétrico de água	Pressão da água nos poros	Banda ultralarga	Teor volumétrico de água	Inclinação da superfície	Teor volumétrico de água
Comunicação (Padrão)	GSM/GPRS (IEEE 802.15.4g)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	GSM/GPRS/3G (IEEE 802.15.4g)	Wi-Fi (IEEE 802.11a,b,g,n)	Não informado	Wi-Fi (IEEE 802.11a,b,g,n)
Frequência de leitura	A cada 30 min (máx.)	Não informada	2-4 por dia	Não informada	A cada 10 min	A cada hora
Coleta de energia no dispositivo de monitoramento	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Sistema caro/complexo	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não
Teste de campo (*exceto parâmetros indiretos)	Sim*	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Implantação fácil/rápida	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Consumo de energia pelo dispositivo de monitoramento (**estimativa)	18,95 mA/h	Não informado	61 mA/h (quando ativo)	Não informado	Não informado	160 mA/h**

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Introdução

Nesta seção, é descrita uma RSSF dedicada a monitorar a evolução de fatores específicos que podem influenciar o risco de um escorregamento de terra em uma área suscetível à ruptura do solo. Primeiramente são expostas características da arquitetura do sistema, com sua evolução no decorrer deste trabalho. Em seguida, é abordado o processo de instalação dos sensores, bem como o pré-processamento dos dados coletados pelos sensores e a sua comunicação. Por fim, há a apresentação de dados, que envolve principalmente a interpretação dos dados coletados e a disponibilização das informações.

### 3.2 Arquitetura do sistema

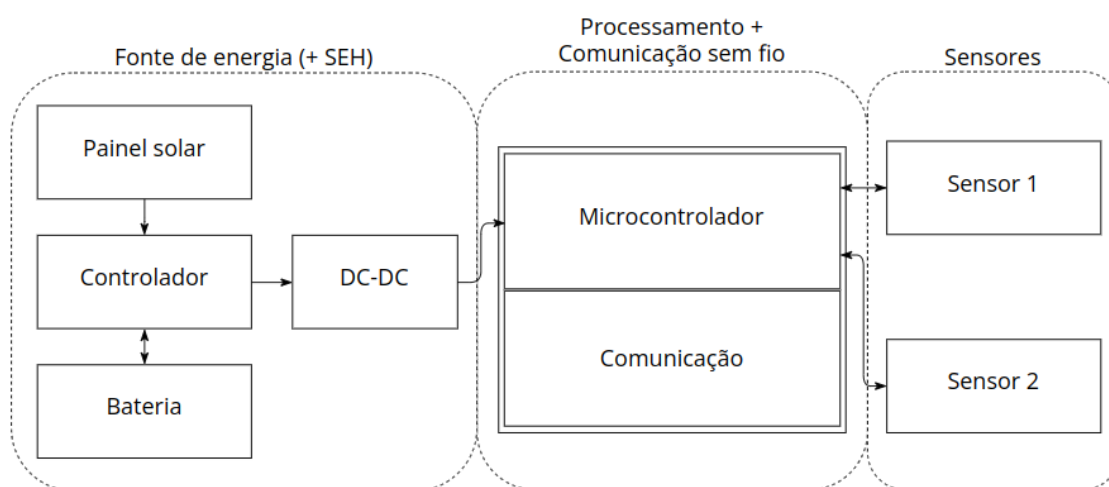
Para avaliar o risco de deslizamento, são medidos dois tipos de parâmetros: aqueles que fornecem informações indiretas sobre a iminência de um risco em uma área monitorada e aqueles que avaliam diretamente a amplitude e velocidade do desastre após o seu início. Os parâmetros indiretos são medidos para obter informações valiosas sobre as condições que podem levar a um deslizamento de terra. Já os parâmetros diretos são usados para avaliar a gravidade do evento, caso ocorra. Ambos os tipos de parâmetros são importantes para uma avaliação completa do risco de deslizamento em uma determinada área (FOSALAU; ZET, 2018). Tendo isso em mente, na concepção e desenvolvimento do sistema proposto, tanto parâmetros indiretos quanto diretos são monitorados por sensores. Isso permitirá avaliar o risco de deslizamento em diferentes tipos de eventos, incluindo deslizamentos planares, deslizamentos rotacionais e fluxos de detritos.

Assim, um protótipo inicial (RevA) foi proposto para verificação da metodologia. A arquitetura de cada nó sensor é composta por quatro elementos principais: sensores, dispositivo de comunicação sem fio, dispositivo de processamento, e fonte de energia (Figura 10).

A interface para aquisição de parâmetros diretos do solo (sensor 1) é uma unidade de medida inercial (IMU) baseada em sistemas microeletromecânicos (MEMS). Trata-se de um

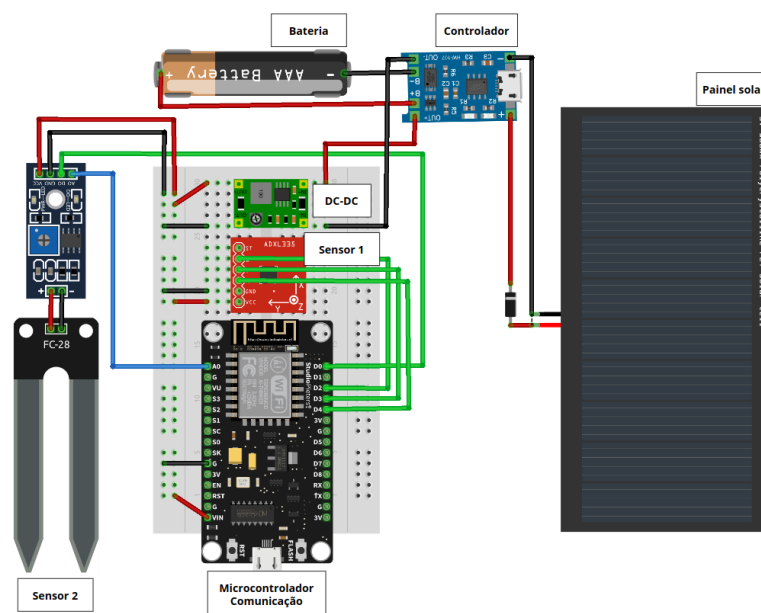
acelerômetro de 3 eixos que mede a aceleração com uma escala mínima de  $\pm 3$  g, o ADXL335. Ele é capaz de medir tanto a aceleração estática da gravidade em aplicações de detecção de inclinação quanto a aceleração dinâmica resultante de movimento, choque ou vibração. Sendo pequeno, fino e de baixa potência, também condiciona saídas de tensão por sinal (ANALOG DEVICES, 2010).

Figura 10: Arquitetura preliminar do nó sensor (RevA).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 11: Representação dos itens da arquitetura preliminar do nó sensor (RevA).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para ser utilizado indiretamente no monitoramento de deflagração de todos os processos citados, há um sensor de umidade do solo (sensor 2). O sensor FC-28 é um

higrômetro que pode ler a quantidade de umidade presente no solo ao seu redor. Ele contém duas sondas para passar corrente elétrica através do solo e obter o nível de umidade com base na resistência (FULLER, 2022). Trata-se de uma ferramenta valiosa relacionada ao monitoramento ambiental, considerando que esse tipo de sensor é capaz de detectar mudanças sutis na umidade.

A unidade de processamento tem como principal tarefa controlar os sensores, executar o protocolo de comunicação e algoritmos de processamento de sinal básicos nos dados coletados. Já a unidade de comunicação é encarregada de transmitir as informações processadas. De conformidade com isso, o microcontrolador ESP8266 NodeMCU integra a tecnologia Wi-Fi e uma ampla gama de pinos de entrada e saída, sendo capaz de fazer as duas unidades (de processamento e comunicação) trabalharem em conjunto para coletar, processar e transmitir informações em tempo real, por uma conexão direta com a internet.

A fim de garantir que os nós sensores possam funcionar por meses ou, idealmente, anos sem substituição de baterias, é integrado um sistema de coleta de energia solar (SEH) à fonte de energia do sistema. Portanto, o sistema de alimentação do nó sensor é composto por uma bateria de lítio de uma única célula (3,7 V), um painel solar, um módulo carregador de bateria de lítio (TP4056) e um conversor para elevação de tensão (MT3608). Em termos simples, o painel solar é responsável por capturar a energia da luz solar e convertê-la em eletricidade. O TP4054 é um circuito integrado de gerenciamento de carga que controla o fluxo de energia entre o painel solar e a bateria, garantindo que a bateria seja carregada de forma segura. Já o MT3608 é um conversor elevador DC-DC que aumenta a saída da bateria de lítio para tensões maiores. Isso é, ele faz com que a tensão da bateria de 3,7 V seja transformada em 5,0 V, permitindo a operação do ESP8266 NodeMCU pelo pino de entrada de energia VIN.

Todos os itens especificados, que constituem os elementos demonstrados na Figura 10, são representados na Figura 11 para melhor análise. Além disso, na Tabela 8, é mostrado o custo de cada um desses componentes pertencentes a RevA (sem cobrir taxas ou fretes).

Posteriormente, após maiores avaliações sobre esse artefato preliminar, foi criada uma nova versão de dispositivo sensor (RevB). A abordagem de avaliar e melhorar continuamente é importante para que a RSSF seja uma ferramenta ainda mais valiosa para o monitoramento de risco de deslizamentos. Assim, essa nova versão foi desenvolvida com melhorias significativas em relação à sua versão anterior.



Tabela 8: Custo de componentes do nó sensor preliminar (RevA, por fornecedores nacionais).

Componente	Descrição/Modelo	Un.	Custo/Un. (R\$)	Subtotal (R\$)	Total (R\$)
Painel solar	100.8x82.5 1.15W	1	30,90	30,9	
Controlador	TP4054	1	23,00	23	
Bateria	Li-Ion 18650 2.200mAh	1	15,23	15,23	
	Suporte de bateria 3,7 V	1	8,46	8,46	
DC-DC	MT3608	1	8,07	8,07	
Microcontrolador /Comunicação	ESP8266 NodeMCU	1	28,50	28,5	
Sensor 1	ADXL335	1	29,90	29,9	
Sensor 2	FC-28	1	10,50	10,5	
Outros				30,00	
					184,56

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Uma das mudanças mais significativas envolve a tecnologia de comunicação adotada. O ESP8266 NodeMCU possui WiFi nativo, o qual não é considerado eficiente para dispositivos alimentados por bateria (JAWAD et al., 2017). Porém, a principal vantagem do uso desta tecnologia envolve a possibilidade de conexão direta com um ponto de acesso à internet, eximindo o emprego de nós coletores entre dispositivos sensores, ou a inserção de uma estação base. Considerando que os locais mais vulneráveis dos municípios tendem a ser áreas mais pobres e com uma infraestrutura tecnológica menos desenvolvida, é de suma importância adotar uma opção de comunicação que seja acessível e adequada às necessidades dessas regiões. Isso significa usar uma solução que seja economicamente viável, de fácil implementação e que não dependa de uma infraestrutura de comunicação complexa. Logo, ao considerar a tecnologia GPRS, é possível estabelecer comunicação mesmo em locais com pouca cobertura de rede e oferecer uma alternativa viável para mais inclusão digital de áreas vulneráveis. Ou seja, pela adoção dessa tecnologia como opção de comunicação, é possível superar as barreiras de conectividade e contribuir para a redução das disparidades socioeconômicas. Além do mais, a tecnologia GSM/GPRS ainda é a forma mais avançada de comunicação disponível em diversos municípios brasileiros (BRASIL, 2020). Embora tal tecnologia também não seja ideal para aplicações onde há recursos energéticos limitados, a

GPRS tem capacidade para atuar com menos consumo de energia e em maiores distâncias, em comparação a tecnologia WiFi (JAWAD et al., 2017).

De acordo com isso existe o TTGO T-Call, um microcontrolador ESP32 com um módulo GSM/GPRS integrado (SIM800L). Além de permitir a comunicação por meio de redes celulares, ele inclui também WiFi, Bluetooth, opções para controlar o consumo de energia do módulo SIM800L e pode ser alimentado por baterias ou fontes de energia externas (SANTOS, 2019). Dessa forma, pela troca da unidade de processamento e comunicação do nó, de ESP8266 NodeMCU para TTGO T-Call, é possível:

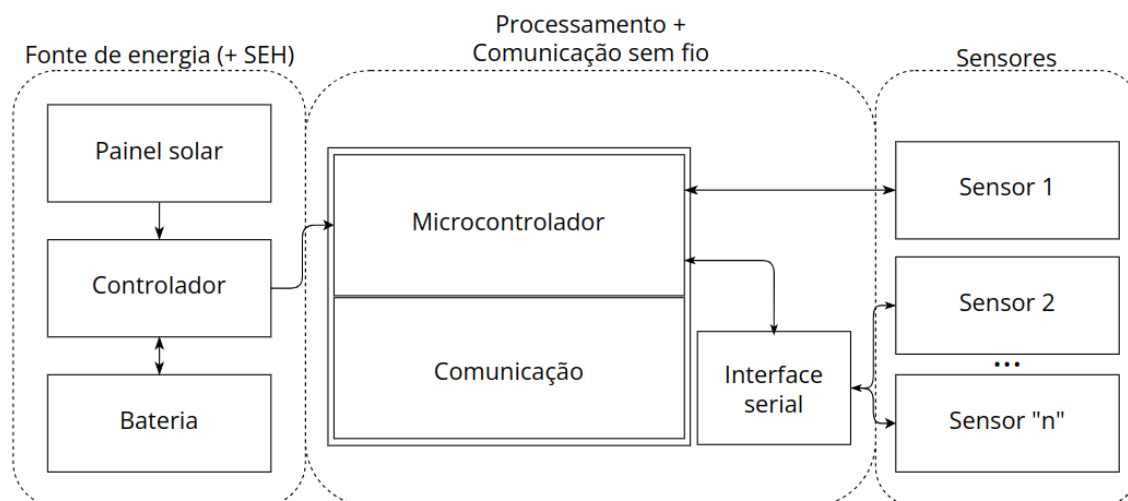
- Aprimorar o modo de transmissão de dados para uma forma energeticamente mais eficiente e com um alcance de atuação até cem vezes maior.
- Extinguir a necessidade de um ponto de acesso à internet próximo à região sendo monitorada.
- Remover o conversor para elevação de tensão DC-DC, o MT3608, uma vez que o TTGO T-Call permite a conexão de baterias de lítio de 3,7 V.

Além de abordar os aspectos de comunicação e consumo de energia, foram realizadas otimizações na parte dos sensores do nó. A interface para mensurar os parâmetros diretos dos movimentos de massa, o ADXL335, foi substituída pelo MPU-6050. Essa atualização expande funcionalidades para além de um acelerômetro de 3 eixos, combinando a isso um sensor de velocidade angular, um giroscópio de 3 eixos. A sensibilidade de taxa angular é de até 131 LSB/°/seg (bit menos significativo por grau por segundo) com faixa de atuação a partir de  $\pm 250$  °/seg. Já a escala mínima de aceleração coberta pelo nó passa a ser de  $\pm 2$  g (INVENSENSE, 2013).

Em conjunção com essas mudanças no sensoriamento está a permuta do FC-28 por dois ou mais Soil MTEC-02A. Este sensor foi projetado com padrões da indústria e apresenta alta precisão, alta sensibilidade e durabilidade (IP68). Ele incorpora, além do sensor de umidade, outros dois sensores, de temperatura e de condutividade elétrica do solo. Isso significa que, ao medir a constante dielétrica do solo, ele pode medir de forma estável o conteúdo volumétrico de água, independentemente dos vários tipos de solo. O Soil MTEC-02A, além de ser muito mais robusto e durável que o FC-28, apresenta também compensação automática de temperatura, proporcionando muito mais precisão das medições independentemente das mudanças ambientais (SEEED, 2020). Ainda mais, como esse sensor

se comunica por meio de um protocolo Modbus RTU via RS-485, é possível conectar outros elementos à interface, como um segundo sensor, por exemplo.

Figura 12: Arquitetura atual do dispositivo de detecção (RevB).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 9: Custo de componentes do nó sensor atual (RevB, por fornecedores nacionais, exceto \*).

Componente	Descrição/Modelo	Un.	Custo/Un. (R\$)	Subtotal (R\$)	Total (R\$)
Painel solar	100.8x82.5 1.15W	1	30,90	30,9	
Controlador	TP4054	1	23,00	23	
Bateria	Li-Ion 18650 2.200mAh	1	15,23	15,23	
	Suporte de bateria 3,7 V	1	8,46	8,46	
Microcontrolador /Comunicação	TTGO T-Call	1	117,00	117	
Interface serial	Conversor RS-485	1	4,99	4,99	
Sensor 1	MPU-6050	1	17,07	17,07	
Outros				30,00	
					246,65
Sensor 2, "n"	Soil MTEC-02A*	2	US \$81.25	US \$162.5	
					US \$162.5

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Fundamentalmente, a arquitetura atual de cada nó sensor (Figura 12) tem os mesmos quatro elementos já destacados. Rigorosamente falando, houve uma redução do sistema de

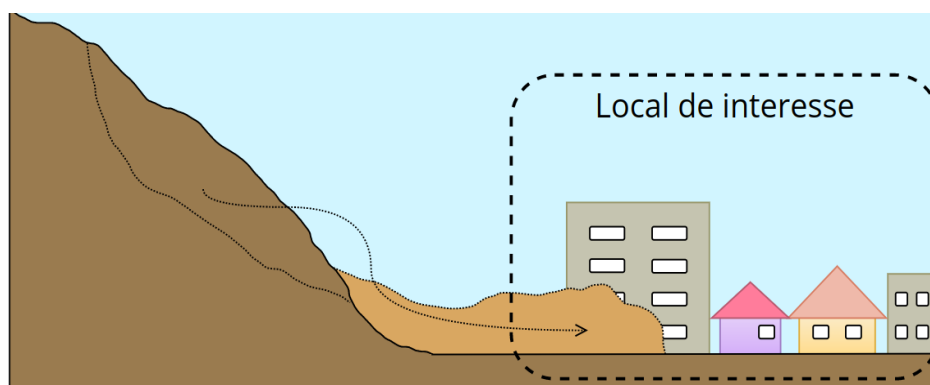
SEH, pela remoção do conversor elevador DC-DC. O dispositivo de comunicação sem fio que é integrado junto ao de processamento agora tem mais funcionalidades e capacidade de alcance. Já na parte de sensoriamento, o sensor 1 é mais moderno e permite seis eixos de liberdade de movimento. Além dele, agora é possível a inclusão de “n” sensores de umidade por meio de uma rede RS-485. Conseqüentemente, há a necessidade de inclusão de um módulo complementar de comunicação para viabilizar essa nova interface serial, um módulo conversor de dados TTL para RS-485 baseado no MAX485.

Sendo assim, é mostrada na Tabela 9 a mais recente relação de itens empregados na arquitetura do dispositivo de monitoramento de deslizamentos de terra (sem cobrir taxas ou fretes). Infelizmente, não há fornecedores nacionais para o sensor de umidade do solo Soil MTEC-02A. Por consequência, para obtê-lo, é necessário recorrer a fornecedores estrangeiros ou ao próprio fabricante. Isso tende a elevar o custo, sobretudo na ocorrência de taxas de importação. Porém, a precisão e confiabilidade do sensor justifica o seu uso para o monitoramento de condições ambientais e auxílio na prevenção de desastres.

### 3.3 Processo de instalação

O processo de instalação de nós sensores deve ser realizado próximo a locais de interesse. Esses locais representam porções do município que necessitam de monitoramento de áreas propensas a movimentos de massa. Alguns exemplos desses locais podem ser: setores industriais, residenciais e comerciais, áreas hospitalares, escolas, estações de tratamento de água e esgoto, entre outros (Figura 13).

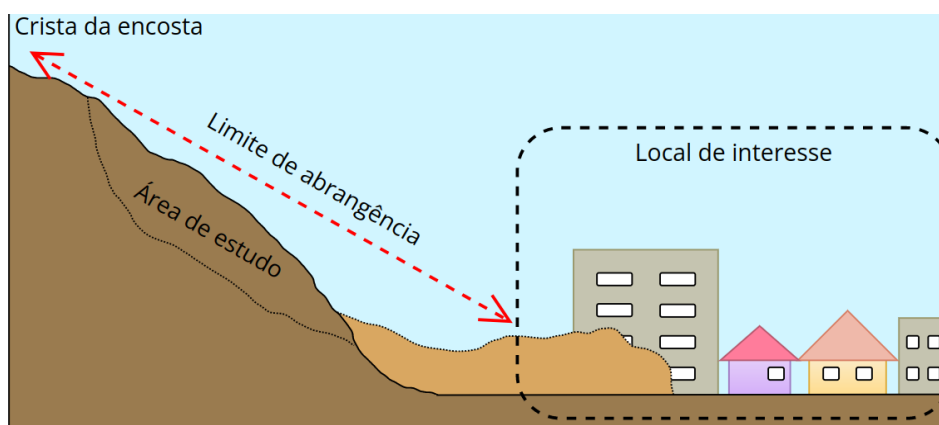
Figura 13: Representação de local de interesse para aplicação de monitoramento.



Fonte: Adaptado de PIMENTEL et al. (2018).

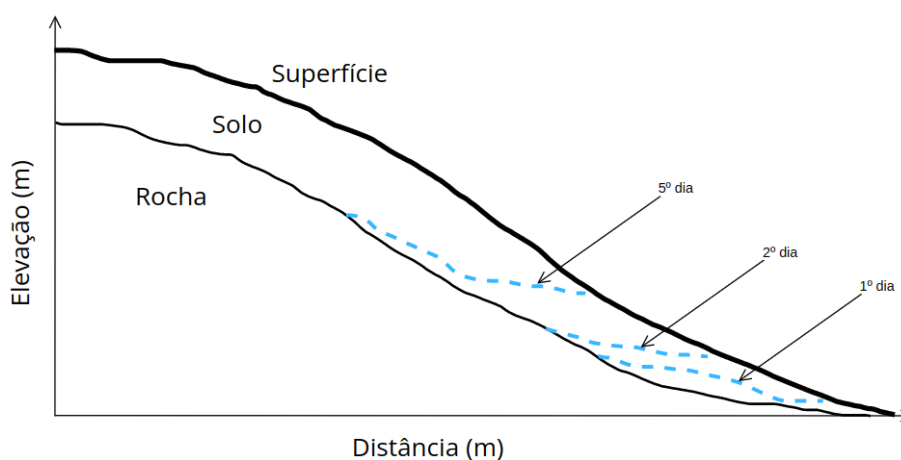
Levando em conta que o impacto ambiental pode se estender além do local de interesse, é necessário que a abrangência para estudos e monitoramento seja considerada de forma ampla. Para isso, deve ser estabelecido um limite de abrangência, o qual se estende desde o local de interesse até a crista das encostas (Figura 14). A distância que separa os locais de interesse da crista das encostas pode variar em uma amplitude de metros a quilômetros, dependendo da região considerada (PIMENTEL et al., 2018). De maneira análoga, a área a ser coberta pelo monitoramento pode variar conforme os processos possíveis no município. Por exemplo, movimentos de massa envolvendo fluxos de detritos podem atingir distâncias quilométricas, enquanto deslizamentos planares podem alcançar dezenas de metros (CARVALHO et al., 2018).

Figura 14: Representação de limite de abrangência de movimentos de massa sobre área de interesse.



Fonte: Adaptado de PIMENTEL et al. (2018).

Figura 15: Representação de um acúmulo de água no solo de um talude no decorrer do tempo.

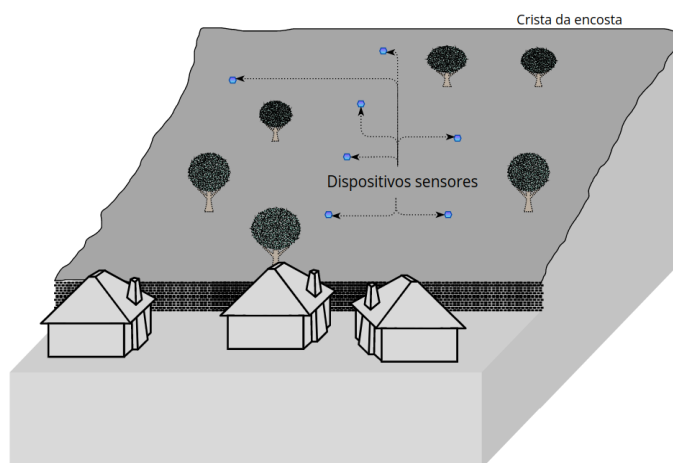


Fonte: Adaptado de GIAN et al. (2017).

Além disso, para uma distribuição adequada dos nós sensores em uma área de estudo, é importante considerar as variações de umidade em diferentes altitudes. Nas áreas mais altas do talude, a umidade tende a ser menor, devido à maior exposição à radiação solar e aos ventos. Por outro lado, nas áreas mais baixas, a umidade tende a ser maior, devido à menor exposição ao sol e maior acumulação de água (Figura 15). Esse é um ponto essencial a ser considerado pois, afinal, chuvas acumuladas durante três ou quatro dias são as mais influentes na preparação do terreno para um processo de deslizamento devido à redução da resistência e o cisalhamento. De maneira idêntica, eventos de precipitação extrema de um ou dois dias também podem disparar o processo, dependendo das condições do solo (BRASIL, 2016).

Outro ponto importante a ser considerado é a influência da vegetação (BAGWARI et al., 2022). A distribuição dos sensores deve levar em conta as áreas de sombra das plantas, que podem encobrir totalmente o painel solar. Além do mais, deve-se considerar a distância em relação às raízes das árvores. Elas podem influenciar tanto a questão de umidade quanto na estabilidade do terreno (Figura 16).

Figura 16: Representação da rede de sensores sem fio instalada em pontos estratégicos nas imediações de uma área de interesse.

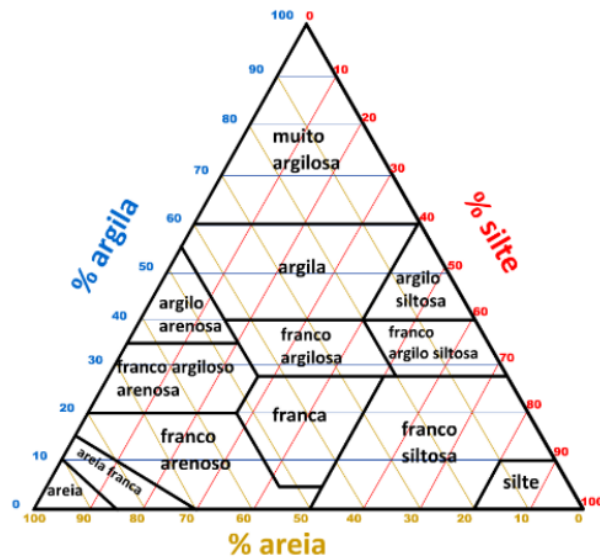


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Conforme destacado anteriormente, cada nó sensor pode ter dois ou mais Soil MTEC-02A conectados à rede RS-485. Isso permite que as medições sejam realizadas em diferentes profundidades do solo. Com a instalação em diferentes níveis de profundidade é possível obter dados mais precisos sobre as condições de umidade no terreno, o que pode ser essencial para efetividade do monitoramento e a segurança das pessoas em áreas de interesse.

A saber, o sensor em questão utiliza a constante dielétrica ou capacitância da matriz do solo (ar, água, solo) para medir a umidade volumétrica (SEEED, 2020). Essas constantes podem variar entre 1 e 80 a 20°C, dependendo da composição da matriz do solo em termos de granulometria e umidade. Em outras palavras, o ar apresenta um valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 11, e a água, que indica o maior valor, é de 80 (HE et al., 2021). Considerando que, por exemplo, os solos mais finos, como argilas, tendem a ter mais poros pequenos e menos poros grandes em comparação com solos mais grossos, como areias, há uma maior capacidade de retenção de água. Ou seja, o teor de umidade do solo está diretamente relacionado a distribuição dos poros e a disponibilidade de água ou, mais precisamente, é a relação entre a massa de água contida nos vazios de um solo e a massa das partículas sólidas (grãos)(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

Figura 17: Classes texturais do solo.



Fonte: QUOOS. Adaptado de LEMOS e SANTOS, 1996.

De forma semelhante às classificações texturais do solo (Figura 17), o Soil MTEC-02A exige em sua configuração a inserção do tipo de solo para que o ele atue adequadamente de acordo com as características do meio (SEEED, 2020). Conforme seguem:

- Solo orgânico: É composto principalmente por material orgânico em decomposição, como folhas, galhos e restos de plantas, e possui alta capacidade de retenção de água.
- Solo mineral: O local da instalação é composto principalmente por minerais de rocha decomposta e possui uma textura variada, que pode ser arenosa, argilosa ou siltosa.

- Solo arenoso: Possui grande proporção de partículas de areia, que são relativamente grandes e espaçadas, o que resulta em uma drenagem rápida e baixa capacidade de retenção de água.
- Solo argiloso: Possui grande proporção de partículas de argila, que são muito finas e compactadas, o que resulta em uma baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água.

Além do tipo de solo, é preciso ser definido um endereço único para cada sensor de umidade existente no nó. Isso permite que o sistema saiba exatamente onde encontrar cada sensor, evitando conflitos ou perdas. Por isso, os parâmetros de configuração, como endereço, taxa de transmissão, paridade, protocolo de comunicação, são armazenados em uma memória não-volátil (SEED, 2020).

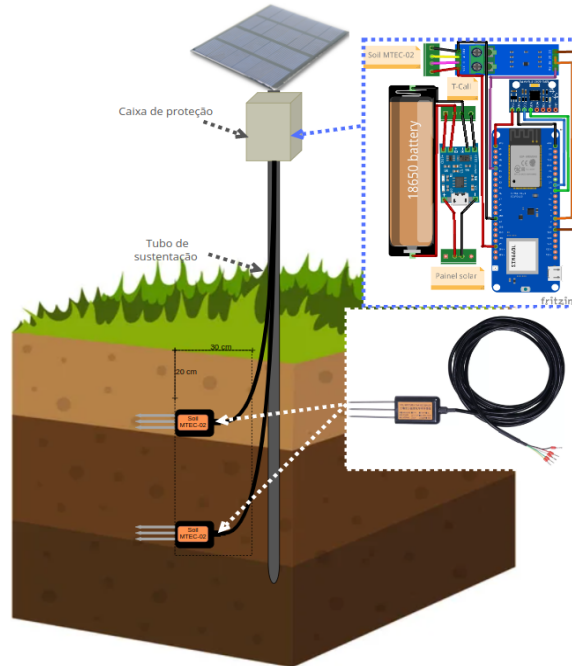
Evidentemente, além da configuração desses parâmetros, é preciso enterrar os sensores para que eles façam as medições subterrâneas. Essa etapa deve ser realizada com bastante cuidado para não comprometer a integridade do sensor. Então, posteriormente à escolha de como distribuir os dispositivos sensores pelo terreno, é preciso cavar um perfil vertical ligeiramente mais fundo que a profundidade de instalação do sensor mais inferior. A fim de inserir o sensor horizontalmente nesse perfil, é preciso que haja, pelo menos, 20 cm de diâmetro. Ainda, recomenda o fabricante, a profundidade mínima para esse método de medição deve ser de 20 cm. Também, se a parede do perfil for muito dura, deve-se primeiro fazer furos com diâmetros inferiores ao das sondas (SEED, 2020). Após a conclusão da instalação é importante que o solo que foi retirado seja recolocado e compactado de volta, seguindo sua ordem original.

Na Figura 18, é mostrado o dispositivo de detecção completo, o nó sensor da rede (RevB), contendo dois sensores de umidade do solo. Nessa imagem, há destaque sobre os dois Soil MTEC-02A, posicionados horizontalmente na parede do perfil do solo (sem escala); sobre o tubo de sustentação, de material rígido e resistente a corrosão; e alguns itens da arquitetura, protegidos do ambiente por uma caixa plástica. Já na Figura 19, esses itens da arquitetura são representados lado a lado com o que foi elaborado para o protótipo, apresentando as dimensões de 12,5 cm x 8,5 cm. É importante ressaltar que o projeto foi desenvolvido levando em consideração a portabilidade do dispositivo, permitindo seu transporte e implantação em diferentes locais de monitoramento. A combinação das dimensões reduzidas com a funcionalidade do dispositivo permite sua utilização em diferentes



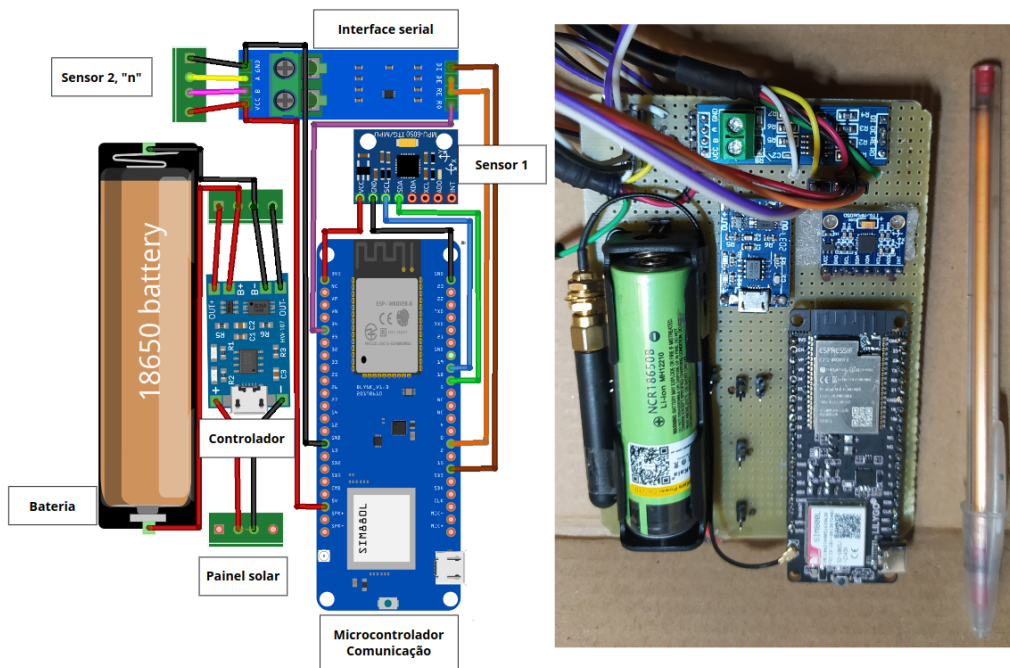
áreas de interesse, proporcionando uma abordagem flexível e adaptável às necessidades específicas de cada contexto.

Figura 18: Representação do dispositivo de detecção (RevB).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 19: Representação parcial dos itens do nó sensor (RevB) e o protótipo equivalente montado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.4 Pré-processamento e comunicação

Tão importante quanto os aspectos de hardware, está o software embarcado no projeto. É fundamental que este comporte um gerenciamento de energia eficiente de modo a prolongar a vida útil de cada elemento da rede. A partir de referências de projetos correlatos com código aberto, foram empregadas iterativamente as seguintes técnicas de redução de energia:

- Estratégia de dormir e despertar;
- Redução da quantidade de dados transmitidos; e
- Gerenciamento de taxa de varredura.

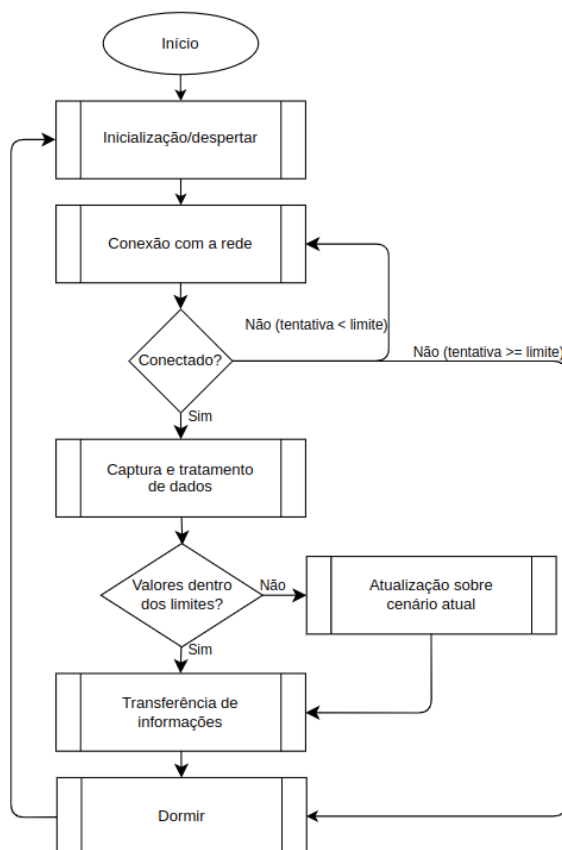
Em seguida, na Figura 20, são mostradas as macro etapas inerentes ao software do RevB que, basicamente, é programado para trabalhar da forma mais precisa possível sobre uma variedade de entradas, transmitindo as informações diretamente pela internet. Nos parágrafos seguintes, serão detalhadas cada uma dessas etapas, juntamente com as técnicas de economia de energia aplicadas à elas. Dessa forma, será possível compreender em profundidade como o software do RevB é projetado para otimizar o consumo de energia e garantir a eficiência do sistema de monitoramento.

Antes de mais nada, o TTGO T-Call precisa inicializar suas entradas e saídas para que ele atue corretamente com o restante da arquitetura. O MPU-60500, por exemplo, utiliza uma interface de comunicação serial I2C de 400 kHz para comunicação (INVENSENSE, 2013). Também há uma interface I2C idêntica dedicada para o chip IP5306, que existente no TTGO T-Call para garantir a segurança da bateria, incluindo recursos de proteção como detecção de sobrecorrente, sobretensão, subtensão, sobretemperatura, etc. (SANTOS, 2019). Além desses, há três pinos de interface para o conversor RS-485 que, por envolver a transmissão de dados em apenas uma direção por vez, usa um pino extra para habilitar e desabilitar a recepção e transmissão (ELETROGATE, 2022).

Assim que configuradas e inicializadas as interfaces, por estar em modo ativo, o software prepara cada um dos recursos para utilização. Começando pelo SIM800L, o mais demorado, estabelece-se uma conexão com a rede GSM/GPRS, pela autenticação e a autorização de acesso. O MPU-6050 vem em seguida, com suas configurações de energia, sensibilidade e filtros. Logo após, o tipo de solo é configurado em cada Soil MTEC-02A para que este mensure o conteúdo volumétrico de água no solo. Por fim, encerrando a etapa de

inicialização/despertar, cria-se um “cliente” com uma plataforma chamada ThingSpeak (MATHWORKS, 2023), que será melhor abordada adiante (3.5 Apresentação de dados).

Figura 20: Princípio de funcionamento do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tendo em vista esses aspectos, convém destacar as bibliotecas utilizadas pelo microprocessador. Elas desempenham um papel muito importante, auxiliando no funcionamento do sistema embarcado e integração com a nuvem. São elas:

- ThingSpeak.h: Biblioteca utilizada para se comunicar com a ThingSpeak. Ela possibilita o envio de dados para a plataforma e também o recebimento de comandos de controle.
- TinyGsmClient.h: Ela implementa o protocolo AT para a comunicação com o SIM800L, permitindo a conexão com a rede.
- StreamDebugger.h (é opcional): Tem como objetivo facilitar a depuração do código. Dentro do contexto em questão, ela torna possível visualizar os dados que estão sendo trocados entre o microcontrolador e o SIM800L em uma segunda interface. Em outros

termos, trata-se de um monitor passivo para um dado canal de comunicação. Isso pode ser muito útil para identificar erros de comunicação.

- Wire.h: Essa biblioteca facilita a utilização do protocolo I2C pelo dispositivo.

Finalizados esses procedimentos de inicialização, a conexão com a rede GSM/GPRS precisa ser verificada. Aqui há estipulado um limite de tentativas para se estabelecer tal conexão dado que, eventualmente, pode ocorrer uma falta de cobertura temporária de rede ou alguma interferência de sinal por exemplo. Dessa forma, o nó não permanecerá indefinidamente tentando se reconectar até que a situação se resolva.

Na existência de uma conexão bem sucedida, é iniciada a captura de dados com um processamento de sinal em nível local. Isso porque, ao serem aplicadas tarefas de tratamento dentro do próprio nó sensor, a quantidade de informação transmitida é condensada, acelerando também sua transmissão (FOSALAU; ZET, 2018).

Tabela 10: Configuração do filtro passa baixa digital para o giroscópio e acelerômetro.

DLPF_CFG	Acelerômetro		Giroscópio	
	Largura de banda (Hz)	Atraso (ms)	Largura de banda (Hz)	Atraso (ms)
0	260	0	256	0.98
1	184	2	188	1.9
2	94	3	98	2.8
3	44	4.9	42	4.8
4	21	8.5	20	8.3
5	10	13.8	10	13.4
6	5	19	5	18.6

Fonte: Adaptado de INVENSENSE (2013).

Assim, é realizada uma série de leituras de parâmetros diretos do solo pelo MPU-6050. Logo que essas amostras são coletadas elas passam por um processo de homogeneização, por meio da aplicação de uma média simples. Esse processo é realizado por consequência do contexto de aplicação, onde níveis mais altos de sensibilidade são necessários para medir diferenças sutis no terreno. Isto é, graças a uma sensibilidade maior consegue-se medir pequenas variações de aceleração ou de rotação. Consequentemente, o sensor torna-se mais sujeito a ruídos e vibrações. Adicionalmente a esse processo, também é

aplicado um filtro passa baixa digital (DLPF) nativo do MPU-6050 sobre cada uma dessas leituras (Tabela 10). Ele pode ser configurado em diferentes níveis de sensibilidade, variando de 0 a 6, onde 0 indica o menor nível de filtragem e 6 indica o maior nível de filtragem (INVENSENSE, 2013).

Acerca dos parâmetros indiretos, a comunicação entre o TTGO T-Call e os sensores é feita via rede RS-485 utilizando o protocolo Modbus RTU. Em termos simples, esse método transmite pacotes de dados do dispositivo solicitante, o microcontrolador, para os sensores, que fornecem as informações (SIMPLY MODBUS, 2020). Rigorosamente falando, o processo de captura é iniciado pelo TTGO T-Call, que envia uma solicitação a cada Soil MTEC-02A para ler determinados dados. Cada solicitação contém o endereço que identifica o sensor, um código de função que especifica, nesse caso, a operação leitura, o endereço do registrador desejado, e o número total de registradores solicitados.

Por exemplo, para ler o conteúdo do registrador de temperatura do Soil MTEC-02A que esteja no endereço “1”, deve-se enviar o endereço desse sensor (0x01), uma requisição de leitura (código de função 0x03), o endereço do registrador (endereço 0x0000), e o número de registradores a serem lidos (no caso, apenas 1). Em resposta, o sensor deve retornar o próprio endereço, o mesmo código da função, o número de bytes de dados (1 registro x 2 bytes = 2 bytes), e os respectivos dados. Ao contrário, um código “6” realiza uma ação de escrita para um registrador específico, por exemplo o de tipo de solo. Nesse caso, em retorno após a gravação do conteúdo, há a repetição dos pacotes da solicitação a partir do sensor. Uma breve relação de registradores e funções permitidas pelo Soil MTEC-02A são mostradas na Tabela 11, incluindo:

- Temperatura: A temperatura do solo pode afetar suas propriedades físicas, como a plasticidade e a coesão, que desempenham um papel importante na estabilidade do solo e na suscetibilidade a deslizamentos.
- Conteúdo volumétrico de água (VWC): O VWC representa a quantidade de água presente no solo em relação ao volume total. É um indicador crucial para avaliar a umidade do solo, pois o excesso de água pode diminuir a resistência do solo, aumentando o risco de deslizamentos. Altos valores de VWC podem indicar condições favoráveis para a ocorrência desses eventos.

- Condutividade elétrica (EC): A EC é uma medida da capacidade do solo de conduzir corrente elétrica e geralmente está relacionada à quantidade de sais dissolvidos no solo.
- Salinidade: A salinidade do solo está relacionada à quantidade de sais presentes, como cloretos e sulfatos. Solos com altos níveis de salinidade podem apresentar menor coesão e resistência, tornando-se mais suscetíveis a deslizamentos.
- Sólidos totais dissolvidos (TDS): O TDS é uma medida da concentração total de substâncias dissolvidas na água do solo. Valores elevados de TDS podem indicar uma alta concentração de sais, afetando as propriedades físicas do solo e aumentando a probabilidade de deslizamentos.
- Constante dielétrica (EPSILON): A constante dielétrica do solo é uma medida da capacidade do solo de armazenar energia eletromagnética. Variações na constante dielétrica podem ser utilizadas para inferir informações sobre a umidade do solo, que desempenha um papel importante na estabilidade do solo e na ocorrência de deslizamentos.
- Tipo de solo: O tipo de solo, como argiloso, arenoso ou siltoso, possui características geotécnicas distintas que influenciam sua estabilidade.

É muito importante que seja mantido atualizado o conhecimento sobre o cenário atual do terreno e, para isso, o sistema pode se adaptar conforme os padrões observados no ambiente. Numa condição de estabilidade, em períodos sem chuva por exemplo, não é necessário que sejam realizadas frequentes coletas e análises, o que contribui para um melhor desempenho energético do sistema. No entanto, assim que sejam detectadas variações nas condições do solo, é fundamental que os ciclos de atividade ocorram mais regularmente. Em outros termos, pela definição e uso de limiares é possível estabelecer uma programação para o sistema de monitoramento e coleta de dados do solo, de forma a agir de forma mais eficiente em situações de mudança. Dessa forma, com base em limiares pré-definidos e do comparativo com leituras anteriores, a taxa de varredura é ajustada pelo sistema por meio do gerenciamento de períodos de dormência. Se os valores de leitura dos sensores estiverem historicamente dentro desses limites, o sistema pode dormir um período mais longo para economizar energia. Caso contrário, tal período é reduzido, permitindo que as informações sejam monitoradas com mais frequência.

Finalmente, os dados capturados, pré-processados e já convertidos são transferidos para a nuvem. Isso permite o armazenamento e acesso das informações de forma centralizada, proporcionando maior flexibilidade e escalabilidade. Além disso, em virtude deste processamento de sinal de baixo nível, que condensa os dados mais relevantes, o uso de recursos de comunicação é otimizado. Como resultado de uma transferência mais eficiente, há economia de banda e energia, além de facilitar o processamento posterior dos dados na nuvem.

Tabela 11: Principais registros utilizados do Soil MTEC-02A.

Nome	Endereço (HEX /DEC)	Tipo	Acesso	Função Modbus	Intervalo e descrição do parâmetro
Temperatura	0x0000 /0	INT16	Leitura	3 /4	-4000-8000 corresponde a -40,00 ~80,00°C
Conteúdo volumétrico de água (VWC)	0x0001 /1	UINT16	Leitura	3 /4	0-10000 corresponde a 0-100%
Condutividade elétrica (EC)	0x0002 /2	UINT16	Leitura	3 /4	0-20000 corresponde a 0-20000us/cm
Salinidade	0x0003 /3	UINT16	Leitura	3 /4	0-20000 corresponde a 0-20000mg/L
Sólidos totais dissolvidos (TDS)	0x0004 /4	UINT16	Leitura	3 /4	0-20000 corresponde a 0-20000mg/L
Constante dielétrica (EPSILON)	0x0005 /5	UINT16	Leitura	3 /4	0-8200 corresponde a 0,00~82,00
Tipo de solo	0x0020 /32	UINT16	Leitura /Escrita	3 /6 /16	0: solo mineral 1: solo arenoso 2: argila 3: solo orgânico

Fonte: Adaptado de SEED (2020).

Após a transmissão de dados e conforme o cenário atual, o sistema embarcado entra em um modo de dormência, com o objetivo de economizar energia e prolongar a vida útil do dispositivo. Nessa etapa, o sistema coloca algumas das interfaces de comunicação em um modo de espera, deixando o consumo de energia mínimo até que ocorra a próxima inicialização/despertar. Conforme dito anteriormente, os tempos de dormência variam de acordo com as leituras e limites estabelecidos. Cabe ressaltar que os valores estabelecidos

para os quatro diferentes períodos, os quais serão apresentados a seguir, são apenas sugestões e podem ser ajustados de acordo com a conveniência e características do local de instalação.

- Limite moderado: Em momentos onde não há precipitação, sem mudanças nas leituras, o dispositivo sensor dormirá por 30 minutos.
- Limite alto: Ao serem detectadas variações (+10%), o sistema passará a analisar duas vezes mais rápido. A saber, passará a dormir por períodos de 15 minutos.
- Limite muito alto: Quando alguma elevada variação é detectada (+30%), o sistema fará varreduras três vezes mais frequentemente pois passará a dormir períodos de 10 minutos.
- Limite crítico: Se os valores das leituras subirem mais consideravelmente (+50%), pode se tratar de uma situação insegura para o local. Assim, o dispositivo transmitirá dados mais assiduamente, em intervalos de 3 minutos, apenas.

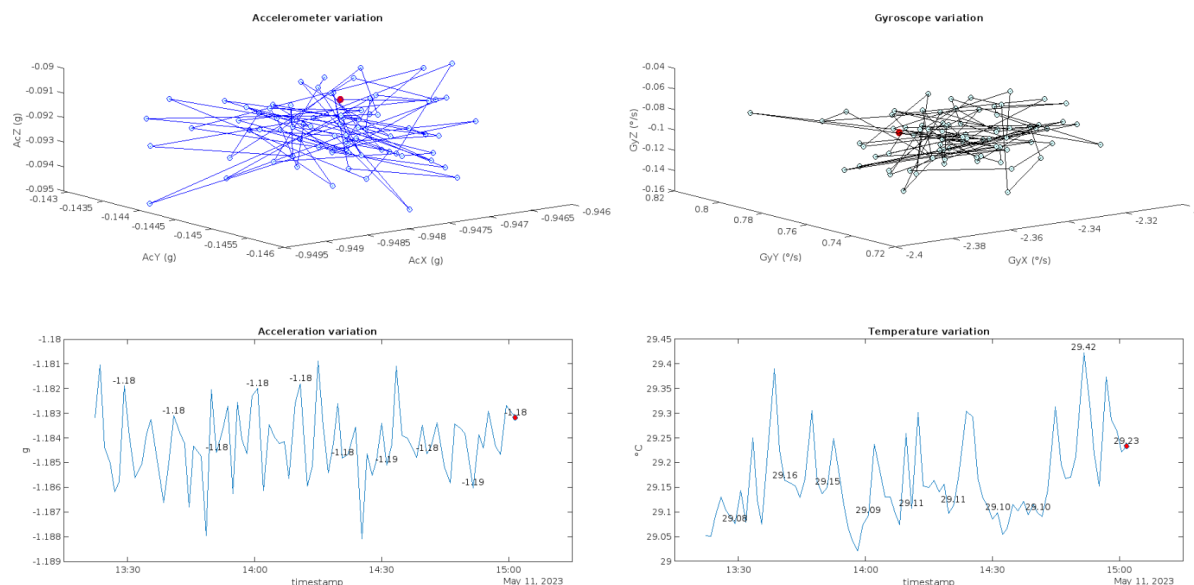
### 3.5 Apresentação de dados

A fim de proporcionar uma visualização clara e acessível das informações coletadas pelo sistema de monitoramento para aqueles que tenham interesse, é utilizada a plataforma de análise ThingSpeak (MATHWORKS, 2023). Dentre as funcionalidades disponíveis nesta plataforma está a possibilidade de criação de painéis privados e painéis públicos. Graças a essa flexibilidade é possível que as informações sejam compartilhadas de acordo com as necessidades e políticas de cada contexto. Por exemplo, gestores e especialistas podem ter acesso a painéis privados para análises mais detalhadas, enquanto a população pode visualizar painéis públicos que fornecem uma visão geral do cenário mais atual. Uma vez que tanto as instituições administrativas responsáveis pela emissão de alertas quanto a população em geral possam acessar esses dados, há mais chances de reduzir o nível de risco e minimizar as consequências desastrosas de deslizamentos de terra.

Outro aspecto importante é que os dados podem ser facilmente baixados e organizados em bancos de dados. Isso permite um maior controle e flexibilidade no gerenciamento das informações, facilitando análises mais aprofundadas e a aplicação de modelos. Além disso, o ThingSpeak executa a versão mais recente do MATLAB, sendo possível a criação de gráficos diversos e personalizados (MATHWORKS, 2023).



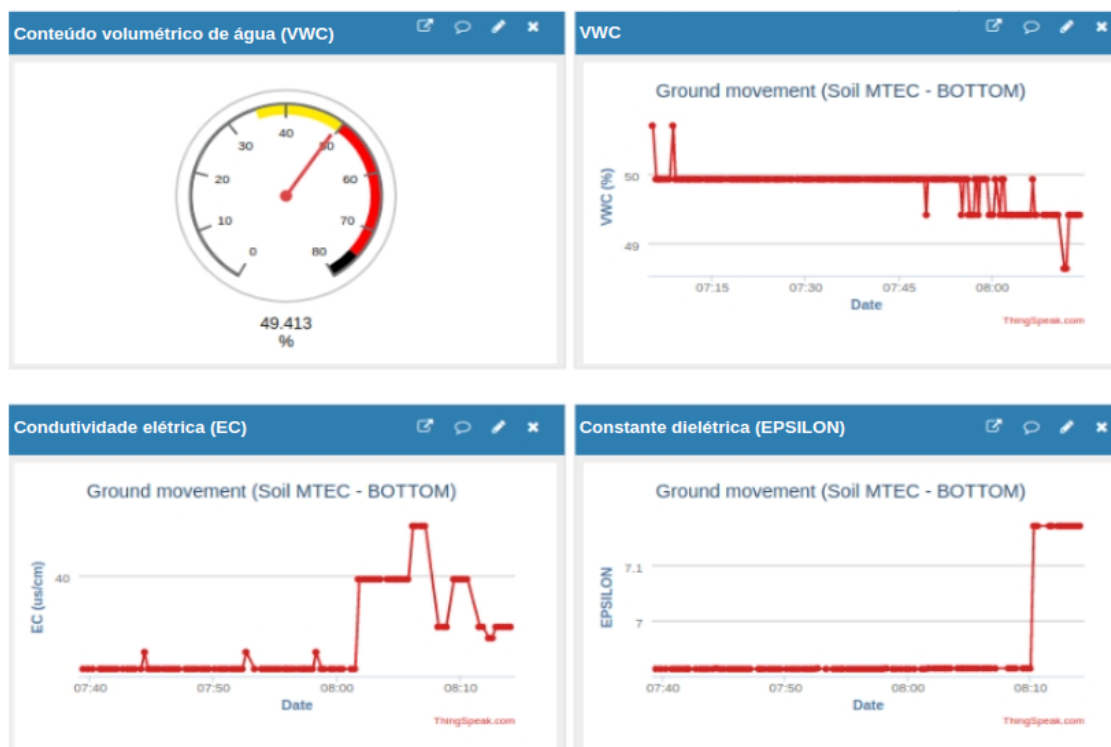
Figura 21: Exemplos de visualizações de dados criada para o MPU-6050 na plataforma ThingSpeak.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Na Figura 21 são mostrados quatro gráficos relativos aos dados providos pelo MPU-6050. No primeiro gráfico, no topo à esquerda, são apresentados dados de aceleração em um espaço tridimensional, onde os eixos x, y e z representam as diferentes direções da aceleração medida. A variação das medidas ao longo do tempo é representada por uma linha contínua que conecta os pontos de dados. No exemplo em questão essa variação envolve no máximo 0.005 g de aceleração, portanto, o nó sensor encontra-se inerte no local de estudo. Também no topo, mas à direita, a taxa de rotação é apresentada em um espaço tridimensional, com os eixos x, y e z representando as diferentes direções de rotação. Semelhante ao gráfico de aceleração, as medidas ao longo do tempo são conectadas por uma linha contínua, fornecendo uma representação visual da variação da taxa de rotação que, nesse exemplo, não envolve movimentação significativa. Já os outros dois gráficos, na parte inferior, são mais simples, bidimensionais. No terceiro, à esquerda, é mostrado o somatório das acelerações em função do tempo. Isto é, representa a soma total das acelerações nas diferentes direções ao longo do tempo, fornecendo uma visão geral da variação do movimento. No último gráfico, à direita, é apresentada a temperatura registrada pelo sensor ao longo do tempo. Ou seja, aponta como a temperatura se comporta ao longo da coleta de dados e pode fornecer informações importantes sobre as condições ambientais durante as medições.

Figura 22: Parte de painel privado criado para o Soil MTEC-02A na plataforma ThingSpeak.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De maneira semelhante, na Figura 22, são fornecidas informações sobre alguns registradores do Soil MTEC-02A. Trata-se de um exemplo de painel criado dentro da plataforma, na nuvem. Pode ser observado nessa figura dados referentes ao conteúdo volumétrico de água, condutividade elétrica e constante dielétrica, ou mais simplesmente, parâmetros indiretos do solo ao longo do tempo. Na parte superior direita, há um medidor apontando o conteúdo volumétrico de água. Os valores indicados neste medidor vão de 0 a 80 e sinalizam o último valor de volume de água registrado. Essa representação visual permite uma rápida visualização do valor atual da umidade do solo. À esquerda do medidor, encontra-se um gráfico que acompanha a variação do conteúdo volumétrico de água ao longo do tempo. Esse gráfico mostra como o teor de água no solo tem evoluído, permitindo identificar padrões, tendências ou variações significativas na umidade do solo. Na parte inferior esquerda, há um gráfico que mostra a variação da condutividade elétrica do solo no decorrer do tempo. As variações presentes nesse indicador conotam mudanças nas propriedades do solo, um fator relevante para análise. Também na parte inferior, à direita,

encontra-se o gráfico da constante dielétrica. A análise desse parâmetro auxilia na compreensão de como a umidade do solo tem sido retida ou liberada com o passar do tempo.

Em síntese, a representação visual dessas e outras medidas favorece a análise e compreensão das informações do ambiente. Vale destacar que, dentro do escopo deste trabalho, a nuvem tem a função de armazenamento e apresentação. Não há ações complementares de processamento, como mineração de dados ou uso de redes neurais.

## 4 TESTES DE LABORATÓRIO E DE CAMPO

Esta seção descreve os procedimentos realizados para verificar o desempenho do sistema proposto (RevB), que foi desenvolvido sob requisitos de consumo eficiente de energia, tamanho reduzido e custo acessível aos municípios brasileiros. Os testes foram conduzidos para avaliar a capacidade do nó sensor de mensurar os parâmetros do solo em ambiente controlado, analisar a suscetibilidade das medidas inerciais à ruídos inerentes ao ambiente real, detectar movimentos, e estipular o desempenho energético em campo. Os resultados desses experimentos são apresentados e discutidos amplamente na seção seguinte (5 RESULTADOS E DISCUSSÕES).

Inicialmente foram realizados quatro pequenos ensaios laboratoriais (A, B, C e D) em amostras de solo com quantidades distintas de água, com o objetivo de analisar o comportamento do sistema nessas diferentes condições. Essas amostras foram preparadas da seguinte forma:

- Quatro porções de terra vegetal contendo 450 gramas cada (Figura 23) foram levadas ao forno, numa temperatura de 200 °C, durante 60 minutos.
- Foram aguardadas algumas horas, até que amostras retornassem à temperatura ambiente de forma natural.
- Então, cada amostra passou por uma nova medição de peso para determinar a massa da porção sólida ( $M_s$ ). Diferentes quantidades de água ( $M_a$ ) foram então adicionadas a essas amostras. Calculando-se a proporção entre a massa de água e a massa sólida, obtém-se a umidade gravimétrica ( $\omega$ ).
  - Sobre a amostra A, agora com 390 gramas, não houve adição de água.
    - $\omega (\%) = 0 \text{ g} / 390 \text{ g} * 100 = 0 \%$ .
  - Na amostra B, com 391 gramas, foram adicionadas 39 gramas de água (Figura 24).
    - $\omega (\%) = 39 \text{ g} / 391 \text{ g} * 100 \approx 9.97\%$ .
  - Na amostra C, com 389,5 gramas, foram adicionadas 116 gramas de água.
    - $\omega (\%) = 116 \text{ g} / 389,5 \text{ g} * 100 \approx 29.79\%$ .
  - Na amostra D, com 390 gramas, foram adicionadas 200 gramas de água.
    - $\omega (\%) = 200 \text{ g} / 390 \text{ g} * 100 \approx 51.28\%$ .

- O Soil MTEC-02A, na verdade, calcula o conteúdo volumétrico de água (VWC). Portanto, considerando-se a densidade da água de aproximadamente  $1 \text{ g/cm}^3$  e o volume total do solo de cada amostra de  $480 \text{ cm}^3$  obtém-se o seguinte:
  - $\text{VWC}_A (\%) = 0 \text{ cm}^3 / 480 \text{ cm}^3 * 100 = 0\%$ .
  - $\text{VWC}_B (\%) = 39 \text{ cm}^3 / 480 \text{ cm}^3 * 100 \approx 8.12\%$ .
  - $\text{VWC}_C (\%) = 116 \text{ cm}^3 / 480 \text{ cm}^3 * 100 \approx 24.16\%$ .
  - $\text{VWC}_D (\%) = 200 \text{ cm}^3 / 480 \text{ cm}^3 * 100 \approx 41.66\%$ .

Assim que cumpridos esses procedimentos de preparação, as amostras foram cobertas com papel alumínio (Figura 25), inclusive ao longo da execução dos testes (Figura 26). Essa medida foi adotada com o objetivo de manter as condições iniciais do experimento, preservando a umidade e minimizando as alterações nas quantidades de água ao longo do tempo.

Adicionalmente, utilizando um recipiente significativamente maior, um teste foi realizado para avaliar a resposta do sistema em relação à penetração de água. O objetivo principal é criar uma situação mais próxima à realidade, na qual a água pode ser distribuída em uma maior área. Além da umidade, deseja-se observar os demais parâmetros disponíveis relacionados ao solo. Esses parâmetros incluem: condutividade elétrica, salinidade, sólidos totais dissolvidos, e constante dielétrica.

Figura 23: Amostras de terra utilizadas nos ensaios.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 24: Amostra B (+10% de água).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 25: Amostras prontas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 26: Execução do teste sobre a amostra B.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Logo, em um recipiente contendo 30 Kg de terra vegetal, sem aquecimento prévio, dois sensores Soil MTEC-02A foram enterrados. O primeiro, que está mais próximo da superfície, encontra-se a 13 cm de profundidade. Já o que está posicionado mais ao fundo está 15 cm após o sensor anterior, ou seja, a 28 cm de profundidade (Figuras 27 e 28).

Figura 27: Sensor posicionado ao fundo (MTEC Bottom).      Figura 28: Sensor posicionado ao topo (MTEC Up).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



Figura 29: Área de testes para avaliação de respostas sobre a infiltração de água no solo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após construído este teste adicional, o sistema e o cenário como um todo foram mantidos isolados em um ambiente interno. Essa medida visou garantir uma estabilidade das leituras durante o monitoramento, evitando eventuais interferências e mantendo um ambiente controlado. Esse período teve duração de cerca de 7 horas, a partir da finalização da instalação dos sensores no interior do recipiente. Passado esse tempo, houve a necessidade de realocação, do ambiente interno para um ambiente externo, para a aplicação do teste que envolve volumes de água (Figura 29). Com isso, mais um período de cerca de 40 minutos foi aguardado para que as variações geradas no sinal fossem dissipadas. Em seguida, duas simulações de chuva leve foram realizadas. Envolvendo um intervalo de uma hora entre elas, e durações de 10 minutos cada.

A fim de avaliar o desempenho do sistema em condições reais, um morrote alto localizado na avenida Eliseu de Almeida, no bairro do Butantã, em São Paulo, foi escolhido para aplicação de testes (Figura 30). Nesse local é possível a identificação do potencial de deslizamento planar, levando em consideração a inclinação e a altura do terreno. Tal potencial envolve parâmetros estabelecidos com base em dados de estudos japoneses e experimentos realizados em municípios brasileiros. Esses estudos indicam que as partes da encosta que apresentam inclinação igual ou superior a  $25^\circ$  e altura igual ou superior a 5 metros entre os limites da condição topográfica são propensas a esse tipo de deslizamento (PIMENTEL et al., 2018).

Apesar disso, a área em si não apresenta alta suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa (IPT, 2015). No entanto, a ocorrência passada de deslizamento nas proximidades (Figura 31) sugere que a execução de estudos nesse local pode ser relevante, proporcionando informações valiosas sobre as características do comportamento do solo e ajudando a prevenir problemas futuros.

Outra consideração importante sobre a escolha desse local é a proximidade em relação a uma avenida de intenso movimento de veículos, a cerca de 35 metros de distância. Ao levar-se em conta que tal proximidade pode gerar ruídos, interferências nas leituras dos sensores, avaliar se há impacto significativo sobre os resultados obtidos pelo sistema é algo fundamental.

Figura 30: Morrote alto em local de baixa suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa.



Fonte: IPT (2015) e Google Maps (2023).

Além da verificação de parâmetros do solo e da análise de ruídos relacionados a movimentos, outro aspecto essencial dos testes em campo envolve a avaliação do consumo energético do dispositivo. Trata-se de um requisito o sistema ser capaz de operar de maneira eficiente e econômica em condições reais de uso.

Infelizmente, durante as etapas de instalação do protótipo, uma obra foi iniciada exatamente no local escolhido. Essa situação inviabilizou a análise de parâmetros indiretos do solo, visto o início da execução de terraplanagem no local e a não ocorrência de precipitações no período. Ainda assim, testes em campo puderam prosseguir com foco na avaliação de ruídos e consumo energético, resultando em informações valiosas para o aprimoramento do sistema.



Figura 31: Ocorrência de evento anterior no talude escolhido para estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Portanto, nos testes realizados em campo, foi utilizado um tubo de ferro com cerca de 1,5 cm de diâmetro e, aproximadamente, um metro de comprimento, como sustentação do nó sensor. A profundidade desse tubo no solo foi de 52 cm e o dispositivo, devidamente protegido contra a ação das chuvas, ficou posicionado a 45,5 cm em relação ao chão.

Considerando o intuito de avaliar o desempenho energético do sistema, não foi habilitado o uso do SEH pelo nó. Isso significa que, a energia gasta durante a operação não será restabelecida ou reabastecida, sendo possível a obtenção de valores corretos de consumo energético do dispositivo após o teste.

Ainda, no que tange os períodos de dormência, ou taxa de varredura do sistema, para o teste em questão foi estipulado um valor ainda inferior ao limite crítico definido. O sistema dormirá por aproximadamente 25 segundos, entrará em modo ativo, voltando a trabalhar novamente e, em seguida, voltará a dormir. Essa configuração visa estressar o nó sensor com uma grande assiduidade de atividades, simulando um cenário de alto uso e demanda energética para verificar a eficiência e resistência do dispositivo em condições adversas.

Por fim, utilizando-se de um local e configurações semelhantes, foi também realizado um experimento em campo envolvendo fluxos de detritos. Em um talude de corte com aproximadamente cinco metros de altura e solo predominantemente argiloso, o nó sensor (RevB) foi posicionado a cerca de três metros a partir da base (Figura 32). O objetivo do experimento em questão é observar e capturar movimentos ao longo do declive. Para tanto, ao topo do talude, foi reservada uma porção de 1300 cm<sup>3</sup> de solo argiloso para ser despejada no declive de modo a fazer com que o movimento de detritos atinja e seja captada pelo RevB. Os

resultados desse experimento, assim como os anteriores citados, estão descritos na próxima seção.

Figura 32: Talude de corte utilizado para simulação de fluxos de detritos.



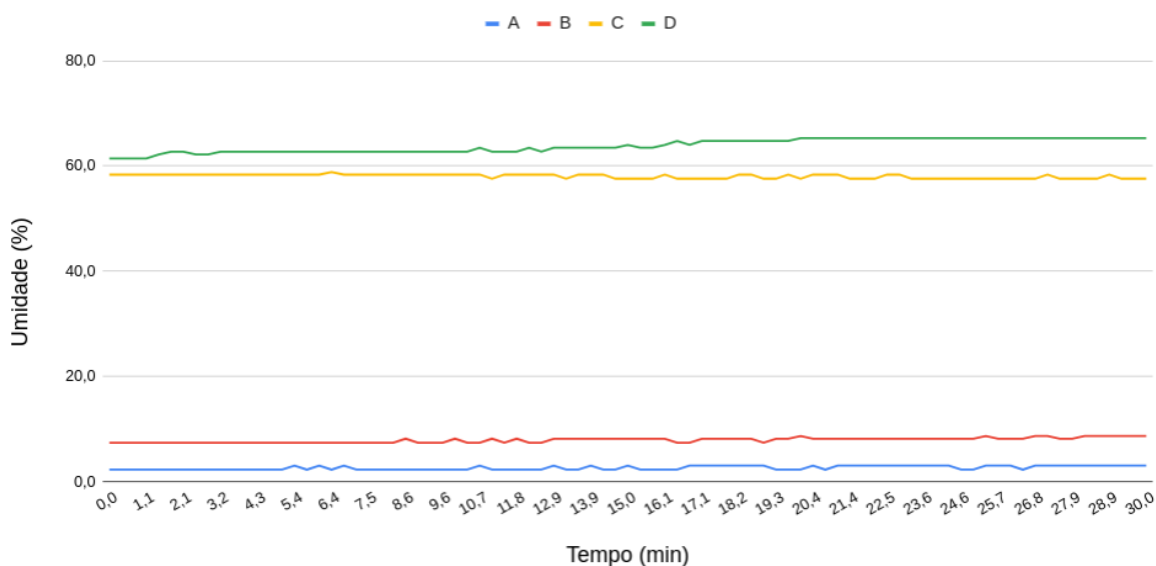
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir dos procedimentos realizados para verificação do dispositivo sensor da RSSF (RevB). Eles são um ponto de partida para uma compreensão mais aprofundada de diferentes cenários e condições de uso, contribuindo assim para a identificação de possíveis melhorias e ajustes necessários no sistema.

Começando com os resultados da mensuração dos parâmetros do solo em ambiente controlado (Figura 33). A partir das quatro amostras de solo, cada uma com uma quantidade distinta de água, foram realizadas consecutivas sequências de leitura sobre o conteúdo volumétrico de água retornado pelo Soil MTEC-02A. O critério adotado para finalização de cada ensaio foi um histórico de 100 leituras estáveis durante 30 minutos. Isso é, leituras cuja variação não ultrapassam valores de 2,5%, para mais ou para menos, dentro desse período de tempo.

Figura 33: Resultados do teor volumétrico de água medidos nos ensaios A, B, C e D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Considerando o conteúdo da amostra A, com 390 gramas de solo seco e com 0 gramas de água, espera-se um conteúdo volumétrico de água próximo de 0% ( $0 \text{ cm}^3 / 480 \text{ cm}^3 * 100 = 0\%$ ). De acordo com os dados observados até o critério de parada, o Soil MTEC-02A apontou um conteúdo volumétrico médio de água de 2,65%.

Em relação a amostra B, com 391 gramas de solo seco e com 39 gramas de água, calcula-se um percentual próximo de 10% de volume de água ( $39 \text{ cm}^3 / 480 \text{ cm}^3 * 100 \approx 8.12\%$ ). Com resultado, o sensor mensurou um valor médio de 7,97% de umidade, neste ensaio.

Seguindo para a amostra C, contendo 389.5 gramas de solo seco e 116 gramas de água, espera-se um percentual de umidade próximo de 24% ( $116 \text{ cm}^3 / 480 \text{ cm}^3 * 100 \approx 24.16\%$ ). Aqui os dados do Soil MTEC-02A ficam mais distantes do ideal. Ele apontou um valor médio de 58,05% sobre o conteúdo volumétrico de água na amostra. Isso significa aproximadamente 34 pontos percentuais de diferença em relação ao que foi calculado como valor esperado. É importante destacar que o tempo necessário até que o critério de parada fosse atingido, foi de aproximadamente 75 minutos (1h15min).

Por fim, sobre a amostra D, com 390 gramas de solo seco e com 200 gramas de água, almeja-se atingir valores de umidade próximos a 41% ( $200 \text{ cm}^3 / 480 \text{ cm}^3 * 100 \approx 41.66\%$ ). Com efeito, o sensor apontou um conteúdo volumétrico médio de água de 63,90%. Esse resultado, tal como o observado no ensaio C, mostra-se divergente do ideal. São aproximadamente 22 pontos percentuais de diferença.

Supõe-se que, para as amostras C e D, não houve tempo suficiente para a estabilização de dados do sensor, considerando o critério de finalização de cada ensaio. Isso é, uma vez instalado, os dados calculados internamente pelo sensor para o conteúdo volumétrico de água (VWC) não refletem imediatamente o cenário real. De acordo com as especificações do fabricante, a resolução do sensor para valores na faixa de 0~50% é de 0,03%. Para uma faixa de valores mais alta, de 50~100%, a resolução especificada é de 1%. São também descritas algumas informações relevantes envolvendo os métodos de medição, que são intimamente ligados à forma de instalação. Há dois deles, o método rápido e o método de medição subterrânea. No primeiro caso a medição envolve um “pequeno intervalo de teste” e deve-se “calcular repetidamente a média”. Sem mais detalhes acerca de um intervalo ideal. No caso do método de medição subterrânea, é levantado que a estabilidade pode requerer um período de tempo, que pode durar dias, meses ou até mais para medir e registrar o cenário real (SEEED, 2020).

Tendo isso em mente, na realização do teste adicional para verificar a penetração de água no solo dentro de um recipiente de maior tamanho, o sistema permaneceu isolado por cerca de 7 horas. No decorrer de tal período quase todos os parâmetros observados

mostraram-se com valores constantes. A exceção foi a medida de umidade calculada pelo sensor da parte superior do experimento, o qual apresentou uma leve tendência de queda no período. Essa inclinação pode ser observada na Figura 34, na série em vermelho (conteúdo volumétrico de água), entre 06:30 e 06:58 horas de experimento.

De acordo com o que foi mencionado anteriormente, passado esse período de isolamento de sistema e cenário, houve a necessidade de realizar-se uma movimentação envolvendo os mesmos. O impacto observado pode ser verificado em T1, tanto na Figura 34 quanto na Figura 35. Nota-se que as medidas de condutividade elétrica sofreram uma ampla variação. As demais prosseguiram quase sem impacto, com exceção do conteúdo volumétrico de água em ambos os sensores. O sensor na parte superior teve sua tendência de queda cessada, passando a apresentar valores constantes. Em contraste, o sensor da parte inferior que apresentava valores constantes iniciou uma tendência de queda em seus valores.

Após 40 minutos dessa breve movimentação, a primeira simulação de chuva leve foi iniciada (T2). Quase que imediatamente, a condutividade elétrica apontada pelos sensores sofreu mudanças. Passados os 10 minutos estipulados, essa simulação de chuva foi encerrada. Alguns instantes depois o sensor da parte superior começa a mostrar variações em diversos parâmetros, como constante dielétrica, sólidos totais dissolvidos e salinidade (T3). Quanto ao sensor localizado na parte inferior, a uma profundidade de 28 cm, levou aproximadamente 13 minutos após a simulação de chuva para registrar os primeiros indícios de variação nesse nível.

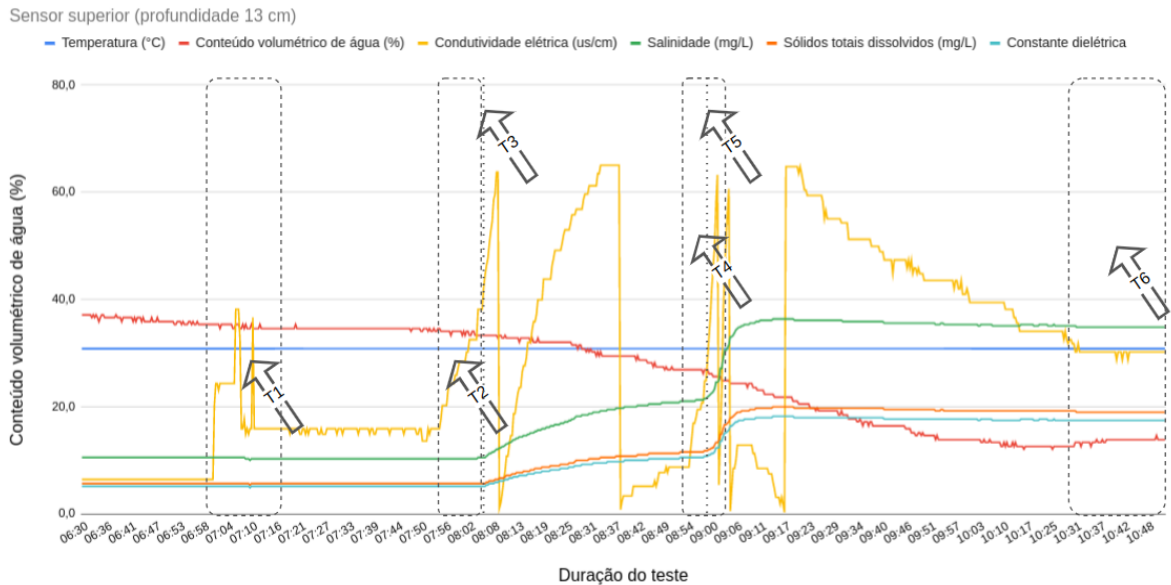
Apesar de diversos parâmetros sinalizarem a penetração de água em diferentes níveis no solo, os valores que são calculados internamente no sensor sobre o conteúdo volumétrico de água ainda não condizem com a realidade presente no experimento. Vale ressaltar que nesses experimentos envolvendo parâmetros indiretos do solo foram realizadas com consecutivas sequências de leitura pelo nó sensor. Ainda, considerando que as amostras são compostas de terra vegetal, a configuração de solo usada nos sensores Soil MTEC-02A refere-se a “solo mineral”, o que remete a um solo predominante em minerais de rocha decomposta e com uma textura variada.

Passada uma hora desde o início da primeira simulação de chuva, uma segunda foi executada (T4). Levando em conta que a amostra de solo já estava úmida, prontamente ambos os sensores registraram mudanças nos parâmetros medidos. Em aproximadamente 7 minutos



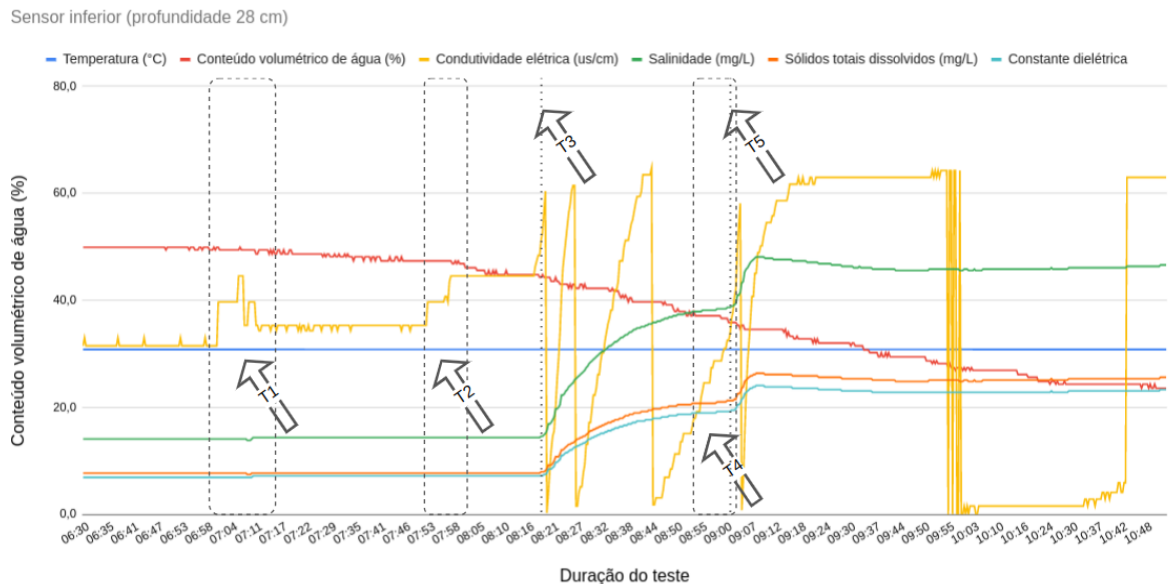
de simulação, foram observadas alterações significativas nos dados obtidos pelos sensores (T5).

Figura 34: Resposta à penetração de água no solo: parte superior/topo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 35: Resposta à penetração de água no solo: parte inferior/fundo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em detalhe, somente após 1,5 horas das simulações de chuva, o sensor posicionado ao topo iniciou uma leve inclinação positiva para a umidade do solo (Figura 34-T6, também em Figura 36-T7). Comportamento este que não foi encontrado sobre o sensor inferior.

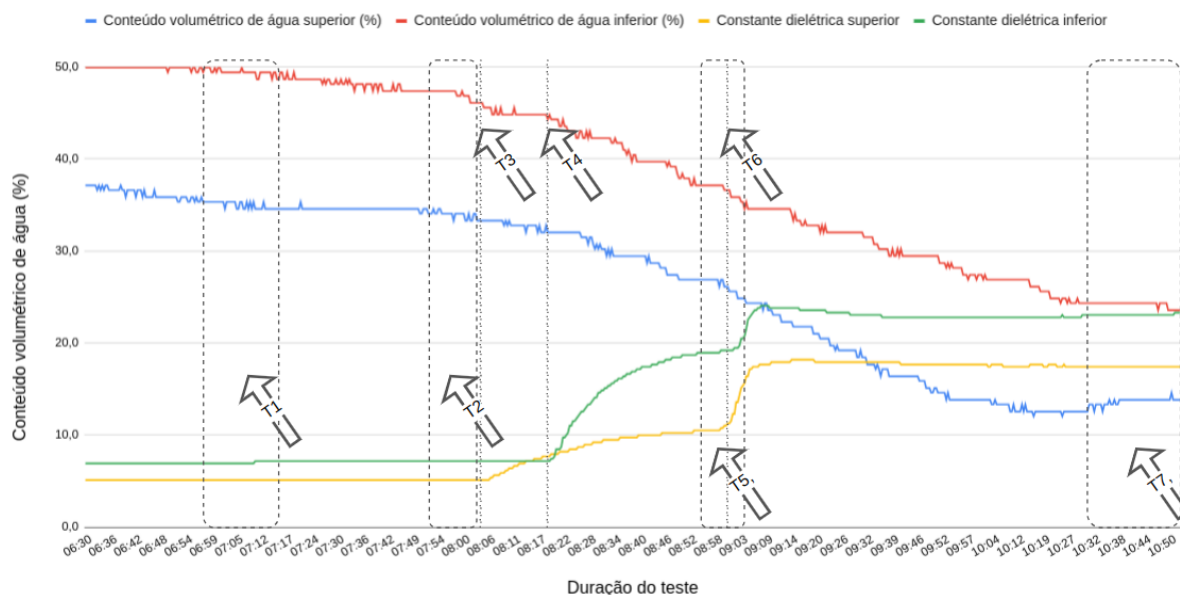
Eventualmente, ao aguardar um período ainda maior, esses valores iriam ao encontro do cenário gerado no experimento. Contudo, o mesmo foi encerrado, atingidas 11 horas de teste.

Em síntese, os valores de umidade e as constantes dielétricas medidas durante o experimento são destacados na Figura 36. Sob esse ponto de vista, é mais simples observar os padrões medidos por cada sensor. As linhas azul e amarela referem-se a parâmetros obtidos pelo sensor superior, enquanto as linhas vermelha e verde ao sensor inferior. Nota-se, mais à esquerda, a troca de comportamento das medidas de umidade a partir da movimentação (T1), envolvendo constância e declínio para o sensor inferior (vermelho), e declínio e constância para o sensor superior (azul). A área de atuação de cada sensor fica visível após o período de simulação inicial de chuva (T2). Quando a água penetra no solo, é primeiro detectada pelo sensor superior, influenciando nos valores dielétricos medidos (T3). Posteriormente, 13 minutos depois, o segundo sensor é alcançado pela água, também sendo influenciado pela mesma (T4). Na ocasião da segunda chuva (T5) o contexto já não é equivalente ao princípio. A umidade acumulada no ambiente faz com que os sensores apontem variações de forma mais antecipada, ainda durante a simulação, e praticamente ao mesmo tempo um em relação ao outro (T6). Diferentemente dos valores das constantes dielétricas nesse intervalo de tempo, os valores de umidade não correspondem à realidade esperada. Esperava-se que os valores de umidade apresentassem uma tendência de aumento. No entanto, essa tendência foi observada de forma discreta apenas no sensor superior, aproximadamente 1,5 horas após a segunda chuva (T7).

Sem dúvida, embora o Soil MTEC-02A seja um sensor mais caro, com um custo mais de três vezes superior ao dos demais componentes da arquitetura combinados (considerando a cotação média do dólar em abril de 2023), é necessário destacar um aspecto importante. Há demora na atualização do percentual volumétrico de água no solo por parte deste sensor. Como hipótese essa situação está relacionada apenas ao processo de instalação, e supõe-se que as leituras fiquem coesas após o período exigido para estabilidade. Porém, com base nos resultados observados nos testes, essa latência em apresentar os valores reais pode representar um obstáculo significativo para as análises. Isso porque, seja em chuvas acumuladas durante três dias ou mais, seja em eventos extremos de precipitação de um ou dois dias, há influência significativa da umidade presente no solo, no desencadeamento de processos de escorregamento (BRASIL, 2016). Portanto, na existência de latência para compreensão das

condições ambientais, o tempo disponível para a tomada de decisão passa a ser muito comprometido.

Figura 36: Conteúdo volumétrico de água e constante dielétrica de ambas as partes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em seguida, foi direcionada atenção para a análise da suscetibilidade das medidas inerciais do sistema aos ruídos presentes no ambiente real. Testes em campo foram realizados, nos quais o sistema foi exposto a diferentes fontes de ruído, como a movimentação de tráfego pesado nas proximidades.

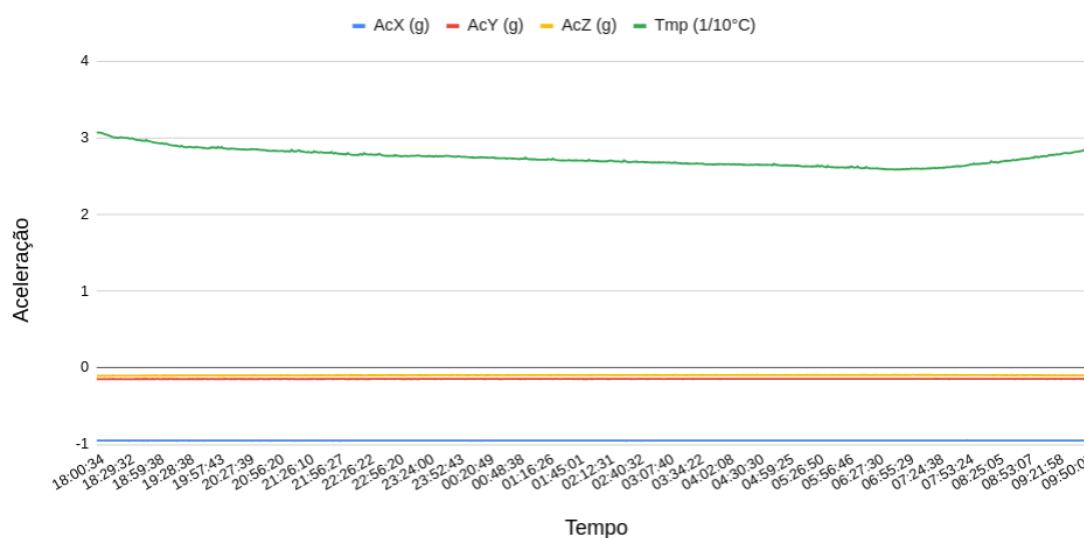
Seguindo as características do contexto de aplicação e as configurações disponíveis no MPU-6050, foi aplicado um filtro passa baixa digital sobre cada uma das leituras do sensor. A configuração escolhida envolve o segundo menor nível de filtragem possível ( $DLPF\_CFG = 1$ ), ou seja, uma opção de frequência de corte alta. Isso faz com que o filtro permita a passagem de uma faixa maior de frequências e, também, apresente taxas de amostragem mais altas. Rigorosamente falando, o acelerômetro contará com uma largura de banda de 184 Hz e apresentará um atraso de 2 ms. Sobre o comportamento imposto ao giroscópio, haverá uma largura de banda de 188 Hz e atraso de 1.9 ms.

Cabe destacar que o período noturno foi considerado como o mais adequado para a realização da análise, uma vez que é nesse momento que observa-se o maior fluxo de veículos pesados na região. Um outro aspecto relevante está relacionado à situação presente no contexto. Considerando a ausência de precipitação ou quaisquer outros indicadores que possam causar movimentações no solo, é correto afirmar que não se espera a detecção de



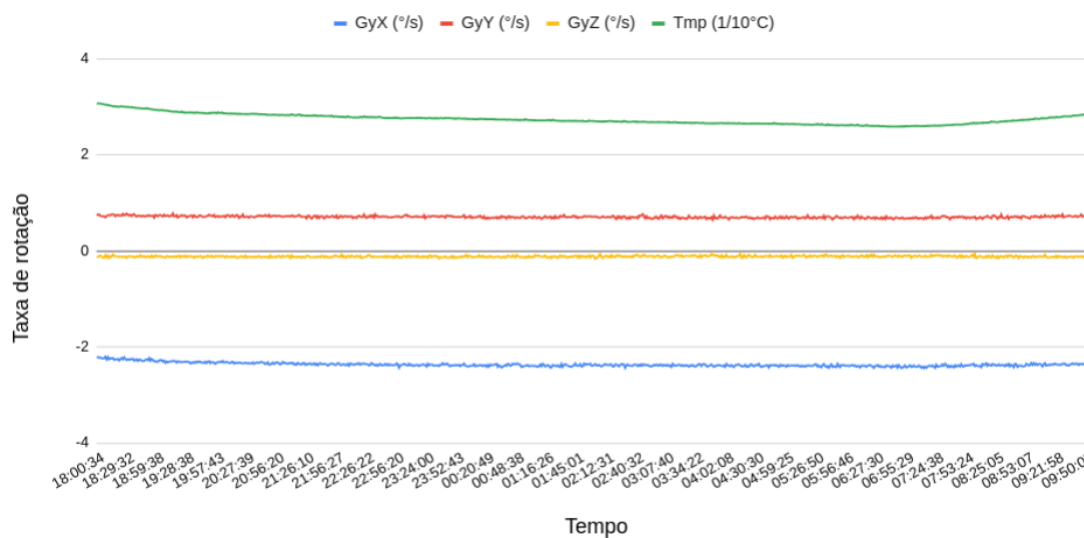
movimentos inerciais pelo nó sensor. Por exemplo, um valor representativo, que apontaria um notável movimento do solo, envolve uma aceleração em uma posição dos eixos X, Y ou Z acima de 0,5 g (GIAN et al., 2017).

Figura 37: Medidas inerciais (em campo): aceleração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 38: Medidas inerciais (em campo): taxa de rotação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Assim, os resultados compreendendo um intervalo de 16 horas de teste são apresentados nas Figuras 37 e 38. Acerca das medidas envolvendo aceleração, não foram detectados movimentos significativos durante todo o experimento. Entre todos os três eixos não houve uma amplitude de movimento superior a 0,018 g. Nos resultados do giroscópio,

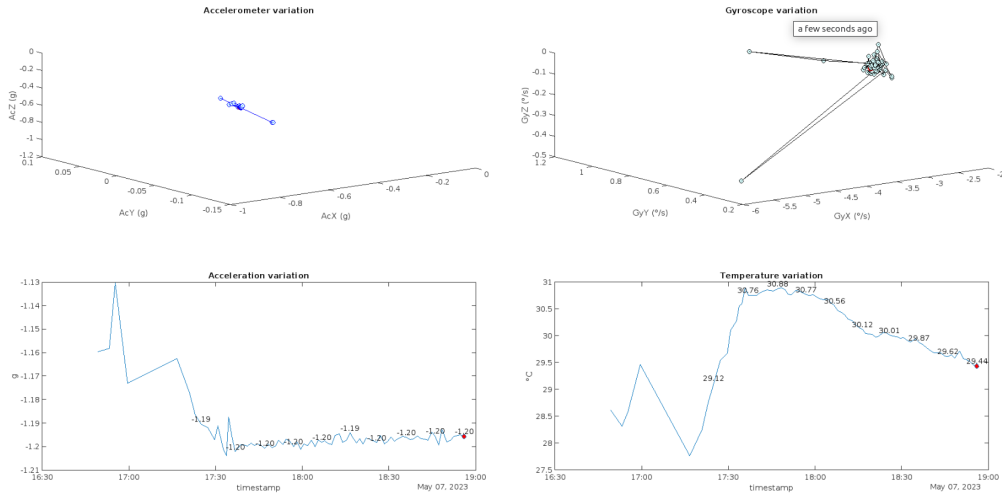
pode-se verificar pequenas e numerosas perturbações nas medidas geradas. Possivelmente as flutuações mais significativas sejam, de fato, influenciadas externamente pelo tráfego. Ou mais simplesmente, sejam resultados de ruídos causados por interferências eletromagnéticas, variações na temperatura, entre outros fatores.

Com relação a isso, sabe-se que a temperatura exerce uma influência significativa no desempenho dos sensores. A sua variação pode influenciar nas propriedades físicas dos materiais utilizados, resultando em mudanças nas características de sensibilidade e calibração dos dispositivos. Essas variações podem levar a erros nas medições e afetar a estabilidade dos sensores (NAZDROWICZ et al., 2022). Além de um controle de temperatura aplicado aos sensores inerciais, e da utilização de filtros em nível de hardware (como o DLPF), também é possível empregar filtros de software mais adequados para reduzir o ruído indesejado e ajudar a melhorar a estabilidade do giro. Embora o presente trabalho não contemple mais formas de tratamento contra ruídos, em vias gerais, o teste realizado evidenciou que o nó sensor possui sensibilidade suficiente para o contexto de aplicação. Adicionalmente, apresenta alguma robustez frente a certos fatores externos, como as vibrações decorrentes da passagem de tráfego pesado.

Além disso, é relevante destacar um aspecto presente na Figura 39. Nela estão expostos quatro dos gráficos utilizados para visualização de dados do MPU-6050, dentro da plataforma ThingSpeak. O período de tempo representado nos gráficos abrange momentos imediatamente anteriores ao início do experimento. É possível notar que certos pontos de dados distanciam-se dos demais, gerando longas linhas contínuas. Isso ocorreu em virtude de ajustes manuais realizados no dispositivo sensor, no local de instalação. Em suma, logo no início de uma situação de perigo, quando muito lentamente ocorrer a ativação de um deslizamento, será esse tipo de visualização gráfica que ocorrerá. E, se movimentos forem detectados desde a sua origem, a probabilidade de reduzir as consequências do desastre aumenta significativamente (FOSALAU; ZET, 2018).

Dessa forma, conforme mencionado anteriormente, foi realizado um experimento em campo envolvendo fluxos de detritos. Com o objetivo de observar e registrar movimentos, o nó sensor (RevB) foi estrategicamente posicionado próximo ao meio do talude. No local, ao topo, foi despejada uma porção de solo que, visto a inclinação do declive, alcançou e atingiu o dispositivo (Figura 40). Apesar de não ser um volume de terra significante, muito aquém das dimensões de um fluxo real, foram identificados momentos críticos a partir desses detritos.

Figura 39: Gráficos do painel MPU-6050: início do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 40: Experimento em campo envolvendo fluxos de detritos (antes e depois do movimento).

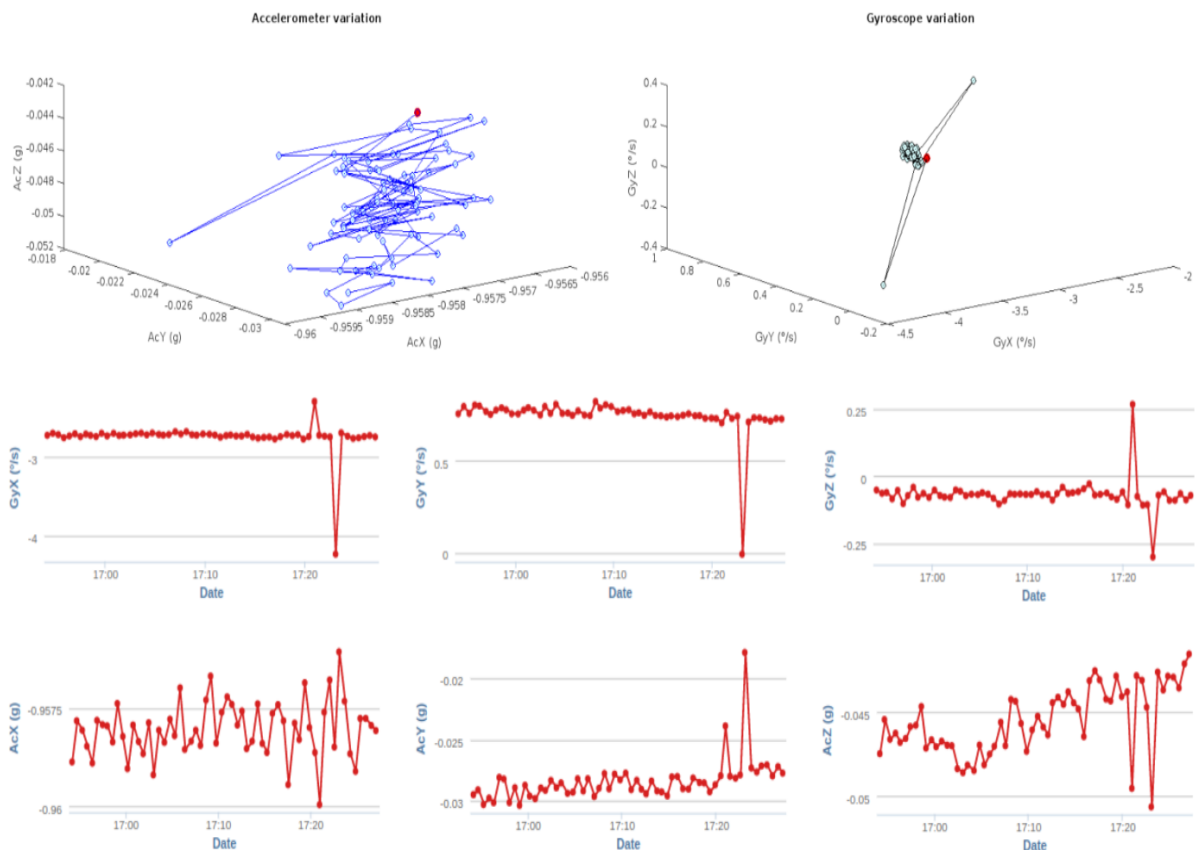


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados observados são expostos na Figura 41. Os gráficos da parte superior sintetizam valores lidos em três dimensões, nos eixos x, y e z. Tanto o gráfico de aceleração, à esquerda, quanto o gráfico de taxa de rotação, à direita, apresentam grande variabilidade de

dados em decorrência do evento. Em outros termos, antes do evento ocorrer, todos os valores mensurados são traçados próximos uns aos outros no gráfico pois, afinal, o nó sensor encontra-se inerte no talude. Imediatamente após a detecção de movimento, o gráfico muda sua escala, apresentando valores muito diferentes dos habituais, o que indica a ocorrência de algum evento anormal no local de estudo. Os gráficos posicionados na parte central e inferior da figura segmentam individualmente cada um dos eixos de movimento, permitindo uma análise detalhada do comportamento de cada um deles. Rigorosamente falando, podem ser identificados desvios na taxa de rotação em todos os eixos, envolvendo até um grau por segundo. Em relação a aceleração, não é observada mudança além de 0,003 g no eixo x, possivelmente devido à sua posição perpendicular ao talude. Já nos eixos y e z têm-se valores mais significativos que alteram a escala gráfica, envolvendo 0,01 g.

Figura 41: Experimento em campo envolvendo fluxos de detritos (antes e depois do movimento).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Esses resultados, embora se tratando de um movimento de massa fictício em escala, evidenciam a importância do monitoramento desses eventos e a relevância do uso de nós sensores como o RevB para obter informações locais em tempo real. Afinal, essas

informações auxiliam na identificação de desvios, na tomada de decisões e na implementação de medidas preventivas.

Assim, foram concentrados esforços na avaliação do desempenho energético do sistema em campo. Naturalmente, de forma antecipada, foram levantadas as especificações de consumo energético dos componentes do nó sensor, de acordo com cada modelo e informações dos fabricantes. Os dados desses componentes estão expostos na tabela a seguir:

Tabela 12: Especificações de consumo energético dos componentes do nó sensor.

Componente	Descrição/Modelo	Un.	Corrente	Subtotal	Total**
			Modo ativo (e dormindo)		
Controlador/gere nciamento de bateria	TP4054*	1	150 uA (55 uA)	150 uA (55 uA)	
Microcontrolador /Comunicação	TTGO T-Call	1	70 mA (300 uA)	70 mA (300 uA)	
	Conversor RS-485	1	300 µA	300 µA	
Sensor 1	MPU-6050	1	3,8 mA	3,8 mA	
Sensor “n”	Soil MTEC-02A	2	6 mA	12 mA	

~86,1 mA (300 uA)

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O TTGO T-Call, principal componente do nó sensor, possui um consumo energético médio de 70 mA durante o seu funcionamento normal (modo ativo) e 300uA quando dormindo. O conversor, responsável pela comunicação serial pela rede RS-485, consome em média 300 µA de energia durante a transmissão e recepção de dados. Já o sensor inercial utilizado no sistema, o MPU-6050, apresenta um consumo médio de 3,8 mA durante a aquisição de dados de giroscópio e acelerômetro. Quanto aos sensores de umidade do solo, dois Soil MTEC-02A nesse caso, possuem cada um o consumo energético médio de 6 mA durante a sua operação. Em relação ao TP4054, por fazer parte do SEH e ser nutrido energeticamente pelo painel solar, ele é um componente isolado (Tabela 12-\*), e não é inserido no total (Tabela 12-\*\*\*) que considera a bateria como fonte de energia. Além do mais, caso a corrente de entrada do TP4054 não seja suficiente para o carregamento da bateria, o mesmo entra automaticamente em modo de suspensão de baixo consumo de energia

(NANJING, 2017). Logo, como sua corrente de entrada irá variar dependendo das condições de iluminação solar sobre o painel, ele ajustará seu consumo energético de acordo, priorizando a eficiência energética e maximizando a utilização da energia disponível. Em suma, considerando essas informações, calcula-se que o nó sensor consumirá aproximadamente 86,1 mA estando em modo ativo.

Convém lembrar que o SEH é composto pelo TP4054, uma bateria de lítio de 3,7 V e 2.200 mAh, e um painel solar de 5V e 230 mA (1.15 W). Ao serem considerados o consumo médio calculado para o dispositivo e a capacidade total da bateria, pode-se estimar uma autonomia para o sistema de aproximadas 25,5 horas de operação contínua ( $2.200 \text{ mAh} / 86,1 \text{ mA} \approx 25,55 \text{ h}$ ).

Também é importante refletir acerca do tempo requerido para um ciclo de carga completo da bateria. De acordo com as especificações do TP4054, a corrente máxima de carga é de 1A (NANJING, 2017). No entanto, deve-se levar em consideração a corrente fornecida pelo painel solar (230mA) como limitante para o carregamento. Em conjunção com isso, é prudente levar em conta a eficiência do painel solar. Supondo que o painel converta efetivamente 80% da energia solar recebida em energia elétrica utilizável, estima-se que um ciclo de carga completo levaria aproximadamente 12 horas para ser concluído ( $2.200 \text{ mAh} / (230 \text{ mA} * 80\%) \approx 11,95 \text{ h}$ ).

Em um primeiro momento, no local de testes, foi verificado o tempo requerido pelo nó para completar um único ciclo ativo de operação. A seguir estão os resultados obtidos:

- 0 s: O dispositivo desperta.
- 12 s: Término das inicializações, iniciando conexão.
- 22 s: Conectado.
- 45 s: Dados capturados, pré processados e transmitidos.
- 50 s: Dispositivo pronto para dormir, início do período de dormência.

Dentre os valores estabelecidos para os quatro diferentes períodos de dormência do sistema, o mais curto é o limite crítico, o qual possui intervalos de 3 minutos, apenas. É preciso então recalcular o consumo do sistema por hora, levando-se em consideração o ciclo ativo de operação e o tempo em modo de economia de energia. Os 86,1 mA que seriam consumidos no decorrer de uma hora, convergem para 1,2 mA exigidos em cada ciclo ativo de 50 segundos. Durante o estado de dormência, que envolve 300 uA, seriam requeridos da bateria apenas 83 nA nos 180 segundos envolvidos. Assim, tem-se aproximados 1,21 mA em

230 segundos, em apenas um ciclo de atividade mais período de dormência. Portanto, considerando a estratégia de dormir e despertar com um ciclo de operação de 50 segundos, onde o sistema fica em modo de economia de energia durante 3 minutos completos, o consumo total do sistema por hora será de aproximadamente 18,95 mA, e resultará em uma autonomia aproximada de 116 horas, ou 4,8 dias.

Para o teste realizado em campo, o intuito foi avaliar o desempenho energético do sistema no contexto de aplicação, sem o apoio do SEH. Nele, os períodos de dormência estipulados foram inferiores ao limite crítico definido. São 25 segundos com baixo consumo, voltando a trabalhar ativamente em seguida. Dentro desse tipo de configuração, há a estimativa de consumo de 57,5 mA/h. Ademais, sabendo-se a duração de 16 horas do teste e o tempo de atividade mais economia ( $50\text{ s} + 25\text{ s} = 75\text{ s}$ ), são aguardados 768 ciclos completos e 920 mA de variação de carga da bateria.

Através dos resultados do experimento, verificou-se que o nó sensor foi capaz de executar um total de 801 ciclos completos. Isso significa que o sistema concluiu suas tarefas num tempo médio inferior a 50 s, ou seja, em aproximadamente 46,91 s.

Com base nessa quantidade significativa de ciclos e períodos de dormência, constatou-se que a eficiência energética do sistema superou as expectativas. Ao avaliar a carga da bateria antes e depois do período de teste, verificou-se uma variação de aproximadamente 600 mA na carga. Em outras palavras, o dispositivo alocado em campo consumiu 37,5 mA/h. Essas medições correspondem a aproximadamente 65% dos resultados de referência calculados anteriormente, os quais eram considerados como valores esperados.

Considerando os resultados obtidos nesses testes de desempenho, é possível afirmar que o experimento realizado demonstrou que o nó sensor é capaz de executar ciclos completos em condições reais de uso. Eles ainda revelaram um desempenho energético satisfatório, superando as expectativas estabelecidas.

Por fim, é essencial discutir algumas das limitações observadas nas etapas de demonstração e avaliação do protótipo. Assim como o Soil MTEC-02A e sua latência sobre os valores reais de umidade do solo, o MPU-6050 também apresentou uma fraqueza. Segundo o que é exposto pelo fabricante do componente, o sensor possui um DMP integrado, que processa algoritmos complexos permitindo reunir um conjunto completo de dados do sensor sem intervenção do processador do sistema (INVENSENSE, 2013). Todavia, durante as iterações de desenvolvimento de software do protótipo, e inclusive observado em documentos

disponibilizados pelo mesmo fabricante, foi constatado que tal recurso do MPU-6050 encontra-se indisponível, desabilitado ou inoperante. Apesar dessa limitação, os testes em campo não foram impactados negativamente. No entanto, é indiscutível que esse recurso é de grande interesse e é um dos motivos pelos quais o presente sensor foi escolhido. Pela utilização dessa funcionalidade haveriam diversos benefícios, sobretudo envolvendo a eficiência energética do nó sensor.

Outro ponto é que a pesquisa não abrange medidas de proteção para os instrumentos instalados. Isso significa que não são consideradas possíveis interferências acidentais, causadas por animais ou seres humanos, que poderiam resultar em alterações abruptas nos dados registrados (BAGWARI et al., 2022). Tampouco são contempladas interferências intencionais, como atos de vandalismo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), que possivelmente tirariam o dispositivo de seu adequado funcionamento.

Definitivamente, todos os testes apresentados forneceram informações valiosas para aperfeiçoar o sistema, tanto em termos de sua capacidade de medir os parâmetros do solo quanto em relação ao seu desempenho energético. A partir deles será possível direcionar futuras ações e aprimoramentos, superando limitações, contribuindo para a criação de um dispositivo mais robusto e confiável para o monitoramento e análise de movimentos de massa.



## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a concepção e desenvolvimento de um nó sensor para uma rede de sensores sem fio voltada a supervisão de deslizamentos. O nó sensor foi projetado para monitorar diversos parâmetros e avaliar os possíveis riscos, visando fornecer informações úteis para um sistema de alerta precoce. A jornada completa desta pesquisa proporcionou um entendimento mais aprofundado sobre o problema dos movimentos de massa e ressaltou a necessidade de desenvolver um sistema de monitoramento que contribua para ações de mitigação e resposta antecipadas e eficazes.

Inicialmente, foi identificada a importância de prover dados para análise dos condicionantes desses movimentos, de modo a proporcionar uma melhor compreensão da dinâmica dos processos físicos envolvidos. Além disso, é reconhecida a necessidade de fornecer informações sobre as condições do terreno.

Com base na motivação identificada, estabeleceu-se os objetivos para a solução, que consistiu no desenvolvimento de um protótipo para monitoramento, baseado em hardware e software, que apresentasse custos financeiros acessíveis aos municípios brasileiros, escala reduzida e eficiência energética. Não somente, como objetivos específicos, foram adotadas medidas para prover dados para análise dos condicionantes dos deslizamentos, fornecer diferentes mensagens sobre as condições do terreno e para manter o sistema disponível pelo maior tempo possível, mesmo em condições adversas.

Ao longo do processo, foram realizados experimentos em laboratório e testes em ambiente real, em campo. Neles foram abrangidos todos os sensores e funcionalidades essenciais do dispositivo de monitoramento. Puderam ser contemplados diversos aspectos diferentes dentro do objetivo geral, como usabilidade, geração de dados, comunicação e consumo de energia.

Durante a avaliação dos resultados, constatou-se que o nó sensor foi capaz de executar ciclos completos de operação em condições reais de uso, provendo mensagens e superando as expectativas de desempenho energético. Os dados coletados forneceram informações valiosas para aprimoramentos futuros, tanto em termos de medição dos parâmetros do solo quanto em relação à eficiência energética. Dessa forma, pode-se afirmar que os objetivos específicos propostos também puderam ser alcançados.

É importante mencionar que a disseminação do conhecimento produzido também foi contemplada na pesquisa. Buscou-se compartilhar os avanços obtidos por meio de publicações científicas ou outros meios. Por exemplo, houve a disponibilização de um Plano de Gestão de Dados, o que garante à comunidade de pesquisa acesso às informações e permite a utilização dos dados coletados.

O artefato resultante desta pesquisa envolve um protótipo de nó sensor de fácil instalação, com um desempenho energético eficiente, escala reduzida, e custo unitário inferior a mil reais. Por atuar individualmente ele pode ser distribuído em pontos estratégicos, dentro ou próximos a uma área de interesse, envolvendo uma ou mais encostas. O dispositivo pode tanto ser combinado a sistemas tradicionais de monitoramento, quanto atuar como ferramenta única, sobretudo em áreas caracterizadas pela indisponibilidade de recursos. Sua aplicação tem, portanto, o potencial de beneficiar a população civil, fornecendo informações essenciais para a análise dos condicionantes de movimentos de massa e possibilitando ações preventivas e de resposta mais ágeis por parte dos tomadores de decisão e das comunidades em risco.

Ademais, a partir das pesquisas e desenvolvimentos realizados neste trabalho, é possível identificar algumas recomendações para trabalhos futuros. Cita-se a inserção de funcionalidades complementares, como mecanismos de atualização remota de software, ou outras medidas de segurança para evitar que o sistema fique bloqueado em alguma operação (temporizadores); criação de uma RevC mais dedicada, em uma placa de circuito impresso ou desenvolvida em silício, proporcionando um barateamento de custo ainda maior por escala; a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina e análise de dados para enriquecer a capacidade de interpretação e previsão dos resultados obtidos; a integração do sistema de monitoramento com sistemas de alerta e tomada de decisão visando potencializar sua utilidade prática; realizar análises de impacto social avaliando os efeitos do sistema de monitoramento na qualidade de vida das comunidades em áreas de interesse. Essas recomendações visam a continuidade do desenvolvimento e aprimoramento do sistema de monitoramento de deslizamentos, contribuindo para a prevenção e redução dos impactos causados por esses eventos naturais.

## REFERÊNCIAS

ANALOG DEVICES. ADXL335: Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 3$  g Accelerometer Data Sheet (Rev. B). 2010. Disponível em: <https://www.analog.com/en/products/adxl335.html#product-reference>. Acesso em: 15 abr. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009. 33 p.

ARAÚJO, A. de S. et al. **Manual Técnico Para Redução De Riscos De Desastres Aplicado Ao Planejamento Urbano – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Desenvolvimento Urbano, 2018. 187 p.

BAGWARI, S. et al. Low-Cost Sensor Based and LoRaWAN Opportunities For Landslide Monitoring Systems on IoT Platform: A Review. **IEEE Access**, v. 10, p. 7107-7127, 2022.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Assembleia Nacional Constituinte, 1988. Disponível em: <http://goo.gl/hW7IVR>.

BRASIL. Lei no 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1o de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, DF: Congresso Nacional, 2012. Disponível em: <http://goo.gl/xm4Z0z>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil**. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. 590 p. ISBN 978-85-88063-30-3.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Departamento de Prevenção e Preparação. **Noções Básicas em Proteção e Defesa Civil e em Gestão de Riscos**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional, 2017. 98 p. ISBN 978-85-68813-08-9.

BRASIL. Ministério das Comunicações. Agência Nacional de Telecomunicações. Mapa da telefonia móvel no país por tecnologia (2G, 3G e 4G). Gov.br: Universalização e Ampliação, 2020. Disponível em:

<https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/universalizacao/mapa-da-telefonia-movel-no-pais-por-tecnologia-2g-3g-e-4g>. Acesso em: 19 abr. 2023.

CARVALHO, A. R. et al. **Manual Técnico Para Elaboração, Transmissão e Uso De Alertas De Risco de Movimentos de Massa – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES**. São José dos Campos, SP: CEMADEN, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, 2018. 162 p.

CASTRO, A. D. J. et al. **Manual Técnico para Planos de Contingência para Desastres de Movimento de Massa – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES**. Brasília, DF: MIN, Ministério da Integração Nacional, 2018. 74 p.

CIRINO, M. Boletim: Catástrofe em São Sebastião contabiliza morte de 23 crianças e 41 adultos; maior parte foi na Barra do Sahy (3/3/2023 – 15h50). São Sebastião, SP: Prefeitura de São Sebastião, 2023. Disponível em: <https://www.saosebastiao.sp.gov.br/noticia.asp?id=N33202316629>. Acesso em: 03 jul. 2023.

CNM. **Danos e prejuízos causados por desastres no Brasil entre 2013 a 2022**. Brasília, DF: CNM, Confederação Nacional de Municípios, 2022. 18 p.

CNM. CNM lamenta destruição e mortes no litoral norte de São Paulo. Brasília, DF: CNM, Confederação Nacional de Municípios, 2023. Disponível em: <https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/cnm-lamenta-destruicao-e-mortes-no-litoral-norte-de-sao-paulo>. Acesso em: 03 jul. 2023.

CONSONI, A. J. et al. **Manual técnico para elaboração, transmissão e uso de alertas de risco de movimentos de massa**. São José dos Campos, SP: CEMADEN, v. 2, 2018. 162 p.

DIKSHIT, A.; SATYAM, D. N.; TOWHATA, I. Early warning system using tilt sensors in Chibo, Kalimpong, Darjeeling Himalayas, India. **Natural Hazards**, v. 94, p. 727–741, 2018.

ELETROGATE. Comunicação Half-duplex com RS-485. In: Componentes Eletronicos. Blog Eletrogate: 2022. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/comunicacao-half-duplex-com-rs-485/>. Acesso em: 01 mai. 2023.

FASCISTA, A. Toward integrated large-scale environmental monitoring using WSN/UAV/crowdsensing: a review of applications, signal processing, and future perspectives. **Sensors**, v. 22, n. 5, 2022. 65 p.

FOSALAU, C.; ZET, C. Power management solutions for a landslide monitoring network. **2018 International Symposium in Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)**, p. 1-6, 2018.

FULLER, J. FC-28 Soil Moisture Sensor Module. Datasheethub: 2022. Disponível em: <https://datasheethub.com/fc-28-soil-moisture-sensor-module/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

GIAN, Q. A. et al. Design and implementation of site-specific rainfall-induced landslide early warning and monitoring system: a case study at Nam Dan landslide (Vietnam). **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1978-1996, 2017.

HE, H. et al. Chapter Three - A review of time domain reflectometry (TDR) applications in porous media. **Academic Press**, v. 168, p. 83-155, 2021.

ISLAM, M. M. et al. Internet of Things: Device Capabilities, Architectures, Protocols, and Smart Applications in Healthcare Domain. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 10, n. 4, p. 3611-3641, 2023.

IPT. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: município de São Paulo – SP. CPRM: Repositório Institucional de Geociências. 2015. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/15216>. Acesso em: 21 abr. 2023.

INVENSENSE. MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking Devices. In: Products. 2013. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

JAWAD, H. M. et al. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. **Sensors**, v. 17, n. 8, 2017. 45 p.

JEONG, S.; KO, J.; KIM, J. The Effectiveness of a Wireless Sensor Network System for Landslide Monitoring. **IEEE Access**, v. 8, pp. 8073-8086, 2020.

KRAUSE, C.; MORAIS, M. P.; NETO, V. C. L. **Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros**. Brasília, DF: Ipea, 2016. 540 p. ISBN 978-85-7811-276-9.

LEMOS, R. C. de; SANTOS, R. D. dos. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-CNPS, v. 3, 1996. 84 p.

MARCHEZINI, V.; LONDE, L. de R. Sistemas de alerta centrados nas pessoas: desafios para os cidadãos, cientistas e gestores públicos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. esp, p. 525-558, 2018.

MARINO, P. et al. Prototype of an IoT-Based Low-Cost Sensor Network for the Hydrological Monitoring of Landslide-Prone Areas. **Sensors**, v. 23, n. 4, p. 2299-2314, 2023.

MATHWORKS. ThingSpeak for Environmental Monitoring. In: Environmental Monitoring. 2023. Disponível em: [https://thingspeak.com/pages/environmental\\_monitoring](https://thingspeak.com/pages/environmental_monitoring). Acesso em: 28 abr. 2023.

MEI, G. et al. A Survey of Internet of Things (IoT) for Geohazard Prevention: Applications, Technologies, and Challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 5, p. 4371-4386, 2020.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MIN). Portaria n. 314, de 17 de outubro de 2012. Cria e estabelece o Protocolo de Ação entre o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD/MI) e o Centro Nacional de Monitoramento a Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN/MCTI). Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=19/10/2012&jornal=1&pagina=26&totalArquivos=140>. Acesso em: 11 set. 2022.

MUCCHI, L. et al. A flexible wireless sensor network based on ultra-wide band technology for ground instability monitoring. **Sensors**, v. 18, n. 6, p. 2948-2969, 2018.

NANJING. TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8. NanJing Top Power ASIC Corp. 2017. Disponível em: <https://www.mikrocontroller.net/attachment/273612/TP4056.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

NAZDROWICZ, et al. Analysis of temperature variation influence on damping coefficient and Q-factor of 2-DOF vibratory rotational velocity sensor. **21st IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems**, p. 1-7, 2022.

PEFFERS, K. et al. A design science research methodology for information systems research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.

PELECH, A. S. et al. **Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2019. 60 p. ISBN 978-85-240-4515-8.

PIMENTEL, J. et al. **Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES**. Rio de Janeiro, RJ: CPRM/SGB, Serviço Geológico do Brasil, 2018. 213 p. ISBN 978-85-7499-448-2.

PIMENTEL, M.; FILIPPO, D.; SANTORO, F. M. **Design Science Research: fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação**. (Org.) Metodologia de Pesquisa Científica em Informática na Educação: Concepção de Pesquisa. Porto Alegre, RS: SBC, 2020. 29 p. ISBN: 978-85-7669-493-9.

SANTOS, R. \$11 TTGO T-Call ESP32 with SIM800L GSM/GPRS. In: Maker Advisor. 2019. Disponível em: <https://makeradvisor.com/ttgo-t-call-esp32-with-sim800l-gsm-gprs/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

SEED. Industrial Soil Moisture & Temperature & EC Sensor MODBUS-RTU RS485 (S-Soil MTEC-02A). In: Sensor Probes. 2020. Disponível em: <https://solution.seeedstudio.com/product/industrial-soil-moisture-temperature-ec-sensor-modbus-rtu-rs485-s-soil-mtec-02a/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

SIMPLY MODBUS. Frequently Asked Questions. In: About MODBUS, 2020. Disponível em: <https://www.simplymodbus.ca/FAQ.htm#Modbus>. Acesso em: 03 mai. 2023.

SULAIMAN, S. N. et al. **GIRD+10: Caderno técnico de gestão integrada de riscos e desastres**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2021. 154 p. ISBN 978-65-994918-0-1.

TELECO. Dados de cobertura das operadoras de celular no Brasil e atendimento. In: Cobertura. São José dos Campos, SP: Teleco Informação e Serviços de Telecomunicações Ltda., 2023. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/cobertura.asp>. Acesso em: 16 mar. 2023.

TELECO. Acompanhe a evolução dos municípios e população cobertos por LPWA por cada Operadora. In: LPWA Cobertura no Brasil. São José dos Campos, SP: Teleco Informação e Serviços de Telecomunicações Ltda., 2023. Disponível em: [https://www.teleco.com.br/lpwa\\_cobertura.asp](https://www.teleco.com.br/lpwa_cobertura.asp). Acesso em: 22 mar. 2023.

WILLIAMS, A. J. et al. Survey of Energy Harvesting Technologies for Wireless Sensor Networks. **IEEE Access**, v. 9, p. 77493-77510, 2021.

## APÊNDICE A – Plano de Gestão de Dados (PGD)

**Universidade de São Paulo**

**Plano de Gestão de Dados**

**Identificador:** 10.5281/zenodo.7879866

**ORCID:** 0000-0001-8033-6089

**DOI:** 10.5281/zenodo.7879866

**Pesquisador responsável:** Alison Fabricio Bilha Wioppiold

**Contato para responsável pelos dados:** fabricio.bilha@usp.br

**Data de criação do plano:** 2023-Abr-30

**Local:** Butantã, São Paulo - SP.

**Título do Projeto:** Sistema de rede de sensores sem fio para monitoramento de deslizamentos de terra

**Descrição do Projeto:**

O objetivo deste projeto é criar um protótipo de um dispositivo sensor que funcione como uma rede sem fio para monitorar deslizamentos de terra, causados principalmente por chuvas, incluindo deslizamentos planares, rotacionais e fluxos de detritos. O dispositivo visa custos financeiros acessíveis para municípios brasileiros, tamanho reduzido e eficiência energética.

**Financiador(es):** CAPES.

### **1) Dados gerados**

No âmbito deste projeto, são gerados dois tipos de dados:

- a) Medidas inerciais, geradas a partir de interações diversas com os sensores. O teste principal, em campo, compreendeu as leituras (entry\_id) de 2514 à 3314.
- b) Parâmetros do solo, incluindo, por exemplo, umidade do solo, condutividade elétrica, temperatura. Quatro ensaios (A, B, C, e D) foram realizados em amostras de solo com quantidades distintas de água. Outro foi destinado à análise da resposta do



sistema em relação à penetração de água em um recipiente maior (há imagens disponíveis). A identificação dos dados úteis principais consta a seguir:

- Ensaio A (sensor 1): entry\_id 1667 à 1751.
- Ensaio B (sensor 0): entry\_id 1431 à 1518.
- Ensaio C (sensor 0): entry\_id 1649 à 1737.
- Ensaio D (sensor 1): entry\_id 1400 à 1485.
- Ensaio de penetração de água (sensor 0): entry\_id 3953 à 4713.
- Ensaio de penetração de água (sensor 1): entry\_id 3893 à 4638.

## **2) Localização dos dados**

Os dados estão disponibilizados na plataforma Zenodo, repositório de dados abertos desenvolvida pela Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (CERN) em conjunto com a OpenAIRE. Os dados arquivados neste local recebem um identificador digital único, o que permite que sejam citados em publicações e utilizados por outros pesquisadores de forma transparente e confiável.

As imagens disponibilizadas junto aos dados brutos não envolvem aspectos que restrinjam seu uso em documentos públicos, tais como artigos e relatórios científicos. Portanto elas podem ser utilizadas em outros projetos de pesquisa, desde que a fonte (projeto presente) seja citada. Quanto aos dados em si, podem ser utilizados para processamento, sob a mesma condição das imagens.

## APÊNDICE B – Links úteis

- Painel na plataforma ThingSpeak: Ground movement (MPU-6050)
  - <https://thingspeak.com/channels/1932096>
- Painel na plataforma ThingSpeak: Ground movement (Soil MTEC – BOTTOM)
  - <https://thingspeak.com/channels/2135619>
- Painel na plataforma ThingSpeak: Ground movement (Soil MTEC – UP)
  - <https://thingspeak.com/channels/2135608>
- Publicação em congresso Ibero-Americano de sensores: Um olhar sobre os sensores na Península Ibérica e América Latina - Ano 2022 (p. 313-317)
  - <https://doi.org/10.48528/h76t-t092>
- Repositório de dados abertos: Zenodo (DOI: 10.5281/zenodo.7879866)
  - <https://doi.org/10.5281/zenodo.7879866>

## APÊNDICE C – Trechos de código fonte utilizados

### Definição de interfaces de comunicação e de depuração.

```

//*****// Serial definition and debug mode //*****//
#define SerialMon Serial // Serial for debug console (to Serial Monitor, default speed 115200)
#define SerialAT Serial1 // Serial for AT commands (to SIM800 module)
#define SerialRS Serial2 // Serial for RS485 serial communication (to S-Soil MTEC)

// #define CONSUMPTION_DETAILS // <<< Comment it, if not needed
// #define DUMP_AT_COMMANDS // <<< Comment it, if not needed
#ifdef DUMP_AT_COMMANDS
#include <StreamDebugger.h>
StreamDebugger debugger(SerialAT, SerialMon); //It dumps all data to debug console for debug purposes
TinyGsm modem(debugger);
#else
TinyGsm modem(SerialAT);
#endif

```

### Camada de aplicação: credenciais para acesso à plataforma online (chaves anonimizadas).

```

//*****// Application layer //*****//
#include <ThingSpeak.h>
const char * writeAPIKey_MPU = ""; // Required to write data to the MPU-6050's channel
unsigned long channelNumber_MPU = 1932096; // Channel ID
const char * writeAPIKey_MTEC_00 = ""; // Required to write data to the MTEC_UP's channel
unsigned long channelNumber_MTEC_00 = 2135608; // Channel ID
const char * writeAPIKey_MTEC_01 = ""; // Required to write data to the MTEC_BOTTOM's channel
unsigned long channelNumber_MTEC_01 = 2135619; // Channel ID

```

### Camada de rede: credenciais para acesso à rede GPRS.

```

//*****// Network layer //*****//
// Configure TinyGSM library
#define TINY_GSM_MODEM_SIM800 // Modem is SIM800
#define TINY_GSM_RX_BUFFER 1024 // Set RX buffer to 1Kb
#include <TinyGsmClient.h>

// GPRS credentials (it can be empty, if not needed)
#define VIVO // GPRS provider
#ifdef VIVO
const char apn[] = "zap.vivo.com.br"; // APN
const char gprsUser[] = "vivo"; // GPRS User
const char gprsPass[] = "vivo"; // GPRS Password
#elif TIM
const char apn[] = "tim.br"; // APN
const char gprsUser[] = "tim"; // GPRS User
const char gprsPass[] = "tim"; // GPRS Password
#elif CLARO
const char apn[] = "claro.com.br"; // APN
const char gprsUser[] = "claro"; // GPRS User
const char gprsPass[] = "claro"; // GPRS Password
#else
const char apn[] = ""; // APN
const char gprsUser[] = ""; // GPRS User
const char gprsPass[] = ""; // GPRS Password
#endif
const char simPIN[] = ""; // SIM card PIN (it can be empty, if not defined)

```

### Camada física: definições, pinos de entrada e saída.

```

//*****// Physical layer //*****//
#define uS_TO_S_FACTOR 1000000UL // Conversion factor for micro seconds to seconds
#define TIME_TO_SLEEP 60 // Time ESP will go to sleep (in seconds)
#define LC 3 // Critical
#define LMA 10 // Very high
#define LA 15 // High
#define LM 30 // Moderate

RTC_DATA_ATTR int bootCount = 0; // Boot number

// TTGO T-Call pins
#define MODEM_RST 5
#define MODEM_PWKEY 4
#define MODEM_POWER_ON 23
#define MODEM_TX 27
#define MODEM_RX 26
#define POWER_SDA 21
#define POWER_SCL 22
#define LED_BUILTIN 13

// TTGO T-Call register addresses (power management used in SIM800L module)
#define IP5306_ADDR 0x75
#define IP5306_REG_SYS_CTL0 0x00

// MPU-6050 pins
#define MPU_SDA 18
#define MPU_SCL 19
// MPU-6050 register addresses
#define MPU_ADDR 0x68 // MPU-6050 I2C address
#define MPU_PWR_MGMT_1 0x6B // Power Management 1 register
#define GYRO_CONFIG 0x1B // Gyro measurement range
#define ACCEL_CONFIG 0x1C // Accelerometer measurement range
#define ACCEL_XOUT 0x3B // Accelerometer register to X value
#define MPU_CONFIG 0x1A // Digital low-pass filter configuration
#define DLPF_CFG_VALUE 1 // Digital Low Pass Filter

// S-Soil MTEC pins
#define RS485_RX 34
#define RS485_TX 15
#define RS485_RDE 0
#define RS485_Transmission HIGH
#define RS485_Reception LOW

```

### Funções: inicialização do TTGO T-Call.

```

// Function to setup the SIM800L
void setupModem() {
  // Start power management
  if(setupIP5306(1) == false) // 1 enable, 0 disable PowerBoostKeepOn
    SerialMon.println(F("Power setup error.));
  else
    SerialMon.println(F("Power setup OK.));

  SerialMon.println("IP5306 Battery level: " + String(getBatteryLevel()) + "%.");

  pinMode(MODEM_RST, OUTPUT);
  pinMode(MODEM_PWKEY, OUTPUT);
  pinMode(MODEM_POWER_ON, OUTPUT);

  digitalWrite(MODEM_RST, HIGH);
  digitalWrite(MODEM_POWER_ON, HIGH); // Turn on the Modem power first

  // Pull down PWRKEY for more than 1 second according to manual requirements
  digitalWrite(MODEM_PWKEY, HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(MODEM_PWKEY, LOW);
  delay(1000);
  digitalWrite(MODEM_PWKEY, HIGH);
}

```

### Funções: nível de bateria e detalhes de consumo de energia.

```

// Function to get the battery level (%)
int8_t getBatteryLevel() {
  #ifdef CONSUMPTION_DETAILS
    consumptionDetails();
  #endif
}

```

Funções: escrita de registradores, leitura de registradores e configuração do MPU-6050.

```
// Function to write a given value to a MPU-6050's register
void writeRegMPU(int reg, int val) {
    I2CMPU.beginTransmission(MPU_ADDR);
    I2CMPU.write(reg);
    I2CMPU.write(val);
    I2CMPU.endTransmission(true);
}

// Function to get a 1 byte from a MPU-6050's register
uint8_t readRegMPU(uint8_t reg) {
    uint8_t data;
    I2CMPU.beginTransmission(MPU_ADDR);
    I2CMPU.write(reg);
    I2CMPU.endTransmission(false); // Finish the transmission but continues with I2C enabled (STOP and START allowed)
    I2CMPU.requestFrom(MPU_ADDR, 1);
    data = I2CMPU.read();
    return data;
}

// Function to configure the MPU-6050 sensor
void initMPU() {
    // PWR_MGMT_1 bit6 = SLEEP (When set to 1, this bit puts the MPU-6050 into sleep mode)
    // PWR_MGMT_1 bit[2:0] = Clock Source; 1 = PLL with X axis gyroscope reference
    writeRegMPU(MPU_PWR_MGMT_1, 1);
    writeRegMPU(GYRO_CONFIG, 0); // ± 250 °/s
    writeRegMPU(ACCEL_CONFIG, 0); // ± 2g
    // *          ACCELEROMETER          |          GYROSCOPE
    // * DLPF_CFG | Bandwidth | Delay | Bandwidth | Delay | Sample Rate
    // *-----+-----+-----+-----+-----+-----
    // * 0        | 260Hz   | 0ms   | 256Hz   | 0.98ms | 8kHz
    // * 1        | 184Hz   | 2.0ms | 188Hz   | 1.9ms  | 1kHz
    // * 2        | 94Hz    | 3.0ms | 98Hz    | 2.8ms  | 1kHz
    // * 3        | 44Hz    | 4.9ms | 42Hz    | 4.8ms  | 1kHz
    // * 4        | 21Hz    | 8.5ms | 20Hz    | 8.3ms  | 1kHz
    // * 5        | 10Hz    | 13.8ms| 10Hz    | 13.4ms | 1kHz
    // * 6        | 5Hz     | 19.0ms| 5Hz     | 18.6ms | 1kHz
    writeRegMPU(MPU_CONFIG, DLPF_CFG_VALUE);
    SerialMon.println("MPU_CONFIG = " + String(readRegMPU(MPU_CONFIG)) + ".");
}

```

Funções: encaminhamento de dados à plataforma e cálculo de CRC16.

```
// Function to send data to ThingSpeak
void sendToTS(const char * writeAPIKey, unsigned long channelNumber) {
    int t = 0, httpCode;
    while(t < limit2Resend){
        SerialMon.print(F("."));
        httpCode = ThingSpeak.writeFields(channelNumber, writeAPIKey);
        t++;
        if(httpCode == 200 || httpCode == -210)
            break;
        delay(1000);
    }
    if(httpCode == 200 || httpCode == -210)
        SerialMon.println(F("\nChannel write successful.));
    else
        SerialMon.println("\nProblem writing to channel. HTTP error code: " + String(httpCode) + ".");
}

// Function to CRC-16/MODBUS calculation
uint16_t calculateCRC16(uint8_t *buffer, uint16_t length) {
    uint16_t crc = 0xFFFF;
    for (uint16_t i = 0; i < length; i++) {
        crc ^= buffer[i];
        for (uint8_t j = 0; j < 8; j++) {
            if (crc & 0x0001) {
                crc >>= 1;
                crc ^= 0xA001;
            } else
                crc >>= 1;
        }
    }
    return crc;
}

```

## Função setup.

```

//*****// SETUP //*****//
void setup() {
  // I/O configuration
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // Turn the LED on while setup is running
  pinMode(RS485_RDE, OUTPUT);
  digitalWrite(RS485_RDE, LOW);

  // Set serial monitor debugging window baud rate to 115200
  SerialMon.begin(115200);
  // Increment boot number and print it every software reboot
  ++bootCount;
  SerialMon.println("Boot number: " + String(bootCount) + ".");

  // Set GSM module baudrate and UART pins
  SerialAT.begin(115200, SERIAL_8N1, MODEM_RX, MODEM_TX);
  // Set RS485 module baudrate and UART pins
  SerialRS.begin(9600, SERIAL_8N1, RS485_RX, RS485_TX);
  delay(1000);

  // Start I2C communication
  I2CPower.begin(Power_SDA, Power_SCL, 400000);
  I2CMPU.begin(MPU_SDA, MPU_SCL, 400000);

  SerialMon.println(F("Initializing modem..."));
  setupModem(); // Setup the SIM800L
  modem.restart(); // Restart SIM800 module
  // It generally takes longer than init() but ensures the module doesn't have lingering connections

  // Unlock your SIM card with a PIN if needed
  if(strlen(simPIN) && modem.getSimStatus() != 3 ) {
    SerialMon.println(F("Unlocking SIM..."));
    modem.simUnlock(simPIN);
  }

  initMPU(); // Setting the MPU-6050 sensor
  talkMTEC(0, fc06_soil_type_0, MTEC_00); // Setting the MTEC_UP sensor
  talkMTEC(1, fc06_soil_type_0, MTEC_01); // Setting the MTEC_BOTTOM sensor
  ThingSpeak.begin(client); // TinyGSM client for internet connection

  esp_sleep_enable_timer_wakeup(TIME_TO_SLEEP * uS_TO_S_FACTOR * currentSleepTime); // Configure the wake up source

  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // Turn the LED off once the setup is completed
}

```

## Função loop.

```

//*****// LOOP //*****//
void loop() {
  int t = 0;
  if(!modem.isGprsConnected()) {
    SerialMon.print(F("Connecting to APN: "));
    SerialMon.println(apn);
    // Establish the GPRS data connection
    while (!modem.gprsConnect(apn, gprsUser, gprsPass) && t<limit2Reconnect) {
      SerialMon.println(F("Failed to connect to the cellular network."));
      delay(10000);
      t++;
    }
  }

  SerialMon.println("Signal quality: " + String(modem.getSignalQuality()) + " (from 0 to 31, poor to great).");

  if(modem.isGprsConnected()) {
    SerialMon.println(F("GPRS Connected."));
    readRawMPU();
    ThingSpeak.setField(1, fAcX);
    ThingSpeak.setField(2, fAcY);
    ThingSpeak.setField(3, fAcZ);
    ThingSpeak.setField(4, fTmp);
    ThingSpeak.setField(5, fGyX);
    ThingSpeak.setField(6, fGyY);
    ThingSpeak.setField(7, fGyZ);
    ThingSpeak.setField(8, getBatteryLevel());
    sendToTS(writeAPIKey_MPU, channelNumber_MPU);

    talkMTEC(0, fc03_temp_vwc_ec_sal_tds_eps, MTEC_00);
    ThingSpeak.setField(1, MTEC_00[0]);
    ThingSpeak.setField(2, MTEC_00[1]);
    ThingSpeak.setField(3, MTEC_00[2]);
    ThingSpeak.setField(4, MTEC_00[3]);
    ThingSpeak.setField(5, MTEC_00[4]);
    ThingSpeak.setField(6, MTEC_00[5]);
    sendToTS(writeAPIKey_MTEC_00, channelNumber_MTEC_00);

    talkMTEC(1, fc03_temp_vwc_ec_sal_tds_eps, MTEC_01);
    ThingSpeak.setField(1, MTEC_01[0]);
    ThingSpeak.setField(2, MTEC_01[1]);
    ThingSpeak.setField(3, MTEC_01[2]);
    ThingSpeak.setField(4, MTEC_01[3]);
    ThingSpeak.setField(5, MTEC_01[4]);
    ThingSpeak.setField(6, MTEC_01[5]);
    sendToTS(writeAPIKey_MTEC_01, channelNumber_MTEC_01);

    modem.gprsDisconnect();
    modem.radioOff();
  }
  SerialMon.println(F("GPRS disconnected."));

  // Put ESP into deep sleep mode (with timer wake up)
  SerialMon.println("Going to sleep now.");
  SerialMon.flush();
  writeRegMPU(MPU_PWR_MGMT_1, 65); // It puts the MPU-6050 into sleep mode
  digitalWrite(MODEM_POWER_ON, LOW);
  esp_deep_sleep_start();

  delay(18000); // It should never run, if in sleep mode
}

```

## APÊNDICE D – Testes complementares em laboratório

Levando-se em consideração as limitações apontadas no capítulo 5 (RESULTADOS E DISCUSSÕES) sobre o sensor Soil MTEC-02A, especificamente em relação aos valores calculados internamente para o parâmetro VWC (conteúdo volumétrico de água), foram conduzidos novos ensaios abrangendo uma gama diversificada de condições e materiais. Esses ensaios incluíram a avaliação do sensor em diferentes configurações e amostras representativas de materiais como água, ar, rejeito de mineração, solo arenoso e solo argiloso em várias faixas de umidade (Figura 42).

Figura 42: Ensaios laboratoriais no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGC-USP).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Essa abordagem foi adotada para verificar a consistência do comportamento do sensor em situações variadas e proporcionar uma compreensão mais abrangente de seu desempenho. Em outras palavras, os ensaios buscaram identificar se as limitações previamente observadas eram específicas para determinadas configurações ou tipos de solo, ou se eram uma tendência geral.

Os resultados desses ensaios adicionais confirmaram que as limitações observadas anteriormente não são específicas de uma configuração ou tipo de solo particular. Em vez



disso, essas limitações de cálculo estão relacionadas à natureza intrínseca do sensor Soil MTEC-02A e podem ser observadas em uma variedade de condições e materiais.

Nesse sentido, é importante notar que a latência na entrega de valores reais de VWC por parte do sensor em questão representa um desafio significativo em análises críticas. Uma vez que a umidade do solo desempenha um papel crucial no desencadeamento de processos de escorregamento, a existência dessa latência na compreensão das condições ambientais pode comprometer seriamente o tempo disponível para a tomada de decisões.

Sendo assim, diante do comportamento inerente do sensor Soil MTEC-02A, é essencial considerar alternativas que minimizem suas restrições. A utilização de outros parâmetros que não envolvem processamento interno, como a condutividade elétrica (EC), sólidos totais dissolvidos (TDS) e a constante dielétrica (EPSILON) são mais adequados em cenários onde o tempo é um fator crítico. Parâmetros esses que também podem ser utilizados para avaliação do conteúdo volumétrico de água no solo.

## ANEXO A – Curso: Sistemas de monitoramento e alerta como suporte à gestão local de riscos e desastres (Turma FEV/2023)


**Certificado**

*A Escola Nacional de Administração Pública - Enap certifica que*

**Alison Fabricio Bilha Wioppiold**

*concluiu o curso **Sistemas de monitoramento e alerta como suporte à gestão local de riscos e desastres (Turma FEV/2023)**, com carga-horária de 30 horas, início em 18/02/2023, término em 19/02/2023 e nota final 95.*



**Paulo Marques**  
*Presidente Substituto*

**Histórico**

<b>Nome:</b> Alison Fabricio Bilha Wioppiold	<b>Curso:</b> Sistemas de monitoramento e alerta como suporte à gestão local de riscos e desastres	
<b>Disponibilidade:</b> 18/02/2023 a 20/03/2023	<b>Carga Horária:</b> 30 horas	<b>Nota Final:</b> 95

**Conteúdo**

Módulo 1: Fundamentos de Sistemas de Monitoramento e Alerta de Desastres;  
Módulo 2: Sistema Nacional de Informações sobre Desastres;  
Módulo 3: Instrumentos de Gestão de Riscos de Desastres na Escala Local e Sistemas de Monitoramento e Alerta;  
Módulo 4: Abordagens Participativas para o Fortalecimento de Sistemas de Monitoramento e Alerta de Desastres



Certificado registrado na Escola Virtual.Gov - EVG sob o código: **iHhR86746561cpX**  
 Este certificado foi gerado em 19/02/2023.  
 O presente certificado pode ter a sua validade comprovada acessando o QRCode à esquerda, ou, caso desejar, informando o código acima na opção **Validação de Documentos** no endereço <https://www.escolavirtual.gov.br>.  
 A data de emissão pode ser anterior à data final do curso nos casos em que o participante alcançou os requisitos mínimos para aprovação antecipadamente.



Escola Nacional de  
Administração Pública

