

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA
UMIDADE DO SOLO PARA PREVISÃO DE
DESLIZAMENTOS**

Anderson Barros Rodrigues

Brasília, Julho de 2019



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA
UMIDADE DO SOLO PARA PREVISÃO DE
DESLIZAMENTOS**

Anderson Barros Rodrigues

*Relatório submetido como requisito parcial de obtenção
de grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Daniel Café, ENE/UnB
Orientador

Prof. Ricardo Zelenovsky, ENE/UnB
Examinador interno

Prof. Jones Yudi, ENM/UnB
Examinador interno

Brasília, Julho de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

ANDERSON, BARROS RODRIGUES

Sistema de monitoramento da umidade do solo para previsão de deslizamentos

[Distrito Federal] 2019.

x, 42p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2019). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.

1. Deslizamento

2.Rompimento

3. Barragens

4.Previsão

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, ANDERSON BARROS, (2019). Sistema de monitoramento da umidade do solo para previsão de deslizamentos. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº022, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 42p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Anderson Barros Rodrigues

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Sistema de monitoramento da umidade do solo para previsão de deslizamentos.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Anderson Barros Rodrigues

SCN 110, bloco B, apartamento 202.

70753-520 Brasília – DF – Brasil.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, que me deram todo o suporte durante toda a minha graduação, ao meu orientador Daniel Café, que durante todo o decorrer deste trabalho esteve sempre presente. Gostaria também de agradecer a todos os colegas de curso e amigos que fiz durante a graduação, sem os quais, chegar até aqui teria sido muito mais difícil. Agradeço também a equipe UnBall - Futebol de Robôs e todos os seus membros e ex-membros por todo o conhecimento, momentos e experiências compartilhadas dentro dos quase 3 anos em que fui membro da equipe. Agradeço ainda à Gabriela Guimarães Landim por todo o suporte durante a fase final da minha graduação.

Anderson Barros Rodrigues

RESUMO

Deslizamentos de terra e rompimentos de barragens são acontecimentos que gostaríamos que nunca acontecessem. Infelizmente, essa não é a realidade do nosso país. Durante épocas chuvosas temos deslizamentos de encostas e para piorar, em geral, em locais onde pessoas de baixa renda se estabelecem. Sem a prevenção adequada ou cuidados na hora da construção, essas regiões estão suscetíveis à desastres de deslizamentos, acabando com o patrimônio de famílias e colocando suas vidas em risco. O rompimento de barragens de rejeitos é outro exemplo de desastre que pode causar danos a centenas de pessoas, como foi o caso de Brumadinho. Esses dois tipos de desastres compartilham o mesmo princípio. Com as chuvas, a terra fica excessivamente encharcada e dependendo da composição do solo, ela pode ceder, levando ao deslize de uma encosta ou ao rompimento de uma barragem. Neste trabalho é proposto um sistema de aferimento da umidade do solo, coleta e armazenamento de dados com o objetivo futuro de prever situações ou condições que podem fazer o solo ceder ou deslizar. O instrumento proposto utiliza um conjunto de sensores de umidade SHT30 em diferentes profundidades do solo e microcontroladores ESP32 dotados de conectividade bluetooth para transmitir os dados aferidos para uma central de coleta.

Palavras Chave: deslizamento, rompimento, barragens, previsão, umidade, monitoramento, sistema.

ABSTRACT

Landslides and dam disruptions are events which we would like to never happen. Sadly, this is not the reality of Brazil. During rainy seasons we have landslides where people with low income settle down. Without the proper prevention and caution during the construction, these regions are susceptible to landslides disasters, bringing to an end family's patrimony and putting their lives at risk. The disruption of tailing dams is another example of tragedy that can cause damage to hundreds of people, as it was in Brumadinho. The two types of disasters share the same principle. The land gets excessively drenched and depending on the soil composition, the land can give in, taking it to a landslide or the disruption of a dam. In this paper it is proposed a soil humidity measurement system, data collection and storage with the future objective of predicting situations or conditions that can make the land give in. The instrument proposed uses a set of humidity sensors SHT30 in different depths of the soil and microcontrollers ESP32 endowed with Bluetooth connectivity to transmit the measured data to a data center.

Keywords: landslide, dam, disruptions, humidity, prediction, monitoring, system.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	PREVISÃO DO DESLIZAMENTO	2
1.3	O PROJETO	3
1.4	OBJETIVO	5
2	Revisão Bibliográfica	6
2.1	CARACTERÍSTICAS DO SOLO	6
2.2	MECANISMOS DE GATILHO DE DESLIZAMENTOS	8
2.3	TECNOLOGIAS DE MEDIDA DE UMIDADE DO SOLO	9
2.4	TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO	11
2.5	TECNOLOGIAS DE SISTEMAS EMBARCADOS	13
3	Metodologia	27
3.1	MÉTODO DE MEDIÇÃO	27
3.2	TESTES DE COMUNICAÇÃO	28
3.3	TESTES DE SISTEMA	29
4	Resultados	30
4.1	INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS	30
4.1.1	ELEMENTOS FÍSICOS	30
4.1.2	ELEMENTOS LÓGICOS	31
4.2	MÓDULO CENTRAL DE PROCESSAMENTO	34
4.2.1	RECEPÇÃO DE DADOS	34
4.2.2	ARMAZENAMENTO	35
4.3	RESULTADOS	35
5	Considerações finais	39
5.1	CONCLUSÃO	39
5.2	TRABALHOS FUTUROS	39

LISTA DE FIGURAS

1.1	Vista de perfil de um recorte da encosta com as estacas inseridas.....	4
1.2	Visão geral do sistema.....	5
2.1	Forças atuando em um recorte de uma encosta infinita (imagem retirada de [7])	7
2.2	Mudança no estado de estresse no plano da encosta causado por aumento da pressão dos poros (imagem retirada de [7]).....	9
2.3	Mudança no estado de estresse no plano da encosta causado pelo aumento do peso da massa do solo (imagem retirada de [7]).....	10
2.4	Ilustração do sensor capacitivo.....	11
2.5	Kit de desenvolvimento esp32.....	13
2.6	Barramento do protocolo I ² C.....	15
2.7	Passos do protocolo I ² C.....	16
2.8	Encapsulamento dos sensores da série SHT3x-DIS	17
2.9	Características elétricas dos sensores da série SHT3x-DIS.....	18
2.10	Comparação do sensor com uma moeda de 10 centavos.....	19
2.11	encapsulamento com película protetora dos sensores da série SHT3x-DIS.....	19
2.12	Endereços I ² C dos sensores da série SHT3x-DIS	19
2.13	Tolerância de umidade relativa para o sensor SHT30 à 25°C	20
2.14	Tolerância de umidade relativa para o sensor SHT31 à 25°C	20
2.15	Tolerância de umidade relativa para o sensor SHT35 à 25°C	20
2.16	Acurácia de leitura de temperatura para o sensor SHT30	21
2.17	Acurácia de leitura de temperatura para o sensor SHT31	21
2.18	Acurácia de leitura de temperatura para o sensor SHT35	22
2.19	Dados transmitidos durante uma leitura - área branca controlada pelo microcontrolador e área cinza controlada pelo sensor.....	23
2.20	Diferentes modos de leitura	23
2.21	Duração dos diferentes modos de leitura	23
2.22	Diferentes periodos de leitura - onde mps pode ser lido como medidas por segundo..	24
2.23	Representação da estaca posicionada no solo.....	26
4.1	Foto do instrumento de medição.....	31
4.2	Estrutura do comando de configuração enviado aos sensores	32
4.3	Estrutura do fluxo de dados de leitura no modo de leitura periódica	33
4.4	Analizador lógico - <i>saleae</i>	36

4.5	<i>software</i> para comunicação com analisador lógico - <i>saleae</i>	36
4.6	Barramento I ² C durante o envio de uma requisição de leitura.....	36
4.7	Barramento I ² C durante o envio de uma leitura de dados	36
4.8	Terminais com os logs dos microcontroladores da estaca e do módulo central.....	37

LISTA DE TABELAS

1.1	Classificação de barragens segundo a ANM.....	2
4.1	Dados de exemplo para o arquivo <i>data.csv</i>	35

Capítulo 1

Introdução

Deslizamentos de terra podem gerar danos muito grandes, principalmente quando causam a perda de vidas. Um deslizamento pode ocorrer devido à alguns fatores como tremores de terra e alta umidade do solo. Similar aos deslizamentos de terras os rompimentos de barragens também podem ser causados pelos mesmos fatores. Deslizamentos de terra em encostas causados por alta umidade do solo se devem em sua maioria às chuvas, que por si só podem ser um alerta do deslizamento. Já no caso das barragens, a chuva é apenas um dos fatores que pode levar a uma alta nos níveis de umidade do solo enquanto o material depositado na barragem também pode causar esse aumento.

O líquido depositado na barragem pode provocar uma alta na umidade do solo ao longo de um período de tempo e pode chegar ao nível crítico sem qualquer tipo de aviso ou sinalização como no caso das encostas onde a alta na umidade do solo é causada por grandes chuvas, ou períodos com chuvas consecutivas.

Rompimentos de grandes barragens como os da barragem de Mariana e de Brumadinho se tornaram famosos, contudo existem outros casos de rompimentos nos últimos anos que não receberam grande cobertura da mídia.

1.1 Contextualização

Barragens com alto potencial de destruição no Brasil somam mais de 200, segundo a ANM, Agência Nacional de Mineração. Rompimentos de barragens como os que ocorreram em Brumadinho (que possuía baixo risco de rompimento) e Mariana que tiraram várias vidas e causaram grandes danos ambientais possuem altas chances de se repetir pelo país. Segundo a ANM atualmente o Brasil possui 16 barragens com alto potencial de destruição e médio ou alto risco de rompimento [2], risco esse que é superior ao que possuía a barragem de Brumadinho.

Categoria de risco	Dano potencial		
	ALTO	MEDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MEDIO	B	C	D
BAIXO	B	C	E

Tabela 1.1: Classificação de barragens segundo a ANM.

A ANM classifica as barragens registradas em cinco categorias, de A a E, de acordo com seu risco de rompimento e o potencial de dano no evento de um rompimento, essa classificação pode ser vista na tabela 1.1.

A categoria de risco indica se as chances da barragem se romper é alta, média ou baixa. A categoria de risco é calculada levando em consideração 3 fatores, que são: características técnicas, estado de conservação e plano de segurança da barragem.

O Ibama multou a empresa Vale em 250 milhões de reais pelos danos ambientais causados pelo rompimento da barragem de Brumadinho. Ação do MPT, ministério publico do trabalho, pediu 3,6 bilhões de reais em multas e indenizações.

Comparado ao custo gerado pelo rompimento de uma barragem o custo da implementação, operação e manutenção do sistema de monitoramento proposto neste trabalho é muito pequeno e possibilita a previsão de rompimentos, e por consequência possibilita também que medidas corretivas sejam tomadas para evitar que o rompimento aconteça.

1.2 Previsão do deslizamento

Prever o rompimento ou aferir um aumento progressivo do risco em um curto período de tempo torna possível a tomada de medidas corretivas e de prevenção que podem evitar o rompimento ou possibilitar a evacuação da área de risco, evitando assim grandes danos ambientais e principalmente salvando vidas.

Duas soluções serão tratadas neste trabalho. Uma envolve conhecimento específico sobre o solo e as condições em que ele se encontra, para calcular o quão suscetível de acontecer o deslizamento/rompimento e o outro foca na localização de bolsões de grande umidade do solo indicando um iminente rompimento ou deslizamento de terra. A primeira será chamada de sistema de monitoramento equanto a segunda será chamada de sistema de alerta.

Sistema de monitoramento

Uma das causas do deslizamento de terra apresentadas em [7], que pode ser relacionada ao rompimento de barragem, é a alta umidade no solo. Alta umidade no solo é apresentada como um fator que resulta em alta pressão de água nos poros do solo. Essa pressão é a grande responsável pelo início ou aceleração do deslizamento.

O sistema de monitoramento deve ser capaz proporcionar informações relacionadas ao estado atual da barragem ou encosta, como o risco de rompimento, umidade do solo ao longo da área além de destacar pontos de alta umidade ou alta variação na umidade.

Sistema de alerta

Tendo como base os dados de umidade do solo coletados a partir do sistema de monitoramento é possível localizar bolsões de grande umidade, regiões isoladas com nível elevado de umidade, que são um indicativo de um iminente rompimento da barragem. Esses bolsões de grande umidade causam um grande aumento na tensão de cisalhamento na região afetada passando a um ponto com alta chance de ruptura, que pode vir a ser o ponto inicial de um deslizamento que pode levar a falha de toda a estrutura.

O sistema de alerta deve ser capaz de localizar regiões de possível ruptura baseado na variação da umidade do solo, destacar essas regiões e gerar alertas conforme elas se aproximem de níveis críticos. Esse sistema diferentemente do sistema de monitoramento não tem por objetivo tornar possível que medidas corretivas sejam tomadas afim de impedir o rompimento, mas sim tornar possível a evacuação da área que será afetada pelo deslizamento. Um sistema de emergência para quando já não é mais possível impedir o deslizamento pois este, quando o alerta for disparado, já é eminente.

1.3 O projeto

Visão geral

O instrumento a ser criado neste trabalho será um cabo de comunicação e alimentação com N sensores de umidade ao longo de seu comprimento que deverá futuramente ser anexado à uma estaca e usado para medir a umidade do solo em diferentes profundidades em um ponto da área de interesse. Usando várias das estacas criadas será possível coletar dados de toda a área à ser analisada.

A partir dos dados coletados de todas as estacas inseridas dentro da área de interesse será possível a criação de um modelo que estime a umidade do solo em qualquer ponto da área e profundidade coberta pelas estacas.

Após a inserção da estaca no solo é necessário que sua posição e ângulo de entrada no solo sejam informados com boa precisão para que haja o melhor tratamento dos dados coletados, de cada estaca. O melhor ângulo de entrada da estaca no solo é de 90 graus, ou seja, a estaca deverá ser inserida no solo ortogonalmente ao plano da encosta garantindo uma maior profundidade para a leitura como pode ser visto na figura 1.1.

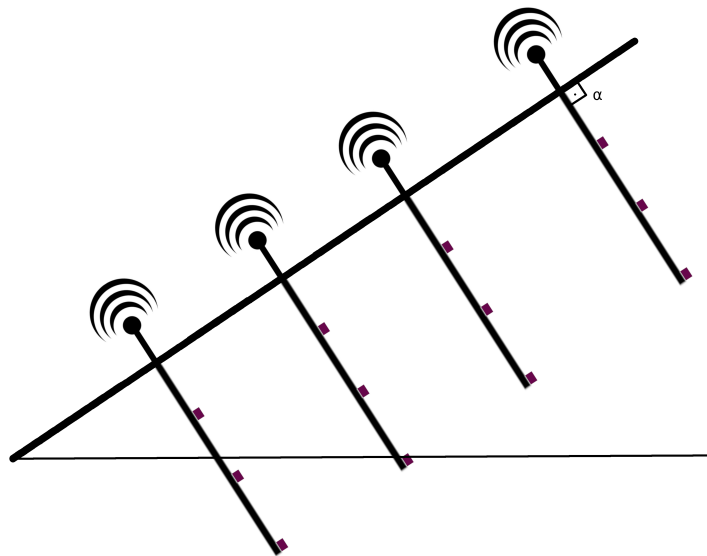


Figura 1.1: Vista de perfil de um recorte da encosta com as estacas inseridas

Cada estaca possuirá um identificador único permitindo que os dados relativos a sua posição e ângulo de entrada no solo sejam inseridos posteriormente no módulo de processamento central, MPC.

A estacas ficarão espalhadas uniformemente pela área de interesse a ser monitorada e o módulo central de processamento deverá estar ao alcance de no mínimo uma estaca para que possa se conectar à rede distribuída e assim ter acesso a todos os dados enviados pelas estacas, como mostra a figura 1.2.

Após feita a conexão da estaca e iniciado a coleta de dados, o módulo de processamento central deve fazer o processamento e armazenamento dos dados coletados em um banco de dados, tornando possível consultas do histórico do comportamento da umidade da área.

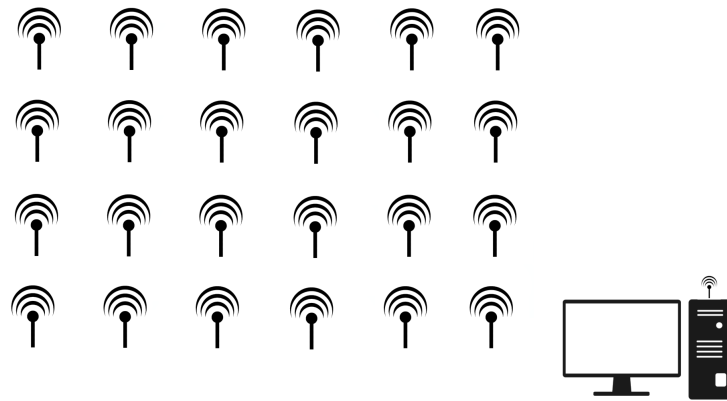


Figura 1.2: Visão geral do sistema.

Com os dados coletados e armazenados é então possível processá-lo para gerar previsão ou alerta. O usuário do sistema deverá ser capacitado para usar o *software* e interpretar os dados observados.

1.4 Objetivo

O objetivo do projeto é de criar um sistema de medição em profundidade da umidade do solo que permita realizar um recorte da região de interesse, encosta ou barragem, e indicar o nível de umidade no volume recortado. Além disso tornar possível a identificação de bolsões de grande volume de água, como um indicativo da necessidade de manutenção de barragens e auxiliar na previsão de deslizamentos de terra e rompimentos de barragens.

Dentro dos objetivos deste trabalho estão a criação do instrumento de medição que torne possível a coleta da umidade do solo em profundidade por um canal sem fio, um módulo central que seja capaz de se conectar ao instrumento criado e fazer a leitura da umidade e um sistema conectado ao módulo central que seja capaz de fazer o armazenamento e apresentação dos dados coletados.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são explicados conceitos fundamentais para o entendimento do projeto e dos fatores que levam aos deslizamentos de terra e rompimentos de barragens. A primeira parte tem foco nas características do solo e nos mecanismos de deslize. Em seguida, são expostas tecnologias de aferimento de umidade do solo, de comunicação sem fio e por último tecnologias à respeito de sistemas embarcados.

2.1 Características do solo

Sidle e Ochiai [7] definiram um fator de segurança F_s , apresentado na equação 2.1, que indica quando a tensão de cisalhamento, "T", é superior à tensão resistiva do solo, "S". O fator de segurança f_s é a razão entre a tensão resistiva do solo e a tensão de cisalhamento. A tensão de cisalhamento é a força que provoca a movimentação do solo e a tensão resistiva é contrária a ela.

$$F_s = S/T \quad (2.1)$$

A figura 2.1 ilustra como as forças citadas e usadas nas equações 2.2 a 2.6 atuam sobre um recorte em um ponto qualquer de uma encosta, considerando que esta é infinita, e torna mais visível a relação aplicada na equação 2.1 para definir o fator de segurança.

A tensão resistiva do solo é definida como:

$$S = c + (W * \cos\beta - u)\tan\phi \quad (2.2)$$

Onde "c" é coesão do solo, " ϕ " é o ângulo de fricção, ou atrito, interno (para infiltrações pode ser considerado paralelo à superfície de deslizamento), enquanto "u" é definido como:

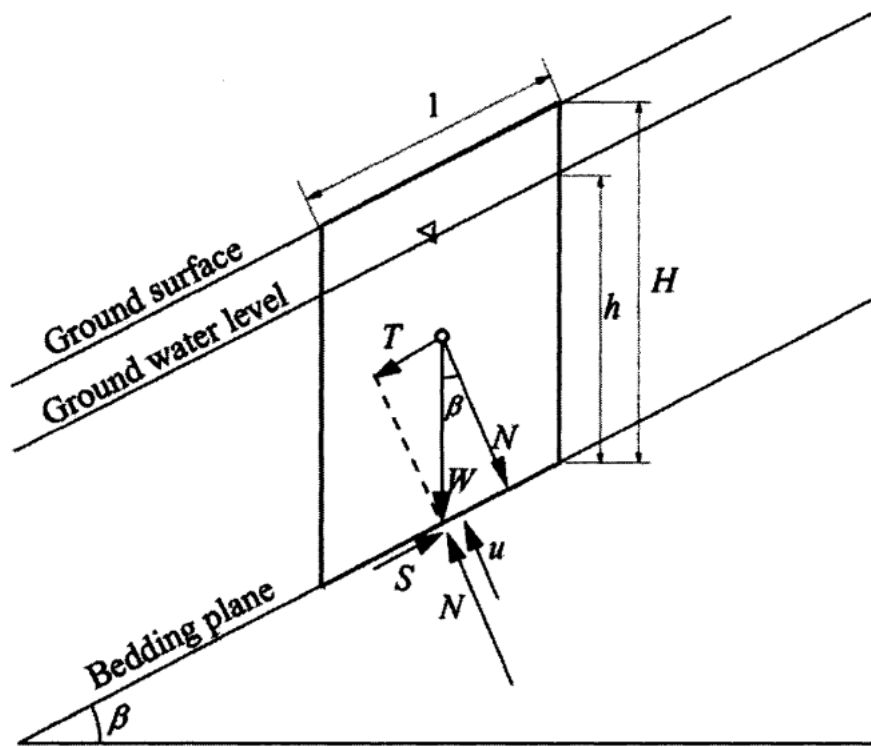


Figura 2.1: Forças atuando em um recorte de uma encosta infinita (imagem retirada de [7])

$$u = \gamma_w * h * \cos^2 \beta \quad (2.3)$$

onde " γ_w " é a densidade da água, h é a distância vertical da água presa em poros do solo e o plano de deslizamento. Já W , peso agindo sobre o recorte, pode ser definido como:

$$W = [\gamma_t * (H - h) + \gamma_{sat} * h] * \cos \beta \quad (2.4)$$

onde γ_t é o peso unitário do solo umido (não saturado) acima da água presa nos poros, H é a distância vertical da superfície do solo até o plano de deslizamento e γ_{sat} é o peso unitário do solo saturado. A tensão de cisalhamento é:

$$T = W * \sin \beta \quad (2.5)$$

Podemos então definir o fator de segurança como sendo:

$$F_s = \frac{c}{W * \sin\beta} + \frac{\tan\phi}{\tan\beta} - \frac{u * \tan\phi}{W * \sin\beta} \quad (2.6)$$

Tendo assim que o deslizamento ocorrerá quando $F_s < 1$, ou seja, tensão de cisalhamento maior que a tensão resistiva do solo.

É importante observar que a maior parte dos parâmetros envolvidos no cálculo do fator de segurança é relacionado às características do solo, ou seja, cada tipo de solo e cada região analisada terão parâmetros específicos. Tanto o tipo quanto a inclinação do solo são de grande importância para a inferência do fator de segurança. Enquanto as características físicas do solo implicam nos parâmetros constantes de F_s , a umidade do solo, a ser medida pelo instrumento aqui proposto, é quem empregará a variação desse fator.

O processamento dos dados de umidade medidos tornará possível a determinação do parâmetro h permitindo assim a determinação de u e W e por consequência T e S demonstrados nas equações 2.2 a 2.5. Por fim, é possível calcular o fator de segurança F_s usando a equação 2.1. Os outros parâmetros são característicos do solo da encosta ou barragem e devem ser caracterizados por um profissional da área de mecânica dos solos.

Será usado um limiar no valor da umidade coletado pelo instrumento que diferenciará terra encharcada, acima do limiar, e terra úmida, abaixo do limiar. Usando esse limiar será possível inferir o valor de h . Os dados dos sensores do instrumento serão interpolados para diminuir o efeito que a discretização espacial dos dados.

2.2 Mecanismos de gatilho de deslizamentos

Existem vários mecanismos que podem levar a um deslizamento de terra ou a um rompimento de barragem entretanto alguns em particular que são diretamente ligados com o aumento da umidade do solo, e são esses mecanismos que serão tratados a seguir. São eles: Aumento da pressão de água nos poros e aumento no peso sobre o plano de deslizamento.

Aumento da pressão de água nos poros

O aumento da umidade no solo provoca um aumento na pressão de água nos poros que consequentemente aumenta força de cisalhamento no solo [7]. Com o aumento da força cisalhante no solo aumentam as chances de um deslizamento ou rompimento de barragem. Causas para esse aumento podem ser chuvas fortes e/ou constantes ou um aumento no nível do lençol freático. No caso de uma encosta, ou pode ser causado por um aumento no nível do líquido dos rejeitos de

uma barragem em direção à parte externa da barragem em si, ou seja, exfiltração na barragem permitindo que o líquido atravesse a barragem aumentando a umidade da mesma no processo. Esse aumento na pressão, Δu , causa uma mudança no estado do estresse cisalhante do solo [7], fazendo-o ir de A_0 para A_f , como é mostrado na figura 2.2.

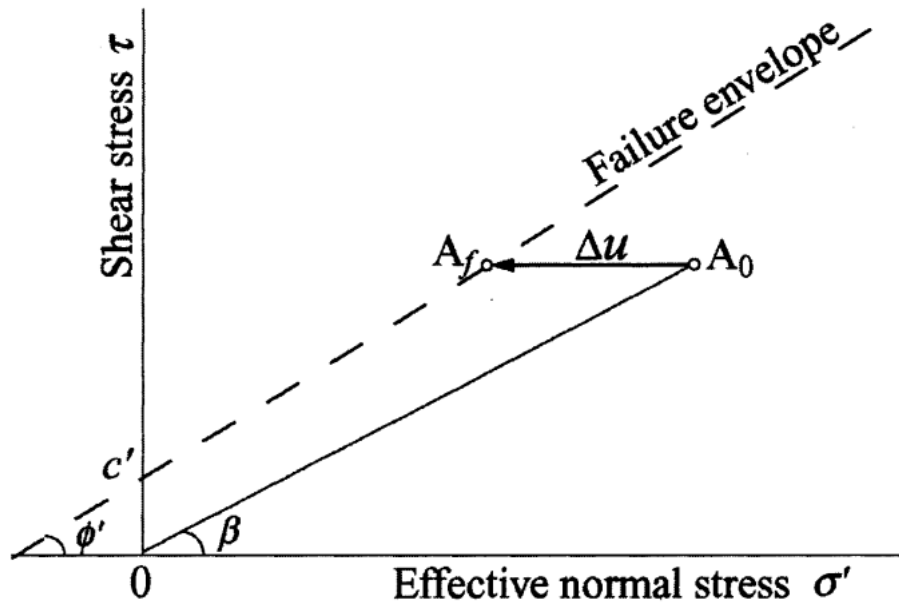


Figura 2.2: Mudança no estado de estresse no plano da encosta causado por aumento da pressão dos poros (imagem retirada de [7])

Aumento no peso sobre o plano de deslizamento

O peso do solo, estático no geral, pode aumentar por sobrecarga devido à chuvas [7]. Quando o peso W da massa do solo aumenta em ΔW o estado do estresse cisalhante do solo se aproxima do plano de falha, como mostrado na figura 2.3, resultando na redução do fator de segurança F_s , 2.6.

2.3 Tecnologias de medida de umidade do solo

Sensores

Existe uma grande variedade de sensores de umidade do solo no mercado. A qualidade da leitura dos sensores pode variar dependendo do solo no qual são usados. A leitura desses sensores depende da salinidade e o PH do solo.

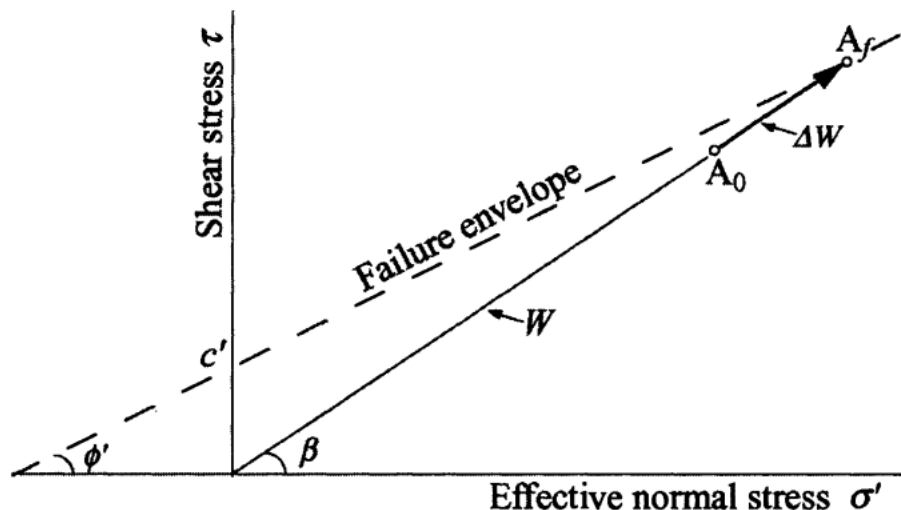


Figura 2.3: Mudança no estado de estresse no plano da encosta causado pelo aumento do peso da massa do solo (imagem retirada de [7])

Os tipos mais comuns de sensores de umidade são os resistivos e capacitivos que fazem uso dessas propriedades para obter o nível de umidade do solo.

Sensores capacitivos

Sensores de umidade do solo capacitivos medem a umidade do ar, possibilitando o aferimento da umidade do solo de forma indireta. Em [1] Rende e Biage caracterizam o uso de sensores de umidade do solo capacitivos, mostrando que quanto mais umido se encontra o solo, mais partículas de água passam a se encontrar entre as placas do capacitor, que não fica selado, e quanto mais seco o solo, menos água se encontrará, desta forma modificando a permissividade do meio dielétrico do capacitor. A variação da umidade do solo causa uma variação da capacitância do sensor. Esta variação da capacitância é possível devido ao fato de que "no solo, a movimentação hídrica se caracteriza pelo fluxo de água de uma área saturada (potencial alto) para uma área seca (potencial baixo)." [1], então conforme o solo se torna seco ao redor do sensor a água que se encontra entre as placas do capacitor diminui, alterando a capacitância. A figura 2.4 ilustra o funcionamento de um sensor de umidade capacitivo.

Sensores resistivos

Sensores de umidade do solo resistivos medem, também de forma indireta, a umidade do solo. Os mesmos princípios de movimentação da água no solo que causam a alteração da capacitância nos sensores capacitivos é aplicado para os sensores resistivos, com a diferença de que no caso desses sensores a variação do volume de água no solo é medida através da variação da resistividade do solo à passagem de corrente. Quanto menor for a resistência maior é a umidade do solo.

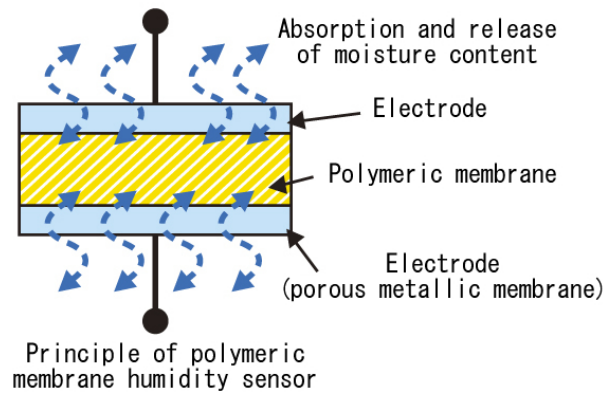


Figura 2.4: Ilustração do sensor capacitivo

Satélite

Usando dados coletados pelo ASMR-E, *Advanced Microwave Scanning Radiometer* ou em português Radiômetro de Varredura de Microondas Avançado, é possível monitorar a umidade do solo em regiões do planeta.

O AMSR-E é um sistema radiômetro de microondas passivo que conta com 12 canais e seis frequências diferentes. Medidas polarizadas vertical e horizontalmente são coletadas em todos os canais. Ele opera nas frequências 6,925, 10,65, 18,7, 23,8, 36,5 e 89,0 GHz. A radiação de microondas emitidas pela terra são coletadas por um refletor parabólico de 1.6 metros de diâmetro que escaneia a Terra ao longo de uma superfície cônica imaginária, mantendo um ângulo de incidência com a Terra constante de 55°.

O ASMR-E monitora não só umidade do solo como também taxas de precipitação, vapor de água, temperatura e vento na superfície do oceano entre outros.

Quando se trata da umidade do solo, os dados coletados pelo ASMR-E apesar de precisos são apenas da superfície, a menos de 5 centímetros de profundidade, e possuem uma resolução espacial de 25 quilômetros, como citado em [4].

2.4 Tecnologias de comunicação

A comunicação entre os nós do sistema deverá ser feita de forma sem fio. Existem várias tecnologias e dispositivos de comunicação sem fio disponíveis no mercado como *Wi-Fi*, *BlueTooth*

e rádios AM e FM. A escolha de qual tecnologia usar deve levar em conta, além da robustez da comunicação, o consumo de energia e o alcance da comunicação. Caso a tecnologia de comunicação consuma muita energia, tornará a manutenção do sistema, devido ao fim da bateria das estacas, muito onerosa visto que quanto maior a área de interesse, maior será a quantidade de estacas necessárias para monitorá-la.

Wi-Fi

O protocolo de comunicação *Wi-Fi* oferece grande robustez e integridade para as comunicações sem fio. Padronizado pela IEEE como rede sem fio IEEE 802.11 em 1997, está atualmente presente em praticamente todos os aparelhos com conectividade à *Internet* e, especialmente, importante no mundo *IoT*, *Internet of things*, que usa sistemas embarcados conectados à Internet. Porém, módulos *Wi-Fi* podem consumir bastante energia, quando comparado a outros protocolos de comunicação, a depender da velocidade da comunicação e da quantidade de dados transferidos. A comunicação *Wi-Fi* pode ser configurada de forma que exija autenticação por parte do dispositivo que deseja se conectar a rede, garantindo assim um nível de segurança para à rede e tornando mais difícil o vazamento de dados sensíveis.

Bluetooth

Desenvolvida pelo holandês Jaap Haartsen a tecnologia *Bluetooth* é versátil, podendo criar conexões ponto-a-ponto, *broadcasting* e em *MESH*. Existem versões *Bluetooth* de longo alcance assim como de baixo consumo de energia, *BLE*, *Bluetooth Low Energy*. O modo de baixo consumo de energia é especialmente apropriado para esse projeto visto que o instrumento deve consumir o mínimo de energia a fim de prolongar a vida da bateria.

Rádio Frequência

Tanto o *Bluetooth* quanto o *Wi-Fi* são protocolos de comunicação via rádio frequência, a diferença entre os módulos destes protocolos e dos módulos de comunicação via modulação de rádio frequência é que esse último não é usado para manter uma conexão ativa, mas sim para enviar ou receber dados apenas sem se preocupar com o dispositivo que recebe ou envia os dados do outro lado da comunicação, tendo assim que protocolos de *handshake*, reconhecimento entre dispositivos, e *acknowledgment*, confirmação do recebimento do dado enviado, assim como a confirmação da integridade dos dados recebidos sejam implementados pelo usuário, no caso o responsável pela implementação da comunicação.

O consumo de energia deste tipo de comunicação depende do módulo que está sendo usado,

assim como a potência do sinal transmitido, que tem ligação direta com o alcance de envio dos dados. Sendo assim que quanto maior for a distância que os dados devem viajar maior será a potência necessária e por consequência maior o consumo de energia.

2.5 Tecnologias de sistemas embarcados

A implementação de sistemas embarcados e sua eficiência são cruciais para a integração de todo o sistema do projeto. Neste contexto, é necessário que às escolhas feitas não apenas atendam as especificações de comunicação estaca-central, mas também de consumo de energia e comunicação microcontrolador-sensor. Estas escolhas vão determinar a implementação do instrumento de medição.

ESP32

Este microcontrolador, figura 2.5, é uma plataforma de microcontrolador desenvolvido pela Espressif, uma empresa chinesa com sede em Xangai, China. Foi desenvolvido para soluções de baixo custo e baixo consumo de energia, além de contar com módulos de WiFi e BlueTooth embutidos. Mais uma vez, o baixo consumo de energia é um fator determinante na sua escolha.



Figura 2.5: Kit de desenvolvimento esp32

A seguir temos listado algumas das principais características deste microcontrolador:

1. CPU: Xtensa dual-core (ou single-core) de 32 bits
2. 3 interfaces UART
3. 2 interfaces I²C
4. 4 interfaces SPI
5. Wi-Fi: 802.11 b/g/n
6. Bluetooth: v4.2 BR/EDR e BLE
7. 4 MB de memória flash

Ele conta com um microprocessador *dual core* Xtensa de 240 MHz de *clock* da empresa Tensilica, que permite paralelismo real de processos além da alta velocidade de processamento quando comparado com microcontroladores de igual, ou similar, tamanho.

Para a solução proposta neste trabalho este microcontrolador é uma excelente opção visto sua grande flexibilidade, baixo consumo de energia e grande quantidade de periféricos já embarcados e o fato de já contar com módulos necessários para a parte de comunicação do trabalho, tornando desnecessários o uso de módulos externos para esse fim.

FreeRTOS

O sistema operacional de tempo real FreeRTOS foi desenvolvido originalmente em 2003 por Richard Barry e hoje é mantido pela Amazon Web Services. O FreeRTOS implementa um escalonador de prioridades, usando o método *round robin* para tarefas de mesma prioridade e possibilitando a implementação de inversão de prioridade para evitar *task starvation*. É um sistema versátil compatível com um grande número de microcontroladores.

A empresa Espressif é parceira do FreeRTOS e desenvolveu uma versão do sistema operacional para ser usada em seu microcontrolador, não apenas adaptando as características já presentes no FreeRTOS para melhor servir ao microcontrolador, mas também implementando melhorias e novas características especialmente para a plataforma desenvolvida.

Uma das características que difere o Esp32 dos outros microcontroladores que possuem suporte do FreeRTOS é o fato dele possuir uma versão com 2 núcleos de processamento. Para melhor aproveitar essa característica o sistema operacional desenvolvido pela Espressif tem a possibilidade de fixar uma tarefa a um núcleo específico trazendo a possibilidade de fazer com que certas tarefas nunca interfiram no funcionamento de outras, mesmo que possuam a mesma prioridade, pois estão sendo processadas em núcleos diferentes, além de permitir que tarefas de baixa prioridade sejam

processadas simultaneamente com tarefas de alta prioridade, desde que estejam com seu processamento fixo em núcleos diferentes.

Somando as características nativas do FreeRTOS e as melhorias feitas pela Espressif ao microprocessador *dual core* do esp32 temos uma plataforma flexível, o que o torna uma excelente escolha para este projeto uma vez que se propõe à unir leitura de sensores com comunicação sem fio, tarefas que são bem diferentes e dependem de periféricos independentes.

Comunicação I²C

O protocolo de comunicação I²C, foi desenvolvido pela empresa *Philips Semiconductors* [3], e é de um protocolo de comunicação serial bidirecional em barramento que utiliza apenas dois fios nomeados de SDA, *serial data* (linha serial de dados) e SCL, *serial clock* (linha serial de relógio). As linhas do barramento, SDA e SCL, precisam estar conectadas à resistores de *pull up*, pois o protocolo exige conexão em dreno aberto.

Como mostrado em [8], o protocolo I²C pode possuir múltiplos mestres e múltiplos escravos no mesmo barramento. Mestres são aqueles que iniciam as transações e controlam o sinal de *clock* enquanto os escravos são aqueles que são acessados pelos mestres. A figura 2.6 mostra a configuração das conexões entre mestres e escravos em um barramento I²C.

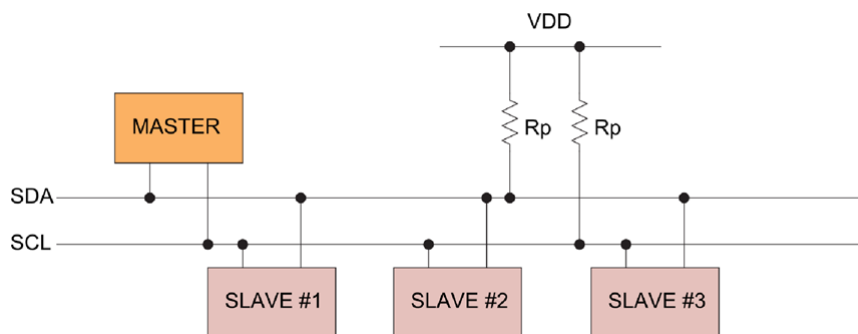


Figura 2.6: Barramento do protocolo I²C

Neste protocolo apenas 2 dispositivos podem se comunicar por vez, visto que enquanto esses 2 dispositivos estão se comunicando o barramento todo fica ocupado por eles. Todos os dispositivos conectados ao barramento I²C precisam de um endereço individual, de 7 ou 10 *bits*. Como por padrão de fábrica um mesmo modelo de dispositivo I²C possui o mesmo endereço este fato impediria que mais de um dispositivo do mesmo modelo se conecte a um mesmo barramento I²C. Felizmente existe uma solução simples implementada por vários fabricantes de sensores com conectividade I²C. O endereço do escravo pode ser configurado por pinos externos ao sensor. Desta forma, podemos conectar no barramento mais de um dispositivo do mesmo tipo.

A transmissão de dados através de um barramento I²C é dividida em 7 passos que são listados a seguir e podem ser visualizados na figura 2.7.

1. Condição de partida: o dispositivo mestre que deseja iniciar uma comunicação espera até que o canal esteja livre, nível lógico *HIGH* nas linhas SDA e SCL, e então força o nível lógico *LOW* na linha SDA enquanto mantém a linha SCL em nível lógico *HIGH* para assim avisar ao demais dispositivos que iniciará uma transmissão, além de prover o *clock* na linha SCL.
2. Endereço do escravo: o endereço de 7 *bits* do dispositivo escravo é enviado.
3. *Bit* de escrita/leitura: um *bit* que indica se o dispositivo mestre pretende fazer um processo de leitura ou escrita é enviado.
4. *Acknowledgement*: o dispositivo mestre espera pelo *bit* de *acknowledgement* vindo do dispositivo escravo. Se for 0 significa ACK, se for 1 significa NACK.
5. Transferência de dados: a transferência de dados é feita *byte a byte*.
6. Espera por ou envio de *acknowledgement*: após o envio de cada *byte* é aguardado o retorno de um bit de *acknowledgement*. Enquanto houverem *bytes* a serem enviados retorna ao passo 5.
7. Condição de parada: após o todos os dados terem sido enviados os dispositivos mestre e escravo deixam de forçar sinal nas linhas SDA e SCL que retornam para o estado lógico *HIGH* e isso indica que o barramento está novamente livre.

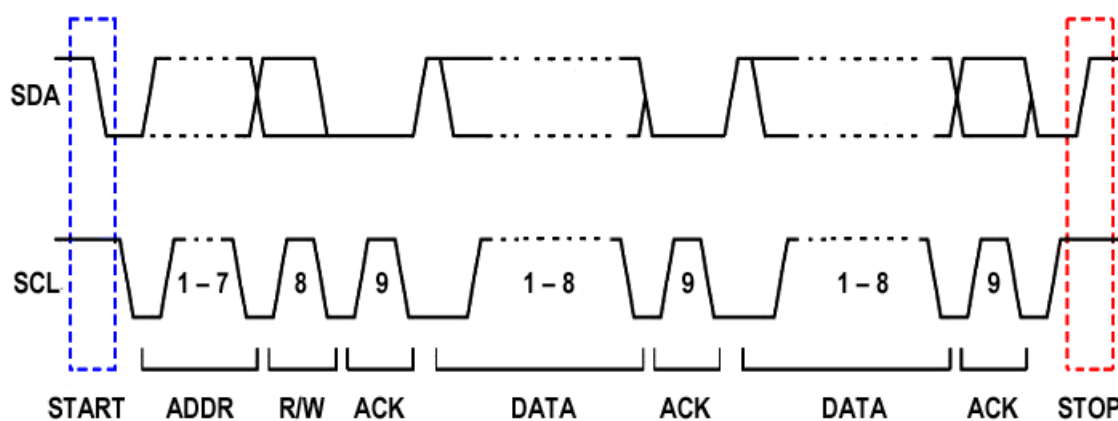


Figura 2.7: Passos do protocolo I²C

Sensores SHT3x-DIS

A série de sensores SHT3x é composta pelos sensores SHT30, SHT31 e SHT35 e é fabricada pela empresa *Sensirion*. Como pertencem à mesma série, esses sensores possuem exatamente o mesmo encapsulamento que pode ser visto na figura 2.8 e as mesmas características elétricas que podem ser observadas na figura 2.9 fornecida pela fabricante *Sensirion* no *datasheet* da série [5]. Como é possível verificar na figura 2.9 os sensores da série toleram uma grande faixa de tensão de alimentação sendo 2,15 e 5,5 os valores mínimos e máximos tolerados, respectivamente. Essa grande tolerância de tensão de alimentação torna os sensores da série compatíveis com a maioria dos microcontroladores encontrados no mercado. Além dessa grande tolerância outro fator que torna essa série excelente é o baixo consumo de corrente que em *idle state*, quando não está fazendo nenhuma medição, varia entre 0.2 e 2 μA , já durante a medição pode variar entre 0.6 e 1.5 mA chegando a uma média de 1.7 μA quando é feita uma única leitura por segundo.



Figura 2.8: Encapsulamento dos sensores da série SHT3x-DIS

A série SHT3x-DIS é uma série de sensores de umidade e temperatura, estes sensores possuem um tamanho bem reduzido, 2.5 x 2.5 x 0.9mm, e um encapsulamento de componente SMD, visualizado na figura 2.8, também pode ser encontrado em versões com encapsulamento a prova de água, visto na figura 2.11 que o torna maior e capaz de operar no solo, estretanto este modelo não é vendido em placas de desenvolvimento, apenas em fitas de componentes. Para melhor ilustrar o quão pequeno é o sensor, na figura 2.10 ele é apresentado ao lado de uma moeda.

A comunicação é digital e feita através de protocolo I²C, o que torna a comunicação muito eficiente com o uso de apenas dois contatos. Outra característica importante da comunicação com o sensor é a presença de um pino de endereço que possibilita alterar o último *bit* do endereço do dispositivo no barramento I²C o que permite a comunicação com mais de 2 sensores no mesmo barramento, trocando apenas o sinal lógico no pino de endereço, *LOW* ou *HIGH*. O endereço de comunicação com o sensor muda de acordo com o sinal no pino de endereço como pode ser observado na figura 2.12, sendo que por padrão, quando o sinal lógico do pino é *LOW*, o endereço do sensor é 0x44 e quando o sinal lógico do pino é *HIGH* o endereço é 0x45.

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units	Comments
Supply voltage	V_{DD}		2.15	3.3	5.5	V	
Power-up/down level	V_{POR}		1.8	2.10	2.15	V	
Slew rate change of the supply voltage	$V_{DD,slw}$		-	-	20	V/ms	Voltage changes on the VDD line between $V_{DD,min}$ and $V_{DD,max}$ should be slower than the maximum slew rate; faster slew rates may lead to reset;
Supply current	I_{DD}	idle state (single shot mode) T=25°C	-	0.2	2.0	μA	Current when sensor is not performing a measurement during single shot mode
		idle state (single shot mode) T=125°C	-	-	6.0		
		idle state (periodic data acquisition mode)	-	45	-	μA	Current when sensor is not performing a measurement during periodic data acquisition mode
		Measuring	-	600	1500	μA	Current consumption while sensor is measuring
		Average	-	1.7	-	μA	Current consumption (operation with one measurement per second at lowest repeatability, single shot mode)
Alert Output driving strength	IOH			$1.5 \times V_{DD}$		mA	See also section 3.5
Heater power	P_{Heater}	Heater running	3.6	-	33	mW	Depending on the supply voltage

Figura 2.9: Características elétricas dos sensores da série SHT3x-DIS

A série possui diferentes níveis de tolerância de acurácia, tanto para umidade relativa assim como para temperatura, associado para cada um dos modelos, fato esse que é exposto a seguir.

Como é possível observar nas figuras 2.13, 2.14 e 2.15 a diferença de tolerância típica entre os valores de 10 a 90% de umidade relativa não muda entre os sensores SHT30 e SHT31 enquanto o sensor SHT35 possui uma diferença de 0.5% para menos. Em relação à medida de temperatura as figuras 2.16, 2.17 e 2.18 mostram que, apesar dos gráficos de tolerância não possuírem um comportamento tão uniforme quanto os gráficos de tolerância de umidade, as diferenças entre as tolerâncias ainda é muito pequena, sendo de 0.8°C entre os sensores SHT30 e SHT35.

Como é relatado em [6] os sensores são todos testados após a fabricação e caso o teste aponte que o sensor não atende aos níveis de tolerâncias estipulados ele não será posto à venda, assim, a fa-

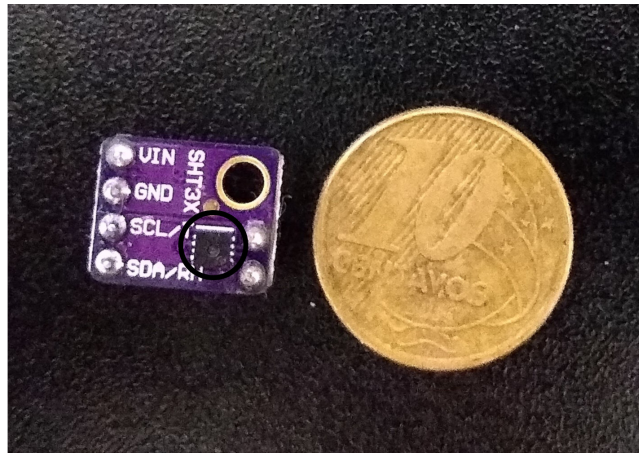


Figura 2.10: Comparação do sensor com uma moeda de 10 centavos

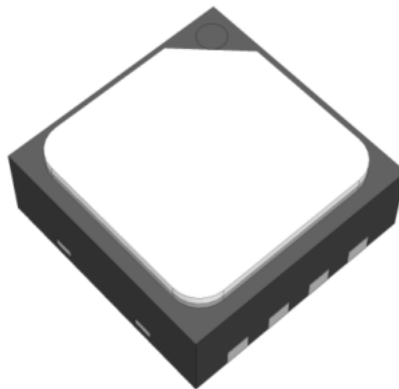


Figura 2.11: encapsulamento com película protetora dos sensores da série SHT3x-DIS

SHT3x-DIS	I2C Address in Hex. representation	Condition
I2C address A	0x44 (default)	ADDR (pin 2) connected to logic low
I2C address B	0x45	ADDR (pin 2) connected to logic high

Figura 2.12: Endereços I²C dos sensores da série SHT3x-DIS

bricante garante essa precisão de leitura de umidade e temperatura em todos os sensores vendidos.

Considerando os níveis de tolerância indicados em [5] e a diferença de custo entre os 3 modelos de sensores da série, o sensor SHT30, apesar de ser o sensor que possui a menor acurácia, se mostra uma boa escolha visto que a diferença de acurácia entre os sensores da série SHT3x-DIS é bem pequena enquanto a diferença de custo é alta, principalmente quando se pensa em escalabilidade considerando que o projeto prevê o uso de um grande número de sensores.

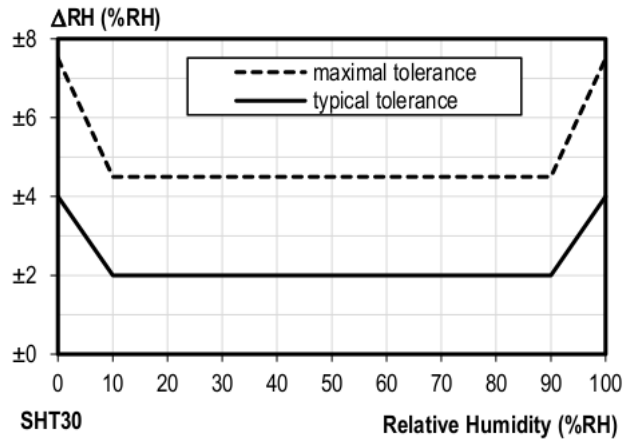


Figura 2.13: Tolerância de umidade relativa para o sensor SHT30 à 25°C

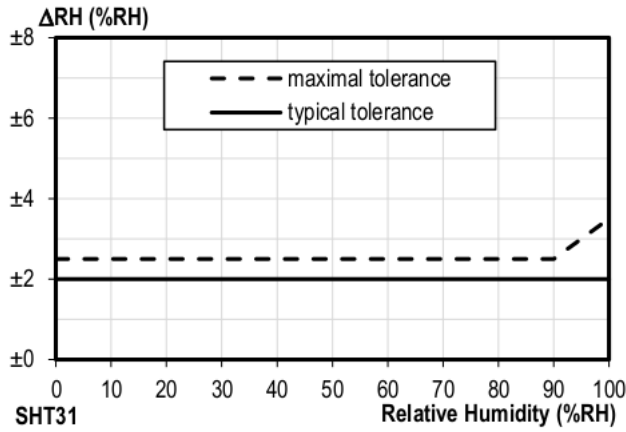


Figura 2.14: Tolerância de umidade relativa para o sensor SHT31 à 25°C

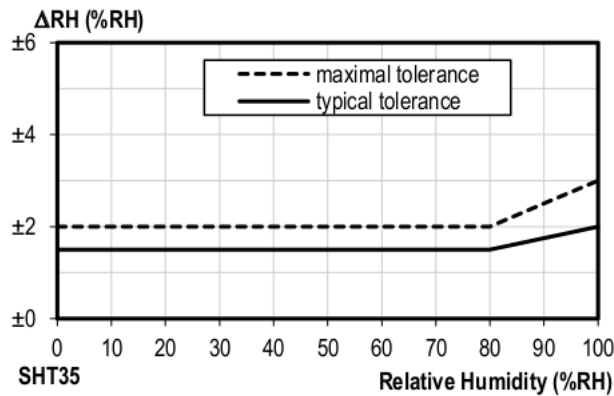


Figura 2.15: Tolerância de umidade relativa para o sensor SHT35 à 25°C

Como foi apresentado anteriormente nesta seção, o sensor escolhido para o projeto, SHT30,

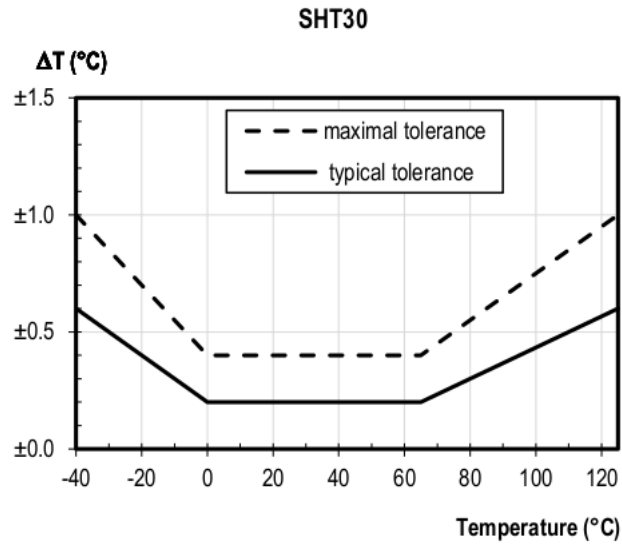


Figura 2.16: Acurácia de leitura de temperatura para o sensor SHT30

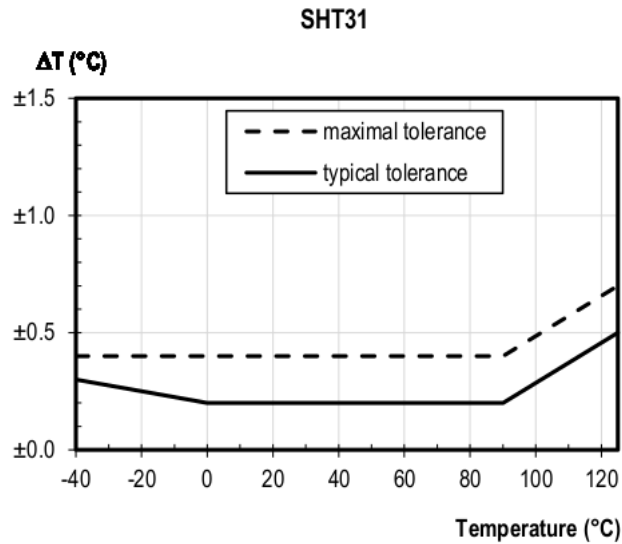


Figura 2.17: Acurácia de leitura de temperatura para o sensor SHT31

usa como forma de comunicação o protocolo I²C, ou seja, ele é um dispositivo I²C servo além de possuir um pino de endereço que permite que 2 ou mais sensores, sendo limitado ao número de portas lógicas disponíveis para esse uso no dispositivo mestre, possam ser acoplados ao mesmo barramento I²C.

Os sensores da série SHT3x-DIS possuem dois principais modos de leitura: modo de leitura única e modo de leitura periódica.

SHT35

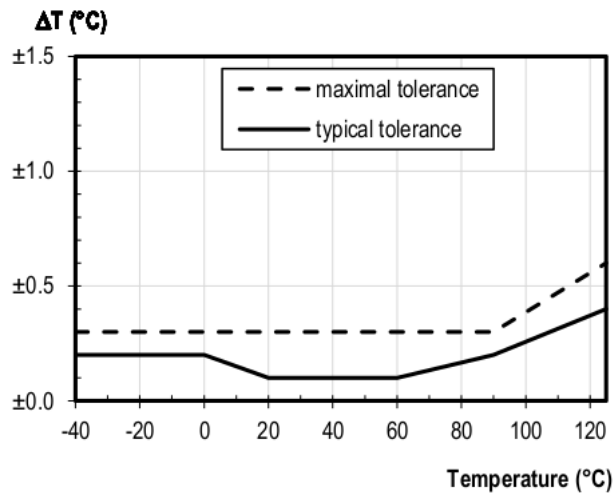


Figura 2.18: Acurácia de leitura de temperatura para o sensor SHT35

Leitura única

No modo de leitura única, o sensor retorna apenas um par de dados, 16 *bits* de temperatura e 16 *bits* de umidade, nesta ordem. Cada um dos valores do par de dados é seguido por um CRC *checksum* de 8 *bits*. A figura 2.19, mostra de forma bem explícita como os dados são enviados do sensor para o microcontrolador.

Dentro do modo de leitura única existem diferentes comandos para leitura, esses comandos são compostos por 16 *bits* e podem ser visualizados na figura 2.20. A forma como o comando é enviado para o sensor pode ser observada na figura 2.19. Os comandos se diferem em *Clock Stretching*, habilitado e não habilitado, e repetibilidade, baixa, média e alta.

A repetibilidade se refere ao tempo em que o sensor fica fazendo a medida do ambiente para gerar uma resposta de leitura, as durações de cada uma dos 3 níveis de repetibilidade podem ser conferidas na figura 2.21, enquanto o *Clock Stretching* se refere a como o sensor responde à um comando de leitura. Com o *Clock Stretching* desabilitado o sensor responde com um *not acknowledge* (NACK) caso o sensor não tenha uma leitura pronta para responder. Com o *Clock Stretching* habilitado o sensor responde com um *acknowledge* independentemente se tem ou não uma dado de leitura pronto para enviar e força o o estado da linha SCL para *LOW* enquanto faz a leitura, após a qual ele libera a linha SCL e envia ao dispositivo mestre os dados da leitura. A diferença entre os modos de *Clock Stretching* é bem ilustrado na figura 2.19.

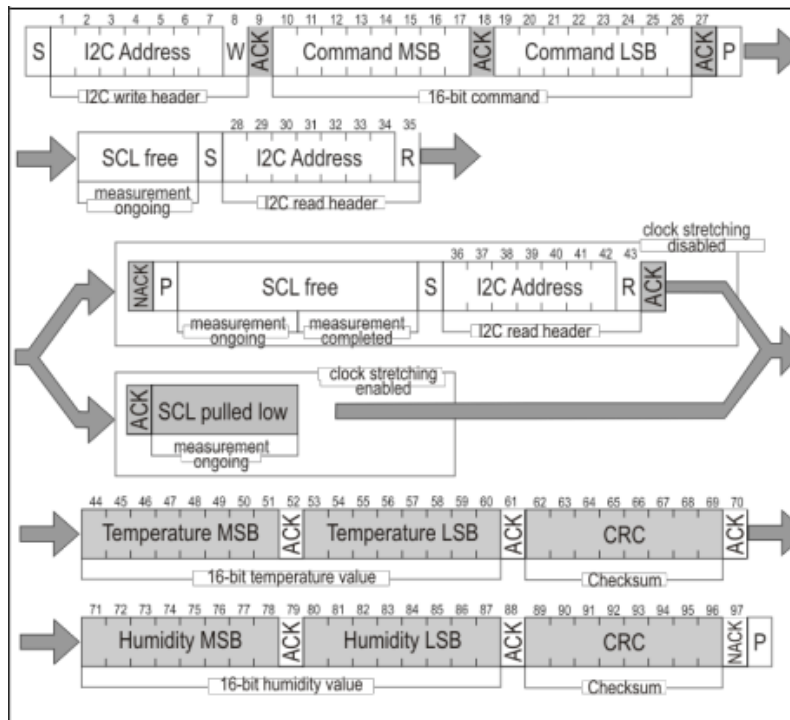


Figura 2.19: Dados transmitidos durante uma leitura - área branca controlada pelo microcontrolador e área cinza controlada pelo sensor

Condition		Hex. code	
Repeatability	Clock stretching	MSB	LSB
High	enabled	0x2C	06
Medium			0D
Low			10
High	disabled	0x24	00
Medium			0B
Low			16

Figura 2.20: Diferentes modos de leitura

Measurement duration	$t_{MEAS,l}$	Low repeatability	-	2.5	4.5	ms
	$t_{MEAS,m}$	Medium repeatability	-	4.5	6.5	ms
	$t_{MEAS,h}$	High repeatability	-	12.5	15.5	ms

Figura 2.21: Duração dos diferentes modos de leitura

Leitura periódica

Assim como no modo de leitura única o modo de leitura periódica retorna também os dados coletados em pares de 16 *bits* de temperatura e 16 *bits* de umidade ambos seguidos de 8 *bits* de CRC

checksum, entretanto o modo de leitura periódica não retorna apenas um par, mas sim como o seu nome indica o sensor passa a enviar pares de leitura periodicamente contando com 5 frequências diferentes de leitura que podem ser vistos na figura 2.22. Assim como o modo de leitura única este modo também possui os 3 níveis de repetibilidade, além de que a forma de enviar o comando para este modo de leitura é também igual à forma feita no modo de leitura única ilustrado na figura 2.19.

Condition		Hex. code	
Repeatability	mps	MSB	LSB
High	0.5	0x20	32
Medium			24
Low			2F
High	1	0x21	30
Medium			26
Low			2D
High	2	0x22	36
Medium			20
Low			2B
High	4	0x23	34
Medium			22
Low			29
High	10	0x27	37
Medium			21
Low			2A

Figura 2.22: Diferentes periodos de leitura - onde mps pode ser lido como medidas por segundo

Estacas

Cada estaca proposta por este projeto terá, além dos sensores, um módulo de processamento e de comunicação sem fio independente que lhe permitirá exportar, através de comunicação sem fio *bluetooth*, os dados de leitura de cada um dos sensores localizados ao longo da estaca. As estacas farão a coleta de dados via sensores e montarão seu *payload* com informação pré-processada e com seu identificador.

O número N de sensores de umidade a ser usado em cada estaca deve ser escolhido de forma a permitir uma leitura da umidade do solo ao longo de seu comprimento minimizando o número de fios e o consumo de energia. Quanto maior o valor de N maior será a discretização da umidade do solo que é obtida pela estaca, contudo também eleva o custo de produção de cada estaca bem como o custo de manutenção, com trocas de baterias. Mas sabe-se que a partir de um certo valor de N a informação extra obtida com um aumento de sensores se torna pequena o suficiente a ponto de ser desprezada. Os sensores devem ser espalhados de forma estratégica ao longo da estaca, por exemplo, caso exista um *gap*, afastamento, muito grande entre os sensores próximos à superfície

e os sensores localizados na outra extremidade da estaca a informação ao longo da parte mediana da placa será mais imprecisa.

Como é apresentado em [1] a água no solo vai da região mais umida para a região mais seca até que o solo se aproxime do equilíbrio. Levando essa tendência em consideração é possível supor que um número $N = 3$ é o suficiente para se ter dados confiáveis da umidade do solo. Tendo um sensor em cada extremidade e um na região central para interpolação dos dados futuramente.

O microcontrolador escolhido para a implementação da estaca possui 2 interfaces I²C, necessárias para a comunicação com os sensores, entretanto é possível acoplar N sensores a um mesmo barramento, ou seja, a uma mesma interface. No entanto, para cada sensor extra acoplado ao barramento I²C é necessário mais um fio para o controle de seu pino de endereço.

Conectar 3 sensores em um mesmo barramento I²C, conseqüentemente uma mesma interface, são necessários 7 fios para fazer a conexão. 2 fios para alimentação, VCC e GND, 2 fios para as linhas de comunicação, SCL e SDA, e 1 fio de endereçamento para cada sensor.

Para que o microcontrolador possa fazer a comunicação com um sensor específico é preciso que todos os outros possuam endereços diferentes, isso é possível devido ao fios conectados aos pinos de endereçamento de cada sensor, que possuem seu estado lógico controlado pelo microcontrolador. A comunicação com os 3 sensores é feita sequencialmente alterando os endereços de todos os sensores antes de iniciar a comunicação com cada sensor.

Módulo de processamento central

Para processar, tratar e visualizar todos os dados coletados pelos instrumentos de medição e e transmitidos através da rede distribuída de comunicação o MPC deverá possuir bom poder de processamento e de armazenamento de dados, ou conexão com a internet para hospedagem do banco de dados em servidor externo.

O módulo de processamento central poderá também servir como um *gateway*, um portal, através do qual os dados coletados possam ser monitorados remotamente, entretanto é imprescindível que este seja capaz de processar e armazenar, ao menos em parte, os dados localmente caso ocorra uma perda de conexão com a internet e assim a coleta de dados não seja perdida durante o período de queda de conexão.

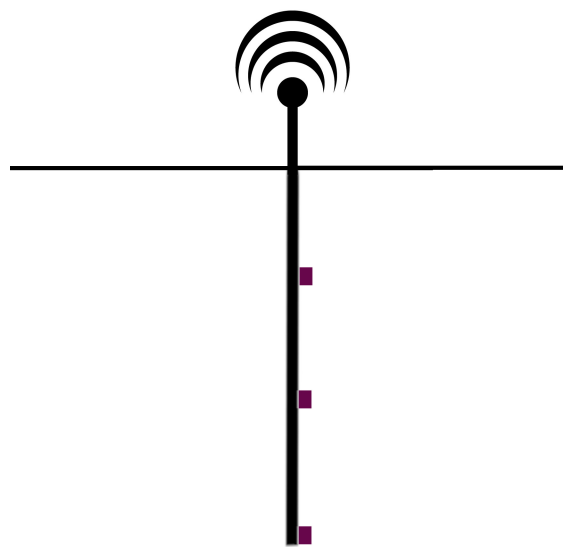


Figura 2.23: Representação da estaca posicionada no solo

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, serão apresentados os testes de validação do sistema, da comunicação do microcontrolador com os sensores, comunicação e envio de dados via *bluetooth* da estaca ao módulo central e a capacidade do módulo central de fazer o armazenamento dos dados coletados discriminados por identificador da estaca e identificadores de cada sensor acoplado à estaca.

3.1 Método de medição

As medidas experimentais serão coletadas e pré-processadas pela estaca do sistema que enviará os dados de umidade coletados através de comunicação *bluetooth* até o módulo central, onde esses dados serão devidamente processados e a informação resultante deste processamento será apresentado para o usuário e armazenada.

A estaca contará com 3 sensores, fato que torna possível validar a comunicação do microcontrolador com mais de 2 sensores. Isto se deve ao fato do microcontrolador da estaca, esp32, possuir 2 interfaces I²C e desta forma é necessário fazer o uso da alternância dos endereços dos sensores através do pino de endereço para que se faça a leitura de mais de um sensor em uma mesma interface.

Os dados coletados pela estaca serão enviados para o módulo central assim que a leitura de cada sensor é feita, ou seja, cada *payload* enviado conterá os dados de leitura de apenas um sensor. Após cada ciclo de leitura, ou seja, a leitura de todos os sensores acoplados será seguida de um segundo de espera até o início do próximo ciclo, sendo que dentro de cada ciclo é feita a espera de 0.1 segundo entre a leitura de cada sensor.

O módulo central é composto por um computador, onde é feito o armazenamento, e um microcontrolador, esp32, que faz a interface do computador com o microcontrolador da estaca. O

microcontrolador recebe os dados das estacas via *bluetooth* e os repassa para o computador via comunicação serial através de um cabo USB. O computador recebe os dados do microcontrolador e os armazena em memória.

3.2 Testes de comunicação

Os testes de comunicação tem por objetivo validar os vários métodos de comunicação usados no sistema que são: comunicação I²C, *bluetooth* e serial. Para que o sistema seja validado é imprescindível que todos os protocolos de comunicação sejam testados de forma separada e por fim juntos, pois os dados coletados serão transportados através deles, seguindo neste sentido o seguinte caminho: I²C -> *bluetooth* -> serial. Para que então possam ser armazenados no módulo central.

Teste de comunicação I²C

Como serão usados 3 sensores na estaca e apenas uma interface I²C deve ser usada afim de reduzir o número de fios usados na estaca.

Este teste visa então validar a leitura dos 3 sensores usando apenas uma interface I²C, empregando para isso o controle de endereço dos sensores através do pino de endereço que eles possuem.

Outro ponto a ser validado durante este teste é a leitura dos sensores com maior distância que a comumente usada, visto que o sensor mais longe do microcontrolador estará a mais de um metro deste.

Para realizar o teste será necessário fazer com que todos os sensores assumam o endereço 0x44 exceto o sensor no qual se pretende fazer a leitura, este permanecerá com endereço 0x45, e desta forma alternar os endereços dos 3 sensores até que se faça a leitura de todos.

Teste de comunicação *bluetooth*

No teste de comunicação *bluetooth* o objetivo é validar a capacidade da estaca e o módulo central de se conectarem através de pareamento e a troca de dados entre os dispositivos. Será testado também se os dispositivos conseguem se manter conectados, e com fluxo de dados, após afastados 10 metros um do outro validando assim a flexibilidade da posição do módulo central.

A realização deste teste se dá da seguinte forma:

1. Com apenas o módulo central ligado, inicialmente, liga-se a estaca e verifica-se se os dispo-

sitivos se paream e iniciam a troca de dados via *bluetooth*

2. O item anterior é repetido trocando qual dispositivo inicia ligado e qual liga-se posteriormente
3. Com o módulo central e a estaca ligados e pareamento e troca de dados ativa, a estaca é reiniciada e verifica-se se paream novamente e voltam a trocar dados via *bluetooth*
4. O item anterior é repetido trocando qual dispositivo é reiniciado
5. É também testado se os dispositivos mantêm a comunicação ativa longos períodos (superior a 24 horas)

Teste de comunicação serial

Este teste tem por objetivo avaliar a qualidade da comunicação entre o microcontrolador e o computador do módulo central, sem a qual o armazenamento dos dados coletados se limitaria à memória interna de 4MB do esp32.

Esse teste é simples devido a simplicidade da comunicação serial. Neste teste a comunicação é avaliada através do uso do sistema todo ligado e verificando se o sistema mantêm a comunicação serial ativa, além de verificar se os dados estão sendo salvos em memória no agente de armazenamento.

3.3 Testes de sistema

Os testes de sistema têm por objetivo validar o funcionamento do sistema completo, ou seja, este teste avaliará se o sistema é capaz de cumprir o que lhe é proposto, fazer a leitura de umidade na estaca, enviar os dados coletados via *bluetooth* para o microcontrolador do módulo central, enviar os dados de forma serial para computado que deve por fim armazenar-los fazendo a discriminação de cada sensor da estaca.

Nesta fase de teste serão unidos todos os testes anteriormente apresentados para provar o pleno funcionamento do sistema.

Capítulo 4

Resultados

O desenvolvimento do sistema proposto composto pelo instrumento de medição, estaca, e pelo módulo central de processamento. O seu funcionamento bem como os resultados obtidos são detalhados a seguir.

4.1 Instrumento de coleta de dados

O instrumento de coleta de dados implementado neste trabalho consiste de um cabo de comunicação flexível, que engloba a fiação necessária para a alimentação e comunicação dos sensores e conecta os sensores ao microcontrolador. Esse cabo deverá ser ligado a uma estaca rígida para que possa ser inserida com facilidade no solo.

4.1.1 Elementos físicos

A quantidade de sensores escolhidos para compor o instrumento de coleta de dados foi 3, visto que esse número é grande o suficiente para provar o conceito proposto pelo projeto, que compreende em criar um instrumento de medição capaz de fazer a comunicação em distância de mais de 2 dispositivos sensores I²C em uma mesma interface.

A estaca implementada neste trabalho conta com 3 sensores SHT30. Dispostos com afastamento da superfície, quando inserido ortogonalmente ao plano do solo, de 20 centímetros, 50 centímetros e 100 centímetros. Essa disposição foi escolhida primeiro pois o objetivo da estaca do projeto é conseguir fazer a leitura de até um metro abaixo da superfície da encosta ou barragem, logo foi imprescindível que um dos sensores fosse colocado na extremidade da estaca. Em seguida foi o escolhido o ponto médio entre a extremidade da estaca e a superfície do solo. Por fim para o sensor que ficaria mais próximo da superfície foi escolhida a distância que significaria 20 cm de profundidade, uma vez que para o objetivo do projeto a umidade muito próxima da superfície não

é tão importante mas sim o quanto dessa unidade esta conseguindo de fato se infiltrar o solo.

O instrumento conta também com um microcontrolador esp32 que faz a comunicação com os 3 sensores e envia os dados coletados destes para o módulo central através de uma conexão *bluetooth*.

O instrumento de coleta de dados desenvolvido neste trabalho pode ser observado na figura 4.1, nesta figura é possível visualizar a disposição dos sensores, a presença dos resistores de *pull up* nas linhas de SCL e SDA e o microcontrolador que possui 7 portas conectadas aos fios do cabo de comunicação.

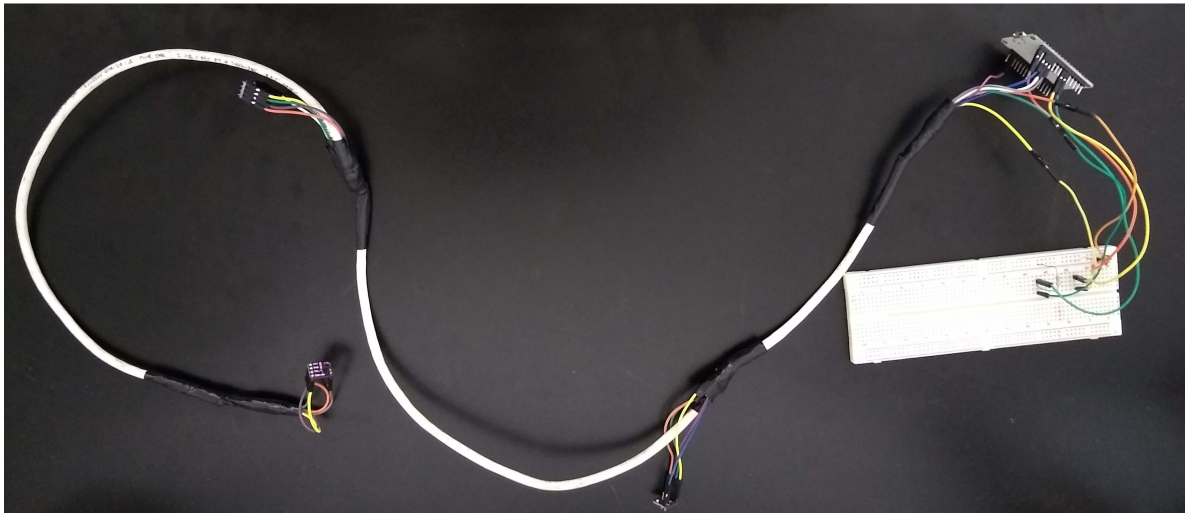


Figura 4.1: Foto do instrumento de medição

O instrumento é alimentado através de cabo USB ligado ao microcontrolador que então faz a alimentação dos 3 sensores ligados a ele através de cabos dedicados de alimentação, VCC e GND.

4.1.2 Elementos lógicos

Os elementos lógicos do instrumento de coleta de dados são intrinsecamente ligados à programação do microcontrolador. Para compilação e gravação do código implementado para o Esp32

foi usado o *Development Framework* ESP-IDF, *Espressif IoT Development Framework* distribuído e documentado gratuitamente pela *Espressif*, fabricante do Esp32.

O sistema embarcado gravado no microcontrolador do instrumento de coleta de dados consiste de duas principais *threads* que rodam paralelamente, utilizando para isso os 2 núcleos de programação disponíveis no microprocessador do Esp32, e que se comunicam através de um fila, *Queue*. Essas duas *threads* são: leitura dos sensores e comunicação *bluetooth*.

Leitura de sensores

A primeira ação tomada por essa *thread* é instalar o *driver* I²C e inicializar sua interface, que permite que o microcontrolador se comunique com os sensores. Após configurar a interface de comunicação com os sensores, I²C, a *thread* faz a primeira comunicação, enviando comandos de configuração. A estrutura do comando pode ser visualizada na figura 4.2.

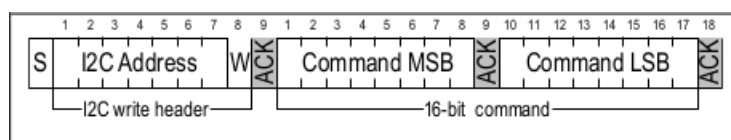


Figura 4.2: Estrutura do comando de configuração enviado aos sensores

A configuração escolhida para operar nos sensores foi de leitura periódica, visto que os dados são enviados periodicamente para o módulo central, com alta repetibilidade e frequência de amostragem de 1 medida por segundo, assim é possível obter uma medida longa que é atualizada 1 vez por segundo. Para se obter tal configuração o comando enviado para o sensor deve ser 0x2130. Essa mesma configuração é usada nos 3 sensores do instrumento.

Após a configuração dos sensores, a *thread* entra em sua parte principal, que é seu laço de repetição "infinito", no qual faz a leitura dos 3 sensores com um período de espera entre a leitura de cada sensor de 100 milissegundos. Após a leitura de cada sensor, a *thread* envia os dados de umidade, temperatura e o identificador do sensor lido. Depois de concluir a leitura de todos os sensores do instrumento a *thread* aguarda completar um segundo antes de iniciar um novo ciclo de leitura. Esse período de espera entre cada ciclo de leitura se deve ao fato de os sensores terem sido configurados para frequência de amostragem de 1 medida por segundo, então dessa forma garante-se que o microcontrolador não faça requisição de dados antes dos sensores terem feito a leitura. A estrutura da requisição de leitura pode ser observada na figura 4.3

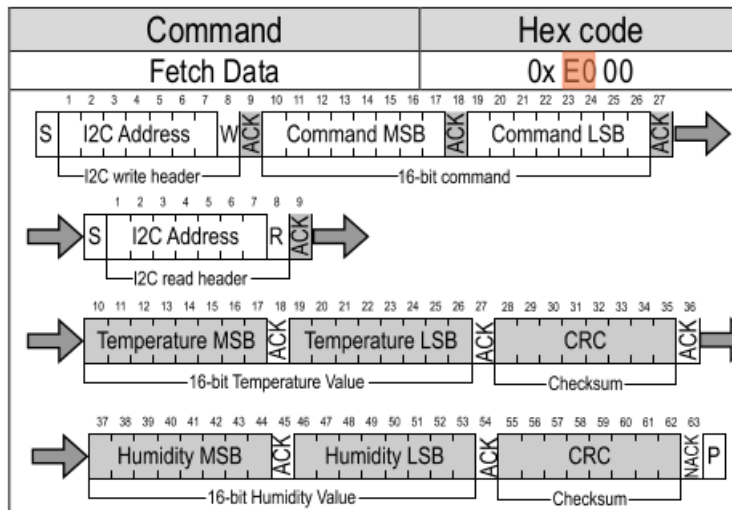


Figura 4.3: Estrutura do fluxo de dados de leitura no modo de leitura periódica

Comunicação *bluetooth*

A *thread* responsável pelo envio dos dados coletados dos sensores para a central se inicia fazendo a configuração do periférico de *bluetooth* e após isso entra em uma rotina de busca, modo de descoberta, pelo dispositivo de *bluetooth* do módulo central de processamento e se mantém nesta rotina de busca até que o encontre e o pareamento entre os dois dispositivos é concluído.

Após a conclusão do pareamento com o módulo central a *thread* entra em seu modo de envio de dados, o qual fica aguardando chegar uma mensagem vinda da *thread* de leitura de sensores através da fila, elemento de comunicação entre *threads*.

Quando no modo de envio de dados é possível que o pareamento com o módulo central seja desfeito, caso isso aconteça a *thread* volta ao modo de descoberta e começa a procurar pelo módulo central novamente e como da primeira vez assim que o pareamento for concluído a *thread* entra no modo de envio de dados.

Os dados enviados para o módulo central são o identificador da estaca, o identificador do sensor da estaca, o valor capturado de temperatura e o valor capturado de umidade. Esses dados são enviados como um vetor de inteiros de 8 *bits* sem sinal, para isso é feita a divisão dos dados para que possam se adequar ao formato de dados enviado, esses dados precisam ser remontados no módulo central para que a informação possa ser extraída deles.

4.2 Módulo central de processamento

O módulo central de processamento implementado neste trabalho tem o papel de se conectar ao dispositivo *bluetooth* da estaca, fazer a recepção e interpretação dos dados coletados e armazenamento desses dados. Ele é composto por duas partes principais que são: Recepção e armazenamento de dados.

4.2.1 Recepção de dados

O dispositivo de recepção é implementado em um microcontrolador esp32 e seu código é ligeiramente mais simples que o código usado no microcontrolador da estaca. Este tem apenas uma tarefa principal que é responsável por receber os dados vindos da estaca via *bluetooth* e repassá-los para o agente de armazenamento.

Sua rotina principal ocorre da seguinte forma: inicialmente o dispositivo configura o controlador do periférico de *bluetooth* e em seguida entra em modo de busca. O dispositivo se mantém no modo de busca até que consiga encontrar a estaca e concluir o processo de pareamento. Assim que o pareamento com a estaca é concluído o dispositivo entra em modo de recepção de dados e aguarda até que a estaca envie os dados coletados dos sensores.

Assim que recebe os dados da estaca, o dispositivo ok valida e em caso afirmativo inicia o processo de reconstrução dos dados, que como já foi dito anteriormente é enviado na forma de um vetor de *integers 8 bits* sem sinal, *uint8_t*. Logo que o identificador da estaca, identificador do sensor e os valores de umidade e temperatura são recuperados eles são enviados via comunicação serial para o agente de armazenamento. Caso o dispositivo verifique que os dados foram corrompidos durante a transmissão os dados são descartados. A verificação é feita a partir de *checksum CRC* de 8 *bits* que é enviado juntamente dos dados, recalculado no dispositivo de recepção e comparado ao valor recebido.

No total, o dispositivo de recepção deve receber 11 *bytes* por *payload*, no formato de um vetor de 11 casas de *uint8_t*. São listados a seguir os dados após a recuperação feita pelo dispositivo:

1. identificador da estaca: 1 *byte* (*uint8_t*)
2. identificador do sensor: 1 *byte* (*uint8_t*)
3. umidade: 4 *bytes* (*float32*)
4. temperatura: 4 *bytes* (*float32*)
5. CRC: 1 *byte* (*uint8_t*)

O dados de umidade e temperatura são salvos em *float32* pois possuem alta precisão de medida.

4.2.2 Armazenamento

O dispositivo de recepção é conectado ao agente de armazenamento via um cabo USB e é através desse que a comunicação serial entre os dois componentes é feita. O agente de armazenamento possui uma única tarefa, que é receber os dados vindos via comunicação serial do dispositivo de recepção e salva-los em um arquivo *.csv* para armazenamento.

Para cumprir a tarefa a ele designada o agente de armazenamento interpreta um algoritmo na linguagem *Python3*. O algoritmo segue da seguinte forma: inicialmente tenta se conectar à porta serial e em caso negativo fecha o programa, já em caso positivo com a conexão serial estabelecida verifica se o arquivo *data.csv* existe e em caso negativo cria o arquivo e escreve o seu cabeçalho como indicado na tabela 4.1, porém em caso positivo apenas abre o arquivo para leitura no modo *append*, para que possa escrever ao final do arquivo, e então entra em sua rotina principal de espera até receber dados válidos por sua conexão com a porta serial e quando os recebe escreve os dados no arquivo como representado na tabela 4.1.

pole id	sensor id	Humidity %	temperature °C
0	0	76.960403	26.185472
0	1	77.518883	25.998592
0	2	77.338829	26.070784
0	0	76.903946	26.228224

Tabela 4.1: Dados de exemplo para o arquivo *data.csv*

4.3 Resultados

O primeiro teste proposto na seção de metodologia é o teste de comunicação I²C, porém apenas enviar comandos e esperar a resposta do sensor não é o suficiente para avaliar a qualidade da comunicação I²C ao longo do cabo de comunicação. Para este fim foi usado um analisador lógico da empresa *Saleae* como o que pode ser visto na figura 4.4 em conjunto com o *software* fornecido pela mesma empresa e apresentado na figura 4.5.

Os resultados encontrados com este teste de qualidade de comunicação se mostraram satisfatório. Durante o teste foi possível verificar o sinal lógico no barramento de comunicação, linhas SDA e SCL. O software também interpreta os sinais recuperados durante a captura como apresentado na figuras 4.6 e 4.7, onde é possível ver o processo de requisição de leitura pelo microcontrolador e a resposta do sensor com os dados, respectivamente.



Figura 4.4: Analisador lógico - *saleae*

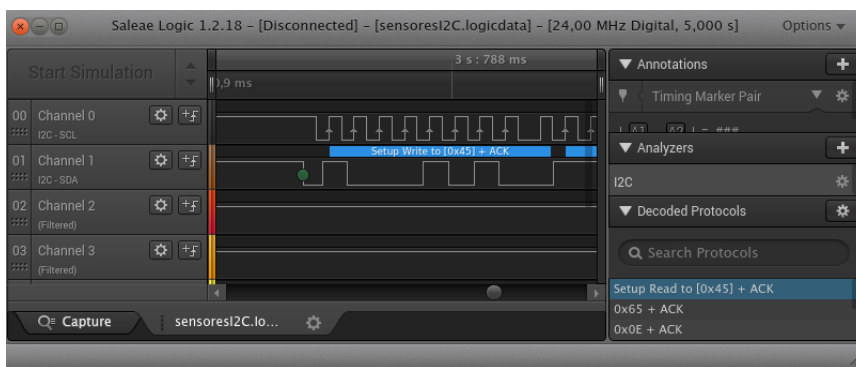


Figura 4.5: *software* para comunicação com analisador lógico - *saleae*

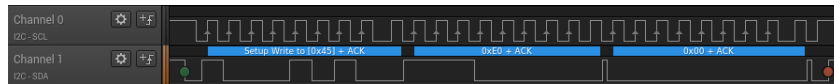


Figura 4.6: Barramento I²C durante o envio de uma requisição de leitura



Figura 4.7: Barramento I²C durante o envio de uma leitura de dados

Na figura 4.5 é apresentada a janela inicial do *software* e algumas de suas principais funcionalidades.

O nível lógico das linhas na figura 4.6 apresentam os dados transmitidos no barramento I²C durante uma requisição de dados. Inicialmente o microcontrolador envia o endereço do dispositivo escravo, 0x45, e o *bit* de escrita, então aguarda até que o escravo envie o sinal de *acknowledgment*. Após estabelecida a comunicação o mestre envia 2 *bytes* com comando de requisição de dados,

0xE000. Após o envio de cada *byte* é esperado o envio do sinal de *acknowledgment*.

Na figura 4.7 é possível observar o nível lógico das linhas de comunicação I²C de uma leitura de dados. Como já observado, após o envio de cada *byte* por um dos dispositivos é aguardado o envio do sinal de *acknowledgment* do outro dispositivo. Nos níveis lógicos observa-se primeiramente que o mestre envia um *byte* com o endereço do escravo e o *bit* de leitura. Em seguida o escravo envia um *byte* com o endereço do mestre. Na sequência são enviados, *byte* a *byte*, os dados de leitura de temperatura e umidade, cada um seguido de seu respectivo *checksum* CRC. Por fim, o último *byte* enviado é seguido de de um NACK e o comando de parada para finalizar a comunicação.

Os dados obtidos através do analisador lógico mostram que a comunicação entre microcontrolador e sensor está ocorrendo como o esperado, mesmo com o uso de fios de mais de um metro, ou seja, a comunicação I²C foi validada com o teste feito.

Ainda nos testes de comunicação a seguir é apresentado os resultados da comunicação *bluetooth*. Na figura 4.8 é possível visualizar 2 pares de dados destacado porém todos outros pares também presentes casam perfeitamente. No lado esquerdo da figura 4.8 são apresentados os dados coletados pela estaca e no lado direito os dados recebidos pelo dispositivo de recepção do módulo central.

```
(45670) I2c_sht: #0,1,56.334782,32.140289
(46670) I2c_sht: I (39409) ESTACA: id: 0 | sensorId: 2 | hum: 68.779 | temp: 28.415
(46670) I2c_sht: #0,2,68.778519,28.415232
(46670) I2c_sht: I (40619) ESTACA: id: 0 | sensorId: 0 | hum: 66.410 | temp: 28.033
(46880) I2c_sht: Read success! array: 1 - 0 - 0 #0,0,66.410316,28.033279
(46880) I2c_sht: Sensor 0: hum = 66.467 temp = 28.060 I (40829) ESTACA: id: 0 | sensorId: 1 | hum: 56.313 | temp: 32.210
(46900) I2c_sht: #0,1,56.313419,32.209663
(47120) I2c_sht: Read success! array: 0 - 1 - 0 I (41039) ESTACA: id: 0 | sensorId: 2 | hum: 68.980 | temp: 28.445
(47140) I2c_sht: Sensor 1: hum = 55.682 temp = 32.181 #0,2,68.979935,28.444672
(47140) I2c_sht: I (42289) ESTACA: id: 0 | sensorId: 0 | hum: 66.421 | temp: 28.047
(47380) I2c_sht: Read success! array: 0 - 0 - 1 #0,0,66.420998,28.046593
(47380) I2c_sht: Sensor 2: hum = 68.014 temp = 28.485 I (42539) ESTACA: id: 0 | sensorId: 1 | hum: 56.074 | temp: 32.223
(47380) I2c_sht: #0,1,56.073853,32.223232
(47410) I2c_sht: I (42779) ESTACA: id: 0 | sensorId: 2 | hum: 68.631 | temp: 28.429
(48410) I2c_sht: #0,2,68.630501,28.428543
(48410) I2c_sht: I (44029) ESTACA: id: 0 | sensorId: 0 | hum: 66.467 | temp: 28.060
(48410) I2c_sht: #0,0,66.466774,28.060160
(48610) I2c_sht: Read success! array: 1 - 0 - 0 I (44279) ESTACA: id: 0 | sensorId: 1 | hum: 55.682 | temp: 32.180
(48610) I2c_sht: Sensor 0: hum = 66.406 temp = 28.004 #0,1,55.681698,32.180481
(48620) I2c_sht: I (44519) ESTACA: id: 0 | sensorId: 2 | hum: 68.014 | temp: 28.485
(48850) I2c_sht: Read success! array: 0 - 1 - 0 #0,2,68.014038,28.484608
(48850) I2c_sht: Sensor 1: hum = 55.465 temp = 32.266 I (45769) ESTACA: id: 0 | sensorId: 0 | hum: 66.406 | temp: 28.004
(48850) I2c_sht: #0,0,66.405739,28.004095
(49090) I2c_sht: Read success! array: 0 - 0 - 1 I (45989) ESTACA: id: 0 | sensorId: 1 | hum: 55.465 | temp: 32.266
(49090) I2c_sht: Sensor 2: hum = 67.930 temp = 28.429 #0,1,55.465019,32.265728
(49090) I2c_sht: I (46229) ESTACA: id: 0 | sensorId: 2 | hum: 67.930 | temp: 28.429
(49120) I2c_sht: #0,2,67.930115,28.428543
```

Figura 4.8: Terminais com os logs dos microcontroladores da estaca e do módulo central

O sistema

Como já foi observado, os módulos do sistema todo operam de forma satisfatória. Ao fazer a integração dos módulos é possível ter uma visão de como todo o sistema funciona e todos os passos dados para que os dados sejam coletados e sejam armazenados em memória física no módulo central de processamento, estes passos são:

1. O microcontrolador da estaca envia comandos de configuração para leitura periódica a todos os sensores da estaca
2. O microcontrolador passa a fazer leituras dos sensores periodicamente
3. O microcontrolador da estaca e o microcontrolador do módulo central fazem pareamento via *bluetooth*
4. Os dados coletados na estaca passam a ser enviados, como forma de um vetor de bytes, para o módulo central via conexão *bluetooth*
5. O dispositivo de recepção do módulo central passa a receber os dados coletados pela estaca
6. Os dados que chegam ao dispositivo de recepção não corrompidos são enviado via serial para o agente de armazenamento
7. Os dados recebidos pelo agente de armazenamento são gravados em memória em um arquivo *.csv*

Assim como já foi observado durante o desenvolvimento deste trabalho algumas das tarefas listadas atuam em paralelo dentro do mesmo módulo e é isso que faz o sistema todo tão eficiente naquilo que se propõe a fazer, que é: fazer a coleta de dados de umidade com um instrumento sem fio e armazenar os dados em memória para futuras observações e análises.

Capítulo 5

Considerações finais

5.1 Conclusão

Durante este trabalho foi apresentado e detalhado o projeto de um **sistema de monitoramento de umidade do solo para auxílio de previsão de deslizamentos de terra e rompimentos de barragens**. Foi explicado o funcionamento das estacas. Foi validado o conceito de comunicação de varios sensores I²C ligados ao barramento através de um **cabo de comunicação** que apresentou uma qualidade acima da esperada.

Além do sistema implementado neste trabalho, foram reunidas informações vitais para a conclusão do projeto, toda a pesquisa inicial e validação conceitual.

5.2 Trabalhos futuros

Tendo o instrumento de medição sem fio e o sistema de processamento e armazenamento de dados desenvolvidos como parte inicial do projeto propõe-se o desenvolvimento dos seguintes componentes:

Rede *MESH*

Uma vez que o instrumento de medição já foi desenvolvido a rede de comunicação *MESH* se faz necessária para trazer a escalabilidade do sistema de medição, tornando-o assim capaz de fazer o monitoramento de grandes áreas e então consequentemente capaz de monitorar encostas e barragens.

Apresentação gráfica de dados

O sistema de apresentação de dados, com uma interface gráfica, será capaz de possibilitar que profissionais capacitados da área, com maiores conhecimentos do solo possam identificar padrões de aumento do risco de deslizamentos ou rompimentos de barragens ao longo do tempo e a identificação mais eficaz da necessidade de manutenções e até mesmo de intervenções na área monitorada e/ou seus arredores.

Sistema de monitoramento

O sistema de monitoramento autônomo que deverá ser capaz, usando os dados coletados pela rede de estacas conectas à rede *MESH*, podendo usar técnicas de *machine learning* de inferir o índice de risco de deslizamento, ou rompimento, baseados nos conceitos apresentados em [7], tendo como base o nível de umidade atual, seu histórico, a sua variação recente e fazendo o uso até mesmo de previsões meteorológicas.

Sistema de alerta

Assim como no sistema de monitoramento, o sistema de alerta deverá usar os dados coletados pelas estacas, porém com um objetivo diferente. Neste sistema o foco será em encontrar pequenas áreas isoladas com elevados níveis de umidade, bolsões de água, e a depender do nível de umidade e tamanho do bolsão gerar o alerta de iminência de deslizamento ou rompimento, pois de acordo com [7] esses bolsões de água podem se tornar pontos de rompimento que podem levar à um deslizamento completo ou parcial da encosta e por associação pode também levar a um rompimento de barragem além de que no caso específico das barragens esses bolsões de água são um forte indicio da ocorrência de exfiltrações, ou seja, do vazamento de rejeitos através da barragem.

Referências Bibliográficas

- [1] R. A. and B. M., “Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils,” *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, vol. 114, pp. 226–233, 2002.
- [2] A. N. de Mineração. (2019) Classificação Das Barragens De Mineração Brasileiras. [Online]. Available: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao/classificacao-oficial-anm>
- [3] *I²C Manual*, Philips Semiconductors, 3 2003.
- [4] R. L. Ray, J. M. Jacobs, and M. H. Cosh, “Landslide susceptibility mapping using downscaled amsr-e soil moisture: A case study from cleveland corral, california, us,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, pp. 2624–2636, 2010.
- [5] *Datasheet SHT3x-DIS*, Sensirion, the sensor company, 2 2019, version 6.
- [6] *Datasheet SHT3x-DIS*, Sensor Specification Statement, 3 2010, revision 1.0.
- [7] R. C. Sidle and H. Ochiai, *LANDSLIDES: Processes, Prediction, and Land Use*. American Geophysical Union, 2006.
- [8] V. K. Vivek Kumar Pandey, Sparsh Kumar and P. Goel, “A review paper on i2c communication protocol,” vol. 4, 2018.