

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA – CEEI
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Paulo Arthur Viana Braga

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMATIZADA DE BAIXO CUSTO COM TECNOLOGIA IoT

CAMPINA GRANDE, PB

2026

PAULO ARTHUR VIANA BRAGA

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMATIZADA DE BAIXO CUSTO COM TECNOLOGIA IoT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau e Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire

CAMPINA GRANDE, PB

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me concedido saúde, força e a oportunidade de trilhar este caminho, guiando-me ao longo dessa jornada e me sustentando nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, Reginaldo Braga e Francimar Braga, expresso minha mais sincera gratidão por todo o apoio, paciência, incentivo e cuidado ao longo dessa caminhada. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

À minha orientadora, Verushcka Monteiro, e chefe do Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), agradeço pela oportunidade de desenvolver pesquisas na área ambiental, pela orientação e por disponibilizar um ambiente de campo experimental fundamental para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador de TCC, Raimundo Carlos Freire, expresso meu agradecimento por ter disponibilizado o laboratório, compartilhado seu conhecimento e contribuído de forma significativa para o meu crescimento acadêmico ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus líderes de pesquisa, Petrov Lobo e Mayara Accioly, deixo meu agradecimento pelo apoio, pelos ensinamentos e pela contribuição durante essa trajetória acadêmica.

À minha namorada, Naara Neto, agradeço por todo o apoio, dedicação, compreensão e por estar ao meu lado, especialmente nos momentos mais difíceis, sempre me incentivando a seguir em frente.

Aos meus amigos que estiveram presentes nessa caminhada, meu muito obrigado pela amizade, pelo companheirismo e pelos momentos compartilhados ao longo dessa batalha: Darlan Mamede, Yan Pontes, Kelvenn Xavier, Eudes Medeiros, Domingos Terceiro, Luca Magalhães, José Fidelis, Alan Soares, Ana Gomes, Davi, Kayan Neto, Augusto Brasileiro, Felipe Brasileiro e Newton Fonseca.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação acadêmica e para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um protótipo de estação meteorológica automatizada de baixo custo, implementada para o monitoramento das condições climáticas do Aterro Sanitário de Campina Grande (ASCG), localizado em uma região semiárida. A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários depende diretamente de variáveis climáticas, como temperatura, umidade, precipitação e velocidade do vento, que influenciam a decomposição dos resíduos, a geração de lixiviados e a emissão de gases. Neste contexto, o monitoramento local em tempo real mostrou-se essencial para a compreensão da biodegradação dos resíduos e o controle de emissões poluentes. A estação foi constituída por sensores de temperatura, umidade, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, além de iluminância, integrados a uma plataforma baseada em *Internet of Things* (*IoT*) com microcontrolador ESP32 e comunicação via *Wi-Fi*. Essa arquitetura permitiu a coleta e a transmissão de dados em tempo real, superando as limitações de monitoramento em áreas remotas como o aterro. Por meio de testes preliminares em bancada, foi possível verificar o funcionamento inicial dos sensores e a integração do sistema com o Google Sheets para armazenamento dos dados. O trabalho resultou no desenvolvimento de um protótipo funcional de estação meteorológica automatizada de baixo custo, com finalidade para aplicação em aterros sanitários. Embora as etapas de calibração e validação completa não tenham sido concluídas no período deste estudo, o sistema desenvolvido constitui uma base técnica para futuras pesquisas e aperfeiçoamentos voltados ao monitoramento ambiental em regiões semiáridas.

Palavras-chave: estação meteorológica, aterro sanitário, IoT.

ABSTRACT

This work presents the development of a low-cost automated meteorological station prototype designed for monitoring the climatic conditions of the Campina Grande Sanitary Landfill, located in a semi-arid region. The management of municipal solid waste in sanitary landfills is directly influenced by climatic variables such as temperature, humidity, precipitation, and wind speed, which affect waste decomposition, leachate generation, and gas emissions. In this context, local real-time monitoring proved to be essential for understanding waste biodegradation and controlling pollutant emissions. The station was composed of sensors for temperature, humidity, atmospheric pressure, wind speed and direction, as well as illuminance, integrated into an Internet of Things (IoT)-based platform using an ESP32 microcontroller with Wi-Fi communication. This architecture enabled real-time data collection and transmission, overcoming monitoring limitations commonly found in remote areas such as landfills. Through preliminary bench tests, it was possible to verify the initial operation of the sensors and the integration of the system with Google Sheets for data storage. The work resulted in the development of a functional low-cost automated meteorological station prototype intended for application in sanitary landfills. Although the calibration and full validation stages were not completed within the time frame of this study, the developed system provides a technical basis for future research and improvements aimed at environmental monitoring in semi-arid regions.

Keywords: weather station; sanitary landfill; IoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Planta baixa de uma Estação Meteorológica Principal e Respectivos Instrumentos ____ 27
Figura 2 - Estação Digital e Instrumentos Meteorológicos ____ 28
Figura 3 - Abrigo de instrumentos meteorológicos usados em estações convencionais ____ 29
Figura 4 - Diagrama de pinagem (pinout) do módulo ESP32 DEVKIT v1 de 38 pinos. ____ 31
Figura 5 - Sensor Magnético de Efeito Hall ky-003 ____ 32
Figura 6 – Diagrama de blocos do AS5600 ____ 33
Figura - 7 Diagrama de bloco do BH1750 ____ 34
Figura 8 - Esquemático elétrico do sensor DHT22 ____ 36
Figura 9 - Sensor DHT 22 ____ 36
Figura 10 - BMP 180 ____ 37
Figura 11 - Circuito de aplicação BMP 180 ____ 37
Figura 12 - Localização do Aterro Sanitário em região semiárida e dos municípios que depositam RSU no empreendimento entre 2015 e 2024. ____ 40
Figura 13 - Vista superior do Aterro Sanitário de Campina Grande-Pb. ____ 40
Figura 14 - Arquitetura do protótipo da Estação Meteorológica ____ 41
Figura 15 - Desenho 3D da parte físico do pluviômetro ____ 42
Figura 16 - Protótipo do pluviômetro impresso em impressora 3D ____ 42
Figura 17 - Desenho 3D da parte que compõe o anemômetro para medireção do vento ____ 43
Figura 18 - Teste manual do funcionamento do anemômetro (direção do vento) ____ 43
Figura 19 - Posição do ímã em relação ao CI do Codificador AS5600 ____ 44
Figura 20 - Distância entre o ímã e o CI ____ 44
Figura 21 - Desenho 3D das peças do anemômetro ____ 45
Figura 22 - Protótipo impresso em impressora 3D do anemômetro ____ 45
Figura 23 - Montagem do Sensores BMP180, DHT22 e BH1750 ____ 46
Figura 24 - Vista Frontal e Vista Lateral do abrigo meteorológico ____ 47
Figura 25 - Display TFT ST7735 com os dados meteorológicos (demonstração) ____ 49
Figura 26 - Planilha de dados recebidos no google sheets ____ 50
Figura 27 - Primeiro teste do DHT22 e BMP180 ____ 51
Figura 28 - Teste de bancada do Codificador AS5600 de forma manual ____ 52
Figura 29 - Teste do funcionamento do Anemômetro para medição da velocidade do vento ____ 53
Figura 30 - Pluviômetro impresso com impressora 3D e um copo medidor para realização dos testes de funcionamento ____ 54
Figura 31 - Leitura dos dados após adicionar 100mL de água de forma lenta ____ 55
Figura 32 - Leitura dos dados para identificar o volume da báscula com queda d'gua de forma rápida ____ 55
Figura 33 - Teste do funcionamento do sensor BH1750 ao ar livre ____ 56

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Descriçao da pinagem da estação meteorológica 48

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	Conversor Analógico-Digital
ASCG	Aterro Sanitário de Campina Grande
BLE	Bluetooth Low Energy
BMP180	Barometric Pressure 180
BH1750	Sensor digital de iluminância
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
CI	Circuito Integrado
CMM	Centros Meteorológicos Mundiais
CMN	Centros Meteorológicos Nacionais
CMR	Centros Meteorológicos Regionais
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DAC	Conversor Digital-Analógico
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
DHT22	Sensor digital de temperatura e umidade
Dr.	Doutor
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESP32	Microcontrolador da família ESP32
GPIO	General Purpose Input/Output
I²C / I2C	Inter-Integrated Circuit
IHM	Interface Homem-Máquina
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	Internet of Things
I2S	Inter-IC Sound
LCD	Liquid Crystal Display
LDR	Light Dependent Resistor
LPM	Low Power Mode
OMI	Organização Meteorológica Internacional
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PAR	Photosynthetically Active Radiation
PB	Paraíba

PD	Fotodiodo
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
Prof.	Professor
RAM	Random Access Memory
ROM	Read-Only Memory
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SCL	Serial Clock Line
SDA	Serial Data Line
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TFT	Thin Film Transistor
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WMO	World Meteorological Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVO GERAL 16

2.1 Objetivos específicos 16

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17

3.1 Aterros Sanitários e condições meteorológicas 17

3.1.1 Aterros Sanitários 17

3.1.2 Condições Meteorológicas 17

3.2 Variáveis meteorológicas aplicadas ao monitoramento de aterros ... 18

3.2.1 Precipitação 18

3.2.2 Ventos 20

3.2.3 Temperatura ambiente 20

3.2.4 Umidade relativa do ar 22

3.2.5 Irradiação Solar 23

3.2.6 Evapotranspiração 25

3.3 Estações meteorológicas 26

3.3.1 Abrigo de Stevenson 29

3.4 Sensores e dispositivos utilizados no sistema 30

3.4.1 Microcontrolador 30

3.4.2 Sensor de efeito Hall 31

3.4.3 Codificador Magnético AS5600 32

3.4.4 BH1750 34

3.4.5 DHT22 35

3.4.6 BMP180 36

3.4.7 Display 37

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO 39

4.1 Caracterização da área de aplicação 39

4.2 Desenvolvimento da estação meteorológica 41

4.2.1 Desenvolvimento dos sensores 41

4.2.2 Abrigo meteorológico 47

4.2.3 Integração dos componentes 47

4.2.4 Conectividade e visualização dos dados 49

4.2.5 Interface Homem-Máquina (IHM) Local 49

4.2.6 Integração com a Nuvem e Iot 49

4.2.7 Desenvolvimento da programação 50

4.3 Testes Realizados 51

4.3.1 Teste DHT22 e BMP180 51

4.3.2 Teste do codificador AS5600 51

4.3.3 Teste do anemômetro de par para velocidade do vento 52

4.3.4 Teste do pluviômetro 53

4.3.5 Teste do BH1750 para luminância 55

5 Resultados e discussão 57

5.1 Arquitetura implementada do protótipo 57

5.2 Resultados dos testes de bancada 57

5.2.1 DHT22 e BMP180 58

5.2.2 Codificador AS5600 58

5.2.3 Anemômetro 58

5.2.4 Pluviômetro 59

5.2.5 BH1750 59

5.3 Integração e visualização dos dados 60

5.4 Limitações e perspectivas 60

6 CONCLUSÃO 61

6.1 TRABALHOS FUTUROS 61

REFERÊNCIAS **62**

1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) nos aterros sanitários apresenta desafios complexos, que envolvem desde a disposição adequada dos resíduos até o controle de emissões de gases e lixiviados. No aterro sanitário de Campina Grande, a dinâmica das condições meteorológicas desempenha um papel importante na decomposição da matéria orgânica, na produção de gases e no comportamento dos lixiviados. Estudos indicam que fatores como a temperatura ambiente e a umidade do ar são essenciais para o aumento da atividade microbiana, influenciando diretamente a decomposição dos resíduos (Park & Shin, 2001; Maciel, 2009). No entanto, a região semiárida de Campina Grande, caracterizada por elevadas taxas de evaporação e baixos índices de precipitação, apresenta um déficit hídrico que limita a formação de lixiviados e o desempenho dos sistemas de drenagem, mesmo em áreas com alto teor de matéria orgânica (Tavares, 2003; Rodriguez, 2002).

A estação meteorológica da EMBRAPA, que fornece dados sobre umidade, precipitação e evaporação desde 1975, cobre uma área de aproximadamente 10 km ao redor de sua sede em Campina Grande (Caribe, 2011). Contudo, a distância de 1,5 km entre a estação e a célula experimental do aterro levanta a necessidade de uma solução local, mais precisa e específica, para monitorar as condições climáticas diretamente no local do aterro.

Além disso, o comportamento dos gases e odores emitidos pelo aterro depende não apenas da temperatura e umidade, mas também de fatores como a velocidade e direção dos ventos, que podem espalhar poluentes e afetar comunidades próximas, e a pressão atmosférica, que influencia a produção e liberação do biogás. Para mitigar esses impactos, sugere-se a adoção de técnicas como a recirculação do lixiviado em aterros secos e o tratamento por lagoas ou tanques de evaporação, que aumentam a umidade e aceleram a atividade microbiana.

Dessa forma, o desenvolvimento de uma estação meteorológica de baixo custo, especificamente para o aterro sanitário de Campina Grande, surge como uma ferramenta essencial para monitorar em tempo real as condições locais. A integração dessa estação a uma plataforma *IoT* possibilitará a coleta contínua de dados meteorológicos críticos, como temperatura, umidade, pressão atmosférica, direção e velocidade dos ventos. Esses dados serão fundamentais para aprimorar a gestão dos

resíduos, otimizar o tratamento de lixiviados e gases, e minimizar os impactos ambientais e à saúde pública causados pela operação do aterro.

2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um protótipo de estação meteorológica de baixo custo para monitoramento ambiental em aterros sanitários, com o foco no Aterro Sanitário de Campina Grande (ASCG), integrando tecnologia IoT para a coleta, visualização e transmissão de dados em tempo real.

2.1 Objetivos específicos

- ✓ Selecionar os sensores, módulos e componentes eletrônicos adequados ao sistema proposto.
- ✓ Obter dados meteorológicos em tempo real e armazenar seus dados históricos.
- ✓ Realizar testes preliminares de funcionamento dos módulos desenvolvidos
- ✓ Propor procedimentos futuros de calibração e validação do sistema

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Aterros Sanitários e condições meteorológicas

3.1.1 Aterros Sanitários

O aterro sanitário pode ser compreendido como uma forma planejada e tecnicamente controlada de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, elaborada para reduzir riscos à saúde pública e diminuir os impactos ao meio ambiente. Esse sistema utiliza critérios de engenharia para confinar os resíduos em uma área adequada, promovendo sua compactação e cobertura periódica com solo, de modo a assegurar melhores condições de operação e controle ambiental (ABNT, 1992).

Além disso, seu funcionamento adequado depende da implantação de estruturas complementares, como sistemas de drenagem das águas pluviais, coleta e tratamento do lixiviado e mecanismos para drenagem e manejo dos gases gerados pela decomposição da matéria orgânica. Quando corretamente executado e operado, o aterro sanitário apresenta vantagens importantes, como relativa simplicidade operacional, controle de vetores, estabilização biológica da fração degradável dos resíduos e possibilidade de aproveitamento energético do gás gerado (BIDONE; POVINELLI, 1999).

3.1.2 Condições Meteorológicas

As condições meteorológicas exercem papel importante no comportamento das emissões gasosas em aterros sanitários, especialmente nas camadas de cobertura. Isso ocorre porque parâmetros climáticos, como pressão atmosférica, temperatura do ar, velocidade dos ventos e precipitação, podem alterar a dinâmica de fluxo dos gases e, consequentemente, influenciar a intensidade com que esses compostos atingem a atmosfera. Dessa forma, a consideração dessas variáveis é fundamental em estudos que buscam compreender de maneira mais adequada o desempenho ambiental dos aterros sanitários (HARO et al., 2019).

Entre os fatores analisados na literatura, a pressão barométrica tem se mostrado particularmente relevante. Estudos apontam que alterações nessa variável podem estar associadas a mudanças no fluxo de biogás e no fluxo específico de metano. Além disso, a temperatura também apresenta influência importante, uma vez que a elevação térmica tende a favorecer o aumento das emissões gasosas. Já a velocidade do vento pode contribuir para reduzir a concentração de biogás na superfície da cobertura, intensificando o gradiente de concentração entre o interior do maciço e o meio externo, o que favorece a difusão dos gases para a atmosfera (AGHDAM et al., 2019; XIN et al., 2016).

Outro aspecto relevante é a precipitação, que pode atuar de forma inversa sobre as emissões. O aumento da umidade no solo da cobertura tende a reduzir sua permeabilidade ao ar, dificultando a passagem dos gases. Esse comportamento é descrito na literatura como “efeito cortiça”, em que o solo mais úmido funciona como uma barreira temporária à migração gasosa, reduzindo os fluxos superficiais observados (RACHOR et al., 2013). Assim, a avaliação conjunta das condições meteorológicas permite compreender melhor a variabilidade das emissões fugitivas e fornece subsídios importantes para o monitoramento e a gestão ambiental de aterros sanitários.

3.2 Variáveis meteorológicas aplicadas ao monitoramento de aterros

3.2.1 Precipitação

É a queda livre de partículas no estado líquido ou sólido na superfície terrestre (VIANELLO,1991);(VAREJÃO,2006).

Na formação das nuvens, pequenas gotas e diminutos cristais de gelo se condensam rapidamente ao redor dos núcleos de condensação e sublimação, crescendo molécula por molécula, sem atingirem um tamanho suficiente para precipitar. No entanto, algumas gotas e cristais crescem o bastante para começarem a cair. Durante sua descida, essas partículas agregam mais moléculas que encontram pelo caminho, permitindo que rapidamente se transformem em gotas maiores, resultando em precipitações na forma de chuva, neve ou granizo, seja em estado líquido ou sólido (MENDONÇA, 2007).

A precipitação pluviométrica (chuva) é medida em milímetros e refere-se à altura da água coletada em pluviômetros, que geralmente trabalham com a quantidade total de água precipitada em um dia. A partir do total diário, é possível calcular os valores mensais, sazonais e anuais, além de determinar os valores pluviométricos normais (MENDONÇA, 2007).

De acordo com o Atlas Internacional de Nuvens da OMM (1972), as precipitações são classificadas da seguinte maneira:

1. Chuva: Refere-se à precipitação de gotas de água com diâmetro superior a 0,5 cm. Chuvas muito intensas, que normalmente duram pouco tempo, são conhecidas como aguaceiros. As de maior duração são frequentemente chamadas de trombas d'água.

2. Chuviscos ou Garoa: Trata-se de uma precipitação bastante uniforme, composta por gotas de água finas.

3. Gelo: É um depósito de gelo que apresenta aspecto cristalino e pode ocorrer em várias formas.

4. Granizo: Refere-se à precipitação em forma de grãos de gelo com diâmetro superior a 5 cm.

5. Neve: É a precipitação de flocos de gelo, na qual a maioria dos flocos é ramificada ou estiradas, podendo assumir diferentes formas.

De acordo com Mendonça (2007), o padrão de distribuição espacial da precipitação de chuvas em escala planetária mantém uma forte inter-relação com diversos fatores, incluindo as correntes marítimas, as zonas de temperatura, os processos de evaporação, os ventos oceânicos e a dinâmica da baixa atmosfera. Essa interação resulta em variações na quantidade de precipitação, fazendo com que algumas localidades recebam mais chuvas do que outras.

No contexto de aterros sanitários, o lixiviado gerado em aterros mais recentes, especialmente quando há elevada entrada de águas pluviais, tende a apresentar pH ácido, altos valores de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a presença de diferentes compostos com potencial tóxico (MEIRA, 2003).

Ainda sobre os aterros sanitários, principal preocupação ocorre em áreas com elevados índices pluviométricos, uma vez que o aumento da infiltração de água favorece a geração de percolado em maiores volumes. Esse processo amplia o risco

de contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais, o que pode intensificar os impactos ambientais associados ao aterro. Embora existam diferentes definições para o lixiviado, é fundamental compreender os componentes envolvidos em sua formação e composição (RODRIGUES, 2007).

3.2.2 Ventos

Os ventos correspondem aos movimentos do ar atmosférico, ocorrendo de forma natural tanto em grandes altitudes quanto próximos à superfície terrestre (VIANELLO, 1991). Apesar de serem fenômenos considerados relativamente simples, possuem grande relevância em diferentes áreas do conhecimento, principalmente por sua influência nas mudanças rápidas do tempo e no deslocamento das massas de ar (MENDONÇA, 2007).

De acordo com Vianello (1991), os componentes horizontais do vento exercem papel importante na dinâmica termodinâmica da atmosfera, uma vez que transportam propriedades do ar, variações de temperatura e ondas de calor e frio. Já os movimentos verticais, embora mais difíceis de serem medidos sem instrumentos mais sofisticados, estão associados à formação de nuvens e à ocorrência de precipitações, sendo, por isso, fundamentais para a previsão do tempo.

A análise do vento em determinado ponto da atmosfera depende, principalmente, de dois parâmetros: direção e velocidade. Essas grandezas são instantâneas e pontuais, já que o escoamento do ar varia conforme as condições atmosféricas no espaço e no tempo. Por essa razão, o vento interfere em diferentes setores da sociedade, como a aviação e a implantação de diversas estruturas, incluindo aterros sanitários, especialmente em áreas próximas à interface entre a superfície e a atmosfera. Além disso, seu comportamento é fortemente influenciado pelas características geométricas do local e pelo aquecimento da própria superfície (VIANELLO, 1991; VAREJÃO, 2006).

3.2.3 Temperatura ambiente

A temperatura ambiente é um dos parâmetros que desempenha um papel fundamental entre os fatores que condicionam o ambiente e a sobrevivência dos seres

vivos. De modo geral, existe uma faixa de temperatura ideal para que cada organismo possa crescer e se desenvolver dentro dos padrões de normalidade.

Essa faixa se insere em outra mais ampla, conhecida como faixa de tolerância, cujos limites superior e inferior são críticos. Quando a temperatura ambiente atinge essa faixa de tolerância (nas zonas superior e inferior), as atividades fisiológicas do ser começam a ser comprometidas, ou vice-versa. (VAREJÃO, 2006).

A taxa de crescimento diminui ou cessa completamente em função do tempo de exposição e do afastamento da faixa de tolerância ótima, refletindo-se na produção de biomassa. Uma exposição superior ao nível máximo tolerável (crítico superior) ou inferior ao nível mínimo tolerável (crítico inferior) é muito prejudicial. Os efeitos podem ser reversíveis, mas, se a exposição for prolongada, pode levar o organismo à morte, como ocorreu na Europa no início de 2012, onde quedas bruscas de temperatura ambiental comprometeram a vida dos seres vivos.

No que diz respeito ao ser humano, a temperatura está intimamente ligada à sensação de conforto físico. Sabe-se que, em temperaturas elevadas, as pessoas tendem a reduzir tanto a atividade motora quanto a intelectual. Essa diminuição é relevante no contexto do consumo mundial de energia, que é influenciado pelos processos de climatização de ambientes. Isso evidencia o esforço que os seres humanos fazem para melhorar as condições ambientais, especialmente em locais recentes.

A temperatura constitui um importante indicador das reações bioquímicas que ocorrem no interior de células de aterros sanitários, variando de acordo com o avanço da degradação da matéria orgânica. Em geral, essa variável é medida ao longo da profundidade do maciço com o auxílio de termômetro elétrico-digital (SILVEIRA, 2004). A condição térmica da massa de resíduos exerce influência direta sobre o processo de biodegradação, uma vez que os microrganismos responsáveis pela decomposição dependem da temperatura do meio para se desenvolver e atuar. Por isso, diferentes faixas de temperatura favorecem diferentes grupos microbianos.

Segundo a literatura, a temperatura no interior da massa de resíduos em aterros sanitários costuma variar entre 30 °C e 60 °C, com diferenças associadas à profundidade e ao estágio de decomposição. Nos primeiros metros do maciço, essa variável ainda pode sofrer influência das condições climáticas locais, como sazonalidade e vento, além da eficiência da camada de cobertura. Em profundidades maiores, porém, a temperatura passa a refletir principalmente os processos de

biodegradação e as características internas da massa de resíduos. Em muitos casos, observa-se aumento da temperatura até cerca de um terço da profundidade do aterro, seguido de redução nas zonas mais profundas, onde o material já se encontra em estágio mais avançado de estabilização (HANSON et al., 2010).

3.2.4 Umidade relativa do ar

A umidade do ar é um elemento atmosférico de extrema importância no ciclo vital do homem e no ambiente que habita. O ciclo hidrológico é uma sequência fechada de fenômenos naturais que pode ser dividida em duas partes: o ramo aéreo, normalmente estudado no contexto da Meteorologia, e o ramo terrestre, objeto da Hidrologia. A superfície que limita os fenômenos pertinentes a cada um desses ramos é a interface globo-atmosfera, no estado vapor, encerrando-se no momento em que se devolve à superfície terrestre, nos estados líquido ou sólido (Varejão, 2006).

Na Meteorologia, o termo "umidade do ar" refere-se à presença de vapor d'água na atmosfera, e não à água nas formas líquida ou sólida (Vianello, 1991).

Segundo Mendonça (2007), os termos "pressão de vapor", "umidade absoluta", "umidade específica", "razão de mistura" e "umidade relativa" são diferentes maneiras de abordar a presença de vapor d'água no ar. A umidade absoluta expressa o peso do vapor de água em um determinado volume de ar. No entanto, essa medida não é muito utilizada, pois não representa adequadamente a quantidade real de vapor presente no ar, uma vez que o volume do ar muda ao ascender (tornando-se mais rarefeito) ou ao descer (tornando-se mais denso).

A umidade específica é definida como a razão entre o peso do vapor d'água e o peso do ar. A razão de mistura relaciona a quantidade de vapor, em gramas, presente em um quilograma de ar, excluindo o peso do próprio vapor. Em contrapartida, a umidade relativa é o termo mais conhecido para representar a presença de vapor no ar. Ela expressa uma relação percentual entre a quantidade de vapor existente no ar e o ponto de saturação do mesmo.

O conhecimento da quantidade de vapor d'água existente no ar é essencial em diversos ramos da atividade humana. A umidade do ar é um dos fatores que condicionam o desenvolvimento de muitos microrganismos patogênicos que atacam as plantas. Além disso, a transpiração vegetal está intimamente relacionada com a umidade do ar adjacente. Também é reconhecida a influência da umidade na

longevidade, na fecundidade e na taxa de desenvolvimento de muitas espécies de insetos (NETO, 2010).

Por outro lado, um dos parâmetros utilizados para definir o grau de conforto ambiental para pessoas e animais é a umidade do ar. Ressalta-se que a manutenção da faixa ótima de umidade do ar constitui um objeto de controle constante durante o armazenamento de inúmeros produtos (VAREJAO, 2006).

No contexto de aterros sanitários, especificamente no interior de uma célula de aterro, os resíduos sólidos passam por processos de decomposição que dependem de fatores como água, oxigênio e temperatura. A água envolvida nesse processo pode vir tanto da umidade do próprio resíduo quanto da infiltração pela camada de cobertura, causada por chuvas ou recirculação. Essa umidade é fundamental para a decomposição anaeróbia, pois participa da atividade microbiana. Conforme avança a transformação biológica dos resíduos, o consumo de água é mais característico da etapa de fermentação, enquanto a formação de líquidos se torna mais evidente na fase metanogênica, quando também ocorre a geração de metano e substâncias húmicas (LINS, 2003).

3.2.5 Irradiação Solar

A irradiação solar é um dos elementos meteorológicos mais importantes, pois dela dependem diversos processos físicos que ocorrem na atmosfera e na superfície terrestre. É essa energia que sustenta o aquecimento da superfície, participa da evaporação da água, influencia a temperatura do ar e contribui diretamente para o crescimento e desenvolvimento vegetal, sobretudo por seu papel na fotossíntese e na transpiração (VAREJÃO-SILVA, 2001; VIANELLO; ALVES, 1991). No campo ambiental e agrícola, o conhecimento dessa variável é relevante porque ajuda a compreender o comportamento térmico de uma área, o balanço de energia e a disponibilidade de energia para os processos naturais e biológicos.

Do ponto de vista físico, a radiação emitida pelo Sol chega ao topo da atmosfera como radiação de onda curta. Ao atravessar a atmosfera, parte dessa energia é refletida pelas nuvens, parte é absorvida por gases atmosféricos e outra parte alcança a superfície terrestre, onde volta a ser absorvida, refletida e reemitida. Como a Terra

e a atmosfera possuem temperaturas muito inferiores à do Sol, essa reemissão ocorre predominantemente na faixa de ondas longas, estabelecendo trocas radiativas importantes no sistema terra-atmosfera (VIANELLO; ALVES, 1991; VAREJÃO-SILVA, 2001).

A radiação solar que atinge a superfície pode ser compreendida em duas parcelas principais: a radiação direta, que chega sem sofrer desvio significativo em seu percurso, e a radiação difusa, resultante do espalhamento provocado por moléculas, aerossóis e nuvens. A soma dessas componentes corresponde à radiação solar global. Em dias de céu claro, a parcela direta tende a predominar; já na presença de nebulosidade, a distribuição entre as componentes se modifica, afetando a quantidade total de energia disponível na superfície (WMO, 1981). Essa variação interfere no aquecimento do solo e do ar, no comportamento da umidade e, por consequência, em outros elementos meteorológicos.

Outro aspecto importante é que a quantidade de energia solar disponível em uma localidade não permanece constante ao longo do tempo. Ela varia em função da latitude, da época do ano, do ângulo de incidência dos raios solares e das condições atmosféricas locais. Por isso, a dinâmica da irradiação solar está diretamente associada à sazonalidade climática e ao comportamento de variáveis como temperatura, evaporação e evapotranspiração (VAREJÃO-SILVA, 2001; WMO, 1981). Em estudos ambientais, essa informação é valiosa porque permite interpretar melhor as condições microclimáticas de uma área e os mecanismos que controlam as trocas de energia e água com a atmosfera.

Embora a irradiação solar possa ser medida com instrumentos específicos, como piranômetros, sua obtenção contínua nem sempre é simples, seja pelo custo dos equipamentos, seja pela necessidade de manutenção e calibração. Por essa razão, muitos estudos recorrem a métodos de estimativa a partir de variáveis meteorológicas mais facilmente observadas. Entre esses métodos, destaca-se a relação proposta por Bristow e Campbell (1984), que associa a radiação solar às temperaturas máxima e mínima do ar, sendo bastante útil em situações em que não há registros diretos de radiação. Essa possibilidade de estimativa amplia o uso da variável em pesquisas meteorológicas, hidrológicas e agrícolas.

No contexto da engenharia ambiental e do monitoramento meteorológico, a irradiação solar tem papel central porque influencia diretamente o balanço energético da superfície. A energia disponível condiciona processos como aquecimento do solo,

aquecimento do ar e transferência de água para a atmosfera. Por isso, ao estudar sistemas ambientais sujeitos à forte ação do clima, como áreas de disposição de resíduos, o acompanhamento da radiação solar ajuda a entender com mais precisão o comportamento térmico local e sua relação com outras variáveis monitoradas (VAREJÃO, 2001; HENRIQUE, 2006).

3.2.6 Evapotranspiração

A evaporação corresponde ao processo físico em que uma substância líquida, ou em alguns casos sólida, passa para o estado gasoso. Já a evapotranspiração representa a perda de água resultante da evaporação do solo associada à transpiração das plantas (TUCCI, 1995).

Conforme Fenn *et al.* (1975), a evapotranspiração é influenciada pelas características do solo e da vegetação, estando também ligada a fatores climáticos como precipitação, temperatura e umidade, que interferem diretamente na capacidade de retenção de água no solo. Lechner (1994) destaca que a vegetação estabelecida sobre a cobertura final do aterro necessita de água tanto para seu desenvolvimento quanto para o processo de transpiração. Além disso, parte da água armazenada no solo é perdida por evaporação, em função da textura do material e das condições climáticas locais. Nesse contexto, é importante diferenciar o período de operação do aterro, no qual pode haver cobertura intermediária, da condição final da área, caracterizada por cobertura definitiva com revegetação.

Jucá (2003 *apud* Maciel, 2003) afirma que as trocas entre a massa de resíduos e o meio externo exercem papel importante sobre as diferentes formas de vida presentes no aterro, influenciando, consequentemente, a velocidade da biodegradação dos resíduos. Nessa mesma linha, McCartney e Zornberg (2002 *apud* Maciel, 2003) descrevem o funcionamento do sistema de cobertura evapotranspirativa em regiões semiáridas, no qual essa camada atua como um meio de armazenamento temporário de umidade. Assim, durante os períodos chuvosos, a cobertura retém parte da água precipitada e, nas estações secas, devolve essa umidade para a atmosfera por meio da evapotranspiração.

3.3 Estações meteorológicas

Para a realização de estudos diagnósticos e prognósticos da atmosfera, a instalação e operação de um sistema de observações meteorológicas tornam-se indispensáveis.

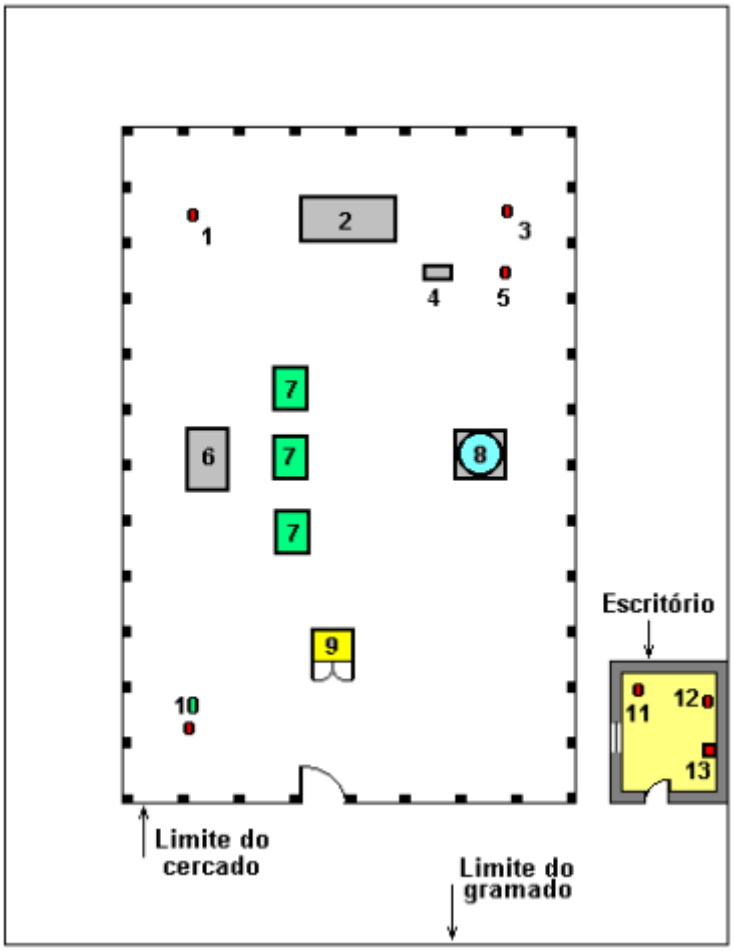
Em 1873, foi criada a Organização Meteorológica Internacional (OMI) com o objetivo de promover a cooperação internacional na área meteorológica. Em 1950, a OMI se transformou na Organização Meteorológica Mundial (OMM), que se tornou um organismo especializado das Nações Unidas. A partir daí, surgiram os Centros Meteorológicos Mundiais (CMM), os Centros Meteorológicos Regionais (CMR) e os Centros Meteorológicos Nacionais (CMN) (VIANELLO, 1991).

No Brasil, uma das instituições que trabalham com dados meteorológicos é o CPTEC (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos), vinculado ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (LUCCI, 2005).

Os dados meteorológicos são obtidos por meio de medições, leituras e registros contínuos, coletados diretamente de instrumentos meteorológicos. Essas observações são realizadas em locais tecnicamente selecionados e preparados para esse fim. As estações meteorológicas podem ser classificadas como sinóticas, climatológicas, ou meteorológicas, além de incluir estações agro meteorológicas, aeronáuticas e especiais (VIANELLO, 1991).

Essas estações são geralmente utilizadas para fins climatológicos e para a previsão do tempo. Na Figura 1, as instalações são rigorosamente padronizadas em vários detalhes, como a espessura dos fios e da tela de proteção, a cor branca utilizada na pintura, e as dimensões exatas dos locais onde os instrumentos meteorológicos serão instalados.

Figura 1- Planta baixa de uma Estação Meteorológica Principal e Respectivos Instrumentos



Fonte: Adaptado de VIANELLO, 1991

Legenda da Figura 1: 1) Heliógrafo e Actinógrafo 2) Conjunto de geotermômetros no solo nú 3) Pluviógrafo 4) Orvalhógrafo 5) Pluviômetro 6) Evapotranspirômetro (caixa de drenagem) 7) Evapotranspirômetro (tanques gramados) 8) Tanque Classe A 9) Abrigo meteorológico: (evaporímetro de Piche, termômetros de máxima e mínima, conjunto psicrométrico, termógrafo, higrógrafo 10) Anemômetro e catavento de leitura instantânea 11) Anemógrafo 12) Barômetro 13) Barógrafo.

Existem dois tipos de estações meteorológicas climatológicas: as digitais e as convencionais. As digitais são equipadas com softwares exclusivos que permitem a geração de relatórios, tabelas ou gráficos, tanto para períodos curtos quanto para bases históricas. Isso facilita a análise dos dados e a tomada de decisões em relação

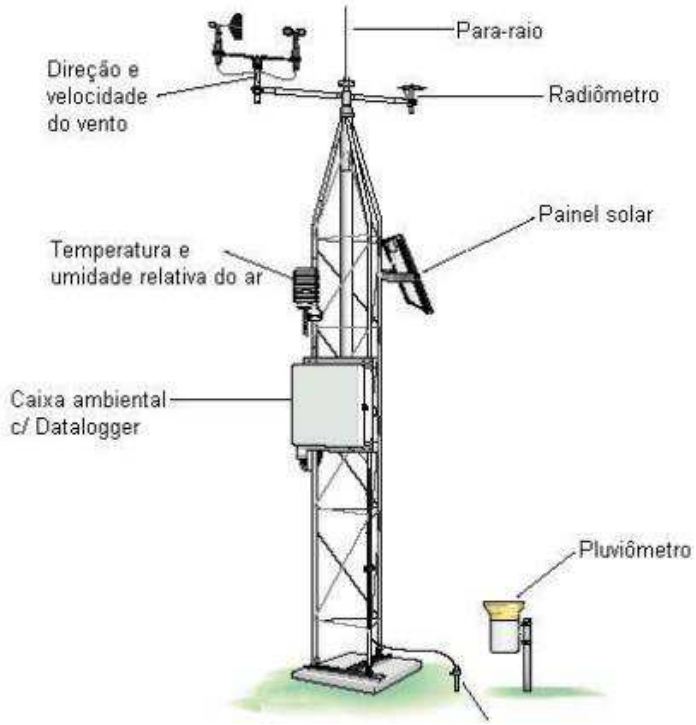
aos impactos gerados pelas condições meteorológicas, otimizando o processo decisório.

Por sua vez, as estações meteorológicas automatizadas (Figura 2) possibilitam a coleta e o registro contínuo de dados meteorológicos e ambientais ao longo do tempo.

Assim, por meio dessas estações, é possível obter relatórios horários ou diários das principais variáveis meteorológicas conectadas ao computador. As estações meteorológicas automáticas são configuráveis e, geralmente, seus sistemas incluem uma plataforma para a coleta de dados, sensores e um sistema de comunicação. As variáveis monitoradas incluem:

- Temperatura e umidade do ar (em conjunto);
- Velocidade e direção do vento (em conjunto);
- Desvio padrão do vento;
- Precipitação;
- Radiação solar global, líquida e PAR;
- Luminosidade;
- Pressão barométrica e umidade do solo;
- Umidade e temperatura dos solos, entre outras.

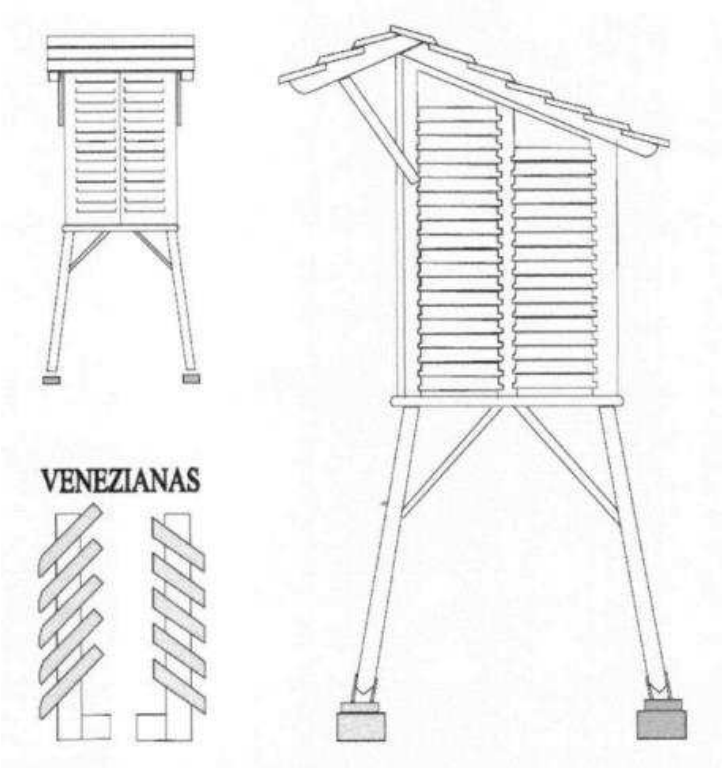
Figura 2 - Estação Digital e Instrumentos



Fonte: Adaptado de VAREJÃO, 2006

As estações climatológicas convencionais são mais simplificadas. Em geral, possuem um abrigo meteorológico (Figura 3) de menor porte e são equipadas com sensores para medir temperatura e precipitação. Além disso, permitem a realização de observações visuais locais de todos os instrumentos meteorológicos.

Figura 3 - Abrigo de instrumentos meteorológicos usados em estações convencionais



Fonte: VAREJÃO (2006)

3.3.1 Abrigo de Stevenson

A exatidão na coleta de dados atmosféricos depende diretamente da proteção dos instrumentos contra interferências ambientais. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2018), os sensores de temperatura e umidade devem ser instalados em compartimentos que os protejam da radiação solar direta, da radiação terrestre e da precipitação, garantindo, contudo, que o ar circule livremente ao redor dos sensores.

Este compartimento é tecnicamente denominado Abrigo de Stevenson (ou *Stevenson Screen*). Conforme detalhado no glossário técnico da Cordulus (2024), o

abrigo consiste em um invólucro projetado para que os instrumentos meteorológicos registrem a temperatura real do ar, evitando erros sistemáticos causados pelo aquecimento direto das superfícies dos sensores por fontes de calor externas.

O design baseado em venezianas inclinadas, padrão recomendado pela WMO (2018), permite a ventilação por convecção natural. A Figura 3 mostra um exemplo de um abrigo de Stevenson para uma estação meteorológica.

3.4 Sensores e dispositivos utilizados no sistema

3.4.1 Microcontrolador

Segundo Ayala, o microcontrolador pode ser compreendido como um computador em um único chip, pois reúne em sua arquitetura elementos típicos de processamento, como unidade lógica e aritmética, registradores e contador de programa, além de memória ROM, memória RAM, portas de entrada e saída, comunicação serial, contadores e circuito de clock. Ainda de acordo com o autor, sua principal aplicação está no controle de máquinas e processos por meio de programas fixos armazenados em memória, o que o torna amplamente empregado em sistemas embarcados.

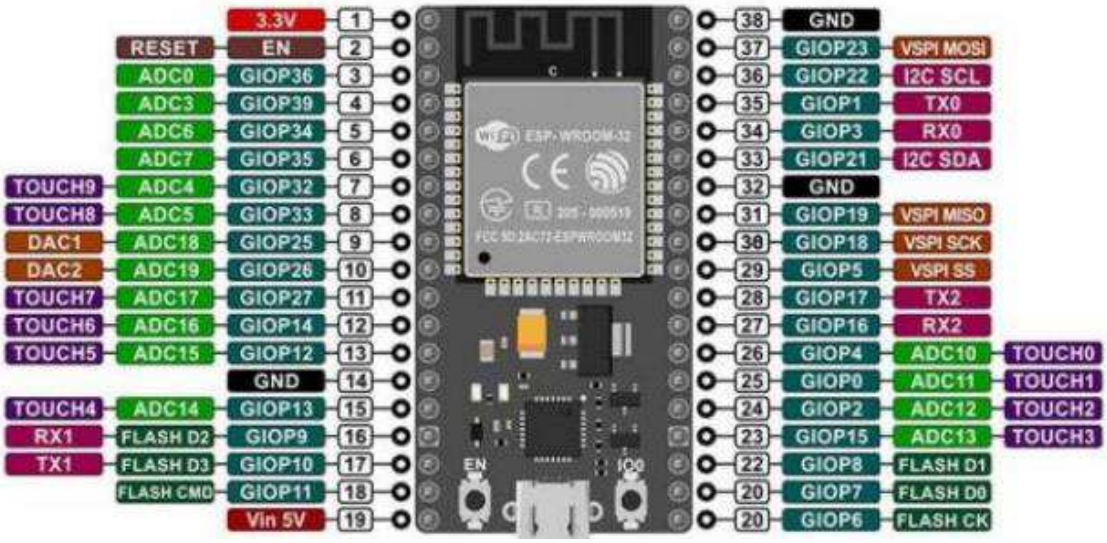
3.4.1.1 ESP32

O ESP32 é uma família de microcontroladores desenvolvida pela Espressif Systems, voltada a aplicações embarcadas e de Internet das Coisas. De acordo com a documentação oficial do fabricante, o dispositivo pode operar com arquitetura Xtensa LX6 de 32 bits em versões de um ou dois núcleos, com frequência de até 240 MHz, além de oferecer conectividade Wi-Fi em 2,4 GHz e Bluetooth, memória ROM e SRAM internas, GPIOs programáveis e diversos periféricos integrados, como ADC, DAC, interfaces SPI, I2C, I2S e UART. Essas características tornam o ESP32 adequado para sistemas de monitoramento, automação e aquisição de dados.

No caso do módulo ESP32-WROOM-32D, a Espressif Systems informa que ele integra flash SPI externa de 4 MB, possui dimensões de 18 × 25,5 × 3,1 mm e foi projetado para aplicações com conectividade Wi-Fi e Bluetooth/Bluetooth Low Energy,

oferecendo bom desempenho em soluções embarcadas baseadas no chip ESP32. A Figura 4 representa o esquema de pinagem do microcontrolador ESP32.

Figura 4 - Diagrama de pinagem (pinout) do módulo ESP32 DEVKIT v1 de 38 pinos.



Fonte: Adaptado de Mischianti (2020)

3.4.2 Sensor de efeito Hall

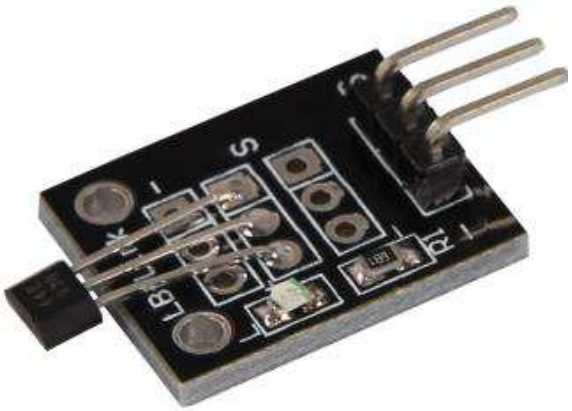
O sensor de efeito Hall tem como base um fenômeno físico observado quando um material percorrido por corrente elétrica é submetido a um campo magnético perpendicular. Nessa situação, surge uma diferença de potencial transversal, chamada tensão Hall. Em termos práticos, esse princípio permite transformar a presença ou a variação de um campo magnético em um sinal elétrico utilizável em circuitos eletrônicos. Essa é a base que explica por que esse tipo de sensor é tão usado em sistemas de medição, detecção e controle. (Kasap, 2001; Honeywell, 1998).

Na prática, os sensores Hall são muito úteis porque conseguem detectar aproximação magnética, posição, rotação e velocidade sem a necessidade de contato mecânico direto. Isso reduz desgaste e aumenta a vida útil do sistema, o que é interessante em aplicações que ficam funcionando continuamente. Em materiais da Honeywell, esse tipo de sensor aparece associado a usos como detecção de posição, monitoramento de movimento e leitura de velocidade, mostrando sua versatilidade em sistemas embarcados. (Honeywell, 1998)

Outro ponto importante é que o sensor de efeito Hall é um dispositivo eletrônico ativo, ou seja, precisa de alimentação elétrica para funcionar. Dependendo do modelo, sua saída pode ser analógica, variando conforme a intensidade do campo magnético, ou digital, comutando entre níveis lógicos quando o campo atinge determinado valor. Essa característica facilita bastante a integração com microcontroladores, já que o sinal gerado pode ser lido diretamente pelo sistema de controle. (Honeywell, 1998; Honeywell, [s. d.])

Em um projeto de estação meteorológica, por exemplo, o sensor Hall pode ser usado para contar voltas de um elemento rotativo ou detectar a passagem de um ímã acoplado a uma peça móvel. Assim, o movimento mecânico é convertido em pulsos elétricos que podem ser processados pelo microcontrolador. Esse tipo de solução costuma ser interessante quando se deseja uma leitura confiável, com baixa manutenção e sem contato físico entre as partes móveis e o elemento sensor. (Honeywell, [s. d.])

Figura 5 - Sensor Magnético de Efeito Hall ky-003



Fonte: JOY-IT (2018)

3.4.3 Codificador Magnético AS5600

O AS5600 é um sensor magnético rotativo empregado na medição de posição angular absoluta. A ams OSRAM (2018) o descreve como um dispositivo programável, sem contato, destinado à leitura do ângulo de um ímã diametralmente magnetizado

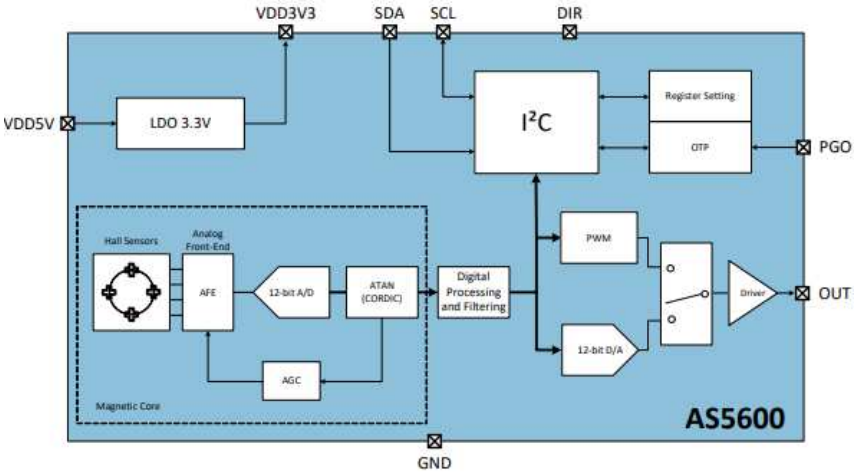
posicionado no eixo do sensor. Seu princípio de funcionamento é baseado em sensores Hall planares, cujos sinais são condicionados internamente, convertidos por um conversor analógico-digital e processados por um bloco CORDIC para o cálculo do ângulo e da magnitude do campo magnético. O fabricante informa ainda que o sensor realiza medições em 360°, com possibilidade de programação de faixas menores.

Em termos de comunicação, o AS5600 possui interface I²C de dois fios, operando como dispositivo escravo no barramento. Conforme a ams OSRAM (2018), O datasheet informa que o endereço escravo de 7 bits do dispositivo é 0x36, e que a comunicação é realizada pelas linhas SDA e SCL, com suporte a modos *Standard, Fast e Fast-mode Plus*, atingindo frequência máxima de clock de 1 MHz.

Por padrão a saída do Sensor de Ângulo Magnético AS5600 detecta variações entre 0 e 360 graus, mas é possível ajustar esse valor de acordo com as necessidades do seu projeto, definindo um ângulo zero (posição de início) e um ângulo máximo (posição de parada). O módulo conta também com módulo *LOW POWER* que reduz o consumo de energia durante o funcionamento, o que torna o AS5600 indicado para projetos compactos ou até mesmo automação e IoT (Internet das Coisas).

Do ponto de vista elétrico, o AS5600 pode ser alimentado em duas condições principais: em 5 V, com faixa típica de 4,5 V a 5,5 V, utilizando o regulador interno, ou em 3,3 V, com faixa típica de 3,0 V a 3,6 V. A ams OSRAM (2018) também apresenta valores típicos de corrente de alimentação de 6,5 mA no modo nominal, 3,4 mA no modo de baixo consumo LPM1, 1,8 mA no LPM2 e 1,5 mA no LPM3.

Figura 6 – Diagrama de blocos do AS5600

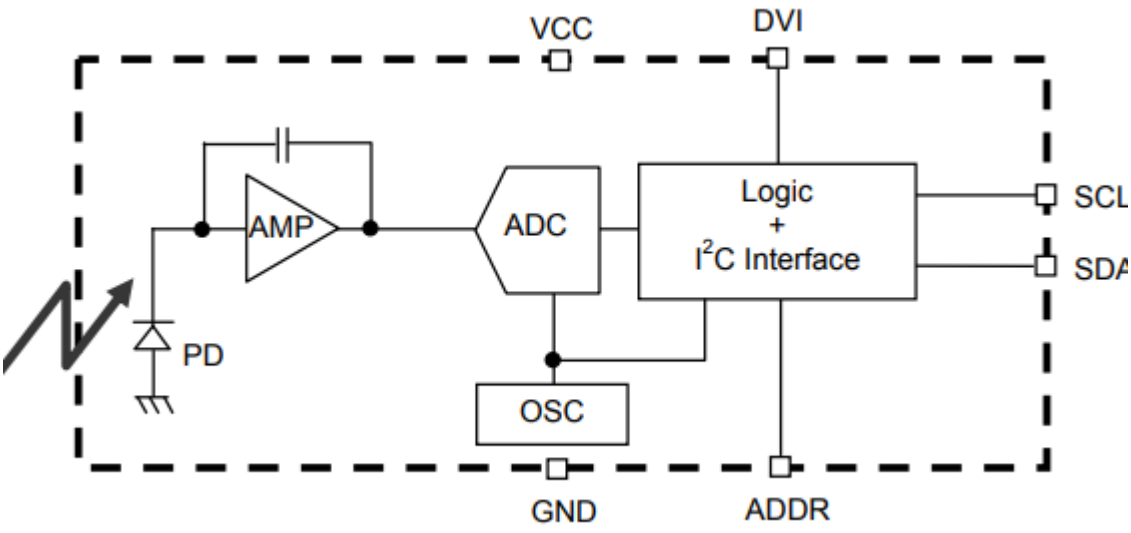


Fonte: ams AG (2018)

3.4.4 BH1750

O sensor de luminosidade BH1750 é um sensor que efetua a comunicação com a interface de dados através do protocolo I2C, utilizado para detectar a incidência de luz de um ambiente, bastante aplicado em sistemas que detectam a luminosidade para a realização de ajustes de eficácia da iluminação (MINATEL, 2017). O sensor BH1750 tem a capacidade de determinar a quantidade de luz que está incidindo em um determinado local, diferentemente do LDR. Este sensor fornece valores medidos em lux (lúmen/m²), que em outras palavras, seria a medida de um lúmen por um metro quadrado, que se trata da unidade padrão para determinar os níveis de luminosidade de determinados ambientes. O sensor de intensidade luminosa BH1750 é classificado como um sensor de luz com saída de dados digitais. Além disso, o sensor BH1750 inclui internamente um fotodiodo de silício com uma capacidade de resposta espectral na região do visível que assemelha-se a resposta espectral do olho humano, conta também com um amplificador de sinais que é responsável por converter a corrente elétrica gerada no fotodiodo em um sinal analógico de tensão, com um conversor analógico-digital de 16 bits de resolução para que seja possível a digitalização da tensão gerada pelo amplificador, e um circuito digital lógico responsável por calcular os níveis de luminosidade (GUADAGNINI e col., 2019).

Figura 7- Diagrama de bloco do BH1750



Fonte: Rohm Semiconductor (2011)

- ✓ PD: fotodiodo com resposta espectral aproximadamente semelhante à do olho humano.
- ✓ AMP: amplificador operacional integrador responsável por converter a corrente gerada pelo fotodiodo em tensão.
- ✓ ADC: conversor analógico-digital utilizado para obter dados digitais com resolução de 16 bits.
- ✓ Lógica + interface I²C: bloco responsável pelo cálculo da luz ambiente e pela comunicação por meio do barramento I²C. Esse bloco inclui, entre outros, o registrador de dados, utilizado para armazenar os dados de luz ambiente, com valor inicial “0000_0000_0000_0000”, e o registrador de tempo de medição, utilizado para definir o tempo de medição, com valor inicial “0100_0101”.
- ✓ OSC: oscilador interno, com frequência típica de 320 kHz, utilizado como clock da lógica interna.

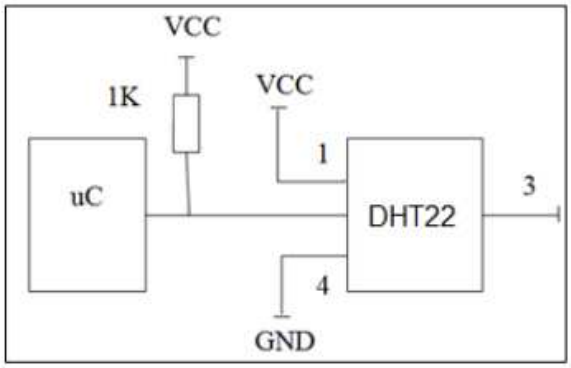
3.4.5 DHT22

É um sensor digital que mede a temperatura e a umidade e é composto por um termistor (medição de temperatura) e um sensor capacitivo (medição da umidade).

Este sensor possui 4 pinos (figura x):

- ✓ O pino 1 é um pino de alimentação;
- ✓ O pino 2 é o pino de dados;
- ✓ O pino 3 é um pino NULL;
- ✓ O pino 4 é o pino de aterramento

Figura 8 - Esquemático elétrico do sensor DHT22



Fonte: Desconhecida

Figura 9 - Sensor DHT 22



Fonte: Aosong Electronics Co.,Ltd

3.4.6 BMP180

O BMP180 é um sensor de pressão fabricado pela empresa Bosch. O sensor de pressão atmosférica mede a pressão absoluta ao redor do sensor, que varia de acordo com o clima e a altitude. Dependendo de como os dados são utilizados, o BMP180 pode ser empregado para monitorar mudanças climáticas, medições de altitude ou outras tarefas que exijam leituras precisas de pressão.

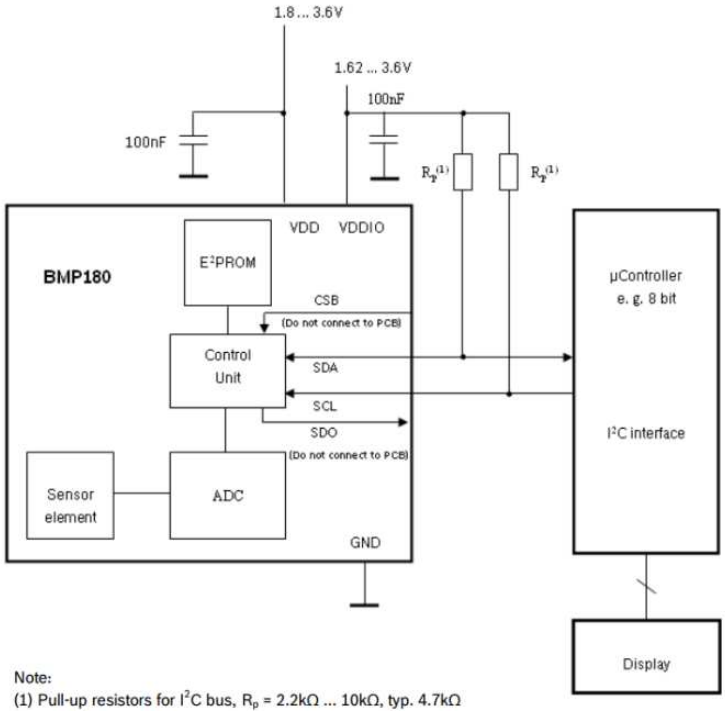
O BMP180 possui uma taxa de amostragem de até 128 amostras por segundo, e seu design permite conexão direta ao microcontrolador por meio de comunicação I2C. O BMP180 é composto por um sensor piezorresistivo, um conversor analógico-digital e uma unidade de controle com E2PROM e interfaces I2C.

Figura 10 - BMP 180



Fonte: (BOSCH SENSORTEC, 2013)

Figura 11 - Circuito de aplicação BMP 180



Fonte: (BOSCH SENSORTEC, 2013)

3.4.7 Display

O display TFT LCD de 1,44 polegadas utilizado neste trabalho é um módulo gráfico colorido geralmente baseado no controlador ST7735, responsável pelo controle da exibição das informações na tela. Esse circuito integrado permite a conexão direta com microcontroladores e aceita comunicação serial SPI, além de armazenar os dados de imagem em memória interna, o que facilita sua aplicação em sistemas embarcados compactos (SITRONIX TECHNOLOGY CORP., 2010). O ST7735 também suporta resoluções como 128 × 160 pixels e operação com até 262 mil cores, características que tornam esse tipo de display adequado para a

apresentação local de variáveis de monitoramento, textos e informações numéricas em projetos instrumentais (SITRONIX TECHNOLOGY CORP., 2010).

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Nesta seção é realizada uma curta descrição do campo experimental, e como o projeto está sendo desenvolvido.

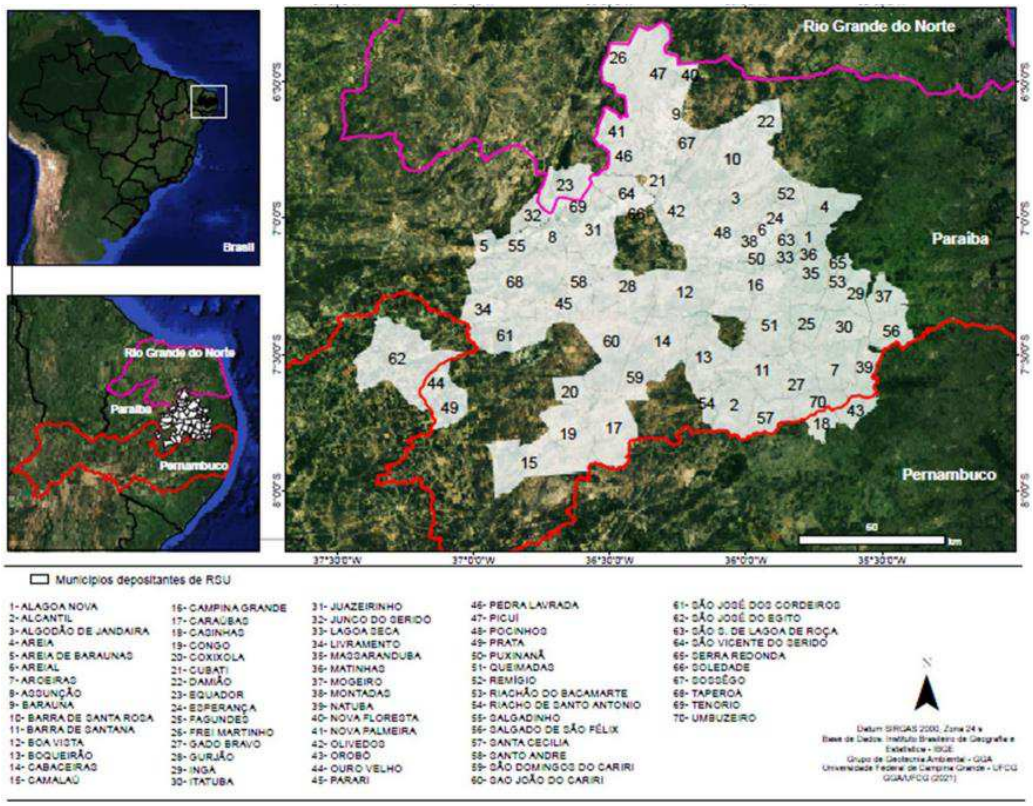
4.1 Caracterização da área de aplicação

A área de estudo de desenvolvimento desse projeto é o Aterro Sanitário de Campina Grande (ASG) localizado em uma região semiárida do Brasil. O município onde ele está situado abrange uma área territorial de 591,658 km² e possui uma população estimada de 413.830 habitantes, segundo dados do IBGE (2021). A altitude da região é de 551 metros. De acordo com a AESA (2022), o clima local é semiárido, com uma temperatura máxima anual média de 28,6 ºC, mínima média de 19,5 ºC e uma média geral de 22,7 ºC. A evaporação anual é de 1417,4 mm, enquanto a pluviosidade média anual é de 802,7 mm. Conforme a classificação climática de Köppen e Geiger (1928), o município apresenta o tipo de clima Bsh, caracterizado como semiárido quente e seco.

A Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) também classifica Campina Grande como uma região semiárida. Em sua Portaria nº 80 (SUDENE, 2021), que revisa a delimitação do Semiárido brasileiro, são apresentadas características desse clima, incluindo chuvas irregulares, precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, índice de aridez de *Thornthwaite* igual ou inferior a 0,5 e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%.

O aterro sanitário em análise possui uma área total de 64 hectares, sendo que 40 hectares são dedicados à disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU). Ele foi projetado para uma vida útil de 25 anos e está em operação desde julho de 2015. No ano de 2022, o aterro recebeu resíduos de 70 municípios, dos quais 66 pertencem ao Estado da Paraíba, 3 ao Estado de Pernambuco e 1 ao Estado do Rio Grande do Norte, totalizando uma média de 600 t de RSU por dia. A Figura 11 ilustra os municípios que depositam RSU no empreendimento**.** (Trecho retirado da dissertação da Amanda Paiva).

Figura 12 - Localização do Aterro Sanitário em região semiárida e dos municípios que depositam RSU no empreendimento entre 2015 e 2024.



Fonte: GGA(2022)

Figura 13 - Vista superior do Aterro Sanitário de Campina Grande-Pb.

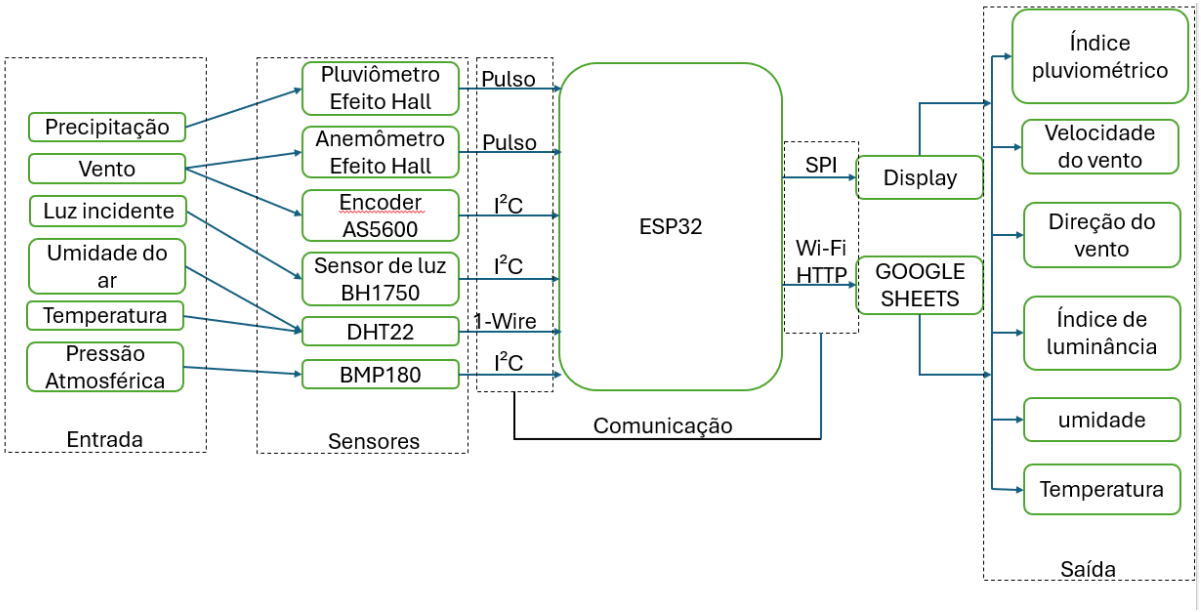


Fonte: GGA (2022)

4.2 Desenvolvimento da estação meteorológica

Neste tópico, será detalhado o processo de desenvolvimento da estação meteorológica, com foco em baixo custo, desde a escolha dos componentes até a implementação física do projeto. A arquitetura do sistema desenvolvido apresenta-se na Figura 14.

Figura 14 - Arquitetura do protótipo da Estação Meteorológica



Fonte: Autoria própria

4.2.1 Desenvolvimento dos sensores

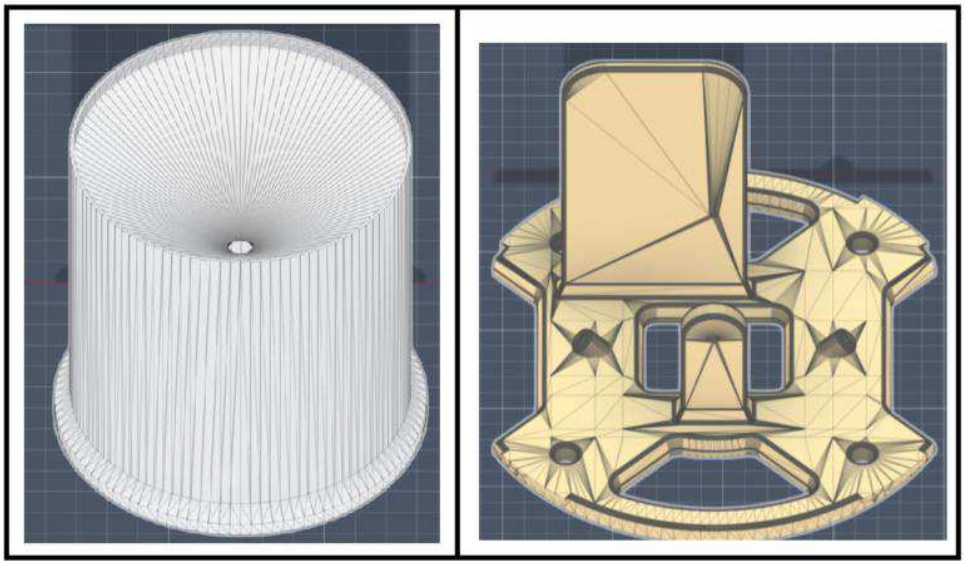
Nesta seção, são apresentadas as etapas de desenvolvimento de cada módulo do sistema do protótipo desenvolvido.

4.2.1.1 Pluviômetro de Báscula

A medição do índice pluviométrico foi realizada através de um pluviômetro de báscula (tipo *tipping bucket*), cujo modelo estrutural foi obtido no repositório *MakerWorld* e produzido com uma impressora 3D utilizando o polímero PETG (Polietileno Tereftalato de Etila Glicol) como material. A escolha deste material justifica-se pela sua elevada resistência mecânica, baixa higroscopia e estabilidade térmica sob exposição direta à radiação solar e outros efeitos mecânicos. O mecanismo de funcionamento baseia-se no equilíbrio de uma gangorra central que, ao atingir um

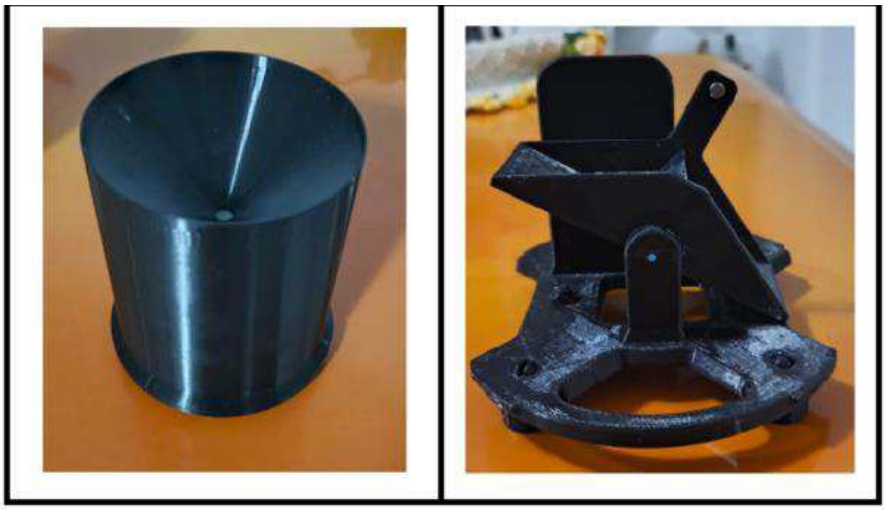
volume pré-determinado de água, bascula por gravidade. Para obtenção do número de basculada, acoplou-se um ímã de neodímio à estrutura móvel e um sensor de efeito Hall à base fixa. A cada movimento de báscula, a variação do fluxo magnético gera um pulso digital processado pelo ESP32, permitindo o cálculo acumulado da precipitação em milímetros (mm).Na figura 15 e 16 mostra o desenho em 3D do protótipo e a sua versão impressa respectivamente.

Figura 15 - Desenho 3D da parte físico do pluviômetro



Fonte: Adaptado do repositório MakerWorld

Figura 16 - Protótipo do pluviômetro impresso em impressora 3D



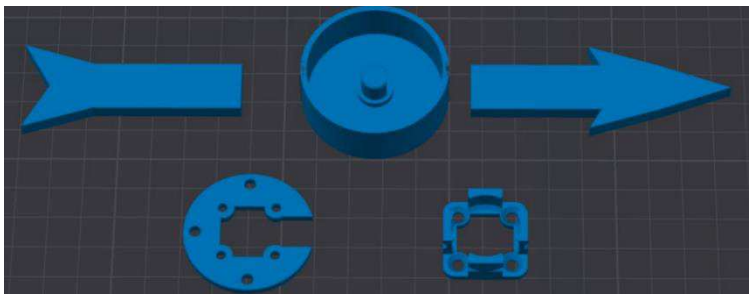
Fonte: Autoria Própria

4.2.1.2 Anemômetro

4.2.1.2.1 Direção do vento

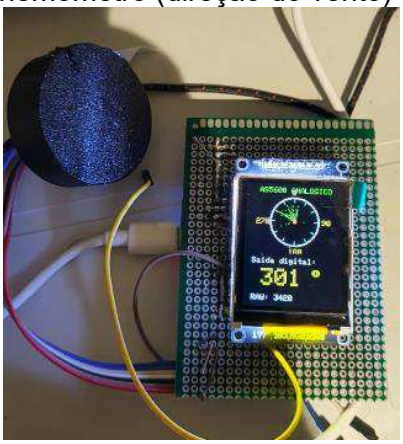
Para determinar a direção do vento, foi escolhido o codificador AS5600. Esse sensor retorna como saída valores de ângulos que variam de 0 a 360º com uma resolução de 12 bits e com erro de linearidade do sistema em torno de 1 grau, de acordo com o datasheet do fornecedor. Além disso, trata-se de um sensor magnético sem contato, o que reduz desgastes mecânico. Sua estrutura física foi desenhada no software FUSION360 com espaço para o encaixe do AS5600, do ímã magnético e com uma valeta que mostra a direção do vento de forma analógica.

Figura 17 - Desenho 3D da parte que compõe o anemômetro para medireção do vento



Fonte: Autoria Própria

Figura 18 - Teste manual do funcionamento do anemômetro (direção do vento)

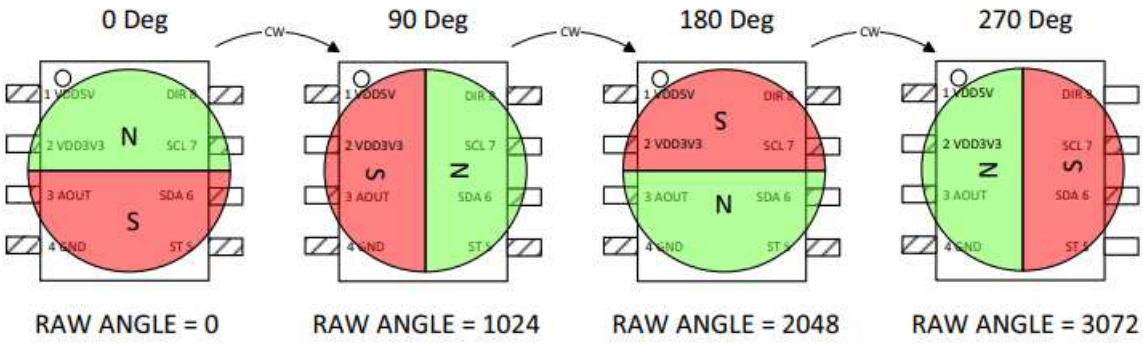


Fonte: Autoria Própria

4.2.1.2.1.1 Montagem do AS5600

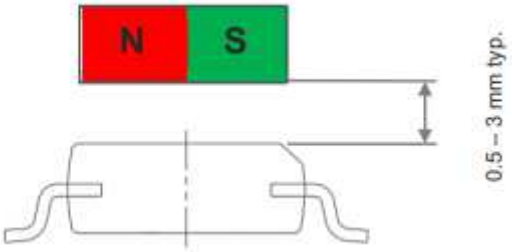
De acordo com o *datasheet* do fornecedor, a posição do ímã a ser colocado seria conforme a figura 19, com uma distância entre 0.5 e 3mm, como mostrado na figura 20.

Figura 19 - Posição do ímã em relação ao CI do Codificador AS5600



Fonte: Adaptado de ams AG

Figura 20 - Distância entre o ímã e o CI



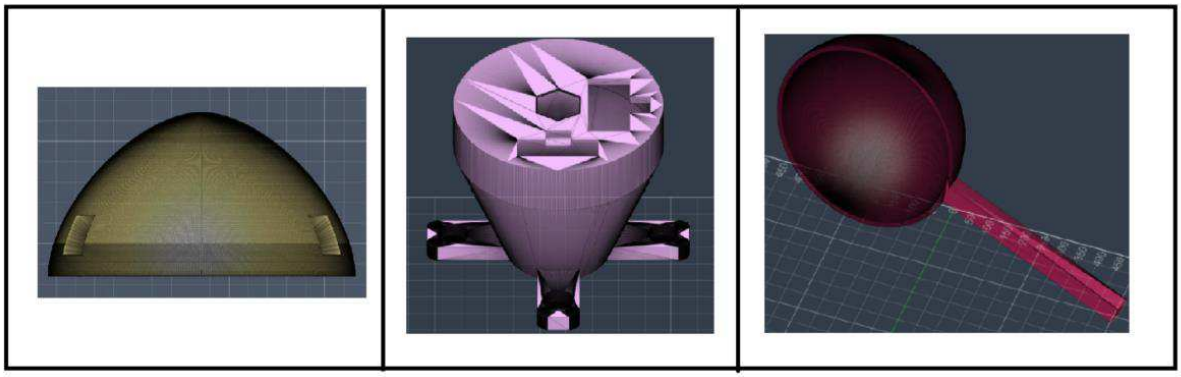
Fonte: Adaptado de ams AG

Então, para a realização do protótipo, foi criado, em desenho 3D, uma estrutura em que a posição do ímã em relação ao CI pudesse estar de acordo com o *Datasheet* do Fabricante para obter o melhor resultado.

4.2.1.2.2 Velocidade do vento

Para a medição da velocidade do vento, foi desenvolvido fazendo-se um reaproveitamento de um mancal e eixo de um microventilador (cooler), com a remoção das bobinas, para diminuição do torque de resistência magnética, permitindo que o eixo gire livremente sob baixas velocidades de vento. A detecção do movimento baseia-se no princípio do efeito hall: o campo magnético do ímã acoplado ao rotor aciona o sensor a cada rotação, gerando um pulso digital. Para a estrutura externa, foi impresso na impressora 3D um modelo de anemômetro que se encontra disponível no repositório *MakerWorld*, com adaptações físicas para o encaixe das peças retiradas do cooler.

Figura 21 - Desenho 3D das peças do anemômetro



Fonte: Adaptado do repositório MakerWorld

Figura 22 - Protótipo impresso em impressora 3D do anemômetro



Fonte: Autoria Própria

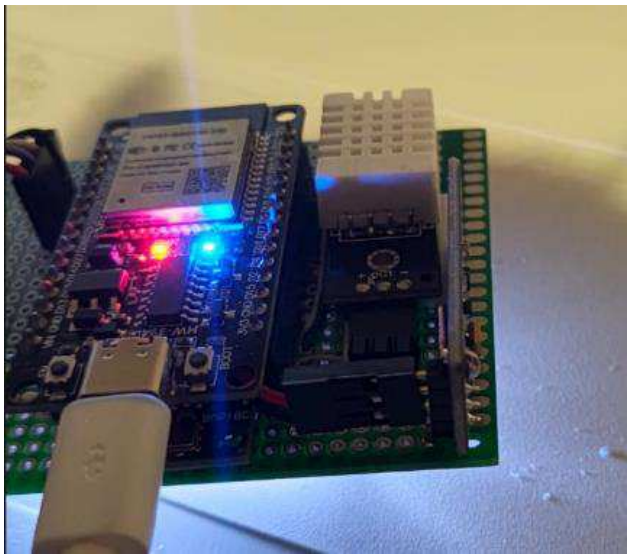
4.2.1.3 Sensores de umidade, temperatura, pressão e luminosidade

Para a coleta das variáveis de umidade, temperatura, pressão e iluminância, foram integrados três módulos sensores distintos ao barramento de dados do ESP32.

A medição de temperatura e umidade relativa do ar é realizada pelo sensor DHT22 (AM2302), selecionado devido ao baixo custo, fácil de encontrar em lojas físicas e por ter ótimos desempenho em ambientes externos e saída digital via protocolo *1-wire.* A pressão atmosférica é monitorada pelo sensor piezoresistivo BMP180, que, além da medição barométrica, possibilita a estimativa da altitude relativa e a análise de variações de pressão associadas a tendências meteorológicas.

A detecção da intensidade luminosa é feita pelo sensor BH1750, um fotodiodo digital de 16 bits que converte a luz incidente diretamente em valores de Lux. Diferente de fotorresistores (LDR) comuns, o BH1750 possui uma resposta espectral próxima à do olho humano, garantindo maior fidelidade aos dados de luminosidade instantânea. Os módulos BMP180 e BH1750 compartilham o barramento de comunicação I²C, otimizando o uso dos pinos de entrada e saída (GPIOs) do microcontrolador. A Figura 23 mostra a montagem dos sensores integrados à placa de circuito impresso perfurada.

Figura 23 - Montagem do Sensores BMP180, DHT22 e BH1750



Fonte: Autoria Própria

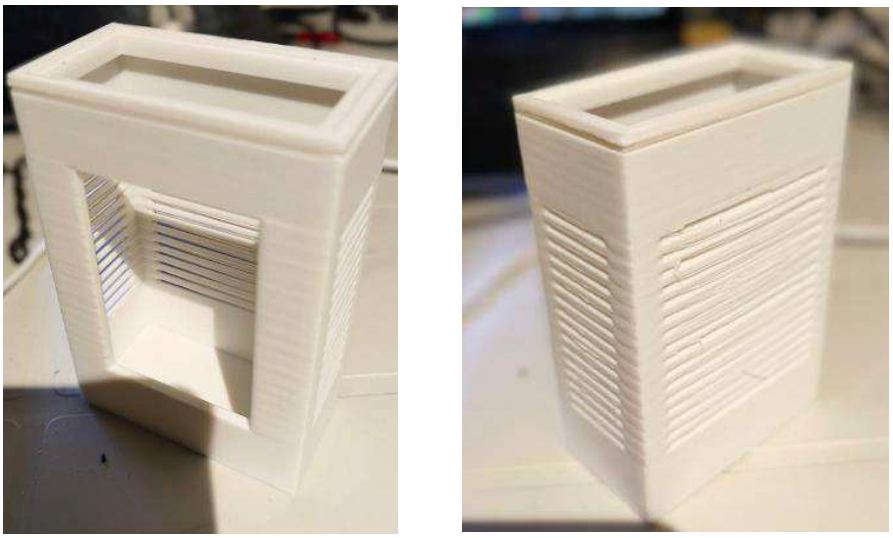
4.2.2 Abrigo meteorológico

Para proteger o circuito e os sensores, foi impressa uma caixa em PETG com as dimensões de 9x6x3 cm. Esse material foi escolhido por ser resistente ao sol e à chuva, garantindo que a estação dure mais tempo em aterros sanitários.

O desenho da caixa foi inspirado no Abrigo de Stevenson, que é o padrão mundial para estações meteorológicas. A principal semelhança são as aberturas laterais (venezianas).

Diferente dos abrigos comuns, essa caixa foi planejada para necessidades específicas para esse projeto, como a entrada de luz para medir a luminosidade e um espaço frontal para a alocação do display.

Figura 24 - Vista Frontal e Vista Lateral do abrigo meteorológico



Fonte: Autoria Própria

4.2.3 Integração dos componentes

A integração dos componentes da estação meteorológica foi realizada a partir do microcontrolador ESP32, responsável por centralizar a leitura, o processamento e a exibição das variáveis monitoradas. A conexão dos dispositivos foi definida de acordo com o protocolo de comunicação e a função de cada elemento no sistema.

Os sensores BMP180, BH1750 e AS5600 foram conectados ao barramento I2C, utilizando os pinos GPIO 21 (SDA) e GPIO 22 (SCL). Essa escolha permitiu o compartilhamento do mesmo barramento entre múltiplos dispositivos, reduzindo a

quantidade de pinos ocupados no microcontrolador e simplificando a montagem do circuito.

O sensor DHT22 foi conectado a uma porta digital exclusiva do ESP32, por meio do GPIO 15, uma vez que sua comunicação ocorre por sinal digital próprio. Já os sensores de efeito Hall utilizados no pluviômetro e no anemômetro foram ligados, respectivamente, aos GPIOs 32 e 33, permitindo a contagem de pulsos gerados pela passagem do ímã em cada evento de basculada ou rotação.

Para a interface de visualização local, foi empregado um display TFT ST7735, conectado ao ESP32 por meio do protocolo SPI. Nessa configuração, foram utilizados os pinos GPIO 23 para transmissão de dados (MOSI), GPIO 18 para clock (SCK), além dos GPIOs 4, 2 e 5 para controle de seleção, comando e reset do display.

A alimentação dos módulos foi realizada em 3,3 V, compatível com o nível lógico do ESP32 e dos sensores empregados, enquanto o aterramento foi unificado em um ponto comum de GND. Essa organização permitiu a integração funcional da estação, assegurando comunicação estável entre os sensores, o microcontrolador e o display.

Tabela 1 - Descrição da pinagem da estação meteorológica

Integração dos componentes da estação meteorológica				
Componente	**Função no sistema**	**Protocolo/Sinal**	**Pino no ESP32**	**Alimentação**
ESP32	Unidade central de processamento	—	—	3,3 V
DHT22	Medição de temperatura e umidade	Digital	GPIO 15	3,3 V
BMP180	Medição de pressão atmosférica	I2C	GPIO 21 (SDA) / GPIO 22 (SCL)	3,3 V
BH1750	Medição de luminosidade	I2C	GPIO 21 (SDA) / GPIO 22 (SCL)	3,3 V
AS5600	Medição angular da direção do vento	I2C	GPIO 21 (SDA) / GPIO 22 (SCL)	3,3 V
Sensor Hall do pluviômetro	Contagem das basculadas	Digital	GPIO 32	3,3 V
Sensor Hall do anemômetro	Contagem das rotações	Digital	GPIO 33	3,3 V
TFT ST7735	Exibição local dos dados	SPI	GPIO 23 (MOSI), GPIO 18 (SCK), GPIO 4 (CS), GPIO 2 (DC), GPIO 5 (RST)	3,3 V

Fonte: Autoria Própria

4.2.4 Conectividade e visualização dos dados

4.2.5 Interface Homem-Máquina (IHM) Local

Para a visualização instantânea no local da instalação, foi integrado um Display TFT ST7735 de 1.44 polegadas, operando via protocolo SPI (Serial Peripheral Interface).

Design da Interface: A interface foi programada para exibir uma lista que mostra os dados de forma compacta, devido às limitações de espaço que o display oferece, o que foi diferente dos testes, o qual eu podia utilizar a tela inteira para uma só variável.

Figura 25 - Display TFT ST7735 com os dados meteorológicos (demonstração)



Fonte: Autoria Própria

4.2.6 Integração com a Nuvem e Iot

A conectividade de longo alcance é estabelecida através do módulo Wi-Fi integrado do ESP32. O fluxo de dados segue a seguinte lógica:

1. Requisição HTTP: A cada intervalo de tempo programado, 1h para o caso da programação deste projeto, o ESP32 compila todas as médias das leituras em uma *string* de dados.

2. Google Apps Script: Os dados são enviados via método POST/GET para um script intermediário hospedado no Google, que atua como uma API personalizada.
3. Armazenamento em Planilha: O script recebe as informações e as insere automaticamente em uma linha do Google Sheets, gerando um banco de dados histórico com carimbo de data e hora (*timestamp*).

Figura 26 - Planilha de dados recebidos no google sheets

Data	Hora	Temperatura_C	Umidade_pct	Pressao_atm	Luminosidade	Direcao_graus	indice_pluv	velocidade_vet
17/03/2026	13:45	38,8	47,8	0,941	54612,5	0	0	0
17/03/2026	14:00	50,5	30,2	0,941	54612,5	0	0	0
17/03/2026	14:15	51,4	29	0,941	54612,5	0	0	0
17/03/2026	14:30	55,6	21,4	0,941	26995,8	0	0	0
17/03/2026	14:45	50,7	26,3	0,941	54612,5	0	0	0

Fonte: Autoria Própria

4.2.7 Desenvolvimento da programação

A programação do sistema foi desenvolvida para o microcontrolador ESP32. O desenvolvimento foi feito em ambiente compatível com a plataforma Arduino (Arduino IDE), utilizando bibliotecas de comunicação e controle para cada dispositivo que constitui esse projeto.

Das bibliotecas utilizadas na programação, é importante citar a *Wire.h*, para comunicação I²C com os sensores BMP180, BH1750 e AS5600; *SPI.h*, para a interface com o *display* TFT; WiFi.h, para conexão do ESP32 à rede sem fio; *HTTPClient.h,* para envio dos dados ao Google Sheets; além de bibliotecas gráficas, como *Adafruit_GFX.h* e *Adafruit_ST7735.h*, e bibliotecas específicas para os sensores integrados ao sistema.

A lógica de funcionamento do programa foi dividida em duas etapas. Na primeira, ocorre a inicialização do sistema, com a configuração dos pinos do ESP32, ativação dos sensores, inicialização do display e conexão à rede Wi-Fi. Na segunda etapa, executada continuamente, o microcontrolador realiza as leituras dos sensores, contabiliza os pulsos dos sensores de efeito Hall do pluviômetro e do anemômetro, processa os dados e mostra os valores no display.

Após esse processamento, as informações também são enviadas por *Wi-Fi* ao Google Sheets, por meio de requisições HTTP, possibilitando o armazenamento

remoto dos dados coletados. Dessa forma, o sistema opera de forma automatizada possuindo armazenamento histórico para geração de gráficos estatísticos e previsões futuras.

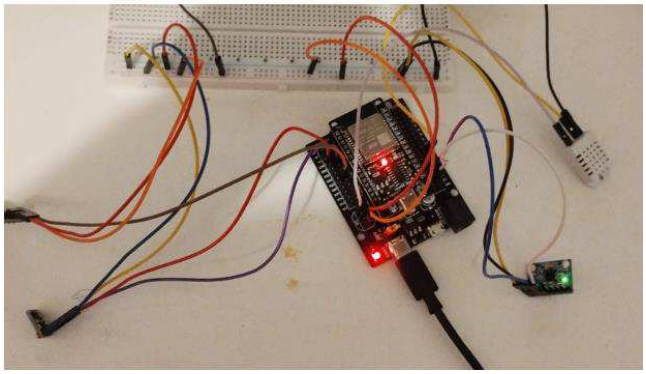
4.3 Testes Realizados

Nesse tópico, será mostrado como foi realizado os testes, em escala de bancada, dos sensores que irão compor a estação meteorológica.

4.3.1 Teste DHT22 e BMP180

Os testes iniciais realizados com os sensores DHT22 e o BMP180, foram feito utilizando uma protoboard, um microcontrolador ESP32 e os respectivos sensores conectados ao circuito de teste. A verificação do funcionamento foi feita por meio da leitura dos dados no monitor serial da plataforma ArduinoIDE, permitindo observar a aquisição das variáveis de temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica. Na figura 27, mostra o primeiro teste realizado.

Figura 27 - Primeiro teste do DHT22 e BMP180



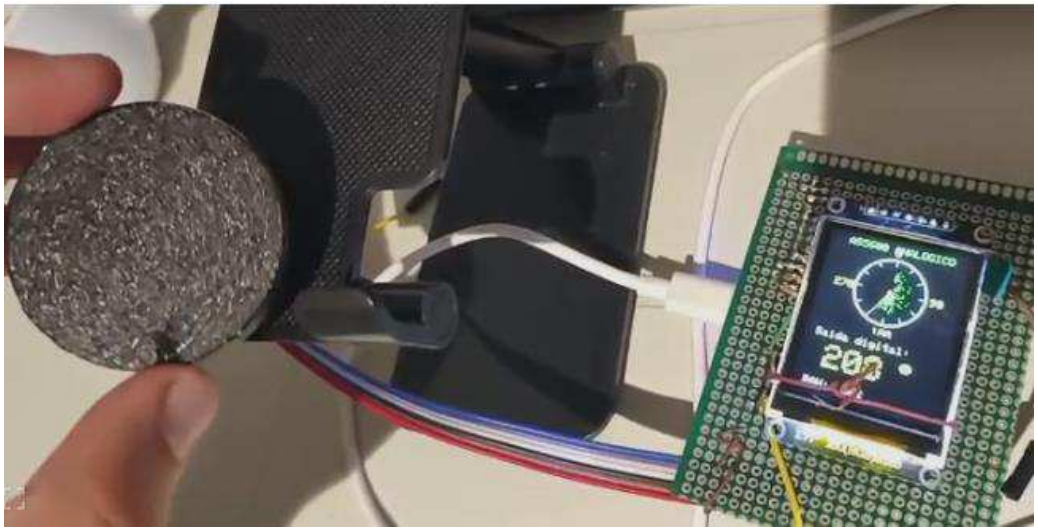
Fonte: Autoria Própria

4.3.2 Teste do codificador AS5600

O teste do codificador magnético AS5600 foi realizado em escala de bancada, utilizando uma peça impressa em 3D para realizar o movimento do eixo durante o ensaio. A análise teve como finalidade verificar a leitura angular fornecida pelo sensor e sua visualização no display do sistema.

Ao longo da movimentação manual do conjunto, observou-se a variação dos valores angulares apresentados na tela dentro da faixa de 0° a 360°, comportamento compatível com o princípio de funcionamento esperado para esse tipo de sensor. Esse teste permitiu uma verificação funcional preliminar do AS5600, indicando sua aplicabilidade na etapa de monitoramento da direção do vento.

Figura 28 - Teste de bancada do Codificador AS5600 de forma manual



Fonte: Autoria Própria

4.3.3 Teste do anemômetro de pás para velocidade do vento

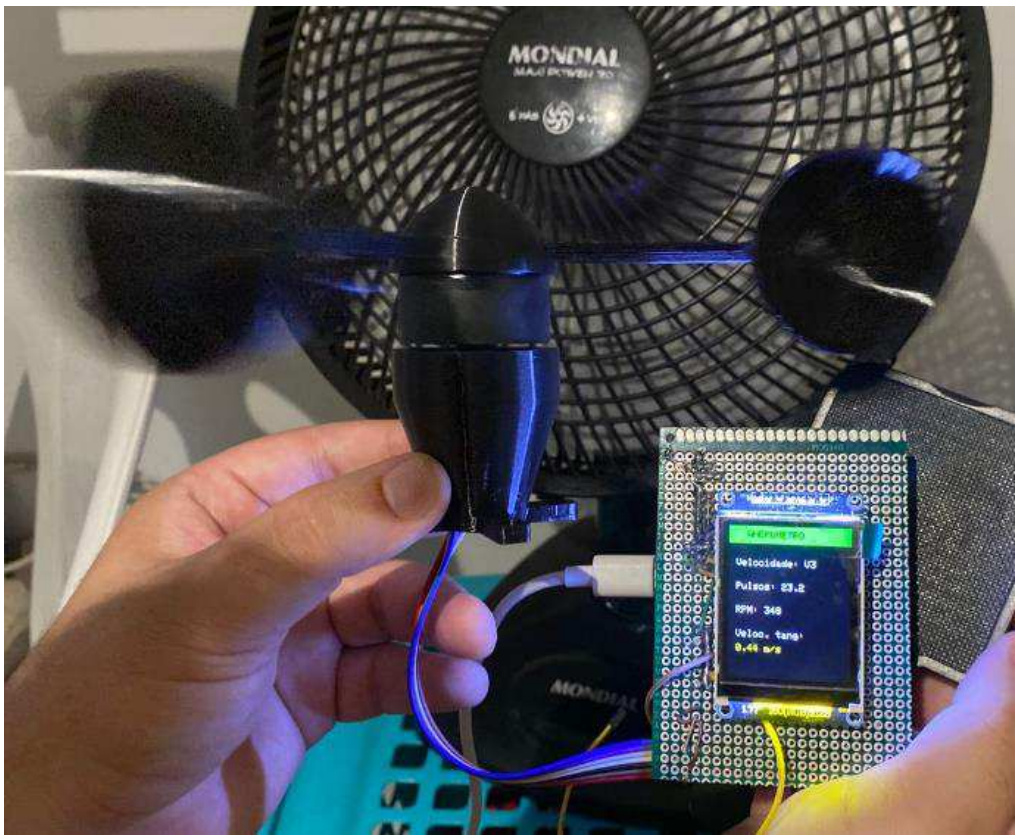
Para esse teste foi utilizado um ventilador como fonte de escoamento de ar para mover a rotação dos pares no eixo do anemômetro. Durante os ensaios, foram adotadas diferentes velocidades de ventilação (3 velocidades disponíveis no ventilador) e diferentes distâncias entre o ventilador e o anemômetro, com o objetivo de observar a resposta do sistema em condições variadas de incidência do fluxo de ar.

A avaliação consistiu no monitoramento da rotação do anemômetro a partir da contagem de pulsos gerados pelo sensor magnético, permitindo a conversão desses valores em velocidade angular, rotação por minuto e velocidade estimada do vento. Com a variação da intensidade do ventilador e da posição relativa entre os elementos do ensaio, observou-se alteração nos valores medidos, apresentando um comportamento compatível com o esperado: maiores velocidades de ventilação e

menores distâncias tenderam a produzir maiores rotações e, consequentemente, maiores valores estimados de velocidade do vento.

Esse procedimento validou a verificação funcional inicial do sistema de medição, indicando que o anemômetro respondeu de forma coerente às mudanças impostas experimentalmente. Ainda que os testes tenham sido conduzidos em ambiente controlado, os resultados observados foram suficientes para confirmar o funcionamento básico do sistema desenvolvido.

Figura 29 - Teste do funcionamento do Anemômetro para medição da velocidade do vento



Fonte: Autoria Própria

4.3.4 Teste do pluviômetro

Para testar o pluviômetro desenvolvido, foi utilizado um copo de medida para adicionar um volume conhecido de água ao protótipo, de modo a avaliar a relação entre o volume inserido e o número de basculadas registradas pelo sistema.

Foram feitos dois ensaios, no primeiro o volume de 100 mL foi aplicado ao pluviômetro com uma queda d’gua um pouco mais acentuado, e o sistema registrou a

ocorrência de 15 basculadas, resultando em um valor médio aproximado de 6,67 mL por basculada, como mostrado na Figura 32. Já para o segundo ensaio, a água caiu de forma mais lenta e foi obtido outros valores de volume para o basculante, 7,14mL por basculada, como mostra a Figura 31.A leitura foi acompanhada em tempo real no display do protótipo, permitindo verificar o comportamento do mecanismo e a contabilização correta dos pulsos gerados a cada acionamento da báscula.

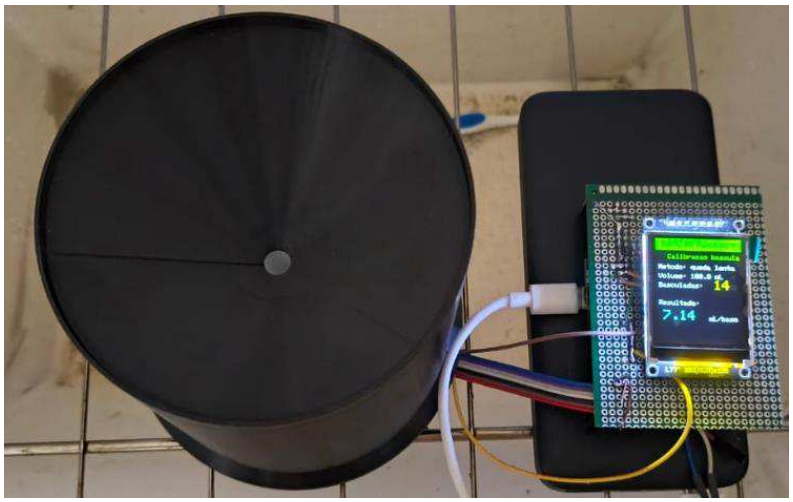
De forma geral, o ensaio indicou que o sistema respondeu adequadamente à entrada controlada de água, apresentando funcionamento coerente entre o volume aplicado, o movimento mecânico da báscula e a leitura do sensor de efeito Hall no interior do pluviômetro. Esse procedimento foi importante para a verificação funcional inicial do pluviômetro e para a definição de parâmetros que poderão ser utilizados em etapas futuras de calibração mais eficiente.

Figura 30 - Pluviômetro impresso com impressora 3D e um copo medidor para realização dos testes de funcionamento



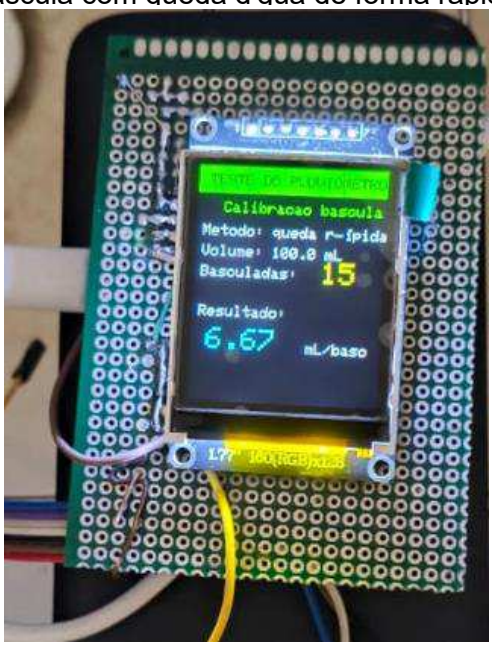
Fonte: Autoria Própria

Figura 31 - Leitura dos dados após adicionar 100mL de água de forma lenta



Fonte: Autoria Própria

Figura 32 - Leitura dos dados para identificar o volume da báscula com queda d'gua de forma rápida



Fonte: Autoria Própria

4.3.5 Teste do BH1750 para luminância

O teste do sensor BH1750 foi realizado com o objetivo de verificar sua resposta à incidência de luz no ambiente. Para isso, o sistema foi posicionado em área externa, de modo a expor o sensor à iluminação natural e observar seu comportamento diante das condições reais de luminosidade.

De forma geral, observou-se que o sensor respondeu à incidência luminosa conforme o esperado, apresentando variações nas leituras de acordo com a exposição à luz. Esse teste foi importante para confirmar o funcionamento básico do BH1750 no protótipo, servindo como etapa inicial para futuras análises relacionadas ao monitoramento da luminância e à estimativa de variáveis derivadas, como a radiação solar global e o índice de evapotranspiração diária.

Figura 33 - Teste do funcionamento do sensor BH1750 ao ar livre



Fonte: Autoria Própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos no desenvolvimento da estação meteorológica proposta. Considerando o tempo disponível para execução do trabalho, os resultados concentram-se na construção do protótipo, na integração entre hardware e software e na realização de testes preliminares em escala de bancada, com foco na verificação funcional dos sensores no quesito elétrico e mecânico.

5.1 Arquitetura implementada do protótipo

Como resultado do desenvolvimento, foi obtido um protótipo funcional de estação meteorológica de baixo custo, composto por sensores de temperatura, umidade, pressão atmosférica, direção do vento, velocidade do vento, precipitação e iluminância, integrados a um microcontrolador ESP32. Além da aquisição dos dados, o sistema também foi estruturado para exibição local em display TFT e envio das informações para armazenamento em nuvem por meio de Google Sheets, evidenciando a implementação da proposta baseada em IoT.

A integração dos componentes demonstrou compatibilidade entre os módulos utilizados e permitiu consolidar uma arquitetura eletrônica simples ao objetivo do trabalho. O compartilhamento do barramento I²C entre BMP180, BH1750 e AS5600 contribuiu para otimização dos pinos do microcontrolador, enquanto os sensores baseados em pulsos, como os do pluviômetro e do anemômetro, foram integrados por meio de entradas digitais específicas. Dessa forma, o protótipo apresentou funcionamento coerente como unidade embarcada de monitoramento meteorológico.

5.2 Resultados dos testes de bancada

Os testes realizados foram voltados à verificação funcional preliminar dos sensores que compõem a estação. Embora não tenham sido executadas testes prolongados em campo e nem comparações com instrumentos de referência, os ensaios permitiram avaliar a resposta básica dos módulos desenvolvidos.

5.2.1 DHT22 e BMP180

Nos testes com os sensores DHT22 e BMP180, observou-se a aquisição de temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica por meio do monitor serial da Arduino IDE, assim como, posteriormente, no display TFT e no google sheets. O ensaio demonstrou que o sistema foi capaz de ler e disponibilizar as variáveis ambientais previstas para essa etapa do projeto.

Do ponto de vista da discussão, esse resultado mostra que o módulo responsável pelas variáveis atmosféricas básicas apresentou funcionamento satisfatório em bancada. Entretanto, por não ter havido aferição frente a equipamento padrão, os resultados devem ser interpretados como validação funcional inicial, e não como certificação de exatidão metrológica.

5.2.2 Codificador AS5600

O teste do codificador magnético AS5600 mostrou a variação angular ao longo da faixa de 0° a 360°, conforme esperado para um sensor de posição. Esse comportamento indica que o dispositivo se mostrou adequado para a aplicação proposta de monitoramento da direção do vento, sobretudo pela possibilidade de leitura contínua do deslocamento angular.

Como discussão, pode-se afirmar que o resultado foi coerente com as especificações previstas para o sensor, embora a calibração da correspondência entre ângulo medido e direção cardeal ainda dependa de montagem definitiva em campo, pois dependerá do referencial para a instalação.

5.2.3 Anemômetro

Nos ensaios com o anemômetro, a aplicação de fluxo de ar por meio de ventilador, em diferentes velocidades e distâncias, resultou em alterações nos valores observados de pulsos, rotação e velocidade estimada. De maneira geral, verificou-se que maiores velocidades de ventilação e menores distâncias produziram respostas mais elevadas, indicando sensibilidade do sistema às mudanças impostas experimentalmente.

Esse resultado tem sua relevância porque demonstra que o conjunto mecânico e eletrônico respondeu de forma coerente às mudanças feitas para o escoamento de ar. Isso mostra que, com realização de mais testes e calibração, esse sistema pode ser utilizado para realizar o monitoramento ambiental.

5.2.4 Pluviômetro

O pluviômetro foi o subsistema que apresentou o resultado quantitativo mais objetivo entre os testes realizados. Durante o ensaio de calibração preliminar, foram aplicados 100 mL de água ao dispositivo, sendo registradas 15 basculadas para um derramamento rápido e 14 basculada para um derramamento mais devagar, o que resultou em um valor médio aproximado de 6,67 mL e 7,15mL, respectivamente, por basculada.

Esse resultado demonstra que o mecanismo de báscula foi efetivamente acionado e que o sistema composto pelo ímã e o sensor e efeito Hall conseguiu registrar os eventos de forma consistente. Do ponto de vista da discussão, esse ensaio é importante por estabelecer um parâmetro inicial de conversão entre o volume aplicado e a resposta do sensor. Ainda assim, recomenda-se que, em etapas futuras, sejam realizados ensaios repetidos com diferentes vazões e volumes, a fim de verificar repetibilidade, linearidade e estabilidade da calibração.

5.2.5 BH1750

O teste do sensor BH1750 em ambiente externo permitiu observar variações nas leituras associadas à incidência luminosa, indicando resposta compatível com o esperado para esse tipo de sensor. O ensaio foi suficiente para comprovar o funcionamento básico do módulo no protótipo.

Na discussão, é importante destacar que o BH1750 fornece valores de iluminância em lux, sendo útil para acompanhamento da intensidade luminosa incidente. Contudo, a utilização desses dados em aplicações mais avançadas, como estimativas relacionadas à radiação, exige tratamento adicional e validação específica, o que extrapola o escopo dos testes preliminares realizados neste trabalho.

5.3 Integração e visualização dos dados

Outro resultado relevante foi a implementação da visualização local por meio do display TFT ST7735 e do armazenamento remoto em Google Sheets. A interface local mostrou-se capaz de exibir as variáveis monitoradas de forma compacta, enquanto a integração com a nuvem demonstrou a possibilidade de registro histórico automatizado dos dados adquiridos.

Esse aspecto fortalece a proposta do trabalho, uma vez que não se trata apenas da leitura isolada de sensores, mas da construção de uma estação com capacidade de aquisição, exibição e armazenamento de informações meteorológicas. Assim, mesmo sem uma campanha extensa de operação em campo, o protótipo já evidencia características típicas de sistemas automáticos de monitoramento.

5.4 Limitações e perspectivas

Apesar dos resultados iniciais indicarem bom funcionamento, algumas limitações consideradas. Os ensaios realizados ocorreram predominantemente em escala de bancada, o que restringe a análise do desempenho do sistema em condições reais de operação contínua no aterro sanitário. Além disso, não foram executadas calibrações completas com instrumentos de referência, o que impede afirmar com exatidão final das medições. Também não houve a análise do desempenho do abrigo de Stevenson, pois é necessário para analisar se os sensores respondem bem em um ambiente fechado e com influência direta das condições ambientais.

Ainda assim, os resultados obtidos mostram que a estação meteorológica desenvolvida atingiu seu objetivo principal como protótipo funcional de baixo custo. A construção física, a integração eletrônica, a resposta preliminar dos sensores e a conectividade IoT indicam que a solução proposta possui potencial para aplicações futuras no monitoramento ambiental de aterros sanitários, especialmente após etapas complementares de calibração, validação em campo e aperfeiçoamento mecânico.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou a construção de um protótipo de estação meteorológica automatizada e de baixo custo, voltada ao monitoramento de variáveis ambientais de interesse para aplicação em aterros sanitários. A proposta mostrou-se viável do ponto de vista construtivo e funcional, juntando os sensores para medição de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, precipitação e iluminância, integrados a um microcontrolador ESP32 e a um sistema de visualização local e armazenamento remoto de dados.

Os resultados obtidos ao longo do projeto demonstraram que foi possível implementar a arquitetura eletrônica e mecânica prevista, bem como realizar testes preliminares de funcionamento dos principais módulos desenvolvidos. Os ensaios em bancada indicaram comportamento compatível com o esperado para os sensores empregados, permitindo verificar a aquisição das variáveis, a resposta dos mecanismos construídos e a comunicação entre os componentes do sistema. Além disso, a utilização de elementos fabricados por impressão 3D trouxe a possibilidade de desenvolver partes estruturais com baixo custo e maior adaptação ao projeto.

Embora os testes realizados tenham sido importantes para a validação funcional inicial do protótipo, é importante ressaltar que o trabalho não contemplou uma etapa completa de calibração com instrumentos de referência e ensaios prolongados de monitoramento em campo. Assim, os resultados apresentados devem ser compreendidos como uma verificação preliminar da viabilidade do sistema, servindo como base para etapas futuras de aperfeiçoamento e validação experimental mais aprofundada.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste trabalho, propõe-se:

- Calibração e a validação do protótipo por meio da comparação dos dados obtidos com os registros de uma estação meteorológica comercial do grupo de Geotecnia Ambiental da UFCG
- Realizações de testes prolongados em campo para avaliar a durabilidade e a eficiência desses sensores em ambiente insalubre.

REFERÊNCIAS

1. Alves, F. de S. (2012). Influência das condições meteorológicas na biodegradação dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande-PB. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande.
2. BOSCH SENSORTEC. BMP180 Digital pressure sensor. [S.l.], 2013. Disponível em: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf.
3. FARIAS, A. P. Modelagem neural dinâmica das características físico-químicas do lixiviado de aterro sanitário. [2023].
4. AYALA, Kenneth J. *The 8051 microcontroller: architecture, programming, and applications*. St. Paul: West Publishing Company, 1991.
5. ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. [S. l.]: Espressif Systems, [s. d.]. Disponível em: documentação oficial da Espressif. Acesso em: 15 nov. 2025.
6. ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U Datasheet*. [S. l.]: Espressif Systems, [s. d.]. Disponível em: documentação oficial da Espressif. Acesso em: 15 nov. 2025.
7. AMS OSRAM. *AS5600: 12-Bit Programmable Contactless Potentiometer*. [S. l.]: ams OSRAM, 2018. Acesso em: 15 mar. 2026.
8. OHM CO., LTD. *BH1750FVI: Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC*. Kyoto: ROHM Co., Ltd., 2011. Disponível em: documentação técnica do componente. Acesso em: 15 mar. 2026.
9. ROHM CO., LTD. *Ambient Light Sensor (ALS) Applications in Portable Products*. [S. l.]: ROHM Co., Ltd., [s. d.]. Disponível em: documento técnico da fabricante. Acesso em: 15 mar. 2026
10. BOSCH SENSORTEC. *BMP180 datasheet*. [S. l.]: Bosch Sensortec, [s. d.]. Disponível em: documentação técnica do componente. Acesso em: 12 mar. 2026. (community.bosch-sensortec.com)
11. BOSCH SENSORTEC. *Pressure sensors*. [S. l.]: Bosch Sensortec, [s. d.]. Disponível em: documentação institucional da fabricante. Acesso em: 15 mar. 2026. (bosch-sensortec.com)

12. BOSCH SENSORTEC. *BMP280 Digital Pressure Sensor: Datasheet*. [S. l.]: Bosch Sensortec, 2015. Disponível em: documentação técnica da fabricante. Acesso em: 15 mar. 2026. (bosch-sensortec.com)
13. SITRONIX TECHNOLOGY CORP. *ST7735: 262K Color Single-Chip TFT Controller/Driver*. Versão 2.1. [S.l.]: Sitronix Technology Corp., 2010.
14. AOSONG. *AM2302 Technical Manual*. Guangzhou: Guangzhou Aosong Electronics Co., Ltd., 2019. Disponível em: documentação técnica do fabricante. Acesso em: 15 mar. 2026.
15. HONEYWELL. *Hall Effect Sensing and Application*. [S. l.]: Honeywell, 1998. Disponível em: documentação técnica. Acesso em: 15 mar. 2026.
16. HONEYWELL. *SS400 Series, SS500 Series Bipolar, Latching, and Unipolar Hall-effect Digital Sensor ICs: Datasheet*. [S. l.]: Honeywell, [s. d.]. Disponível em: documentação técnica. Acesso em: 15 mar. 2026.
17. HONEYWELL. *SNDH-H Series Hall-Effect Speed Sensors*. [S. l.]: Honeywell, [s. d.]. Disponível em: documentação técnica. Acesso em: 15 mar. 2026.
18. KASAP, S. *Hall effect in semiconductors*. [S. l.]: [s. n.], 2001. Disponível em: material didático. Acesso em: 15 mar. 2026.
19. CORDULUS. *Stevenson Screen*. Glossary, 2024. Disponível em: https://www.cordulus.com/pt/glossary/stevenson-screen. Acesso em: 12 jan. 2026.
20. WMO - World Meteorological Organization. *Guide to Instruments and Methods of Observation* (WMO-No. 8). Geneva, 2018. Disponível em: https://library.wmo.int/records/item/42043-guide-to-instruments-and-methods-of-observation-wmo-no-8. Acesso em: 12 jan. 2026.
21. OHM CO., LTD. *BH1750FVI: digital 16bit serial output type ambient light sensor IC*. Kyoto: ROHM Co., Ltd., 2011. Technical note, No. 11046EDT01. Disponível em: datasheet do fabricante.
22. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. 7 p.
23. BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120 p.
24. SOUZA, Jordan Carneiro Martins de. Condições intervenientes nas emissões fugitivas de biogás em camada de cobertura de solo compactado em aterros

sanitários. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

25. PARK, J. W.; SHIN, H. C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. *Atmospheric Environment*, 2001.
26. MACIEL, F. J. Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos. 2009.
27. TAVARES, A. S. Paraíba: desenvolvimento econômico e a questão ambiental. 2004.
28. RODRIGUEZ, J. L. Paraíba: espaço geo-histórico e cultural. 2002.
    CARIBE, R. M.; ARAÚJO, M. V.; MELO, M. C. Estudo de recalques em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos associados às condições meteorológicas. 2011.
29. VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. 1991.
30. VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e climatologia. 2006.
31. MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. 2007.
32. HENRIQUE, F. A. N. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande-PB. 2006.
33. NETO, A. M.; LEMBO, C.; BONOMO, D. Z. Clima e comércio após o encontro de Copenhague. 2010.
34. LUCCI, E. A. Geografia geral e do Brasil. 2005.
35. ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
36. ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PEREIRA, L. S. et al. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, New Delhi, v. 43, n. 2, p. 35-90, 1994a.
37. ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERIER, A. et al. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, New Delhi, v. 43, n. 2, p. 1-31, 1994b.
38. BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, n. 31, p. 159-166, 1984.

39. DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Roma: FAO, 1977. (Irrigation and Drainage Paper, 24).
40. HARGREAVES, G. H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Transactions of the ASAE*, v. 17, p. 701-704, 1974.
41. HENRIQUE, Francisco de Assis Nunes. *Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande-PB*. 2006. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.
42. LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, v. 18, p. 409-424, 1977.
43. PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 193, n. 1032, p. 120-146, 1948.
44. PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, v. 4, p. 9-29, 1956.
45. VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e climatologia*. Brasília, DF: Ed. Pax; INMET, 2001.
46. VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Imprensa Universitária, 1991.
47. WMO. *Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source*. Geneva: World Meteorological Organization, 1981. (WMO, n. 557; Technical Note, n. 172).
48. JOY-IT. *Hall Magnetic Field Sensor KY-003*. [S.l.]: Joy-IT, 2018. Disponível em: <coloque o link do PDF ou da página>. Acesso em: 22 mar. 2026.
49. AMS AG. *AS5600: 12-bit programmable contactless potentiometer*. [S.l.]: ams AG, 2018. Disponível em: <https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-12-bit-Magnetic-Rotary-Position-Sensor-AS5600/res/Magnetic%20Rotary%20Position%20Sensor%20AS5600%20Datasheet.pdf\>. Acesso em: 22 mar. 2026.
50. LINS, Eduardo Antonio Maia. *A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no Aterro da Muribeca*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

51. MEIRA, J. C. R. Chorume do aterro sanitário de Goiânia: tratamento por floculação/coagulação/degradação fotoquímica e custos operacionais. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
52. RODRIGUES, M. R. M. Tratabilidade do lixiviado efluente da lagoa facultativa no aterro de Curitiba por lodos ativados. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
53. MEDEIROS, Rafaella de Moura. *Avaliação de estabilidade de taludes de aterros sanitários*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2018.
54. HANSON, J. L.; YESILLER, N.; OETTLE, N. K. Spatial and Temporal Temperature Distributions in Municipal Solid Waste Landfills. *Journal of Environmental Engineering*, v.
55. SILVEIRA, Ana Maria de Miranda. *Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.