

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Maurílio Tadeu Soares de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE
POÇO ARTESIANO COM AQUISIÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL PARA
ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO AMBIENTAL**

Betim

2026

MAURÍLIO TADEU SOARES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE
POÇO ARTESIANO COM AQUISIÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL PARA
ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

O48d Oliveira, Maurílio Tadeu Soares de

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto de poço artesiano com aquisição de dados em tempo real para atendimento à legislação ambiental / Maurílio Tadeu Soares de Oliveira – 2026.

100 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida

1. Monitoramento remoto. 2. Sistemas embarcados. 3. Internet das coisas. 4. Microcontroladores. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Oliveira, Maurílio Tadeu Soares de. II. Título.

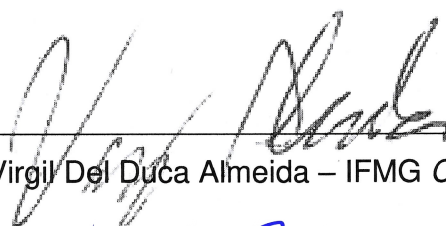
CDU: 681.51

Maurílio Tadeu Soares de Oliveira

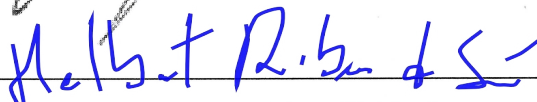
**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE
POÇO ARTESIANO COM AQUISIÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL PARA
ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

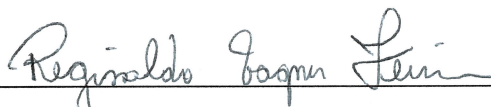
Aprovado em: 23 / 01 /2026 pela banca examinadora:



Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida – IFMG *Campus* Betim



Prof. Me. Helbert Ribeiro de Sá – IFMG *Campus* Betim



Prof. Dr. Reginaldo Vagner Ferreira – IFMG *Campus* Betim

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, nosso Criador, por conceder-me forças, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada. Sem Sua presença, nada disso seria possível.

À minha esposa Fernanda, por seu amor, paciência e apoio incansável, especialmente nas noites em claro e nos momentos mais desafiadores.

À minha filha Melissa, que com sua ternura e alegria renovou minha motivação a cada dia.

À minha mãe, Maria José, por seu exemplo de força, fé e dedicação incondicional.

E em memória do meu pai, Geraldo, cuja partida em 2021 deixou saudades eternas, mas também um legado de coragem e valores que me acompanharam até aqui.

A todos, minha mais sincera gratidão.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado para monitoramento remoto de poços artesianos, com o objetivo de otimizar a coleta e o registro dos dados técnicos exigidos pela Portaria IGAM nº 48, de 04 de outubro de 2019, que regulamenta os procedimentos para a renovação da outorga de uso de recursos hídricos em Minas Gerais. A normativa estabelece a necessidade de apresentação de informações como volume de água captada, tempo de operação da bomba e dados hidrométricos registrados de forma contínua. Atualmente, muitos usuários realizam esse processo de forma manual, estando sujeitos a falhas como ausências de leitura, erros de anotação e perda de dados. O sistema proposto automatiza essa coleta, aumentando a precisão e a confiabilidade dos dados registrados. O protótipo foi desenvolvido em ambiente simulado, utilizando uma bomba submersa de pequeno porte, semelhante às utilizadas em aquários, acoplada a um hidrômetro com saída pulsada. O tempo de operação da bomba é estimado por meio de um sensor de corrente não invasivo. Os dados são processados por um microcontrolador ESP32 e enviados remotamente para uma Planilha Google, onde são organizados em dashboards interativos e relatórios periódicos. Os resultados demonstraram que o protótipo foi capaz de adquirir e registrar de forma contínua as variáveis de interesse, apresentando comportamento coerente com a proposta de monitoramento remoto e atendendo aos objetivos estabelecidos para o controle do uso da água. A solução integra conceitos de instrumentação, automação, *Internet of Things* (IoT) e análise de dados, representando uma alternativa de baixo custo e eficaz para a geração da documentação técnica exigida nos processos de renovação da outorga, em conformidade com a Portaria IGAM.

Palavras-chave: Monitoramento remoto; Poços artesianos; Internet das Coisas; Automação; Outorga de uso da água.

ABSTRACT

This work presents the development of an embedded system for remote monitoring of artesian wells, aiming to optimize the collection and recording of technical data required by IGAM Ordinance No. 48, dated October 4, 2019, which regulates the procedures for renewing water use permits in the state of Minas Gerais, Brazil. The regulation establishes the need to provide information such as water withdrawal volume, pump operating time, and hydrometric data recorded continuously. Currently, many users perform this process manually, being subject to issues such as missing readings, annotation errors, and data loss. The proposed system automates this data acquisition, increasing the accuracy and reliability of the recorded information. The prototype was developed in a simulated environment, using a small submersible pump similar to those employed in aquariums, coupled to a pulsed-output water meter. The pump operating time is estimated through a non-invasive current sensor. The data are processed by an ESP32 microcontroller and transmitted remotely to a Google Spreadsheet, where they are organized into interactive dashboards and periodic reports. The results demonstrated that the prototype was capable of continuously acquiring and recording the variables of interest, exhibiting behavior consistent with the proposed remote monitoring approach and meeting the objectives established for water use control. The solution integrates concepts of instrumentation, automation, Internet of Things (IoT), and data analysis, representing a low-cost and effective alternative for generating the technical documentation required in water permit renewal processes, in compliance with IGAM Ordinance.

Keywords: Remote monitoring; Artesian wells; Internet of Things; Automation; Water use permit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de Certificado de Outorga.	21
Figura 2 - Estrutura de um poço tubular.	24
Figura 3 - Camadas IoT.	32
Figura 4 - <i>Layout</i> de pinos da placa ESP32.	41
Figura 5 - Diagrama de blocos funcionais do ESP32.	42
Figura 6 - Construção interna do hidrômetro multijato.	44
Figura 7 - Hidrômetro multijato equipado com sensor <i>Reed Switch</i>	48
Figura 8 - Sensor de corrente não invasivo SCT-013.	49
Figura 9 - Bomba submersível HG-380.	51
Figura 10 - Relação vazão x altura de elevação da bomba HG-380.....	52
Figura 11 - Horímetro analógico SYS-1.....	53
Figura 12 - Montagem física do protótipo em base de MDF.	56
Figura 13 - Diagrama do circuito.....	60
Figura 14 - Diagrama de blocos e fluxo de dados do sistema.	62
Figura 15 - Diagrama do fluxo do <i>firmware</i>	64
Figura 16 - Opções do <i>menu</i> personalizado.....	67
Figura 17 - Horímetro analógico eletromecânico instalado.	69
Figura 18 - Montagem do sistema no ambiente de teste.	73
Figura 19 - Calibração do sensor SCT-013.	78
Figura 20 - Módulo de expansão para cartão SD.....	86
Figura 21 - Módulo RTC externo DS3231.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de materiais utilizados na montagem do protótipo e custos estimados.	57
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de avaliação da precisão da medição de volume.	77
Tabela 3 - Resultados comparativos dos ensaios de medição do tempo de operação.	79
Tabela 4 - Resultados dos ensaios experimentais de vazão da bomba pelo método de referência.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre os protocolos HTTP e MQTT.....	33
Quadro 2 - Especificações técnicas da placa ESP32.....	43
Quadro 3 - Especificações técnicas do hidrômetro multijato com sensor.....	45
Quadro 4 - Especificações técnicas do Sensor <i>Reed Switch</i> SAGA V4.	46
Quadro 5 - Especificações técnicas do sensor SCT-013.	50
Quadro 6 - Especificações da bomba HG-380.	52
Quadro 7 - Especificações técnicas do horímetro analógico SYS-1.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AP	<i>Access Point</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CNPJ	Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica
CPF	Cadastro de Pessoa Física
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DN	Diâmetro Nominal
ESP32	Microcontrolador da Espressif Systems
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IP	<i>Internet Protocol</i>
IoT	Internet das Coisas
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LED	Diodo Emissor de Luz
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MIRA	Monitoramento de Intervenções e Recursos Hídricos
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
NM	Norma Mercosul

NTP	<i>Network Time Protocol</i>
NVS	<i>Non-Volatile Storage</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OTA	<i>Over-The-Air</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PVC	Policloreto de Vinila
RTC	<i>Real-Time Clock</i>
SCT	<i>Split-core Current Transformer</i>
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SEGRH	Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SISEMA	Sistema Estadual de Meio Ambiente
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SOUT	Sistema de Outorga de Minas Gerais
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SPST	<i>Single-Pole, Single-Throw</i>
SSID	<i>Service Set Identifier</i>
TLS	<i>Transport Layer Security</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UF	Unidade Federativa
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
F	Farad
Hz	Hertz
L	Litro
L/h	Litros por hora
L/min	Litros por minuto
V	Volt
W	Watt
cm	Centímetro
dB	Decibel
h	Hora
kWh	Quilowatt-hora
m	Metro
mA	Miliampère
min	Minuto
mm	Milímetro
ms	Milissegundo
m ³	Metro cúbico
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
rms	<i>Root Mean Square</i> (Média Quadrática)
s	Segundo
°C	Grau <i>Celsius</i>
Ω	Ohm
μF	Microfarad

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização e Justificativa.....	17
1.2	Definição do Problema	18
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos.....	19
1.4	Organização do Trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Gestão de Recursos Hídricos e a Outorga de Uso	20
2.1.1	Histórico e conceito de outorga de uso de recursos hídricos em Minas Gerais.....	20
2.1.2	Papel do IGAM.....	22
2.1.3	Estatísticas de uso de água subterrânea em Minas Gerais	23
2.1.4	Conceito de Poços Tubulares e suas aplicações	24
2.2	Portaria IGAM nº48/2019	25
2.2.1	Exigências normativas para a renovação de outorga	26
2.2.2	Dados obrigatórios e sua importância	27
2.3	Monitoramento Hidrométrico Automatizado	28
2.3.1	Vantagens sobre registros manuais	28
2.3.2	Conceitos de vazão, volume consumido e tempo de operação	29
2.4	Sistemas Embarcados e IoT	31
2.4.1	Definição de IoT	31
2.4.2	Arquitetura típica de IoT aplicada a monitoramento remoto.....	31
2.4.3	Protocolos de comunicação: HTTP x MQTT	32
2.5	Trabalhos Correlatos	34
2.5.1	Sistema MIRA (IGAM).....	34
2.5.2	Soluções IoT de monitoramento hídrico	35
2.5.3	Sistemas comerciais de telemetria para poços artesianos	35
2.5.4	Síntese comparativa e justificativa da solução proposta.....	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	Requisitos Funcionais do sistema	38

3.2	Requisitos Técnicos do sistema	39
3.3	Principais Componentes Utilizados no Projeto.....	41
3.3.1	Microcontrolador ESP32	41
3.3.2	Hidrômetro multijato com sensor de pulsos.....	43
3.3.3	Sensor de corrente não-invasivo	48
3.3.4	Bomba submersível	50
3.3.5	Horímetro analógico eletromecânico	53
3.3.6	Google Sheets e Apps Script.....	54
3.4	Montagem Física do Protótipo	55
3.5	Circuito Eletrônico e Condicionamento de Sinais	58
3.6	Projeto da Arquitetura do Sistema.....	60
3.7	Desenvolvimento do <i>Software</i> Embarcado.....	62
3.8	Integração com a plataforma <i>Google Sheets</i>.....	65
3.9	Ambiente de Simulação do Poço Artesiano	68
3.10	Estratégia de Validação em Ambiente Simulado.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1	Comportamento do Sistema no Ambiente de Teste	72
4.2	Precisão das Leituras de Volume e Tempo de Operação.....	75
4.2.1	Calibração do sistema de medição de volume	75
4.2.2	Avaliação da precisão da medição de volume	76
4.2.3	Calibração e desempenho do sensor de corrente.....	77
4.2.4	Medição do tempo de operação	78
4.2.5	Avaliação da Vazão da Bomba.....	80
4.2.6	Análise dos erros observados.....	82
4.3	Capacidade do Sistema em Gerar Documentação Técnica	83
4.4	Limitações e Possibilidades de Expansão.....	85
5	CONCLUSÃO	88
5.1	Alcance dos Objetivos.....	88
5.2	Contribuições para o Processo de Outorga	88
5.3	Recomendações para Trabalhos Futuros	89
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DO <i>FIRMWARE</i> DO ESP32	93
	APÊNDICE B – CÓDIGO DO <i>GOOGLE APPS SCRIPT</i>.....	94
	ANEXO A – TELA DO MENU PRINCIPAL DA PLANILHA.....	95

ANEXO B – EXEMPLOS DE REGISTROS ARMAZENADOS.....	96
ANEXO C – RELATÓRIO DE RESUMO DIÁRIO.....	97
ANEXO D – RELATÓRIO DE RESUMO MENSAL	98
ANEXO E – RELATÓRIO DE OCORRÊNCIAS	99
ANEXO F – MONITORAMENTO DE ENERGIA.....	100

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Justificativa

A água doce é um recurso limitado e de fundamental importância para a manutenção da vida e dos ecossistemas, sendo reconhecida como um direito humano essencial. O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 da Organização das Nações Unidas (ONU) enfatiza a necessidade de garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos (ONU, 2015). A extração não monitorada de água, particularmente em poços artesianos, pode causar degradação de aquíferos e reduzir a disponibilidade hídrica a longo prazo (CHAGAS, 2023).

Em Minas Gerais, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), através da Portaria nº 48/2019, regula a renovação da outorga de uso de recursos hídricos, exigindo o registro técnico do volume captado e do tempo de operação de bombas. Essa exigência normativa está em consonância com os princípios da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei n.º 9.433/1997), reforçando a necessidade de dados confiáveis para fundamentar a promoção de uma gestão racional da água (BRASIL, 1997; IGAM, 2019).

A coleta manual de dados pode falhar em rigor e constância, permitindo omissões e erros que comprometem a qualidade dos relatórios utilizados em processos legais (DE OLIVEIRA, 2022). Por outro lado, o paradigma da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) tem demonstrado resultados promissores. Sistemas embarcados com microcontroladores como o ESP32 são adotados em diversas soluções por sua conectividade integrada e baixo custo operacional. Em cenários de monitoramento hídrico, o uso de IoT para coleta contínua e em tempo real de parâmetros em ambientes lênticos — com base em plataformas semelhantes — mostrou-se eficiente, ágil e confiável (ZUKERAM *et al.*, 2023).

Além disso, é apontado na literatura que métodos convencionais de medição em campo — como estação hidrométrica manual — podem apresentar elevados níveis de incerteza, enquanto abordagens automatizadas e assistidas por sensores oferecem maior exatidão e uniformidade (BORELLA *et al.*, 2023). Essas evidências suportam a adoção de soluções tecnológicas para aprimorar a governança dos recursos hídricos.

Diante desse panorama, este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo IoT em ambiente simulado, com microcontrolador, sensor de corrente e hidrômetro equipado com sensor de pulsos, visando automatizar a coleta de dados técnicos exigidos para renovação da outorga conforme a norma vigente. Ao automatizar este processo, espera-se reduzir falhas humanas, garantir qualidade nos registros e contribuir para a sustentabilidade dos recursos hídricos em Minas Gerais, alinhando-se às melhores práticas de gestão ambiental baseadas em evidências.

1.2 Definição do Problema

O processo de coleta manual de dados de vazão e tempo de operação de bombas em poços artesianos está sujeito a falhas humanas, como ausência de registros, erros de anotação ou perda de dados. Essas falhas comprometem a geração da documentação técnica exigida para o atendimento aos requisitos legais, conforme estabelece a norma vigente. Assim, propõe-se a seguinte questão de pesquisa:

“Como desenvolver um sistema de monitoramento remoto, capaz de automatizar a coleta e o registro de dados de vazão e consumo de água em poços artesianos de forma contínua, com o objetivo de gerar documentação técnica confiável e compatível com as exigências legais para a renovação da outorga?”

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho apresenta como objetivo geral desenvolver um protótipo de sistema IoT para monitoramento em tempo real de vazão e consumo de água de poços artesianos, em ambiente simulado, com capacidade de gerar documentação técnica compatível com a legislação ambiental, visando à renovação da outorga de uso dos recursos hídricos.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Projetar a arquitetura de *hardware* e *software* utilizando microcontrolador ESP32, integrando sensores ao sistema para coleta automática de dados.
- Desenvolver algoritmos embarcados para cálculo de vazão, volume e tempo de operação da bomba, implementando a comunicação dos dados para uma planilha em nuvem.
- Construir relatórios técnicos automatizados para exportação de dados periódicos.
- Validar o sistema em ambiente simulado de um poço artesiano, verificando sua eficácia como ferramenta de apoio aos processos administrativos de regularização.

1.4 **Organização do Trabalho**

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 - Introdução: Apresenta o contexto do problema, os objetivos do projeto e a justificativa para seu desenvolvimento.
- Capítulo 2 - Fundamentação Teórica: Explora os conceitos de gestão hídrica, outorga, legislação vigente, IoT e relaciona os trabalhos correlatos.
- Capítulo 3 - Metodologia: Detalha a proposta funcional e técnica do sistema, os principais componentes empregados, a montagem física, o ambiente simulado, a arquitetura do sistema e os critérios de desenvolvimento, integração e validação.
- Capítulo 4 - Resultados e Discussões: Apresenta os dados obtidos e avalia a capacidade do sistema em atender às exigências legais.
- Capítulo 5 - Conclusão: Resume os resultados alcançados, discute as contribuições do trabalho e aponta melhorias e aplicações futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Gestão de Recursos Hídricos e a Outorga de Uso

A gestão dos recursos hídricos no estado de Minas Gerais está diretamente associada a instrumentos legais e administrativos que visam assegurar o uso racional, sustentável e fiscalizado da água, entre os quais se destaca a outorga de direito de uso. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender a evolução histórica e o conceito da outorga no âmbito estadual, bem como o papel institucional do IGAM como órgão responsável pela regulação e fiscalização. A análise das estatísticas de uso da água subterrânea permite avaliar a relevância dos poços tubulares no atendimento às demandas hídricas, enquanto a compreensão conceitual desses sistemas e de suas aplicações fornece a base técnica necessária para discutir os desafios e exigências associados ao monitoramento e à regularização do uso de recursos hídricos.

2.1.1 *Histórico e conceito de outorga de uso de recursos hídricos em Minas Gerais*

A outorga de direito de uso de recursos hídricos em Minas Gerais tem sua origem vinculada à Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal nº 9.433/1997), que instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) e estabeleceu a água como bem de domínio público e recurso limitado, dotado de valor econômico (BRASIL, 1997). Em âmbito estadual, a regulamentação foi consolidada pela Lei Estadual nº 13.199/1999, que estruturou a Política Estadual de Recursos Hídricos e criou o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SEGRH-MG), consolidando a outorga como principal instrumento de controle e fiscalização do uso da água (MINAS GERAIS, 1999).

O conceito de outorga corresponde à autorização administrativa concedida pelo poder público para que pessoas físicas ou jurídicas utilizem os recursos hídricos superficiais ou subterrâneos, de forma controlada e por prazo determinado. Tal autorização não transfere a propriedade da água, que permanece como bem público, mas garante ao usuário o direito de utilizá-la conforme as condições definidas no ato administrativo (ANA, 2019). Em Minas Gerais, a competência para concessão de

(MINAS GERAIS, 1999). Além disso, a legislação prevê hipóteses de suspensão ou revogação da outorga em casos de descumprimento das condições estabelecidas, escassez hídrica ou conflito de usos prioritários. Nesse sentido, a outorga constitui não apenas um instrumento administrativo, mas também um mecanismo estratégico de gestão integrada, compatibilizando o desenvolvimento econômico com a conservação dos recursos hídricos (ANA, 2019).

2.1.2 *Papel do IGAM*

O IGAM é uma autarquia vinculada à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais (SEMAD), fundada em 17 de julho de 1997. Ele integra tanto o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) quanto o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA), sendo o órgão responsável pela gestão e controle do uso dos recursos hídricos, incluindo a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, a autorização de intervenções em corpos d'água e a fiscalização das captações.

Em relação ao controle e registro de usuários de recursos hídricos subterrâneos, o IGAM atua por meio de cadastros específicos: o cadastro de uso isento de outorga, que contempla captações de baixa relevância (como usos rurais insignificantes ou poços de monitoramento), e a outorga de direito de uso de recursos hídricos, articulada pela plataforma digital SOUT (Sistema de Outorga de Minas Gerais), que centraliza todo o processo de solicitação, análise e gestão das autorizações. O IGAM também estabelece critérios de vazão para usos insignificantes, de acordo com o contexto hidrogeológico das regiões, e institui ações específicas em áreas prioritárias, como programas de regularização e segurança hídrica.

Além disso, o IGAM utiliza a outorga como principal instrumento de gestão dos recursos subterrâneos em Minas Gerais. Por meio da análise dos processos de outorga, é possível traçar um panorama dos usos da água subterrânea no estado, identificando zonas de escassez, conflitos por sobre-exploração e vulnerabilidades no abastecimento — sobretudo em regiões como a bacia do rio Araguari, onde a exploração de aquíferos é intensa (RAMOS; MARTINS, 2002). Isso reforça a relevância do papel do IGAM tanto na regulamentação quanto no monitoramento desses usos, com base em dados técnicos e sistematizados, para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos.

2.1.3 Estatísticas de uso de água subterrânea em Minas Gerais

Estudos recentes evidenciam a expressiva dependência de captações subterrâneas no estado de Minas Gerais, especialmente por meio de poços tubulares, que desempenham papel estratégico no abastecimento humano, na irrigação e nas atividades industriais. Na Circunscrição Hidrográfica de Furnas, por exemplo, aproximadamente 92% das captações são realizadas por poços tubulares existentes, sendo o abastecimento humano responsável por 78% da vazão outorgada, seguido pelos usos agrícola/agroindustrial e industrial, ambos com cerca de 9% cada (DEUS, 2022). Esses dados demonstram a predominância das águas subterrâneas como fonte principal de suprimento hídrico em diversas regiões do estado.

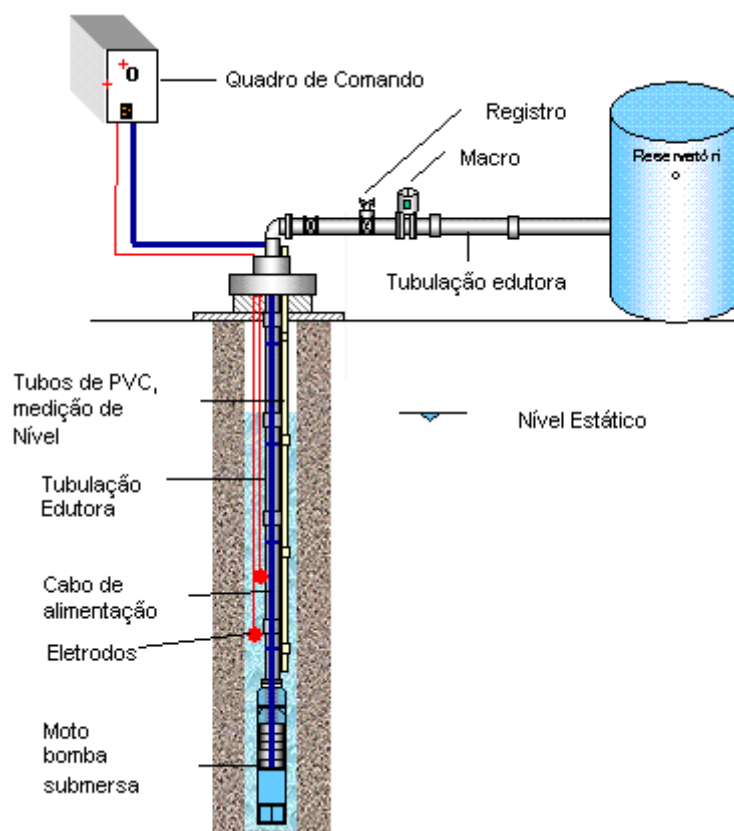
Situação semelhante é observada na bacia do rio São Francisco em Minas Gerais, onde a irrigação responde por mais de 60% da demanda hídrica, exercendo forte pressão sobre os aquíferos, especialmente nos municípios da porção norte do estado (CARVALHO; MELO; GALVÃO, 2024). Esse cenário evidencia a importância do controle e da fiscalização do uso da água subterrânea, uma vez que a exploração intensiva sem monitoramento adequado pode comprometer a sustentabilidade dos aquíferos ao longo do tempo.

Na Região Metropolitana do Vale do Aço, a relevância das águas subterrâneas também é significativa, com a captação de aquíferos aluvionares, que são reservatórios de água subterrânea formados em depósitos de sedimentos (areia, cascalho, silte) depositados por rios ao longo de suas várzeas ou em zonas litorâneas. Tais aquíferos fornecem cerca de 600 litros por segundo (L/s) para o abastecimento público, atuando como fonte essencial de complementação aos mananciais superficiais (CABRAL; LOUREIRO, 2002). Esses exemplos regionais reforçam a necessidade de sistemas confiáveis de medição e monitoramento das captações subterrâneas, especialmente em poços tubulares, de modo a subsidiar a gestão hídrica, atender às exigências de outorga e garantir o uso racional dos recursos hídricos.

2.1.4 Conceito de Poços Tubulares e suas aplicações

Os poços tubulares, também conhecidos como poços profundos, são estruturas de captação de água subterrânea perfuradas mecanicamente, com revestimento em tubos metálicos ou de PVC, projetadas para atingir aquíferos em maiores profundidades e garantir a exploração sustentável de água subterrânea (BRASIL, 1997; IGAM, 2010). Diferem dos poços escavados ou cacimbas, que possuem pequena profundidade e captação em lençóis freáticos rasos. Os poços tubulares podem atingir profundidades superiores a 100 metros, dependendo das características hidrogeológicas locais, e são equipados com motobombas submersas e hidrômetros que permitem o controle da vazão e da pressão de extração de água para armazenamento em reservatórios, conforme a estrutura exemplificada na Figura 2. Esses poços constituem a principal forma de aproveitamento de aquíferos em regiões de déficit hídrico, representando uma alternativa segura e de menor vulnerabilidade à contaminação (IGAM, 2010).

Figura 2 - Estrutura de um poço tubular.



Fonte: <https://www.abas.org/educacao/pocos-para-captacao-de-agua/>

No estado de Minas Gerais, os poços tubulares têm ampla aplicação em diferentes setores, incluindo abastecimento público, irrigação, consumo industrial e uso agropecuário, destacando-se sua relevância para comunidades rurais e municípios com oferta limitada de água superficial (DEUS, 2022). Segundo o IGAM, mais de 90% das captações subterrâneas outorgadas no estado provêm de poços tubulares, o que reforça a necessidade de controle e monitoramento adequados (IGAM, 2019). Além de contribuírem para a segurança hídrica, os poços tubulares são essenciais no contexto de gestão descentralizada dos recursos hídricos, pois permitem o uso racional e monitorado da água subterrânea — aspecto diretamente relacionado às exigências da normativa ambiental, que regulamenta as medições e registros obrigatórios das captações.

Os poços tubulares podem ser classificados, de acordo com suas características construtivas e hidráulicas, em poços rasos, profundos e artesianos. Os poços rasos captam águas de aquíferos livres, geralmente com profundidades inferiores a 50 metros, e são mais suscetíveis à contaminação. Já os poços profundos interceptam aquíferos confinados ou semiconfinados, com maior proteção geológica e estabilidade de vazão (IGAM, 2010). Quando a pressão natural do aquífero é suficiente para fazer a água ascender até a superfície, tem-se o chamado poço artesiano, podendo ser fluente (quando jorra naturalmente) ou não fluente (quando requer bombeamento). O IGAM diferencia essas tipologias nos processos de outorga para determinar parâmetros como vazão máxima outorgável, profundidade de captação e necessidade de monitoramento hidrométrico — fatores que influenciam diretamente a análise técnica e o licenciamento das captações subterrâneas (IGAM, 2019).

2.2 Portaria IGAM nº48/2019

A Portaria IGAM nº 48/2019, estabelece as condições gerais para o monitoramento das intervenções em recursos hídricos superficiais e subterrâneos no Estado de Minas Gerais, definindo diretrizes técnicas relacionadas à medição, ao registro e à disponibilização das informações associadas ao uso da água.

2.2.1 Exigências normativas para a renovação de outorga

Diante da relevância da Portaria IGAM para o monitoramento das captações de água subterrânea e da relação direta de seus dispositivos com os objetivos deste trabalho, apresenta-se a seguir a transcrição adaptada da Seção V do Capítulo II, que estabelece, de forma detalhada, as obrigações relativas à medição, ao registro e à disponibilização das informações de uso dos recursos hídricos na etapa da renovação de outorga.

CAPÍTULO II - DOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE INTERVENÇÕES EM RECURSOS HÍDRICOS

Seção V - Das condições gerais para o monitoramento das intervenções em recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Art. 25 – O usuário de recursos hídricos deverá realizar medições diárias da vazão captada, do tempo de captação e do fluxo residual, quando for o caso, armazenando esses dados em formato de planilhas impressas e em meio digital, que deverão ser apresentadas no momento da renovação da outorga de direito de uso dos recursos hídricos ou quando solicitado pelo IGAM, bem como no momento de fiscalização realizada por órgão integrante do SISEMA.

§ 1º – Excepcionalmente nos casos em que a captação não ocorra diariamente, a periodicidade do monitoramento da intervenção em recursos hídricos poderá ser diversa da que trata o caput, desde que prevista no ato da outorga de direito de uso dos recursos hídricos.

§ 2º – O IGAM poderá, considerando as condições particulares de uso e de localização da intervenção, mediante justificativa técnica, estabelecer periodicidade diversa da definida no caput.

§ 3º – O usuário poderá utilizar plataforma *on line* para a gestão e a disponibilização das medições.

Art. 28 – As despesas com instalação, manutenção, leitura, registro e transmissão de informações, assim como quaisquer outras despesas relativas ao sistema de medição, serão custeadas pelo usuário de recursos hídricos.

Art. 29 – É de responsabilidade do usuário de recursos hídricos a garantia e manutenção do perfeito funcionamento dos equipamentos do sistema de medição, bem como a veracidade das informações prestadas ao IGAM.

§ 1º – O usuário deverá manter registro de qualquer ocorrência que venha a comprometer o sistema de medição, impossibilitando suas medições ou comprometendo a integridade dos dados.

§ 2º – O registro de ocorrências deverá estar apensado ao relatório de monitoramento, no momento da renovação da outorga de direito de uso dos recursos hídricos ou quando solicitado pelo IGAM ou por qualquer órgão ou entidade integrante do SISEMA.

Art. 30 – O sistema de medição adotado na intervenção em recursos hídricos e os dados obtidos pelo sistema de medição, quando enviados ao IGAM ou solicitados por qualquer órgão ou entidade integrante do SISEMA, deverão ser atestados por profissional legalmente habilitado, mediante apresentação de Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), expedida pelo conselho profissional competente.

(IGAM, 2019)

Essas condicionantes normativas têm relação direta com o sistema de monitoramento proposto neste projeto, uma vez que o protótipo IoT foi concebido justamente para automatizar a medição contínua, gerar registros confiáveis e exportar os dados em meio digital, atendendo ao que a portaria determina. Além disso, a capacidade do sistema de gerar relatórios periódicos e registrar falhas de funcionamento supre a necessidade de rastreabilidade e transparência exigida pelo IGAM, tornando o processo de renovação da outorga mais ágil e tecnicamente fundamentado.

2.2.2 Dados obrigatórios e sua importância

No processo de outorga e renovação, a norma vigente também define um conjunto de dados obrigatórios que devem ser fornecidos pelo usuário: identificação do requerente, localização georreferenciada do ponto de captação, finalidade do uso, volumes e vazões outorgados, tempo de operação, memorial descritivo e planta de situação (IGAM, 2019). Para comprovação, devem ser apresentados os registros de monitoramento das captações em planilhas impressas e digitais, complementados por relatórios técnicos assinados com Anotação de Responsabilidade Técnica (ART).

No contexto do projeto, o protótipo desenvolvido garante que esses dados sejam registrados, armazenados em meio digital e facilmente convertidos em relatórios impressos. Assim, os relatórios de vazão captada, tempo de operação e volume total consumido podem ser extraídos em formato de planilhas digitais integradas a sistemas de nuvem, possibilitando a disponibilização imediata ao IGAM em caso de solicitação. Além disso, o sistema prevê o registro de eventuais ocorrências operacionais (falhas no sensor, interrupções de energia, inconsistências de leitura), que podem ser anexadas aos documentos exigidos no processo administrativo. Dessa forma, o trabalho proposto se alinha às exigências da portaria, garantindo conformidade legal e técnica.

2.3 Monitoramento Hidrométrico Automatizado

O monitoramento hidrométrico automatizado refere-se à utilização de dispositivos e sistemas eletrônicos para a medição contínua e sistemática de parâmetros associados à captação e ao uso da água, como vazão, volume consumido e tempo de operação de sistemas de bombeamento. Essa abordagem substitui ou complementa os registros manuais tradicionais, proporcionando maior exatidão, confiabilidade e rastreabilidade das informações coletadas. Além disso, o uso de tecnologias automatizadas possibilita o armazenamento e a transmissão dos dados em tempo real, atendendo às demandas operacionais e às exigências normativas relacionadas à gestão e fiscalização dos recursos hídricos (ANA, 2023).

2.3.1 Vantagens sobre registros manuais

Os registros manuais de níveis de água em poços artesianos ou instalações de monitoramento frequentemente apresentam limitações significativas, tais como periodicidade reduzida, custos elevados com deslocamento de equipe e risco de erro humano na anotação ou transcrição dos dados. Além disso, registros pontuais não capturam adequadamente variações rápidas ou ciclos curtos de recarga e abstração, essenciais para uma avaliação precisa de regimes de água subterrânea.

Ao adotar um sistema automatizado de monitoramento hidrométrico — como o que é proposto para este trabalho — é possível obter vantagens claras: coleta contínua ou com alta frequência de dados, acesso remoto em tempo real, alertas automáticos em caso de desvios ou falhas, e integração direta com plataformas de tratamento e análise de dados. Por exemplo, sistemas automáticos permitem reduzir os custos operacionais de visitas de campo, aumentar a representatividade temporal dos dados e melhorar a rastreabilidade e qualidade das medições.

Para o sistema proposto no âmbito deste trabalho, essas vantagens permitem otimizar a outorga de poços artesianos junto ao IGAM: com monitoramento remoto e automatizado será possível evidenciar regimes de funcionamento em tempo real, detectar extrações ou recargas indevidas, gerar base de dados robusta para análise e informar de forma mais eficiente os processos de gestão e conformidade. Dessa forma, o trabalho deixa de depender de coletas esporádicas e manuais,

transitando para um sistema inteligente que fortalece a governança dos recursos hídricos.

2.3.2 Conceitos de vazão, volume consumido e tempo de operação

A vazão volumétrica representa o fluxo volumétrico de água que atravessa uma seção de tubulação ou poço em função do tempo, sendo expressa em unidades como metros cúbicos por hora (m^3/h) ou litros por minuto (L/min), e pode variar em função das condições operacionais do sistema, como pressão e regime de escoamento. Em sistemas de captação de águas subterrâneas, especialmente durante a operação de bombeamento, pode ocorrer a presença simultânea de água e ar no escoamento, caracterizando um regime de vazão bifásica, fenômeno associado a variações no nível dinâmico do poço, entrada de ar na coluna de sucção ou condições transitórias de operação. Esse comportamento pode influenciar a precisão das medições volumétricas, uma vez que os dispositivos de medição são, em geral, projetados para escoamento monofásico. Por outro lado, a vazão mássica mede a massa efetivamente transportada por unidade de tempo, expressa em unidades como quilogramas por hora (kg/h), sendo menos sensível às variações físicas do fluido e mais comumente empregada em sistemas que envolvem o controle de gases.

No contexto dos recursos hídricos, a vazão volumétrica constitui uma métrica fundamental para quantificar a extração ou recarga de água subterrânea e para a definição dos regimes de operação. Em hidrometria, define-se a vazão d'água como “o volume de água que atravessa uma seção de um curso de água por unidade de tempo” (ENCYCLOPÉDIE ENVIRONNEMENT, 2025). A compreensão adequada da vazão volumétrica, bem como dos efeitos associados a regimes bifásicos, permite avaliar intervenções de controle, calibrar curvas de descarga e dimensionar sistemas de monitoramento de forma mais eficaz.

O volume consumido refere-se à quantidade total de água utilizada ou retirada de um sistema durante um certo período, independentemente de a vazão variar ao longo desse período. Em termos de captação de água através de poço artesiano, o volume consumido corresponde à integração da vazão volumétrica ao longo do tempo de operação.

$$V = \int_{t_0}^{t_f} Q(t)dt$$

Em situações em que se considera uma vazão média constante, essa relação pode ser expressa por:

$$V = Q \times t$$

ou, de forma equivalente:

$$Q = \frac{V}{t}$$

onde,

Q = Vazão volumétrica média (m³/h ou L/min);

V = Volume consumido (m³ ou L);

t = Tempo de operação (h ou min).

Em uso hídrico, faz-se distinção entre retirada e consumo, onde o consumo significa a parcela de água que não retorna à fonte imediata, ou é perdida por evapotranspiração ou incorporação em produtos (USGS, 1997). No monitoramento automatizado, mensurar o volume consumido é crucial para cumprir exigências de outorga, para relatórios de uso e para detectar uso indevido ou excessivo.

O tempo de operação é o intervalo temporal durante o qual o sistema de captação ou bombeamento está ativo, e serve como parâmetro de controle e histórico para análise operacional. Quando se dispõe da vazão instantânea ou média e conhece-se o tempo de operação, torna-se possível estimar o volume extraído ou medir o regime de funcionamento do sistema. Na prática de automação, o monitoramento contínuo permite registrar, com exatidão temporal, quando o sistema está ativo, pausado ou apresenta flutuações, o que melhora o entendimento de padrões de uso, possibilita alertas em situação de uso abusivo e facilita a conformidade com dispositivos regulatórios. Assim, no sistema proposto para este trabalho, a mensuração e correlação entre vazão, volume e tempo de operação

permitem compor uma base de dados robusta para a gestão de poços, verificando se os regimes de captação atendem à outorga ou se ocorrem desvios.

2.4 Sistemas Embarcados e IoT

2.4.1 Definição de IoT

O conceito de IoT refere-se à rede de objetos físicos — dotados de sensores, *software* e conectividade de rede — que possibilita coletar e trocar dados entre si ou com sistemas centrais de forma automatizada (IBM, 2023). Nesse contexto, dispositivos embarcados deixam de operar isoladamente e passam a integrar um ecossistema digital-físico, no qual a informação gerada nos ativos do mundo real pode ser monitorada, registrada ou acionada independentemente da intervenção humana direta.

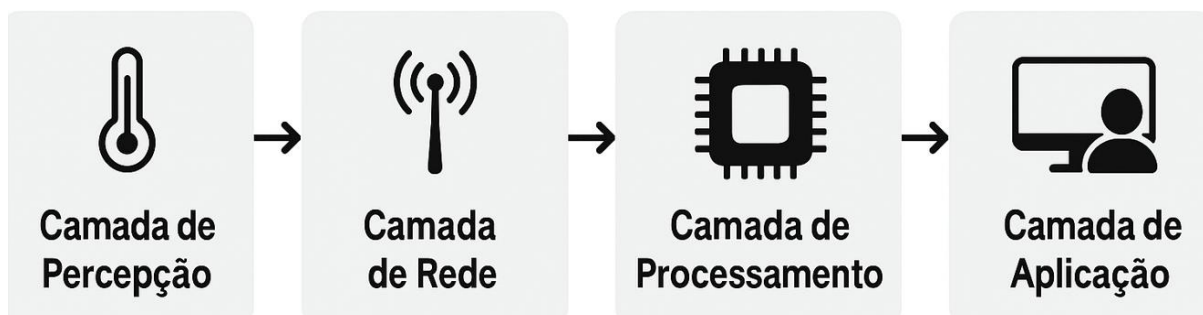
No âmbito do sistema proposto neste trabalho, o paradigma IoT torna-se fundamental ao permitir que sensores instalados no local captem variáveis operacionais (como volume, vazão, tempo de operação) e as transmitam em tempo real para uma plataforma de análise remota. Dessa forma, a estrutura proposta incorpora a IoT como tecnologia habilitadora para rastreabilidade e eficiência na gestão hídrica, elevando o controle convencional para um patamar automatizado e digitalizado.

2.4.2 Arquitetura típica de IoT aplicada a monitoramento remoto

A arquitetura típica de um sistema IoT baseia-se em uma estrutura em camadas, com destaque para quatro níveis principais: camada de percepção, camada de rede, camada de processamento e camada de aplicação, conforme ilustrado na Figura 3. A primeira é responsável pela coleta dos dados físicos — como corrente elétrica, pulsos de vazão e temperatura — por meio de sensores conectados a microcontroladores. A camada de rede realiza a comunicação entre os dispositivos e os servidores remotos, utilizando protocolos como HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) ou MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Em seguida, a camada de processamento armazena e trata as informações, podendo empregar serviços em nuvem ou *scripts* integrados. Por fim, a camada de aplicação fornece ao usuário final

interfaces de visualização, relatórios e painéis interativos (ATZORI; IERA; MORABITO, 2019).

Figura 3 - Camadas IoT.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

No contexto do sistema proposto para monitoramento de poços artesianos, a aplicação dessa arquitetura permite a integração eficiente entre o microcontrolador, os sensores de pulso e corrente, e a plataforma em nuvem. Essa disposição hierárquica garante coleta contínua, comunicação confiável e processamento automatizado dos dados hidrométricos, resultando em um ambiente de monitoramento remoto robusto e escalável. Assim, o modelo IoT proposto promove rastreabilidade, redução de falhas humanas e conformidade com as exigências legais, tornando-se uma solução prática e alinhada à transformação digital dos processos de gestão hídrica.

2.4.3 Protocolos de comunicação: HTTP x MQTT

O protocolo HTTP é amplamente utilizado em sistemas de comunicação cliente-servidor, baseando-se em requisições diretas do dispositivo para um servidor *web*. Sua estrutura simples e compatibilidade universal tornam-no especialmente vantajoso em aplicações que demandam integração com plataformas já consolidadas, como o *Google Apps Script*. Essa compatibilidade permite a comunicação direta, simplificando a implementação e eliminando a necessidade de servidores intermediários (HIVEMQ, 2024).

Embora o MQTT seja reconhecido por sua eficiência em conexões persistentes e de baixo consumo de dados, sua adoção implicaria a configuração de uma infraestrutura adicional de *broker* (servidor intermediário) e autenticação, o que

elevaria o nível de complexidade do projeto. Além disso, em aplicações com frequência de envio de dados moderada — como o monitoramento de poços artesianos, que transmite registros de vazão e tempo de operação em intervalos regulares — o ganho de eficiência do MQTT não compensa o aumento da complexidade e da dependência de servidores externos. Neste sentido, o HTTP mostra-se suficiente e mais apropriado, atendendo aos requisitos de confiabilidade, compatibilidade e baixo custo operacional (TELIT, 2023).

O uso do protocolo HTTP otimiza a integração direta entre microcontrolador e o sistema de armazenamento de dados em nuvem, garantindo a transmissão automática dos parâmetros de monitoramento, como volume, tempo ligado e corrente elétrica, de forma estável e rastreável. A simplicidade da comunicação HTTP permite que cada envio seja processado como uma requisição independente, o que facilita o tratamento de erros, o registro de *logs* e a análise de desempenho no ambiente do *Apps Script*. Assim, o protocolo não apenas simplifica o desenvolvimento e a manutenção do sistema, mas também assegura a conformidade com as exigências de rastreabilidade e armazenamento digital da norma vigente, reforçando o alinhamento entre eficiência técnica e cumprimento legal. O Quadro 1 apresenta um comparativo mais amplo sobre os protocolos de comunicação discutidos neste tópico.

Quadro 1 - Comparativo entre os protocolos HTTP e MQTT.

Critério	HTTP	MQTT
Modelo de comunicação	Cliente-servidor (<i>request-response</i>).	Publicador/assinante (<i>publish-subscribe</i>).
Infraestrutura necessária	Integração direta com servidores <i>web</i> (ex.: <i>Google Apps Script</i>).	Exige configuração de <i>broker</i> intermediário.
Complexidade de implementação	Baixa — bibliotecas nativas e suporte amplo em APIs.	Moderada — requer gestão de tópicos, autenticação e manutenção do <i>broker</i> .
Consumo de dados e energia	Levemente superior devido à abertura de conexões independentes.	Reduzido, com conexões persistentes e pacotes compactos.
Confiabilidade da comunicação	Alta, com entrega garantida em cada requisição.	Depende da qualidade da conexão e do <i>broker</i> configurado.
Integração com plataformas em nuvem	Simples e nativa com APIs REST, ideal para <i>Google Apps Script</i> e planilhas.	Necessita ponte ou serviço intermediário para integração.

Critério	HTTP	MQTT
Segurança	HTTPS amplamente suportado, fácil de configurar.	Requer configuração de TLS e autenticação no <i>broker</i> .
Adequação ao projeto proposto	Ideal: simples, compatível e facilmente integrável ao ambiente Google.	Menos indicado: maior complexidade e necessidade de infraestrutura dedicada.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

2.5 Trabalhos Correlatos

2.5.1 Sistema MIRA (IGAM)

O Sistema MIRA – Monitoramento de Intervenções e Recursos Hídricos – foi instituído pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas por meio da Portaria IGAM nº 12/2023 como plataforma oficial para recepção, validação e análise de dados hidrológicos provenientes de captações de água no estado de Minas Gerais. O sistema tem como objetivo padronizar e digitalizar o envio de informações relacionadas ao uso dos recursos hídricos, permitindo que usuários de outorgas registrem periodicamente parâmetros como volume captado, tempo de operação de bombas e localização das intervenções. Segundo o IGAM (2023), o MIRA integra ferramentas de submissão de dados, acompanhamento de processos e auditoria, promovendo maior controle e transparência na gestão hídrica estadual.

A relevância do MIRA para este trabalho é direta, uma vez que a Portaria IGAM nº 48/2019 já estabelecia a obrigatoriedade de medição contínua de volume captado e tempo de bombeamento em poços artesianos, e o MIRA consolida a transição para um ambiente totalmente informatizado. O protótipo desenvolvido neste trabalho, ao automatizar a coleta e o processamento dessas medições, aproxima-se conceitualmente da estrutura exigida pelo sistema, demonstrando potencial futuro de integração ou produção de relatórios compatíveis com o padrão solicitado. Além disso, o MIRA reforça a importância de soluções automatizadas e de baixo custo para pequenos e médios usuários, que historicamente enfrentam dificuldades para registrar e apresentar dados de maneira sistemática.

Estudos recentes publicados pelo próprio IGAM indicam que a informatização dos processos de monitoramento tende a reduzir erros de preenchimento, facilitar auditorias e melhorar a gestão das outorgas, sobretudo em

áreas sujeitas a estresse hídrico. Dessa forma, compreender o funcionamento e os objetivos do MIRA permite situar o protótipo desenvolvido neste trabalho no contexto da modernização da política hídrica mineira, fortalecendo sua motivação e relevância prática.

2.5.2 Soluções IoT de monitoramento hídrico

A literatura científica apresenta um crescente número de trabalhos que utilizam tecnologias IoT para monitoramento de água, reforçando o alinhamento do protótipo deste trabalho com pesquisas recentes. Fuentes *et al.* (2020) desenvolveram um sistema inteligente para medição doméstica de consumo hídrico, com transmissão em tempo real via *internet* e capacidade de detecção de vazamentos. O estudo demonstra que sensores de fluxo associados a microcontroladores conectados à nuvem podem melhorar a precisão e reduzir o intervalo entre eventos de medição, características semelhantes às adotadas neste trabalho.

Outro estudo relevante é o de Zukeram *et al.* (2023), que implementaram um sistema IoT para monitoramento contínuo de variáveis ambientais em um ecossistema aquático no sul do Brasil. Os autores destacam a importância da automação, da coleta remota e da utilização de plataformas em nuvem para viabilizar análises sistemáticas e confiáveis. Embora não voltado especificamente aos poços artesianos, o estudo reforça a aplicabilidade de arquiteturas IoT em cenários que requerem acompanhamento frequente de parâmetros hidráulicos e ambientais.

2.5.3 Sistemas comerciais de telemetria para poços artesianos

O mercado brasileiro possui diferentes soluções comerciais de telemetria voltadas ao monitoramento de poços artesianos, geralmente baseadas em controladores robustos, sensores eletromagnéticos de vazão, sensores de nível de água e comunicação GSM/3G/4G. Esses sistemas são majoritariamente projetados para aplicações industriais ou agrícolas de grande porte, com foco em confiabilidade, integração com supervisórios e operação contínua. Entretanto, seu custo elevado, a necessidade de instalação profissional especializada e a dependência de infraestrutura de telecomunicação tornam tais soluções pouco acessíveis para pequenos usuários e propriedades rurais de menor porte. Para fins de comparação e

enquadramento da solução proposta neste trabalho, observa-se no mercado a disponibilidade de equipamentos robustos, capazes de atender às especificações anteriormente descritas nesta seção, com valores de aquisição na ordem de R\$ 12.000,00.

Outro ponto relevante é que grande parte desses sistemas comerciais não realiza automaticamente a consolidação dos dados nos formatos exigidos por normativas específicas, exigindo rotinas adicionais de tratamento, conversão de dados ou interpretação manual. Em muitos casos, há pouca flexibilidade para integração com plataformas alternativas, como *Google Sheets*, o que pode limitar análises, auditorias ou adequação aos requisitos impostos pelos órgãos fiscalizadores. Essa limitação contrasta com o protótipo desenvolvido neste trabalho, que prioriza baixo custo, facilidade de implementação e integração direta com ambiente em nuvem amplamente acessível.

Dessa forma, ao comparar o protótipo proposto com os sistemas comerciais existentes, observa-se que a solução apresentada neste trabalho se destaca por sua acessibilidade econômica, simplicidade de execução e autonomia na geração de relatórios compatíveis com os padrões regulatórios locais. Embora não possua o mesmo nível de robustez industrial, seu custo-benefício e facilidade de adoção o tornam uma alternativa promissora, especialmente para pequenos usuários que enfrentam limitações financeiras e operacionais.

2.5.4 Síntese comparativa e justificativa da solução proposta

A análise dos trabalhos correlatos demonstra que o protótipo desenvolvido neste trabalho ocupa uma posição intermediária entre sistemas acadêmicos de baixo custo e soluções comerciais de telemetria de alto desempenho. Embora não ofereça robustez industrial, o sistema apresenta vantagens como acessibilidade, facilidade de implementação e integração em nuvem, características essenciais para pequenos usuários rurais e urbanos. Sua aderência às exigências da Portaria IGAM e potencial futura compatibilidade com o sistema MIRA reforçam sua relevância prática.

Enquanto as soluções comerciais existentes atendem plenamente demandas industriais, o custo elevado inviabiliza sua adoção por usuários de menor porte. Por outro lado, as pesquisas acadêmicas apontam que sensores de baixo custo e microcontroladores conectados podem, quando devidamente calibrados, oferecer

medições confiáveis e adequadas a sistemas de monitoramento. Assim, o protótipo desenvolvido posiciona-se como alternativa técnica e economicamente viável, contribuindo para ampliar o acesso a ferramentas de automação hidrométrica.

Dessa forma, os trabalhos correlatos analisados fundamentam a pertinência da solução proposta, demonstrando que o sistema pode preencher lacunas existentes no monitoramento de poços artesianos, especialmente na faixa de usuários que necessitam cumprir exigências normativas utilizando tecnologias de baixo investimento e fácil manutenção.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento e validação do sistema proposto, descrevendo de forma estruturada as etapas, critérios e decisões técnicas que fundamentaram a construção do protótipo. Inicialmente, são definidos os requisitos funcionais e técnicos do sistema, estabelecendo as bases para a concepção da solução. Em seguida, são detalhados os componentes utilizados, a montagem física, a arquitetura do sistema, o desenvolvimento do *software* embarcado e a integração com a plataforma de processamento e apresentação dos dados. Na etapa final é apresentado o ambiente de simulação do poço artesiano e a estratégia de validação em ambiente simulado, na qual são avaliados o desempenho, a confiabilidade e as limitações do sistema. Essa abordagem metodológica visa assegurar rastreabilidade, coerência técnica e aderência às exigências normativas aplicáveis ao monitoramento hidrométrico automatizado.

3.1 Requisitos Funcionais do sistema

Os requisitos funcionais do sistema foram definidos de modo a garantir que todas as etapas de medição, registro e transmissão de dados atendam às necessidades de monitoramento contínuo exigidas pela Portaria IGAM nº 48/2019. O primeiro requisito consiste na medição automática do volume de água captado, realizada por meio de um hidrômetro multijato equipado com sensor de pulsos. Essa abordagem permite quantificar o volume com exatidão adequada, eliminando processos manuais sujeitos a erros. De acordo com Fuentes *et al.* (2020), sistemas inteligentes de medição são capazes de “reduzir substancialmente a interferência humana e proporcionar rastreamento contínuo dos parâmetros monitorados”, reforçando a importância da automação no contexto hídrico.

Em complemento à medição de volume, o sistema deve realizar a estimativa do tempo de operação da bomba submersa utilizando um sensor de corrente não invasivo. Esse sensor permite determinar com exatidão os instantes de acionamento e desligamento da bomba, proporcionando as informações necessárias para calcular o consumo energético e identificar padrões operacionais. Tal prática é comum em sistemas IoT, conforme destaca Varela-Aldás *et al.* (2022), ao afirmar que sensores elétricos integrados a plataformas conectadas “viabilizam o monitoramento

contínuo de parâmetros em campo, com transmissão instantânea a sistemas remotos”.

A partir das medições de volume e tempo ligado, o sistema deve calcular a vazão instantânea, definida como a razão entre o volume captado e o tempo de operação. Esses dados são organizados em registros horários, contemplando volume, tempo ligado, vazão e carimbo de data e hora, garantindo rastreabilidade e conformidade com as exigências legais. A literatura destaca a importância da granularidade temporal para análises ambientais: segundo Zukeram *et al.* (2023), registros contínuos “proporcionam maior robustez à avaliação dos usos da água em campo, especialmente quando integrados a sistemas de telemetria”.

Outro requisito funcional essencial é a transmissão dos dados em tempo real para uma planilha da plataforma em nuvem. Essa estratégia permite centralizar o armazenamento dos dados e disponibilizar o conteúdo para consulta por período (dia ou mês), além de possibilitar a geração automática de relatórios diários e mensais compatíveis com os formatos exigidos pelo IGAM. Também são gerados relatórios de ocorrências, acionados quando o sistema detecta anomalias como ausência de pulsos, leituras incoerentes ou falhas de comunicação.

Por fim, todas as medições são realizadas em um ambiente controlado de simulação, que reproduz o funcionamento de um poço artesiano real, mas com maior segurança e previsibilidade. A simulação permite validar o protótipo sem os riscos e custos associados ao ambiente de campo, o que é consistente com práticas recomendadas na engenharia de automação. Dessa forma, os requisitos funcionais estabelecem as bases operacionais do sistema, assegurando que o protótipo atenda com rigor às demandas técnicas e legais.

3.2 Requisitos Técnicos do sistema

Os requisitos técnicos do sistema foram definidos para garantir desempenho e compatibilidade com as necessidades de monitoramento contínuo de poços artesianos, conforme estabelecido pela norma. O primeiro elemento central é o uso do microcontrolador ESP32, selecionado por sua capacidade de processamento, conectividade *Wi-Fi* integrada e suporte a protocolos amplamente utilizados em IoT. Essas características asseguram que o dispositivo seja capaz de executar leituras de

sensores, processar dados localmente e transmitir informações em tempo real para a nuvem, com baixo consumo energético e alta estabilidade operacional.

No que se refere aos sensores, o projeto utiliza dois dispositivos principais: o hidrômetro com saída de pulsos, responsável por fornecer medições precisas de volume, e o sensor de corrente não invasivo SCT-013, utilizado para estimar o tempo de operação da bomba submersa. Ambos os dispositivos oferecem fácil integração com o ESP32 e alta confiabilidade. Essa abordagem possibilita que o sistema registre os volumes captados e identifique com exatidão os ciclos de acionamento da bomba, sem necessidade de intervenção direta na rede elétrica.

A montagem do protótipo é realizada em ambiente de simulação controlado, composto por uma bomba submersa de pequeno porte inserida em um balde e acoplada ao hidrômetro, permitindo reproduzir, de forma segura e de baixo custo, o comportamento hidráulico típico de pequenos poços artesianos. Essa estratégia garante repetibilidade e controle das variáveis experimentais, como também permite a identificação de falhas potenciais sem comprometer equipamentos ou instalações reais.

Os dados coletados são enviados em tempo real para a plataforma *Google Sheets*, onde o *Apps Script* atua como parte interna da aplicação para armazenamento, processamento, validação, detecção de falhas e geração de relatórios periódicos. Essa escolha permite uma solução de baixo custo e alta acessibilidade, com possibilidade de integração direta com rotinas automatizadas e *dashboards* de análise. Além disso, a comunicação via protocolo HTTP POST facilita a transmissão dos dados, conforme apontado por Telit Cinterion (2023), que destaca que o HTTP é “altamente compatível com serviços em nuvem e ideal para aplicações que priorizam simplicidade e interoperabilidade”.

Por fim, os requisitos técnicos consideram aspectos de confiabilidade, escalabilidade e replicabilidade. Estratégias de tolerância a falhas incluem reenviar dados em caso de perda de conexão e registrar inconsistências em *logs* específicos. A arquitetura adotada permite futura expansão para ambientes reais, incluindo sensores adicionais e módulos alternativos. Além disso, todos os componentes foram selecionados visando baixo custo e simplicidade, favorecendo que pequenos produtores, usuários domésticos e instalações de menor porte possam replicar o protótipo. Dessa forma, o modelo técnico proposto atende às demandas do

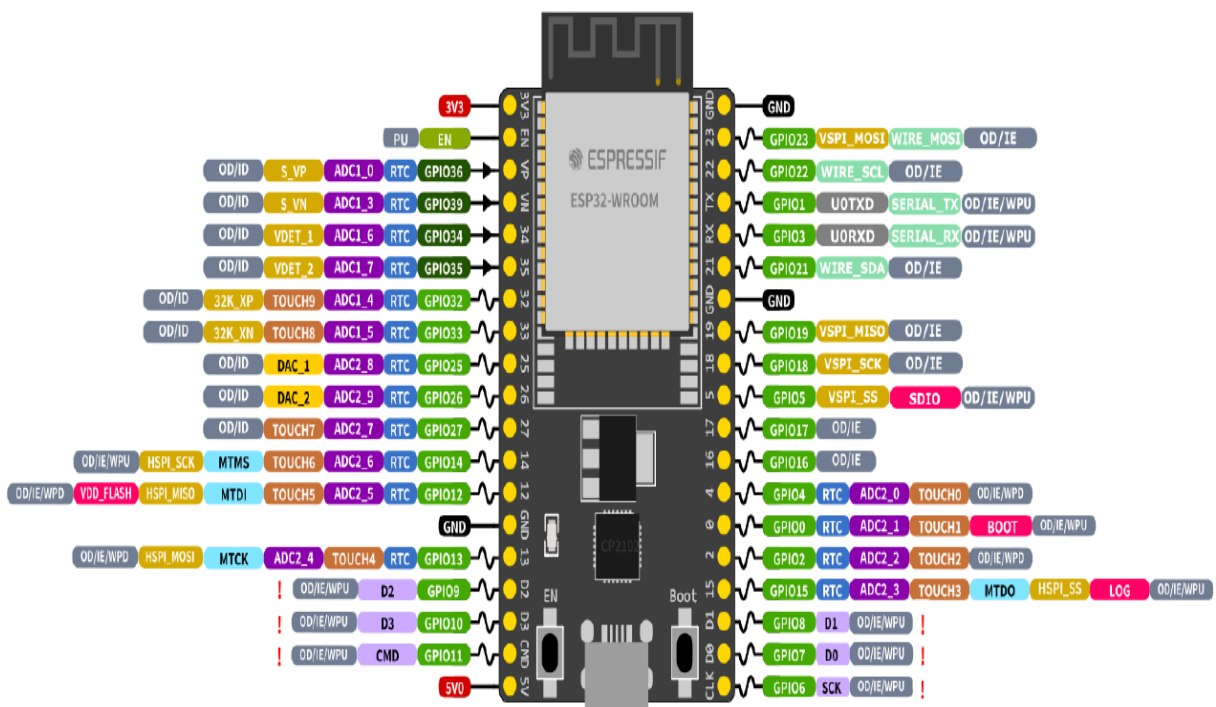
monitoramento hídrico inteligente, mantendo aderência às exigências legais e às boas práticas de engenharia.

3.3 Principais Componentes Utilizados no Projeto

3.3.1 Microcontrolador ESP32

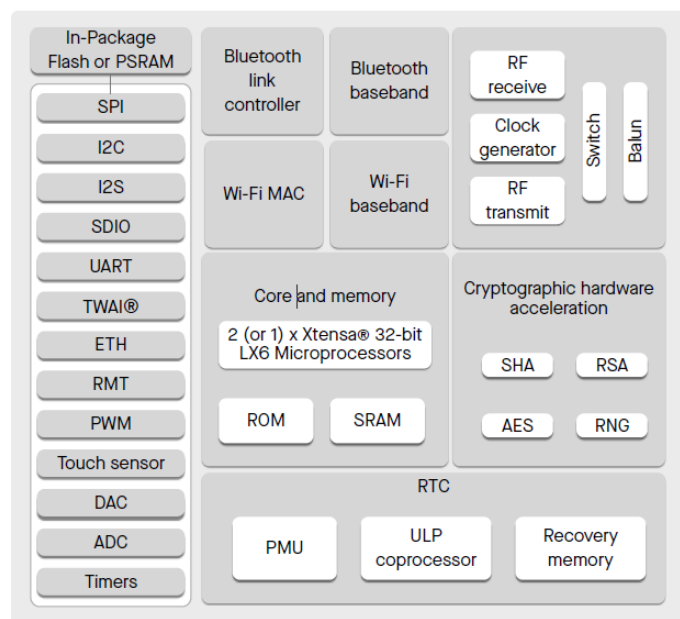
A placa ESP32 de 30 pinos integra o módulo ESP-WROOM-32, que reúne um processador da família Xtensa LX6, com 2 núcleos e 32 bits, operando até cerca de 240 MHz, com suporte integrado a *Wi-Fi* 802.11 b/g/n e *Bluetooth* v4.2 / BLE (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024). Esta configuração fornece elevada capacidade de processamento e conectividade sem fio, que são fundamentais para aplicações de IoT onde o dispositivo precisa gerenciar sensores, tratar dados localmente e transmiti-los para a nuvem com confiabilidade. A escolha da variante de 30 pinos favorece um fator de forma reduzido, fácil integração em placas de protótipo ou mesmo em *layouts* finais, facilitando o desenvolvimento do projeto. O *layout* de pinos da placa é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - *Layout* de pinos da placa ESP32.



No que se refere aos pinos de entrada/saída (GPIO), a versão de 30 pinos disponibiliza múltiplas linhas programáveis que podem ser configuradas como ADC (conversores analógico-para-digital), comunicação UART/I2C/SPI, PWM, entre outras funcionalidades. Por exemplo, para este projeto, o sensor de corrente e o sensor de pulsos podem estar conectados a entradas analógicas ou digitais com interrupção, enquanto os pinos I2C ou SPI poderiam eventualmente servir para um *display*, módulo de armazenamento externo ou outro periférico de suporte, conforme consta no diagrama de blocos funcionais do microcontrolador, apresentado na Figura 5. A flexibilidade dos GPIOs permite a integração de leituras de volume, tempo de operação e vazão, processamento básico local e envio via HTTP para a planilha Google, sem necessidade de *hardware* adicional complexo.

Figura 5 - Diagrama de blocos funcionais do ESP32.



Fonte: ESP32 Datasheet (2025).

Outra funcionalidade relevante da placa ESP32 é o suporte a modos de baixo consumo, que permite reduzir a corrente de operação quando o sistema está em espera ou em estado de dormência, beneficiando projetos que dependem de consumo energético otimizado. Além disso, os recursos de conectividade *Wi-Fi* garantem que o dispositivo possa executar requisições HTTP (como POST) diretamente para plataformas baseadas na nuvem ou *scripts* do *Google Apps Script*,

o que simplifica a comunicação e integração com o sistema de monitoramento proposto. Dessa forma, o controlador ESP32 de 30 pinos se apresenta como componente central adequado para o protótipo, capaz de atender aos requisitos de conectividade, flexibilidade de sensores e rastreabilidade de dados exigidos pela normativa.

O Quadro 2 apresenta as principais características do controlador ESP32 de 30 pinos.

Quadro 2 - Especificações técnicas da placa ESP32.

Parâmetro	Descrição / Valor típico
Modelo	ESP32-WROOM-32
Processador	Tensilica Xtensa LX6 dual-core 32 bits
Frequência de operação	Até 240 MHz
Memória Flash	4 MB (<i>on-board</i>)
Memória SRAM	520 KB
Tensão de alimentação	3,0 a 3,6 V DC (pino 3V3) / 5 V via USB
Número de GPIOs	30 pinos (25 GPIOs utilizáveis)
Entradas ADC	12 bits (18 canais disponíveis)
Saídas DAC	2 canais (8 bits)
Interfaces de comunicação	UART (3), SPI (3), I ² C (2), PWM (16 canais)
Conectividade sem fio	Wi-Fi 802.11 b/g/n + Bluetooth v4.2 (BLE + EDR)
Modo de operação Wi-Fi	STA (<i>Station</i>), AP (<i>Access Point</i>) ou STA+AP
Consumo típico	160 mA (em transmissão Wi-Fi); < 10 µA em <i>Deep Sleep</i>
Faixa de temperatura de operação	-40 °C a +85 °C
Dimensões típicas (placa DEVKIT V1)	51 x 27 mm (aprox.)
Conector USB	USB-C (padrão para programação e alimentação)

Fonte: Adaptado de ESPRESSIF SYSTEMS (2024).

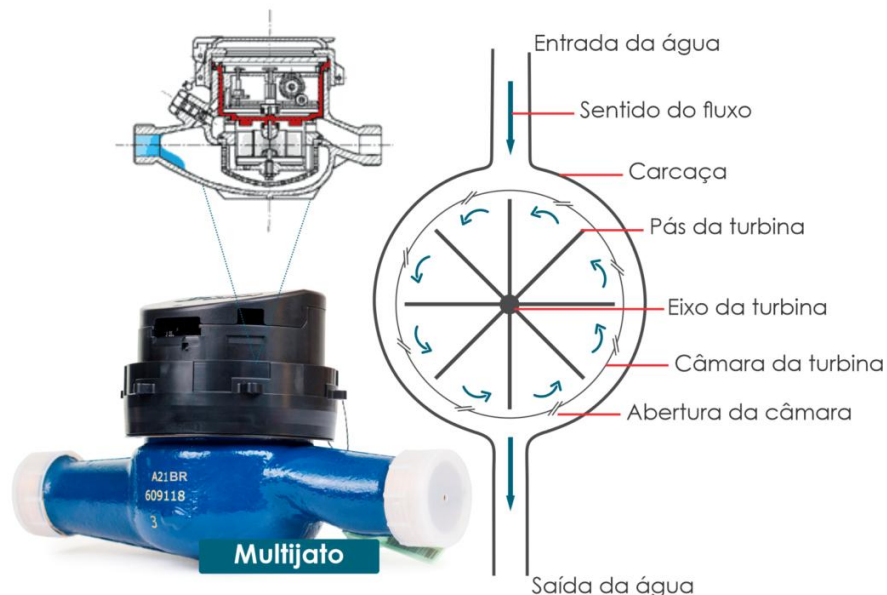
3.3.2 Hidrômetro multijato com sensor de pulsos

O hidrômetro é um dispositivo destinado à medição volumétrica de água, funcionando por meio da conversão do movimento do fluido em deslocamento mecânico proporcional ao volume escoado. À medida que a água atravessa o corpo do medidor, sua passagem é direcionada para a câmara de medição, onde o fluxo faz girar uma turbina interna. O número de voltas dessa turbina é proporcional à

quantidade de água que passa pelo hidrômetro, e esse movimento é transmitido a um conjunto de engrenagens que registra o volume totalizado no mostrador analógico.

Os hidrômetros do tipo multijato possuem uma construção interna baseada no direcionamento do fluxo de água por múltiplos canais distribuídos radialmente, que incidem de maneira uniforme sobre a turbina interna do medidor, conforme apresentado na Figura 6. Essa turbina, geralmente composta por pás de material leve e resistente, é instalada em uma câmara de medição isolada do mecanismo de transmissão por acoplamento magnético, evitando contato direto com a água e reduzindo desgaste mecânico. À medida que a água passa pelos jatos simétricos, o rotor gira proporcionalmente à vazão, transmitindo esse movimento para um conjunto de engrenagens que compõe o totalizador analógico posicionado na parte superior do hidrômetro. Esse mecanismo é protegido por uma carcaça hermética, com visor de policarbonato, garantindo estanqueidade, proteção contra umidade e durabilidade do conjunto. A distribuição equilibrada dos jatos ao redor da turbina permite maior estabilidade, menor sensibilidade a turbulências e melhor desempenho em baixas vazões quando comparado a hidrômetros de jato único.

Figura 6 - Construção interna do hidrômetro multijato.



Fonte: Adaptado de Renova Medição (2024).

O hidrômetro multijato utilizado no projeto é um medidor certificado pelo INMETRO, projetado para medições de vazão de até 3 m³/h, adequado a aplicações

residenciais e experimentais. De acordo com o fabricante, trata-se de um medidor de alta precisão, fabricado com materiais de alta qualidade, para uma resistência efetiva contra fadiga e corrosão e equipado para telemetria (leitura remota) com sensor do tipo *Reed Switch* modelo SAGA V4. Essas características garantem confiabilidade na medição de pequenos volumes em ciclos intermitentes — condição típica do ambiente simulado de poço artesiano utilizado neste trabalho. A relação pulso por litro constante e padronizada no equipamento simplifica a conversão dos dados para volume acumulado, reduzindo erros de quantização e assegurando linearidade na leitura. As especificações técnicas gerais do equipamento são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Especificações técnicas do hidrômetro multijato com sensor.

Parâmetro	Descrição / Valor
Tipo de medidor	Hidrômetro multijato equipado para telemetria
Aplicação principal	Medição de água tratada em residências, condomínios e pequenos estabelecimentos
Vazão nominal (Qn)	1,5 m ³ /h
Vazão máxima (Qmáx)	3,0 m ³ /h
Vazão de transição (Qt)	120 L/h
Vazão mínima (Qmin)	30 L/h
Vazão de início de funcionamento	7 L/h
Temperatura máxima de trabalho	40 °C
Pressão máxima de trabalho	10 bar
Diâmetro nominal (DN)	15 mm (1/2")
Rosca de conexão (G)	G3/4"B (rosca externa)
Comprimento total	165 mm
Classe / Instalação	B – Horizontal (H)
Relojoaria	Tipo inclinada a 45°, de policarbonato, modelo super seca IP68
Certificação	INMETRO
Norma de referência	NBR NM 212 – Medidores de Água Potável
Compatibilidade de telemetria	Sensor <i>Reed Switch</i> SAGA V4 integrado (3 fios, SPST NA)

Fonte: Adaptado de *Catálogo Técnico – Hidrômetro Multijato Equipado para Telemetria* (2024).

O sensor *Reed Switch* SAGA V4 integrado ao hidrômetro é um transdutor do tipo SPST (*Single-Pole, Single-Throw*), encapsulado e selado com grau de

proteção IP68, o que o torna adequado a ambientes úmidos e submersos. Segundo o catálogo técnico, ele suporta tensão máxima de 200 VDC, corrente de comutação de 0,5 A e tempo de operação inferior a 0,5 ms, assegurando uma resposta rápida ao sistema. O encapsulamento selado e o baixo consumo elétrico do *Reed Switch* permitem sua integração direta ao microcontrolador ESP32, dispensando complexos circuitos de condicionamento adicionais. Demais especificações técnicas do sensor são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Especificações técnicas do Sensor *Reed Switch* SAGA V4.

Parâmetro	Descrição / Valor
Tipo de contato	SPST (Normalmente Aberto – NA)
Potência máxima	10 W
Tensão de comutação (máx.)	200 VDC
Corrente de comutação (máx.)	0,5 A
Corrente de transporte (máx.)	1,0 A
Resistência de contato (máx.)	150 mΩ
Tensão de isolamento (mín.)	0,25 kVDC
Tempo de operação (máx.)	0,5 ms
Tempo de liberação (máx.)	0,1 ms
Capacitância de contato	0,3 pF
Temperatura de operação	–40 °C a +125 °C
Relação de pulsos	1 pulso / litro ¹
Grau de proteção	IP68
Terminais e funções	(1) Vermelho – Comum (2) Marrom – Saída de Pulso (3) Laranja – Fraude Magnética (opcional) (4) Amarelo – Corte de Cabo (opcional)

Fonte: Adaptado de *Catálogo Técnico – Sensor Reed Switch SAGA V4* (2024).

A combinação entre o hidrômetro multijato e o sensor *Reed Switch* SAGA V4 garante medições de vazão e volume de água com exatidão adequada ao monitoramento contínuo. Essa solução, conforme o padrão NBR NM 212, permite registrar volumes mínimos de 30 L/h com repetibilidade e estabilidade dentro das margens exigidas pela norma (ABNT, 2007). No contexto do sistema desenvolvido, cada pulso detectado pelo ESP32 é interpretado como um determinado volume de

¹ A relação nominal indicada pelo fabricante é 1 pulso/L, porém os testes experimentais indicaram relação aproximada de 2 pulsos/L, adotada para calibração.

água captado, possibilitando o cálculo direto de vazão instantânea e volume total acumulado. A integração desse conjunto atende plenamente às exigências da Portaria IGAM, que determina a medição contínua do volume captado e do tempo de operação das bombas de poços artesianos, garantindo rastreabilidade e precisão dos dados hidrométricos.

O hidrômetro utilizado possui, segundo o fabricante, uma relação nominal de 1 pulso por litro, conforme documentação técnica do sensor de pulsos. Entretanto, essa relação refere-se ao comportamento esperado pelo projeto construtivo e não impede variações decorrentes de tolerâncias mecânicas, desgaste ou diferenças entre lotes. Nos testes realizados neste trabalho, verificou-se experimentalmente uma relação média aproximada de 2 pulsos por litro, valor que foi adotado como fator de calibração no processamento dos dados. A discrepância entre o valor de catálogo e o valor medido será apresentada e discutida posteriormente no capítulo Resultados e Discussões, conforme prática comum em estudos experimentais com instrumentos hidrométricos.

Além da saída pulsada utilizada pelo sistema embarcado, o hidrômetro empregado no protótipo é capaz de fornecer leitura volumétrica convencional por meio do mostrador analógico. Esse tipo de instrumento é reconhecido como padrão oficial de auditoria e fiscalização dos volumes captados em sistemas de abastecimento e em poços artesianos, conforme a NBR NM 212. Dessa forma, a leitura analógica foi utilizada como referência na etapa de validação do sistema digital. A visão geral do hidrômetro equipado com sensor é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Hidrômetro multijato equipado com sensor *Reed Switch*.

Fonte: Adaptado de Renova Medição (2024).

3.3.3 Sensor de corrente não-invasivo

O sensor de corrente não invasivo SCT-013 é um transformador de corrente tipo *clamp* (FIGURA 8) desenvolvido pela YHDC (Yueqing Hualong Electric Co., Ltd.), amplamente utilizado para medições de corrente alternada (AC) em sistemas de monitoramento e proteção de equipamentos elétricos. Segundo o fabricante, trata-se de um modelo de núcleo dividido (*split core*) que “permite a medição de corrente sem a necessidade de interromper o circuito, oferecendo isolamento elétrico seguro e instalação simplificada” (YHDC, 2023, p. 1). O modelo de saída em tensão (1 V) incorpora um resistor de amostragem interno, o que possibilita conexão direta com o conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador ESP32, simplificando o circuito e reduzindo erros de medição. No contexto deste trabalho, o sensor é utilizado para identificar o estado de operação da bomba submersa, convertendo o sinal de corrente em uma grandeza proporcional que permite determinar o tempo de funcionamento acumulado e, em conjunto com o hidrômetro, calcular a vazão média e o volume total captado.

Figura 8 - Sensor de corrente não invasivo SCT-013.



Fonte: <https://www.usinainfo.com.br>

O *datasheet* especifica que o SCT-013 possui faixa de medição de 0 a 5 A AC, saída de 1 V_{rms} proporcional à corrente nominal, não linearidade inferior a $\pm 3\%$, e isolamento dielétrico de 1.000 VAC por 1 minuto entre o invólucro e a saída do sensor. O material do núcleo é ferrite, e o dispositivo é capaz de suportar pelo menos 1.000 ciclos de abertura e fechamento sem degradação mecânica. Além disso, opera de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, atendendo aos requisitos de durabilidade em ambientes laboratoriais e de campo. O uso de sensores de corrente em sistemas IoT possibilita o monitoramento contínuo de parâmetros elétricos, garantindo eficiência e exatidão na medição. Dessa forma, o modelo SCT-013, por sua concepção de núcleo dividido, baixo custo e fácil integração em sistemas embarcados, mostra-se tecnicamente adequado para o protótipo IoT proposto, assegurando medições confiáveis de corrente elétrica e compatibilidade direta com a plataforma ESP32 utilizada no projeto. Demais especificações gerais do sensor são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Especificações técnicas do sensor SCT-013.

Parâmetro	Descrição / Valor
Modelo	SCT-013-005
Tipo	Transformador de corrente tipo <i>split core</i> (não invasivo)
Faixa de medição	0 – 5 A AC
Tipo de saída	Tensão (1 V_{rms} proporcional à corrente nominal)
Resistor de amostragem interno	Integrado (modelo de saída em tensão)
Não linearidade	$\pm 3\%$ (entre 10 % e 120 % da corrente nominal)
Isolamento dielétrico	1 000 V AC / 1 minuto
Material do núcleo	Ferrite
Temperatura de operação	-25 °C a +70 °C
Força dielétrica	Conforme UL94-V0 (resistência ao fogo)
Número mínimo de ciclos mecânicos	$\geq 1\ 000$ ciclos (25 °C)
Abertura interna	13 mm x 13 mm
Saída elétrica	Cabo de 1 m com plug P2 3,5 mm (3 vias)
Aplicações típicas	Monitoramento de motores, compressores e bombas AC em sistemas IoT

Fonte: Adaptado de YHDC – *SCT-013 Series Datasheet* (2023).

3.3.4 Bomba submersível

A bomba submersível modelo HG-380 (FIGURA 9) foi utilizada neste projeto para compor o ambiente de simulação do sistema de captação de água. Trata-se de um equipamento eletromecânico compacto, amplamente empregado em aplicações como aquários, fontes ornamentais, chafarizes e sistemas de hidroponia, devido ao seu baixo consumo energético e operação contínua. Com potência nominal de 20 W, tensão de operação de 127 V e frequência de 60 Hz, a bomba apresenta desempenho estável e adequado para testes laboratoriais que demandam circulação constante de água e condições reproduzíveis de ensaio.

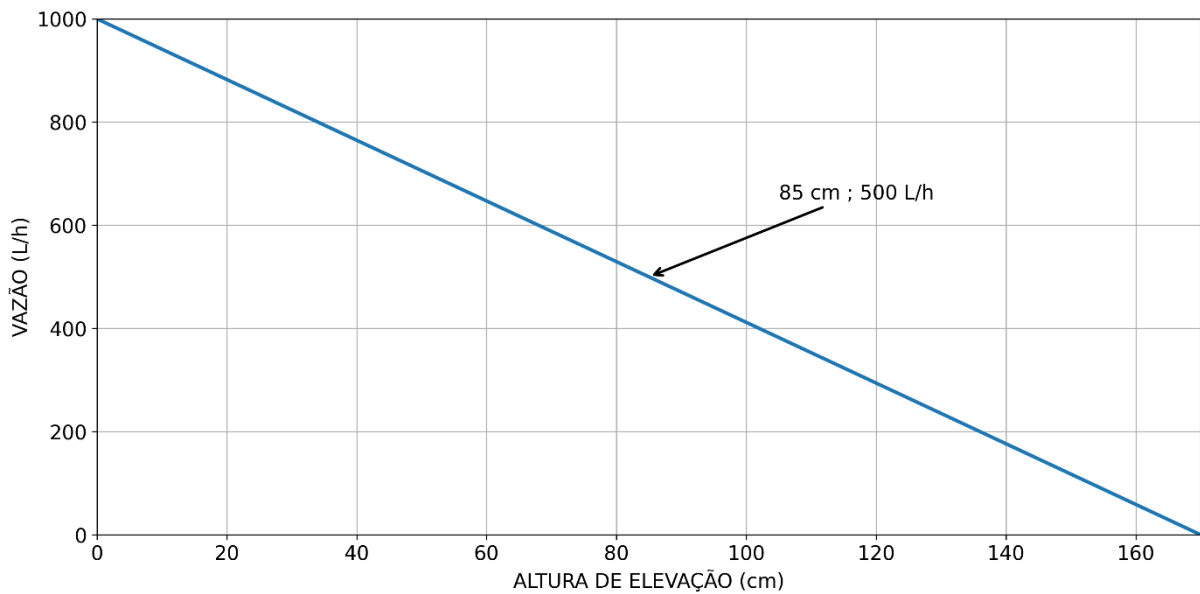
Figura 9 - Bomba submersível HG-380.



Fonte: Adaptado de especificações comerciais da bomba HG-380 (2024).

A HG-380 possui vazão nominal de 1000 L/h quando operando em altura de elevação igual a zero, valor que naturalmente diminui conforme aumenta a coluna d'água. Seu comportamento hidráulico segue uma tendência aproximadamente linear, típica de bombas centrífugas de pequeno porte: a vazão é máxima em alturas próximas de 0 cm e decresce até atingir vazão nula na altura de elevação máxima, especificada em 170 cm. Esse comportamento foi apresentado na Figura 10 e possibilita simular diferentes condições de operação de um poço artesiano em escala reduzida, permitindo analisar a resposta dos sensores de vazão e corrente sob variações de carga hidráulica.

Figura 10 - Relação vazão x altura de elevação da bomba HG-380.



Fonte: Adaptado de especificações comerciais da bomba HG-380 (2024).

No contexto do protótipo, a bomba HG-380 fornece o fluxo necessário para acionar o hidrômetro multijato, permitindo observar o comportamento do sensor *Reed Switch*, ao mesmo tempo em que possibilita avaliar a resposta do sensor de corrente SCT-013 durante os ciclos de acionamento da bomba. Sua utilização como elemento hidráulico de simulação atende aos objetivos de validar o funcionamento do sistema IoT em ambiente controlado, mantendo segurança operacional e repetibilidade dos ensaios, características desejáveis para experimentos de instrumentação e testes de sistemas embarcados. As especificações gerais da bomba são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Especificações da bomba HG-380.

Parâmetro	Valor
Modelo	HG-380
Potência nominal	20 W
Tensão de operação	127 V
Frequência	60 Hz
Vazão nominal	1000 L/h
Elevação máxima	170 cm
Principais aplicações	Aquários, fontes, chafarizes, climatizadores, hidroponia

Fonte: Adaptado de especificações comerciais da bomba HG-380 (2024).

3.3.5 Horímetro analógico eletromecânico

O projeto também incorporou um horímetro analógico eletromecânico modelo SYS-1 (FIGURA 11), utilizado amplamente em aplicações industriais e agrícolas para registrar o tempo acumulado de operação de motores, bombas e compressores. A inclusão deste dispositivo justifica-se não apenas pelo seu papel técnico no ambiente de simulação, mas sobretudo por sua exigência normativa em poços artesianos reais. Na fiscalização conduzida por órgãos gestores de recursos hídricos, como o IGAM, o horímetro constitui um instrumento oficial de referência, empregado para auditoria do tempo de operação da bomba e para validação das medições declaradas pelo usuário. Por essa razão, sua presença no protótipo é fundamental para aproximar o ambiente de testes das condições reais de campo, garantindo comparabilidade entre métodos analógicos e digitais.

Figura 11 - Horímetro analógico SYS-1.



Fonte: Adaptado de *SYS-1 Hour Meter Datasheet (2024)*.

Além do papel normativo, o horímetro SYS-1 foi utilizado como padrão comparativo para validar o tempo de operação estimado pelo sensor de corrente não invasivo SCT-013. O horímetro eletromecânico funciona mediante a aplicação de uma diferença de potencial elétrica entre seus terminais, o que faz trabalhar as suas engrenagens internas, acumulando horas sempre que a bomba se encontra energizada. Entretanto, por registrar o tempo sob tensão e não necessariamente o tempo em regime efetivo de operação, ele pode apresentar pequenas discrepâncias

em relação à leitura do SCT-013, que detecta exclusivamente a corrente real no circuito. Durante a validação experimental, o horímetro foi confrontado com as medições do sensor de corrente e com um cronômetro digital externo, servindo como instrumento de auditoria primária e permitindo avaliar a coerência e precisão do sistema embarcado desenvolvido. As especificações gerais do horímetro analógico são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Especificações técnicas do horímetro analógico SYS-1.

Parâmetro	Descrição / Valor
Modelo	SYS-1
Tipo	Horímetro analógico eletromecânico
Alimentação	100–250 V AC
Frequência nominal	50/60 Hz
Faixa de contagem	0–99.999,9 horas
Precisão temporal	±0,1 h
Consumo de potência	~0,3 W
Temperatura de operação	–10 °C a +50 °C
Umidade ambiente	48–85% UR
Características construtivas	Projeto selado, não resetável
Retenção de dados	Mantém a contagem após interrupção de energia
Aplicações típicas	Geradores, bombas, compressores, máquinas agrícolas, equipamentos industriais

Fonte: Adaptado de *SYS-1 Hour Meter Datasheet (2024)*.

3.3.6 Google Sheets e Apps Script

As Planilhas Google (*Google Sheets*) constituem uma ferramenta de processamento e organização de dados baseada em nuvem, parte do ecossistema *Google Workspace*, permitindo criação, edição e compartilhamento de planilhas em tempo real. Entre suas funcionalidades essenciais encontram-se armazenamento automático, controle de versões, colaboração simultânea e acesso multiplataforma, características que tornam o ambiente adequado para aplicações que exigem registro contínuo e rastreável de informações. De acordo com o *Google Workspace (2024)*, o sistema é projetado para permitir “trabalho colaborativo seguro, com sincronização

automática e disponibilidade independente do dispositivo”, características fundamentais para sistemas de monitoramento operando de forma distribuída.

No contexto deste projeto, as Planilhas Google desempenham o papel de plataforma central de armazenamento e análise de dados, recebendo em tempo real as medições enviadas pelo microcontrolador ESP32. Cada registro recebido é organizado em abas anuais e tabelas estruturadas, permitindo consultas por hora, dia ou período definido, além de possibilitar a geração de relatórios operacionais e gráficos. A utilização desse ambiente facilita a rastreabilidade histórica e atende às necessidades de integridade e transparência das informações exigidas por órgãos gestores de recursos hídricos.

Um diferencial relevante do *Google Sheets* é a integração com o *Apps Script*, uma plataforma de automação baseada em *JavaScript* que opera de forma nativa dentro do ambiente Google. Essa tecnologia permite criar funções, serviços e rotinas automatizadas capazes de processar dados, gerar relatórios, validar registros e interagir com APIs por meio de requisições HTTP. No projeto, o *Apps Script* atua como *backend* responsável por interpretar os dados enviados via HTTP POST, armazená-los na planilha, calcular a vazão instantânea, consolidar registros horários, gerar relatórios e demais rotinas automatizadas. Conforme documentado pelo *Google Developers (2024)*, o *Apps Script* possibilita a criação de “aplicações personalizadas integradas ao ecossistema Google, automatizando fluxos de trabalho e estendendo funcionalidades nativas”. Dessa forma, a combinação entre *Google Sheets* e *Apps Script* constitui uma solução robusta, escalável e de baixo custo, plenamente alinhada às demandas do monitoramento hidrométrico automatizado proposto neste trabalho.

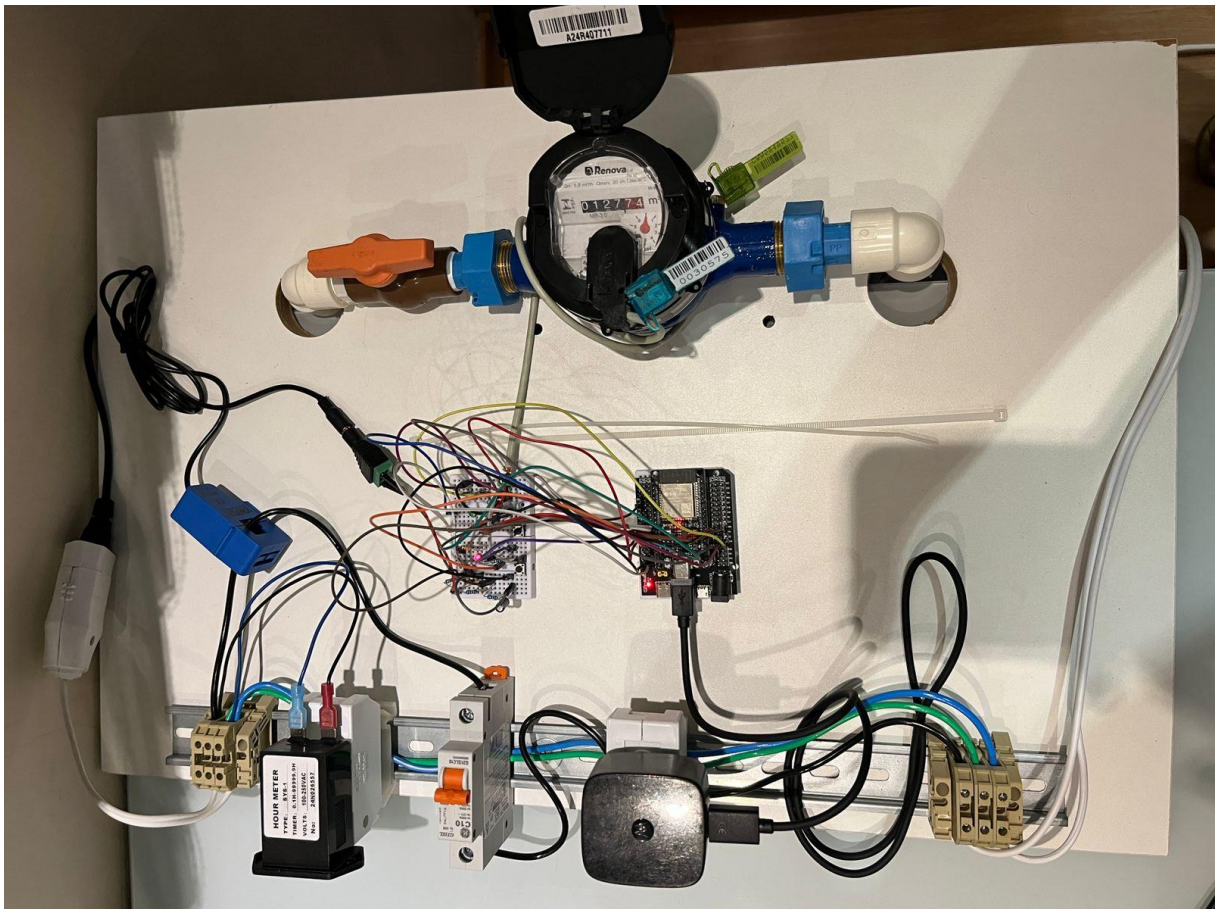
3.4 Montagem Física do Protótipo

A montagem física do protótipo foi realizada sobre uma base de MDF com 600 mm de largura, 400 mm de profundidade e 15 mm de espessura, que fornece rigidez estrutural suficiente para fixação dos componentes elétricos, eletrônicos e hidráulicos. Sobre esta base foi instalado um cavalete hidráulico contendo um hidrômetro DN25 com saída pulsada e um registro de esfera de 1/2”, permitindo controlar o fluxo para a simulação de consumo. A entrada do hidrômetro foi conectada através de uma mangueira flexível atóxica transparente de 1/4" à saída de uma bomba submersa, instalada no interior de um balde que funciona como reservatório de

recirculação. Nessa configuração, a bomba impulsiona a água do balde para o hidrômetro, que por sua vez devolve o volume escoado novamente ao recipiente, também através de uma mangueira flexível atóxica transparente de 1/4", formando um sistema fechado. Essa disposição facilita o manuseio e possibilita a realização de testes repetitivos em ambiente controlado, prática comum em bancadas experimentais de sistemas de instrumentação.

Na porção elétrica, um trilho DIN de 50 cm foi fixado à base para acomodação dos bornes de conexão, que se dividem em dois conjuntos: um para a entrada de alimentação do projeto e outro para a saída destinada à bomba de aquário, utilizada como carga simulada. Um disjuntor monopolar de 10 A foi instalado entre os bornes de entrada e saída, garantindo proteção ao circuito de carga. Adicionalmente, foi instalada uma tomada 2P+T de 10 A, utilizada exclusivamente para alimentar a fonte do ESP32. A Figura 12 apresenta a vista superior do projeto montado.

Figura 12 - Montagem física do protótipo em base de MDF.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O sistema opera em 127 VAC, conforme a tensão nominal da bomba utilizada. A fonte do ESP32, de entrada bivolt (100-250 VAC) e saída 5 VDC, fornece até 25 W de potência e foi ligada diretamente na tomada instalada no trilho DIN para reduzir o percurso dos cabos de alimentação de baixa tensão. O horímetro analógico eletromecânico, que pode ser alimentado em 100–250 VAC, foi fixado sobre uma base no trilho DIN e conectado em paralelo com a bomba, após o disjuntor de proteção, garantindo que registre apenas o tempo em que a carga está efetivamente energizada.

Para organização do circuito de sinais, foram utilizadas quatro mini *protoboards* de 170 pontos, sobre as quais estão distribuídos os componentes auxiliares, como divisores resistivos, filtros RC e resistores de *pull-up*. O microcontrolador ESP32, montado em uma base de expansão de 30 pinos, foi fixado em posição central para facilitar a interligação com sensores, LEDs, botões e demais módulos. Os cabos foram organizados de forma a separar fisicamente as regiões de tensão alternada e tensão contínua, prática recomendada para reduzir interferências e aumentar a segurança da bancada experimental.

A Tabela 1 apresenta o levantamento dos valores gastos na montagem do protótipo:

Tabela 1 - Relação de materiais utilizados na montagem do protótipo e custos estimados.

Item	Descrição	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
1	Base de MDF (600 x 400 x 15 mm)	1	60,00	60,00
2	Trilho DIN 50 cm	1	5,30	5,30
3	Cabos flexíveis 2,5 mm ²	—	—	8,00
4	Conectores de poliamida	6	3,24	19,44
5	Tomada 2P+T 10 A para trilho DIN	1	11,66	11,66
6	Disjuntor monopolar C 10 A – 250 V	1	17,33	17,33
7	Microcontrolador ESP32	1	50,15	50,15
8	Placa base de expansão para ESP32	1	35,55	35,55
9	Componentes eletrônicos diversos	—	—	25,00
10	Fonte de alimentação 25 W bivolt	1	30,00	30,00
11	Horímetro analógico SYS-1	1	63,71	63,71
12	Sensor de corrente SCT-013-005	1	68,06	68,06
13	Hidrômetro DN25 com sensor de pulsos	1	179,99	179,99

Item	Descrição	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
14	Kit cavalete hidráulico em PVC	1	59,99	59,99
15	Bomba submersível HG-380 127 V	1	74,90	74,90
16	Outros materiais e fixações	—	—	40,00
	Total estimado do protótipo	—	—	749,08

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Os valores apresentados são estimativas obtidas a partir de preços praticados no mercado nacional à época da montagem do protótipo, podendo sofrer variações conforme fornecedor, região e disponibilidade. A tabela tem caráter ilustrativo e visa demonstrar a viabilidade econômica da solução proposta em contexto acadêmico e experimental.

3.5 Circuito Eletrônico e Condicionamento de Sinais

O circuito eletrônico do protótipo foi projetado para garantir aquisição estável, segura e livre de ruídos dos sinais provenientes dos sensores e periféricos conectados ao ESP32. Todos os componentes de baixa tensão foram alimentados a 3,3 VDC, selecionados por meio do *jumper* do módulo de expansão do microcontrolador, o que assegura compatibilidade direta com os níveis lógicos das GPIOs. O sensor de corrente SCT-013 foi ligado à GPIO 35 (entrada ADC), necessitando de um circuito de condicionamento composto por divisor resistivo, capacitor de acoplamento e filtro RC passa-baixa. O divisor de tensão formado por dois resistores de 10 k Ω tem dupla função essencial: (i) garantir que o sinal proveniente do SCT-013 seja centralizado no nível médio de 1,65 V, faixa segura para o ADC do ESP32, que não aceita valores negativos; e (ii) limitar a amplitude máxima do sinal para evitar sobretensão na entrada analógica, preservando a integridade do microcontrolador. O capacitor de acoplamento de 100 μ F tem a função de bloquear o componente contínuo do sinal, permitindo que apenas a componente alternada proporcional à corrente seja aplicada ao ADC, técnica amplamente utilizada em medições com transformadores de corrente.

O filtro RC aplicado ao SCT-013, formado por um resistor de 10 k Ω e um capacitor cerâmico de 220 nF, atua como filtro passa-baixa para reduzir ruídos de alta

frequência decorrentes de interferências eletromagnéticas, chaveamentos e variações abruptas do sinal. A frequência de corte (f_c) pode ser estimada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Substituindo pelos valores adotados no projeto,

$$f_c = \frac{1}{2\pi(10000)(220 \times 10^{-9})} \approx 72 \text{ Hz}$$

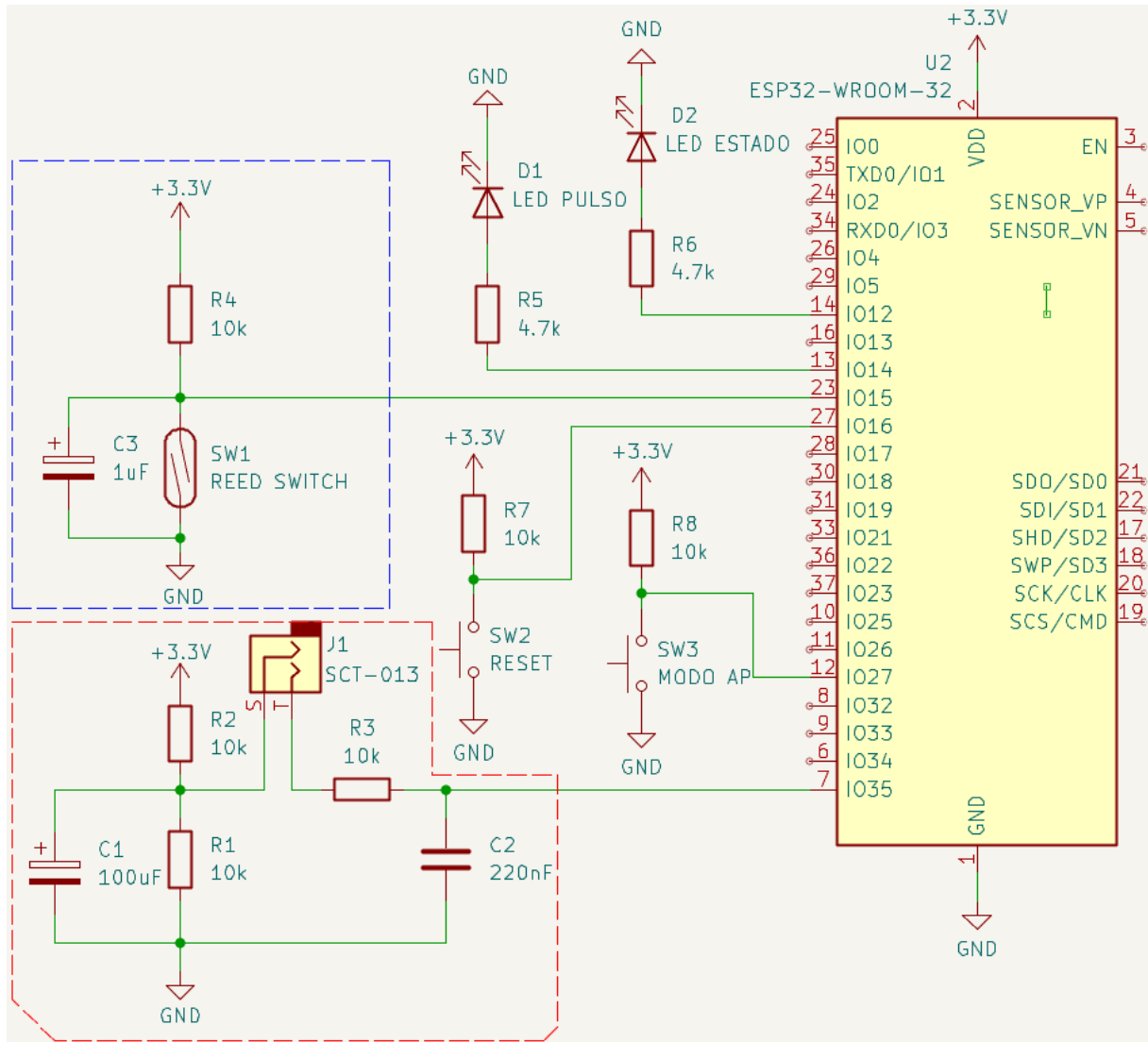
Esse valor garante que o sinal fundamental da rede elétrica (60 Hz) seja preservado enquanto se atenuam componentes de alta frequência que poderiam distorcer a leitura.

O sensor de pulsos do hidrômetro, baseado em *Reed Switch*, foi conectado à GPIO 15 com um resistor de *pull-up* de 10 k Ω e um capacitor de 1 μ F, formando um circuito de *debouncing* por filtragem RC. O *Reed Switch*, por ser eletromecânico, apresenta o fenômeno conhecido como *contact bounce*, em que o contato abre e fecha várias vezes em poucos milissegundos antes de estabilizar. Sem tratamento, essas oscilações seriam interpretadas pelo microcontrolador como múltiplos pulsos, gerando superestimativa do volume. O uso de um capacitor suaviza essas transições, resultando em um pulso elétrico limpo e único. Estudos sobre contato mecânico reforçam a necessidade de *debouncing* para garantir medições corretas em sensores comutados mecanicamente (HOROWITZ; HILL, 2015).

Os LEDs indicadores de estado e pulsos foram conectados às GPIOs 12 e 14, cada um com resistor limitador de 4,7 k Ω , garantindo operação segura dentro dos limites de corrente da GPIO. Esses resistores são essenciais para evitar sobrecorrente no LED e no próprio microcontrolador, conforme práticas consolidadas de eletrônica básica (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). Já os *push buttons* instalados nas GPIOs 16 e 27 executam as funções de *reset* da NVS e entrada no modo AP, respectivamente, e receberam resistores externos de *pull-up* de 10 k Ω , mesmo havendo *pull-ups* internos disponíveis no ESP32. A escolha de resistores externos garante maior confiabilidade, reduz sensibilidade a ruídos e oferece comportamento previsível, especialmente importante no botão de *reset* da NVS e no acionamento do

modo AP, que exigem leituras estáveis para não dispararem indevidamente. A Figura 13 apresenta a modelagem do diagrama do circuito eletrônico proposto.

Figura 13 - Diagrama do circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3.6 Projeto da Arquitetura do Sistema

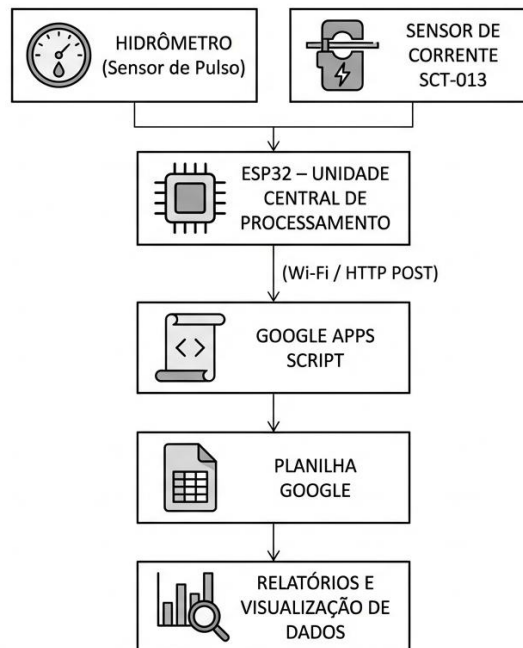
O diagrama de blocos do sistema apresenta uma visão macro da estrutura funcional do protótipo, descrevendo o fluxo de informações desde a aquisição dos dados até sua disponibilização na nuvem. Na primeira parte do diagrama encontram-se os módulos de sensoriamento, compostos pelo hidrômetro com saída pulsada e pelo sensor de corrente SCT-013, responsáveis pela leitura do volume captado e do tempo de operação da bomba. Esses sensores convertem grandezas físicas em sinais

elétricos interpretáveis pelo microcontrolador. Cada pulso gerado pelo hidrômetro corresponde a um determinado volume de água, enquanto a leitura de corrente permite determinar se a bomba está ligada ou desligada. O uso de sensores de natureza complementar permite monitorar simultaneamente variáveis hidráulicas e elétricas, contribuindo para uma visão abrangente do comportamento operacional do sistema.

Os sinais provenientes dos sensores são direcionados ao microcontrolador ESP32, que atua como unidade central de processamento. Neste bloco, o dispositivo executa a contagem de pulsos do hidrômetro, a amostragem dos valores de corrente e a organização dos registros horários obtidos via sincronização NTP (*Network Time Protocol*). Em seguida, organiza essas informações em um pacote JSON (*JavaScript Object Notation*) enviado por HTTP POST diretamente ao *endpoint* (URL de acesso) do *Google Apps Script* na Planilha Google correspondente. Conforme ressalta Gubbi *et al.* (2013), arquiteturas IoT que combinam processamento distribuído e conectividade integrada tendem a apresentar melhor desempenho e escalabilidade em aplicações de monitoramento.

Na etapa final, o diagrama destaca a camada de comunicação e processamento em nuvem, onde o *Google Apps Script* recebe, valida e armazena os dados enviados pelo ESP32, organizando-os em tabelas na Planilha Google. É também nessa camada que ocorre o cálculo da vazão instantânea (a partir da variação do volume sobre o tempo ligado) e a geração de relatórios diários, mensais e de ocorrências. Assim, o fluxo de dados se encerra com a disponibilização das informações em uma interface acessível e organizada, garantindo confiabilidade, rastreabilidade e conformidade com as exigências da Portaria IGAM. O diagrama da Figura 14 destaca a interação direta entre o dispositivo físico e a plataforma em nuvem, evidenciando a ausência de servidores intermediários e reforçando o caráter de baixo custo da solução. Essa arquitetura modular e hierarquizada facilita a manutenção, amplia a possibilidade de expansão futura e oferece um caminho claro para migração do protótipo em ambiente simulado para sistemas de monitoramento instalados em poços artesianos reais.

Figura 14 - Diagrama de blocos e fluxo de dados do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3.7 Desenvolvimento do *Software* Embarcado

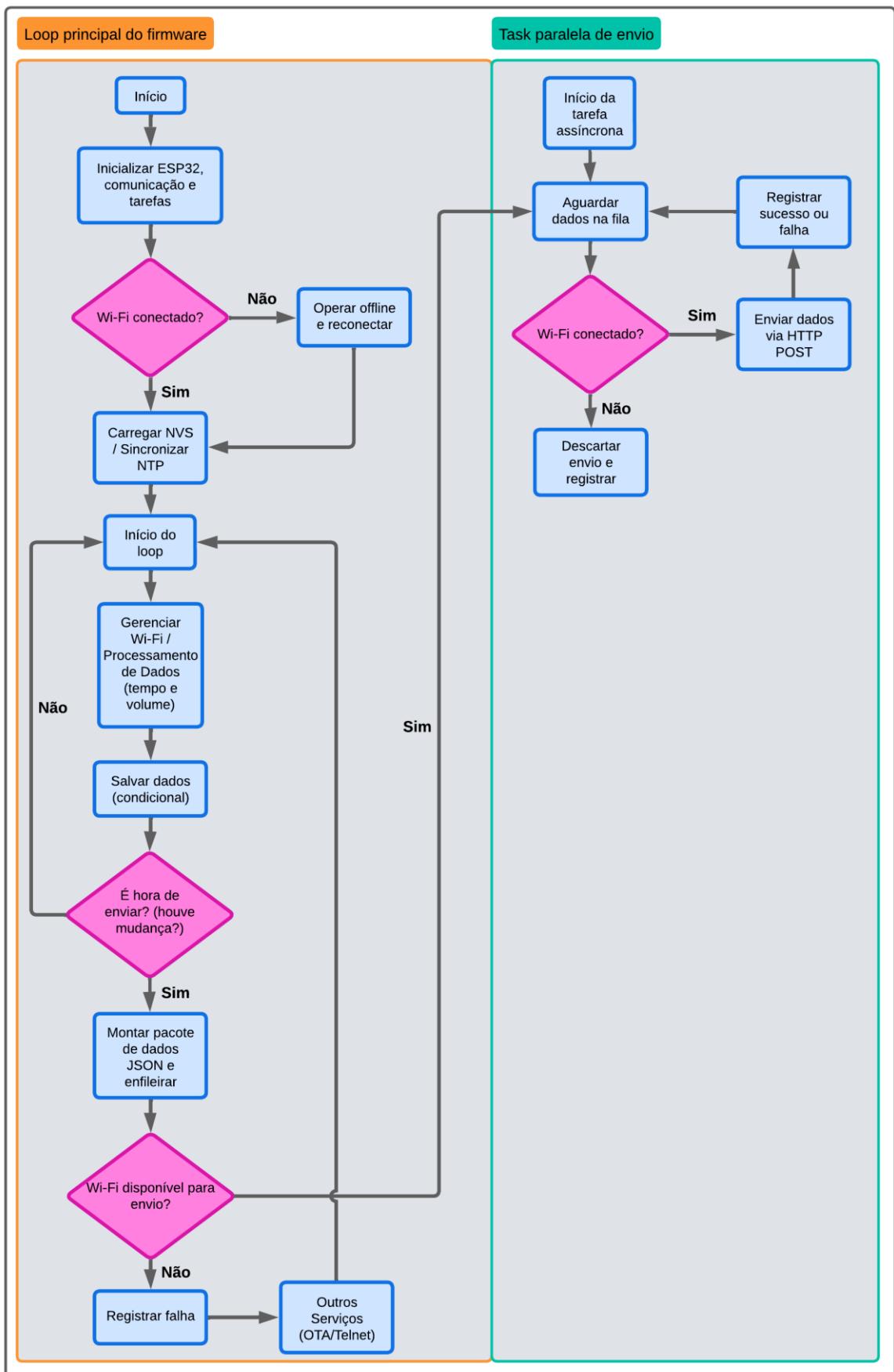
O desenvolvimento do *software* embarcado teve como objetivo garantir a aquisição precisa e contínua dos dados coletados pelos sensores, bem como sua organização e transmissão para a plataforma em nuvem. O microcontrolador ESP32 foi programado para realizar as leituras dos pulsos provenientes do hidrômetro e a leitura analógica dos valores de corrente do sensor SCT-013. Para aumentar a confiabilidade das medições elétricas, o *firmware* implementa técnicas de filtragem simples e lógica de histerese, evitando oscilações falsas no estado da bomba, prática comum em sistemas embarcados dedicados ao monitoramento de cargas elétricas. A medição de volume bombeado é realizada por meio do sensor de pulsos do hidrômetro (*Reed Switch*) e a interrupção associada a esse pino implementa um *debouncing* por *software*, complementando o circuito de *debouncing* físico. Essa lógica evita que oscilações mecânicas do *Reed Switch* (*bouncing*) sejam interpretadas como múltiplos pulsos, garantindo que cada ciclo hidráulico do hidrômetro resulte em uma contagem correta. Além disso, o dispositivo sincroniza seu relógio interno via NTP, garantindo que cada registro contenha carimbo temporal preciso, requisito essencial para a rastreabilidade dos dados.

Após a coleta, o *software* processa parcialmente as informações antes de enviá-las à nuvem. Embora o cálculo da vazão instantânea seja executado no *Google Apps Script*, o ESP32 é responsável por organizar dados essenciais como o total de pulsos acumulados, o estado da bomba, o tempo total de operação da bomba, a corrente instantânea medida e os carimbos temporais de cada amostra. O sistema salva periodicamente os valores acumulados de volume e tempo ligado na memória NVS (*Non-Volatile Storage*), assegurando que não haja perda de dados significantes em situações de queda de energia ou reinicializações inesperadas. Essa gravação é feita de forma condicional, a depender da variação dos valores acumulados, visando minimizar o desgaste da memória *flash*, que tem vida útil limitada, sendo essa uma prática recomendada em sistemas de telemetria que necessitam assegurar integridade histórica dos dados.

A comunicação com a nuvem é realizada por meio de requisições HTTP POST, estruturadas em pacotes JSON, contendo os campos necessários para o processamento posterior no *Apps Script*. Para aumentar a robustez da transmissão, o *firmware* emprega uma fila e uma tarefa dedicada ao envio dos pacotes, permitindo que as leituras dos sensores não sejam interrompidas por eventuais falhas de rede ou lentidão no servidor. Essa arquitetura assíncrona garante maior estabilidade e confiabilidade no envio dos dados, sendo comumente adotada em projetos IoT que exigem operação contínua em ambientes com variações de conectividade. Em caso de falha de transmissão, o pacote é reenviado em ciclos programados até que a conexão seja restabelecida.

O *firmware* também incorpora mecanismos de configuração, manutenção e diagnóstico, como: acesso AP para gerenciamento das redes *Wi-Fi* salvas na memória NVS, *logs* via *serial/Telnet* e suporte opcional a atualizações OTA (*Over-the-Air*), possibilitando modificações remotas no código sem necessidade de acesso físico ao dispositivo. Além disso, o sistema é capaz de identificar anomalias, como ausência de pulsos por longos períodos, inconsistências nas leituras de corrente ou falhas de sincronização NTP. A Figura 15 apresenta o diagrama do fluxo geral do *software* embarcado, para melhor entendimento das funcionalidades implementadas.

Figura 15 - Diagrama do fluxo do *firmware*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Dessa forma, o *firmware* foi desenvolvido de forma modular e orientada à confiabilidade operacional, buscando garantir exatidão nas medições, robustez frente a falhas de comunicação e aderência aos requisitos funcionais estabelecidos para o monitoramento de poços artesianos. O código-fonte foi desenvolvido na plataforma *Arduino IDE* e o mesmo encontra-se apresentado no Apêndice A.

3.8 Integração com a plataforma *Google Sheets*

A integração com a plataforma *Google Sheets* constitui o núcleo da camada de processamento em nuvem do sistema proposto, responsável por receber, armazenar, validar e tratar as informações enviadas pelo ESP32. Para isso, utiliza-se um *script* desenvolvido em *Google Apps Script*, executado em ambiente isento de servidor dedicado, o que elimina a necessidade de manutenção de servidores próprios e reduz significativamente o custo operacional. O *script* é acionado automaticamente sempre que o microcontrolador envia um pacote de dados via requisição HTTP POST, contendo informações como volume acumulado, tempo ligado da bomba, corrente medida, estado de operação e carimbo temporal sincronizado por NTP. Essa arquitetura segue uma lógica alinhada às práticas de sistemas IoT modernos, que combinam processamento distribuído entre dispositivo e nuvem para maior eficiência e escalabilidade.

A primeira responsabilidade do *Apps Script* é realizar a validação das informações recebidas, verificando a estrutura do JSON, garantindo que os campos obrigatórios estejam presentes e analisando possíveis duplicidades decorrentes de retransmissões do microcontrolador. Esta validação evita inconsistências, registros repetidos e falhas de integridade nos dados. Após a validação, o *script* roteia cada registro para a aba correspondente ao ano da medição, criando automaticamente novas abas quando necessário, seguindo um padrão de formatação previamente definido. Essa modularidade facilita a organização histórica das informações e contribui para a rastreabilidade, requisito essencial para análises hídricas longitudinais e auditorias ambientais.

Posteriormente, o *script* executa o processamento derivado dos dados, como o cálculo da vazão instantânea, obtido pela variação do volume dividido pelo tempo ligado no intervalo entre medições. Esse cálculo, realizado em nuvem, reduz a

carga computacional do ESP32 e permite ajustes posteriores no algoritmo sem necessidade de reprogramação do dispositivo físico, característica destacada por Zukeram *et al.* (2023) como fundamental em sistemas IoT implantados em ambientes de monitoramento ambiental. Além disso, o *script* agrupa as medições em registros horários, consolidando volume captado, tempo de operação e vazão média por hora, com formatação automática e detecção de falhas conforme padrões estabelecidos. As funcionalidades de integração com o servidor em nuvem descritas até aqui resultam na tabela de dados exemplificada no Anexo B deste trabalho.

Para centralizar a configuração e a visualização dos dados, o *script* cria e mantém uma aba chamada *menu* e nessa aba são definidos blocos de:

- Configurações Iniciais: “hidrômetro inicial”, “horímetro inicial”, “vazão nominal”, “potência” e “tensão da bomba”, “corrente nominal calculada”;
- Relatórios (seleção da unidade dos resumos – “L/min” ou “m³/h” – e intervalo de datas para resumo diário, resumo mensal e relatório de ocorrências);
- Dados do Sistema: “MAC”, “SSID”, “IP”, “data/hora da última gravação persistida na NVS”, “total de litros” e “tempo acumulado na última gravação”;
- Painel com indicadores atualizados, tais como: hidrômetro (m³), horímetro (h), estado, corrente instantânea e vazão instantânea;
- Dados da Instalação / Outorga, com campos para outorgado, CPF/CNPJ, município/UF, coordenadas geográficas, número de processo, datas e série do hidrômetro.

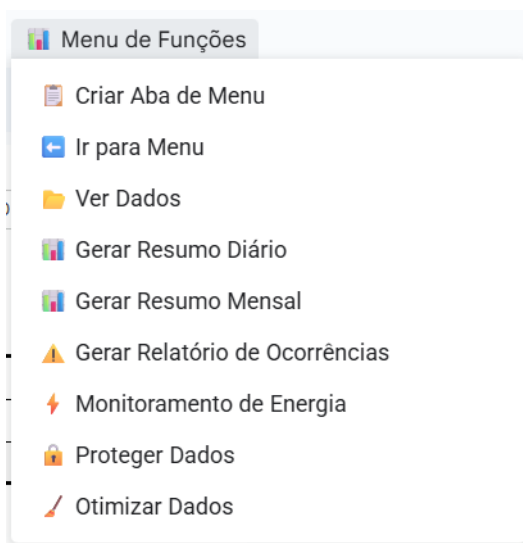
Um exemplo do *menu* gerado através do *script* foi apresentado no Anexo A.

O *Apps Script* também é responsável pela geração de relatórios diários (ANEXO C) e mensais (ANEXO D), atendendo aos requisitos técnicos estabelecidos pela Portaria IGAM nº 48/2019, que exige que os usuários de recursos hídricos mantenham informações consolidadas de volume captado, tempo de bombeamento e variações de vazão. O *script* organiza automaticamente os dados, cria gráficos, destaca totais e implementa mecanismos de ordenação e validação. Adicionalmente,

o sistema conta com um relatório de ocorrências (ANEXO E), que registra eventuais falhas identificadas, como ausência de pulsos, variações anômalas na corrente, perda de comunicação ou inconsistências nos dados enviados. Isso aumenta a robustez do sistema e fornece subsídios importantes para intervenções de manutenção.

Por fim, a integração inclui um painel complementar de monitoramento de energia com gráficos de corrente e consumo energético estimado, conforme exemplificado no Anexo F, como também um *menu* personalizado dentro da própria planilha, permitindo ao usuário executar funções específicas de forma automática — como gerar relatórios, atualizar listas suspensas, formatar abas ou recalcular históricos — diretamente pela interface gráfica (FIGURA 16). Essa abordagem reduz a necessidade de conhecimento técnico avançado e torna o sistema mais acessível a usuários finais, mantendo a exatidão dos dados e a automação dos processos.

Figura 16 - Opções do *menu* personalizado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Assim, o conjunto de rotinas implementadas no *Apps Script* constitui um elo essencial entre o microcontrolador e o ambiente analítico, garantindo uma solução integrada, confiável, escalável e compatível com os requisitos regulatórios e operacionais do monitoramento hídrico digital.

O *script* completo, desenvolvido na plataforma *Google Apps Script* em linguagem *JavaScript*, encontra-se apresentado no Apêndice B.

3.9 Ambiente de Simulação do Poço Artesiano

O ambiente de simulação do poço artesiano foi projetado para reproduzir, de forma controlada e segura, as condições essenciais de operação de um sistema real de captação subterrânea. Para isso, utiliza-se uma bomba submersa de pequeno porte, similar às aplicadas em aquários, cuja função é gerar um fluxo contínuo de água através do sistema. Embora opere com potência reduzida e em baixa profundidade, esse tipo de bomba apresenta comportamento hidráulico coerente com o observado em sistemas de bombeamento reais, permitindo avaliar o acionamento, o consumo energético e as variações de vazão em condições estáveis. Destaca-se que ambientes simulados são eficientes para reproduzir padrões reais de consumo e comportamento hidráulico em cenários controlados, tornando-os adequados para testes laboratoriais de sistemas inteligentes.

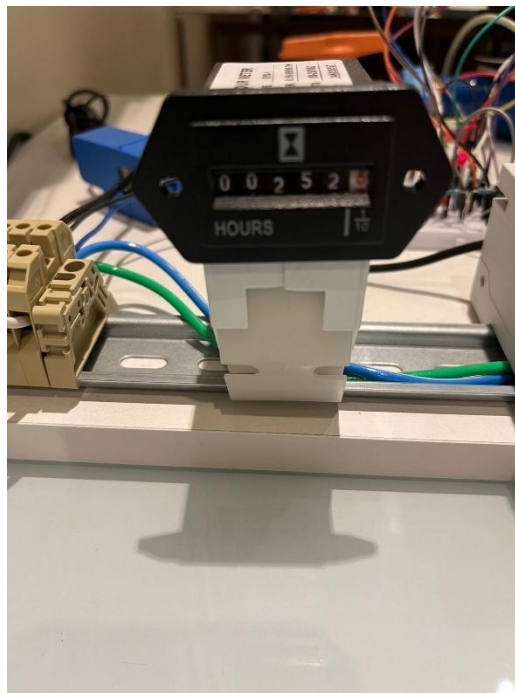
O fluxo gerado pela bomba é direcionado para um hidrômetro multijato com leitura analógica e equipado com sensor do tipo *Reed Switch*, responsável por registrar o volume de água captado por meio de pulsos. Esse mecanismo simula com fidelidade o processo de medição volumétrica exigido em poços artesianos, nos quais o volume captado deve ser monitorado continuamente para fins de regularização junto aos órgãos ambientais. Soluções de monitoramento baseadas em IoT apresentam desempenho confiável quando aplicadas à mensuração contínua de variáveis hidrológicas em ambientes controlados, permitindo extrapolações consistentes para cenários reais. Dessa forma, o uso do hidrômetro pulsado no ambiente simulado garante fidelidade às condições operacionais típicas de sistemas de captação subterrânea.

Para complementar a simulação, incorpora-se ao circuito elétrico de alimentação da bomba o sensor de corrente não invasivo SCT-013, utilizado para identificar os momentos de acionamento e desligamento da mesma, possibilitando a estimativa do tempo de operação, sendo este um parâmetro indispensável para o cálculo da vazão instantânea. Sensores elétricos integrados a sistemas IoT possibilitam monitoramento contínuo de parâmetros operacionais com alta confiabilidade, reforçando o potencial do ambiente simulado como ferramenta de validação. Assim, o conjunto bomba–hidrômetro–sensor de corrente permite testar, verificar e ajustar todo o ciclo de aquisição e transmissão de dados em um cenário

seguro, de baixo custo e altamente replicável, antes de sua implantação em um poço artesiano real.

Além dos sensores integrados ao protótipo, o ambiente de simulação incluiu um horímetro analógico eletromecânico (FIGURA 17), instrumento tradicionalmente exigido em sistemas de bombeamento e em poços artesanais para fiscalização do tempo de operação das bombas. Esse dispositivo foi incorporado com o propósito de servir como parâmetro comparativo durante a validação, permitindo confrontar o tempo de operação estimado via sensor de corrente com o tempo contabilizado pelo mecanismo eletromecânico.

Figura 17 - Horímetro analógico eletromecânico instalado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3.10 Estratégia de Validação em Ambiente Simulado

A estratégia de validação do sistema foi conduzida integralmente em um ambiente de simulação controlado, com o objetivo de verificar o desempenho do protótipo antes de sua aplicação em um poço artesiano real. Esse ambiente possibilita avaliar o comportamento dos sensores, as rotinas do *firmware* e o processamento em nuvem sob condições estáveis e repetíveis, o que é fundamental na fase de desenvolvimento. Como afirmam Fuentes *et al.* (2020), ambientes controlados

permitted “reduzir interferências externas e favorecer análises consistentes durante as etapas iniciais de validação de sistemas hidrométricos inteligentes”, justificando plenamente sua utilização neste estudo.

A simulação foi composta por uma bomba submersa de aquário, um hidrômetro multijato equipado com sensor de pulsos do tipo *Reed Switch* e um sensor de corrente não invasivo do tipo SCT-013. Essa configuração estabelece um circuito fechado capaz de reproduzir, de forma reduzida, o comportamento hidráulico de um sistema de captação, permitindo observar contagem de pulsos, tempo de operação e estabilidade da comunicação. O ambiente proporciona condições ideais para comparar medições digitais e analógicas, já que elimina variáveis externas como: pressão do aquífero, perdas de carga ao longo da tubulação ou variações sazonais, que são características de poços artesianos reais.

Os procedimentos de validação envolveram ciclos repetidos de acionamento da bomba, com diferentes durações e intervalos de repouso, de modo a observar o comportamento do sistema em múltiplas condições operacionais. Durante esses ensaios, observou-se que a relação real entre pulsos do hidrômetro e volume medido diferiu do valor nominal informado no *datasheet*. Da mesma forma, o tempo de operação estimado pelo sensor SCT-013 apresentou divergências em relação ao horímetro analógico eletromecânico instalado no circuito. Entretanto, quando comparado a um cronômetro digital (referência de precisão para o teste), o sensor SCT-013 apresentou baixo índice de erro, demonstrando maior aderência ao tempo real de operação da bomba. Essas observações preliminares não constituem ainda os resultados formais do estudo, mas sinalizam aspectos críticos que serão aprofundados na seção de Resultados e Discussões.

Os parâmetros avaliados durante a validação incluíram concordância das medições de volume e tempo ligado, estabilidade do fluxo de dados, exatidão temporal via NTP, confiabilidade da transmissão HTTP e robustez da persistência na memória NVS. A comparação qualitativa entre os instrumentos analógicos e o sistema digital também foi essencial, considerando que tanto o hidrômetro analógico quanto o horímetro eletromecânico são dispositivos obrigatórios em poços artesianos para fins de fiscalização e auditoria. Assim, mesmo apresentando limitações inerentes, esses instrumentos fornecem uma referência indispensável para aferir a coerência das medições do protótipo.

Por fim, embora o ambiente simulado seja extremamente eficaz para validar a lógica do sistema, identificar falhas e ajustar algoritmos, ele não reproduz integralmente as condições reais de campo. Fatores como profundidade do poço, oscilações de nível dinâmico, pressões variáveis, perdas de carga extensas e interferências entre captações não estão presentes no ambiente de bancada. Dessa forma, a validação em simulação constitui uma etapa inicial necessária e segura, mas deverá ser complementada futuramente por testes em um poço artesiano real para confirmar o desempenho do sistema sob condições operacionais completas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os principais resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com o protótipo desenvolvido, considerando seu comportamento em ambiente de teste, a precisão das medições de volume e tempo de operação, bem como a capacidade do sistema em gerar documentação técnica automatizada. As análises aqui expostas baseiam-se nos dados coletados durante os testes em bancada e nas saídas geradas pelo sistema de monitoramento, permitindo avaliar o desempenho global da solução proposta frente aos objetivos estabelecidos neste trabalho. Além disso, são discutidas as limitações observadas ao longo do desenvolvimento e dos ensaios experimentais, bem como as possibilidades de aprimoramento e expansão do sistema, de modo a fornecer uma visão crítica e fundamentada sobre sua aplicabilidade no contexto de monitoramento de poços tubulares e apoio à gestão do uso de recursos hídricos.

4.1 Comportamento do Sistema no Ambiente de Teste

Os ensaios realizados para avaliação do comportamento do sistema ocorreram exclusivamente em ambiente de bancada, com sistema montado em reservatório fixo com recirculação de água, conforme ilustrado na Figura 18. O objetivo principal dessa etapa foi observar o funcionamento global do protótipo em condições controladas, verificando sua estabilidade operacional, coerência das medições e comportamento frente a eventos previstos de falha, como perda de conectividade e desligamentos abruptos.

Figura 18 - Montagem do sistema no ambiente de teste.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A bomba submersível utilizada nos testes foi instalada em um reservatório fixo, constituído por um balde com capacidade aproximada de 12 L, operando em regime de recirculação de água: a bomba impulsionou o fluido através da mangueira e do hidrômetro, retornando ao reservatório, o que possibilitou a execução de medições sucessivas sem a necessidade de reposição constante de água. Essa configuração favorece a repetição dos testes sob condições semelhantes, reduz variações externas e facilita a observação de eventos como liga/desliga, interrupções e retomadas de operação, além de permitir o acompanhamento contínuo das medições registradas pelo ESP32 e da transmissão dos dados para a planilha em nuvem. A altura de elevação adotada foi de cerca de 85 cm, correspondente à altura da mesa onde o conjunto estava instalado. Essa configuração permitiu simular uma condição estável de funcionamento hidráulico, adequada para a observação do comportamento do sistema de medição de volume e tempo de operação, conforme já apresentado na descrição da montagem física e da arquitetura do protótipo.

Durante os testes, o sistema apresentou comportamento adequado durante as energizações. Em todas as inicializações observadas, o microcontrolador realizou corretamente o processo de *boot*, estabelecendo conexão com a primeira rede *Wi-Fi* conhecida disponível em um tempo médio de aproximadamente 15 segundos. Após a conexão bem-sucedida, a sincronização de data e hora por meio do protocolo NTP ocorreu de forma adequada em todos os casos, sem atrasos perceptíveis ou necessidade de intervenções adicionais, garantindo a coerência temporal dos registros gerados.

Os acionamentos da bomba foram realizados manualmente, por meio da manobra liga/desliga do disjuntor presente no circuito elétrico. Nessas condições, o sistema demonstrou resposta imediata às mudanças de estado, identificando corretamente os períodos de funcionamento e desligamento da bomba, tanto pelo estado lógico registrado pelo *firmware* como também pelas indicações visuais do protótipo. Esse comportamento reforça a adequação do método de detecção adotado, conforme discutido nas seções anteriores do trabalho, evidenciando a eficácia da lógica de detecção de estado implementada no microcontrolador, bem como a adequação do condicionamento de sinais empregado no circuito de medição de corrente.

No que se refere ao envio e ao armazenamento dos dados, o sistema operou conforme o projeto estabelecido. Sempre que houve variação nos valores de volume consumido ou tempo de operação, os dados foram transmitidos com periodicidade de 1 minuto. Na ausência de alterações nesses parâmetros, o envio ocorreu a cada 10 minutos. De forma geral, os dados recebidos no ambiente em nuvem apresentaram coerência com as informações exibidas localmente no dispositivo e com os valores persistidos na memória interna do microcontrolador, evidenciando a concordância do processo de integração entre os diferentes níveis do sistema. Situações pontuais de duplicidade, desordem temporal ou inconsistência nos registros foram corretamente identificadas e tratadas pelo *script* em nuvem, resultando na geração de alertas e registros específicos, sem comprometer a integridade global da base de dados.

Adicionalmente, foram simuladas situações de perda de conectividade *Wi-Fi* e desligamentos abruptos do sistema, com o intuito de avaliar seu comportamento frente a condições adversas. Na maioria dos cenários testados, o sistema apresentou funcionamento compatível com o previsto em projeto, realizando

reconexão automática à rede e retomando a operação a partir dos dados previamente salvos. Em alguns casos, observou-se perda pontual de registros, associada ao intervalo de gravação dos dados na memória não volátil, configurado em 10 minutos. Nessas situações, ao reiniciar, o sistema retornava aos últimos valores persistidos, podendo ocorrer a sobreposição ou ausência de leituras intermediárias, comportamento já previsto e considerado aceitável dentro das limitações do escopo experimental.

O mecanismo de verificação de inatividade implementado no servidor em nuvem mostrou-se eficaz ao classificar corretamente os períodos sem comunicação como estado *OFFLINE*, refletindo essa condição tanto nas abas de dados quanto no painel de monitoramento e nos relatórios de ocorrências. Da mesma forma, o retorno do sistema ao estado *ONLINE* foi reconhecido de forma automática, confirmando a confiabilidade da comunicação entre o protótipo e o ambiente em nuvem ao longo dos testes realizados.

De forma geral, os resultados obtidos nesta etapa indicam que o sistema apresentou comportamento estável e previsível no ambiente de teste em bancada, atendendo aos requisitos funcionais definidos para o protótipo. As observações realizadas nesta seção fornecem subsídios para as análises subsequentes relacionadas à precisão das medições e à capacidade do sistema em gerar documentação técnica, que serão discutidas nos próximos tópicos.

4.2 Precisão das Leituras de Volume e Tempo de Operação

4.2.1 Calibração do sistema de medição de volume

O sistema de medição de volume desenvolvido no protótipo baseia-se na utilização de um hidrômetro multijato DN25, certificado pelo INMETRO e equipado com um sensor de pulsos do tipo *Reed Switch*, conforme descrito anteriormente na seção “3.3 - Principais Componentes Utilizados no Projeto”. De acordo com a especificação do fabricante, a relação nominal informada para o sensor de pulsos era de 1 pulso correspondente a 1 litro de água.

Entretanto, durante os ensaios experimentais realizados em bancada, observou-se uma divergência entre a especificação nominal e o comportamento real do sistema. A partir da comparação direta entre o volume indicado no mostrador

analógico do próprio hidrômetro e o volume contabilizado pelo sistema digital, verificou-se que, na prática, a relação observada foi de aproximadamente 2 pulsos para cada litro de água escoado. Essa constatação evidenciou a necessidade de calibração do sistema, mesmo tratando-se de um equipamento certificado, reforçando a importância da validação experimental em aplicações práticas.

Diante desse comportamento, o fator de calibração foi ajustado diretamente no *firmware* do microcontrolador, de modo que a conversão entre pulsos contabilizados e volume resultante mantivesse coerência com a leitura analógica do hidrômetro. Após o ajuste, as leituras apresentadas pelo sistema proposto passaram a coincidir com os valores indicados no mostrador do equipamento, garantindo a coerência entre os dois métodos de medição.

4.2.2 Avaliação da precisão da medição de volume

Após a definição do fator de calibração adequado, foram realizados ensaios específicos para avaliar a precisão do sistema de medição de volume. Os ensaios descritos a seguir foram realizados especificamente para a avaliação da precisão do sistema de medição desenvolvido, complementando os testes funcionais apresentados na etapa de desenvolvimento do protótipo. Como método de referência, utilizou-se um recipiente graduado com capacidade de 10 litros, contendo divisões a cada 1 litro, o que permitiu uma leitura direta e visual do volume transferido durante os testes.

Foram executados dez ensaios independentes, nos quais o volume medido pelo sistema foi comparado ao volume indicado no recipiente graduado. Os resultados obtidos indicaram que o erro de medição apresentou comportamento alternado, ora positivo, ora negativo, não sendo observado um erro sistemático predominante. Em todos os ensaios realizados, o erro percentual absoluto manteve-se em 5%, conforme consta na Tabela 2, sendo este valor considerado compatível com a natureza do sensor empregado e com o escopo experimental do projeto. Adicionalmente, a análise estatística das medições resultou em um desvio padrão amostral de aproximadamente 0,41, indicando baixa dispersão entre os valores observados e boa repetibilidade do sistema.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de avaliação da precisão da medição de volume.

Ensaio	Volume de referência (L)	Volume medido pelo sistema (L)	Erro absoluto (L)	Erro percentual (%)
1	10,0	9,5	-0,5	-5,0
2	10,0	10,0	0,0	0,0
3	10,0	10,5	+0,5	+5,0
4	10,0	9,5	-0,5	-5,0
5	10,0	10,0	0,0	0,0
6	10,0	10,5	+0,5	+5,0
7	10,0	10,0	0,0	0,0
8	10,0	9,5	-0,5	-5,0
9	10,0	10,5	+0,5	+5,0
10	10,0	10,0	0,0	0,0

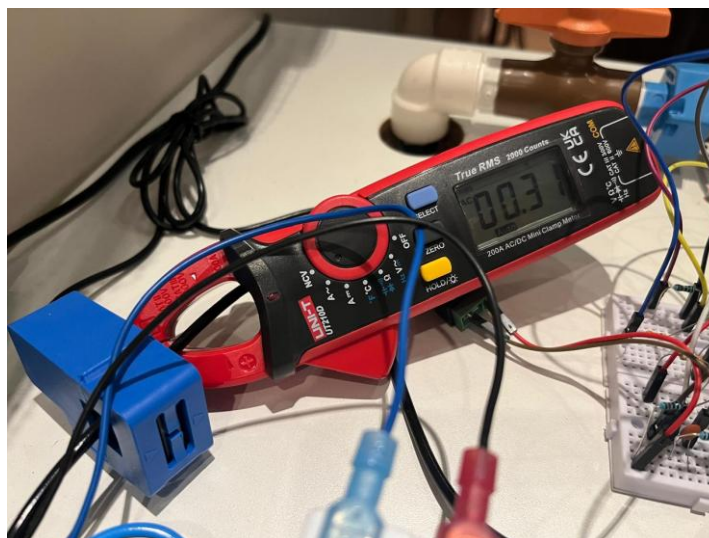
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Esses resultados demonstram que, após a calibração, o sistema apresentou desempenho satisfatório na medição de volume, sendo capaz de fornecer leituras coerentes e próximas ao valor de referência, dentro de uma margem de erro aceitável para aplicações de monitoramento e registro de consumo hídrico.

4.2.3 Calibração e desempenho do sensor de corrente

O sensor de corrente utilizado no protótipo foi o modelo SCT-013-005, conforme especificado anteriormente. A calibração desse sensor foi realizada inicialmente por meio da medição de corrente com um multímetro amperímetro (FIGURA 19), permitindo a obtenção de um valor de referência para o ajuste do fator de calibração no *firmware*.

Figura 19 - Calibração do sensor SCT-013.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após a calibração inicial, foi realizado o ajuste fino do limiar de corrente responsável pela identificação do estado ligado ou desligado da bomba. Esse procedimento foi fundamental para garantir a estabilidade da detecção, especialmente considerando a baixa potência e, conseqüentemente, a baixa corrente elétrica associada à bomba utilizada nos testes.

Durante todo o período experimental, não foram observados falsos acionamentos ou falsos desligamentos do sistema, indicando que os parâmetros de calibração e o limiar de corrente adotados foram adequadamente definidos. Esses resultados demonstram que o sensor de corrente apresentou desempenho satisfatório para a finalidade proposta, atuando de forma confiável na detecção do estado operacional da bomba.

4.2.4 Medição do tempo de operação

A medição do tempo de operação da bomba foi realizada com base na detecção de corrente elétrica acima de um valor limiar previamente definido, utilizando o sensor de corrente instalado no circuito. Esse método permitiu contabilizar de forma automática os períodos efetivos de funcionamento da bomba, independentemente do acionamento manual realizado durante os testes.

Para avaliação da exatidão do horímetro implementado no sistema, foram adotados dois métodos de referência: um horímetro eletromecânico instalado no

circuito e um cronômetro digital, utilizado por meio de um dispositivo móvel (celular). O ensaio de maior duração teve aproximadamente 600 minutos de operação contínua, permitindo observar o comportamento acumulativo das medições ao longo do tempo.

Os resultados indicaram que o horímetro do sistema apresentou um desvio acumulado significativo quando comparado ao horímetro eletromecânico, correspondendo a cerca de 3% de diferença ao final do maior período avaliado. Esse atraso mostrou-se perceptível e relevante, especialmente em ensaios de longa duração. Em contrapartida, quando comparado ao cronômetro digital, o sistema apresentou excelente concordância, com erro acumulado inferior a 0,02%, representando apenas alguns segundos após o mesmo intervalo de 600 minutos. Os resultados comparativos dos ensaios de medição do tempo de operação, bem como os erros percentuais observados em relação aos métodos de referência, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados comparativos dos ensaios de medição do tempo de operação.

Ensaio	Duração nominal (min)	Tempo – Horímetro eletromecânico (min)	Tempo – Cronômetro digital (min)	Tempo – Sistema automatizado (min)	Erro sist. x horímetro (%) ²	Erro sist. x cronômetro (%)
1	30	29,7	30,00	30,00	+1,01	+0,000
2	60	59,2	60,00	60,00	+1,35	+0,000
3	120	117,9	120,00	120,01	+1,79	+0,008
4	180	176,3	180,00	180,02	+2,11	+0,011
5	240	234,7	240,00	240,03	+2,27	+0,013
6	300	292,7	300,00	300,04	+2,51	+0,013
7	360	350,9	360,00	360,05	+2,61	+0,014
8	450	437,7	450,00	450,06	+2,82	+0,013
9	540	524,9	540,00	540,07	+2,89	+0,013
10	600	583,0	600,00	600,08	+2,93	+0,013

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Essas observações evidenciam diferenças relevantes entre os princípios de funcionamento dos métodos de referência adotados, uma vez que o horímetro eletromecânico baseia-se em mecanismos mecânicos de acionamento contínuo,

$$^2 \text{ Erro}(\%) = \frac{T_{\text{sistema}} - T_{\text{referência}}}{T_{\text{referência}}} \times 100, \text{ com } T \text{ em minutos}$$

sujeitos a inércia e desgaste, enquanto o cronômetro digital e o sistema proposto realizam a contabilização do tempo de forma eletrônica e discreta, a partir da detecção precisa dos instantes de acionamento e desligamento da bomba, o que justifica a maior concordância entre estes últimos.

4.2.5 Avaliação da Vazão da Bomba

Diferentemente das análises anteriores, que se concentraram na exatidão das leituras de volume e tempo de operação, esta etapa tem como objetivo avaliar a coerência da vazão obtida por diferentes métodos, relacionando os valores medidos experimentalmente, os valores calculados pelo sistema automatizado e a vazão estimada a partir das especificações do fabricante da bomba utilizada no projeto.

De acordo com o *datasheet* da bomba submersível empregada, apresentado parcialmente no tópico 3.3.4, a relação entre vazão e altura de elevação indica que, para uma altura aproximada de 85 cm — condição adotada nos ensaios em bancada — a vazão esperada situa-se em torno de 500 L/h, o que corresponde aproximadamente a 8,33 L/min, conforme a marcação na curva característica de vazão em função da altura de elevação (FIGURA 10). Esse valor constitui uma estimativa teórica, sujeita a variações decorrentes das condições reais de operação, como perdas hidráulicas, eficiência do conjunto motobomba e características da instalação.

A vazão experimental de referência foi obtida por meio de um método direto, baseado na medição do tempo médio necessário para encher um recipiente graduado de 10 L, com divisões a cada 1 L, mantida a mesma altura de elevação utilizada nos demais testes. Foram realizadas dez medições consecutivas, utilizando um cronômetro digital e sem a passagem da água pelo hidrômetro, de modo a evitar a introdução de perdas adicionais no sistema. Os resultados obtidos a partir das dez medições realizadas pelo método de referência, bem como as vazões individuais e o valor médio calculado, estão apresentados na Tabela 4. A partir dessas medições, obteve-se uma vazão média de 8,52 L/min, valor que se mostrou consistente entre os ensaios realizados e compatível com a estimativa fornecida pelo fabricante para a condição de operação adotada. A análise estatística das vazões calculadas resultou em um desvio padrão amostral de aproximadamente 0,06 L/min, o que indica baixa variabilidade entre as medições e estabilidade no processo de estimativa da vazão.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios experimentais de vazão da bomba pelo método de referência.

Ensaio	Volume coletado (L)	Tempo medido (s)	Vazão calculada (L/min)
1	10,0	70,1	8,56
2	10,0	71,0	8,45
3	10,0	70,4	8,52
4	10,0	69,8	8,60
5	10,0	70,9	8,46
6	10,0	71,2	8,43
7	10,0	70,3	8,53
8	10,0	69,9	8,59
9	10,0	71,1	8,44
10	10,0	70,6	8,50
Média	10,0	70,53	8,52

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A vazão foi calculada a partir da razão entre o volume coletado e o tempo medido, conforme a equação a seguir:

$$Q = \frac{V}{t} \times 60$$

Onde:

- Q é a vazão, em litros por minuto (L/min);
- V é o volume coletado, em litros (L);
- t é o tempo de enchimento do recipiente, em segundos (s).

Paralelamente, a vazão calculada pelo sistema automatizado foi obtida a partir da razão entre o volume acumulado medido pelo hidrômetro e o tempo total de operação da bomba, considerando os registros armazenados pelo sistema. Para essa análise, foi utilizado o consolidado do mês de outubro de 2025, que totalizou mais de 8.000 minutos de operação registrados pelo sistema, conforme apresentado no Anexo D. A vazão média calculada pelo sistema nesse período foi de 8,24 L/min, refletindo o comportamento médio da bomba ao longo de um intervalo de tempo significativamente maior que o adotado nos ensaios pontuais de referência.

A comparação entre os diferentes métodos evidencia boa coerência entre os valores obtidos. Em relação à vazão estimada pelo fabricante (8,33 L/min), a vazão

medida experimentalmente apresentou diferença percentual da ordem de +2,3%, enquanto a vazão calculada pelo sistema automatizado apresentou diferença de aproximadamente -1,1%. Essas variações são consideradas compatíveis com as incertezas inerentes aos métodos de medição empregados e às condições reais de operação, especialmente quando se considera a influência de fatores como variações instantâneas da vazão, perdas hidráulicas no sistema, exatidão do método de referência e o fato de a vazão do sistema automatizado representar um valor médio obtido a partir de um grande conjunto de dados ao longo do tempo.

De forma geral, os resultados obtidos indicam que a vazão calculada pelo sistema automatizado apresenta comportamento coerente tanto com as medições experimentais diretas quanto com as especificações fornecidas pelo fabricante da bomba. Essa coerência reforça a consistência do método de cálculo adotado pelo sistema, complementando as análises de precisão das medições de volume e tempo de operação apresentadas nos subtópicos anteriores e consolidando a confiabilidade do protótipo no monitoramento das grandezas hidrométricas avaliadas.

4.2.6 *Análise dos erros observados*

Os principais erros observados durante os ensaios estiveram relacionados, principalmente, a situações de desligamento abrupto do sistema. Nessas condições, verificou-se a ocorrência de pulsos não contabilizados durante o período de reinicialização e sincronização do microcontrolador, bem como a perda de alguns dados após a recuperação das informações previamente salvas na memória interna.

Adicionalmente, foi identificado um erro significativo na comparação entre o horímetro do sistema e o horímetro eletromecânico, conforme discutido anteriormente. Esses desvios, embora relevantes do ponto de vista quantitativo, apresentaram caráter pontual e foram prontamente identificados durante a análise dos resultados.

De forma geral, os erros observados não comprometeram a confiabilidade global do sistema e mostraram-se compatíveis com o escopo do protótipo proposto. As limitações identificadas são inerentes às escolhas metodológicas adotadas e fornecem subsídios importantes para a discussão das possibilidades de aprimoramento e expansão do sistema, a ser apresentada no tópico subsequente.

4.3 Capacidade do Sistema em Gerar Documentação Técnica

A capacidade do sistema desenvolvido em gerar documentação técnica de forma automatizada constitui um dos principais resultados observados durante os ensaios realizados em bancada. A partir da integração entre o microcontrolador, o armazenamento em nuvem e os *scripts* de processamento de dados, foi possível estruturar um conjunto de registros e relatórios que organizam as informações operacionais de maneira padronizada, contínua e rastreável. Embora a solução proposta não possua caráter regulatório direto, os dados gerados atendem parcialmente às exigências normativas associadas ao monitoramento do uso de recursos hídricos, especialmente no que se refere ao registro de volume captado e tempo de operação, informações estas alinhadas aos dados descritos na Seção V do Capítulo II da Portaria IGAM nº 48/2019. Nesse contexto, a documentação técnica gerada pelo sistema configura-se como uma base técnica capaz de subsidiar processos de gestão e, em especial, a renovação da outorga de uso de poços tubulares.

Os dados coletados pelo sistema são armazenados automaticamente em formato estruturado, contendo informações como data e hora do registro, estado operacional da bomba, volume acumulado, tempo de operação, corrente elétrica e observações associadas a eventos específicos. Essa organização permite manter um histórico coerente das operações ao longo do tempo, favorecendo a rastreabilidade das informações e a identificação de padrões de uso. Além disso, a padronização adotada reduz a necessidade de intervenções manuais no tratamento dos dados, contribuindo para a confiabilidade das informações registradas. Um exemplo representativo dessa estrutura de armazenamento encontra-se apresentado no Anexo B, evidenciando a consistência dos registros obtidos durante o período de testes.

A partir dessa base de dados, o sistema é capaz de gerar automaticamente relatórios operacionais consolidados, como os resumos diário e mensal. Esses relatórios organizam os dados em diferentes escalas temporais, agregando informações de volume consumido, tempo de operação e vazão média, além de apresentarem gráficos que auxiliam na visualização do comportamento do sistema ao longo do tempo. O processo de geração desses relatórios ocorre de forma automatizada, a partir de parâmetros definidos pelo usuário, eliminando etapas

manuais de consolidação e reduzindo a possibilidade de erros de processamento. Sob a perspectiva do processo administrativo, essa consolidação automática contribui para a organização histórica dos dados de captação, facilitando sua análise e eventual apresentação em relatórios técnicos. Exemplos dos relatórios de resumo diário e mensal encontram-se apresentados, respectivamente, nos Anexos C e D.

Outro aspecto relevante da documentação técnica gerada refere-se ao registro e tratamento de ocorrências operacionais. O sistema foi projetado para identificar e registrar automaticamente eventos como falhas de comunicação, ausência de dados, falhas de sensores, registros duplicados ou inconsistências temporais, armazenando essas informações em um relatório específico. Esse mecanismo atua simultaneamente como ferramenta de diagnóstico interno do sistema e como elemento de transparência e auditabilidade, permitindo identificar eventuais limitações ou anomalias durante a operação. No contexto da renovação da outorga, a existência desse histórico de ocorrências contribui para o atendimento da normativa bem como para uma análise mais criteriosa dos dados apresentados, ao evidenciar períodos de falha, interrupção ou limitação do monitoramento, aspecto relevante em avaliações técnicas mais detalhadas. Um exemplo desse relatório é apresentado no Anexo E.

De forma complementar, o sistema também incorpora um módulo experimental de monitoramento de energia elétrica, baseado na medição da corrente consumida pela bomba e na estimativa de consumo ao longo do tempo. Embora esse recurso não constitua o foco principal do trabalho e não esteja diretamente associado às exigências normativas relativas à outorga, sua inclusão amplia o conjunto de informações disponíveis para análise técnica, permitindo correlacionar o estado operacional da bomba com seu comportamento elétrico. Esse tipo de informação pode auxiliar na compreensão do funcionamento do sistema como um todo, sendo tratado neste trabalho como funcionalidade complementar e exploratória. Um exemplo das saídas geradas por esse módulo encontra-se apresentado no Anexo F.

De maneira geral, os resultados obtidos demonstram que o sistema desenvolvido apresenta capacidade consistente de gerar documentação técnica automatizada, organizada e rastreável, adequada ao acompanhamento operacional e à consolidação de informações historicamente associadas aos processos de gestão e renovação da outorga de uso de poços tubulares. Apesar de seu caráter experimental e das limitações observadas durante os ensaios em bancada, a solução proposta

evidencia potencial como ferramenta de apoio técnico, contribuindo para a organização, confiabilidade e disponibilidade dos dados. As limitações identificadas, bem como as possibilidades de aprimoramento e expansão do sistema visando ampliar sua aplicabilidade e robustez em cenários mais complexos, são discutidas no tópico seguinte.

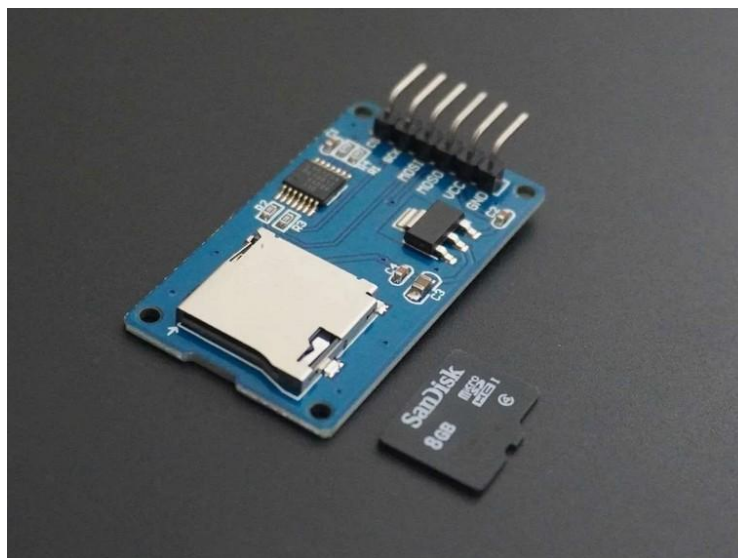
4.4 Limitações e Possibilidades de Expansão

Os ensaios realizados em bancada permitiram identificar limitações inerentes ao protótipo desenvolvido, bem como apontar possibilidades de expansão capazes de ampliar sua aplicabilidade em cenários reais de monitoramento de poços artesianos. Tais limitações estão diretamente associadas às escolhas de projeto adotadas, compatíveis com o escopo experimental do trabalho, e não comprometem os resultados obtidos, mas indicam caminhos consistentes para evoluções futuras do sistema.

Uma das principais limitações observadas refere-se à dependência de conectividade via rede *Wi-Fi* para o envio contínuo dos dados. Em aplicações reais, poços artesianos frequentemente estão localizados em áreas remotas, onde a disponibilidade desse tipo de infraestrutura é limitada ou inexistente. Nesse contexto, a integração de um módulo de comunicação celular, como GPRS ou 4G/5G, utilizando *chip* do tipo M2M, configura-se como uma expansão relevante do sistema e alinhada às melhores práticas atuais. Essa solução permitiria comunicação contínua e independente de redes locais, tornando o sistema mais adequado para operação em campo, além de representar uma evolução natural do projeto em relação ao modelo atualmente desenvolvido.

Outra limitação identificada diz respeito à capacidade de armazenamento local dos dados, atualmente restrita à memória interna do microcontrolador, que é limitada. Embora o mecanismo de persistência implementado tenha se mostrado funcional, a integração de memória externa ou cartão SD, de modelo similar ao apresentado na Figura 20, poderia atuar como mecanismo complementar de armazenamento, permitindo a gravação contínua de todos os registros gerados. Essa expansão contribuiria para minimizar perdas de dados em situações de desligamento abrupto ou falhas prolongadas de comunicação, aumentando a robustez e a confiabilidade do sistema de monitoramento.

Figura 20 - Módulo de expansão para cartão SD.



Fonte: www.electronicwings.com

A dependência de alimentação elétrica contínua também representa um fator limitante em cenários reais de aplicação. A integração de uma bateria externa, operando como fonte de energia auxiliar, permitiria manter o funcionamento do sistema durante interrupções no fornecimento elétrico, assegurando a continuidade das medições e reduzindo a probabilidade de perda de dados relevantes. Nesse contexto, a bateria seria utilizada como *backup* energético, reforçando a resiliência do sistema sem alterar sua arquitetura principal.

No que se refere à rastreabilidade e à contextualização espacial das informações, a integração de um módulo GPS surge como uma possibilidade de expansão significativa. A obtenção automática da localização geográfica do dispositivo permitiria associar os registros gerados a um ponto físico específico, facilitando a identificação do poço monitorado e contribuindo para a organização documental. Essa funcionalidade apresenta alinhamento conceitual com informações usualmente requeridas para atendimento aos requisitos legais, especialmente no que diz respeito à identificação e caracterização da intervenção em recursos hídricos.

Adicionalmente, a integração de sensores de nível de água compatíveis com a aplicação de um poço tubular profundo representa uma expansão futura relevante do sistema. A medição automatizada do nível estático e dinâmico do poço permitiria ampliar o conjunto de informações monitoradas, oferecendo subsídios adicionais para análises técnicas relacionadas à disponibilidade hídrica e ao

comportamento do aquífero. Embora não tenha sido contemplada no escopo deste trabalho, essa funcionalidade se apresenta como um complemento natural ao monitoramento de volume e tempo de operação, com potencial para auxiliar no atendimento das exigências normativas.

Como melhoria adicional voltada à confiabilidade temporal dos registros, destaca-se a possibilidade de integração de um módulo de relógio de tempo real (RTC) externo, conforme exemplo da Figura 21. A adoção desse recurso permitiria manter a referência temporal do sistema de forma independente da conectividade com a rede, reduzindo a dependência exclusiva da sincronização via NTP e aumentando a robustez dos registros em cenários de operação prolongada ou com conectividade intermitente. Essa melhoria contribuiria diretamente para a consistência histórica dos dados armazenados, aspecto relevante em análises técnicas e documentais.

Figura 21 - Módulo RTC externo DS3231.



Fonte: www.blog.eletrogate.com

De forma geral, as limitações identificadas e as possibilidades de expansão discutidas neste tópico reforçam o caráter experimental do sistema desenvolvido, ao mesmo tempo em que evidenciam seu potencial de evolução para aplicações mais robustas e aderentes a cenários reais. As propostas apresentadas apontam caminhos viáveis para aprimoramentos futuros, mantendo coerência com os objetivos do trabalho e com as demandas associadas ao monitoramento de poços artesianos, servindo como base para estudos posteriores e para o aprofundamento da solução proposta, conforme será sintetizado no capítulo de conclusão.

5 CONCLUSÃO

5.1 Alcance dos Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um protótipo de sistema IoT para monitoramento em tempo real do volume de água captado e do tempo de operação de poços artesianos, em ambiente simulado, com capacidade de gerar documentação técnica compatível com as exigências da norma vigente. A partir dos resultados obtidos em bancada, verificou-se que o sistema proposto operou de forma estável e coerente com o escopo definido, sendo capaz de realizar a aquisição automática dos dados, processá-los adequadamente e armazená-los de forma organizada em ambiente de nuvem.

No que se refere aos objetivos específicos, a arquitetura de *hardware* e *software* baseada no microcontrolador ESP32 foi implementada com êxito, integrando sensores de pulsos e corrente, algoritmos de cálculo de volume, vazão e tempo de operação, além da comunicação via protocolo HTTP com a plataforma *Google Sheets*. Os testes realizados indicaram que as medições apresentaram rigor compatível com a proposta experimental do trabalho, validando o funcionamento do protótipo como ferramenta de monitoramento automatizado em ambiente controlado.

5.2 Contribuições para o Processo de Outorga

Embora o sistema desenvolvido não possua caráter regulatório direto, os resultados demonstram que a solução proposta contribui de forma conceitual e técnica para o processo de renovação da outorga de uso de poços artesianos. A documentação técnica gerada automaticamente pelo sistema contempla registros contínuos de volume captado e tempo de operação, informações alinhadas às exigências descritas na Seção V do Capítulo II da Portaria IGAM nº 48/2019, especialmente no que se refere à organização, rastreabilidade e histórico dos dados hidrométricos.

Nesse contexto, o protótipo atua como um instrumento auxiliar de apoio à gestão e ao acompanhamento do uso dos recursos hídricos, reduzindo a dependência de registros manuais e aumentando a confiabilidade das informações geradas. A automatização do processo de coleta e consolidação dos dados favorece a

transparência, a consistência temporal dos registros e a organização documental, aspectos relevantes para análises técnicas associadas à outorga.

5.3 Recomendações para Trabalhos Futuros

Considerando o caráter experimental do protótipo e as limitações inerentes ao ambiente de simulação e ao microcontrolador utilizado, recomenda-se que trabalhos futuros explorem a expansão do sistema para aplicações em campo, com a incorporação de módulos de comunicação celular, mecanismos adicionais de armazenamento local, fontes alternativas de energia e sensores complementares. Essas evoluções exigem novos estudos, ensaios e validações, especialmente em ambientes reais de poços artesianos, de modo a ampliar a robustez da solução e aprofundar a sua aderência às exigências normativas e operacionais associadas à gestão dos recursos hídricos. Adicionalmente, destaca-se o potencial futuro de integração do sistema desenvolvido com plataformas institucionais de gestão, bem como a adaptação ou geração automática de relatórios em formatos compatíveis com o padrão solicitado pelo sistema MIRA, o que poderia ampliar a aplicabilidade prática da solução como ferramenta de apoio técnico aos processos de acompanhamento e renovação da outorga.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Caderno de Capacitação: Instrumentos de Gestão da Política de Recursos Hídricos**. Brasília: ANA, 2019.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Diretrizes para Elaboração do Projeto de Instalação de Estações Hidrológicas**. Brasília: ANA, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 212: Medidores de Água Potável – Requisitos e Ensaios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The Internet of Things: A survey**. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2019. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010. Acesso em: 23 de outubro de 2025.
- BORELLA, D. R.; PAULISTA, R. S. D.; ALVES, M. A. B.; MARTIM, C. C.; SILVA, C. J.; DE ALMEIDA, F. T.; DE SOUZA, A. P. **Flow Measurement Methods in Small Tributaries of the Teles Pires River, Southern of the Amazon Hydrological Region**. *Water*, v. 15, n. 21, art. 3811, 2023.
- BOYLESTAD, R.; NASHIELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. 11. ed. Pearson, 2013.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.
- CABRAL, A. T.; LOUREIRO, C. O. **Modelamento hidrogeológico do aquífero aluvionário de Amaro Lanari – Vale do Aço – MG**. *Revista Águas Subterrâneas*, 2002.
- CARVALHO, J. D.; MELO, M. C.; GALVÃO, P. G. **Pressão sobre aquíferos e uso da água subterrânea no semiárido mineiro da bacia do rio São Francisco**. *Ambiente & Sociedade*, v. 27, 2024.
- CHAGAS, V. **Hydrological extremes in Brazil: large-scale patterns, mechanisms, and change**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.
- DE OLIVEIRA, D. Y. et al. **The Treatment of Uncertainty in Hydrometric Observations: A Probabilistic Description of Streamflow Records**. *Water Resources Research*, 2022.
- DEUS, F. O. **Usos dos recursos hídricos subterrâneos na Circunscrição Hidrográfica de Furnas: estudo de casos entre 2001 e 2020**. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 34, e63520, 2022.
- Encyclopédie Environnement. **Hydrometry: measuring the flow rate of a river, why and how?** 8 mar. 2025. Disponível em: <https://www.encyclopedie-environnement.org/en/water/hydrometry-measuring-flow-river-why-how-2/>. Acesso em: 23 de outubro de 2025.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series Datasheet**. Shanghai: Espressif Systems, 2024. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 23 de outubro de 2025.

FUENTES, H. et al. **Smart water consumption measurement system for houses: technological solution for real-time consumption measurement and leak detection**. Environmental Monitoring and Assessment, v. 192, p. 768, 2020. DOI: 10.1007/s10661-020-08535-4.

GOOGLE DEVELOPERS. **Apps Script Overview**. 2024. Disponível em: <https://developers.google.com/apps-script>. Acesso em: 25 jan. 2025.

GOOGLE WORKSPACE. **Google Sheets – Product Description**. 2024. Disponível em: <https://workspace.google.com/products/sheets/>. Acesso em: 25 jan. 2025.

GUBBI, J. et al. **Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions**. Future Generation Computer Systems, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.

HIVEMQ. **MQTT Vs. HTTP for IoT**. 2024. Disponível em: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-vs-http-protocols-in-iiot/> . Acesso em: 23 de outubro de 2025.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **The Art of Electronics**. 3. ed. Cambridge University Press, 2015.

IBM Corporation. **What is the Internet of Things (IoT)?** Disponível em: <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things> . Acesso em: 23 de outubro de 2025.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Manual Técnico e Administrativo de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM, 2010.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Portaria IGAM nº 48, de 04 de outubro de 2019**. Sinaliza normas suplementares para a regularização dos recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Disponível em: SIAM - Sistema Integrado de Informação Ambiental. Acesso em: 06 de março de 2025.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Portaria nº 12, de 2023**. Institui o Sistema MIRA.

MINAS GERAIS. **Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Diário do Executivo, Belo Horizonte, MG, 30 jan. 1999.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

RAMOS, M. L. S.; MARTINS, J. C. **Abordagem preliminar do uso da água subterrânea em Minas Gerais através do instrumento de outorga**. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002. Belo Horizonte.

RENOVA MEDIÇÃO. **Catálogo Técnico – Hidrômetro Multijato Equipado para Telemetria**. Bocaiúva, 2024.

SAGA MEDIÇÃO. **Catálogo Técnico – Sensor Reed Switch V4**. Bocaiúva, 2024.

TELIT CINTERION. **HTTP vs MQTT: Comparison for IoT**. 2023. Disponível em: <https://www.telit.com/blog/http-vs-mqtt/> . Acesso em: 23 de outubro de 2025.

United States Geological Survey (USGS). **Concepts, approaches, and methods for determining water use**. Chapter 11. U.S. 1997. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/chapter11/chapter11B.html> . Acesso em: 23 de outubro de 2025.

VARELA-ALDÁS, J.; SILVA, S.; PALACIOS-NAVARRO, G. **IoT-Based Alternating Current Electrical Parameters Monitoring System**. *Energies*, v. 15, n. 18, p. 6637, 2022. DOI: 10.3390/en15186637.

YHDC – YUEQING HUALONG ELECTRIC CO. **Datasheet Sensor Corrente SCT-013**. Yueqing: YHDC, 2023.

ZUKERAM, E. S. J. et al. **In Situ IoT Development and Application for Continuous Water Monitoring in a Lentic Ecosystem in South Brazil**. *Water*, v. 15, n. 13, art. 2310, 2023.

APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DO *FIRMWARE* DO ESP32

A Figura 1-A apresenta o QR Code de acesso ao *link* do repositório para *download* do *firmware* do ESP32, desenvolvido na plataforma Arduino IDE.

Figura 1-A - QR Code para o repositório do *firmware* do ESP32



Disponível em:

<https://1drv.ms/f/c/b7f0a822df22b301/IgBh73AQIG90T6ebXDo2eHFUAQiJAdpmjUKRQoafVAWy1jl?e=m7RZkh>

APÊNDICE B – CÓDIGO DO *GOOGLE APPS SCRIPT*

A Figura 2-A apresenta o QR Code de acesso ao *link* do repositório para *download* do *script* desenvolvido na plataforma *Google Apps Script*.

Figura 2-A - QR Code para o repositório do código do *Google Apps Script*



Disponível em:

<https://1drv.ms/f/c/b7f0a822df22b301/lgDW6VUEi6NBRIX2Em0xakrmAbU8QZ6CZ9cmpPO5LzVHHdw?e=LBB1uT>

ANEXO A – TELA DO MENU PRINCIPAL DA PLANILHA

MENU PRINCIPAL

🔧

Configurações Iniciais

Hidrômetro Inicial (m³):	13,562	Potência Nominal (W):	20,0
Horímetro Inicial (h):	18,54	Tensão Nominal (V):	127,0
Vazão Nominal (L/min):	8,20	Corrente Nominal (A):	0,26

📊

Relatórios

Unidade dos Resumos:	L/min
📅 Data Resumo Diário / Energia:	23/10/2025
📅 Mês Resumo Mensal:	Outubro
📅 Ano Resumo Mensal / Dados:	2025
📅 Data Inicial (Rel. Ocorrências):	16/10/2025
📅 Data Final (Rel. Ocorrências):	23/10/2025

Gerar Resumo Diário

Gerar Resumo Mensal

Gerar Relatório de Ocorrências

⚙️

Dados do Sistema

MAC Address:	A0:B7:65:15:75:1C
SSID:	IO5 H4CK3R
IP:	192.168.18.181
Data/Hora Última Gravação:	23/10/2025 21:12:05
Total Litros Últ. Grav. (L):	182218,0
Tempo Ligado Últ. Grav. (min):	22284,0

📺

Painel

23/10/2025 22:22:02

Hidrômetro (m³):	195,780
Horímetro (h):	389,94
Estado:	DESLIGADO
Corrente (A):	0,00
Vazão Instantânea (L/min):	0,00

Ver Dados

Monitoramento Energia

📌

Dados da Instalação / Outorga

Outorgado(s):	PROTOTIPO 1
CPF/CNPJ:	123.456.789-10
Município/UF:	Contagem / MG
Latitude:	16°43'00"S
Longitude:	43°50'41"W
Nº Processo:	63893/2022
Data:	12/02/2022
Validade:	5 anos
Serial Hidrômetro:	A24R407711

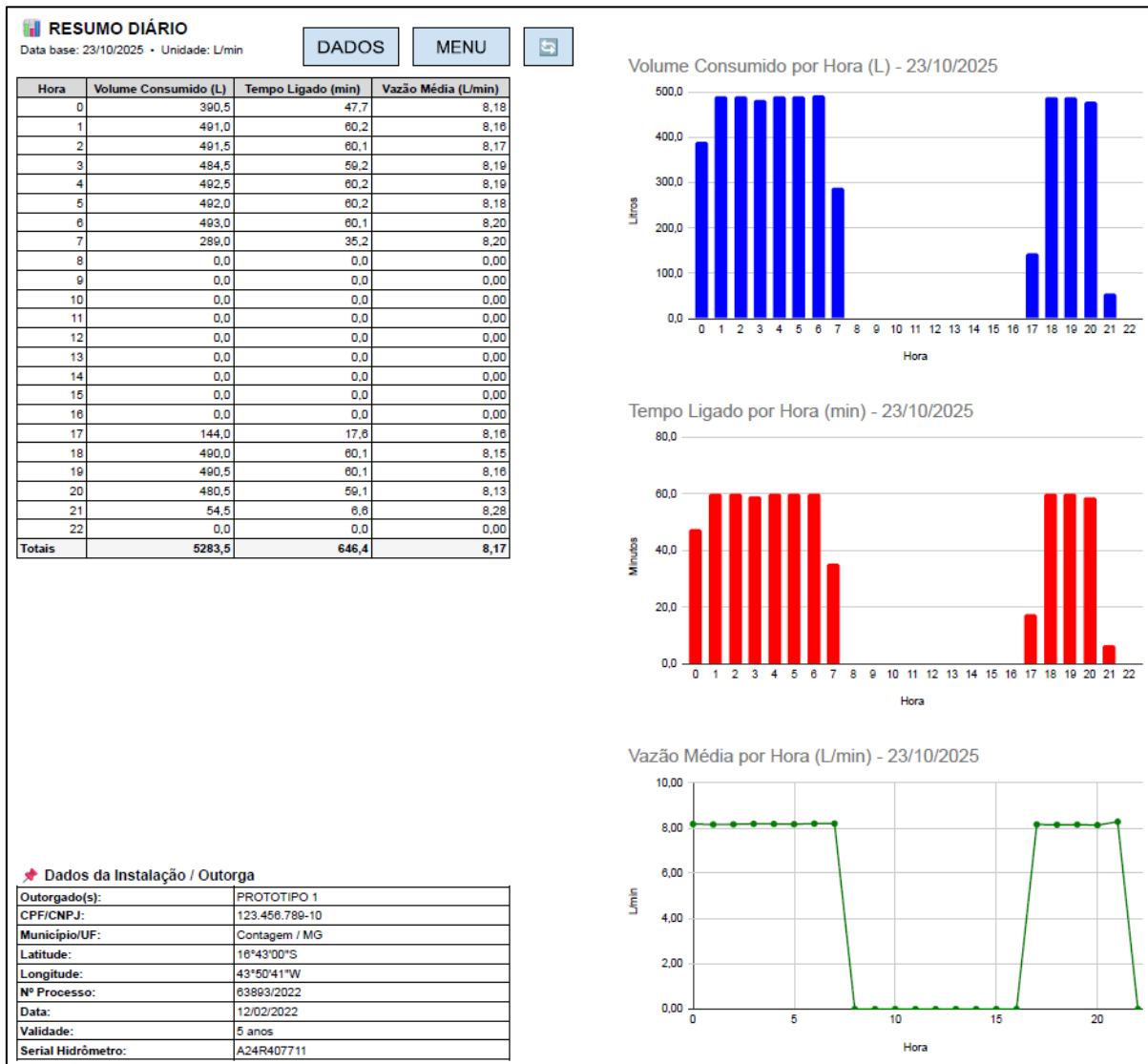
23/10/2025 22:26:59

ANEXO B – EXEMPLOS DE REGISTROS ARMAZENADOS

Data/Hora	Corrente (A)	Estado	Tempo Ligado (min)	Total Litros (L)	Vazão Inst. (L/min)	Volume Total (m³)	Horimetro (h)	Observação	MENU
2025-10-20 22:25:38	0,28	LIGADO	20485,3	167499,0	8,50	181,061	359,96		
2025-10-20 22:26:38	0,30	LIGADO	20486,3	167507,0	8,00	181,069	359,98		
2025-10-20 22:27:38	0,30	LIGADO	20487,3	167515,5	8,50	181,078	359,99		
2025-10-20 22:28:38	0,29	LIGADO	20488,3	167523,5	7,92	181,086	360,01		
2025-10-20 22:29:38	0,30	LIGADO	20489,3	167532,0	8,59	181,094	360,03		
2025-10-20 22:30:38	0,29	LIGADO	20490,3	167540,0	7,92	181,102	360,04		
2025-10-20 22:31:38	0,28	LIGADO	20491,3	167548,5	8,50	181,111	360,06		
2025-10-20 22:32:38	0,29	LIGADO	20492,3	167556,5	8,00	181,119	360,08		
2025-10-20 22:33:38	0,28	LIGADO	20493,3	167564,5	8,00	181,127	360,09		
2025-10-20 22:34:38	0,28	LIGADO	20494,3	167573,0	8,50	181,135	360,11		
2025-10-20 22:35:38	0,28	LIGADO	20495,3	167581,0	8,00	181,143	360,13		
2025-10-20 22:36:38	0,29	LIGADO	20496,3	167589,5	8,50	181,152	360,14		
2025-10-20 22:37:38	0,29	LIGADO	20497,3	167597,5	8,00	181,160	360,16		
2025-10-20 22:38:38	0,28	LIGADO	20498,3	167606,0	8,50	181,168	360,18		
2025-10-20 22:39:38	0,29	LIGADO	20499,3	167614,0	8,00	181,176	360,19		
2025-10-20 22:40:38	0,28	LIGADO	20500,3	167622,5	8,50	181,185	360,21		
2025-10-20 22:41:38	0,27	LIGADO	20501,3	167630,5	8,00	181,193	360,23		
2025-10-20 22:42:39	0,26	LIGADO	20502,3	167639,0	8,42	181,201	360,24		
2025-10-20 22:43:40	0,04	DESLIGADO	20503,2	167646,0	7,78	181,208	360,26	ERRO: DEFEITO BOMBA	
2025-10-20 22:44:40	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 22:45:39	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 22:46:40	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 22:47:40	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 22:48:40	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 22:49:40	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 22:50:40	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 22:51:41	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 22:52:41	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 23:02:41	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 23:12:42	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 23:22:41	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 23:32:41	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 23:42:41	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-20 23:52:42	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-21 00:02:41	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		
2025-10-21 00:12:42	0,00	DESLIGADO	20503,2	167646,0	0,00	181,208	360,26		

Data/Hora	Corrente (A)	Estado	Tempo Ligado (min)	Total Litros (L)	Vazão Inst. (L/min)	Volume Total (m³)	Horimetro (h)	Observação	MENU
2025-10-21 09:32:04	0,30	LIGADO	20641,5	168776,5	8,50	182,339	362,57		
2025-10-21 09:33:04	0,30	LIGADO	20642,5	168784,5	8,00	182,347	362,58		
2025-10-21 09:34:04	0,30	LIGADO	20643,5	168792,5	8,00	182,355	362,60		
2025-10-21 09:35:04	0,30	LIGADO	20644,5	168801,0	8,50	182,363	362,62		
2025-10-21 09:36:04	0,29	LIGADO	20645,5	168809,0	8,00	182,371	362,63		
2025-10-21 09:37:04	0,29	LIGADO	20646,5	168817,5	8,50	182,380	362,65		
2025-10-21 09:38:04	0,29	LIGADO	20647,5	168825,5	7,92	182,388	362,67		
2025-10-21 09:39:04	0,30	LIGADO	20648,5	168833,5	8,00	182,396	362,68		
2025-10-21 09:40:04	0,29	LIGADO	20649,5	168842,0	8,50	182,404	362,70		
2025-10-21 09:42:05	0,30	LIGADO	20651,5	168858,5	8,25	182,421	362,73		
2025-10-21 09:41:05	0,30	LIGADO	20650,5	168850,0	0,00	182,412	362,72	ERRO: ATRASO DE LEITURA	
2025-10-21 09:43:05	0,29	LIGADO	20652,5	168866,5	8,25	182,429	362,75		
2025-10-21 09:44:05	0,29	LIGADO	20653,5	168874,5	8,00	182,437	362,77		
2025-10-21 09:45:05	0,30	LIGADO	20654,5	168883,0	8,42	182,445	362,78		
2025-10-21 09:46:06	0,30	LIGADO	20655,5	168891,0	7,92	182,453	362,80		
2025-10-21 09:47:05	0,30	LIGADO	20656,5	168899,5	8,50	182,462	362,82		
2025-10-21 09:48:05	0,30	LIGADO	20657,5	168907,5	8,00	182,470	362,83		
2025-10-21 09:49:05	0,30	LIGADO	20658,5	168916,0	8,50	182,478	362,85		
2025-10-21 09:50:05	0,29	LIGADO	20659,5	168924,0	8,00	182,486	362,87		
2025-10-21 09:51:05	0,29	LIGADO	20660,5	168932,0	8,00	182,494	362,88		
2025-10-21 09:52:05	0,30	LIGADO	20661,5	168940,5	8,50	182,503	362,90		
2025-10-21 09:53:06	0,29	LIGADO	20662,5	168948,5	8,00	182,511	362,92		
2025-10-21 09:54:06	0,30	LIGADO	20663,5	168957,0	8,50	182,519	362,93		
2025-10-21 09:55:06	0,29	LIGADO	20664,5	168965,0	8,00	182,527	362,95		
2025-10-21 09:56:06	0,29	LIGADO	20665,5	168973,0	8,00	182,535	362,97		
2025-10-21 09:57:06	0,29	LIGADO	20666,6	168981,5	8,42	182,544	362,98		
2025-10-21 09:58:06	0,29	LIGADO	20667,6	168989,5	8,00	182,552	363,00		
2025-10-21 09:59:06	0,28	LIGADO	20668,6	168998,0	8,50	182,560	363,02		
2025-10-21 10:00:06	0,29	LIGADO	20669,6	169006,0	8,00	182,568	363,03		
2025-10-21 10:01:06	0,28	LIGADO	20670,6	169014,0	8,00	182,576	363,05		
2025-10-21 10:02:06	0,29	LIGADO	20671,6	169022,5	8,50	182,585	363,07		
2025-10-21 10:03:06	0,29	LIGADO	20672,6	169030,5	8,00	182,593	363,08		
2025-10-21 10:04:06	0,29	LIGADO	20673,6	169039,0	8,50	182,601	363,10		
2025-10-21 10:05:06	0,30	LIGADO	20674,6	169047,0	8,00	182,609	363,12		
2025-10-21 10:06:06	0,29	LIGADO	20675,6	169055,0	8,00	182,617	363,13		
2025-10-21 10:07:06	0,29	LIGADO	20676,6	169063,5	8,50	182,626	363,15		

ANEXO C – RELATÓRIO DE RESUMO DIÁRIO



ANEXO D – RELATÓRIO DE RESUMO MENSAL

RESUMO MENSAL
Período: 10/2025 • Unidade: L/min

DADOS
MENU
\$

Dia	Volume Consumido (L)	Tempo Ligado (min)	Vazão Média (L/min)
1	0,0	0,0	0,00
2	5256,0	640,7	8,20
3	3553,0	429,8	8,27
4	0,0	0,0	0,00
5	3147,0	383,4	8,21
6	4616,0	555,6	8,31
7	5623,5	703,2	8,28
8	3037,0	365,0	8,32
9	5714,0	694,7	8,22
10	3871,0	471,4	8,21
11	1907,5	232,5	8,20
12	520,0	63,1	8,24
13	5038,5	608,6	8,28
14	977,5	119,5	8,18
15	3487,5	418,6	8,28
16	169,5	20,5	8,25
17	2696,0	325,4	8,29
18	0,0	0,0	0,00
19	0,0	0,0	0,00
20	3657,0	446,5	8,19
21	5628,0	687,1	8,19
22	3660,5	447,3	8,18
23	5283,5	646,4	8,17
Totais	68023,0	8259,4	8,24

★ **Dados da Instalação / Outorga**



Outorgado(s):	PROTOTIPO 1
CPF/CNPJ:	123.456.789-10
Município/UF:	Contagem / MG
Latitude:	16°43'00"S
Longitude:	43°50'41"W
Nº Processo:	63893/2022
Data:	12/02/2022
Validade:	5 anos
Serial Hidrômetro:	A24R407711

Volume Consumido por Dia (L) - Outubro/2025

Tempo Ligado por Dia (min) - Outubro/2025

Vazão Média por Dia (L/min) - Outubro/2025

ANEXO E – RELATÓRIO DE OCORRÊNCIAS

 RELATÓRIO DE OCORRÊNCIAS				
Período: 16/10/2025 a 23/10/2025		DADOS	MENU	
Data	Hora	Ocorrência		
20/10/2025	05:36:17	SISTEMA OFFLINE		
20/10/2025	06:36:19	SISTEMA OFFLINE		
20/10/2025	07:36:22	SISTEMA OFFLINE		
20/10/2025	09:59:32	ERRO: ATRASO DE LEITURA		
20/10/2025	22:43:40	ERRO: DEFEITO BOMBA		
21/10/2025	09:41:05	ERRO: ATRASO DE LEITURA		
22/10/2025	19:24:57	ERRO: SENSOR CORRENTE		
23/10/2025	18:45:47	ERRO: SOBRECARGA		

ANEXO F – MONITORAMENTO DE ENERGIA

