



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Alex Bruno Duarte

Aproveitamento sustentável da água de ar-condicionado através de controle com ESP

PAU DOS FERROS

2025

Alex Bruno Duarte

Aproveitamento sustentável de água de ar-condicionado através de controle com ESP

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Pedro Thiago Valério de Souza, Prof. Dr.

Co-orientador: Walber José Adriano Silva, Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D812a Duarte, Alex Bruno.
Aproveitamento sustentável de água de ar-
condicionado através de controle com ESP / Alex
Bruno Duarte. - 2025.
39 f. : il.

Orientador: Pedro Thiago Valério de Souza.
Coorientador: Walber José Adriano Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Água condensada. 2. Reaproveitamento. 3.
ESP8266. 4. IoT. 5. ThingsBoard. I. Souza, Pedro
Thiago Valério de, orient. II. Silva, Walber José
Adriano , co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Alex Bruno Duarte

Aproveitamento sustentável da água de ar-condicionado através de controle com ESP

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 04 / 08 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Pedro Thiago Valério de Souza, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Alex Pinheiro Feitosa, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Reudismam Rolim de Souza, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, aos meus pais, Antonio Regiane Duarte e Maria Valdiza Duarte, e aos meus irmãos, Aline Maria Duarte e Victor Hugo Duarte, por todo apoio incondicional, paciência e incentivo em todos os momentos.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Thiago Valério de Souza, pelo conhecimento compartilhado, pela orientação dedicada, pelos conselhos fundamentais para a realização deste projeto e pela paciência.

Agradeço à banca examinadora, pelo interesse e disponibilidade.

Agradeço aos meus colegas e amigos, pela troca de experiências, incentivo e companheirismo durante todo o curso e em minha trajetória de vida.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

“A lesson without pain is meaningless. That's because you can't gain something without sacrificing something else. But by enduring that pain and overcoming it, he shall obtain a powerful, unmatched heart. A fullmetal heart.”

Edward Elric (Fullmetal Alchemist: Brotherhood)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de automação de baixo custo para o aproveitamento sustentável da água condensada de aparelhos de ar-condicionado. O sistema utiliza o microcontrolador ESP8266, programado na plataforma Arduino IDE, integrando sensores de nível e atuadores para o controle automático do fluxo de água. Os dados do sistema são monitorados remotamente por meio da plataforma ThingsBoard, permitindo visualização em tempo real e análise do consumo e aproveitamento da água, através de uma interface homem-máquina (IHM). A simulação e os testes práticos realizados com a maquete demonstraram que o sistema é capaz de acionar automaticamente bomba e válvulas com base nos níveis dos reservatórios, alternando de forma confiável entre o uso da água reaproveitada e da água potável, conforme a disponibilidade.

Palavras-chave: água condensada; reaproveitamento; ESP8266; IoT; ThingsBoard.

ABSTRACT

This work presents the development of a low-cost automation prototype for the sustainable reuse of condensate water from air conditioning units. The system uses the ESP8266 microcontroller, programmed through the Arduino IDE platform, integrating level sensors and actuators for automatic water flow control. System data is monitored remotely via the ThingsBoard platform, enabling real-time visualization and analysis of water consumption and reuse through a human-machine interface (HMI). The simulations and practical tests carried out with the prototype demonstrated that the system is capable of automatically activating the pump and valves based on the water levels in the reservoirs, reliably alternating between the use of reclaimed water and potable water depending on availability.

Keywords: condensate water; reuse; ESP8266; IoT; ThingsBoard.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Diagrama do sistema	20
Figura 2	–	Máquina de Estados Finita	21
Figura 3	–	Placa ESP8266 NodeMcu ESP-12	22
Figura 4	–	Sensor de nível	23
Figura 5	–	Esquema de uma válvula de 2/2 vias de operação direta	24
Figura 6	–	Válvula Solenoide 12v DC 180° 1/2 polegada	25
Figura 7	–	Mini Bomba D'agua 12 Volts 600-800 Litros/h Coluna 4m-5m 19w	25
Figura 8	–	Módulo Relé 04 Canais 5V 10A com Led Indicador	26
Figura 9	–	Fonte Chaveada Bivolt 12V 10A	26
Figura 10	–	Última telemetria no ThingsBoard	27
Figura 11	–	Sinal de controle automático do motor m	32
Figura 12	–	Sinais de controle automático das válvulas v_0 e v_I	33
Figura 13	–	Maquete do sistema	34
Figura 14	–	Unidade de controle	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Conexão Wi-Fi	28
Quadro 2	– Lógica do acionamento dos atuadores	29
Quadro 3	– Envio dos dados para a plataforma ThingsBoard	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Tabela verdade do motor de bombeamento	21
Tabela 2	–	Especificações da placa ESP8266 (ESP-12 / NodeMCU)	23
Tabela 3	–	Especificações do sensor de nível	24
Tabela 4	–	Mapeamento de Entradas e Saídas no ESP8266 (NodeMCU)	35
Tabela 5	–	Estimativa de custos	37
Tabela 6	–	Possíveis erros	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AC</i>	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<i>API</i>	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicações)
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
<i>Clk</i>	<i>Clock</i> (Relógio)
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
<i>FSM</i>	<i>Finite State Machine</i> (Máquina de Estados Finitos)
<i>GPIO</i>	<i>General-Purpose Input/Output</i> (Entrada/Saída de Uso Geral)
IHM	Interface Homem-Máquina
<i>IoT</i>	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
pH	Potencial Hidrogênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO TEÓRICA	18
2.1 Água condensada	18
2.2 Internet das coisas	19
3 SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ÁGUAS	20
3.1 Modelo do sistema	20
3.2 Materiais e métodos.....	22
3.2.1 Microcontrolador ESP8266	22
3.2.2 Sensor de nível	23
3.2.3 Válvulas solenoides	24
3.2.4 Bomba d'água.....	25
3.2.5 Módulo relé	25
3.2.6 Fonte de alimentação	26
3.3 Interface homem-máquina	27
3.4 Código-fonte.....	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 Resultados de simulação	31
4.1.1 Simulação para o controle da bomba M	32
4.1.2 Simulação para o controle das válvulas V_0 e V_1	33
4.2 Elaboração da maquete.....	34
4.3 Testes práticos na maquete.....	36

4.4 Aspectos gerais.....	36
4.5 Análise de custo.....	37
4.6 Possíveis falhas no sistema	38
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para a sobrevivência de todas as formas de vida na Terra. Apesar de o planeta ser majoritariamente composto por água, apenas uma pequena fração é doce e diretamente acessível para consumo humano. Conforme dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), cerca de 97,5% dessa água é salgada, restando aproximadamente 2,5% de água doce, grande parte dela presa em geleiras e calotas polares. Considerando apenas as reservas subterrâneas, rios e lagos, menos de 1% da água total está realmente disponível para uso humano, tornando esse recurso ainda mais escasso diante do crescimento populacional, urbanização acelerada e aumento da demanda hídrica.

Freitas (2021) afirma que o Brasil, apesar de deter cerca de 12% de toda a água doce do planeta, enfrenta desafios significativos. Estudos baseados em imagens de satélite, feitos pela equipe MapBiomas (2021), revelam que, desde 1991, o país perdeu aproximadamente 15,7% de sua superfície hídrica, uma redução de cerca de 3,1 milhões de hectares, devido a fatores como mudanças no uso da terra, construção de barragens, poluição, consumo excessivo e alterações climáticas. Diante do agravamento dos períodos de seca, evidenciado em 2024 com o registro de oito dos dez anos mais secos desde 1985, além da perda adicional de 2% da superfície hídrica em apenas um ano, torna-se cada vez mais urgente a busca por fontes alternativas de abastecimento de água (Freitas, 2021).

O cenário se torna ainda mais crítico na região do Semiárido nordestino, historicamente marcada por longos períodos de estiagem. A seca entre 2012 e 2015 é considerada a mais prolongada registrada na série histórica do Nordeste, afetando desde o centro-sul da Bahia até o Ceará e deixando milhões de moradores sem acesso mínimo à água (Marengo et al., 2016). Durante esse período, perdas agrícolas foram drásticas, abastecimento urbano pós-falha intermitente de açudes e milhares de decretos de calamidade pública foram emitidos (Marengo et al., 2016).

Neste cenário, a captação e o reaproveitamento de água de chuva e de outras fontes alternativas se destacam como estratégias eficientes para diminuir a demanda sobre os sistemas de água potável. Entre essas fontes, merece destaque a água condensada gerada por aparelhos de ar-condicionado, um recurso até então negligenciado pelos sistemas de gestão hídrica. Lima, Maia e Silva (2019), mostram que, em regiões tropicais, estas unidades podem gerar volumes consideráveis de condensado, variando entre 8 e 25 litros por aparelho ao dia, suficientes para usos não potáveis como irrigação, descarga de sanitários, lavagem de pisos e automóveis.

A análise físico-química da água condensada confirma sua viabilidade para múltiplas aplicações. Essa água normalmente apresenta Potencial Hidrogênio (pH) neutro, baixa turbidez e baixos níveis de sólidos dissolvidos, metais e cloretos, o que a coloca em condições adequadas para utilização não potável (Fadigas, 2024). Além disso, em grandes instalações, como edifícios residenciais, comerciais e universidades, a integração desses sistemas demonstrou potencial de economia na ordem de milhões de litros ao ano. Segundo Adams (2017), a Rice University, localizada em Houston, Estados Unidos da América, implementou um sistema de reaproveitamento da água condensada em seus sistemas de ar-condicionado como parte de sua estratégia de sustentabilidade hídrica, essa iniciativa recupera cerca de 45 a 53 milhões de litros por ano.

Ao longo da história, várias civilizações construíram sistemas de captação e reaproveitamento de água, principalmente, de chuva. No entanto, apenas com os recentes avanços da Internet das coisas (*IoT*) e dos microcontroladores de baixo custo, como o ESP8266 NodeMcu ESP-12, tornou-se possível construir sistemas automatizados altamente eficientes. Esses sistemas permitem a integração de sensores para monitorar níveis de água, atuadores para bombas e válvulas, além da aplicação de regras inteligentes que promovem o uso racional do recurso hídrico.

Com base nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de reaproveitamento da água condensada de aparelhos de ar-condicionado, utilizando como base o microcontrolador ESP8266 e sua conectividade Wi-Fi. O sistema visa capturar, armazenar e distribuir essa água de forma automatizada, por meio de sensores e atuadores, garantindo eficiência no uso e reduzindo significativamente o consumo de água potável em atividades cotidianas.

O projeto será desenvolvido por meio da plataforma Arduino IDE, que facilita a programação e configuração do ESP8266, e os dados coletados serão enviados e monitorados remotamente pela plataforma de ThingsBoard, uma plataforma de código aberto voltada para *IoT*, que permite a visualização em tempo real e análise inteligente do consumo e aproveitamento da água através de uma Interface Homem-Máquina (IHM). A relevância desta abordagem se apoia em problemas hídricos reais, potencial de economia de recursos a nível residencial e institucional, além da viabilidade técnica proporcionada pela *IoT*, pelo ESP8266 e pela integração com ferramentas modernas de monitoramento remoto.

1.1 Justificativa

Diante do cenário de escassez hídrica global e nacional, torna-se fundamental adotar medidas que reduzam o consumo de água potável e promovam o reaproveitamento de fontes alternativas. O uso de água condensada proveniente de aparelhos de ar-condicionado representa uma oportunidade concreta e viável de otimizar recursos hídricos em ambientes urbanos, contribuindo para a preservação do meio ambiente e redução de custos. A adoção de tecnologias baseadas em *IoT* e microcontroladores como o ESP8266 permite automatizar esse processo de forma eficiente e acessível.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema automatizado para captação, armazenamento e distribuição de água condensada de aparelhos de ar-condicionado, utilizando o microcontrolador ESP8266 e tecnologias de *IoT*, visando reduzir o consumo de água potável em usos não potáveis.

1.2.2 Objetivos específicos

- Projetar e construir um sistema de hardware composto por sensores de nível, bombas, válvulas e o microcontrolador ESP8266 para controle e automação do processo.
- Implementar a programação do sistema por meio da plataforma Arduino IDE, integrando sensores e atuadores de forma eficiente.
- Desenvolver uma interface de monitoramento remoto utilizando a plataforma ThingsBoard para coleta e visualização dos dados do sistema em tempo real.
- Verificar o potencial de redução do consumo de água potável obtido pela implementação do sistema em ambientes de teste.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Água condensada

A água condensada é originada pela condensação do vapor de água presente no ar, quando este entra em contato com superfícies resfriadas, como as serpentinas dos aparelhos de ar-condicionado. Esse processo ocorre à medida que o ar úmido resfria abaixo do ponto de orvalho, coagulando em gotas que são coletadas em bandejas e normalmente descartadas (Fadigas, 2024).

Esse tipo de água, classificado pela Norma Brasileira 16.783/2019 como “água clara”, não passa por tratamento convencional, o que a diferencia da água potável, fornecida por sistemas municipais e certificados para consumo humano. Entretanto, mesmo sem tratá-la para potabilidade, estudos brasileiros indicam boas características físico-químicas da água condensada: pH neutro ($\sim 7,3$), baixa turbidez, condutividade elétrica entre 26–27 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e Sólidos Dissolvidos Totais da ordem de 17 mg/L (Fadigas, 2024). Tais parâmetros demonstram sua adequação para usos não potáveis, como irrigação, lavagem de pisos, descarga sanitária e limpeza veicular.

Projetos implementados em instituições públicas e privadas no Brasil reforçam essa viabilidade. Um estudo da Universidade Federal da Paraíba, realizado entre 2018 e 2020 com 38 aparelhos de diversos portes, registrou vazões entre 0,20 e 6,81 L/h, dependendo da potência do aparelho e condições ambientais (Vieira, 2020). Na Universidade de Pernambuco Recife, a análise de água de um hospital indicou potencial para gerar até 640 m³ de condensado, capaz de atender 92,6% da demanda predial não potável (Silva 2021).

Já no Instituto Federal de São Paulo, no município de Votuporanga (SP), estudos integraram água de chuva e condensada num sistema de irrigação inteligente, demonstrando boa performance automatizada. No Instituto Federal de Pernambuco, no município de Garanhuns (PE), a água condensada foi empregada em hortas após análise físico-química e microbiológica, atendendo aos parâmetros estabelecidos pela Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, especialmente para fins não potáveis (Lima, 2019).

Com base nesses dados, a água condensada se configura como uma fonte hídrica alternativa viável, economicamente interessante e tecnologicamente compatível. Sua utilização em sistemas automatizados promove a redução da carga sobre os sistemas convencionais de água potável, a diminuição de custos operacionais e impactos no ciclo urbano da água e a utilização eficiente de um recurso até então desprezado. Entretanto, para

garantir adequação às aplicações, é necessária a adoção de um sistema que contemple a captura eficaz da água condensada, o armazenamento adequado para evitar contaminação, o controle automatizado e o acompanhamento via sensores e plataforma de *IoT*.

Esses conceitos constituem a base teórica para o desenvolvimento do sistema proposto nesta pesquisa, que visa o uso inteligente da água condensada, alinhando sustentabilidade hídrica, inovação e aplicação prática.

2.2 Internet das coisas

A Internet das Coisas (*IoT*, do inglês *Internet of Things*) refere-se à interconexão de dispositivos físicos à Internet, possibilitando a coleta, transmissão e processamento de dados em tempo real para automação inteligente. No contexto hídrico, a *IoT* tem se destacado ao permitir monitoramento e controle de variáveis como nível, vazão, pressão e qualidade da água, além de viabilizar o acionamento automático de bombas e válvulas, contribuindo para a eficiência dos sistemas de reutilização e distribuição (Leal Júnior, 2020).

Microcontroladores de baixo custo, como o ESP8266, com suporte a Wi-Fi integrado, se conectam facilmente a sensores e, programados via Arduino IDE, são capazes de enviar dados para plataformas em nuvem, como o ThingsBoard, que oferecem dashboards personalizados e armazenamento de séries temporais (Autocore, 2020). A plataforma ThingsBoard, tem se consolidado como uma solução de código aberto robusta, utilizada em diversos estudos acadêmicos e aplicações práticas, pois ela permite hospedar-se localmente e oferece suporte a dashboards e lógica de controle em nuvem (Silva, 2021).

Aplicações brasileiras e internacionais mostram que protótipos *IoT* para monitoramento hídrico são cada vez mais comuns. Em ambientes acadêmicos, como a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, pesquisadores implementaram estações meteorológicas automatizadas com sensores e ESP8266 para gestão da irrigação (Azevedo, 2021), comprovando que a arquitetura *IoT* é eficiente para monitoramento e controle de recursos hídricos.

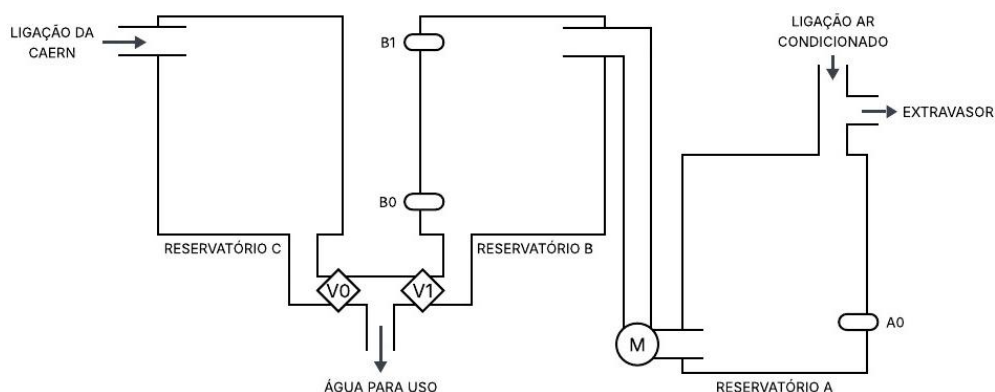
Com base nesses preceitos, o sistema proposto neste trabalho utiliza o ESP8266, programado na Arduino IDE, para coletar dados de sensor de nível e acionar bomba conforme regras definidas. Os dados são enviados ao ThingsBoard, onde são visualizados, analisados e podem gerar alertas ou tomarem decisões automáticas. Essa configuração alinha-se às tendências atuais de automação sustentável, concentrando-se em eficiência, baixo custo e aplicabilidade real.

3 SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ÁGUAS

3.1 Modelo do sistema

O sistema desenvolvido é composto por três reservatórios principais: o reservatório A, que armazena a água condensada proveniente dos aparelhos de ar-condicionado; o reservatório B, que atua como caixa superior de distribuição para usos não potáveis; e o reservatório C, correspondente ao abastecimento da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), utilizado como fonte secundária quando o nível da água reaproveitada é insuficiente. A Figura 1 mostra o diagrama do sistema.

Figura 1 – Diagrama do sistema



Fonte: Autoria própria (2025)

A água condensada é conduzida para o reservatório A, também chamado de caixa receptora. Quando o nível da água atinge o ponto adequado, identificado pelo sensor A_0 , o motor (M) é acionado para bombear a água para o reservatório B. Este, por sua vez, distribui a água para aplicações como irrigação, limpeza de ambientes e descargas sanitárias.

O reservatório B conta com dois sensores de nível: B_0 (nível baixo) e B_1 (nível alto). A lógica de controle entre os reservatórios e os atuadores é baseada no estado sensores A_0 , B_0 e B_1 . Caso o reservatório B esteja completamente vazio ($B_0 = 0$ e $B_1 = 0$), a válvula da CAERN (V_0) é aberta para permitir o uso da água potável. Quando o nível superior ($B_1 = 1$) é atingido, a válvula V_0 é fechada e a válvula do ar-condicionado (V_1) é acionada para utilizar prioritariamente a água reaproveitada. Quando $B_0 = 0$ (nível insuficiente), o sistema desliga V_1 e reabre V_0 para que o reservatório C volte a ser utilizado.

A lógica de controle embarcada no ESP8266 considera as seguintes entradas: sensor da caixa receptora (A_0), sensor de nível alto do reservatório B (B_1) e sensor de nível baixo do

reservatório B (B_0). As saídas são: Motor de bombeamento (M), Válvula do Reservatório B (V_1) e Válvula do Reservatório C (V_0). A Tabela 1 resume o funcionamento do motor, que depende apenas das entradas A_0 e B_1 .

Tabela 1 – Tabela verdade do motor de bombeamento

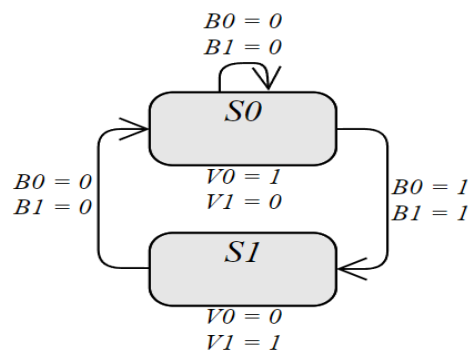
A_0	B_1	M
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

Fonte: Autoria própria (2025)

O ESP8266, também controla as válvulas V_0 e V_1 , porém, o controle depende exclusivamente dos sensores de nível B_0 e B_1 do reservatório B. Por se tratar de um processo com dependência de estados anteriores, sua lógica foi implementada por meio de uma Máquina de Estado Finita (*FSM*, do inglês *Finite State Machine*), seu diagrama é representado na Figura 2, composta pelos seguintes estados:

- S_0 : Reservatório B vazio, inicia com uso da água da CAERN ($V_0 = 1$, $V_1 = 0$);
- S_1 : Reservatório B cheio, passa a utilizar a água reaproveitada ($V_0 = 0$, $V_1 = 1$);

Figura 2 – Máquina de Estados Finita



Fonte: Autoria própria (2025)

A lógica de controle garante que o sistema priorize o uso da água condensada, utilizando a água da CAERN apenas quando necessário, promovendo assim um uso eficiente e racional dos recursos hídricos. Todas as transições são monitoradas e registradas pela plataforma ThingsBoard, permitindo análise em tempo real e tomada de decisão automática ou manual, conforme necessidade.

3.2 Materiais e métodos

Nas subseções a seguir, são detalhados os materiais e métodos que foram utilizados para implementar o modelo do sistema apresentado na seção anterior.

3.2.1 Microcontrolador ESP8266

Neste trabalho, o microcontrolador ESP8266 NodeMcu ESP-12 foi utilizado como unidade de controle do sistema. A Figura 3 mostra o microcontrolador citado.

Figura 3 – Placa ESP8266 NodeMcu ESP-12



Fonte: Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/modulo-wifi-esp8266-nodemcu-esp-12/>

O ambiente de desenvolvimento utilizado para a programação do ESP8266 foi a Arduino IDE, uma plataforma de código aberto amplamente adotada no desenvolvimento de sistemas embarcados. Sua interface simples e a vasta comunidade de suporte tornam o processo de desenvolvimento mais acessível, mesmo para iniciantes.

A escolha do ESP8266 neste trabalho se deu por diversos fatores. Primeiramente, trata-se de um microcontrolador de baixo custo e com alta disponibilidade no mercado brasileiro, o que o torna uma opção viável para projetos acadêmicos e protótipos de baixo orçamento. Além disso, o ESP8266 possui conectividade Wi-Fi nativa, permitindo a comunicação direta com servidores remotos. Essa funcionalidade foi essencial para a integração com a plataforma ThingsBoard, utilizada neste projeto para a visualização e o monitoramento dos dados do sistema.

Outro fator relevante é a sua capacidade de controle direto de dispositivos através dos *GPIOs* (Entrada/Saída de Uso Geral, do inglês *General-Purpose Input/Output*), possibilitando a integração com sensores de nível, válvulas solenoides e motor. Por fim, destaca-se a compatibilidade do ESP8266 com a Arduino IDE, viabilizada pela adição do gerenciador de placas específico. Isso facilita a codificação, o envio do programa para o microcontrolador

(*upload*) e o acompanhamento do funcionamento do sistema por meio do monitor serial da própria IDE. As especificações do microcontrolador ESP8266 são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações da placa ESP8266 (ESP-12 / NodeMCU)

Especificação	Valor	Aplicação no Projeto
<i>GPIOs</i> disponíveis	17 pinos de E/S	Conexão de sensores e relé
Memória	~4 MiB Flahs	Armazena o firmware do sistema
Conectividade Wi-Fi	Integrado (b/g/n)	Envio de dados e monitoramento remoto
Tensão de Operação	3,0 V a 3,6 V	Alimentado por fonte de 3,3 V
Conversor ADC	1 canal, 10 bits	Leitura de sensor de nível d'água
Economia de energia	Deep sleep, watchdog	Redução de consumo entre leituras

Fonte: Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/modulo-wifi-esp8266-nodemcu-esp-12/>

3.2.2 Sensor de nível

O sensor de nível utilizado no sistema é do tipo *float switch* lateral, instalado por meio de uma rosca na parede do reservatório. Seu funcionamento baseia-se na presença de uma boia com ímã interno, que se movimenta de acordo com a variação do nível do líquido. Esse movimento faz com que o flutuador gire em torno de um eixo articulado, alterando a posição do ímã em relação ao corpo do sensor.

Quando o nível da água atinge o ponto de comutação, a proximidade magnética aciona um *reed switch* interno, que pode abrir (Normalmente Fechado – NF) ou fechar (Normalmente aberto – Na) o circuito. A montagem do sensor de nível no projeto foi feita levando em consideração o modo NA. A saída do sensor é digital do tipo contato seco, ou seja, não necessita de alimentação externa e é compatível com sinais lógicos de microcontroladores, como o ESP8266. Essa característica o torna adequado para circuitos configurados com resistores de *pull-up* ou *pull-down*, garantindo simplicidade na integração com o sistema (SMS-Tork, 2024). A Figura 4 apresenta o sensor de nível utilizado no projeto.

Figura 4 – Sensor de nível



Fonte: Oliveira (2019)

As principais especificações técnicas do sensor de nível utilizado no sistema estão organizadas na Tabela 3, a fim de facilitar a visualização dos parâmetros relevantes para sua aplicação no projeto.

Tabela 3 – Especificações do sensor de nível

Especificação	Valor
Montagem do corpo	PP ou PA12
Temperatura de operação	-25 °C a +105 °C
Pressão máxima	~100 psi
Grau de proteção	IP68/NEMA-6 submersível
Corrente de comutação	até 1 A em 200 VDC ou 250 VAC

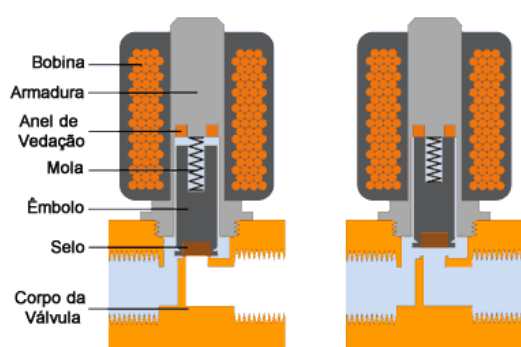
Fonte: Disponível em: <https://smstork.com/en/tms-float-switches-side-mount-level-switch>

3.2.3 Válvulas solenoides

Para o controle do fluxo de fluido no sistema automatizado proposto, foi adotada uma válvula solenoide de 2/2 vias com operação direta, alimentada em 12 V. Esse tipo de válvula é composta por dois estados (aberta e fechada) e duas vias (entrada e saída).

A Figura 5 apresenta o funcionamento esquemático da válvula. No estado desenergizado (à esquerda), a mola empurra o êmbolo para baixo, mantendo o selo pressionado contra o orifício de saída, impedindo a passagem do fluido. Ao energizar a bobina com tensão de 12 V (à direita), cria-se um campo magnético que atrai a armadura e desloca o êmbolo para cima, vencendo a força da mola. Esse movimento desobstrui a passagem, permitindo o fluxo do fluido entre as duas vias (Citissystems, 2017).

Figura 5 – Esquema de uma válvula de 2/2 vias de operação direta



Fonte: Disponível em: <https://www.citissystems.com.br/valvula-solenoide/>

A escolha da válvula solenoide de 12 V foi motivada por fatores como a compatibilidade com sistemas embarcados, simplicidade de controle, baixo custo e confiabilidade mecânica. A Figura 6 representa a Válvula solenoide utilizada no projeto.

Figura 6 – Válvula Solenoide 12v DC 180° 1/2 polegada



Fonte: Disponível em: <https://www.casadarobotica.com/sensores-modulos/modulos/outros/valvula-solenoide-12v-dc-180-12-polegada>

3.2.4 Bomba d'água

Para garantir o deslocamento de água no sistema desenvolvido, foi utilizada uma bomba d'água centrífuga de corrente contínua, alimentada com tensão de 12 V, potência de 19 W e capacidade de até 800 L/h. A Figura 7 mostra o modelo da bomba empregada no projeto. Essa bomba opera por meio de um rotor interno que, ao girar, cria uma força centrífuga capaz de impulsionar o fluido para fora da carcaça através da tubulação de saída. Ao ser energizado, o motor interno aciona o rotor, promovendo a circulação contínua da água. Quando desligada, o fluxo é interrompido imediatamente (Cobasi, 2021).

Figura 7 – Mini Bomba D'agua 12 Volts 600-800 Litros/h Coluna 4m-5m 19w



Fonte: Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/mini-bomba-dagua-12-volts-600800-litros-h-coluna-4m5m-19w/up/MLBU2928400403>

3.2.5 Módulo relé

Para o acionamento de dispositivos de maior potência, foi utilizado um módulo relé de 4 canais, como apresentado na Figura 8. Este módulo permite o controle de cargas *Alternating*

Current (Corrente Alternada, *AC*) ou *Direct Current* (Corrente Contínua, *DC*) por meio de sinais de baixa potência. De acordo com o site de vendas WJ Componentes (2025), cada relé suporta até 10 A a 250 V *AC* ou 10 A a 30 V *DC* e funciona em nível lógico baixo (*LOW*) e não em nível lógico alto (*HIGH*). Cada canal conta com um acoplador óptico, que isola eletricamente a carga do sistema de controle, protegendo o ESP surtos de tensão.

Figura 8 – Módulo relé 04 canais 5v 10a com led indicador



Fonte: Disponível em: <https://www.wjcomponentes.com.br/rele-4>

3.2.6 Fonte de alimentação

Para alimentar os componentes do sistema com segurança e estabilidade, foi utilizada uma fonte chaveada de 12 V, conforme ilustrado na Figura 9. A fonte é conectada diretamente à rede elétrica (110 V ou 220 V *AC*) por meio dos terminais identificados como L (fase), N (neutro) e $\perp$ (terra). Na saída, a fonte disponibiliza tensão contínua de 12 V *DC* nos terminais V+ e V-, os quais são utilizados para alimentar dispositivos como o módulo relé, as válvulas solenoides e a bomba d'água.

Esta fonte é capaz de fornecer uma corrente suficiente para o funcionamento simultâneo dos atuadores do sistema, com proteções contra sobrecarga, curto-circuito e superaquecimento, características importantes para garantir segurança e confiabilidade no funcionamento do projeto.

Figura 9 – Chaveada Bivolt 12V 10A



Fonte: Disponível em: <https://www.vlxledexcellence.com.br/product-page/12v-10a>

3.3 Interface homem-máquina

A interface homem-máquina (IHM) deste projeto foi implementada utilizando a plataforma ThingsBoard, que atua como painel interativo para monitoramento e controle do sistema de reaproveitamento da água condensada de aparelhos de ar-condicionado. Essa abordagem substitui a tradicional utilização de displays físicos e botões, conforme utilizado em projetos semelhantes (como o de Oliveira, 2019), por uma solução conectada em nuvem, disponível remotamente de qualquer dispositivo com acesso à internet.

A IHM desenvolvida na plataforma ThingsBoard permite ao usuário visualizar, em tempo real, os *status* dos sensores instalados nos reservatórios e o funcionamento dos atuadores. A Figura 10 ilustra a “Última telemetria”, ou seja, os valores lidos em tempo real no ThingsBoard. A cada segundo, o ESP8266 realiza leituras dos sensores físicos e envia os dados via protocolo HTTP para o servidor da plataforma, conforme será detalhado no código-fonte do sistema apresentado no Tópico 3.4.

Figura 10 – Última telemetria no ThingsBoard

☐ Horário da última atualização	Chave ↑	Valor
☐ 2025-06-19 09:44:24	motor	0
☐ 2025-06-19 09:44:24	sensor_arcond_alto	0
☐ 2025-06-19 09:44:24	sensor_arcond_baixo	0
☐ 2025-06-19 09:44:24	sensor_receptora	0
☐ 2025-06-19 09:44:24	valvula_arcond	0
☐ 2025-06-19 09:44:24	valvula_caern	1

Fonte: Autoria própria (2025)

O modo de operação padrão é o automático, no qual o sistema executa todas as decisões com base na lógica embarcada no ESP8266. Isso inclui o acionamento do motor apenas quando há água disponível na caixa receptora e o nível do reservatório B ainda não atingiu o máximo, além da alternância entre a utilização da água da CAERN ou da água reaproveitada de acordo com os sensores B_0 e B_1 .

Por fim, o ThingsBoard permite ainda a geração de alarmes e mensagens de erro em tempo real, caso ocorra leitura inconsistente nos sensores ou falha na lógica de operação, informando ao operador o tipo de erro identificado e facilitando o diagnóstico remoto. Esse recurso amplia a robustez e a usabilidade do sistema, proporcionando uma solução profissional e escalável baseada em *IoT*.

3.4 Código-fonte

O sistema de automação foi programado na plataforma Arduino IDE, utilizando a linguagem C/C++ e bibliotecas específicas para Wi-Fi e HTTP do ESP8266. A comunicação com a plataforma ThingsBoard ocorre por meio do protocolo HTTP, que é um protocolo de aplicação padrão na Internet. Os dados dos sensores e atuadores são organizados em um *payload*, que representa a carga útil da requisição e é estruturado em formato *JSON*.

Esse *payload* é então enviado ao servidor através de uma requisição HTTP do tipo *POST*, que é um método utilizado para transmitir dados do cliente para o servidor. Nesse contexto, o método *POST* é responsável por encapsular os dados e encaminhá-los à plataforma ThingsBoard para armazenamento e visualização em tempo real. A *API* (*Application Programming Interface*) disponibilizada pelo ThingsBoard possibilita o envio de informações do ESP8266 para a plataforma de *IoT*, utilizando uma linguagem padronizada compreendida por ambas as partes.

A lógica de operação do sistema foi desenvolvida com base no modelo apresentado na Seção 3.1. O Quadro 1 apresenta as bibliotecas e as variáveis utilizadas no código para realizar a conexão com a rede Wi-Fi, além de parte da função destinada a essa conexão.

Quadro 1 – Conexão Wi-Fi

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266HTTPClient.h>

const char* ssid = "*****";
const char* password = "*****";
const char* server = "http://demo.thingsboard.io";
const char* token = "*****";

WiFiClient client;

void setup(){
  Serial.begin(115200);

  WiFi.begin(ssid, password);
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.print("Conectando ao Wi-Fi...");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println(" Conectado!");
}
```

Fonte: Autoria própria (2025)

O Quadro 2 apresenta o código implementado no laço principal (*loop*) do sistema embarcado, responsável pelo controle dos atuadores: o motor (M) e as válvulas solenoides (V_0 e V_1). O código realiza a leitura dos sensores conectados aos reservatórios e à caixa receptora, invertendo os sinais lógicos para compatibilidade com os módulos relé, que operam em nível baixo (ativo em 0). A variável $a0$ armazena o estado do Reservatório A e as variáveis $b0$ e $b1$ armazenam os estados do Reservatório B.

Com base nessas leituras, a lógica de controle define o acionamento do motor por meio da variável m , que será verdadeira apenas quando houver água na caixa receptora ($a0 == 1$) e o Reservatório B ainda não estiver cheio ($b1 == 0$). Em relação às válvulas, V_0 é acionada quando o reservatório inferior estiver vazio ($b0 == 0$), enquanto V_1 é ativada quando o reservatório superior estiver cheio ($b1 == 1$). Essas condições são armazenadas nas variáveis booleanas *estado_v0* e *estado_v1*.

Ao final do laço, os comandos *digitalWrite* enviam os sinais de controle para os pinos dos atuadores, acionando ou desativando cada componente conforme a lógica estabelecida. A função *enviarDados()* transmite os estados atuais para fins de monitoramento, e o *delay(1000)* garante que o ciclo de leitura e controle ocorra a cada segundo. Esse controle periódico garante o funcionamento automatizado do sistema de aproveitamento da água, respeitando os níveis dos reservatórios e a disponibilidade do recurso.

Quadro 2 – Lógica do acionamento dos atuadores

```
void loop() {
  int a0 = !digitalRead(SENSOR_RECEPTORA);
  int b0 = !digitalRead(SENSOR_ARCOND_BAIXO);
  int b1 = !digitalRead(SENSOR_ARCOND_ALTO);

  bool m = (a0 == 1 && b1 == 0);

  if (b0 == 0) {
    estado_v0 = true;
    estado_v1 = false;
  } else if (b1 == 1) {
    estado_v0 = false;
    estado_v1 = true;
  }

  digitalWrite(MOTOR, m ? LOW : HIGH);
  digitalWrite(VALVULA_CAERN, estado_v0 ? LOW : HIGH);
  digitalWrite(VALVULA_ARCOND, estado_v1 ? LOW : HIGH);

  enviarDados(a0, b0, b1, m, estado_v0, estado_v1);

  delay(1000);
}
```

Fonte: Autoria própria (2025)

O Quadro 3 apresenta o código da função *enviarDados()*, que tem como objetivo enviar as informações dos sensores e dos atuadores do sistema para a plataforma online de monitoramento. Essa função só é executada quando o dispositivo está conectado ao Wi-Fi. Ao ser chamada, ela monta o endereço do servidor (com um código de acesso chamado *token*), organiza os dados dos sensores e do motor/válvulas em formato de texto (*JavaScript Object Notation, JSON*) e prepara tudo para envio.

Depois disso, as informações são enviadas para a internet usando um comando de envio (*POST*), e o próprio sistema mostra o que foi enviado e se a plataforma respondeu corretamente. Caso a internet não esteja funcionando, o sistema exibe uma mensagem de erro. Essa função é essencial para que os dados coletados pelo sistema possam ser acompanhados em tempo real, facilitando o controle e o monitoramento do funcionamento do protótipo.

Quadro 3 – Envio dos dados para a plataforma ThingsBoard

```
void enviarDados(int a0, int b0, int b1, bool m, bool v0, bool v1) {
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
    String url = String(server) + "/api/v1/" + token + "/telemetry";
    http.begin(client, url);
    http.addHeader("Content-Type", "application/json");

    String payload = "{";
    payload += "\"sensor_receptora\":" + String(a0) + ",";
    payload += "\"sensor_arcond_baixo\":" + String(b0) + ",";
    payload += "\"sensor_arcond_alto\":" + String(b1) + ",";
    payload += "\"motor\":" + String(m ? 1 : 0) + ",";
    payload += "\"valvula_caern\":" + String(v0 ? 1 : 0) + ",";
    payload += "\"valvula_arcond\":" + String(v1 ? 1 : 0);
    payload += "}";

    int httpResponseCode = http.POST(payload);

    Serial.print("Enviado: ");
    Serial.println(payload);
    Serial.print("Resposta do servidor: ");
    Serial.println(httpResponseCode);

    http.end();
  } else {
    Serial.println("Falha na conexão WiFi");
  }
}
```

Fonte: Autoria própria (2025)

Além das tabelas apresentadas, existem outras partes do código relevantes para o funcionamento do sistema, como a definição dos pinos utilizados para as entradas dos sensores e saídas dos atuadores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados de simulação

Utilizando o *ModelSim – Intel FPGA Starter Edition 10.5b (Quartus Prime 18.1)*, uma versão gratuita do simulador *ModelSim* voltada ao ecossistema da *Intel*, foi possível simular o comportamento lógico da bomba e das válvulas solenoides, conforme apresentado na Seção 3.1. Para isso, foram desenvolvidos dois arquivos principais em *Verilog*: o módulo *sistema_logico.v*, que implementa a lógica combinacional e sequencial do sistema, e o arquivo de teste *tb_sistema_logico.v*, que funciona como *testbench*, ou seja, um ambiente de simulação utilizado para gerar estímulos, configurar sinais de entrada e observar as respostas nas saídas.

A escolha do *ModelSim* se deu por sua confiabilidade, ampla adoção acadêmica e compatibilidade com a linguagem *Verilog*. Outras ferramentas, como *GTKWave*, foram analisadas, mas o *ModelSim* se destacou por ser mais estável, oferecer melhor suporte a simulações de *FSMs* e ter interface amigável para inspeção de formas de onda.

Nas subseções seguintes, são apresentadas as simulações correspondentes às regras de controle automático. Ressalta-se que a base de tempo adotada nas simulações é hipotética, ou seja, não representa os tempos reais de operação do sistema. As formas de onda estão representadas na escala de nanosegundos, em conformidade com o sinal de clock (*clk*), que é um sinal digital periódico utilizado para sincronizar as operações do circuito.

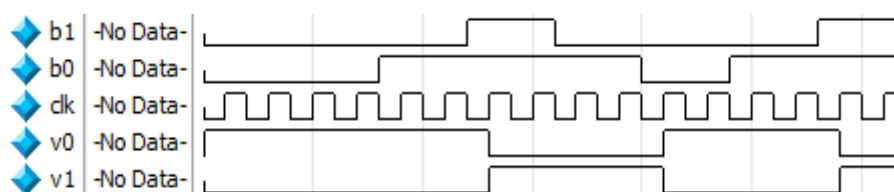
No contexto da simulação, esse *clock* foi gerado exclusivamente para fins de teste, sendo utilizadas suas transições de subida e descida para a atualização das entradas e saídas do sistema. Essa simplificação não compromete a validade das análises realizadas, uma vez que o objetivo principal é verificar o comportamento lógico e funcional do sistema, e não seu desempenho temporal em hardware real.

O ambiente de simulação proporcionado pelo *ModelSim* permitiu a verificação detalhada dos sinais de controle responsáveis pelos acionamentos automáticos dos atuadores. A análise das formas de onda resultantes possibilitou validar o funcionamento correto da lógica projetada, ainda que em um ambiente com base de tempo hipotética, conforme discutido anteriormente.

4.1.2 Simulação para o controle das válvulas V_0 e V_I

A Figura 12 apresenta a simulação do comportamento dos sinais de controle v_0 e v_I , responsáveis por acionar as válvulas solenoides (V_0 e V_I , respectivamente) que definem qual água será liberada para uso, do Reservatório B (água reaproveitada, v_I) ou do Reservatório C (água fornecida pela CAERN, v_0).

Figura 12 – Sinais de controle automático das válvulas v_0 e v_I



Fonte: Autoria própria (2025)

O funcionamento das válvulas é controlado por uma *FSM* que avalia os sinais dos sensores de nível inferior (b_0) e superior (b_I) do Reservatório B. O controle é automático, garantindo que o enchimento e o escoamento ocorram de forma segura e eficiente. Pela análise da Figura 12, observa-se que, no instante inicial, ambos os sensores estão em nível baixo, indicando que o Reservatório B está vazio. Nessa condição, a válvula da CAERN é ativada e a válvula do Reservatório B permanece desativada.

Quando o sensor de nível inferior é ativado ($b_0 = 1$) e o sensor de nível superior ainda está inativo ($b_I = 0$), o sistema permanece no estado de enchimento, mantendo a válvula da CAERN aberta ($v_0 = 1$) e a válvula do Reservatório B fechada ($v_I = 0$). Ao atingir o nível máximo ($b_I = 1$ e $b_0 = 1$), o sistema reconhece que o Reservatório B está cheio. Nesse momento, a válvula da CAERN é imediatamente desativada ($v_0 = 0$) e a válvula do Reservatório B é acionada ($v_I = 1$), permitindo o uso da água do ar-condicionado.

Durante o escoamento da água, o sensor de nível superior desliga ($b_I = 0$), mas o sensor inferior permanece ativado ($b_0 = 1$). Nesse estado, o sistema compreende que o Reservatório B está secando, e a válvula do Reservatório B permanece aberta ($v_I = 1$), enquanto a válvula da CAERN continua fechada ($v_0 = 0$).

Por fim, ao atingir novamente os níveis baixos nos dois sensores ($b_0 = 0$ e $b_I = 0$), o sistema retorna ao estado inicial: a válvula da CAERN é reativada ($v_0 = 1$) e a válvula do Reservatório B é desligada ($v_I = 0$), reiniciando o ciclo de enchimento de forma automática.

4.2 Elaboração da maquete

Com o objetivo de validar o funcionamento do sistema proposto e garantir o posicionamento adequado dos componentes, foram confeccionados três reservatórios de vidro com dimensões de 20 cm × 20 cm × 20 cm cada, ou seja, 8 L cada. Os reservatórios A e B são posicionados em cima de uma mesa e o reservatório C é posicionado diretamente no solo, de forma a simular um desnível natural entre os tanques, fundamental para o fluxo gravitacional da água entre os compartimentos.

Como os reservatórios são abertos na parte de cima, o sistema de captação de água do ar-condicionado é simulado através do derramamento de água por essa parte. A interligação entre os reservatórios foi realizada por mangueiras em PVC flexíveis, facilitando a montagem e desmontagem do protótipo. A Figura 13 apresenta a maquete estruturada.

Figura 13 – Maquete do sistema



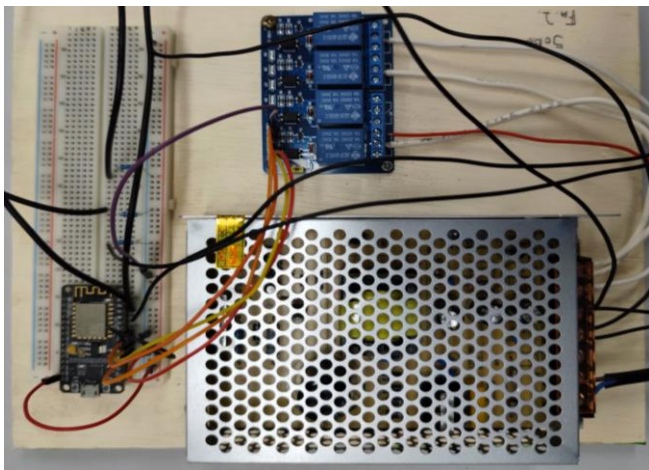
Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Juntamente com a construção da maquete, foi desenvolvida a unidade de controle do sistema, apresentada na Figura 14. Essa unidade tem como finalidade centralizar e organizar os principais componentes eletrônicos responsáveis pelo funcionamento do sistema automatizado. Os dispositivos foram fixados sobre uma base de madeira, o que proporciona maior firmeza, segurança na manipulação e facilidade na visualização do circuito.

A montagem dos circuitos foi realizada por meio de uma protoboard, permitindo a interligação dos componentes sem a necessidade de soldagem. Na unidade de controle, estão instalados o microcontrolador ESP8266, que executa a lógica do sistema e se comunica com a

internet; o módulo de relés, utilizado para acionamento dos atuadores; e uma fonte chaveada, responsável por fornecer energia elétrica estável ao circuito. Essa estrutura torna a prototipagem prática e funcional, além de facilitar possíveis manutenções e ajustes.

Figura 14 – Unidade de controle



Fonte: Arquivo pessoal (2025)

A alimentação dos componentes da maquete foi realizada por meio de três fontes distintas. Primeiramente, utilizou-se uma fonte de corrente alternada, obtida a partir de uma tomada convencional, a qual fornece energia para a fonte chaveada. Esta, por sua vez, é uma fonte de 12V, conforme ilustrado na Figura 9, responsável por alimentar a bomba e as válvulas solenoides do sistema. Além disso, uma porta USB conectada a um computador foi utilizada para fornecer alimentação ao módulo ESP8266, assim como a todo o circuito de controle associado. A ligação do ESP8266 com os demais módulos do sistema está detalhada na Tabela 4.

Tabela 4 – Mapeamento de Entradas e Saídas no ESP8266 (NodeMCU)

Pino NodeMCU	Direção	Função
D1	Entrada	Leitura de nível baixo do Reservatório B
D2	Entrada	Leitura de nível Alto do Reservatório B
D4	Entrada	Leitura de nível do Reservatório A
D5	Saída	Acionamento da Válvula do Reservatório C
D6	Saída	Acionamento da Válvula do Reservatório B
D7	Saída	Acionamento da bomba d'água

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3 Testes práticos na maquete

Com o objetivo de verificar o funcionamento correto do sistema implementado na maquete, foi realizado um conjunto de testes experimentais, abrangendo diferentes cenários operacionais. Os testes buscaram avaliar o comportamento do sistema frente às possíveis condições de funcionamento, simulando situações reais de variação no nível dos reservatórios.

Durante os ensaios, os reservatórios foram preenchidos com água em diferentes sequências e volumes, a fim de observar a resposta dos sensores, o acionamento das válvulas solenoides e da bomba d'água, bem como a lógica de controle programada no microcontrolador ESP8266.

Cada situação testada permitiu verificar se os atuadores respondiam corretamente às leituras dos sensores e se o sistema se comportava de forma coerente com a proposta de reaproveitamento da água. Os testes também contribuíram para validar a integração entre hardware e software, bem como a comunicação com a plataforma ThingsBoard, garantindo o envio e registro dos dados em tempo real.

4.4 Aspectos gerais

Em ambientes residenciais, comerciais ou acadêmicos, a água condensada gerada por aparelhos de ar-condicionado é frequentemente descartada sem qualquer tipo de aproveitamento (Silva, 2021). A proposta deste projeto permite transformar esse desperdício em uma oportunidade sustentável, por meio da instalação de sistemas de coleta e automação embarcada no ESP8266. Onde torna-se possível capturar a água condensada, armazená-la e direcioná-la para fins não potáveis. Ao adotar o sistema proposto em escala institucional, a universidade pode reduzir significativamente o consumo de água potável, diminuir os custos operacionais e ainda promover uma cultura de responsabilidade ambiental.

Para a aplicação do sistema proposto em ambientes institucionais, alguns pontos importantes devem ser considerados, especialmente, com vistas à viabilidade, segurança e eficiência da operação em escala real. Abaixo são listados alguns desses aspectos:

- Recomenda-se a utilização de um sistema de tubulações conectadas aos drenos dos aparelhos de ar-condicionado, convergindo para um ou mais reservatórios centrais estrategicamente posicionados no prédio;
- É necessário o uso de bombas d'água mais robustas, com maior capacidade de vazão e elevação, garantindo o transporte da água reaproveitada para caixas superiores;

- Os sensores de nível não devem ser instalados diretamente nas paredes dos reservatórios. O ideal é fixá-los em tubos de PVC (do tipo tubo guia), que são submersos verticalmente no interior do reservatório, facilitando a manutenção e preservando a estrutura da caixa;
- Toda a estrutura de cabeamento dos sensores e atuadores deve estar devidamente protegida, evitando exposição à umidade, ao calor excessivo ou a interferências eletromagnéticas, comuns em instalações elétricas densas;
- Deve haver manutenções preventivas a fim de garantir o funcionamento contínuo e eficiente do sistema.

A adoção do sistema proposto, representa uma alternativa sustentável e economicamente viável para instituições de ensino que buscam soluções para o reaproveitamento de recursos hídricos, contribuindo diretamente para a redução do consumo de água potável no ambiente acadêmico.

4.5 Análise de custo

Na Tabela 5, apresenta-se uma estimativa dos custos dos principais componentes utilizados no projeto. Itens auxiliares como fios, conectores e materiais de fixação foram desconsiderados por terem impacto mínimo no custo total. Além disso, os valores unitários foram estimados com base em cotações realizadas em sites de comércio eletrônico como Mercado Livre, Amazon e lojas especializadas como MakerHero e WJ Componentes, com data de referência em julho de 2025.

Tabela 5 – Estimativa de custos

Componente	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Total (R\$)
ESP8266 NodeMCU	1	50,00	50,00
Sensor de Nível (boia)	3	27,00	81,00
Relé de 4 canais	1	30,00	30,00
Bomba de água 12V	1	130,00	130,00
Válvula Solenoide 12V	2	45,00	90,00
Fonte 12V DC	1	40,00	40,00
Total estimado	-	-	421,00

Fonte: Autoria própria (2025)

O custo total estimado de R\$ 421,00 refere-se à versão prototipada do sistema, utilizando componentes acessíveis e suficientes para comprovação funcional em ambientes controlados. No entanto, para aplicações de maior porte, como em ambientes residenciais, comerciais ou universitários, é recomendada a utilização de componentes mais robustos e apropriados para uso intensivo, mesmo que isso aumente o investimento inicial.

Por exemplo, bombas centrífugas industriais com potência entre 1 cv e 7,5 cv podem variar de R\$ 956,00 a R\$ 6.400, dependendo do modelo, tensão e material de construção. Um modelo intermediário de 1 cv tem preço na faixa de R\$ 955,90 (Loja do mecânico, 2025), enquanto bombas maiores, de até 7,5 cv, superam os R\$ 6.400,00 (Loja do mecânico, 2025).

Embora tais componentes impliquem custos superiores à versão prototipada, eles conferem ao sistema características indispensáveis, como maior durabilidade e resistência a uso contínuo e melhor desempenho hidráulico. Portanto, mesmo com a substituição por esses itens mais resistentes, o projeto mantém uma boa relação custo-benefício, especialmente, quando comparado a soluções comerciais de automação hidráulica.

4.6 Possíveis falhas no sistema

Durante o desenvolvimento do sistema automatizado de controle e reaproveitamento de água condensada de ar-condicionado, utilizando o microcontrolador ESP8266, identificaram-se possíveis falhas que podem comprometer o funcionamento adequado da automação. A Tabela 6 descreve esses riscos e suas consequências.

Tabela 6 – Possíveis erros

Possível erro	Consequência
Falha de conexão com o Wi-Fi	O sistema não conseguirá enviar dados para a plataforma ThingsBoard, mas continuará operando localmente.
Falha nos sensores de nível	A bomba ou as válvulas podem não ser acionadas corretamente, prejudicando o reaproveitamento da água.
Travamento ou reinício do ESP8266	Interrupção do funcionamento do sistema por tempo indeterminado.
Falta de energia	Desligamento completo do sistema, paralisando a coleta e distribuição de água.

Fonte: Autoria própria (2025)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema automatizado para o aproveitamento sustentável da água proveniente da condensação de aparelhos de ar-condicionado, utilizando um microcontrolador ESP8266, sensores de nível, atuadores e monitoramento remoto via plataforma ThingsBoard. A proposta surgiu a partir da observação do desperdício recorrente desse recurso em ambientes acadêmicos, considerando seu potencial de reaproveitamento para fins não potáveis.

Durante a execução do projeto, foi possível comprovar, por meio da construção e testes de uma maquete funcional, que o sistema atende de forma eficiente às demandas previstas, controlando o acionamento de válvulas e motor de bombeamento com base nos níveis dos reservatórios e condições do ambiente. Além disso, a integração com o ThingsBoard viabilizou o acompanhamento remoto das variáveis do sistema, promovendo maior confiabilidade e facilidade de diagnóstico em tempo real.

A aplicação prática deste sistema em instituições de ensino superior, como demonstrado na análise dos aspectos gerais, apresenta grande viabilidade. Considerando a quantidade de equipamentos de ar-condicionado presentes no ambiente acadêmico, estima-se que o volume de água condensada descartada diariamente possa ser significativo. O reaproveitamento desse recurso, quando realizado de forma automatizada, contribui não apenas para a economia de água potável, mas também para a promoção de uma cultura sustentável no ambiente acadêmico.

Conclui-se, portanto, que o sistema proposto se apresenta como uma solução viável, de baixo custo, sustentável e de fácil adaptação a diferentes contextos. Além do benefício ambiental direto, o projeto também possui valor educacional, podendo ser utilizado como ferramenta didática em cursos relacionados à automação, eletrônica embarcada e Internet das Coisas. Futuramente, novas melhorias podem ser implementadas, como tratamento da água condensada, integração de sensores de qualidade da água, criação de um sistema de notificações, desenvolvimento de uma versão industrial ou comercial do sistema, aplicação do sistema em conjunto com o reaproveitamento de água da chuva e uso de inteligência artificial ou aprendizado de máquina de modo a prever o consumo de água com base no histórico da plataforma ThingsBoard.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Barbara Belzer. THE BENEFITS of harvesting HVAC condensation. WaterTech Online, 2017. Disponível em: <https://www.watertechonline.com/water-reuse/article/15550318/the-benefits-of-harvesting-hvac-condensation>. Acesso em: 28 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Água no mundo. ANA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>. Acesso em: 28 jun. 2025.

AUTOCORE ROBÓTICA. Painel de Automação com *ThingsBoard* e ESP8266. Autocore Robótica Blog, 19 jul. 2020. Disponível em: <https://autocorerobotica.blog.br/painel-de-automacao-com-thingsboard-e-esp8266/>. Acesso em: 4 jul. 2025.

AZEVEDO, Angelo Tiago. **Desenvolvimento de dispositivos eletrônicos alternativos para auxílio no manejo da irrigação via IoT**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CELDUC®RELAIS. Level Sensors With Reed Switches. celduc® relais, 2024. Disponível em: <https://www.celduc-relais.com/en-us/liquid-level-sensing-using-reed-switch-technology/>. Acesso em: 4 jul. 2025.

BOMBA DE AQUÁRIO: VOCÊ SABE MESMO COMO FUNCIONA? Blog Cobasi, 12 ago. 2021. Disponível em: <https://blog.cobasi.com.br/bomba-de-aquario-voce-sabe-mesmo-como-funciona/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

DECKER, Howard. How Rice U. saves 12-14 million gallons of water a year. Houston Chronicle, 1 set. 2011. Disponível em: <https://www.chron.com/neighborhood/bellaire/news/article/How-Rice-U-saves-12-14-million-gallons-of-water-a-9433279.php>. Acesso em: 28 jun. 2025.

FADIGAS, F. S.; EÇA, G. F. Purificação de água de condensação de ar-condicionado para uso em laboratório. **Revista Licuri**, p. 32–44, 8 mar. 2024.

FREITAS, Adriana. Brasil perde 15% de superfície de água desde o começo dos anos 1990. CNN Brasil, 23 ago. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/brasil-perde-15-de-superficie-de-agua-desde-o-comeco-dos-anos-1990/>. Acesso em: 28 jun. 2025.

LEAL JÚNIOR, W. B.; ARAÚJO, H. X.; TAVARES, F. M. Monitoramento da qualidade da água utilizando plataforma de Internet das Coisas. **Humanidades & Inovação**, Palmas, v. 7, n. 9, p. 1-11, 2020.

LIMA, C. N.; MAIA, A. C. S.; SILVA, A. C. Avaliação da água condensada em aparelhos de ar-condicionado do IFPE-Campus Garanhuns para uso na irrigação de hortas verticais. In: I Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade e III Congresso Internacional da Diversidade do Seminário, Campina Grande, 2019. **Anais**. Campina Grande: Realize Editora, 2019. p. 160-174.

MAKERHERO. Placa ESP8266 NodeMcu ESP-12. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/modulo-wifi-esp8266-nodemcu-esp-12/>. Acesso em: 4 jul. 2025.

MARENGO, José; CUNHA, Ana Paula; ALVES, Lincoln. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanalise**, v. 4, p. 49–54, nov. 2016.

OLIVEIRA, Kauann Jácome de. **Sistema automático de aproveitamento de águas das chuvas para uso doméstico e irrigação**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2019.

SILVA, S. R; SOARES, M. C. D. M; SOUZA JÚNIOR, G. D. Estimativa das demandas hídricas não potáveis em edifício público por aproveitamento de água condensada de ar-condicionado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 16, e85101623372, 2021.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. **Como funciona a válvula solenoide e quais os tipos**. 19 set 2017. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/valvula-solenoide/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

SILVA, Francelino Marcílio da. **Estudo de caso sobre a adoção da plataforma ThingsBoard para Internet das coisas**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2021.

SMS-TORK. TMS Float Switches Side Mount Level Switch. Disponível em: <https://smstork.com/en/tms-float-switches-side-mount-level-switch>. Acesso em: 4 jul. 2025.

MAPBIOMAS. **Superfície de água no Brasil reduz 15% desde o início dos anos 90**. 23 ago. 2021. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2021/08/23/superficie-de-agua-no-brasil-reduz-15-desde-o-inicio-dos-anos-90/>. Acesso em: 28 jun. 2025.

THINGSBOARD community edition, 2025. Disponível em: <https://thingsboard.io/docs/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

VIEIRA, Jonas Lucas. **Estudo da UFPB conclui que água de ar-condicionado pode ser reutilizada**. Disponível em: <https://www.ufpb.br/ufpb/contents/noticias/estudo-da-ufpb-conclui-que-agua-de-ar-condicionado-pode-ser-reutilizada>. Acesso 5 jul. 2025.

MÓDULO relé 04 canais 5v 10a com led indicador. Disponível em: <https://www.wjcomponentes.com.br/rele-4>. Acesso em: 5 jul. 2025.