



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO INTERDICIPLINAR EM TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO

Igor Pereira Fernandes

**Sistema automatizado de irrigação com reusa de água de climatização para
sustentabilidade urbana no semiárido**

PAU DOS FERROS

2025

Igor Pereira Fernandes

**Sistema automatizado de irrigação com reusa de água de climatização para
sustentabilidade urbana no semiárido**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Tecnologia da Informação.

Orientador: Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, Prof. Dr.

© 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.

F363s Fernandes, Igor Pereira.
 Sistema automatizado de irrigação com reusa de
 água de climatização para sustentabilidade urbana
 no semiárido / Igor Pereira Fernandes. - 2025.
 37 f. : il.

 Orientador: Francisco Carlos Gurgel da Silva
 Segundo.

 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Tecnologia da
 Informação, 2025.

 1. Água condensada. 2. Ilhas de calor. 3.
 Sistema automatizado. 4. Microcontrolador. 5.
 LDR. I. Silva Segundo, Francisco Carlos Gurgel da
 , orient. II. 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.

Igor Pereira Fernandes

**Sistema automatizado de irrigação com reusa de água de climatização para
sustentabilidade urbana no semiárido**

Monografia apresentada à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Tecnologia
da Informação.

Defendida em: 4 de Julho de 2025

BANCA EXAMINADORA

Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, Prof. Dr.
(UFERSA)
Presidente

Petrucio Ricardo Tavares de Medeiros, Prof. Dr.
(UFERSA)
Membro Examinador

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

AGRADECIMENTOS

A defesa deste Trabalho de Conclusão de Curso representa a realização de uma grande conquista. Ao ingressar nesta universidade, eu tinha muitos sonhos, mas também uma imaturidade que, por vezes, me fez questionar se estava pronto para iniciar uma graduação.

Durante essa jornada, as dificuldades em algumas disciplinas, as noites em claro estudando, as conversas inspiradoras nos laboratórios e as amizades que construí foram fundamentais para o meu amadurecimento. Sou grato aos professores, que se tornaram verdadeiros mestres e me incentivaram a seguir em frente mesmo nos momentos de desânimo. O apoio e a fé que depositaram em mim, mesmo quando eu duvidava da minha própria capacidade, foram decisivos para que eu chegasse até aqui.

Essa experiência me transformou em um pesquisador mais completo e em uma pessoa mais madura, impactando todas as frentes da minha vida.

Também sou grato às pessoas que, fora da instituição, me deram o suporte necessário. À minha família, por todo o apoio incondicional. Aos meus amigos, que estiveram presentes em todos os momentos. E, especialmente, à minha namorada, por me apoiar e acreditar em mim nos momentos mais desafiadores e nas maiores vitórias.

EPÍGRAFE

Nowadays all I do is shine, take a breath and ease my mind.

Mac Miller

RESUMO

Este trabalho propõe um sistema automatizado de irrigação para combater a escassez hídrica e os efeitos de ilhas de calor no semiárido brasileiro, utilizando a água de condensação de aparelhos de ar-condicionado. Embora essa água seja ligeiramente ácida devido à absorção de dióxido de carbono da atmosfera, ela é utilizada diretamente para a irrigação de pequenas hortas urbanas. A automação é realizada por um microcontrolador ATtiny13A, de baixo custo e consumo, e um sensor de luminosidade (LDR), que ativa a irrigação somente à noite para otimizar o uso da água e reduzir a perda por evaporação em até 30% (Medeiros; Silva; Ramos, 2018). O projeto também se propõe a coletar dados operacionais, como volume de água e frequência de irrigação, para subsidiar futuras políticas públicas de infraestrutura "azul-verde", oferecendo um modelo replicável para promover a resiliência socioambiental em áreas com cobertura vegetal limitada.

Palavras-chave: água condensada; ilhas de calor; sistema automatizado; microcontrolador LDR;

ABSTRACT

This paper proposes the development of an automated irrigation system that reuses condensed water from air conditioners. The main objective is to combat water scarcity and mitigate the effects of urban heat islands in the Brazilian semi-arid region. The research identifies condensed water as a viable alternative source for irrigating small urban gardens, despite its slight acidity from absorbing atmospheric carbon dioxide. The system was designed with a low-cost ATtiny13A microcontroller and a light-dependent resistor (LDR), which optimizes irrigation by activating it only at night. This strategy is proven to reduce water consumption by up to 30% by minimizing evaporation loss (Medeiros; Silva; Ramos, 2018). Furthermore, the project plans to collect operational data, such as captured water volume and irrigation frequency, to inform future public policies on "blue-green" infrastructure. The initiative seeks to create a replicable model to promote urban sustainability and socio-environmental resilience in areas with limited vegetation cover.

Keywords: condensed water; heat islands; automated system; microcontroller; LDR

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo genérico de Componentes THT	20
Figura 2 – Exemplo genérico de Componentes SMD	21
Figura 3 – Exemplo Microcontrolador Attiny13a SMD	21
Figura 4 – Exemplo genérico de um Sensor de Luminosidade (LDR) THT.	22
Figura 5 – Exemplo genérico de resistores SMD (à direita) e trimpot (à esquerda) . . .	23
Figura 6 – Exemplo de um Transistor MMBT2222A SMD.	23
Figura 7 – Exemplo genérico de um Diodo SMD.	24
Figura 8 – Exemplo genérico de um relé	24
Figura 9 – Exemplo genérico de uma Válvula Solenoide.	25
Figura 10 – Exemplo genérico de Capacitor Cerâmico SMD	25
Figura 11 – Exemplo genérico de um Regulador de Tensão SMD	26
Figura 12 – Exemplo genérico de um LED Vermelho THT.	26
Figura 13 – Teste prático do protótipo de irrigação automática utilizando água de conden- sação	28
Figura 14 – Vista do jardim em frente ao prédio de sólidos	29
Figura 15 – Diagrama do Circuito de Automação para Irrigação	32
Figura 16 – Protótipo	36
Figura 17 – Microgreens	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problemas Ambientais e Urbanos Decorrentes da Escassez Hídrica	14
1.2	Benefícios do Cultivo Urbano e da Eficiência Hídrica	15
1.3	Justificativa	15
1.4	Objetivos	16
1.4.1	Objetivo Geral	16
1.4.2	Objetivo Específico	16
1.5	Proposta do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Reúso de Água de Condensação de Ar-Condicionado	18
2.2	Irrigação Automatizada e Eficiência Hídrica	19
2.3	Componentes Eletrônicos	20
2.3.1	Tipos de Encapsulamento: THT e SMD	20
2.3.2	Microcontroladores	21
2.3.3	Sensores	22
2.3.4	Resistores e Potenciômetros/Trimpots	22
2.3.5	Transistores	23
2.3.6	Diodos	23
2.3.7	Relés	24
2.3.8	Válvulas Solenoide	24
2.3.9	Reguladores de Tensão	25
2.3.10	LEDs (Diodos Emissores de Luz)	26
3	TRABALHOS RELACIONADOS E DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO	27
3.1	Análise Crítica dos Trabalhos Correlatos	27
3.1.1	O Sistema Autônomo de Irrigação de Jesus et al. (2024)	27

3.1.2	A Avaliação do Reúso em Edificações Públicas por Soares, Souza et al. (2021)	28
3.2	As Lacunas Observadas e a Proposta do Projeto	30
4	PROJETO E METODOLOGIA	32
4.1	Diagrama do Projeto	32
4.2	Descrição de Componentes	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1	Desenvolvimento e Testes do Protótipo	35
5.2	Avaliação do Uso da Água Condensada para Cultivo de <i>Microgreens</i>	36
5.3	Implicações e Potencial de Comercialização	37
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

No Nordeste brasileiro, a convivência com um clima predominantemente semiárido impõe desafios constantes à população, afetando tanto a segurança econômica quanto a saúde e o bem-estar social (Mata; Freitas; Resende, 2019). Em períodos de estiagem intensa, o racionamento do abastecimento de água para consumo humano torna-se uma realidade inescapável, levando à priorização das necessidades básicas em detrimento da manutenção da vegetação nas áreas urbanas. Nesse contexto, projetos que proponham soluções de uso sustentável da água e criação de áreas verdes urbanas ganham relevância crucial para a resiliência das cidades.

1.1 Problemas Ambientais e Urbanos Decorrentes da Escassez Hídrica

A escassez de espaços verdes potencializa os elevados índices de temperatura e o fenômeno das ilhas de calor, uma vez que a falta de cobertura vegetal impede processos naturais essenciais, como a evapotranspiração, o sombreamento e a filtragem de poluentes (Akbari, 1997). Essa deficiência não só eleva a temperatura ambiente, mas também compromete a infiltração da água da chuva no solo, intensificando o risco de inundações durante períodos chuvosos e limitando os espaços de lazer que são fundamentais para o bem-estar psicológico dos habitantes.

Para mitigar esses desafios ambientais e urbanos, torna-se imperativo integrar áreas verdes ao planejamento urbano, mesmo em contextos de escassez de água. A utilização de espécies endêmicas, adaptadas a condições áridas, e a implementação de sistemas de irrigação eficientes são estratégias essenciais para garantir a funcionalidade e a sustentabilidade desses espaços. Políticas públicas focadas na criação e manutenção de infraestrutura verde promovem a regulação térmica, a melhoria da qualidade do ar, o enriquecimento estético das cidades e a promoção da convivência social (Haaland; Van den Bosch, 2015).

Contudo, a maioria das edificações urbanas não foi concebida para otimizar o uso de recursos hídricos, o que dificulta a gestão eficiente da água. Nesse cenário, tecnologias que possibilitam o reuso de águas residuais e pluviais emergem como alternativas indispensáveis para reduzir a pegada hídrica e fomentar a sustentabilidade (Lima; Pereira; Santos, 2020). Em particular, a água condensada gerada por sistemas de ar-condicionado — comumente descartada na rede pluvial — desponta como um recurso alternativo promissor. Equipamentos de climatização, amplamente utilizados em ambientes de clima quente, podem produzir vários litros de água por dia, permitindo o seu reaproveitamento para irrigação de jardins, hortas urbanas e

outras áreas verdes, contribuindo assim para uma gestão hídrica mais eficiente.

1.2 Benefícios do Cultivo Urbano e da Eficiência Hídrica

Além dos benefícios ambientais e urbanos, o incentivo ao cultivo doméstico de hortaliças e *microgreens* agrega uma dimensão vital à segurança alimentar, à promoção da saúde e à sustentabilidade das áreas urbanas. Estudos demonstram que os *microgreens* podem ser colhidos em ciclos curtos (entre 7 e 14 dias) e apresentam uma densidade nutricional superior à de seus equivalentes permanentes, além de demandarem menos água e espaço para o cultivo (Kapoor; Chen; Brown, 2023; Tavan; Smith; Lee, 2021).

Para maximizar o potencial desses cultivos e otimizar o uso da água, sistemas automatizados de irrigação por sensores podem otimizar o uso da água em até 30% em comparação aos métodos tradicionais (Medeiros; Silva; Ramos, 2018), viabilizando a produção de alimentos saudáveis em ambiente residencial, reduzindo custos e fortalecendo a autonomia alimentar, em consonância com práticas de economia circular.

1.3 Justificativa

A expansão de áreas verdes em centros urbanos é uma estratégia amplamente reconhecida para mitigar os impactos climáticos, promover serviços ecossistêmicos e melhorar a qualidade de vida. Em regiões semiáridas como o Nordeste brasileiro, onde os regimes pluviométricos são irregulares, as taxas elevadas de evapotranspiração e os sucessivos eventos de estiagem se fazem presentes, o desafio é ainda maior. Estudos do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) apontam para a intensificação de secas e ondas de calor, enquanto a Organização Mundial da Saúde recomenda uma meta mínima de 9 m² de área verde por habitante – um parâmetro raramente atingido nas cidades da região. A falta de cobertura vegetal contribui significativamente para a formação das ilhas de calor urbano, elevando a necessidade de sistemas de climatização artificial e agravando problemas respiratórios e psicológicos na população. Além disso, a presença de áreas verdes pode reduzir as temperaturas locais entre 2 °C e 8 °C, captar partículas finas, atenuar a poluição sonora e favorecer a infiltração de água da chuva, mas depende de sistemas de irrigação contínuos (Akbari, 1997), o que se torna um desafio em contextos onde a disponibilidade hídrica anual pode ser inferior a 800 mm, valor que caracteriza regiões de clima semiárido.

Nesse cenário, o reaproveitamento da água condensada gerada por sistemas de ar-condicionado surge como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável. Dados extraídos de Engenharia do Século XXI (Poisson, 2020) demonstram que aparelhos *Split* de 24.000 *BTU* apresentam vazões que variam conforme a umidade relativa (UR) do ar, alcançando cerca de 2 L/h para UR em torno de 15% e até 5 L/h para UR próximas de 60%. Ao direcionar esse efluente — geralmente descartado nas redes pluviais — para um sistema automatizado de irrigação, o projeto contribui para a redução do consumo de água tratada para fins não potáveis. Essa abordagem se alinha às metas 6.4 e 11.6 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, voltadas para o uso eficiente dos recursos hídricos e a redução do impacto ambiental das cidades. Além disso, reforça a Política Nacional de Recursos Hídricos, que prioriza a gestão integrada e o uso múltiplo dos recursos disponíveis.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema automatizado de irrigação sustentável que reutilize a água coletada de sistemas de climatização, visando à expansão e à manutenção de áreas verdes em regiões urbanas do Nordeste brasileiro, promovendo o uso eficiente dos recursos hídricos e contribuindo para a mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbano e a melhoria da qualidade de vida.

1.4.2 Objetivo Específico

- Seleção de espécies vegetais: identificar e selecionar as mais adequadas para climas semiáridos, priorizando hortaliças e *microgreens* de ciclo curto — como rabanete, rúcula e cebolinha — que demandem baixa irrigação e apresentem rápida adaptação às condições urbanas.
- Coleta e armazenamento de água condensada: projetar e implementar um sistema integrado para a captação e armazenamento da água condensada de equipamentos de climatização, garantindo eficiência técnica, viabilidade econômica e sustentabilidade do reuso.
- Desenvolvimento do sistema de controle automatizado: desenvolver e testar uma solução baseada em sensores de luminosidade e microcontroladores, assegurando o acionamento preciso e periódico do sistema e otimizando o uso da água coletada.

1.5 Proposta do Trabalho

Diante desse panorama, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema inovador de irrigação automatizado que utiliza a água condensada dos sistemas de climatização para irrigar áreas verdes e cultivos urbanos. Essa abordagem integradora visa não só otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos e reduzir a pegada hídrica dos ambientes urbanos, mas também contribuir para a melhoria do microclima, o fortalecimento da infraestrutura verde e a promoção da segurança alimentar em cidades nordestinas sob pressão climática, alinhando tecnologia, sustentabilidade e resiliência urbana em uma solução abrangente.

A proposta integra os conhecimentos da engenharia eletrônica e do planejamento urbano para desenvolver um protótipo de irrigação sustentável composto por: (i) um sistema de captação do condensado em um reservatório de baixo custo; (ii) um controle microprocessado baseado em sensores de luminosidade e intervalos de ativação, garantindo que a água seja aplicada somente quando necessária pelas plantas; e (iii) o registro dos dados operacionais do sistema, volume de água e frequência de irrigação, que subsidiará a formulação de políticas públicas de adaptação climática.

Ao preencher a lacuna existente entre a demanda crescente por áreas verdes e a escassez de recursos hídricos, a pesquisa propõe um modelo replicável de infraestrutura azul-verde, capaz de reduzir as ilhas de calor, melhorar os indicadores de saúde pública e fortalecer a resiliência socioambiental em cidades semiáridas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A sustentabilidade urbana em regiões semiáridas demanda soluções que conciliem a escassez de recursos hídricos com a manutenção de infraestruturas verdes. A irregularidade pluviométrica, a crescente demanda por água potável e as elevadas taxas de evapotranspiração intensificam a pressão sobre os sistemas públicos de abastecimento, comprometendo a qualidade de vida e acentuando o fenômeno das ilhas de calor urbanas. Nesse contexto, práticas de economia circular e reúso de subprodutos — como o condensado de ar-condicionado — emergem como estratégias promissoras para promover a resiliência climática dos centros urbanos (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021; Akbari, 1997; ??; Haaland; Van den Bosch, 2015).

A adoção de tecnologias integradas de reúso e automação potencializa esse ganho: enquanto o reúso otimiza o ciclo da água no perímetro urbano, a automação assegura que o recurso seja aplicado apenas quando e onde as plantas necessitam. Isso evita desperdícios ao utilizar a quantidade exata de água necessária, controlada por sensores que medem as condições ambientais. É nessa convergência entre tratamento simples de água e controle preciso — por meio de sensores e microcontroladores de baixo consumo energético — que se fundamenta a proposta de um sistema de irrigação adaptado às condições do semiárido nordestino (Lima; Pereira; Santos, 2020; Barbosa; Oliveira; Santos, 2024).

Diante deste cenário e da proposta tecnológica, este Capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos e a descrição detalhada dos componentes eletrônicos essenciais que compõem o sistema. As informações sobre os princípios de funcionamento desses componentes são baseadas na literatura padrão de eletrônica e em manuais técnicos de fabricantes. Compreender a função de cada elemento é crucial para entender o funcionamento global do protótipo e as escolhas de projeto que visam otimização de custo, consumo e compactação.

2.1 Reúso de Água de Condensação de Ar-Condicionado

O condensado de ar-condicionado resulta da condensação do vapor de água presente na atmosfera ao entrar em contato com as serpentinas frias do aparelho. Em condições típicas do semiárido, um equipamento de 12 000 BTU pode gerar entre 1 e 2 L de condensado por hora, totalizando até 48 L em um turno de 24 h; em edifícios com múltiplas unidades, esse volume se torna expressivo para irrigação não potável de hortas e jardins urbanos (Poisson, 2020).

Quimicamente, o condensado apresenta pH levemente ácido e concentrações irrelevantes de sais e matéria orgânica, o que o torna adequado para regas diretas após filtração básica. Sistemas de pré-filtragem, compostos por telas para retenção de partículas e reservatórios fechados, removem poeira e contaminantes que poderiam comprometer a saúde vegetal ou causar incrustações na tubulação. A simplicidade desses elementos facilita a manutenção e reduz custos operacionais (Lima; Pereira; Santos, 2020).

Contudo, a produção de condensado é sazonal e depende do uso do climatizador e dos níveis de umidade relativa do ar. Durante períodos de baixa demanda ou umidade reduzida, a geração pode cair abaixo do necessário para irrigação contínua. Assim, recomenda-se adotar sistemas híbridos, combinando condensado com água de chuva captada em lajes ou reservatórios externos, além de agrupar múltiplas unidades de ar-condicionado para garantir fornecimento constante (Poisson, 2020; Lima; Pereira; Santos, 2020).

2.2 Irrigação Automatizada e Eficiência Hídrica

A automação da irrigação usa sensores ambientais — luminosidade, umidade do solo e temperatura — para determinar o momento exato e o volume ideal de água a ser aplicado. Essa abordagem reduz o consumo em até 30% quando comparada a sistemas temporizadores fixos, prevenindo subirrigação e perdas por evaporação excessiva (Medeiros; Silva; Ramos, 2018).

A escolha de componentes compactos e de baixo consumo, como o microcontrolador ATtiny13A, combinado a um sensor LDR calibrável por trimpot e circuitos de acionamento de relé, possibilita soluções de baixo custo e fácil replicação. Em relação a plataformas mais robustas — como Arduino Uno com módulo RTC — o ATtiny13A reduz dimensões, consumo e valor de hardware. Apesar de sua simplicidade, essa configuração garante uma precisão frequente e suficiente nos ciclos de irrigação nos horários de menor insolação (amanhecer e entardecer), maximizando a penetração da água e minimizando perdas (Barbosa; Oliveira; Santos, 2024)

A modularidade do sistema, em que cada setor de cultivo dispõe de seu próprio módulo autônomo alimentado por 12 V DC (regulado internamente a 5 V), descentraliza o controle e facilita a manutenção. Cada unidade lê o valor de luminosidade, decide o acionamento da válvula solenóide e interrompe o fluxo ao atingir condições ideais. Essa arquitetura distribuída permite registrar dados operacionais para ajustes finos e suporte a políticas públicas de gestão hídrica em larga escala (Barbosa; Oliveira; Santos, 2024).

2.3 Componentes Eletrônicos

Esta seção apresenta uma descrição detalhada dos principais componentes eletrônicos empregados no desenvolvimento de sistemas de automação e controle, como os utilizados no projeto de irrigação automatizada. Compreender as características e o funcionamento básico de cada um desses elementos é fundamental para o projeto, a análise e a manutenção de circuitos eletrônicos eficazes.

2.3.1 Tipos de Encapsulamento: THT e SMD

Os componentes eletrônicos são encontrados em diferentes tipos de encapsulamento, o que determina seu método de montagem em placas de circuito impresso (PCIs). Os tipos mais comuns são Through-Hole Technology (THT) e Surface-Mount Device (SMD).

Componentes **THT**, ou de montagem por furo, possuem terminais que são inseridos através de furos na PCI e soldados no lado oposto (conforme mostrado na Figura 1). Esse método é mais antigo, facilita a soldagem manual e é ideal para prototipagem ou circuitos que demandam maior robustez mecânica. No entanto, componentes THT são maiores e ocupam mais espaço na placa.

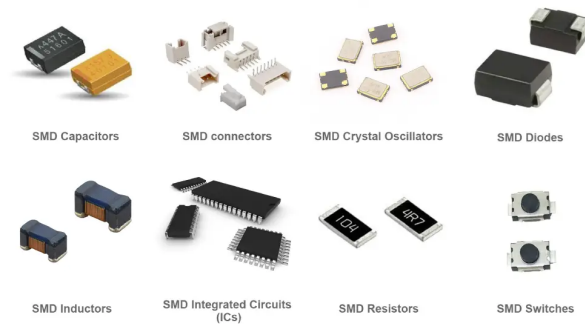
Já os componentes **SMD**, ou de montagem em superfície, são fixados diretamente na superfície da placa, sem a necessidade de furos (como pode ser visto na Figura 2). Essa tecnologia é predominante na eletrônica moderna, permitindo a fabricação de dispositivos menores, mais leves e com maior densidade de componentes na PCI, o que é ideal para a produção em massa automatizada.

Figura 1 – Exemplo genérico de Componentes THT



Fonte: <https://www.mokotechnology.com/pt/through-hole-components/>

Figura 2 – Exemplo genérico de Componentes SMD



Fonte: <https://www.mokotechnology.com/pt/a-beginners-guide-to-smd-components/>

A escolha entre um tipo e outro depende dos requisitos de tamanho, custo e complexidade da montagem, já que muitos componentes, como resistores, capacitores e transistores, podem ser encontrados em ambos os encapsulamentos.

2.3.2 Microcontroladores

Microcontroladores são pequenos computadores integrados em um único chip, contendo um processador (CPU), memória (RAM e ROM), e periféricos de entrada e saída (I/O). Eles são projetados para realizar tarefas específicas e dedicadas. Sua principal função é atuar como o "cérebro" de um sistema eletrônico, executando programas armazenados em sua memória para controlar o comportamento de outros componentes e responder a entradas de sensores. Em circuitos, são utilizados para processar dados de sensores, tomar decisões lógicas, controlar atuadores (como bombas, válvulas ou motores) e gerenciar a comunicação entre diferentes partes do sistema. No contexto de automação de irrigação, o microcontrolador lê dados de luminosidade e ativa a irrigação em momentos programados. A Figura 3 apresenta um exemplo de microcontrolador.

Figura 3 – Exemplo Microcontrolador Attiny13a SMD



Fonte: www.octopart.com

2.3.3 Sensores

Sensores são dispositivos que detectam e respondem a algum tipo de entrada do ambiente físico, como luz, calor, movimento, pressão, umidade, entre outros. Eles convertem essa grandeza física em um sinal elétrico. Sua função é fornecer dados sobre o ambiente ou o estado de um sistema para o microcontrolador ou outro circuito de controle. Em aplicações de circuitos, como no sistema de irrigação, um sensor de luminosidade (como um LDR - Light Dependent Resistor) pode ser usado para detectar a intensidade da luz ambiente, permitindo que o sistema decida os melhores horários para irrigar, otimizando a absorção de água pelas plantas e minimizando perdas por evaporação. A Figura 4 mostra um exemplo de sensor.

Figura 4 – Exemplo genérico de um Sensor de Luminosidade (LDR) THT.

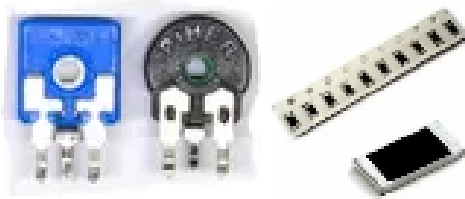


Fonte: www.octopart.com

2.3.4 Resistores e Potenciômetros/Trimpots

Um resistor é um componente passivo que oferece resistência à passagem da corrente elétrica. Sua principal característica é o valor de resistência, medido em Ohms (Ω). Potenciômetros e trimpots são tipos de resistores variáveis. O potenciômetro é ajustável manualmente pelo usuário, enquanto o trimpot é um resistor ajustável para calibração, geralmente com uma chave de fenda. A função de um resistor é limitar a corrente elétrica, dividir a tensão em um circuito, dissipar energia na forma de calor, ou polarizar transistores. Potenciômetros e trimpots permitem o ajuste da resistência em um circuito, o que pode ser usado para calibrar limiares de acionamento ou controlar volumes. No sistema de irrigação, um trimpot é utilizado com o LDR para calibrar o limiar de luminosidade que aciona o ciclo de irrigação. Ambos são componentes presentes em praticamente todos os circuitos eletrônicos para diversas finalidades. A Figura 5 mostra exemplos de resistores.

Figura 5 – Exemplo genérico de resistores SMD (à direita) e trimpot (à esquerda)

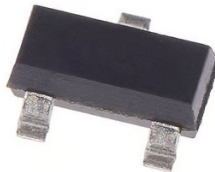


Fonte: www.mercadolivre.com

2.3.5 Transistores

Transistores são dispositivos semicondutores que podem atuar como chaves eletrônicas ou amplificadores de sinais. Existem diferentes tipos, como os Transistores Bipolares de Junção (BJTs - NPN e PNP) e os Transistores de Efeito de Campo (FETs). A função principal de um transistor é atuar como um interruptor controlado eletronicamente (ligar/desligar) ou amplificar pequenas correntes ou tensões para controlar correntes maiores. Em aplicações de circuitos, como no sistema de irrigação, um transistor NPN (como o MMBT2222A) é frequentemente usado para acionar componentes que demandam mais corrente do que o microcontrolador pode fornecer, como um relé, que por sua vez controla a válvula solenoide. Ele permite que um pequeno sinal do microcontrolador controle um dispositivo de maior potência. A Figura 6 ilustra um exemplo de transistor.

Figura 6 – Exemplo de um Transistor MMBT2222A SMD.



Fonte: www.octopart.com

2.3.6 Diodos

Diodos são componentes semicondutores que permitem que a corrente elétrica flua em uma única direção, bloqueando-a na direção oposta. Suas funções incluem retificar corrente (converter AC em DC), proteger circuitos contra inversão de polaridade, ou atuar como "diodos flyback" para proteger componentes contra picos de tensão reversa gerados por cargas indutivas. Em circuitos, um diodo flyback (como o 1N4007) é crucial quando se aciona componentes com bobinas (cargas indutivas), como relés ou válvulas solenoides. Ele "desvia" a energia armazenada

na bobina quando ela é desligada, protegendo o transistor ou o componente de controle de danos por picos de tensão. A Figura 7 apresenta um exemplo de diodo.

Figura 7 – Exemplo genérico de um Diodo SMD.

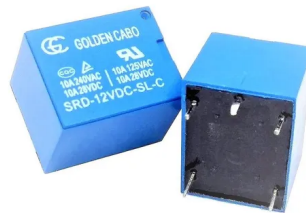


Fonte: www.octopart.com

2.3.7 Relés

Relés são chaves eletromecânicas que usam um eletroímã para abrir ou fechar um circuito. Eles permitem que um circuito de baixa potência (como o de um microcontrolador) controle um circuito de alta potência. A função principal do relé é isolar eletricamente e controlar cargas de alta potência (como motores, bombas ou válvulas) utilizando um sinal de controle de baixa potência. No sistema de irrigação, o relé é acionado pelo transistor, que por sua vez é controlado pelo microcontrolador. O relé então fecha o circuito da válvula solenoide, liberando a água. A Figura 8 mostra um exemplo de relé.

Figura 8 – Exemplo genérico de um relé



Fonte: www.mercadolivre.com

2.3.8 Válvulas Solenoide

Uma válvula solenoide é uma eletroválvula controlada eletricamente, consistindo em um solenoide (uma bobina de fio que atua como um eletroímã) e um corpo de válvula com um orifício. Sua função é controlar o fluxo de fluidos (líquidos ou gases) abrindo ou fechando a passagem em resposta a um sinal elétrico. São amplamente utilizadas em sistemas de irrigação automatizada para controlar o fluxo de água para as plantas. Quando energizada, a válvula abre,

permitindo a passagem de água; quando desenergizada, ela fecha. A Figura 9 ilustra uma válvula solenoide.

Figura 9 – Exemplo genérico de uma Válvula Solenoide.



Fonte: www.mercadolivre.com

Capacitores

Capacitores são componentes passivos que armazenam energia em um campo elétrico. São compostos por duas placas condutoras separadas por um material dielétrico isolante. A função dos capacitores é armazenar e liberar energia elétrica, filtrar ruídos em linhas de alimentação (capacitores de desacoplamento), estabilizar tensões, temporizar circuitos ou acoplar/desacoplar sinais em diferentes estágios de um circuito. Capacitores de desacoplamento são frequentemente usados em paralelo com reguladores de tensão e microcontroladores para filtrar ruídos de alta frequência e estabilizar picos transitórios na alimentação elétrica. A Figura 10 mostra um exemplo de capacitor.

Figura 10 – Exemplo genérico de Capacitor Cerâmico SMD



Fonte: www.octopart.com

2.3.9 Reguladores de Tensão

Reguladores de tensão são circuitos integrados ou discretos projetados para manter uma tensão de saída constante, independentemente das flutuações na tensão de entrada ou

na carga do circuito. Sua função é fornecer uma tensão de alimentação estável e limpa para outros componentes eletrônicos sensíveis à variação de tensão. São essenciais para alimentar microcontroladores e outros componentes lógicos que requerem uma tensão precisa (por exemplo, 5V) a partir de uma fonte de tensão mais alta ou instável (por exemplo, 12V). A Figura 11 apresenta um exemplo de regulador.

Figura 11 – Exemplo genérico de um Regulador de Tensão SMD



Fonte: www.octopart.com

2.3.10 LEDs (Diodos Emissores de Luz)

LEDs são diodos semicondutores que emitem luz quando uma corrente elétrica passa por eles na direção correta (polarização direta). A função dos LEDs é sinalizar o estado de um circuito (ligado/desligado, modo de operação, erro), iluminar ou indicar a presença de energia. São utilizados como indicadores visuais para o usuário, mostrando se o sistema está funcionando, se a irrigação está ativa, ou outros estados importantes. A Figura 12 mostra um exemplo de LED.

Figura 12 – Exemplo genérico de um LED Vermelho THT.



Fonte: www.octopart.com

3 TRABALHOS RELACIONADOS E DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO

A crescente preocupação com a sustentabilidade hídrica tem impulsionado a busca por soluções inovadoras para o reaproveitamento de recursos. Dentre as diversas fontes de água não convencionais, a água de condensação de aparelhos de ar-condicionado emerge como uma alternativa promissora.

A literatura científica tem explorado a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento dessa água em diferentes contextos e para diversas finalidades. A qualidade da água condensada, embora não seja potável, é geralmente superior à da água de reuso cinza (proveniente de chuveiros e lavatórios) e, por ser livre de cloro e sais minerais, torna-se ideal para aplicações específicas que não exigem potabilidade, como irrigação, limpeza e descargas sanitárias.

A pesquisa no campo dos sistemas de reúso tem avançado para além da simples coleta, incorporando tecnologias de automação e gerenciamento de energia, com o objetivo de otimizar os processos e torná-los mais eficientes e autônomos. Nesse contexto, o desenvolvimento de soluções compactas, de baixo custo e de fácil manutenção é fundamental para a ampla adoção desses sistemas, especialmente em ambientes com múltiplas unidades geradoras.

3.1 Análise Crítica dos Trabalhos Correlatos

Para contextualizar a inovação de nosso projeto, é fundamental analisar as contribuições e as lacunas dos trabalhos preexistentes que abordam o reuso da água de condensação.

3.1.1 O Sistema Autônomo de Irrigação de Jesus et al. (2024)

Um exemplo notável de avanço na área é o trabalho de (Jesus *et al.*, 2024), publicado na *Brazilian Journal of Production Engineering*. Os autores propuseram e desenvolveram um sistema completamente autônomo para a irrigação de hortaliças em ambientes urbanos, utilizando a água condensada de aparelhos de ar-condicionado. A inovação central de sua abordagem reside na autossuficiência energética, garantida pelo uso de painéis fotovoltaicos, e no controle preciso do processo por meio de um Arduino Uno.

Este projeto demonstra um expressivo potencial de economia hídrica e a capacidade de operar sem a necessidade de intervenção humana ou dependência da rede elétrica convencional. A implementação de um sistema de irrigação automático, aliado à captação de energia solar, representa um passo significativo para a sustentabilidade em pequenas hortas urbanas. No

entanto, a escolha do Arduino Uno e de módulos complementares como o RTC (DS3231) acarreta certas implicações. Embora sejam componentes robustos e de fácil programação, a sua implementação pode implicar em um maior consumo de energia, dimensões físicas mais consideráveis e um custo de hardware que, em comparação com soluções mais enxutas, pode ser elevado, especialmente em cenários que demandem múltiplas unidades controladoras.

Figura 13 – Teste prático do protótipo de irrigação automática utilizando água de condensação



Fonte: Jesus et al. (2024)

Na Figura 13, observa-se um teste prático do protótipo desenvolvido por Jesus et al. (2024). A montagem inclui uma garrafa PET sendo utilizada para simular a coleta da água condensada, conectada através de uma mangueira a um recipiente menor. Ao lado, visualiza-se a placa de controle com o Arduino e outros componentes eletrônicos, como relés e a bomba de água, dispostos sobre uma base de madeira. A presença de fiação e conexões demonstra a integração dos elementos para o funcionamento do sistema de irrigação automática proposto pelos autores.

3.1.2 A Avaliação do Reúso em Edificações Públicas por Soares, Souza et al. (2021)

Em outra frente, (Soares; Júnior; Silva, 2021), em artigo publicado na revista *Research, Society and Development*, investigaram o aproveitamento do condensado em edificações públicas no estado de Pernambuco. Este estudo focou na avaliação da viabilidade do uso dessa água para aplicações não potáveis, como limpeza de pisos, descargas sanitárias e rega de jardins. A

pesquisa trouxe dados importantes sobre o potencial de economia de água potável em larga escala, quantificando o volume de água que pode ser gerado em um ambiente institucional.

A contribuição principal deste trabalho reside na demonstração prática da aplicabilidade do reúso em um cenário real e de grande demanda hídrica. No entanto, o foco principal do estudo não foi a automação do controle do sistema. A ênfase foi dada à coleta e ao direcionamento da água, sem aprofundar em mecanismos de controle inteligentes que otimizassem o uso ou monitorassem o desempenho de forma autônoma. Essa abordagem, embora válida para a avaliação inicial do potencial, limita a eficiência e a escalabilidade do sistema em cenários onde a automação é crucial para reduzir a intervenção humana e maximizar a economia.

Figura 14 – Vista do jardim em frente ao prédio de sólidos



Fonte: Soares, Souza Júnior e Silva (2021)

Para ilustrar o cenário de aplicação em edificações públicas, a Figura 14 apresenta uma vista do jardim em frente ao prédio de sólidos, área que representa um dos potenciais locais para o reaproveitamento da água condensada de aparelhos de ar-condicionado. Essa imagem contextualiza visualmente a escala e o tipo de ambiente onde o estudo de Soares, Souza Júnior e Silva (2021) avaliou a viabilidade de uso desse efluente para fins não potáveis, como a irrigação paisagística.

3.2 As Lacunas Observadas e a Proposta do Projeto

Embora as iniciativas de (Jesus *et al.*, 2024) e (Soares; Júnior; Silva, 2021) demonstrem os benefícios do reúso da água de condensação, ainda persistem lacunas significativas que limitam sua adoção em larga escala. A principal delas é a ausência de soluções que sejam, ao mesmo tempo, compactas, de baixo custo e de fácil manutenção, fatores cruciais para a implementação em cenários com múltiplas unidades geradoras, como edifícios e *campi* universitários.

Para preencher essas lacunas, nosso projeto propõe uma solução otimizada que prioriza eficiência energética, redução de custos e facilidade de implementação. A seguir, detalhamos os aspectos que diferenciam nossa abordagem e a tornam aplicável em larga escala:

- **Miniaturização e Custo Reduzido do Hardware:** Diferentemente de projetos que utilizam o Arduino Uno, nossa solução adota o ATtiny13A, um microcontrolador com menor consumo de energia e dimensões físicas drasticamente reduzidas. Essa escolha estratégica diminui o custo total do hardware e é ideal para aplicações que não exigem grande poder de processamento ou muitas portas de I/O, tornando o sistema mais enxuto e replicável.
- **Eficiência Energética e Redução de Componentes:** Nossa arquitetura de alimentação de 12 V DC, regulada internamente para 5 V através do componente LD1117-5.0, elimina a necessidade de fontes de alimentação externas volumosas. Essa abordagem contribui para um sistema mais compacto, eficiente e integrado, otimizando o consumo de energia.
- **Otimização do Temporizador e Tolerância a Variações:** Para simplificar o sistema e reduzir custos, dispensamos o módulo RTC (Real-Time Clock), utilizando o oscilador interno do ATtiny13A para a temporização. Embora apresente uma imprecisão de $\pm 10\%$ em ciclos de 12 horas, essa margem é aceitável para a irrigação de *microgreens*, que não requer precisão temporal rigorosa. A simplicidade e o baixo custo de não usar um RTC externo compensam essa pequena variação¹.
- **Sensores Inteligentes e Otimização da Irrigação:** O sistema incorpora um LDR (Light Dependent Resistor), calibrado por um trimpot de $10k\Omega$, que permite ao sistema priorizar horários de menor insolação para a irrigação. Essa funcionalidade é crucial, pois evita a rápida evaporação da água durante os picos de sol, garantindo que o recurso seja absorvido de forma mais eficaz pelas plantas e maximizando a eficiência da irrigação.

¹ Mais detalhes no datasheet oficial do ATtiny13A: <https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/ATtiny13A-Data-Sheet-DS40002307A.pdf>

- **Controle Simplificado da Válvula Solenoide:** Para o acionamento da válvula solenoide de 12 V, empregamos uma arquitetura robusta e confiável que utiliza um transistor NPN e um diodo flyback 1N4007. Essa configuração garante o controle preciso da válvula e protege o circuito contra picos de tensão gerados pela carga indutiva, permitindo uma operação contínua e segura.

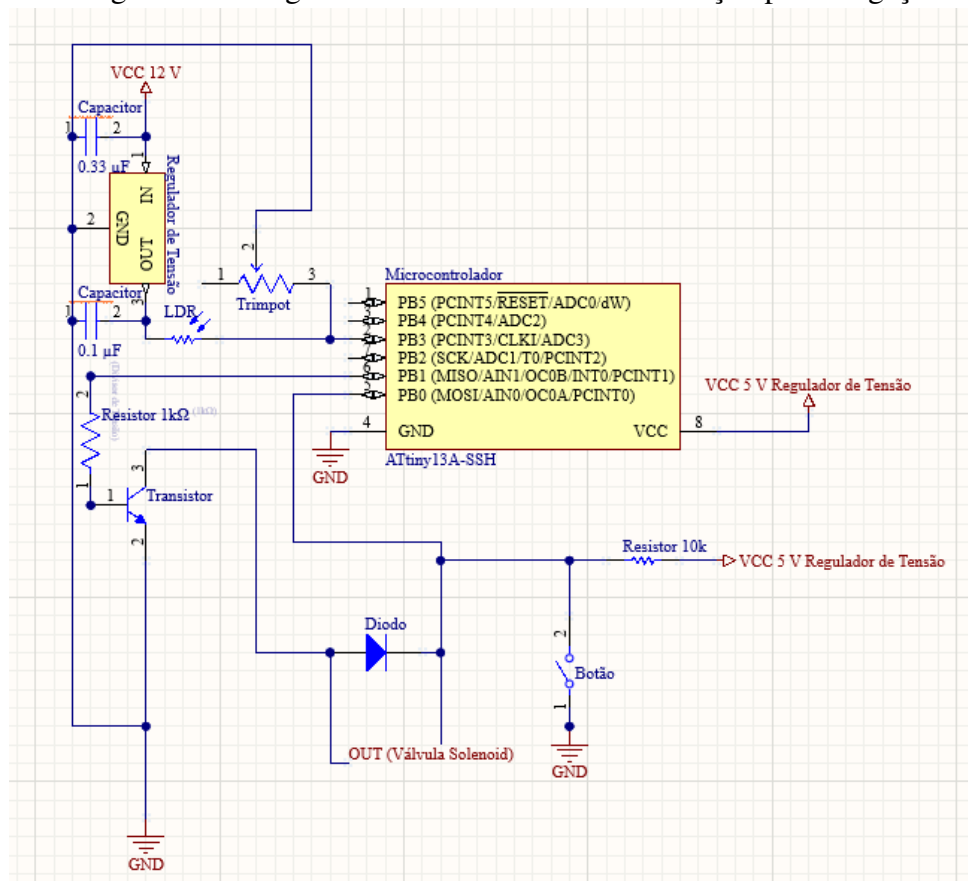
Ao focar em hardware compacto e de baixo custo, controle automatizado e estratégias de irrigação mais eficientes, nosso projeto se diferencia dos estudos anteriores. Ele avança da teoria e de projetos-piloto para um sistema prático, eficiente e replicável, facilitando a implementação do reuso da água em diversas aplicações, como hortas urbanas comunitárias e grandes edifícios institucionais.

4 PROJETO E METODOLOGIA

Este Capítulo detalha o desenvolvimento e funcionamento do sistema de irrigação automatizado com base em sensor de luminosidade, apresentando os aspectos técnicos do circuito, os componentes eletrônicos utilizados e a lógica empregada na sua construção. Através de diagramas explicativos e descrições precisas, evidencia-se a integração entre hardware e software para garantir eficiência, baixo consumo e praticidade no controle da irrigação.

4.1 Diagrama do Projeto

Figura 15 – Diagrama do Circuito de Automatização para Irrigação



Fonte: Adaptado de Altium Design (2025)

O sistema descrito na Figura 15 consiste em um circuito eletrônico baseado em um microcontrolador ATtiny13A, que atua sobre uma válvula solenoide de 12 V a partir da leitura da luminosidade ambiente. A alimentação principal de 12 V é conduzida ao regulador de tensão LD1117-5.0, produzindo uma saída estabilizada de 5 V para o ATtiny13A e demais componentes lógicos.

O sensor de luminosidade é composto por um LDR e um trimpot de $10\text{ k}\Omega$, montados em série entre 5 V e GND como divisor de tensão. O ponto médio desse divisor é conectado ao pino PB3 do ATtiny13A, onde o conversor analógico-digital lê o nível de luz para determinar as janelas de irrigação (amanhecer e entardecer).

A saída digital do pino PB0 do ATtiny13A aciona a base do transistor NPN MMBT2222A através de um resistor de $1\text{ k}\Omega$. Em saturação, o transistor fecha o circuito da bobina de um relé de 12 V, cuja outra extremidade está ligada à fonte de 12 V. Quando o relé é energizado, sua saída fecha o circuito hidráulico, liberando água pela válvula solenoide.

Um diodo 1N4007 é montado em antiparalelo à bobina do relé (cátodo ao positivo, ânodo ao coletor do transistor) para absorver picos de tensão reversa no desligamento (*flyback*), protegendo os semicondutores. Além disso, para permitir o reinício manual do microcontrolador, um circuito *pull-up* foi implementado, composto por um botão conectado entre o pino PB5 (Reset) e o GND, e um resistor de $10\text{ k}\Omega$ ligado entre o mesmo pino e o VCC de 5 V. Essa configuração garante que, enquanto o botão não é pressionado, o pino permaneça em nível lógico alto. Ao pressioná-lo, o circuito é fechado com o GND, levando o pino a nível lógico baixo e forçando o microcontrolador a reiniciar.

Para filtrar ruídos e estabilizar a tensão, capacitores cerâmicos de desacoplamento de $0,33\text{ }\mu\text{F}$ (na entrada do LD1117-5.0) e $0,1\text{ }\mu\text{F}$ (na saída) são posicionados em paralelo ao regulador. Essa configuração resulta em um sistema compacto, de baixo consumo e custo reduzido, ideal para aplicações de irrigação automatizada por sensor de luz.

4.2 Descrição de Componentes

- **Microcontrolador (ATtiny13A):** Microcontrolador ultracompacto de 8 bits da família AVR, adequado para leituras analógicas simples e acionamento de relés. Consome apenas dezenas de microamperes em modo de espera e ocupa 8 pinos de I/O, o suficiente para nosso sensor LDR, trimpot, transistor de saída e botão de ciclo manual.²
- **Sensor LDR (Light Dependent Resistor):** Resistor ôhmico cuja resistência varia inversamente à intensidade luminosa. Utilizado como *input* analógico para determinar os momentos ideais de irrigação—principalmente ao amanhecer e pôr do sol.³
- **Trimpot (Trimpotenciômetro $10\text{ k}\Omega$):** Resistor ajustável em curva linear, empregado em

² <https://octopart.com/pt/attiny13a-ssh-microchip-77761973>

³ <https://octopart.com/pt/02-ldr12-nte+electronics-122329573>

conjunto com o LDR como divisor de tensão. Permite calibrar o limiar de luminosidade que dispara o ciclo de irrigação. ⁴

- **Transistor bipolar NPN (MMBT2222A):** Chave eletrônica de uso geral, operando em saturação para conduzir correntes para a válvula a partir de pequenos sinais na base. Apresenta alta velocidade de comutação e baixa capacitância interna.⁵
- **Diodo Flyback (1N4007):** Diodo retificador em silício, instalado em antiparalelo à bobina do relé para proteger o transistor de picos de tensão reversa gerados no desligamento da carga indutiva. ⁶
- **Válvula Solenoide 12 V:** Eletroválvula projetada para aplicações de irrigação. Ao ser energizada, abre internamente a passagem de água, isolando eletricamente a parte de potência da área hidráulica.
- **Capacitores de Desacoplamento:** Cerâmicos de 0,33 μF (entrada) e 0,1 μF (saída), posicionados em paralelo ao regulador LD1117-5.0 para filtrar ruídos de alta frequência e estabilizar picos transitórios.^{7,8}
- **LED de Indicação:** Diodo emissor de luz que sinaliza o estado de ativação da válvula solenoide, facilitando a depuração e o acompanhamento visual do sistema. ⁹
- **Resistores:** Diversos valores utilizados para:
 - proteção de LEDs ($1k\Omega$ a $4,7k\Omega$);
 - composição de divisores de tensão com LDR e trimpot;
 - *bias* de base do transistor NPN ($10k\Omega$ típico);
 - circuito *pull-up* do pino de reset ($10k\Omega$).
- **Regulador de Tensão LD1117-5.0:** Regulador linear de 5 V a partir de 4.75-15 V DC, com *dropout* típico de 1 V. Fornece alimentação estável ao ATtiny13A e circuitos lógicos. Requer capacitores de desacoplamento para operação estável.

⁴ <https://octopart.com/pt/ps10mh40-103a3030-piher-135728682>

⁵ <https://octopart.com/pt/search?q=MMBT2222A¤cy=USD&specs=0>

⁶ <https://octopart.com/pt/search?q=1N4007-E3%2F54¤cy=USD&specs=0>

⁷ <https://octopart.com/pt/search?q=CL10B334KO8NNNC¤cy=USD&specs=0>

⁸ <https://octopart.com/pt/search?q=CL05B104KA5NNNC¤cy=USD&specs=0>

⁹ https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2782080945-kit-200-pecas-led-vermelho-alto-brilho-5mm-forte-12000-mcd-_JM

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente Capítulo detalha os resultados obtidos com o desenvolvimento e a experimentação do protótipo de sistema automatizado de irrigação, utilizando a água condensada de sistemas de climatização em um cenário residencial. A metodologia aplicada buscou validar a viabilidade técnica da solução, especialmente no contexto de escassez hídrica do semiárido e para o cultivo urbano.

5.1 Desenvolvimento e Testes do Protótipo

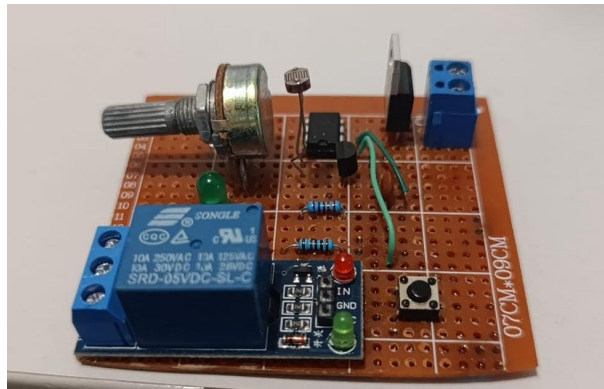
conforme os princípios e componentes debatidos no Capítulo de Projeto e Metodologia, foi desenvolvido um protótipo funcional do sistema automatizado de irrigação. A montagem incorporou elementos eletrônicos como o microcontrolador ATtiny13A, um sensor LDR para detecção de luminosidade, um potenciômetro chipsce de 50 k Ω , e uma válvula solenoide para o controle do fluxo de água. O uso de um módulo relé foi incluído de forma opcional para permitir a compatibilidade com válvulas de maior tensão. Se a válvula solenoide utilizada for de 5V, o relé pode ser descartado, simplificando ainda mais o circuito e reduzindo o custo total.

Além dos componentes principais, foram integrados dispositivos que guardam semelhança com os descritos no Capítulo de projeto e metodologia, como o potenciômetro THT da marca ChipsCE, o sensor LDR de 50 k Ω e o transistor BC548. Tais escolhas contribuíram para validar o comportamento funcional do circuito com alternativas acessíveis, mantendo a lógica construtiva do projeto.

O sistema foi alimentado por uma fonte de 12V DC. A decisão de utilizar um regulador de tensão LD1117-5.0 para estabilizar a tensão em 5V, em vez de um 7805, foi estratégica. O LD1117-5.0 é uma alternativa mais econômica e, ao mesmo tempo, atende às especificações de tensão e corrente do projeto de forma eficiente. A proposta priorizou uma arquitetura compacta, de baixo consumo energético e custo reduzido, com base na intensidade luminosa ambiente.

A Figura 16 ilustra a montagem final do protótipo, destacando os componentes citados e sua disposição do circuito. Os testes iniciais ocorreram em um ambiente residencial, utilizando água condensada proveniente de um sistema de ar-condicionado armazenada em um reservatório conectado por tubulações de PVC. Essa etapa prática permitiu validar o desempenho do sistema de detecção e controle, assegurando que o acionamento da válvula solenoide seguisse a lógica programada e otimizasse o aproveitamento da água coletada.

Figura 16 – Protótipo



Fonte: Arquivo pessoal (2025)

5.2 Avaliação do Uso da Água Condensada para Cultivo de *Microgreens*

Devido à ausência de plantas com rápido desenvolvimento ou à proximidade de árvores e gramados em relação ao ar-condicionado e ao reservatório em ambiente residencial, optou-se por focar na aplicação da água condensada para o cultivo de *microgreens*. Essa escolha foi estratégica, uma vez que *microgreens* possuem um ciclo de colheita curto, variando entre 7 e 15 dias, e demandam menor quantidade de água e espaço para seu cultivo, além de apresentarem alta densidade nutricional.

Para os testes, foram preparados quatro recipientes distintos, cada um com terra fertilizada e sementes de diferentes espécies de *microgreens*: rabanete de indra, repolho krishna, alface deva e ravi do seco. A irrigação foi realizada com a água condensada coletada do sistema de ar-condicionado.

Figura 17 – Microgreens



Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Os resultados observados na Figura 17 demonstraram que, entre as espécies testadas, apenas o rabanete de indra apresentou um desenvolvimento nítido e satisfatório, evidenciando sua adaptabilidade ao clima e à qualidade da água de condensação. As demais espécies não mostraram um crescimento significativo nas condições do experimento.

5.3 Implicações e Potencial de Comercialização

O sucesso no desenvolvimento do rabanete de indra com a água de condensação sugere que o investimento em sistemas de irrigação para hortaliças selecionadas é tecnicamente viável e pode ser um produto com potencial de comercialização. A implementação de tal sistema em ambientes como apartamentos, por exemplo, não apenas otimiza o uso de um recurso hídrico que seria descartado, mas também incentiva a produção orgânica de hortaliças em áreas urbanas, fortalecendo a autonomia alimentar e contribuindo para práticas de economia circular.

Além do cultivo de *microgreens*, estudos indicam que a água condensada pode ser efetivamente utilizada para a rega de outras formas de vegetação, como gramados — conforme discutido por Soares, Júnior e Silva (2021) no contexto de edificações públicas em Pernambuco — e, por extensão, também em árvores, desde que respeitadas as exigências específicas de cada espécie e ambiente.

Tabela 1 – Custo Estimado dos Componentes Chave do Protótipo

Componentes	Tipo	Custo Total (U\$)	Custo Total (R\$)	Data
Attiny13a-SSH	Microcontrolador	0.58	3,242	28/07/2025
MMBT2222A	Transistor	0.02	0,112	28/07/2025
LED Vermelho	LED	0.041	0,23	28/07/2025
1N4007-E3/54	Diodo Retificador	0.045	0,252	28/07/2025
02-LDR12	Sensor LDR	0.678	3,79	28/07/2025
PS10MH40-103A3030	Potenciômetro	0.63	3,52	28/07/2025
CL05B104KA5NNNC	Capacitor Cerâmico	0.005	0,028	28/07/2025
CL10B334KO8NNNC	Capacitor Cerâmico	0.015	0,083	28/07/2025
LD1117-5.0	Regulador de Tensão	0.125	0,698	28/07/2025
Custo Total Estimado		2,509	14,025	

Fonte: Autoria própria (2025)

Não só os benefícios ambientais e sociais, mas também a viabilidade econômica do sistema é um fator crucial para seu potencial de comercialização. A análise de custo dos componentes eletrônicos chave do projeto, detalhada na Tabela 1, revela um custo total estimado

de apenas U\$ 2,14, aproximadamente R\$ 11,96 (OCTOPART, 2025; MERCADO LIVRE, 2025). Este valor demonstra a capacidade de desenvolver uma solução de baixo custo, o que é fundamental para a acessibilidade e a escalabilidade do produto no mercado. A seleção criteriosa de cada componente, baseada em seu custo-benefício e funcionalidade, como o microcontrolador Attiny13a-SSH e o regulador de tensão LD1117-5.0, foi essencial para atingir essa economia, sem comprometer o desempenho do sistema.¹⁰

Esses resultados demonstram o potencial do sistema proposto para preencher a lacuna entre a crescente demanda por áreas verdes e a escassez de recursos hídricos, promovendo um modelo replicável de infraestrutura azul-verde capaz de contribuir para a redução das ilhas de calor e o fortalecimento da resiliência socioambiental em cidades semiáridas. A aplicabilidade do sistema se estende a hortas urbanas, campi universitários e edifícios institucionais, oferecendo uma solução enxuta e replicável para o manejo hídrico sustentável.

¹⁰ https://docs.google.com/spreadsheets/d/1NuYQVfdnxOYJpnUp7TYVAkwZg8bGECH2kOGQIvT_W2g/edit?usp=sharing

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema automatizado de irrigação capaz de reutilizar a água de condensação de sistemas de climatização, com foco na promoção da sustentabilidade urbana em regiões semiáridas. Para tanto, projetou-se e construiu-se um protótipo funcional fundamentado em componentes de baixo custo, entre os quais destacam-se o microcontrolador ATtiny13A e um sensor LDR para detecção de luminosidade. A arquitetura do sistema priorizou o baixo consumo energético, a compacidade e a facilidade de replicação, condições essenciais para garantir acessibilidade e escalabilidade. Os testes iniciais, realizados em ambiente residencial e utilizando água proveniente de ar-condicionado, atestaram a eficiência do conjunto de detecção e controle, confirmando que o acionamento da válvula solenoide otimiza o aproveitamento do volume coletado conforme a lógica de irrigação programada.

Em síntese, o sistema proposto representa uma solução inovadora para atenuar a tensão entre a crescente demanda por áreas verdes e a escassez hídrica típica de climas semiáridos. A adoção de uma infraestrutura azul-verde replicável contribui diretamente para a mitigação das ilhas de calor urbanas, para a melhoria dos indicadores de saúde pública ligados à qualidade ambiental e para o aumento da resiliência socioambiental em localidades submetidas a estresse climático. Ao demonstrar viabilidade técnica e econômica, este trabalho fornece subsídios práticos para a difusão de estratégias de economia circular e de gestão inteligente de recursos hídricos em centros urbanos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar o estudo da adaptabilidade de distintas espécies vegetais ao regime de irrigação com água de condensação, de modo a ampliar a diversidade botânica atendida pelo sistema. Sugere-se também a realização de experimentos de longa duração, destinados a avaliar a durabilidade dos componentes eletrônicos e hidráulicos sob variações climáticas e de uso prolongado. A integração de fontes de energia renovável, especialmente painéis fotovoltaicos, pode elevar o grau de autossuficiência do protótipo e reduzir ainda mais seu impacto ambiental. Paralelamente, o desenvolvimento de um software de monitoramento remoto e de um banco de dados operacional permitirá o acompanhamento em tempo real dos parâmetros de funcionamento, facilitando a manutenção preditiva e a análise de desempenho. Por fim, recomenda-se investigar técnicas de mineralização da água condensada e estabelecer diretrizes de monitoramento químico, bem como elaborar diretrizes técnicas e propostas de políticas públicas que fomentem a adoção dessa proposta em contextos urbanos vulneráveis.

REFERÊNCIAS

- AKBARI, H. Cooling our communities. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 79–83, 1997.
- BARBOSA, R.; OLIVEIRA, T.; SANTOS, A. Sistema autônomo de irrigação urbana com energia solar e arduino. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 8, n. 1, p. 15–25, 2024.
- HAALAND, C.; Van den Bosch, C. K. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, n. 4, p. 760–771, 2015.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- JESUS, A. F. de *et al.* Aproveitamento de água de ar condicionado com uso de arduino e painéis fotovoltaicos para irrigação automática de hortaliças. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 10, n. 2, p. 225–232, 2024.
- KAPOOR, S.; CHEN, L.; BROWN, J. Microgreens in urban agriculture: nutritional and spatial benefits. **Urban Agriculture & Regional Food Systems**, v. 9, n. 2, p. 125–134, 2023.
- LIMA, D.; PEREIRA, E.; SANTOS, F. Reaproveitamento de água condensada de aparelhos de ar-condicionado. **Revista de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 1, p. 22–30, 2020.
- MATA; FREITAS; RESENDE. **Avaliação de Políticas Públicas no Brasil: uma análise do semiárido**. [S.l.: s.n.], 2019. v. 4.
- MEDEIROS, A.; SILVA, B.; RAMOS, C. Automação na irrigação: eficiência e economia de água em hortas urbanas. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 12, n. 3, p. 101–109, 2018.
- MERCADO LIVRE. 2025. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/>.
- OCTOPART. **Electronic Components Search Engine | Find Parts Fast**. 2025. <https://octopart.com/>. Acesso em: 27 Jul. 2025.
- POISSON, N. **Engenharia do Século xxi: aplicações em sustentabilidade urbana**. São Paulo: Editora Poisson, 2020. v. 17.
- SOARES, M. C. D. M.; JÚNIOR, G. D. de S.; SILVA, S. R. da. Aproveitamento de água de

aparelhos de ar condicionado em prédio público do estado de pernambuco. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 16, p. e85101623372, 2021.

TAVAN, A.; SMITH, D.; LEE, H. Short-cycle vegetables: water use efficiency in urban environments. **Horticultural Science**, v. 56, n. 4, p. 323–330, 2021.