

PROTOTIPAGEM DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO INTELIGENTE COM SENSOR RESISTIVO E MICROCONTROLADOR RP2040

Kassem Mahmoud Hamdoun ¹; Matheus Adario Di Prado Milani ¹; Thiago Correa e Silva de Moraes ¹; Andressa Martins ²; Rodrigo França ²

¹ Aluno do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);
² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *A dificuldade de cultivar plantas no cotidiano é um impeditivo para que mais pessoas as utilizem como meios de decoração doméstica e é fato que um dos princípios básicos do cultivo é a necessidade de regar as plantas. Em vista disso, este trabalho tem o objetivo de fornecer uma alternativa de baixo custo para a automação da irrigação contendo um sensor de umidade e um sensor de nível de água do reservatório.*

Introdução

O uso de plantas como elemento de decoração em ambientes domésticos é uma prática amplamente valorizada por seus benefícios estéticos, psicológicos e ambientais. No entanto, a manutenção adequada dessas plantas, especialmente em rotinas urbanas cada vez mais aceleradas, representa um desafio para muitos indivíduos. Entre os principais fatores que dificultam o cultivo está a necessidade de rega frequente e adequada, uma tarefa simples, porém frequentemente negligenciada.

Nesse contexto, sistemas de irrigação automatizados têm se destacado como soluções viáveis para reduzir o esforço associado ao cuidado com plantas e promover a sustentabilidade doméstica. O desenvolvimento de tais sistemas tem se beneficiado do avanço de microcontroladores de baixo custo e da ampla disponibilidade de sensores analógicos, em especial os sensores de umidade do solo. Embora existam opções comerciais, muitas apresentam alto custo ou funcionalidades desnecessárias para aplicações residenciais simples, desta forma desenvolveu-se um diagrama de blocos para atingir as necessidades descritas, como mostrado na figura 1.

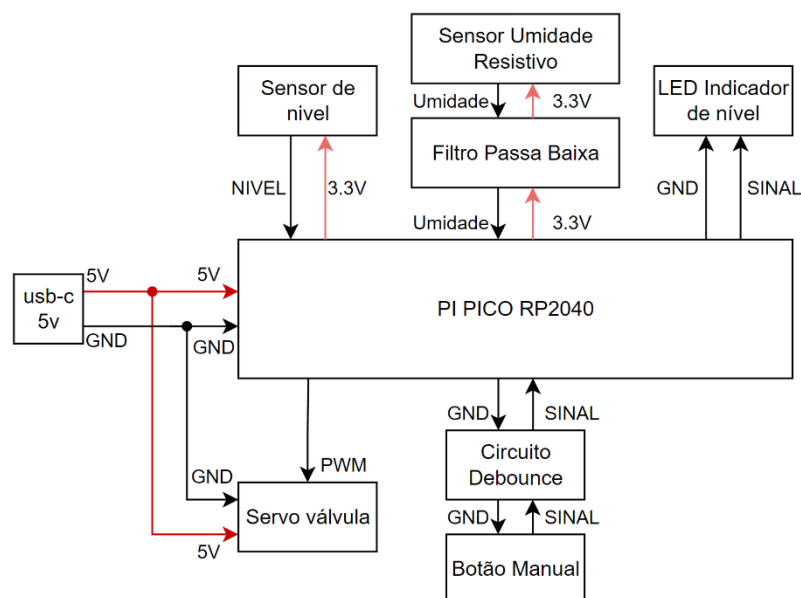


Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de irrigação.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de irrigação automatizado voltado ao uso doméstico. O sistema é baseado no microcontrolador RP2040, utilizando um sensor resistivo de umidade do solo para tomada de decisão quanto à irrigação, e um sensor de nível de água para evitar acionamentos indevidos quando o reservatório estiver vazio. O controle do fluxo de água é feito por meio de uma válvula acionada por servo motor. O protótipo foi projetado, calibrado e testado com sucesso em condições reais, com o objetivo de validar sua funcionalidade e aplicabilidade prática.

Material e Métodos

Desenvolvimento do sensor de umidade:

Para medir a umidade do solo, utilizou-se um sensor resistivo que se trata de dois eletrodos posicionados a uma distância fixa um do outro. Um deles é alimentado com 3,3 V através de um resistor de 10 k Ω e o outro eletrodo é aterrado formando um divisor resistivo entre o resistor e a resistência da terra. Devido à natureza da variação da umidade ser extremamente lenta, projetou-se um filtro com 30 Hz de frequência de corte para garantir que a frequência da rede elétrica de 60 Hz não perturbasse a medição, determinamos um valor de 1 k Ω para resistência. Para calcular o valor do capacitor, aplicou-se a equação 1. Sendo ω a frequência (Hz) e R a resistência (Ω).

$$C = \frac{1}{2\pi\omega R} = 5.3\mu F \quad (1)$$

Escolheu-se o valor de 4,7 μF por ser o valor mais próximo disponível, obtendo-se uma frequência de corte de 33.86Hz. O esquema elétrico do sensor é mostrado na figura 2.

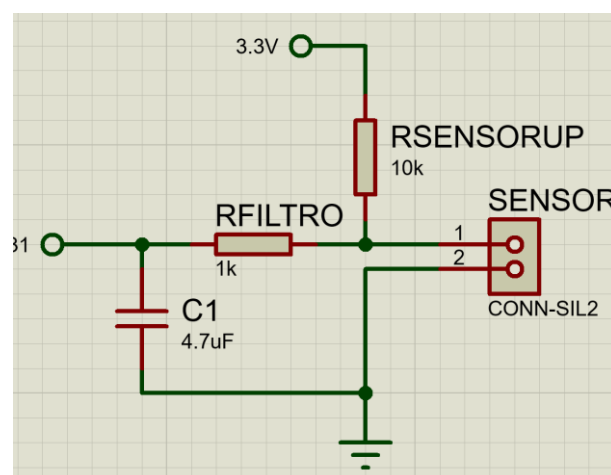


Figura 2 - Esquema elétrico do sensor de umidade.

Desenvolvimento do sensor de nível:

Este sensor foi utilizado para determinar se o nível de água no reservatório era suficiente para a operação de rega, permitindo o acionamento da válvula solenoide e impedindo que, caso o reservatório esvazie, a válvula seja constantemente acionada.

Para projetar este sensor foi utilizado como referência o circuito apresentado por Braga (2025). Ele utiliza a ideia de que a partir da corrente de coletor definida por um resistor entre a alimentação de 3,3 V e o coletor do transistor BC547 pode-se determinar a corrente de base necessária para saturar o transistor impondo uma tensão de coletor próxima de 0 V.

O valor da resistência de coletor escolhido foi de 10 kΩ, pois limita a corrente máxima de coletor em um valor baixo (próxima de 330 μA). Sabendo-se que o ganho típico do BC547 é de 200 vezes com um fator de Overdrive de 10 vezes pode-se determinar que a corrente de base necessária é de 15 μA, com esta corrente podemos determinar a resistência máxima através da equação 2.

$$\frac{3,3 - 0,7}{15\mu} = 173k\Omega \quad (2)$$

A resistividade da água tratada é em torno de 2 kΩ/cm (CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, 2025). Considerando a distância dos eletrodos como 5 cm, a resistência esperada do sensor de nível de água é de 10 kΩ. Sendo assim, qualquer valor de resistência escolhida abaixo de 163 kΩ seria válido, porém para reduzir o número de modelos de resistores diferentes escolhemos o valor de 10 kΩ. O esquema elétrico do sensor é mostrado na figura 3.

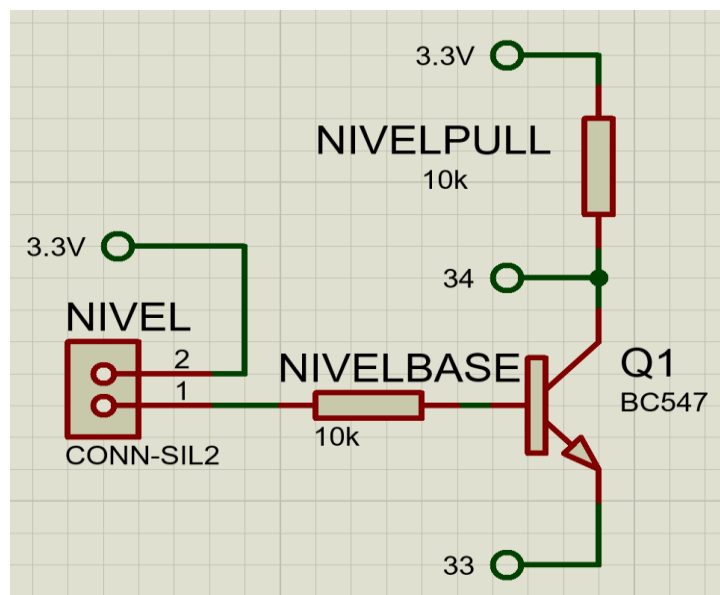


Figura 3 - Esquema elétrico do sensor de nível.

Debounce do botão:

Como utilizou-se o sinal do botão como uma interrupção, não é possível utilizar um *debounce* via software. Desta forma, determinou-se um filtro RC passa-baixas para remover o período transitório, a partir de WÜRTH ELEKTRONIK (2021) determinou-se os valores para o circuito de *debounce* como mostrados no esquema elétrico da figura 4.

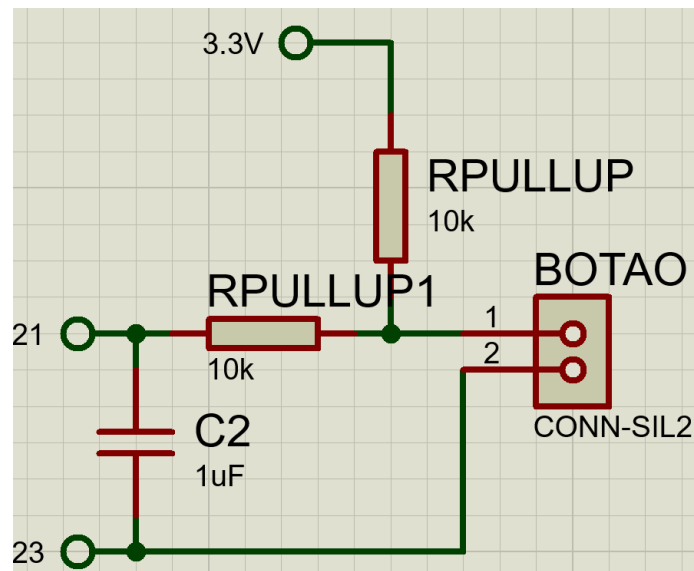


Figura 4 - Esquema elétrico do debounce do botão.

Controle do Servo Motor:

O servo motor escolhido foi o MG996R (figura 5), pois possui um alto torque (9,4 kg/cm) ainda mantendo um baixo custo. Devido à válvula esférica escolhida, é necessário um movimento de 90°, permitindo utilizar uma redução de 2:1, dobrando o torque.

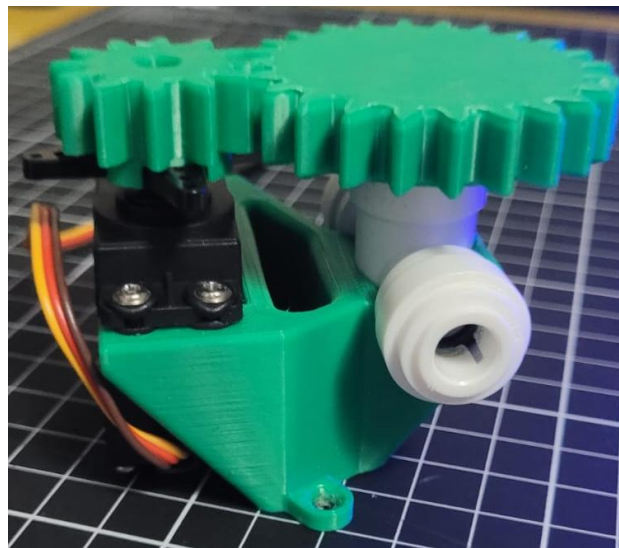


Figura 5 - Motor MG996R.

Este servo motor é controlado através de um sinal PWM com um período de 20 ms, a posição angular é definida pela largura do pulso, este valor é geralmente entre 1 ms e 2,5 ms representado 0° e 180°, respectivamente (TOWER PRO, 2025). Porém, por meio de testes foi definido que o ângulo de 0° é obtido com a largura de pulso de 0,5 ms e o ângulo de 180° com 2,5 ms.

Circuito completo:

O esquema elétrico do circuito completo é apresentado na figura 6.

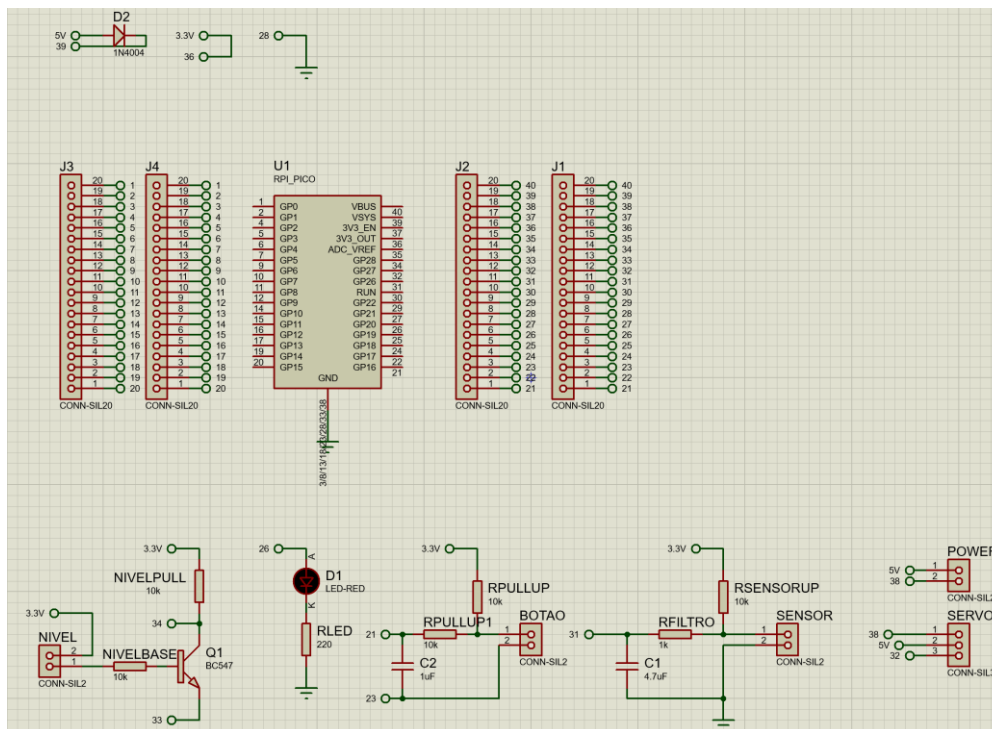


Figura 6 - Esquema elétrico do circuito completo.

PCB:

Para o projeto final, o circuito foi montado em uma PCB (figura 7) de modo a economizar espaço. Ela foi projetada no Software Protheus.

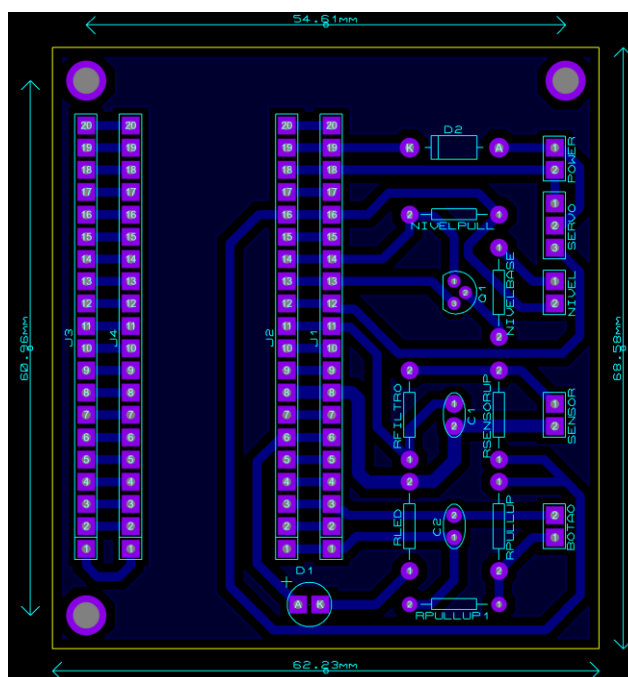


Figura 7 - PCB vista no Software Protheus.

Lista de materiais:

- 1 x Pi Pico RP2040.
- 1 x servo MG996R.

- 1 x Registro esférico 8mm.
- 1 x LED vermelho.
- 1 x conector fêmea tipo c.
- 1 x push-button.
- 1 x resistor 220 Ω .
- 1 x resistor 1 k Ω .
- 5 x resistores 10 k Ω .
- 1 x Capacitor 1 μ F.
- 1 x Capacitor 4,7 μ F.

Programação:

O programa funciona a partir de interrupções, deixando o Pi Pico em um estado de consumo energético menor, sem a necessidade de um loop infinito.

O funcionamento da programação foi separado em 3 interrupções:

- 1) Quando o botão é acionado, uma interrupção de GPIO é gerada, o que força a rega, caso tenha água suficiente no reservatório;
- 2) Utiliza-se uma interrupção de timer para medir a umidade do solo e, se necessário, regar a planta caso tenha água suficiente no reservatório. O tempo utilizado foi de 30 s para testes, porém, devido a lenta variação da umidade do solo, um valor final de 30 minutos foi mais que suficiente;
- 3) Quando o programa detecta que o sensor de nível foi acionado, o GPIO é interrompido e o indicador de nível é atualizado.

Para realizar a rega, foi necessário gerar um sinal PWM com uma frequência de 50Hz e variar o *duty-cycle* para abrir e fechar a válvula. Para uma explicação mais detalhada, analisar os comentários feitos no arquivo “ProjetoPlanta.c”.

Calibração da válvula solenoide:

De modo a calcular o tempo necessário para a válvula permanecer aberta para um determinado volume, foi realizado um experimento onde o vaso foi colocado sobre uma balança e o tempo que a válvula permaneceu aberta cronometrado. Desta forma, foi possível determinar a vazão da válvula, porém, como utilizamos um reservatório que funciona com base na força gravitacional exercida sobre a água, o nível do reservatório afeta a vazão. Por conta disso, traçou-se duas curvas: a primeira representa a vazão de quando o reservatório estava cheio e a segunda a vazão de quando o reservatório estava em seu valor mínimo, desta forma foi obtido os gráficos da figura 8.

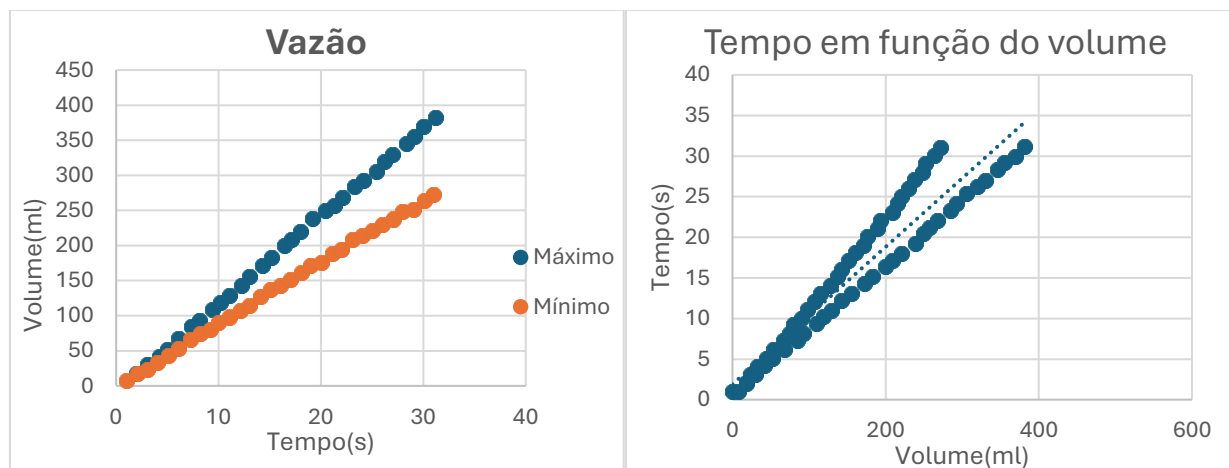


Figura 8 – Gráficos representando a vazão do reservatório cheio (azul) e quase vazio (laranja).

A partir da linha de tendência do tempo em função do volume (considerando os pontos de ambas as curvas), determinou-se que a fórmula do intervalo de tempo necessário em função do volume desejado é dada pela equação 3. Sendo t o tempo (s) e V o volume (mL).

$$t = 0,0847 \cdot V + 1,8875 \quad (3)$$

Calibração do sensor de umidade:

O intuito deste sensor é determinar a umidade do solo a partir de um sinal de tensão analógico. Assim, a parte mais importante é determinar a relação entre os valores analógicos de tensão e o percentual de umidade do solo, para isso foi proposto um experimento usando uma massa de terra conhecida (112,1 g) e seca, definimos a hipótese de a terra ter um grau de umidade de 0% (este material esteve guardado durante 2 meses sem o contato direto com água). Para uma calibração mais precisa, o correto é determinar a umidade exata deste solo inicial. A massa de terra foi adicionada em pequenos incrementos da massa total na água e a terra foi misturada para garantir que a umidade do solo fosse constante. Desta forma, foi obtido o gráfico apresentado na figura 9.

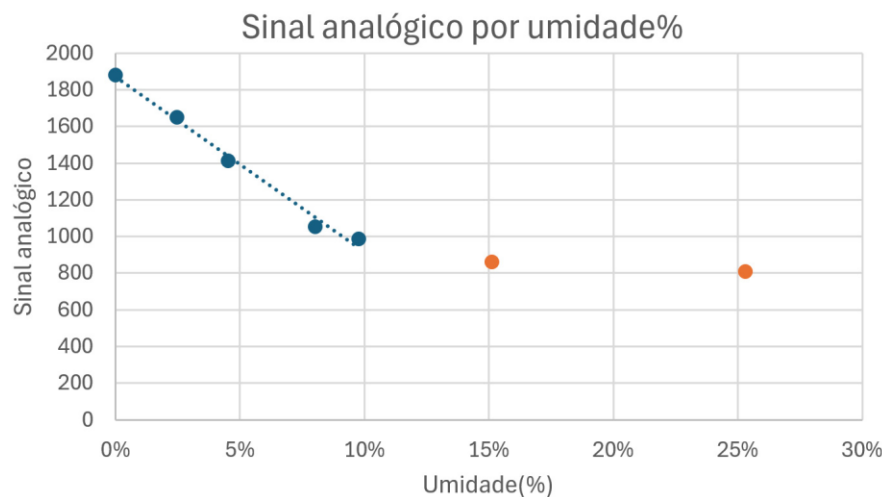


Figura 9 - Gráfico do sinal de tensão em função da umidade.

A partir da análise dos pontos obtido verifica-se que entre 0% e 10% o comportamento é linear e pode ser modelado pela equação 4. Sendo U a umidade percentual (%) e B o sinal analógico lido pelo microcontrolador (adimensional).

$$B = 1870,6 - 9562,6 \cdot U \quad (4)$$

Resultados e Discussão

Montagem do sistema completo:

Após todos os estudos e dimensionamentos realizados, o sistema de irrigação montado ficou como o apresentado na figura 10.



Figura 10 - Montagem final.

Teste experimental em vaso com solo real:

O sistema automatizado de irrigação foi implementado e testado em um vaso contendo terra agrícola real. O funcionamento demonstrou-se correto e consistente: a válvula solenoide era acionada somente quando o sensor de umidade indicava solo abaixo do limiar especificado, mobilizando a irrigação conforme o esperado. Em todas as execuções observou-se comportamento estável do circuito de controle.

Calibração do sensor de umidade do solo:

Para calibrar o sensor resistivo de umidade, adicionou-se incrementalmente água a uma amostra de solo seco com massa conhecida e registrou-se a tensão de saída correspondente. A curva experimental resultante revelou forte correlação (próxima de linear) entre a tensão lida e o teor de umidade do solo, permitindo derivar uma equação de calibração específica. Essa adaptação é essencial, pois embora sensores resistivos de umidade sejam indicados para sistemas automatizados, sua resposta real depende das propriedades do solo em teste e necessita de ajuste para leituras precisas.

Calibração da válvula solenoide:

A válvula solenoide foi calibrada medindo-se o volume de água dispensado para diferentes tempos de abertura. Os dados experimentais ajustaram-se bem a uma relação aproximada da linearidade entre tempo de abertura e volume irrigado, gerando uma fórmula empírica de doseamento. Observou-se que a vazão efetiva variou conforme o nível de água no reservatório, pois, de acordo com princípios de mecânica dos fluidos, maior altura da coluna d'água produziu pressão mais alta na válvula. Esse comportamento implicou considerar o valor médio das curvas de vazão “mínima” e “máxima” do reservatório, de modo reduzir a variação de volume.

Desempenho do sistema e confiabilidade operacional:

Nos testes práticos, o sistema acionou a válvula exatamente nas condições previstas pelo algoritmo de controle, respeitando as rotinas de interrupção programadas no firmware do microcontrolador. Não foram detectados acionamentos indevidos ou leituras erradas, indicando

robustez na implementação. O sensor de nível de água funcionou conforme o esperado: ele bloqueou o acionamento da válvula quando o reservatório estava vazio, evitando operação sem a presença de água e protegendo os componentes. Em todas as simulações, a válvula foi energizada apenas em resposta às condições corretas de umidade e nível, comprovando o atendimento aos objetivos de irrigação automatizada. Porém, houve vazamentos nas junções pelas quais a água passou.

Torque do atuador e eficiência energética:

O servo MG996R apresentou torque suficiente para operar a válvula esférica, sem travamentos mecânicos. Segundo o fabricante, esse servo oferece torque de $\sim 9,4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ a 4,8 V, patamar adequado à inércia do conjunto de tubulação e válvula. Na prática, o sistema permaneceu estável ao longo de todo o período de operação contínua, sem variações de desempenho ou quedas na eficiência.

Conclusões

O desenvolvimento do sistema de rega automatizada utilizando sensores de umidade e nível de água, controlado por um microcontrolador Pi Pico RP2040, demonstrou ser uma solução eficaz, de baixo custo e com bom desempenho para aplicações em jardinagem automatizada. A construção e calibração dos sensores permitiram uma leitura confiável das condições do solo e do reservatório, sendo essenciais para o acionamento correto da válvula solenoide.

A escolha do servo motor MG996R mostrou-se adequada devido ao seu alto torque e custo acessível, sendo capaz de operar a válvula esférica de forma precisa. A implementação do controle via PWM e a utilização de interrupções tornaram o sistema eficiente em termos de consumo energético e responsividade.

Além disso, os experimentos de calibração garantiram uma boa correspondência entre os dados analógicos dos sensores e as condições reais do sistema, permitindo ajustes finos no tempo de abertura da válvula e na leitura da umidade.

O projeto apresenta potencial para futuras melhorias, como a adição de conectividade remota e integração com plataformas de IoT. Além disso, é essencial que trabalhos futuros considerem algum meio de vedação eficaz para evitar vazamentos.

Assim, conclui-se que o sistema desenvolvido cumpre seu objetivo de automatizar a irrigação de forma inteligente, eficiente e adaptável às condições do ambiente.

Referências Bibliográficas

- BRAGA, Newton C. *Alarme de Água ou Umidade (CIR3147)*. Instituto Newton C. Braga, [s.d.]. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/banco-de-circuitos/11310-alar-me-de-agua-ou-umidade-cir3147.html>. Acesso em: 8 maio 2025.
- CONDUTIVIDADE ELÉTRICA: o guia definitivo. *Digital Water*, [s.d.]. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/condutividade-eletrica-guia-definitivo/>. Acesso em: 8 maio 2025.
- WÜRTH ELEKTRONIK. *Contact debounce circuit for switches*. Waldenburg: Würth Elektronik, 2021. (Support Note, SN015). Disponível em: https://www.wer-online.com/catalog/media/o185480v410%20SN015_Contact%20debounce%20circuit%20for%20switches.pdf. Acesso em: 8 maio 2025.
- TOWER PRO. *MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo*. [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: https://www.handsontec.com/dataspecs/motor_fan/MG996R.pdf. Acesso em: 8 maio 2025.

- RASPBERRY PI. *Pico series*. Raspberry Pi Documentation, 2025. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/pico-series.html>. Acesso em: 27 jun. 2025.
- FRANÇA, Rodrigo. *Aula 05: Interrupção de Hardware*. Material da disciplina ECA409 – Microcontroladores e Sistemas Microcontrolados. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia, [s.d.].
- FRANÇA, Rodrigo. *Aula 07: Conversor Analógico Digital (ADC)*. Material da disciplina ECA409 – Microcontroladores e Sistemas Microcontrolados. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia, [s.d.].