CAPÍTULO 2

EQUIPAMENTOS, SENSORES, ATUADORES E CONTROLADORES NO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADO

1. INTRODUÇÃO À HARDWARE E INSTRUMENTAÇÃO EM IRRIGAÇÃO IOT

A automação do manejo de irrigação exige uma infraestrutura física composta por equipamentos eletrônicos, hidráulicos e mecânicos capazes de interagir diretamente com o ambiente agrícola. Enquanto os protocolos de rede e os softwares de backend gerenciam o fluxo lógico de informações e as telas de interface fornecem o controle ao operador, são os sensores, controladores e atuadores que traduzem instruções virtuais em ações físicas no campo.

No sistema de irrigação automatizado hipotético apresentado no Capítulo 1, a instrumentação física desempenha um papel central em todas as etapas do ciclo de controle. Um sistema de irrigação inteligente opera em um ciclo contínuo de percepção, processamento e ação. Na etapa de percepção, os sensores capacitivos medem variáveis físicas do solo e a umidade nas parcelas experimentais. Na etapa de processamento, os controladores microprocessados analisam essas medições, sincronizam os dados com o servidor central via requisições HTTP e decidem a abertura das válvulas. Por fim, na etapa de ação, os atuadores elétricos e hidráulicos chaveiam relés de potência, operam a motobomba principal de 5,5 CV e acionam as válvulas solenoides dos setores agrícolas (Melão, Tomate, Pimentão e Estufa 01).

Neste capítulo, são detalhados as principais plataformas de hardware embarcado, os sensores ambientais edáficos, os atuadores elétricos e hidráulicos, as câmeras de inspeção visual e os arranjos experimentais de laboratório utilizados no projeto e na construção do sistema de irrigação automatizado com Internet das Coisas (IoT).

2. CONTROLADORES E PLATAFORMAS EMBARCADAS (EDGE COMPUTING)

O controlador embarcado é o cérebro eletrônico do nó de campo. Ele é responsável por executar o algoritmo de controle de borda, ler os sinais dos sensores locais, acionar os relés e comunicar-se via rede sem fio ou cabeada com o servidor central HTTP em Python Flask.

2.1. Microcontrolador ESP32 e seu Papel no Nó de Campo

O microcontrolador ESP32 consolida-se como a principal plataforma de computação em névoa e borda (Edge Computing) no sistema de irrigação proposto. Equipado com um microprocessador Xtensa Dual-Core de 32 bits operando a frequências de até 240 MHz, o ESP32 integra nativamente conectividade Wi-Fi 802.11 b/g/n e Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE. A Figura 1 ilustra a estrutura física do módulo ESP32 utilizado no nó de controle do sistema.

Figura 6: Módulo microcontrolador ESP32 com conectividade Wi-Fi e Bluetooth integrada para nós de controle de irrigação.



No sistema de irrigação automatizado hipotético, o ESP32 desempenha a função de nó mestre de borda. A cada 10 segundos, seu firmware em C++ dispara uma requisição HTTP do tipo GET /estado-geral para o servidor Flask. O microcontrolador interpreta o documento JSON retornado pelo backend e altera o nível lógico de seus pinos de saída digital GPIO para acionar a bobina da motobomba principal e as bobinas das válvulas solenoides dos quatro setores agrícolas.

O ESP32 possui dois conversores analógico-digitais (ADC) SAR de 12 bits para leitura dos sensores capacitivos de umidade edáfica (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024a,b, 2023). Contudo, o fabricante alerta que os canais do ADC2 apresentam restrições de uso quando a conectividade Wi-Fi está ativa. Assim, deve-se especificar cuidadosamente os pinos GPIO do ADC1 para garantir leituras analógicas ininterruptas e confiáveis. O microcontrolador possui pinos com suporte a interrupções externas para medidores de vazão e canais PWM para controle de motores. Sua capacidade de chavear modos de baixo consumo (Deep Sleep) viabiliza o uso de nós autônomos alimentados por pequenas baterias recarregáveis no campo (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010; BAYIH et al., 2022).

2.2. Arduino UNO com Ethernet Shield W5100 para Ambientes com Ruído RF

Em cenários rurais onde a infraestrutura sem fio sofre com interferências eletromagnéticas severas provocadas pela partida de motores elétricos trifásicos ou por grandes estruturas metálicas de pivôs centrais, utiliza-se a plataforma Arduino UNO acoplada a um módulo Ethernet cabeado W5100 como alternativa de conexão física resistente a ruídos.

No nó de campo cabeado, o Arduino UNO atua como cliente HTTP via rede local RJ45. Devido às limitações de memória RAM do microcontrolador ATmega328P (2 KB de RAM), a comunicação é otimizada para enviar requisições compactas e decodificar respostas JSON enxutas, garantindo que o acionamento dos relés de potência ocorra com total estabilidade mesmo sob severas interferências elétricas.

3. SENSORES AGRÍCOLAS DE CAMPO E COLETA EDÁFICA

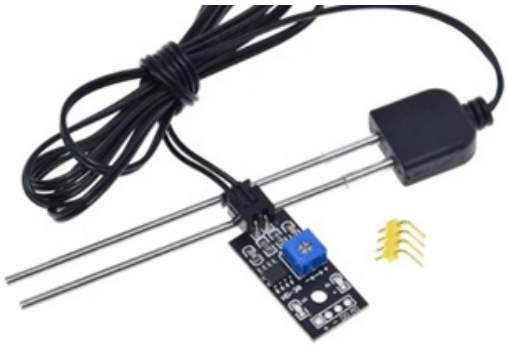
A coleta precisa de dados ambientais é indispensável para evitar tanto o estresse hídrico da cultura por subirrigação quanto o desperdício de recursos e a lixiviação de nutrientes por superirrigação.

3.1. Sensores de Umidade de Solo Capacitivos

Os sensores de umidade do solo são transdutores desenvolvidos para estimar a lâmina de água contida nos poros da matriz edáfica. Diferente dos sensores resistivos convencionais, que sofrem corrosão acelerada por eletrólise e oxidação das hastes metálicas em contato com o solo salino, os sensores de umidade do solo capacitivos operam pela variação da constante dielétrica do meio. A Figura 2 ilustra o sensor capacitivo de umidade do solo empregado nas parcelas agrícolas.

No experimento agrícola exibido no painel de estado atual do sistema (Capítulo 1), esses sensores são posicionados nas doze posições físicas das parcelas de amostragem ao longo das linhas de cultivo. O circuito do sensor capacitivo gera um sinal de alta frequência e mede a alteração na capacitância provocada pela presença de água, já que a constante dielétrica do ar é aproximadamente 1, a do solo seco varia entre 3 e 5, e a da água pura é cerca de 80 (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980; EVETT et al., 2012).

Figura 7: Sensor de umidade do solo capacitivo utilizado para amostragem edáfica em tempo real.



O sinal analógico de saída (variação de tensão) é lido pelos pinos ADC do microcontrolador ESP32. É imperativo ressaltar que a conversão do sinal elétrico em umidade volumétrica exige calibração específica e criteriosa (NAGAHAGE; NAGAHAGE; FU-JINO, 2019; QU et al., 2015). Textura, salinidade, densidade, temperatura e a qualidade do contato sensor-solo influenciam drasticamente a medição (LI et al., 2022; TRACY et al., 2020), demandando validação rigorosa e periódica em condições reais de campo.

4. ATUADORES HIDRÁULICOS E DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO ELÉTRICO

Os atuadores são os elementos finais de controle que convertem os sinais de comandos emitidos pelos microcontroladores em trabalho físico, promovendo o deslocamento de fluídos e o acionamento de potências elétricas elevadas.

4.1. Válvulas Solenoides Hidráulicas por Setor

A válvula solenoide é um atuador eletromecânico utilizado para interromper ou liberar a passagem de água nas tubulações dos setores de irrigação. Ela é composta por uma bobina elétrica (solenoide) e um corpo de válvula com diafragma interno. A Figura 3 ilustra uma válvula solenoide hidráulica para uso agrícola.

No sistema de irrigação automatizado, quatro válvulas solenoides são instaladas na tubulação principal de recalque, correspondendo à Solenoide 1 (Setor de Melão), Solenoide 2 (Setor de Tomate), Solenoide 3 (Setor de Pimentão) e Solenoide 4 (Estufa 01). Quando a bobina da solenoide é energizada pelo módulo relé do ESP32, um êmbolo metálico interno abre o orifício de alívio de pressão. O fechamento e a abertura hidraulicamente controlados da válvula amortecem mudanças abruptas de fluxo, evitando o golpe de aríete na rede hidráulica – um pico transitório de pressão (CHAUDHRY, 2014; WY-LIE; STREETER; SUO, 1993). Evitar a operação contínua da motobomba principal contra válvulas fechadas é igualmente vital, a fim de prevenir danos severos ao conjunto motobomba por cavitação ou operação em fluxo zero (KARASSIK et al., 2008; STEPHENSON, 1989).

Figura 8: Válvula solenoide de controle hidráulico para direcionamento do fluxo de água nos setores de plantio.



4.2. Motobomba Hidráulica Principal de Pressurização

A bomba hidráulica é o equipamento de pressurização responsável por captar a água do reservatório ou poço artesiano e recalcá-la até os emissores de irrigação (gotejadores ou aspersores). A Figura 4 apresenta a bomba hidráulica centrífuga acoplada ao sistema.

A motobomba principal do sistema hipotético possui potência de 5,5 CV alimentada em tensão trifásica de 220V. Sua operação é integrada logicamente às válvulas solenoides: a bomba somente é ativada pelo backend e pelo controlador ESP32 quando ao menos uma das quatro válvulas solenoides estiver aberta, evitando a pressurização com tubulação

fechada (operação contra válvula fechada), o que causaria sobreaquecimento do rotor e queima do motor elétrico.

Figura 9: Bomba hidráulica centrífuga de 5,5 CV acoplada ao sistema de pressurização de água.



4.3. Módulos Relé e Contatores Magnéticos de Potência

Para que os sinais de controle de baixa tensão (3.3V DC emitidos pelo ESP32) consigam acionar equipamentos de alta potência (solenoides de 24V e motobombas de 220V/380V), é indispensável utilizar elementos de isolamento galvânico e chaveamento de potência. A Figura 5 ilustra o módulo relé optoacoplado e a contatora magnética industrial empregados no painel de comando elétrico.

Figura 10: Módulo relé optoacoplado (esquerda) e contatora magnética de potência (direita) para isolamento elétrico e acionamento seguro dos motores.





O módulo relé optoacoplado utiliza um LED interno e um fototransistor para isolar totalmente o circuito lógico do microcontrolador ESP32 das tensões dos atuadores. Os contatos secos do relé chaveiam a bobina de comando da contatora magnética industrial. A contatora, por sua vez, fecha os contatos trifásicos de alta corrente que alimentam o motor elétrico da motobomba de 5,5 CV, garantindo a proteção contra sobrecarga por meio de relés térmicos acoplados.

REFERÊNCIAS

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. **The Internet of Things**: A survey. [S.l.: s.n.], 2010. v. 54, p. 2787–2805. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.

BAYIH, Tesfaye et al. **Utilization of Internet of Things and Wireless Sensor Networks in Agriculture**. [S.l.]: Springer, 2022.

CHAUDHRY, M. Hanif. **Applied Hydraulic Transients**. 3. ed. New York: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-1-4614-8538-4.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series Datasheet**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.html>.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Technical Reference Manual**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://documentation.espressif.com/esp32_technical_reference_manual_en.html>.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-WROOM-32 Datasheet**. [S.l.], 2023. Disponível em:<https://documentation.espressif.com/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf>.

EVETT, Steven R. et al. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. **Agricultural Water Management**, v. 104, p. 1–9, 2012. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.12.002.

KARASSIK, Igor J. et al. **Pump Handbook**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

LI, X. et al. Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11538, 2022. DOI: 10.3390/su141811538.

NAGAHAGE, E. A. A. D.; NAGAHAGE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v. 9, n. 7, p. 141, 2019. DOI: 10.3390/agriculture9070141.

QU, W. et al. Calibration of a novel low-cost soil water content sensor. **Sensors**, v. 15, n. 9, p. 24127–24143, 2015. DOI: 10.3390/s150924127.

STEPHENSON, D. **Pipeline Design for Water Engineers**. Amsterdam: Elsevier, 1989.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 574–582, 1980. DOI: 10.1029/WR016i003p00574.

TRACY, S. R. et al. Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. **Sensors**, v. 20, n. 23, p. 6934, 2020. DOI: 10.3390/s20236934.

WYLIE, E. Benjamin; STREETER, Victor L.; SUO, Lisheng. **Fluid Transients in Systems**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.