

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

ANILSON PEREIRA DE ARAÚJO
FRANCISCO LUCAS SOUSA DO CARMO
GIOVANNA KIMBERLI OLIVEIRA DE ALMEIDA

**Conservação De Água Na Agricultura Com Emprego De Energia Eólica e
Solar Fotovoltaica**

São Paulo

2026

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

ANILSON PEREIRA DE ARAÚJO
FRANCISCO LUCAS SOUSA DO CARMO
GIOVANNA KIMBERLI OLIVEIRA DE ALMEIDA

**Conservação De Água Na Agricultura Com Emprego De Energia Eólica E
Solar Fotovoltaica**

Projeto tecnológico elaborado
como requisito parcial para a conclusão
do Curso Superior de Tecnologia em
Automação Industrial.

Orientador: Flávio Santos de
Souza

São Paulo
2026

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANILSON PEREIRA DE ARAÚJO
FRANCISCO LUCAS SOUSA DO CARMO
GIOVANNA KIMBERLI OLIVEIRA DE ALMEIDA

Conservação De Água Na Agricultura Com Emprego De Energia Eólica E Solar Fotovoltaica

Projeto tecnológico elaborado
como requisito parcial para a conclusão
do Curso Superior de Tecnologia em
Automação Industrial.

Orientador: Professor Doutor
Flávio Santos de Souza

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Professor Mestre David Tadami Suzuki

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

Professor Mestre Dalmácio Almeida

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

Professor Doutor Flavio Santos

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

RESUMO

O atual cenário global impõe à agricultura o desafio de garantir a segurança alimentar de uma população crescente, enfrenta simultaneamente a escassez crítica de recursos hídricos e a necessidade de eficiência energética. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um projeto tecnológico voltado à conservação de água na agricultura, através de um sistema de irrigação inteligente e automatizado. O objetivo principal é projetar uma solução de baixo custo operacional, acessível a pequenos produtores, que integre os princípios da Agricultura 4.0. A metodologia foi baseada no uso de um Controlador Lógico Programável (CLP) para o processamento lógico, conectado a sensores capacitivos de umidade do solo, que oferecem maior durabilidade e precisão se comparado aos modelos resistivos. Para garantir a autonomia e a sustentabilidade do sistema, especialmente em áreas rurais isoladas, foi dimensionado um sistema híbrido de alimentação elétrica, que utiliza a energia solar fotovoltaica e energia eólica. A revisão bibliográfica e os estudos de caso analisados demonstram que a transição da irrigação tradicional para a irrigação de precisão automatizada pode reduzir o desperdício de água em aproximadamente 20% e o consumo de energia em 30%. Conclui-se que a integração entre automação industrial e energias renováveis é técnica e economicamente viável, visa promover não apenas a economia de recursos naturais, mas também o aumento da produtividade e a redução de custos operacionais para a agricultura familiar.

Palavras-chave: Automação Industrial; Irrigação Inteligente; Energia Renovável; CLP; Sustentabilidade.

Abstract

The current global scenario challenges agriculture to ensure food security for a growing population while confronting critical water scarcity and the need for energy efficiency. This work presents the development of a technological project focused on water conservation in agriculture through an intelligent, automated irrigation system. The main objective is to design a low-operational-cost solution, accessible to small-scale producers, that integrates the principles of Agriculture 4.0. The methodology was based on the use of a Programmable Logic Controller (PLC) for logical processing, connected to capacitive soil moisture sensors, which offer greater durability and accuracy compared to resistive models. To guarantee autonomy and sustainability, especially in isolated rural areas, a hybrid power supply system combining photovoltaic solar and wind energy was designed. The literature review and analyzed case studies demonstrate that transitioning from traditional irrigation to automated precision irrigation can reduce water waste by approximately 20% and energy consumption by 30%. It is concluded that the integration of industrial automation and renewable energy is technically and economically viable, aiming not only to promote the conservation of

natural resources but also to increase productivity and reduce operational costs for family farming.

Keywords: Industrial Automation; Smart Irrigation; Renewable Energy; PLC; Sustainability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. PANORAMA DA AGRICULTURA IRRIGADA E DA ESCASSEZ HÍDRICA	14
2.1.2 Métodos De Irrigação Localizada.....	15
2.2 AGRICULTURA 4.0 E IRRIGAÇÃO DE PRECISÃO	16
2.3 FUNDAMENTOS DA AUTOMAÇÃO APLICADA.....	19
2.4 INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE SOLO	21
2.5 SISTEMAS DE CONTROLE EM IRRIGAÇÃO (ESTUDOS DE CASO)	23
2.6 ENERGIAS RENOVÁVEIS NA AGRICULTURA.....	25
2.6.1 Energia Solar Fotovoltaica.....	26
2.6.2 Energia Eólica.....	27
2.7. REDES INDUSTRIAIS	27
2.7.1. MODBUS	30
2.8. SISTEMAS DE CONTROLE EM IRRIGAÇÃO (ESTUDOS DE CASO)	33
2.8.1. ESTUDOS DE CASO: ESTADOS UNIDOS.....	33
2.8.1.2. Purdue University & Michigan State University – Microinversor Solar Para Irrigação Inteligente	33
2.8.1.2. Usda-Ars Bushland, Texas – Sistema Scada Para Irrigação Com Taxa Variável (Vri).....	34
2.8.1.3. Terranova Ranch, Califórnia – Automação De Irrigação Com Iot E Conectividade Rural	34
2.8.1.4. Isscada System – Irrigação Deficitária Automatizada Para Algodão (Texas)	35
2.8.1.5. Lumo – Automação De Bomba A Válvula (Pump-To-Plant)	36
2.8.1.6 Iron Horse Vineyards – Conectividade Iot Para Viticultura De Precisão	37
2.9. ESTUDOS DE CASO: ÍNDIA	37
2.9.1. Sistema Scada Para Monitoramento Remoto Em Irrigação Solar (Punjab)	37

2.9.2. Wsn Para Irrigação Por Gotejamento Automatizado Em Cultivo Protegido (Manipur)	38
2.9.3 Pm-Kusum – Programa Nacional De Bombas Solares (Madhya Pradesh)	39
2.9.4 Automação De Canais Scada Alimentada Por Energia Solar (Karnataka)	39
2.9.5. Irrigação Por Gotejamento Inteligente Com Wsn E Zigbee (Coimbatore)	40
2.9.6. Irrigação De Precisão Com Dados Pela Cultivate (Karnataka)	41
2.9.7. Parceria Netafim E Amazon India Para Conservação De Água (Bengaluru E Hyderabad)	41
2.10. ESTUDO DE CASO: CHINA	42
2.10.1. Sistema De Irrigação Automática Baseado Em Clp Com Energia Solar (Chongqing).....	42
2.10.2. Sistema Inteligente De Monitoramento Para Coleta E Reciclagem De Água Da Chuva	43
2.10.3. Irrigação Inteligente De 4.000 Acres De Arrozais (Chongming, Xangai)	44
2.10.4. Dispositivo Inteligente De Controle De Irrigação Com Economia De Energia Fotovoltaica (Tarim University).....	44
2.10.5. Controle De Irrigação Por Clp Com Lógica Fuzzy Para Agricultura De Precisão	45
2.10.6. Monitoramento Inteligente Com Múltiplos Sensores E Válvulas Proporcionais	46
2.10.7. Sistema Inteligente Para Grandes Áreas Com Controle Remoto Via 4g (Xangai).....	47
2.11. ALEMANHA.....	47
2.11.1. Smart Water Cube – Sistema De Irrigação Inteligente No All Electric Society Park (Blomberg).....	47
2.11.1. Beeotopia – Irrigação Automatizada Para Plantio Vertical Em Fachadas (Mannheim)	48
2.11.2. Laboratório De Inovação Apv 2.0 – Acoplamento De Produção Agrícola E Fotovoltaica (Renânia).....	49
2.11.3. Express – Campo Experimental Para Irrigação E Monitoramento De Estresse Hídrico (Alemanha).....	50
2.11.5. 4drain – Distribuição Espacial E Temporal De Água Sob Máquinas De Irrigação (Baixa Saxônia)	51
2.11.6. Isobed – Abordagens Digitais E Baseadas Em Ia Para Irrigação Sustentável (Geisenheim)	52

2.11.7. Projeto De Demonstração Agri-Pv Da Rwe E Forschungszentrum Jülich (Titz-Jackerath)	53
2.12. ESTUDO DE CASO: BRASIL.....	54
2.12.1. Saci – Sistema Automático De Controle De Irrigação Com Sensor Igstat (São Paulo).....	54
2.12.2. Irrigação Inteligente Baseada Em Iot Para Agricultura Familiar (Maranhão) 55	55
2.12.3. Protótipo Autônomo De Irrigação Com Energia Solar Fotovoltaica (Pantanal) 55	55
2.12.4. Irrigação Localizada Com Energia Eólica (Ceará)	56
2.12.5. Irriga Certo – Aplicativo Para Gestão De Irrigação (Brasil)	57
2.12.6. Sistema De Irrigação Automatizado Com Monitoramento Remoto E Energy Harvesting (Sorocaba)	57
2.12.7. Manejo De Irrigação Com Cobertura Plástica Do Solo No Cerrado (Brasil Central) 58	58
3. METODOLOGIA.....	59
3.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA	59
3.2. ETAPAS INICIAIS DO PROJETO.....	60
3.2.1. Escolha Do Tema	60
3.2.2 Levantamento De Requisitos	60
3.3 MÉTODOS DE PESQUISA UTILIZADOS	61
3.3.1 Pesquisa Bibliográfica.....	61
3.3.2 Estudo De Casos	61
3.3.3 Pesquisa Quantitativa E Qualitativa Com Produtores.....	62
3.3.3.2 Análise Do Ciclo Produtivo E Manejo Hídrico Atual	63
3.3.3.3 Matriz Energética Local E Viabilidade De Fontes Renováveis	64
3.4. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	65
4. DESENVOLVIMENTO.....	67
4.1. SELEÇÃO DE COMPONENTES	67
4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE E SUPERVISÓRIO	68
4.2.2 Desenvolvimento Do Sistema Supervisório Com Nbdesigner	68
4.2.3 Programação Do Clp Com Control Fpwin Pro 7	69
4.2.4 Comunicação Clp E Ihm Via Protocolo Modbus	70
4.2.5 Subsistema De Geração E Armazenamento De Energia	71
4.3 INTEGRAÇÃO E AJUSTES FINAIS	71

5. RESULTADOS E TESTES.....	73
5.1. PASSO 1 – CRIAÇÃO DA TELA IHM.....	73
5.2. TESTE 1 – INTEGRAÇÃO CLP, IHM E PROGRAMAÇÃO (SEM MAQUETE)	74
5.3. TESTE 2 - MONTAGEM DA MAQUETE, BOMBEAMENTO COM ENERGIA EÓLICA E MONTAGEM DO RESERVATÓRIO	75
5.4. TESTE 3 – INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS EÓLICO E FOTOVOLTAICO COM O CLP	77
5.5 – TESTE 4 - MODERNIZAÇÃO DA TELA DA IHM.....	78
5.6. TESTE 5 - AVALIAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DO INVERSOR DE TENSÃO	80
5.7. TESTE 6 - TESTE DE COMUNICAÇÃO MODBUS RTU ENTRE CLP E IHM.....	81
5.8. TESTE 7 - IDENTIFICAÇÃO DAS TELAS DA IHM E MAPEAMENTO DOS REGISTRADORES MODBUS PARA COMUNICAÇÃO COM O CLP.....	84
5.9. TESTE 8 - VALIDAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE COMPONENTES	86
6. CONCLUSÃO.....	90
7. REFERÊNCIAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relato técnico sobre o preparo do solo e condicionantes climáticas do terreno	63
Figura 2 - Maquinário utilizado no processo de semeadura	64
Figura 3 - Atividade de colheita automatizada e armazenamento de grãos na propriedade rural.	65
Figura 4 - Primeira tela da Interface Homem-Máquina (IHM) projetada no software NBDesigner, representando o diagrama esquemático do sistema de bombeamento alimentado energia solar.	74
Figura 5 - Teste virtual de integração entre CLP Panasonic FP0R-C14RS, IHM Omron NB7W-TW01B e programação em Ladder, realizado sem entradas e saídas físicas (apenas simulação lógica e comunicação Modbus RTU).	75
Figura 6 - Montagem da maquete funcional, sistema de bombeamento acionado diretamente por energia eólica (sem integração com CLP) e montagem do reservatório de água.	76
Figura 7 - Bateria estacionária UNIPOWER UP12350 (12V 35Ah) utilizada no subsistema de armazenamento de energia do protótipo.	77
Figura 8 - Tela da IHM modernizada no software NBDesigner, representando o sistema de irrigação inteligente com todos os elementos visuais integrados - Estado com motor ligado	79
Figura 9 - Tela da IHM modernizada no software NBDesigner, representando o sistema de irrigação inteligente com todos os elementos visuais integrados - Estado com motor desligado	79
Figura 10 - Inversor de tensão de baixa potência (testado e descartado por insuficiência de capacidade)	80
Figura 11 - Inversor de tensão multifunção 1500W (pico) – 220V, adotado para alimentar o sistema.	81
Figura 12 - Configuração do protocolo Modbus RTU no software Control FPWIN Pro 7.	83
Figura 13 - Tela de configuração dos parâmetros de comunicação serial no software NBDesigner.	83

Figura 14 - Identificação das telas da Interface Homem-Máquina (IHM).....	84
Figura 15 - Estrutura do projeto no software Control FPCWIN Pro 7	85
Figura 16 – a) Primeiro sensor testado (descartado por sensibilidade a altas temperaturas); b) modelo substituído adotado.	86
Figura 17 – a) primeiro leitor de sensor com saída digital (descartado por alteração do sinal ao conectar ao CLP); b) modelo substituto com contato seco.	87
Figura 18 - indicador de desempenho do sistema mostrando 100% de funcionamento nos principais subsistemas (geração de energia, comunicação e acionamento da irrigação).	88

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

As projeções para o desenvolvimento global nas próximas décadas indicam que a humanidade enfrentará desafios críticos relacionados à gestão de energia, água, alimentos, ao equilíbrio ambiental e à superação da pobreza (PANDA et al., 2024).

Neste cenário, a agricultura mundial é encontrada sob forte pressão para, simultaneamente, manter a segurança alimentar de uma população crescente e contribuir para a geração de energia limpa de forma sustentável (ROCHA; GUIMARÃES; OLIVEIRA, 2024).

O relatório da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) intitulado "O futuro da alimentação e da agricultura: tendências e desafios" identificou os requisitos para o fornecimento de suprimentos de alimentos adequados e acessíveis por meio de serviços agrícolas sustentáveis, a fim de atender às crescentes demandas da crescente população mundial (FAO, 2017 apud PANDA et al., 2024).

Um dos focos de maior preocupação é a agricultura irrigada. Embora ocupe apenas 18% da área cultivada mundial, ela é responsável por 42% da produção total de alimentos (CHRISTOFIDIS, 2002), visa demonstrar a sua alta produtividade. A competição crescente por água, impulsionada não apenas pela irrigação (que já consome 80% da água doce) mas também por demandas industriais e urbanas, agrava a escassez de recursos hídricos para a população rural. Essa escassez pode perpetuar a pobreza ao criar desigualdades no acesso à água. Além disso, embora a disponibilidade de alimentos seja crucial, ela por si só não resolve a fome e a pobreza. Para eliminar permanentemente a insegurança alimentar, são necessárias ações que vão além da agricultura, como a implementação de políticas de proteção social e redes de segurança (PANDA et al., 2024).

O centro do problema reside na baixa eficiência: é estimado que a eficiência média global dos sistemas de irrigação seja de apenas 37%, o que gera um

desperdício massivo de água e da energia utilizada para bombeá-la (ROCHA; GUIMARÃES; OLIVEIRA, 2024).

Os sistemas modernos de distribuição alimentar tendem a favorecer grandes produtores e centros urbanos, o que dificulta a inserção de pequenos agricultores.

No entanto, em países de baixa renda, a produção local ainda é responsável por até 90% do consumo rural, tornando o investimento nesses sistemas tradicionais e em sua conexão com os mercados urbanos um motor essencial para o crescimento (CALICIOGLU, 2019).

Na literatura, numerosos métodos e soluções são usados para lidar com as crescentes crises globais de água. O uso de sistemas de irrigação de precisão para economia de água (PISs) é uma abordagem altamente recomendada para mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas (LAKHIAR, 2024).

Diante da necessidade urgente de práticas agrícolas mais sustentáveis, este projeto se justifica pela busca de uma solução que enfrente diretamente o desperdício de recursos hídricos e energéticos (TEIXEIRA, 2025).

Estudos indicam que a implementação de sistemas de irrigação racionais pode promover uma economia de aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumida (LAKHIAR et al., 2024).

A relevância desta proposta é ampliada pelo contexto brasileiro, que se destaca como um dos países mais competitivos para a geração de energia eólica e solar fotovoltaica, tende a criar uma oportunidade para o desenvolvimento de soluções agrícolas autônomas e de baixo custo operacional (SOUZA, 2020).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo funcional em escala reduzida, de modo a demonstrar a aplicação de sistemas de automação voltado para a agroindústria, com foco na redução do consumo de água e emprego das fontes renováveis de energia elétrica fotovoltaica e eólica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Projetar a arquitetura de um sistema de irrigação automatizado (protótipo funcional), com integração entre CLP, sensores e sistema de aquisição e controle de dados;
- Dimensionar e implementar um sistema híbrido, com emprego de energia solar fotovoltaica em operação ilhada (independente do sistema elétrico interligado), com opção de seleção de fonte energética (geração distribuída - sistema interligado);
- Implementar um sistema de bombeamento de água com emprego direto de energia eólica (sistema diretamente conectado à bomba, sem emprego de energia elétrica);
- Desenvolver o algoritmo e a lógica de programação para gerenciamento do sistema;
- Construir uma maquete funcional para demonstrar e validar o funcionamento prático do sistema proposto.

Neste capítulo foi apresentada uma introdução, de modo a contextualizar o tema com a proposta do trabalho, assim como a motivação e objetivos geral e específicos.

No Capítulo 2 Revisão Bibliográfica, são apresentados os fundamentos teóricos sobre irrigação, automação industrial (CLP e norma IEC 61131-3), sensores capacitivos de solo e energias renováveis (solar fotovoltaica e eólica). O capítulo também aborda o protocolo Modbus para comunicação CLP-IHM e uma análise de estudos de caso nacionais e internacionais que comprovam a viabilidade da automação na irrigação com fontes limpas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo 1 foi apresentado o contexto ao qual este trabalho é baseado.

Neste capítulo será apresentado a revisão bibliográfica, com estudos de projetos semelhantes ao projeto proposto, tecnologias e técnicas empregadas em sistemas agrários.

2.1. Panorama da Agricultura Irrigada e da Escassez Hídrica

Segundo LAKHIAR et al. (2024) o setor agrícola global enfrenta desafios como alimentar uma população crescente, adaptar-se às mudanças climáticas e reduzir sua pegada ambiental. Simultaneamente, os ODS da ONU estabeleceram metas para crescimento sustentável e redução da pobreza. O setor de irrigação tradicional mudou significativamente nos últimos 50 anos devido a mudanças climáticas, seca e urbanização.

São mais conhecidos dois métodos de irrigação, os impulsionados pela gravidade (tradicional) e impulsionados por pressão (modernos). Métodos por gravidade aplicam água de forma uniforme desconsiderando a variabilidade do campo, enquanto sistemas por pressão (como aspersão e gotejamento) usam bombas e alcançam maior eficiência no uso da água. Sistemas de irrigação de superfície têm eficiência de 40-70%, enquanto sistemas pressurizados oferecem até 95% de eficiência (Lakhiar, 2024).

Existem quatro principais métodos de irrigação, sendo eles: aspersão, superfície, localizada e subsuperfície ou subterrânea.

2.1.1 Métodos de Irrigação Tradicionais

Segundo MORAES et al. (2014) os métodos de irrigação tradicional envolvem um conjunto de técnicas estabelecidas historicamente na agricultura, caracterizadas principalmente pela distribuição de água através da gravidade ou de sistemas de aspersão convencionais, sem o uso de automação avançada ou tecnologias de precisão.

Na irrigação por aspersão, o método aplicado simula a chuva, borrifando ou respingando gotas de água sobre a plantação. Utiliza no seu Sistema Convencional aspersores convencionais que permanecem fixos ou são movimentados manualmente pelo campo. Já no seu sistema mecanizado, os aspersores se movem automaticamente, comumente em movimento circulares (pivô central) ou lineares (MORAES et al., 2014).

Segundo LAKHIAR et al. (2024), no método irrigação por superfície, a água é aplicada diretamente sobre a superfície do solo, se infiltrando nele.

Nos Sistemas por Sulcos, a água escoar por pequenos canais (sulcos) abertos ao longo das linhas da cultura, inundando parcialmente a área. Em paralelo, no Sistema por Inundação, a água é aplicada sobre toda a área e se acumula na superfície, inundando o solo. Essa inundação pode ser temporária ou permanente.

No sistema da irrigação subterrânea, a água é aplicada abaixo da superfície do solo, diretamente na zona das raízes da plantação (LAKHIAR et al., 2024).

2.1.2 Métodos de Irrigação Localizada

Segundo ROCHA; GUIMARÃES; OLIVEIRA (2024), a irrigação localizada é caracterizada pela aplicação pontual e frequente de água diretamente na zona radicular das plantas ou em suas proximidades, operando geralmente com baixa pressão e vazão reduzida. Diferente dos métodos convencionais que tendem a molhar toda a superfície, esta técnica utiliza emissores específicos, como gotejadores e microaspersores, para umedecer apenas o volume de solo estritamente necessário.

O método aplicado por microaspersão são utilizados microaspersores que aplicam a água em forma de jatos finos ou névoa (aerossóis). Habitualmente, tem uma vazão maior que o gotejamento.

O sistema de Gotejamento Subterrâneo, semelhante ao sistema de gotejamento, porém as linhas com os gotejadores são enterradas no solo; o sistema de Elevação do Lençol Freático, utilizado em áreas com camadas de solo subsuperficiais compactadas, permite controlar a profundidade no nível da água (lençol freático) para mantê-lo próximos às raízes; o sistema de Subirrigação em Ambientes Protegidos (ROCHA; GUIMARÃES; OLIVEIRA, 2024).

2.2 Agricultura 4.0 e Irrigação de Precisão

Segundo LAKHIAR et al. (2024), a irrigação de precisão é baseada no gerenciamento das variáveis de água e solo, possui como objetivo central aplicar a quantidade exata de água, no momento certo e no local específico, impulsionando a produtividade enquanto minimiza o desperdício de recursos hídricos e energia.

O agendamento de irrigação determina a duração e a quantidade de água a ser aplicada. Padrões não gerenciados podem afetar significativamente a eficiência e o rendimento. O PS é uma prática avançada que usa ferramentas modernas para otimizar o uso da água, aumentando o rendimento da cultura e diminuindo o desperdício (LAKHIAR et al., 2024).

Esse modelo é embasado na compreensão e gerenciamento da variabilidade espacial e variabilidade temporal.

A variabilidade espacial reconhece que o solo não é uniforme. Em um mesmo hectare, podem existir diferenças na textura do solo (areia vs. argila), topografia e capacidade de retenção de água. O sistema ajusta a irrigação para atender a essas manchas específicas (Zonas de Manejo).

A variabilidade temporal monitora as mudanças climáticas e o estágio de desenvolvimento da cultura ao longo do tempo. A demanda hídrica de uma planta muda completamente do plantio até a colheita.

Para garantir o bom funcionamento da irrigação de precisão, é essencial a integração de um ecossistema tecnológico avançado, muitas vezes sustentado pela Internet das Coisas. Na coleta de dados, é destacado os sensores de solo e planta, como as sondas capacitivas e tensiômetros, que monitoram a umidade em tempo real, e até equipamentos mais avançados que medem o fluxo de seiva para detectar estresse hídrico precocemente (BORGES et al., 2024) (LAKHIAR et al., 2024).

Esses dados de solo são cruzados com informações atmosféricas fornecidas por estações meteorológicas locais, que computam a evapotranspiração calculando a perda de água com base na radiação solar, vento e temperatura. Para complementar, é utilizado imagens de satélite e drones equipados com câmeras multiespectrais para gerar índices de vegetação, como o NDVI, permitindo o mapeamento da saúde da

lavouira em larga escala (BERNARDI, 2014; BERNARDO, 2019; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

Todos esses dados alimentam os sistemas de aplicação, que representam a execução física da tecnologia.

Segundo Borges (2024), embora existam muitas tecnologias de irrigação, elas frequentemente possuem custos elevados que as tornam inacessíveis aos pequenos produtores. Visto que a agricultura familiar é a principal fonte de alimentos no Brasil, é essencial focar em projetos de baixo custo, acessíveis e autônomos, que possam aumentar a qualidade e a facilidade da produção.

Segundo Lakhier (2024) Sistemas inteligentes de economia de água (SISs) são essenciais para gerenciar recursos hídricos de forma eficiente. A gestão eficiente da água é chave para a viabilidade a longo prazo da produção global de alimentos e intersecta com múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A transformação digital na agricultura (Agricultura 4.0) visa obter o máximo de saída com o mínimo de entrada, utilizando ferramentas como IoT e sensores sem fio.

O objetivo do sistema de irrigação é garantir o uso mais eficiente da água, aplicando a quantidade certa de água no momento certo e no local certo. Os sistemas de irrigação, são caracterizados em termos de tecnologia de controle e regulação.

Segundo Gümüşer, Pichlhöfer e Korjenic são considerados Sistemas Inteligentes e Sistemas Apoiados por IA como sistemas de irrigação inteligentes, que são projetados para determinar o cronograma de irrigação mais adequado para as plantas, processando dados recebidos de sensores de umidade do solo/substrato e, arbitrariamente, outros dados climáticos e de estresse relacionados às plantas, principalmente com o objetivo de reduzir o consumo de água e energia. Por exemplo, ao implementar a irrigação inteligente, 20% do uso de água pode ser reduzido mantendo a umidade do solo de 0,13 a 0,22 m³/m³ (13 a 22% VWC).

Como a umidade do solo serve como solvente e transportador de minerais e matéria orgânica, regula a temperatura do solo e possui uma influência direta na saúde e desenvolvimento das plantas. Portanto, a umidade do solo é mais imediata em comparação com outros fatores ambientais, sugerindo uma importância primordial sobre outras variáveis ambientais como a temperatura do ar. Métodos diretos e indiretos fornecem resultados qualitativos e/ou quantitativos.

Diante desse contexto, a inserção de tecnologias na agricultura irrigada garante a expansão sustentável da capacidade de produção. Atualmente, diversos sistemas utilizam tecnologias visando o manejo da irrigação.

No caso de pivôs centrais, a inovação reside na Taxa Variável de Irrigação (VRI), onde válvulas solenoides controlam individualmente os aspersores, o que permite que o equipamento aplique lâminas de água diferentes em zonas distintas do mesmo talhão, respeitando as variações de solo. Já em sistemas de gotejamento, a precisão ocorre através da setorização hidráulica e automação, entregando água e nutrientes diretamente na zona radicular da planta via telemetria, o que permite ao produtor controlar todo o processo remotamente via smartphone ou computador, eliminando a necessidade de deslocamento constante até o campo para acionamento manual.

A adoção desse conjunto tecnológico gera impactos profundos tanto na economia quanto na sustentabilidade do agronegócio. O benefício mais imediato é a redução significativa do consumo de água e, conseqüentemente, de energia elétrica ou diesel utilizados no bombeamento, visto que se irriga apenas o necessário. Além da economia direta, há um ganho agrônômico: ao eliminar tanto o déficit hídrico quanto o excesso de água, a planta consegue expressar seu máximo potencial genético, o que aumenta a produtividade por hectare. Ambientalmente, a precisão também mitiga a lixiviação de fertilizantes, evitando a contaminação de lençóis freáticos.

Entretanto, a implementação em larga escala enfrenta barreiras consideráveis, começando pelo alto custo inicial de aquisição dos sensores e controladores, o que pode dificultar o acesso para pequenos e médios produtores.

Além do fator financeiro, a infraestrutura de conectividade no campo ainda é um gargalo em muitas regiões do Brasil, limitando a transmissão de dados em tempo real necessária para a IoT. Por fim, existe o desafio da capacitação técnica, pois a agricultura de precisão exige profissionais aptos não apenas a lidar com a agronomia clássica, mas também a interpretar dados complexos para a tomada de decisão. Apesar desses desafios, a irrigação de precisão é consolidada como uma ferramenta indispensável para garantir a segurança alimentar em um futuro de recursos hídricos cada vez mais escassos.

2.3 Fundamentos da Automação Aplicada

A automação industrial elétrica é um campo de estudo crítico que revolucionou a forma como as indústrias operam, particularmente na manufatura, geração de energia e outras indústrias pesadas. À medida que as indústrias mudaram a sua perspectiva e a sua metodologia de produção e alcance e nível global, a necessidade de automação tornou-se ainda mais fundamental, uma vez que a automação facilita a integração de sistemas que melhoram a produtividade, reduzem o erro humano e garantem padrões de segurança mais elevados (DONTA, 2025).

Segundo Dontha (2025), historicamente a automação industrial começou com sistemas de controle simples baseados em relés e evoluiu para os sistemas sofisticados e altamente integrados como os que estão presentes atualmente. Ainda conforme a autora, a introdução dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) na década de 1960 marcou um ponto de virada importante na indústria de automação. Os CLPs permitiram uma abordagem mais flexível, confiável e escalável para controlar processos industriais. A evolução dos CLPs, assim como o desenvolvimento de sensores mais avançados e redes de comunicação, permitiu que as indústrias automatizassem processos mais complexos com maior precisão.

Segundo Dontha (2025), “o cenário atual da automação industrial é moldado pela convergência de várias tecnologias-chave, incluindo sensores inteligentes, robótica e sistemas baseados em IA”.

Antes da criação do Controlador Lógico Programável nas indústrias e nos setores produtivos, o controle de máquinas industriais era realizado por meio de painéis de relés que controlavam as linhas de montagem. A lógica de controle, que envolvem sequências, intertravamentos e temporizações, era física, ou seja, definida pela fiação que interligava os relés e integravam o sistema.

O processo de criação de um Controlador Lógico Programável surgiu a partir da percepção de transtornos relacionados a inflexibilidade, pois qualquer mudança na linha de produção exigia que os painéis fossem fisicamente desmontados e religados, além do custo de engenharia, fiação e comissionamento elevado, a baixa confiabilidade relacionada as falhas técnicas dos relés e sua vida útil limitada que causam paradas constantes para a manutenção.

Diante desse contexto, em 1968, a Hydramatic da General Motors (GM) lançou um desafio a indústria com o objetivo de formar um controlador padrão. Os seus requisitos definiam que o novo dispositivo deveria ser programável e reprogramável, ser modulável, robusto o suficiente para suportar as condições de um ambiente fabril, além de ser menor e mais barato do que os painéis de relés equivalentes.

A empresa que venceu o desafio foi a Bedford Associates, projetaram um dispositivo com base na lógica digital e memória programável, batizando-o de MODICON 084, Modular Digital Controller (Controlador Lógico Programável).

Perante esse marco histórico, a lógica de controle foi modificada de hardware (fios) para software. Com o avanço dos microprocessadores, os CLPs se potencializaram com maior intensidade, sendo mais ágil e conquistando a capacidade de comunicação em rede.

Na década de 90, foi publicada a norma IEC 61131-3 que visou a padronização das linguagens de programação dos CLPs. O objetivo central da IEC 61131-3 não foi apenas unificar a sintaxe, mas estabelecer um modelo de software consistente. A norma define conceitos fundamentais como tipos de dados (elementares e derivados), variáveis, unidades de organização de programas (POUs) e configurações de tarefas, garantindo que a estrutura lógica seja padronizada independentemente do fabricante do equipamento (FRANCHI; CAMARGO, 2009).

Um dos aspectos mais relevantes da norma é a definição de cinco linguagens de programação, classificadas em duas categorias: gráficas e textuais.

Segundo a IEC 61131-3, as linguagens são:

1. Diagrama de Contatos (LD - *Ladder Diagram*): Linguagem gráfica baseada na lógica de relés eletromecânicos. Muito semelhante a esquemas elétricos tradicionais, facilita a compreensão dos responsáveis pela manutenção.
2. Diagrama de Blocos de Função (FBD - *Function Block Diagram*): Linguagem gráfica que representa o fluxo de sinais através de blocos de processamento (como portas lógicas, temporizadores e contadores). Funciona de forma eficiente para descrever o fluxo de informações entre variáveis de processo.
3. Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC - *Sequential Function Chart*): Baseada na estrutura do GRAFCET, esta linguagem gráfica é utilizada para

particionar o processo em etapas (*steps*) e transições. Idealmente utilizado para processos sequenciais e máquinas de estados.

4. Texto Estruturado (ST - *Structured Text*): Linguagem textual de alto nível, com sintaxe semelhante à linguagem Pascal ou C. Permite a construção de algoritmos complexos, laços de repetição (*loops*) e cálculos matemáticos avançados.
5. Lista de Instruções (IL - *Instruction List*): Linguagem textual de baixo nível, similar ao Assembly, baseada em acumuladores e mnemônicos.

A adoção da IEC 61131-3 proporcionou a portabilidade de software e a reutilização de código. A modularização permitida pela norma, através do uso de Blocos de Função (User Derived Function Blocks), incentiva a programação estruturada, reduzindo erros e o tempo de desenvolvimento (PETRUZELLA, 2014).

Dessa forma, a norma transformou o desenvolvimento de automação: o foco é deslocado da compreensão das peculiaridades de um hardware específico para a lógica de controle e a eficiência do processo.

2.4 Instrumentação para Monitoramento de Solo

Segundo Chowdhury, Sen e Janardhanan (2022), o monitoramento da umidade do solo (SM) é um pilar fundamental na agricultura moderna. A umidade do solo é descrita como um parâmetro essencial, pois influencia diretamente atividades ambientais e agrícolas críticas, como a previsão de secas e o manejo da irrigação. Em sistemas de irrigação inteligente, o monitoramento contínuo da umidade do solo é de extrema importância para reduzir o uso desnecessário de água, otimizando recursos e aumentando a eficiência da produção.

A medição da umidade do solo pode ser realizada por duas abordagens principais: direta e indireta. O método gravimétrico é a forma direta de aferição (TEIXEIRA, 2025).

Embora forneça dados precisos (conhecidos como ground truth), esse método, segundo Chowdhury, Sen e Janardhanan (2022), tem maior tempo de reposta e maior complexidade para a sua empregabilidade, tornando-o impraticável para o monitoramento contínuo exigido pela irrigação automatizada.

Por esse pretexto, os métodos indiretos, que utilizam sensores eletrônicos, são os mais empregados. Com o avanço da Internet das Coisas (IoT) aplicada à agricultura, o uso de sensores de baixo custo está se tornando popular entre os agricultores. Dentre as opções disponíveis, os sensores predominantemente capacitivos e resistivos são os mais utilizados em sistemas de monitoramento, justificado por serem "menos dispendiosos e terem requisitos fáceis de configuração" (CHOWDHURY; SEN; JANARDHANAN, 2022).

Esses dois tipos de sensores, no entanto, operam por princípios fundamentalmente distintos: o Sensor Resistivo opera com o ideal focado na mudança de resistência, que mede a condutividade da corrente entre duas sondas inseridas no solo, à medida que o teor de água (SWC) aumenta, a condutividade sobe e a resistência diminui. Enquanto o Sensor Capacitivo trabalha com base na mudança da constante dielétrica do solo, a presença de água (que possui uma alta constante dielétrica) altera a capacitância do sistema, que é medida por um circuito oscilador. Ambos os sensores fornecem saída em termos de tensão (TEIXEIRA, 2025).

Embora ambos sejam de baixo custo, uma análise comparativa revela uma diferença crítica em sua aplicabilidade de longo prazo, sendo este o fator decisivo para projetos de irrigação.

O estudo de Chowdhury, Sen e Janardhanan (2022) destaca que os sensores resistivos são sensíveis à corrosão. Como suas sondas metálicas ficam expostas diretamente ao solo úmido, o processo de eletrólise e oxidação é rápido. O estudo observou que após 5-6 medições de curta duração, o sensor perde sua funcionalidade.

Em contrapartida, os sensores capacitivos são projetados para durabilidade. Suas sondas são revestidas com um polímero que resiste à eletrólise e oxidação. Essa proteção confere ao sensor capacitivo a robustez necessária para o monitoramento agrícola contínuo.

O estudo realizado por Chowdhury, Sen e Janardhanan (2022), conclui que o sensor capacitivo é adequado para medições de longa duração, enquanto o sensor resistivo é ideal para medição instantânea. Dada a exigência de monitoramento contínuo para a gestão hídrica inteligente, o sensor capacitivo se mostra a opção tecnológica mais viável e confiável para integração em sistemas de irrigação automatizados.

2.5 Sistemas de Controle em Irrigação (Estudos de Caso)

A conservação de recursos hídricos é um tema de suma importância nos diversos setores produtivos, com destaque ao setor agrícola, e sistemas de controle automatizado são aliados ao combate ao desperdício de recursos. Sistemas com base em Controladores Lógicos Programáveis podem atender esta demanda de forma relativamente simples, tecnicamente viável e financeiramente acessível.

Na agricultura, sistemas de irrigação inteligentes podem ser implementados com base na coleta de dados de sensores que medem a temperatura, umidade e umidade de solo. Este sistema envia sinais de reconhecimento descrevendo o status da tarefa, incluindo o nível de umidade do solo, a temperatura ambiente e a condição do motor em relação à fonte de energia principal ou energia solar. As saídas de status do motor são produzidas por um controlador lógico, que também computa os parâmetros de entrada como umidade do solo, temperatura e umidade

Morsi e Ahmed (2024) demonstram em seu estudo, a viabilidade prática ao implementarem um sistema de irrigação inteligente em uma fazenda de 20 acres localizada em Alexandria, Egito. A motivação central do projeto reside na crise hídrica global e na necessidade de reduzir o desperdício de recursos naturais e energéticos causados por métodos de irrigação tradicionais, que operam com base em cronogramas fixos e intervenção manual.

Conforme o estudo, as leituras mínimas e máximas de umidade dos sensores podem ser usadas para controlar a rega de diferentes tipos de plantas, exigindo o uso de um PLC e sistema SCADA que determinavam a umidade para cada campo.

Medição e controle para cultivo baseados em temperatura, sensor de umidade, umidade do solo e intensidade de luz, que resultaram em uma economia no consumo de energia em comparação ao sistema tradicional baseado em PLC e SCADA para regular a irrigação, foram utilizados. A implementação de uma rede de sensores sem fio Wi-Fi inteligente para irrigação foi conduzida.

A solução proposta no estudo substituiu o controle manual por uma arquitetura automatizada desenvolvida, fundamentada na integração entre Controladores Lógicos Programáveis (PLC) e sistemas de supervisão (SCADA).

A topologia de hardware adotada utilizou uma configuração Mestre-Escravo para garantir a descentralização e eficiência na aquisição de dados.

Foi utilizado um PLC Siemens S7-1200 (CPU 1214C), responsável pelo processamento central da lógica de controle e comunicação via protocolo Ether e um PLC Schneider M221 foi empregado para gerenciar a coleta de dados da estação meteorológica e sensores periféricos, comunicando-se com o mestre através de um switch de rede.

A instrumentação de campo foi composta por um conjunto de sensores, transmissores de pressão (0-10 bar), sensores de umidade do solo, condutividade elétrica (EC) e uma estação meteorológica com a capacidade de medir velocidade do vento, precipitação e temperatura do ar.

Esses dispositivos fornecem as variáveis de entrada que são o ponto de partida para a tomada de decisão autônoma do sistema.

O diferencial tecnológico do projeto de Morsi e Ahmed (2024), consiste na aplicação da Lógica Fuzzy (Método de Mamdani) para o controle das bombas, sobressaindo a lógica binária simples. O sistema processa seis variáveis de entrada — temperatura, pressão, umidade do solo, precipitação, umidade do ar e velocidade do vento — para determinar com precisão o número de bombas que devem operar em um dado momento.

Para a operação e monitoramento, foi desenvolvido um sistema SCADA com Interface Homem-Máquina (IHM) composta por seis telas principais. Estas interfaces permitem ao operador visualizar o status das válvulas, monitorar alarmes de sobrecarga, ajustar *setpoints* e acompanhar as condições meteorológicas em tempo real, eliminando a necessidade de deslocamento físico constante até o campo.

A eficiência do sistema foi comprovada através da comparação direta com o método tradicional. No cenário anterior, a irrigação dependia de quatro bombas operando fixamente durante 4 horas diárias, independentemente das condições climáticas, resultando em um consumo de 352 kWh/dia.

Com a implementação do controle inteligente via PLC e Lógica Fuzzy, o sistema passou a operar de forma dinâmica. As bombas são acionadas apenas quando os sensores indicam necessidade real (por exemplo, solo seco e ausência de

chuva), e desligadas automaticamente em condições adversas (como chuva ou vento forte).

Os resultados quantitativos demonstraram:

- Uma redução do consumo energético para 242 kWh/dia.
- Uma economia financeira direta de 31,25% nos custos operacionais diários.
- A garantia de conservação hídrica a longo prazo, prevenindo a irrigação excessiva.

O estudo de Morsi e Ahmed (2024) válida a hipótese de que a integração de PLCs com algoritmos de inteligência artificial (Fuzzy) é uma solução viável e economicamente vantajosa para a agricultura moderna. O sistema não apenas otimizou o uso de recursos hídricos e energéticos, mas também aumentou a confiabilidade operacional da fazenda através do monitoramento contínuo via SCADA.

2.6 Energias Renováveis na Agricultura

Diante do contexto e as dificuldades enfrentadas pelo setor agrícola, a adoção de tecnologias de energia renovável surgiu como uma solução promissora. As fontes de energias renováveis, como a solar e a eólica, promovem a transformação das práticas agrícolas, pois fornecem energia limpa e acessível para a irrigação, secagem, aquecimento de estufas e maquinário (TARIQ; ASHRAF; HASNAIN, 2021).

A adoção de fontes de energias renováveis na agricultura está intrinsicamente ligada aos 17 ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), estabelecidos em 2015, que englobam questões sociais, econômicas e ambientais. A agricultura tem um papel fundamental na tentativa de sanar a pobreza (ODS 1), fome zero (ODS 2), crescimento econômico (ODS 8) e produção responsável (ODS 12). No entanto, o setor enfrenta desafios ambientais como emissões e escassez de água. A implementação da energia solar soluciona os desafios expostos na ODS, pois melhora o acesso à água e produtividade. Da mesma forma, a implementação da energia eólica busca resolver os problemas expostos na ODS viabilizando o bombeamento mecânico robusto e zero consumo de água na geração, convivência (gado, lavoura

com a energia) e irrigação noturna, além de ocupar pouco solo, preservando pastagens e habitats abaixo das hélices (ODS 2, 6, 15) (PANDA et al., 2024).

2.6.1 Energia Solar Fotovoltaica

Os sistemas de irrigação que utilizam painéis fotovoltaicos (PV) têm seus custos reduzidos, maior confiabilidade, eficiência hídrica e zero emissões.

A energia solar é a origem da maioria das fontes de energia na Terra. A Terra recebe cerca de 1366 watts por metro quadrado do sol. A maior parte do espectro de energia solar que atinge a superfície da Terra consiste em luz visível (~400 nm a 700 nm) e luz infravermelha (TARIQ; ASHRAF; HASNAIN, 2021).

No sistema solar, as células fotovoltaicas convertem a irradiação solar diretamente em corrente contínua (DC). Para a alimentação de CLPs e sensores, a energia é gerada nativamente em DC, do mesmo modo que a maioria dos microcontroladores e instrumentos de medição (que operam frequentemente em 12V ou 24V). Isso reduz a necessidade de conversores complexos e perdas de eficiência associadas à retificação de corrente alternada.

Os painéis solares carregam as baterias durante o dia através de controladores de carga (como MPPT ou PWM). Este banco de baterias atua como um pulmão, armazenando o excedente de energia gerada nas horas de pico de sol. Diferente da irrigação direta, os sensores e o CLP precisam funcionar 24 horas por dia. O banco de baterias assume a carga total durante a noite, garantindo que o sistema continue monitorando o solo e comunicando dados, mantendo a integridade das informações agronômicas.

Ainda que possuam as suas vantagens, como a redução de emissões e aumento de renda em áreas rurais, a implementação enfrenta barreiras como custos iniciais elevados e falta de perícia técnica.

2.6.2 Energia Eólica

No contexto da agricultura moderna, a turbina eólica (aerogerador) atua como a fonte primária ou complementar de eletricidade. O vento gira as lâminas da turbina, convertendo energia cinética em mecânica e, logo em seguida, através de um gerador, em energia elétrica.

Para aplicações de pequeno e médio porte em irrigação, é utilizado turbinas de eixo horizontal (HAWT), que podem ser fabricadas com materiais locais para reduzir custos e adaptadas para operar de forma efetiva, mesmo em baixas velocidades de vento. A eletricidade gerada, geralmente em corrente alternada (AC) ou retificada para corrente contínua (DC), é então gerenciada por controladores de carga para alimentar bombas submersíveis ou de superfície.

Para garantir que o sistema de irrigação inteligente não seja interrompido, onde uma falha de energia pode significar perda de dados ou falha crítica na irrigação, o processo de geração de energia eólica é integrado a bancos de baterias. A turbina carrega as baterias através de retificadores e controladores, criando um "pulmão" energético.

Em sistemas avançados, inversores e reguladores de frequência são usados para suavizar a entrega de energia para as bombas, ajustando a rotação do motor conforme a disponibilidade de carga, protegendo o equipamento contra oscilações bruscas do vento.

2.7. Redes Industriais

As redes industriais são elementos essenciais da comunicação da atual manufatura. Em contrapartida das redes de escritório, as redes industriais não são projetadas para transferir grandes volumes de dados, mas para garantir que a informação certa chegue ao destino certo, no momento exato, e em ambientes muitas vezes hostis.

Uma definição direta e abrangente é fornecida pela Universal Robots (2022): "Redes industriais são estruturas de comunicação automatizada que gerenciam processos industriais envolvendo atuadores, computadores, máquinas, sensores, interfaces, rádios de comunicação, fibra óptica, redes wireless industriais e robôs. Elas transmitem e compartilham dados entre si, garantindo o funcionamento eficiente dos processos produtivos".

De forma complementar, autores como Lugli e Santos (2019 *apud* BENTO, 2024) contextualizam seu intuito: essas redes foram desenvolvidas para "tornar o processo de controle industrial mais flexível, permitindo expansões futuras e garantindo maior acessibilidade".

As características das redes industriais correspondem a capacidade de garantir que uma mensagem será entregue dentro de um intervalo de tempo predefinido, fator crítico para o controle de processos, ou seja, correspondem ao determinismo e tempo real. Além dessa característica, as redes têm a capacidade de operar em condições severas.

Diferentemente de uma rede doméstica, uma rede industrial "deve ser muito confiável, trabalhar em condições adversas e processar rapidamente grandes quantidades de dados". Aspectos como imunidade a ruídos eletromagnéticos são, portanto, requisitos centrais de projeto (DJIEV, 2016).

A escolha da topologia de rede está diretamente ligada aos modos de transmissão e às exigências de cobertura geográfica típicas das aplicações de supervisão.

Segundo a obra de Ervaldo Garcia Junior (2019), Introdução a Sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados – SCADA, as topologias ponto a ponto estabelecem um enlace dedicado entre dois dispositivos, enquanto as configurações multiponto permitem que uma estação mestre se comunique com diversas remotas, operando usualmente em modo half-duplex e empregando mecanismos de polling para evitar colisões.

Nos níveis mais próximos ao processo, o autor aborda as topologias clássicas das redes de campo, como barramento, anel, estrela e árvore.

O barramento tem vantagem pela simplicidade e pelo baixo custo de cabeamento, sendo típico de protocolos como Modbus RTU; o anel, por sua vez, confere redundância intrínseca, aspecto essencial para sistemas que exigem alta disponibilidade.

Garcia Junior (2019) também aponta que, com a consolidação das redes Ethernet industriais, topologias em estrela e árvore ganharam espaço, uma vez que switches gerenciáveis permitem diagnóstico avançado, segmentação do tráfego e rápida recuperação de falhas, elevando a resiliência do sistema supervisório.

Quanto aos protocolos e tecnologias de comunicação, a obra divide a análise entre os fieldbuses tradicionais e as soluções baseadas em Ethernet industrial. Entre os protocolos de campo, o Modbus RTU/ASCII é manifestado como o mais difundido, operando em uma relação mestre-escravo sobre meios físicos como RS-485, e é muitas vezes citado pelo autor por sua robustez e simplicidade de implementação.

O PROFIBUS, em suas vertentes DP e PA, também é detalhado: a primeira voltada a periféricos descentralizados com alta velocidade, e a segunda destinada à instrumentação de processo com segurança intrínseca.

DeviceNet e CANopen, ambos baseados sobre o protocolo CAN, são opções para controle de máquinas e movimento. A transição para a Indústria 4.0 é abordada por meio dos protocolos que encapsulam as funcionalidades dos fieldbuses em quadros Ethernet, como Modbus TCP, PROFINET e EtherNet/IP, os quais, conforme Garcia Junior (2019), ampliam a largura de banda e abrem caminho para a integração vertical entre o chão de fábrica e os sistemas corporativos.

Diante dessas informações, o escopo do SCADA inclui ativos em localidades remotas, destacando também os meios de transmissão como rádio UHF/VHF, telefonia discada e celular, satélite e fibra óptica, sendo esta última recomendada para backbones em razão da imunidade eletromagnética e da elevada capacidade de transmissão.

Garcia Junior (2019) estrutura a hierarquia em níveis que partem do campo, onde sensores e atuadores trocam dados por protocolos de alto determinismo, como Modbus RTU e PROFIBUS PA, passam pelo controle em que controladores lógico-

programáveis executam lógicas de processo com requisitos temporais rígidos, apoiados por redes como PROFIBUS DP e PROFINET e alcançam a supervisão.

Dessa forma, a conexão entre topologias adequadas à extensão geográfica e à criticidade dos processos, a seleção de protocolos que equilibram determinismo e banda passante e a integração hierárquica promovida pelo SCADA constituem os fundamentos técnicos para a supervisão eficaz de sistemas industriais complexos.

A compreensão desses elementos é condição necessária para projetar, operar e expandir plataformas supervisórias que atendam aos atuais requisitos de confiabilidade, interoperabilidade e conectividade com os níveis gerenciais das organizações.

2.7.1. Modbus

Oficialmente criado no final da década de 1970, pela fabricante de equipamentos Modicon, atual Schneider Electric, o Modbus nasceu com o objetivo de estabelecer um protocolo de comunicação serial padronizado e de fácil implementação para uso com controladores lógicos programáveis (CLPs).

Em 2004, a Schneider Electric transferiu os direitos sobre o protocolo para a Modbus Organization, que desde então passou a ser disponibilizado de forma aberta e livre de taxas de licenciamento.

Essa condição, aliada à sua independência em relação ao meio físico, o Modbus é situado na camada de aplicação do modelo OSI e pode ser transportado sobre padrões como RS-232, RS-485 e, posteriormente, Ethernet, contribuiu de maneira decisiva para que se tornasse um dos protocolos mais antigos e ainda hoje mais utilizados em sistemas de automação industrial (MODBUS, [2025]; GARCIA JUNIOR, 2019).

Conforme descrevem Nascimento e Lucena (2003, p. 1), “o protocolo Modbus é baseado no modelo de comunicação mestre-escravo, onde apenas o único dispositivo mestre pode inicializar a comunicação”.

Esse mestre, que pode ser um CLP, um computador ou um sistema supervisorio, endereça um comando, denominado *query*, a um escravo específico, que por sua vez processa a requisição e retorna uma resposta (*response*) contendo os dados solicitados ou a confirmação de uma ação executada.

O protocolo permite também que o mestre envie mensagens em broadcast, dirigidas a todos os dispositivos da rede simultaneamente; nesse caso, os escravos não geram resposta, para evitar colisões no barramento.

Todo esse mecanismo opera em regime half-duplex, com o mestre controlando o acesso ao meio, característica que, impõe um determinismo suficiente para muitos processos industriais e dispensa a necessidade de algoritmos complexos de arbitragem de barramento (GARCIA JUNIOR, 2019; NASCIMENTO; LUCENA, 2003).

Do ponto de vista das modalidades de transmissão, o Modbus serial apresenta duas variantes principais: o Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) e o Modbus ASCII. Ambas compartilham o mesmo modelo funcional e os mesmos códigos de função, distinguindo, entretanto, na forma como os dados são codificados e no método de verificação de erros.

No modo RTU, os dados são transmitidos em formato binário, com cada byte contendo dois dígitos hexadecimais, o que torna a comunicação mais compacta e eficiente em termos de banda; a integridade da mensagem é assegurada por um campo de verificação cíclica de redundância de 16 bits (CRC-16), calculado sobre todo o quadro.

Já no modo ASCII, os dados são codificados como caracteres ASCII legíveis, com cada byte representado por dois caracteres, e um campo de verificação longitudinal (LRC – *Longitudinal Redundancy Check*) substitui o CRC.

Embora o Modbus ASCII seja de mais fácil depuração, o Modbus RTU é frequentemente empregado sobre o padrão elétrico RS-485, que suporta até 32 dispositivos em um único barramento e distâncias de até 1.200 metros (ALFA INSTRUMENTOS, 2000; GARCIA JUNIOR, 2019).

A evolução do protocolo para a camada TCP/IP resultou no surgimento do Modbus TCP, que transpõe a lógica de requisição e resposta para redes Ethernet sem alterar a estrutura essencial da mensagem Modbus.

O Modbus TCP opera tipicamente na porta 502 e, por trafegar sobre a infraestrutura de rede corporativa, viabiliza o acesso remoto a dispositivos de campo: uma funcionalidade que, ao mesmo tempo, representa uma vantagem e um risco, por expor o chão de fábrica a ameaças típicas do mundo da tecnologia da informação (UFRN, 2025; GARCIA JUNIOR, 2019).

No âmbito dos sistemas SCADA, o Modbus ocupa posição estratégica na integração vertical dos níveis hierárquicos de automação. Nos níveis de campo e de controle, o Modbus RTU, operando sobre RS-485 em topologias de barramento, estabelece a comunicação entre CLPs, remotas e instrumentos de medição, garantindo ciclos de varredura compatíveis com os requisitos de aquisição de dados de processos contínuos.

Já o Modbus TCP atua como ponte para o nível de supervisão, permitindo que as estações centrais de operação, por meio de processadores de fronteira ou diretamente via switches Ethernet, colem dados, emitam comandos e integrem o sistema supervisório aos bancos de dados históricos e aos níveis gerenciais.

Garcia Junior (2019) ressalta que essa capacidade de transitar da instrumentação de campo até o software SCADA, preservando um formato de mensagem simples e bem conhecido, é um dos fatores que explicam a permanência do Modbus mesmo em arquiteturas modernas que coexistem com PROFINET, EtherNet/IP e outras soluções de Ethernet industrial.

Seguindo esse raciocínio, é possível afirmar que o Modbus não é apenas um protocolo legado: sua evolução para o ambiente TCP/IP e sua função de elemento unificador na hierarquia da automação consolidam-no como um componente ainda relevante no cenário da Indústria 4.0 (GARCIA JUNIOR, 2019).

2.8. Sistemas de Controle em Irrigação (Estudos de Caso)

Para compreender as diferentes abordagens e soluções tecnológicas empregadas na irrigação automatizada ao redor do mundo, esta seção apresenta uma seleção de estudos de caso implementados em países como Estados Unidos, Índia, China, Alemanha e Brasil. Os casos foram escolhidos com base no uso de automação (CLP ou microcontroladores), integração com energias renováveis (solar e eólica) e foco na conservação de recursos hídricos. A análise dessas experiências permitiu identificar boas práticas, desafios e oportunidades para o desenvolvimento do protótipo proposto neste trabalho.

2.8.1. Estudos de Caso: Estados Unidos

2.8.1.2. Purdue University & Michigan State University – Microinversor Solar para Irrigação Inteligente

Diante do cenário da agricultura dos Estados Unidos, pesquisadores da Universidade Purdue (Elmore Family School of Electrical and Computer Engineering) em colaboração com a Michigan State University desenvolveram um projeto financiado pelo USDA (US\$394.608) para integrar energia solar com tecnologias IoT, visando tornar a irrigação mais eficiente e acessível para agricultores.

Conforme Cal.net (2026), as tecnologias empregadas tratam-se de Micro inversor, alimentado por energia solar, projetado para dar partida suave em motores de indução de bombas de irrigação, capaz de reduzir picos de demanda na rede elétrica (*peak shaving*); os sensores IoT, que tem como finalidade monitorar a umidade do solo, consumo de energia e outras variáveis ambientais; plataforma em nuvem que permite acesso remoto aos dados e controle do sistema e as ferramentas de suporte à decisão que considera tipo de cultura, tamanho da bomba e condições do campo.

Os resultados obtidos são perceptíveis pois houve redução do estresse na rede elétrica durante períodos de alta demanda, economia de energia através do uso de

fonte renovável, sistema adaptável a diferentes tamanhos de fazenda e tipos de irrigação e testes de campo em andamento em fazendas parceiras em Michigan e Indiana (anos 2 e 3 do projeto) (CAL.NET, 2026).

2.8.1.2. USDA-ARS Bushland, Texas – Sistema SCADA para Irrigação com Taxa Variável (VRI)

O Agricultural Research Service (ARS) do USDA desenvolveu um sistema SCADA para gerenciamento de irrigação que visa otimizar a produção agrícola por unidade de água e fertilizante utilizados, com foco em irrigação deficitária regulada.

Segundo a Emergent Connect (2025), as tecnologias empregadas envolvem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) para controle de irrigação com taxa variável, os sensores sem fio correspondentes as câmeras de visão computacional, sensores térmicos infravermelhos para detecção de estresse hídrico das plantas, os sensores de umidade do solo e estação meteorológica, algoritmos computacionais para prescrição de aplicação de água baseada em estresses bióticos e abióticos e a Interface gráfica amigável com integração em nuvem para acesso e controle remoto.

Os resultados obtidos correspondem a redução do escoamento superficial e perdas por percolação profunda, a redução do consumo de água, redução da energia consumida no bombeamento, o aumento da rentabilidade e sustentabilidade das economias rurais e o aumento da eficiência geral do uso da água (precipitação + irrigação) (EMERGENT CONNECT, 2025).

2.8.1.3. Terranova Ranch, Califórnia – Automação de Irrigação com IoT e Conectividade Rural

A Terranova Ranch, trata-se de uma operação agrícola diversificada de 6.000 acres no Vale de San Joaquin, Califórnia, enfrentava desafios com o gerenciamento manual de válvulas em 2.200 acres de tomate. O método tradicional exigia equipes

trabalhando dia e noite para abrir e fechar válvulas, resultando em ineficiência e desperdício de água.

De acordo com a Lumo Precision Irrigation (2025), as tecnologias empregadas no projeto “Automação de Irrigação com IOT e Conectividade Rural”, englobam Sensores IoT para monitoramento de solo e plantas, sistema de automação de irrigação Emergent Connex com conectividade Cal.net (LoRaWAN), válvulas automatizadas controladas remotamente e internet rural de alta velocidade para transmissão de dados em tempo real.

Os resultados quantitativos demonstram uma redução de 34% no uso de água em 400 acres de tomate processado, 136 acre-feet¹ de água subterrânea economizada anualmente, \$22.420 economizados anualmente em custos de água. No cenário antigo, as equipes operavam as válvulas manualmente duas vezes ao dia, com a implementação do projeto, a irrigação é programada remotamente " (LUMO PRECISION IRRIGATION, 2025).

2.8.1.4. ISSCADA System – Irrigação Deficitária Automatizada para Algodão (Texas)

Estudo de dois anos conduzido em Bushland, Texas, investigou o desempenho do sistema ISSCADA (Irrigation Scheduling Supervisory Control and Data Acquisition) para gerenciamento de irrigação deficitária em algodão, comparando métodos automatizados com o método manual tradicional.

O'Shaughnessy et al. (2023) descreve as tecnologias empregadas, como o ISSCADA - sistema SCADA especializado para programação de irrigação, sensor de estresse hídrico da planta (iCWSI - integrated Crop Water Stress Index), sensores de umidade do solo (sondas de nêutrons para método manual de referência),

¹ Unidade de medida de volume equivalente a aproximadamente 1.233,48 m³. Conforme o NIST Special Publication 811, um *acre-feet* 1 act-ft = 12333,489 m³ é definido pela relação (baseado no *U.S. Survey Foot*).

combinação de depleção de água de solo com limiares iCWSI e sistema baseado em GIS para gerenciamento espacial da irrigação.

Os resultados quantitativos demonstram uma economia mínima de água de 20% em 2021 e de 16% em 2022. A produtividade de algodão foi mantida nos níveis de irrigação em 75% de reposição, as tecnologias empregadas produziram resultados estaticamente similares ao método manual, a sua vantagem é a eliminação da sonda de nêutrons (PURDUE UNIVERSITY, 2024).

2.8.1.5. Lumo – Automação de Bomba a Válvula (Pump-to-Plant)

A Lumo, empresa americana de tecnologia de irrigação de precisão, desenvolveu uma plataforma de automação que integra controle de bombas e válvulas inteligentes. A tecnologia foi implementada em ranchos na Costa Norte e Central dos EUA, com tamanhos variando de 60 a 1.300 acres.

Segundo a ScienceDirect (2025), as tecnologias empregadas envolvem plataforma de válvulas inteligentes com dados em tempo real de vazão e pressão, integração com automação de bomba para controle "da bomba à planta", sensores de vazão e pressão para feedback em tempo real, agendamento remoto de irrigação em horários noturnos e fora de pico e verificações de segurança avançadas para prevenir danos por funcionamento a seco e picos de pressão.

Os resultados quantitativos comprovam a eliminação da necessidade de deslocamento ao campo para ligar/desligar bombas, irrigação noturna sem necessidade de mão de obra extra ou horas extras e a otimização de quais blocos irrigar simultaneamente baseado em dados em tempo real, "Pela primeira vez, posso dizer que esses blocos foram suficientemente irrigados" – Andrew Oliver, gerente de vinhedo da Antinori.

2.8.1.6 Iron Horse Vineyards – Conectividade IoT para Viticultura de Precisão

Pesquisadores desenvolveram a plataforma Crop2Cloud (C2C) para integrar múltiplas fontes de dados (sensores TDR, radiômetros infravermelhos, estações meteorológicas) e fornece recomendações de irrigação em tempo real usando lógica fuzzy e índices de estresse hídrico.

De acordo com o USDA ARS (2026) as tecnologias empregadas correspondem aos sensores conectados à rede IoT Emergent, monitoramento e regulação remota da irrigação em diferentes seções do vinhedo, dados em tempo real para otimização do equilíbrio entre crescimento da copa e qualidade dos frutos e conectividade rural para áreas remotas e montanhosa.

Os resultados quantitativos demonstram melhoria na qualidade do vinho através do controle preciso de irrigação, redução do estresse hídrico em áreas secas e controle do crescimento excessivo da copa em áreas úmidas, prevenção de condições favoráveis para mofo e a capacidade de monitoramento em áreas onde antes não havia conectividade confiável.

2.9. Estudos de caso: Índia

2.9.1. Sistema SCADA para Monitoramento Remoto em Irrigação Solar (Punjab)

Pesquisadores da Trinity College of Engineering and Research, Pune, em publicação da Springer (Communications in Computer and Information Science, 2025), desenvolveram uma arquitetura assistida por SCADA para monitoramento remoto em sistemas de irrigação solar, abordando os desafios de escassez de água causados por padrões de chuva imprevisíveis na economia agrícola indiana.

Segundo Springer (2025), as tecnologias empregadas envolvem integração de IoT e tecnologias de energia solar para revolucionar o gerenciamento de água, com

foco específico em irrigação inteligente, implementação de sistemas de bombeamento baseados em energia solar e uma estrutura proposta que introduz monitoramento remoto com SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

Os resultados demonstram operação estável e eficiente sem o uso de eletricidade da rede elétrica. Apesar dos desafios, a integração de IoT e energia solar mostra potencial para remodelar a agricultura tradicional, oferecendo uso eficiente de energia solar para uma agricultura inteligente sustentável.

2.9.2. WSN para Irrigação por Gotejamento Automatizado em Cultivo Protegido (Manipur)

O Dr. G T Patle, Professor Assistente do Departamento de Irrigação e Drenagem da Central Agricultural University, Imphal, Manipur, desenvolveu e avaliou um sistema de irrigação por gotejamento automatizado baseado em rede de sensores sem fio (WSN) para cultivo protegido, com os resultados publicados no CIGR Journal em dezembro de 2025.

Segundo Patle (2025), as tecnologias empregadas envolvem três nós principais: nó supervisor (controlador primário que determina o momento e a quantidade precisa de água), nó sensor (coleta dados de diversas áreas do campo) e nó atuador (consiste em uma válvula solenoide que ativa ou desativa baseado nas diretivas do nó supervisor). O sistema foi avaliado para cultivo de tomate durante duas safras em 2022.

Os resultados quantitativos comprovam eficiências excepcionais: uniformidade de emissão de 91,55%, eficiência de distribuição de água de 94,91% e eficiência de aplicação de 94,96%. O sistema automatizado aplicou semanalmente de 2,78 a 6,96 litros por planta de tomate, alcançando 21% de redução no uso de água e 34,59% de melhoria na produção de tomate em comparação ao sistema manual. O desempenho do sistema WSN automático superou significativamente o sistema manual em termos de métricas de crescimento da cultura e rendimento.

2.9.3 PM-KUSUM – Programa Nacional de Bombas Solares (Madhya Pradesh)

A Shakti Pumps (India) Limited recebeu uma ordem de trabalho no valor de Rs 65,20 crore (aproximadamente US\$ 7,8 milhões) da Madhya Pradesh Urja Vikas Nigam Limited para o fornecimento de 1.897 sistemas de bombeamento de água solares fotovoltaicos DC off-grid em todo o estado de Madhya Pradesh.

Segundo a Libord Broking (2025), a ordem foi concedida sob o Componente-B do esquema PM-KUSUM (Pradhan Mantri Kisan Urja Suraksha evam Utthaan Mahabhiyan) e abrange o projeto, fabricação, fornecimento, transporte, instalação, teste e comissionamento dos sistemas de bombeamento solar em todo o estado. O projeto deve ser executado dentro de 120 dias.

Os resultados quantitativos comprovam o fortalecimento da presença da Shakti Pumps no segmento de irrigação solar e o alinhamento com o foco do governo na promoção de soluções baseadas em energia renovável para a agricultura sob o programa PM-KUSUM.

2.9.4 Automação de Canais SCADA Alimentada por Energia Solar (Karnataka)

A Koduri Venkata Kowshik, em apresentação no Green Summit on Green & Digital Technology 2024 no MNIT Jaipur, documentou a implementação de automação de canais alimentada por energia renovável para gerenciamento eficiente de recursos hídricos no Canal Margem Esquerda de Narayanapur, em Karnataka.

Segundo o relato técnico de KOWSHIK (2024), as tecnologias empregadas envolvem automação de comportas de canais baseada em SCADA (registros cruzados e saídas de descarga de água), totalizando 4.203 comportas espalhadas por uma área de 4,5 lakh hectares (450.000 hectares), utilizando rádios para comunicação entre si e com o centro de comando, operando puramente com energia solar.

Os resultados quantitativos comprovam a facilitação eficaz do alcance de água para as extremidades dos sistemas de canais alimentados por gravidade. Os agricultores sob o sistema de canal automatizado relataram mudanças notáveis no gerenciamento de água e elogiaram a distribuição equitativa de água. Os benefícios adicionais observados incluíram aumento na produtividade das colheitas, economia de água e melhoria na confiabilidade da distribuição de água entre os agricultores.

2.9.5. Irrigação por Gotejamento Inteligente com WSN e ZigBee (Coimbatore)

Pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica da Karpagam Academy of Higher Education, Coimbatore, e do Karpagam Institute of Technology, publicaram na E3S Web of Conferences (2024) um protótipo de sistema de irrigação inteligente combinando tecnologia WSN com irrigação por gotejamento.

Segundo Kalidas et al. (2024), as tecnologias empregadas envolvem redes de sensores sem fio e comunicação ZigBee para criar uma solução de irrigação automatizada e inteligente, com sensores estrategicamente posicionados próximos às raízes das plantas (incluindo temperatura e umidade do solo). O sistema analisa os dados coletados em relação aos limites predefinidos para cada parâmetro e ativa ou desativa a irrigação de acordo.

Os resultados quantitativos demonstram que a integração de WSNs na agricultura oferece benefícios numerosos, incluindo qualidade de cultura aprimorada, eficiência de produção melhorada, conservação de recursos (água e energia) e práticas otimizadas de gerenciamento de culturas (como irrigação e fertilização). O sistema visa alcançar economias significativas de água, tempo e energia, abordando as ineficiências dos sistemas atuais e as crescentes demandas de produção.

2.9.6. Irrigação de Precisão com Dados pela Culyvate (Karnataka)

A Culyvate, uma agritech startup fundada em 2016 em Bengaluru, desenvolveu um sistema de irrigação por sensoriamento remoto que ajuda agricultores de arroz a reduzir o uso de água em até 50%. O modelo foi implementado em Punjab, Uttar Pradesh, Haryana, Tamil Nadu, Karnataka, Telangana e Andhra Pradesh.

Segundo o Frontier Tech Hub do NITI Aayog (2025), as tecnologias empregadas envolvem sensores de umidade do solo, medidores de vazão, dados meteorológicos e algoritmos de IA para monitorar condições de campo em tempo real. Os agricultores recebem alertas móveis sobre quando e quanto irrigar. O hardware é alimentado por energia solar e capaz de funcionar sem acesso à internet. Os alertas são enviados via chamadas de voz e em idiomas regionais, não exigindo alfabetização ou conhecimento técnico do agricultor.

Os resultados quantitativos comprovam que mais de 3.500 agricultores em 7 estados indianos se beneficiaram, com economia superior a 3.080 crore litros de água (aproximadamente 30,8 bilhões de litros), melhoria de até 20% na qualidade e produtividade das colheitas, e redução de emissões de até 60% para cumprir diretrizes ESG - Environmental, Social and Governance (Ambiental, Social e Governança). A tecnologia, patenteada, é adaptável para outras culturas de alta demanda hídrica como cana-de-açúcar e banana.

2.9.7. Parceria Netafim e Amazon India para Conservação de Água (Bengaluru e Hyderabad)

A Orbia Netafim, líder global em agricultura de precisão, e a Amazon India anunciaram duas iniciativas que visam a conservação de água que devem economizar aproximadamente 325 milhões de litros de água anualmente em Bengaluru e Hyderabad .

Segundo a United News of India (2026), as tecnologias empregadas envolvem a conversão de sistemas tradicionais de irrigação por inundação para sistemas avançados de irrigação por gotejamento em 80 hectares de plantações de cabaça e

tomate em Bengaluru (beneficiando cerca de 70 agricultores independentes) e 40 hectares de plantações de milho e vegetais em Hyderabad (beneficiando cerca de 40 agricultores independentes).

Os resultados quantitativos comprovam a economia anual de aproximadamente 175 milhões de litros de água no cinturão agrícola ocidental de Bengaluru e cerca de 150 milhões de litros no norte de Hyderabad. A iniciativa apoia o compromisso da Amazon de se tornar "water positive" na Índia até 2027. Max Moldavsky, Diretor de Inovação e Soluções Climáticas da Orbia Netafim, observou que a parceria demonstra como a irrigação de precisão pode gerar impacto significativo para agricultores e comunidades, melhorando a eficiência hídrica, fortalecendo meios de subsistência e contribuindo para esforços mais amplos de segurança hídrica.

2.10. Estudo de caso: China

2.10.1. Sistema de Irrigação Automática Baseado em CLP com Energia Solar (Chongqing)

Pesquisadores da Chongqing University of Science and Technology, por meio da patente CN106034999A publicada em outubro de 2016, desenvolveram um sistema de irrigação automática baseado em CLP e alimentado por energia solar para resolver os problemas de baixa inteligência dos sistemas de irrigação tradicionais e a dificuldade de fornecimento de energia em áreas remotas.

Segundo a CNIPA (2016), as tecnologias empregadas envolvem um módulo de alimentação fotovoltaica composto por painéis solares e bateria, um módulo de detecção que inclui sensor de umidade do solo, sensor de nível de água e sensor de abertura de válvula, um módulo de controle CLP (Controlador Lógico Programável) e um módulo de irrigação com bomba d'água e válvula solenoide. O sistema adota um controlador PID fuzzy para controlar com precisão a abertura da válvula eletromagnética.

Os resultados quantitativos comprovam que o sistema alcança controle mais preciso da quantidade de irrigação, melhora significativamente a inteligência do sistema de irrigação, permite auto-ativação, auto-parada e auto-ajuste da altura da irrigação durante o processo de aspersão.

A utilização do módulo de alimentação fotovoltaica resolve o problema de energia necessária para irrigação em áreas remotas, alcançando efeitos considerativos de economia de energia e redução de emissões, além de proteger o meio ambiente ecológico.

2.10.2. Sistema Inteligente de Monitoramento para Coleta e Reciclagem de Água da Chuva

O inventor Wang Hui desenvolveu um sistema inteligente de monitoramento para coleta, tratamento e reciclagem de água da chuva, registrado sob a patente CN203896933U em 2014, com o objetivo de garantir o uso racional e eficaz dos recursos hídricos na agricultura.

Segundo Wang Hui (2014), as tecnologias empregadas envolvem um controlador PLC, inversor de frequência, sensor de pressão de água, bomba de irrigação, tela sensível ao toque conectada ao PLC, sensor de chuva para detectar a precipitação e decidir sobre a abertura da válvula borboleta de entrada de água, sensores de nível de água para detectar os limites superior e inferior das piscinas de sedimentação e água limpa, sensor de pressão de água para estabilizar a pressão de saída e sensores de umidade do solo distribuídos em múltiplos pontos combinados com válvulas proporcionais para garantir irrigação refinada.

Os resultados quantitativos comprovam que o sistema assegura que o volume de entrada de água não ultrapasse os limites, garante a operação normal e estável do sistema, estabiliza a pressão de saída de água e garante irrigação refinada, assegurando o uso racional e eficaz das fontes de água.

2.10.3. Irrigação Inteligente de 4.000 Acres de Arrozais (Chongming, Xangai)

A empresa Anctech implementou um projeto de irrigação inteligente em terras agrícolas estatais na Ilha de Chongming, Xangai, cobrindo aproximadamente 4.000 acres de plantação de arroz. O projeto foi concluído e documentado em maio de 2025.

Segundo a Anctech (2025), as tecnologias empregadas envolvem 5 controladores principais GG-002D, 59 controladores de campo para monitoramento de 59 sensores de nível de líquido, 55 controladores para controle de 55 válvulas gaveta elétricas, 12 controladores para 12 válvulas borboleta elétricas DC 24V, 3 controladores para controle de bombas, e 131 sistemas de alimentação solar (incluindo caixas à prova de chuva e baterias).

O sistema adota uma disposição que combina canais abertos e fechados, com controladores que analisam dados de sensores de nível e controlam automaticamente a abertura das válvulas. A comunicação é bidirecional sem fio integrada, com distância máxima de controle de 4.000 metros.

Os resultados quantitativos comprovam que o sistema alcança controle automático da abertura das válvulas com base no nível da água do arrozal, suporta controle remoto e controle manual no local, reduzindo custos de mão de obra e melhorando a eficiência da produção. Todo o sistema é alimentado por energia solar verde com baterias de armazenamento, garantindo operação mesmo em dias chuvosos e eliminando a necessidade de cabeamento no campo.

2.10.4. Dispositivo Inteligente de Controle de Irrigação com Economia de Energia Fotovoltaica (Tarim University)

Pesquisadores da Tarim University (Xinjiang) – Li Jianjun, Wang Wei, Zhang Hongzhou e Liao Jian – desenvolveram um dispositivo inteligente de controle de irrigação com economia de energia fotovoltaica, registrado sob a patente CN203575261U em 2014, voltado para regiões áridas do oeste da China.

Segundo a National Agricultural Information Service (2014), as tecnologias empregadas envolvem computador conectado via cabo de dados ao PLC S7-200 da Siemens, fonte de alimentação fotovoltaica conectada ao PLC S7-200, inversor de frequência, módulo de entrada analógica do PLC, sensor de umidade do solo e transmissor.

A bomba d'água é conectada ao inversor de frequência e aos sprinklers via tubulações, com o inversor conectado ao PLC S7-200 e ao módulo de entrada analógica. O sistema detecta a umidade do solo e ajusta automaticamente o estado de operação da bomba d'água.

Os resultados quantitativos comprovam que o dispositivo possui estrutura simples, ajusta automaticamente o estado de operação da bomba d'água através da detecção da umidade do solo, melhorando a eficiência e economizando água.

O consumo de eletricidade do dispositivo é fornecido por energia solar, economizando energia elétrica. A estrutura inovadora é especialmente adequada para regiões com recursos hídricos escassos.

2.10.5. Controle de Irrigação por CLP com Lógica Fuzzy para Agricultura de Precisão

Pesquisadores chineses desenvolveram um sistema de controle de irrigação baseado em CLP que utiliza controladores PID fuzzy para otimizar a aplicação de água. O sistema foi projetado especificamente para cultivo em estufas e áreas de produção agrícola intensiva.

Segundo a Rwe Renewables (2016), as tecnologias empregadas envolvem controlador PID fuzzy integrado ao CLP para controle preciso da abertura da válvula eletromagnética, combinado com sensores de umidade do solo em múltiplas profundidades.

O sistema utiliza um módulo de alimentação fotovoltaica com painéis solares e baterias para garantir operação contínua, e o módulo de irrigação inclui bombas

d'água e sistema de irrigação tipo guincho para aspersão. O sistema permite auto-ativação, auto-parada e auto-ajuste da altura da irrigação durante o processo.

Os resultados quantitativos demonstram que o sistema alcança maior precisão na quantidade de irrigação, melhorando significativamente o nível de inteligência do sistema de irrigação em comparação com métodos tradicionais.

A aspersão não é limitada pelo ambiente geológico, apresentando forte adaptabilidade para diferentes condições de terreno.

2.10.6. Monitoramento Inteligente com Múltiplos Sensores e Válvulas Proporcionais

O inventor Wang Hui desenvolveu um sistema completo de monitoramento inteligente que integra coleta de água da chuva com irrigação de precisão, utilizando uma arquitetura abrangente de sensores e atuadores para maximizar a eficiência hídrica.

Segundo a Wang Hui (2014), as tecnologias empregadas envolvem PLC como controlador central da bomba d'água, grande quantidade de sensores e atuadores para controle automático, sensor de chuva para decisão de coleta de água, sensores de nível de água para controle de limites de operação, sensores de pressão de água para estabilização da pressão de saída, e sensores de umidade do solo em múltiplos pontos combinados com válvulas proporcionais para garantir irrigação refinada. O sistema também inclui tela sensível ao toque para interface homem-máquina e inversor de frequência para controle da bomba.

Os resultados quantitativos comprovam a detecção precisa do volume de chuva para decidir sobre a coleta de água, garantia de que o volume de entrada de água não ultrapasse os limites das piscinas de sedimentação e água limpa, operação normal e estável do sistema, pressão de saída estabilizada e irrigação refinada garantida por sensores de umidade do solo em múltiplos pontos.

2.10.7. Sistema Inteligente para Grandes Áreas com Controle Remoto via 4G (Xangai)

O projeto de irrigação inteligente de 4.000 acres em Chongming Island, Xangai, representa uma das maiores implementações de automação de irrigação alimentada por energia solar na China, integrando controle remoto via rede móvel.

Segundo a Anctech (2025), as tecnologias empregadas envolvem controladores principais GG-002D conectados a smartphones ou computadores via rede 4G, 59 controladores de campo para monitoramento de sensores de nível de líquido, 55 controladores para controle de válvulas gaveta, 12 controladores para válvulas borboleta DC 24V, 3 controladores para controle de bombas, e 131 sistemas de alimentação solar autônomos.

Os controladores de campo se comunicam com os controladores principais através de rádio bidirecional integrado, permitindo que os usuários visualizem remotamente o status do sistema e controlem equipamentos de campo a qualquer hora e em qualquer lugar.

Os resultados quantitativos comprovam a redução de custos de mão de obra e melhoria da eficiência da produção em larga escala. O sistema permite que os usuários escolham entre controle automático, controle remoto ou controle manual no local das válvulas. Toda a energia é fornecida por fontes renováveis, sem necessidade de cabeamento elétrico no campo, alcançando verdadeira automação da irrigação agrícola.

2.11. Alemanha

2.11.1. Smart Water Cube – Sistema de Irrigação Inteligente no All Electric Society Park (Blomberg)

A Phoenix Contact GmbH & Co. KG implementou um sistema de irrigação inteligente no All Electric Society Park em Blomberg, um parque de mais de 7.800 m²

que demonstra o uso integrado de energias renováveis e automação. O projeto utiliza o Smart Water Cube como centro de controle da irrigação do parque.

Segundo a Phoenix Contact (2024), as tecnologias empregadas envolvem uma PLCnext-Steuerung AXC-F 3152 (CLP) como unidade central de processamento, módulos I/O Smart Elements para acionamento das válvulas solenoides, sensores LoRaWAN de umidade e temperatura do solo instalados em 15 zonas de irrigação, estação meteorológica local, medidor de vazão com módulo de impulsos na tubulação principal, e conexão via VPN ao sistema SCADA baseado na web (Resylive) para monitoramento remoto.

O sistema também conta com um terminal local para configuração de horários e limites de irrigação por zona, e utiliza GNSS com NTP para sincronização temporal.

Os resultados quantitativos comprovam que o sistema alcança uma economia de água de até 30% em comparação com a irrigação puramente baseada em tempo. O algoritmo detecta automaticamente vazamentos e gera alarmes, e a integração com a estação meteorológica permite abortar automaticamente a irrigação quando a chuva é detectada.

A plataforma SCADA remota permite a geração de relatórios de consumo de água e configuração da planta de qualquer lugar.

2.11.1. BEEOTOPIA – Irrigação Automatizada para Plantio Vertical em Fachadas (Mannheim)

A BEEOTOPIA, empresa alemã especializada em projetos de plantio urbano, implementou um sistema automatizado de irrigação e fertilização em uma pérgola de 10 metros de altura durante o Federal Garden Show (BUGA) 2023 em Mannheim. O projeto cobriu quase 50 metros quadrados de espaço vertical com 1.700 plantas, mais 30 metros quadrados de plantio suspenso em bolsos têxteis sustentáveis.

Segundo a Wireless Logic (2025), as tecnologias empregadas envolvem um sistema automático de irrigação e fertilização, sensores de plantas interconectados, roteador IoT Teltonika RUT240 com conexão celular, e uma solução SIM com IP fixo fornecida pela Wireless Logic mdex para garantir conectividade autossuficiente e

estável, já que não havia rede Wi-Fi disponível no local. Todo o projeto foi gerenciado remotamente via rede celular.

Os resultados quantitativos comprovam que o plantio vertical proporciona capacidade de resfriamento de 3 a 5 graus Celsius de redução na temperatura ambiente através do resfriamento evaporativo, eliminação do uso de ar-condicionado no verão devido ao pré-condicionamento do ar, melhoria do clima do distrito através de correntes de ar ascendentes (efeito chaminé), e redução da permeabilidade ao vento com efeito isolante.

2.11.2. Laboratório de Inovação APV 2.0 – Acoplamento de Produção Agrícola e Fotovoltaica (Renânia)

Pesquisadores do Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, em cooperação com o Forschungszentrum Jülich, desenvolveram o Laboratório de Inovação APV 2.0, um projeto financiado pelo Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) com duração de dezembro de 2019 a dezembro de 2021, visando otimizar a resiliência agrícola e os rendimentos enquanto expande a energia renovável através do estabelecimento de sistemas agrivoltaicos variados na região de mineração da Renânia.

Segundo o Fraunhofer ISE (2022), as tecnologias empregadas envolvem módulos PV bifaciais, rastreados e fixos, com diferentes orientações (sul ou leste-oeste) instalados em uma instalação de pesquisa de aproximadamente 1 hectare perto de Alt-Morschenich.

O sistema utiliza algoritmos inovadores para controle dos sistemas de rastreamento dos módulos, permitindo o uso otimizado da luz para geração de energia solar e produção agrícola.

O sistema de captação de água da chuva é controlado via sensores para explorar e implementar irrigação sinérgica com a água coletada, e uma instalação de fenotipagem integrada à subestrutura permite o registro diferenciado de mudanças diurnas e sazonais nas culturas.

Os resultados quantitativos comprovam que o sistema resolve conflitos de uso da terra ao permitir o uso duplo de terras agrícolas de alta qualidade. A alteração do ângulo de inclinação do módulo pode aumentar a disponibilidade solar para a cultura em condições de baixa irradiação crítica, mas também protegê-la de clima extremo (calor, granizo) quando movida para posição horizontal.

A produção de eletricidade solar, que depende da posição do sol, também é gerenciável via controle do módulo e quantificada na instalação de pesquisa. A região da Renânia, que enfrenta mudanças estruturais devido ao fim da mineração de lignito, é beneficiada desta solução inovadora que combina produção de alimentos e energia na mesma área.

2.11.3. EXPRESS – Campo Experimental para Irrigação e Monitoramento de Estresse Hídrico (Alemanha)

O IMMS GmbH, em cooperação com o Federal Ministry of Agriculture, Food and Regional Identity (BMLEH), desenvolveu o projeto EXPRESS (Experimental field for data-driven networking and digitalisation in agriculture), financiado com o número de concessão FKZ 28DE102D18, com duração de 2019 a 2025, visando testar e avaliar tecnologias digitais para aumentar a eficiência de recursos na produção agrícola, com foco especial em culturas especiais.

Segundo o IMMS (2025), as tecnologias empregadas envolvem sistemas de sensores autônomos modulares para coleta de dados de estresse hídrico em múltiplas escalas, monitoramento automático de parâmetros abióticos chave através da medição do microclima nas culturas, integração de dados de fontes heterogêneas de sensores via tecnologia RFID, transmissão de dados via 5G para a nuvem S2DES, e desenvolvimento de soluções de sistema para monitoramento de seca em cooperação com empresas agrícolas.

O foco está em cinco casos de uso: monitoramento de estresse hídrico para otimização da irrigação, monitoramento automático de parâmetros abióticos, rastreamento de alimentos via blockchain, realidade aumentada/virtual/mista na agricultura, e integração e gerenciamento de dados altamente heterogêneos.

Os resultados quantitativos comprovam que os sistemas de sensores autônomos são projetados de forma o mais modular possível para posterior adaptação às respectivas condições de contorno em uma empresa agrícola.

O desafio de desenvolver sistemas de baixo custo que registrem todas as variáveis necessárias com precisão suficiente foi abordado, permitindo obter informações úteis com o menor número possível de pontos de medição.

Os resultados são disponibilizados para a indústria, promovendo a transferência de tecnologia do campo experimental para a prática agrícola.

2.11.5. 4DRain – Distribuição Espacial e Temporal de Água sob Máquinas de Irrigação (Baixa Saxônia)

Pesquisadores da Ostfalia Hochschule – Professor Dr.-Ing. Klaus Röttcher, Felix Schmidt M.Sc., Jasper Leon Seng B.Eng. e Jasmina Bock M.Sc. – lançaram o projeto 4DRain no início de 2025, com duração prevista de 01.01.2025 a 31.12.2026.

O projeto visa criar um uso mais eficiente da água de irrigação através do uso de máquinas de irrigação móveis e autônomas, respondendo ao aumento da demanda hídrica na Baixa Saxônia, onde cerca de 14% das terras aráveis são irrigadas (comparado à média nacional de apenas 5%).

Segundo o projeto 4DRain (2025), as tecnologias empregadas envolvem máquinas de irrigação móveis autônomas, investigação de diferentes opções de irrigação móvel, influência do controle de irrigação e novas possibilidades técnicas, análise do efeito da distribuição de água na infiltração no solo e na distribuição de umidade do solo nas culturas estudadas.

O projeto examina três pontos principais: diferentes culturas como batata, o tempo que leva para a água de irrigação atingir a profundidade da qual a planta extrai água em seu estágio particular de crescimento, e a evolução temporal da distribuição de água no solo, investigando as vantagens de aplicações de irrigação mais frequentes, porém menores.

Os resultados quantitativos comprovam que otimizações devem ser derivadas tanto para irrigação não controlada existente com canhão sprinkler quanto para canhão sprinkler controlado.

O projeto é baseado em projetos de pesquisa anteriores que já realizaram testes para investigar a tecnologia de irrigação. A pesquisa é conduzida em esquema semelhante e a implementação da metodologia de teste é tecnicamente garantida.

O projeto aborda a questão central de como garantir tecnicamente que a planta receba a quantidade necessária de água da forma mais precisa possível e com o menor esforço técnico possível.

2.11.6. iSoBeD – Abordagens Digitais e Baseadas em IA para Irrigação Sustentável (Geisenheim)

O projeto iSoBeD (desenvolvimento de novas abordagens digitais e baseadas em IA para soluções de irrigação sustentáveis, eficientes e práticas em vegetais e viticultura) é financiado pelo Federal Ministry of Food and Agriculture, com duração de setembro de 2025 a agosto de 2028, sob coordenação do Dipl.-Physiker Marco Hofmann e Dr. Matthias Friedel da Hochschule Geisenheim University.

Segundo Hofmann e Friedel (2025), as tecnologias empregadas envolvem o desenvolvimento de ferramentas digitais para modelar e otimizar requisitos de irrigação em culturas vegetais e viticultura de forma localizada, integração de sensores em rede, reconstruções digitais de parâmetros de culturas ou modelos orientados por dados e IA, otimização e automação de métodos de irrigação para cultivo de vegetais para permitir controle de taxa variável, implementação de irrigação automatizada localizada para viticultura usando protocolos padronizados, e validação dos métodos desenvolvidos em ensaios de campo ao longo de vários anos em fazendas cooperadoras.

Os resultados quantitativos comprovam que as soluções desenvolvidas permitem uma determinação mais precisa das necessidades hídricas, economizando recursos hídricos. A implementação usando protocolos padronizados simplifica a precisão da aplicação e o gerenciamento da irrigação em toda a cadeia de processo.

Para a viticultura, a irrigação automatizada localizada visa garantir a produtividade de longo prazo e a preservação de encostas íngremes que caracterizam paisagens inteiras.

O projeto promove o forte envolvimento de profissionais e a transferência de conhecimento para fazendas de vegetais e vinho através de atividades intensivas de disseminação, networking e transferência, estabelecendo as bases para o cultivo sustentável e digitalmente apoiado de culturas especiais.

2.11.7. Projeto de Demonstração Agri-PV da RWE e Forschungszentrum Jülich (Titz-Jackerath)

A RWE Renewables, em cooperação com o Forschungszentrum Jülich, planejou um projeto de demonstração inovador de agrivoltaica em aproximadamente sete hectares de terra recultivada na borda da mina de Garzweiler em Titz-Jackerath, Renânia do Norte-Vestfália. O projeto é financiado pelo estado da Renânia do Norte-Vestfália através do programa progres.nrw.

Segundo a RWE (2023), as tecnologias empregadas envolvem três soluções técnicas diferentes de Agri-PV: (1) sistema vertical com módulos dispostos em fileiras deixando espaço suficiente para máquinas de colheita entre as fileiras de módulos; (2) sistema com módulos montados horizontalmente e automaticamente rastreados para seguir o sol durante o dia, otimizando os rendimentos de energia; (3) sistema com módulos PV elevados em uma subestrutura alta tipo pérgola, com culturas como framboesas ou mirtilos cultivadas abaixo deles. O sistema permite a coleta de água da chuva dos módulos PV para uso em irrigação.

Os resultados quantitativos comprovam que a planta de demonstração terá uma capacidade de pico de cerca de 3 megawatts (mais de 2 MWac).

O projeto permite comparar diferentes soluções técnicas e investigar comportamentos de crescimento de várias culturas sob condições reais. O objetivo é desenvolver métodos de cultivo adequados e estratégias de agregação de valor para operadores de plantas Agri-PV.

2.12. Estudo de Caso: Brasil

2.12.1. SACI – Sistema Automático de Controle de Irrigação com Sensor Igstat (São Paulo)

A empresa Tecnicer, em parceria com a Embrapa Instrumentação e a Universidade de São Paulo (USP), desenvolveu o Sistema Automático de Controle de Irrigação (Saci), um equipamento que aciona automaticamente a irrigação ao detectar baixa umidade no solo.

O projeto foi finalista da seleção Inovação para a Indústria 2017 do Senai-SP e contou com investimento de R\$ 400 mil do Senai para desenvolvimento do protótipo em 24 meses.

Segundo a Embrapa (2018), as tecnologias empregadas envolvem o sensor Igstat (patenteado no Brasil e nos Estados Unidos), um cilindro de sete centímetros de comprimento feito de material poroso que identifica a baixa umidade quando suas paredes permeáveis detectam a passagem de ar, associado a componentes eletrônicos de automação sem fio, fonte de energia solar, rede elétrica ou bateria.

O sistema utiliza transmissão de dados por radiofrequência ou celular, possui resistência à umidade e choques, fácil manuseio, e dispensa calibrações.

Os resultados quantitativos comprovam que a tecnologia consegue reduzir o consumo de água e energia na lavoura em até 50%. O sistema aciona a irrigação somente nas áreas da plantação que precisam de água, em vez de irrigar toda a lavoura simultaneamente como ocorre nos sistemas convencionais.

Além disso, reduz a lixiviação do solo, de nutrientes e pesticidas, minimizando impactos ambientais e perdas econômicas, e permite o armazenamento de dados sobre irrigação com facilidade.

2.12.2. Irrigação Inteligente Baseada em IoT para Agricultura Familiar (Maranhão)

Rodrigo Sampaio de Albuquerque, da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), desenvolveu um sistema de irrigação inteligente de baixo custo baseado em Internet das Coisas (IoT) voltado especificamente para a agricultura familiar.

Segundo Albuquerque (2019), as tecnologias empregadas envolvem uma placa de prototipagem Arduino UNO como unidade central de processamento, sensor de umidade do solo para coleta de dados, e um aplicativo para smartphone que permite aos usuários controlar a maneira de irrigar sua produção e receber informações da umidade do solo em tempo real. O sistema foi projetado para ser de baixo custo e acessível a pequenos produtores.

Os resultados quantitativos comprovam que a utilização de tecnologia para atividades cotidianas pode acrescentar bastante na vida dos agricultores, facilitando o trabalho e evitando desperdícios.

O sistema atende à crescente demanda por eficiência hídrica na agricultura familiar, que contribui significativamente para o setor agrícola brasileiro e se destaca consideravelmente no país.

2.12.3. Protótipo Autônomo de Irrigação com Energia Solar Fotovoltaica (Pantanal)

A Embrapa Pantanal desenvolveu um protótipo autônomo de irrigação energizado por uma célula fotovoltaica de 5 W, baseado na plataforma Arduino (código e hardware aberto).

Segundo a Embrapa (2013), as tecnologias empregadas envolvem um sensor de umidade do solo para monitoramento contínuo, célula fotovoltaica de 5 W como fonte de energia renovável, e plataforma Arduino para processamento da lógica de controle. O sistema foi projetado para operar de forma autônoma em áreas remotas do bioma Pantanal, onde o acesso à rede elétrica é limitado.

Os resultados quantitativos comprovam a viabilidade do uso de energia solar fotovoltaica de pequeno porte para alimentar sistemas de irrigação automatizados. O protótipo demonstrou que é possível integrar sensoriamento de baixo custo, automação com hardware livre e energia renovável em uma solução compacta e acessível para agricultores familiares e pequenos produtores rurais.

2.12.4. Irrigação Localizada com Energia Eólica (Ceará)

A Embrapa Agroindústria Tropical, em Fortaleza/CE, realizou um experimento com um sistema de irrigação localizada acionado por energia eólica, utilizando cataventos hidráulicos.

O estudo foi desenvolvido no Campo Experimental de Pacajus (CE) com financiamento da Fundação Cearense de Apoio à Pesquisa (Funcap) e da Embrapa.

Segundo Crisóstomo (2004), as tecnologias empregadas envolvem um catavento do tipo convencional instalado sobre um poço com profundidade de 17m, uma bomba de pistão aspiro-premente para elevar a água, e uma caixa d'água instalada a uma altura de seis metros.

Os resultados quantitativos comprovam que o sistema apresentou eficiência para pequenas áreas, dependendo da cultura. Embora o custo inicial seja maior que o sistema de bombeamento elétrico, a médio e longo prazos o sistema apresenta vantagens, pois não é preciso pagar pela fonte de energia (vento), a manutenção dos equipamentos tem custo menor, e o sistema é não poluidor do meio ambiente.

O sistema pode ser a solução para viabilizar o cultivo irrigado em regiões onde não existe energia elétrica instalada, desde que a propriedade esteja em região com ventos acima de 2,4 m/s.

2.12.5. Irriga Certo – Aplicativo para Gestão de Irrigação (Brasil)

A Embrapa Agricultura Digital desenvolveu o aplicativo móvel Irriga Certo, lançado em 2025, para apoiar a gestão da irrigação agrícola. A ferramenta auxilia na organização, monitoramento e tomada de decisão em relação à irrigação na propriedade rural.

Segundo a Embrapa (2025), as tecnologias empregadas envolvem interface móvel amigável para smartphones, integração com dados de estação meteorológica automática (quando disponível), e algoritmos para recomendação de manejo de irrigação baseados em parâmetros agronômicos e climáticos.

Os resultados quantitativos comprovam que o aplicativo permite ao produtor rural otimizar o uso da água na irrigação, reduzindo desperdícios e melhorando a eficiência hídrica da propriedade.

A ferramenta está disponível gratuitamente e representa um exemplo de como tecnologias digitais de baixo custo podem democratizar o acesso à agricultura de precisão para pequenos e médios produtores em todo o território nacional.

2.12.6. Sistema de Irrigação Automatizado com Monitoramento Remoto e Energy Harvesting (Sorocaba)

Santiago Coelho Teixeira, da Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, desenvolveu um projeto de irrigação automática com monitoramento remoto e energy harvesting (colheita de energia). O projeto integra conceitos de automação, IoT e energias renováveis em uma solução de baixo custo.

Segundo Teixeira (2025), as tecnologias empregadas envolvem sistemas de sensoriamento de baixo custo para monitoramento de umidade do solo, integração com plataformas de monitoramento remoto via internet, e técnicas de energy harvesting para alimentação dos sensores e atuadores, reduzindo ou eliminando a dependência de fontes de energia externas ou baterias.

Os resultados quantitativos comprovam a viabilidade técnica de sistemas de irrigação automatizados que combinam monitoramento remoto, sensoriamento de baixo custo e técnicas de colheita de energia. O projeto contribui para o desenvolvimento de soluções acessíveis para pequenos produtores, alinhadas aos princípios da Agricultura 4.0 e da sustentabilidade energética.

2.12.7. Manejo de Irrigação com Cobertura Plástica do Solo no Cerrado (Brasil Central)

A Embrapa Cerrados desenvolveu uma tecnologia que apresenta recomendações de manejo de irrigação em conjunto com a cobertura plástica do solo na produção de mandioca de mesa no Cerrado do Brasil Central.

Segundo a Embrapa (2020), as tecnologias empregadas envolvem a definição do momento ideal para irrigação baseada em monitoramento da umidade do solo, integração com sistemas de cobertura plástica do solo para redução da evaporação, e recomendações técnicas para manejo eficiente da água na cultura da mandioca de mesa no bioma Cerrado.

Os resultados quantitativos comprovam que a tecnologia proporciona a diminuição da mão-de-obra utilizada na condução da lavoura para controle de plantas daninhas, além de otimizar o uso da água através da combinação de irrigação precisa com cobertura plástica do solo.

A tecnologia é especialmente relevante para o Cerrado brasileiro, bioma que enfrenta desafios relacionados à sazonalidade das chuvas e à necessidade de irrigação suplementar para garantir a produtividade das culturas.

3. METODOLOGIA

No capítulo anterior foi apresentada a revisão bibliográfica, com estudos de projetos semelhantes ao sistema proposto, tecnologias e técnicas empregadas em sistemas agrários.

Neste capítulo será descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, abrangendo desde a definição do tema e a busca pelo orientador até os procedimentos de construção e programação do protótipo.

3.1. Delineamento da Pesquisa

O trabalho trata-se de uma pesquisa aplicada, pois visa gerar conhecimentos para solução de um problema prático: o desperdício de água e energia na irrigação agrícola e a proposição de um projeto que visa atingir eficiência energética e de processos.

Quanto aos objetivos, a pesquisa é caracterizada como exploratória, pois envolve levantamento bibliográfico e estudo de casos similares; e descritiva, por detalhar as características do sistema proposto e sua operação.

Quanto aos procedimentos técnicos, é adotado a pesquisa experimental e a prototipagem, com a construção de uma maquete funcional para validação do conceito.

A abordagem é mista sendo qualitativa, pois corresponde a análise da viabilidade técnica e operacional do sistema, descrição dos desafios de implementação, e avaliação da aceitabilidade por pequenos produtores (por meio de entrevistas informais com agricultores familiares, quando possível). E quantitativa pois refere-se à medição e comparação de volumes de água e consumo energético antes e depois da automação, além da análise estatística dos dados de umidade do solo.

3.2. Etapas Iniciais do Projeto

3.2.1. Escolha do Tema

O tema de pesquisa foi definido em comum acordo com o professor orientador, com base na importância do agronegócio, assim como a busca pela eficiência energética e sistemas mais sustentáveis. A escolha partiu da constatação de que a agricultura irrigada, embora responsável por maior parte da produção global de alimentos, apresenta baixa eficiência no uso da água, agravada pela dependência de fontes de energia não renováveis e de alto custo operacional.

Diante desse cenário, o foco deste trabalho foi centrado nas investigações de soluções que integrem princípios da Agricultura 4.0, como automação via CLP, sensoriamento de solo e IoT, com fontes renováveis de energia (solar fotovoltaica e eólica), visando à conservação de recursos hídricos e energéticos. Dito isso, foi priorizado o desenvolvimento de um protótipo funcional de baixo custo e viável para pequenos produtores rurais.

3.2.2 Levantamento de Requisitos

Com o auxílio do orientador, foram levantados os requisitos funcionais e não funcionais. Para os requisitos funcionais, foi estabelecido que o sistema deve irrigar automaticamente quando a umidade do solo atingir valor abaixo de 30% da capacidade de campo; o sistema deve ser alimentado por fontes renováveis (solar e eólica) sem necessidade de conexão à rede elétrica e deve haver um meio de monitoramento remoto (ou local) do status da umidade e da bateria.

Para os requisitos não funcionais, refere-se ao baixo custo de implantação; robustez para operar em ambiente rural (umidade, poeira, variações de temperatura) e facilidade de manutenção e substituição de componentes.

3.3 Métodos de Pesquisa Utilizados

3.3.1 Pesquisa Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi conduzida em bases de dados científicas (Google Scholar, SciELO, IEEE Xplore, ScienceDirect) e repositórios institucionais (Embrapa, USP, UNESP).

Foram utilizados descritores como “irrigação inteligente”, “CLP na agricultura”, “energia solar fotovoltaica”, “energia eólica bombeamento”, “sensor capacitivo de umidade solo”, e “agricultura 4.0” nos idiomas português, inglês e espanhol.

O período de busca abrangeu publicações dos últimos 10 anos (2015-2025), priorizando artigos de periódicos indexados, anais de congressos, patentes e documentos oficiais (FAO, MDA, ANA).

O levantamento bibliográfico resultou na seleção e análise de 18 artigos científicos, 3 patentes e 5 trabalhos acadêmicos de conclusão de curso, além do mapeamento detalhado de 31 estudos de caso práticos distribuídos estrategicamente entre Estados Unidos, Índia, China, Alemanha e Brasil.

A busca consolidou os fundamentos técnicos que justificaram a escolha de um Controlador Lógico Programável (CLP) para o processamento, de sensores capacitivos para o monitoramento do solo e da configuração híbrida fotovoltaica e eólica para a autonomia energética do sistema.

3.3.2 Estudo de Casos

Para compreender as soluções já existentes e suas limitações, foram estudados diferentes projetos de irrigação automatizada implantados ao redor do mundo (detalhados da Seção 2.8 à Seção 2.12 deste trabalho).

Os critérios de seleção para o mapeamento desses cenários tecnológicos foram baseados em: (a) emprego de automação e controle (via CLP ou microcontroladores); (b) integração com matrizes de energias renováveis (solar fotovoltaica, eólica ou sistemas híbridos); (c) foco estratégico na conservação de

recursos hídricos; e (d) viabilidade de aplicação em diferentes escalas produtivas (que contemplam desde a agricultura familiar até locais irrigados de grande porte).

Cada estudo de caso foi analisado sob os aspectos referentes a arquitetura tecnológica, componentes utilizados, resultados quantitativos (economia de água/energia), custos relatados e lições aprendidas.

Essa análise permitiu identificar as melhores práticas (como por exemplo, uso de sensor capacitivo em vez de resistivo; lógica fuzzy para maior precisão; necessidade de redundância energética) e evitar fragilidades (como falta de monitoramento remoto; dependência exclusiva de uma única fonte renovável).

Este capítulo consolidou a metodologia de natureza aplicada, exploratória e experimental com abordagem mista, com detalhamento das etapas iniciais, como escolha do tema, orientação e levantamento de requisitos funcionais e não funcionais.

Foram descritos os métodos de pesquisa bibliográfica, estudos de diferentes projetos, assim com pesquisa de campo com produtores rurais.

3.3.3 Pesquisa Quantitativa e Qualitativa com Produtores

Para embasar o referencial teórico com os desafios reais enfrentados no setor agrícola, foi realizada pesquisa de campo por meio de entrevista técnica semiestruturada e registros audiovisuais com um operador de maquinário e produção agrícola especializado no cultivo de soja, com objetivo de mapear o ciclo produtivo da cultura, avaliar as formas de manejo hídrico adotadas e verificar o nível de inserção de fontes renováveis de energia na localidade analisada.

Na figura 1 é apresentada uma plantação de soja, gerenciada pelo entrevistado na pesquisa de campo realizada no estado do Maranhão, em 30 de abril de 2026

Figura 1 - Relato técnico sobre o preparo do solo e condicionantes climáticas do terreno



Fonte: Francisco Bruno de Sousa Rios (2026).

3.3.3.2 Análise do Ciclo Produtivo e Manejo Hídrico Atual

Com base nos dados coletados, o cronograma operacional da cultura da soja na região estudada é dividido em quatro macroetapas bem definidas ao longo do ano:

1. **Preparo do Solo e Adubação (Junho a Novembro):** Período de estiagem em que são realizadas a gradagem e a correção de nutrientes da terra.
2. **Plantio (Dezembro a Fevereiro/Março):** Fase de semeadura que coincide intencionalmente com a chegada do período chuvoso na região.
3. **Desenvolvimento da Cultura:** Período vegetativo e de floração que demanda entre 45 e 60 dias de condições ideais para atingir a maturação.
4. **Colheita (Final de Março a Maio):** Etapa final de recolhimento dos grãos por meio de colhedoras automáticas.

A Figura 2 apresenta o maquinário agrícola utilizado durante a etapa de semeadura, composto por trator e semeadora de precisão acoplada, demonstrando o nível de mecanização empregado na propriedade.

Figura 2 - Maquinário utilizado no processo de semeadura



Fonte: Francisco Bruno de Sousa Rios (2026).

O entrevistado destacou que o método de irrigação adotado na propriedade é estritamente o manejo hídrico natural, dependente de forma exclusiva das chuvas.

Essa característica evidencia uma vulnerabilidade produtiva, a total dependência de fatores climáticos. Diante de estiagens prolongadas ou irregularidades nas chuvas durante a janela crítica de desenvolvimento (os 45 a 60 dias mencionados), a produtividade da lavoura é diretamente comprometida.

Este cenário justifica tecnicamente a relevância do sistema de irrigação automatizado por CLP proposto neste trabalho, o qual visa garantir a estabilidade do plantio sem depender exclusivamente da imprevisibilidade climática.

3.3.3.3 Matriz Energética Local e Viabilidade de Fontes Renováveis

Um ponto de convergência tecnológica identificado na pesquisa de campo foi a presença de infraestrutura de energia solar fotovoltaica na propriedade rural, utilizada para suprir demandas elétricas locais.

A constatação de que o meio rural já absorve tecnologias de geração distribuída valida uma das principais premissas deste TCC, o emprego de fontes limpas de energia (como a solar e a eólica) em sistemas de bombeamento e controle no campo.

A integração de painéis solares para alimentar o Controlador Lógico Programável (CLP) e os sensores capacitivos demonstram estar alinhados com as tendências práticas de campo observadas, reforçando a viabilidade de transição para a Agricultura 4.0 mesmo em localidades distantes dos grandes centros urbanos.

Conforme registrado na Figura 3, a propriedade rural já dispõe de maquinário de colheita automatizada e estrutura de armazenamento, o que reforça a viabilidade da inserção de tecnologias de automação e energias renováveis no campo.

Figura 3 - Atividade de colheita automatizada e armazenamento de grãos na propriedade rural.



Fonte: Francisco Bruno de Sousa Rios (2026).

3.4. Análise de Viabilidade Econômica

A viabilidade do projeto foi mensurada não apenas no seu custo de aquisição inicial, mas sobretudo pela redução de custos operacionais ao longo do seu ciclo de vida.

O protótipo desenvolvido totalizou um investimento de R\$6.238,80 ou R\$2.383,80 em sua versão comercial otimizada sem a Interface Homem-Máquina (IHM) física, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 - Levantamento de custos dos componentes do protótipo de irrigação

Item	Componente/Especificação	Preço Unitário (R\$)	Função no sistema
1	Placa Solar Fotovoltaica (30W a 50W)	120,00	Captação de energia solar para o sistema híbrido
2	Bateria Estacionária Unipower - UP12350 (12V 35Ah)	340,00	Armazenamento e autonomia do banco de baterias.
3	Hélice de ventilador (para o protótipo do aerogerador eólico)	25,00	Protótipo aerogerador para simular a energia eólica.
4	Sensor de nível tipo Boia Vertical (Branco)	45,00	Monitoramento do nível de água no reservatório.
5	Mini reservatório de água (Capacidade aproximada de 1L)	35,00	Armazenamento de água para os testes de irrigação.
6	Válvula abre e fecha manual (Esfera/Gaveta PVC de 1/2")	45,00	Bloqueio mecânico de segurança ou manutenção.
7	Interruptor Inteligente Wi-Fi (Nova Digital)	55,00	Controle e monitoramento auxiliar via rede sem fio.
8	Módulo Mini Contato Seco Wi-Fi (Nova Digital)	65,00	Relé inteligente para automação e acionamento remoto
9	Inversor de Tensão Veicular Multifunção 12V para 220V (1500W Pico)	105,00	Conversão de DC (bateria) para AC (bomba/alimentação).
10	Fonte Chaveada / Switch Mode Power Supply (MCE) - 12V/24V	1.043,00	Conversão de AC para 24Vdc para alimentar o CLP e a IHM.
11	Sensor de umidade de solo (Mamute Eletrônica)	8,90	Monitoramento direto da umidade do solo em tempo real.
12	Módulo sensor de temperatura e umidade DHT-11 (Mamute Eletrônica)	11,90	Coleta de dados ambientais e microclima da bancada.
13	Caixa plástica para painel de comando/energia (Ex: 30x20x15cm)	75,00	Acomodação segura do CLP, fonte e fiação.
14	Equipamento de Saída AC 220-240V (Bomba d'água de aquário/maquete)	70,00	Execução física do bombeamento e ciclo de irrigação.

15	Controlador Lógico Programável (CLP) - Panasonic FP0R-C14RS	840,00	Unidade central de processamento lógico do protótipo
16	Interface Homem-Máquina (IHM) - Omron NB7W-TW01B (7")	3.400,00	Monitoramento local, exibição de gráficos e controle do operador.

Fonte: Autoria própria (2026).

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos metodológicos que nortearam o trabalho, abrangendo o delineamento da pesquisa, os métodos de pesquisa bibliográfica, o estudo de casos múltiplos, a pesquisa de campo com produtor rural e a análise de viabilidade econômica.

A consolidação do levantamento de requisitos e do referencial teórico-prático permitiu definir a arquitetura tecnológica do sistema, justificando a escolha do CLP Panasonic, dos sensores capacitivos e do sistema híbrido solar-eólico. Os resultados obtidos nas etapas metodológicas embasaram o desenvolvimento do protótipo funcional, descrito no capítulo seguinte.

4. DESENVOLVIMENTO

No capítulo anterior foram descritos os procedimentos metodológicos adotados para a realização da pesquisa.

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento prático do sistema de irrigação inteligente, abrangendo a integração dos componentes eletroeletrônicos, a programação do CLP, a montagem da maquete funcional e a implementação do sistema híbrido de energia solar e eólica.

4.1. Seleção de Componentes

Os materiais empregados no protótipo foram selecionados com base nos critérios de baixo custo, disponibilidade no mercado nacional e adequação aos requisitos do sistema.

4.2 Desenvolvimento do Sistema de Controle e Supervisório

O desenvolvimento prático do sistema proposto seguiu uma sequência lógica de etapas, desde a montagem dos componentes físicos até a programação dos softwares de controle e supervisão, garantindo a automação completa do processo de irrigação.

4.2.1 Preparação da Estrutura Física

A base do sistema foi uma bancada didática de madeira com dimensões de 1,0 m × 0,6 m. Sobre ela, foi fixado o reservatório de água (mini caixa d'água de 1 litro) na posição elevada para garantir pressão por gravidade, o vaso com solo contendo o sensor de umidade inserido a aproximadamente 5 cm de profundidade, e a caixa plástica destinada ao painel de comando, onde foram alojados o CLP, a fonte chaveada, o inversor e os demais componentes elétricos.

4.2.2 Desenvolvimento do Sistema Supervisório com NBDesigner

Para o monitoramento e supervisão do processo de irrigação, foi utilizado o software NBDesigner, da Omron. Conforme a documentação do fabricante, o NBDesigner é uma ferramenta gratuita que oferece todos os recursos e funcionalidades para criar telas de operador intuitivas com facilidade e rapidez, sendo a interface ideal para uso com controladores da família Omron CP1 e compatível com outros fabricantes via protocolos abertos.

O software permite a criação de telas com elementos como gráficos de barras, curvas de tendência, indicadores de alarmes, além de simulação online e offline.

Foram desenvolvidas quatro telas principais no NBDesigner para o sistema:

- **Tela fotovoltaica:** indica que o sistema está abastecendo o reservatório através da energia gerada pela placa fotovoltaica (ou bateria) no modo off-grid.

- **Tela eólica:** indica que o sistema está abastecendo o reservatório através da energia gerada pela turbina eólica.
- **Tela reservatório cheio:** indica que o reservatório está cheio e pronto para uso.
- **Tela de irrigação:** mostra o sistema sendo irrigado – seja pelo acionamento automático (bomba d'água) ou de forma manual pela IHM.

4.2.3 Programação do CLP com Control FPWIN Pro 7

O CLP Panasonic FP0R-C14RS foi programado utilizando o software Control FPWIN Pro 7, da Panasonic. Este software de programação, desenvolvido de acordo com a norma internacional IEC 61131-3, é a ferramenta universal para todos os CLPs da série FP, incluindo o modelo FP0R utilizado neste projeto.

O Control FPWIN Pro 7 suporta as cinco linguagens de programação da norma (ST, LD, FBD, SFC e IL), permitindo escolher a mais adequada para cada parte do programa, garantindo compatibilidade entre diferentes modelos da família e recursos avançados de teste e depuração.

O programa desenvolvido em linguagem Ladder (LD) foi estruturado em diversas lógicas digitais:

- Leitura do gerador eólico e abastecimento do reservatório através da bomba de água 12V.
- Leitura da placa fotovoltaica junto com a bateria para abastecimento da bomba 12V na ausência da geração eólica.
- Botão na IHM para seleção entre sistema manual e automático para controle da irrigação.
- Sistema de leitura de reservatório vazio e cheio de acordo com o processo.

4.2.4 Comunicação CLP e IHM via Protocolo Modbus

Para a troca de dados entre o CLP Panasonic e a IHM Omron, foi escolhido o protocolo Modbus, amplamente utilizado em sistemas de automação industrial. Conforme as especificações técnicas, a série NB da Omron possui drivers de comunicação para dispositivos não Omron, como Modbus RTU e Modbus TCP, garantindo a interoperabilidade entre os equipamentos.

A configuração da comunicação foi realizada seguindo os passos:

1. **Configuração do CLP:** no software Control FPCWIN Pro 7, foram definidos os parâmetros da porta serial do FP0R-C14RS (baud rate: 9600 bps, 8 bits de dados, 1 bit de parada, sem paridade), configurando o CLP como escravo Modbus RTU.
2. **Configuração da IHM:** no software NBDesigner, foi criado um novo projeto para a IHM Omron NB, selecionado o driver de comunicação “Modbus RTU” e definido o mesmo baud rate e paridade do CLP, configurando a IHM como mestre Modbus.
3. **Mapeamento de tags:** foram criadas no NBDesigner *tags* (variáveis) associadas diretamente aos endereços Modbus do CLP, conforme detalhado a seguir:
 - R180 – chamada de tela de reservatório cheio.
 - R181 – chamada de tela de reservatório vazio abastecido por energia eólica.
 - R182 – chamada de tela de reservatório vazio abastecido por energia fotovoltaica.
 - R183 – chamada de tela de irrigação.
 - R191 – status de liga/desliga da bomba (saída discreta).
 - R192 – seleção de sistema manual ou automático.

Esse mapeamento permite que a IHM leia e escreva dados em tempo real.

4.2.5 Subsistema de Geração e Armazenamento de Energia

O protótipo contou com um subsistema de energia híbrida (solar + eólica) composto pelos seguintes elementos:

- **Aerogerador de bancada:** utilizando uma hélice de ventilador acoplada a um motor DC de 12V (reaproveitado), fixado em um suporte de madeira. A rotação do motor foi retificada e regulada por um circuito simples com um contato seco para a geração de energia para a bomba d'água, gerando um sinal digital para o CLP.
- **Bateria estacionária 12V 35Ah:** conectada ao inversor com as saídas dos controladores de carga, garantindo o armazenamento de energia.
- **Inversor veicular 12V → 220V:** conectado aos terminais da bateria para alimentar a fonte chaveada do CLP.
- **Fonte chaveada 24Vdc:** alimentada pela saída do inversor, fornecendo 24V estabilizados para o CLP Panasonic e para a IHM Omron.

4.3 Integração e Ajustes Finais

Após a montagem elétrica e a programação dos sistemas de supervisão e controle, foi realizado os ajustes finos para garantir o funcionamento do trabalho.

A comunicação Modbus entre o CLP e a IHM foi validada com sucesso, demonstrando a troca de informações em tempo real.

Por fim, foi testado o fluxo de água e as conexões hidráulicas, além da configuração do módulo Wi-Fi para o monitoramento remoto, concluindo a etapa de montagem.

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento prático do protótipo, incluindo a montagem da bancada, a programação do CLP em Ladder e a criação do sistema supervisório no NBDesigner. A comunicação Modbus RTU entre CLP e IHM foi estabelecida com sucesso, permitindo a troca de dados em tempo real. O

subsistema híbrido (solar fotovoltaico + eólico de bancada) foi integrado à bateria, garantindo a autonomia energética do sistema. Após os ajustes e a validação da comunicação e do fluxo hidráulico, o protótipo ficou pronto para a etapa de testes.

5. RESULTADOS E TESTES

No capítulo anterior foi apresentado o desenvolvimento prático do sistema de irrigação inteligente, abrangendo desde a seleção dos componentes até a integração dos subsistemas de controle, supervisão e geração híbrida de energia.

Neste capítulo serão descritos os testes experimentais realizados para validar o funcionamento do protótipo, abrangendo os procedimentos de simulação dos cenários operacionais, a coleta e análise dos dados de umidade do solo, consumo energético e economia de água, bem como a comparação com um sistema de irrigação convencional.

5.1. Passo 1 – Criação da tela IHM

A primeira etapa do desenvolvimento da interface consistiu na elaboração do layout gráfico no software NBDesigner, utilizando elementos da biblioteca (símbolos de painel solar, bomba, tanque, inversor) e setas para representar o fluxo de energia e água. Foram inseridos também indicadores visuais (como os raios solares e a identificação "OMRON" e "POWER").

A Figura 4 apresenta a primeira tela da IHM desenvolvida no software NBDesigner, ainda em fase de projeto visual. A interface exibe o diagrama esquemático do sistema de bombeamento alimentado por energia solar, contemplando os principais componentes: painel solar, raios solares, tanque de armazenamento de água, inversor/controlador, bomba e fonte de água, além da identificação do equipamento Omron.

Figura 4 - Primeira tela da Interface Homem-Máquina (IHM) projetada no software NBDDesigner, representando o diagrama esquemático do sistema de bombeamento alimentado energia solar.



Fonte: Autoria Própria (2026)

Nesta fase, nenhuma lógica de comunicação ou programação de eventos foi vinculada aos elementos da tela.

5.2. Teste 1 – Integração CLP, IHM e programação (sem maquete)

Neste teste, a comunicação Modbus RTU entre o CLP Panasonic FP0R-C14RS (configurado como escravo) e a IHM Omron NB7W-TW01B (configurada como mestre) foi estabelecida de forma virtual.

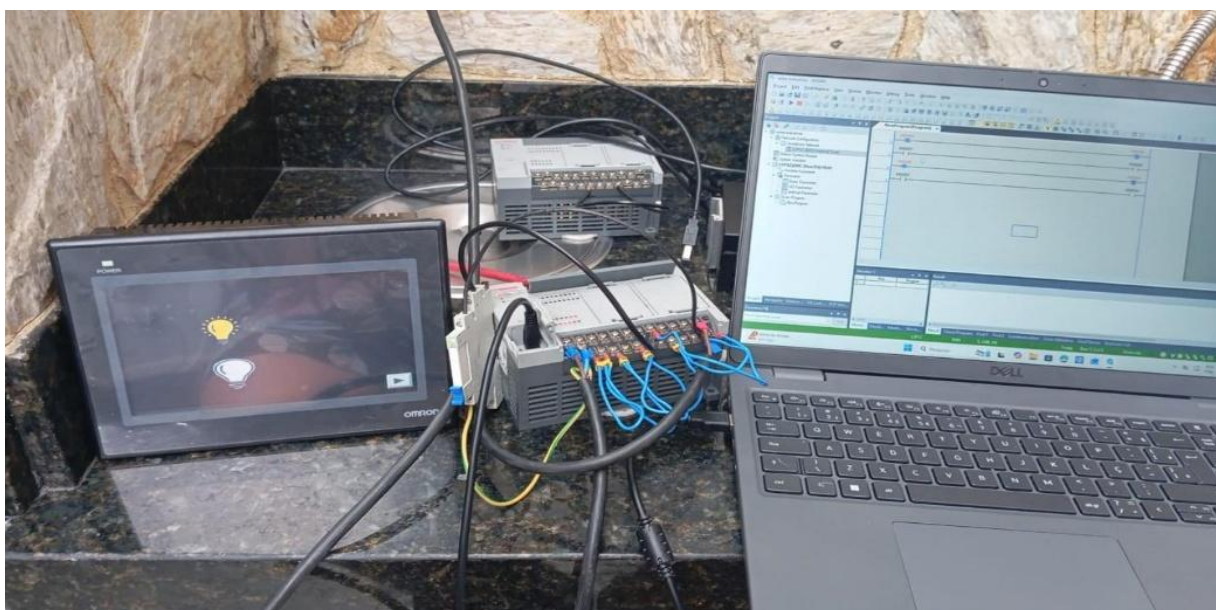
O sistema não empregou nenhum dispositivo de entrada ou saída físico. A leitura do sensor de umidade do solo ocorreu por meio de uma variável simulada dentro do ambiente de programação do CLP (software Control FPWIN Pro 7). A lógica desenvolvida em Ladder acionou a saída que representaria o comando da bomba.

A IHM, projetada no software NBDesigner, recebeu os dados via Modbus RTU e exibiu corretamente os status da bomba (ligada/desligada) e do reservatório (cheio/vazio). O acionamento manual também foi testado por meio de um botão virtual na tela da IHM, sem qualquer intervenção física.

A comunicação ocorreu em tempo real na simulação, nenhum componente elétrico ou hidráulico foi conectado durante esta etapa.

A Figura 5 mostra a bancada de testes no momento da validação virtual, com o CLP, a IHM e os cabos de comunicação visíveis, mas sem qualquer ligação física a sensores, atuadores ou à maquete.

Figura 5 - Teste virtual de integração entre CLP Panasonic FP0R-C14RS, IHM Omron NB7W-TW01B e programação em Ladder, realizado sem entradas e saídas físicas (apenas simulação lógica e comunicação Modbus RTU).



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.3. Teste 2 - Montagem da maquete, bombeamento com energia eólica e montagem do reservatório

Neste teste, a maquete funcional foi montada sobre a madeira (1,0 m × 0,6 m). A estrutura recebeu o caixa de isopor para simular a área que será irrigada, o mini

reservatório de água (capacidade aproximada de 1 litro) posicionado em altura elevada para garantir pressão por gravidade, e a caixa plástica do painel de comando contendo o CLP, a fonte chaveada e o inversor.

O sistema de bombeamento com energia eólica utilizou um aerogerador de bancada composto por hélice de ventilador acoplada a um motor DC de 12V. O motor foi fixado em um suporte de madeira e conectado a um circuito retificador simples.

A rotação da hélice (simulando vento) gerou tensão contínua suficiente para acionar a bomba d'água de aquário (12V), transferindo água da fonte (balde inferior) para o reservatório elevado.

A montagem do reservatório incluiu a fixação da mini caixa d'água na parte superior da bancada e a tubulação de PVC (1/2") conectando a saída da bomba à entrada do reservatório. Uma válvula esfera manual foi adicionada para bloqueio mecânico de segurança.

A Figura 6 apresenta a vista geral da maquete montada, o detalhe do aerogerador eólico acionando a bomba e o reservatório elevado com sensor de boia.

Figura 6 - Montagem da maquete funcional, sistema de bombeamento acionado diretamente por energia eólica (sem integração com CLP) e montagem do reservatório de água.



Fonte: Aatoria Própria (2026).

5.4. Teste 3 – Integração dos sistemas eólico e fotovoltaico com o CLP

A Figura 7 apresenta a bateria estacionária UNIPOWER UP12350 (12V 35Ah) empregada no sistema de armazenamento de energia, integrada ao circuito de alimentação do CLP e da bomba.

Figura 7 - Bateria estacionária UNIPOWER UP12350 (12V 35Ah) utilizada no subsistema de armazenamento de energia do protótipo.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Nesta etapa, o sistema de bombeamento acionado por energia eólica foi montado e testado, atingindo 100% de eficácia na alimentação da bomba do reservatório. A hélice do aerogerador de bancada (motor DC 12V com hélice de

ventilador) acionou diretamente a bomba d'água, transferindo água da fonte para o reservatório elevado sem qualquer fonte auxiliar de energia.

Em paralelo, o sistema fotovoltaico foi configurado em operação off-grid (independente da rede elétrica). A energia foi fornecida alternadamente por uma bateria estacionária UNIPOWER UP12350 (12V 35Ah) e por uma placa solar fotovoltaica (30W a 50W), sendo que a placa solar também realizou a recarga da bateria durante a operação. Todo o subsistema elétrico (bomba, CLP e IHM) funcionou exclusivamente com essas fontes renováveis, confirmando a sustentabilidade energética do projeto.

Ao final do teste, o ambiente de trabalho foi organizado e limpo, seguindo os princípios da metodologia 5S (planejamento, organização e limpeza).

Como pendências para a próxima etapa de desenvolvimento, ficaram a adaptação da Interface Homem-Máquina (IHM) para inclusão de uma tela representando a tampa do projeto, o ajuste e o teste da válvula de saída do reservatório para controle de vazão, o ajuste da maquete para adaptação dos isopores com as plantas e o barro (substrato) e a finalização da programação completa do CLP com a integração de toda a lógica de controle.

5.5 – Teste 4 - Modernização da tela da IHM

Nesta etapa, a tela da Interface Homem-Máquina (IHM) foi completamente reformulada no software NBDesigner, incorporando um layout mais intuitivo e informativo.

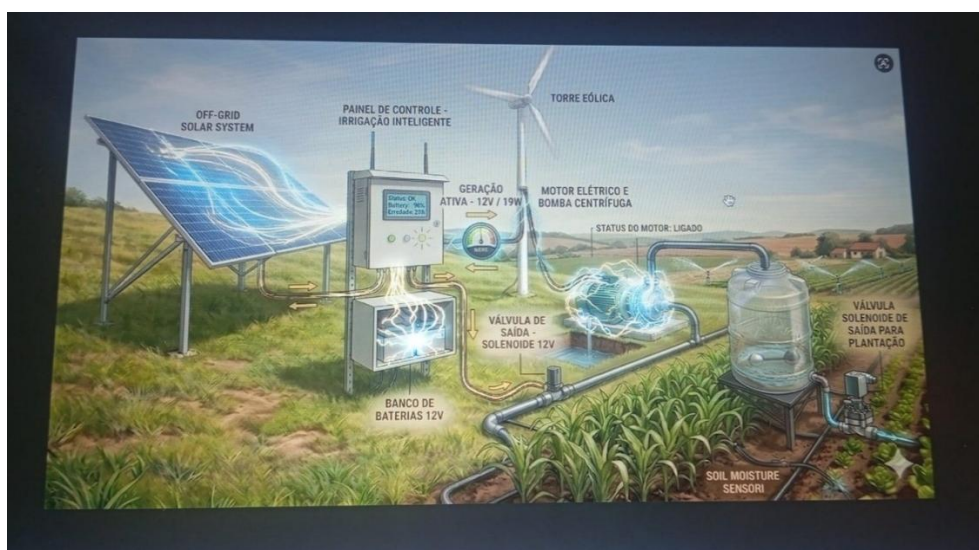
A nova interface passou a incluir um diagrama esquemático do sistema off-grid com indicação da fonte solar e eólica, um indicador de geração ativa (12V / 19W), o status do motor elétrico e da bomba centrífuga (LIGADO/DESLIGADO), a representação da válvula solenoide de saída (12V) com indicação de energizada e aberta, o banco de baterias 12V, o sensor de umidade do solo e um painel de controle central identificado como "Irrigação Inteligente".

A modernização permite ao operador visualizar, em uma única tela, todas as informações relevantes do processo, incluindo a fonte de energia ativa (solar ou

eólica), o estado da bateria, o acionamento da bomba, a posição da válvula solenoide e a leitura do sensor de umidade do solo.

Dois estados principais foram testados: motor desligado, conforme a figura 8, e motor ligado, conforme a figura 9, validando a correta atualização dos indicadores conforme os comandos enviados pelo CLP via protocolo Modbus RTU.

Figura 8 - Tela da IHM modernizada no software NBDesigner, representando o sistema de irrigação inteligente com todos os elementos visuais integrados - Estado com motor ligado



Fonte: Autoria Própria (2026).

Figura 9 - Tela da IHM modernizada no software NBDesigner, representando o sistema de irrigação inteligente com todos os elementos visuais integrados - Estado com motor desligado



Fonte: Autoria Própria (2026).

Os testes realizados validaram a comunicação Modbus RTU entre CLP e IHM, a alimentação híbrida (solar fotovoltaica e eólica) e o bombeamento autônomo. A modernização da interface supervisória proporcionou ao operador visualização clara de todas as variáveis do processo, confirmando a viabilidade técnica do protótipo.

5.6. Teste 5 - Avaliação e substituição do inversor de tensão

Durante os testes de alimentação elétrica do protótipo, um inversor de tensão de baixa potência foi conectado ao banco de baterias 12V, conforme a figura 10, com o objetivo de fornecer 220V para a fonte chaveada que alimenta o CLP e a IHM.

Figura 10 - Inversor de tensão de baixa potência (testado e descartado por insuficiência de capacidade)



Fonte: Autoria Própria (2026).

Os testes realizados com este equipamento mostraram-se inválidos, pois o inversor não possuía potência suficiente para suportar a corrente demandada pelo circuito, entrando em sobrecarga e desarmando repetidamente.

Diante desse resultado, o inversor de baixa potência foi substituído por um Inversor de Tensão Multifunção com potência de pico de 1500W e saída 220V, conforme a figura 11. O novo equipamento, além de suportar a carga total do sistema

(CLP, IHM, fonte chaveada e eventuais periféricos), apresentou funcionamento estável e contínuo, sem superaquecimento ou desarmamentos. A substituição garantiu a confiabilidade da fonte de alimentação para as etapas seguintes de integração e testes.

Figura 11 - Inversor de tensão multifunção 1500W (pico) – 220V, adotado para alimentar o sistema.



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.7. Teste 6 - Teste de comunicação Modbus RTU entre CLP e IHM

Neste teste, estabeleceu-se a comunicação entre o CLP Panasonic FP0R-C14RS e a IHM Omron NB7W-TW01B utilizando o protocolo Modbus RTU sobre porta serial.

O CLP foi configurado como dispositivo escravo, enquanto a IHM operou como mestre. Os parâmetros de transmissão adotados foram: 9600 bps, 8 bits de dados, 1 bit de parada e sem paridade, conforme especificado nos manuais de ambos os equipamentos.

O mapeamento das variáveis (tags) entre a IHM e o CLP seguiu a tabela de endereços Modbus previamente definida. Os principais pontos de troca de dados incluíram os registradores R180 a R183 (para chamada de telas), R191 (status de liga/desliga da bomba) e R192 (seleção entre modo manual e automático). A programação no CLP foi desenvolvida em linguagem Ladder no software Control FPLWIN Pro 7, enquanto as telas da IHM foram criadas no NBDesigner.

Durante o teste, a IHM conseguiu ler e escrever dados nos registradores do CLP em tempo real. Ao acionar um botão virtual na tela da IHM, o valor do registrador R191 foi alterado, e a saída discreta correspondente no CLP respondeu conforme a lógica programada.

Simultaneamente, o CLP enviou para a IHM os valores simulados de umidade do solo e nível do reservatório, que foram exibidos corretamente na interface gráfica. Nenhuma falha de comunicação ou perda de pacotes foi observada durante os ciclos de varredura.

A validação da comunicação Modbus RTU confirmou a interoperabilidade entre os equipamentos de diferentes fabricantes (Panasonic e Omron) e permitiu prosseguir para as etapas de integração com os sensores e atuadores da maquete.

A Figura 12 exibe a tela de configuração do Modbus RTU no software Control FPLWIN Pro 7, mostrando os registros de sistema e a seção COM1, onde foram configurados os parâmetros de comunicação (9600 bps, 8 bits de dados, 1 bit de parada e sem paridade) para o CLP Panasonic FP0R atuar como escravo na rede.

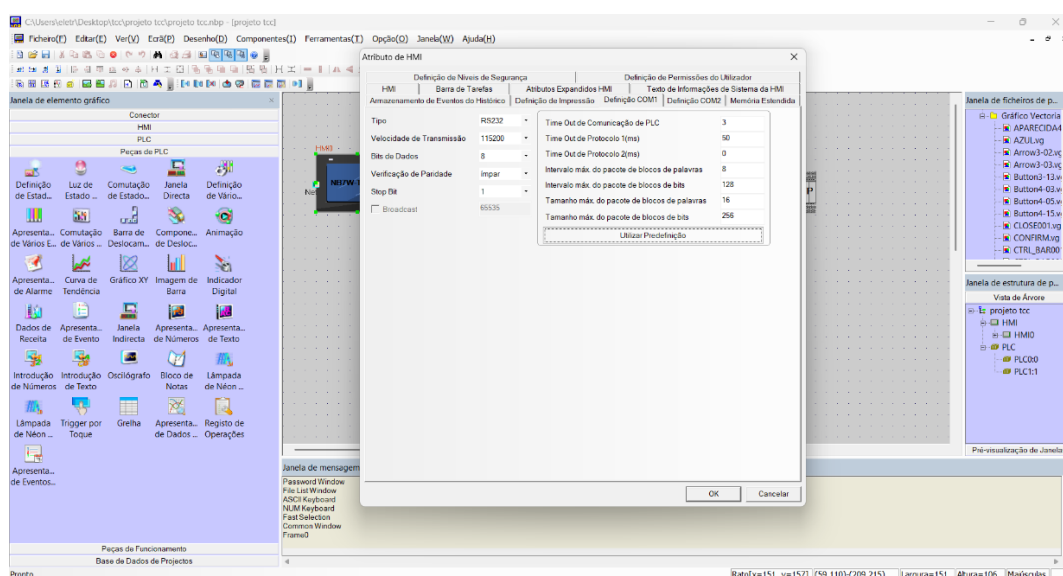
Figura 12 - Configuração do protocolo Modbus RTU no software Control FPCWIN Pro 7

No	Item name	Data	Dime...	Range	Additional information
412	Communication mode	MEWTOCOL-COM master/...		MEWTOCOL-COM master/slave [Computer link]	The PLC can be a MEWTOCOL-COM ma
410	Station number	1		1 to 99	Station numbers are the numbers to ide
415	Baud rate	115200	baud	115200	Specifies the baud rate of the port.
413	Data length	8 bits		8 bits	Selects the data length.
413	Parity	Odd		None	Selects the parity check.
413	Stop bits	1 bit		1 bit	Specifies the number of stop bits.
413	Start code	No-STX		No-STX	Selects the start code.
413	End code/reception done condition	CR		CR	Selects the end code.
416	Receive buffer starting address	0		0 to 12314	Specifies the starting address of the rec
417	Receive buffer capacity	0	word	0 to 2048	Specifies the number of words to be us
412	Modem connection	Disabled		Disabled	Specifies if a modem is connected.
46	PLC link 0 and 1 allocation setting	Use PLC link 0		Use PLC link 0	
47	PLC link 0 - Highest station number in ...	16		1 to 16	
40	PLC link 0 - Link flags - Send/receive ...	0	word	0 to 64	This area is not shared by the linked PLC
42	PLC link 0 - Link flags - Send area - S...	0	address	0 to 63	No data from this area will be sent to th
43	PLC link 0 - Link flags - Send area - N...	0	word	0 to 64	
41	PLC link 0 - Link registers - Send/rece...	0	word	0 to 128	This area is not shared by the linked PLC
44	PLC link 0 - Link registers - Send area...	0	address	0 to 127	No data from this area will be sent to th
45	PLC link 0 - Link registers - Send area...	0	word	0 to 127	
57	PLC link 1 - Highest station number in ...	16		1 to 16	
50	PLC link 1 - Link flags - Send/receive ...	0	word	0 to 64	This area is not shared by the linked PLC
52	PLC link 1 - Link flags - Send area - S...	64	address	64 to 127	No data from this area will be sent to th
53	PLC link 1 - Link flags - Send area - N...	0	word	0 to 64	
51	PLC link 1 - Link registers - Send/rece...	0	word	0 to 128	This area is not shared by the linked PLC
54	PLC link 1 - Link registers - Send area...	128	address	128 to 255	No data from this area will be sent to th
55	PLC link 1 - Link registers - Send area...	0	word	0 to 127	

Fonte: Autoria Própria (2026).

A Figura 13 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de comunicação no software NBDesigner, utilizada para definir as configurações da porta COM1 da IHM Omron, incluindo a velocidade de transmissão, bits de dados, verificação de paridade e bit de parada, alinhadas com os parâmetros configurados no CLP (9600 bps, 8 bits, sem paridade, 1 stop bit) para estabelecer a comunicação Modbus RTU.

Figura 13 - Tabela de configuração dos parâmetros de comunicação serial no software NBDesigner



Fonte: Autoria Própria (2026).

5.8. Teste 7 - Identificação das telas da IHM e mapeamento dos registradores Modbus para comunicação com o CLP

Os testes realizados com a Interface Homem-Máquina (IHM) envolveram a definição de telas específicas para cada etapa do processo de irrigação inteligente, conforme registrado na Figura 14.

Figura 14 - Identificação das telas da Interface Homem-Máquina (IHM)



Fonte: Autoria Própria (2026).

A tela identificada como BL1 corresponde ao abastecimento do reservatório quando vazio, utilizando exclusivamente a energia gerada pela torre eólica (vento). A tela BL3 executa a mesma função de abastecimento do reservatório vazio, porém alimentada pelo sistema fotovoltaico ou pela bateria 12V.

A interface BL13 representa o estado de reservatório cheio, com o sistema em modo de espera (standby), enquanto a tela BL5 mostra o sistema ativo realizando a irrigação propriamente dita.

Um botão invisível (SB0) foi implementado para acionar a irrigação manualmente, sem a necessidade de elementos visuais na tela. A Figura 14 também apresenta a lista de entradas discretas (0 a 5) utilizadas no CLP, incluindo os sinais de ativação da bomba, sensor de boia e fontes renováveis.

Paralelamente ao desenvolvimento das telas, o mapeamento dos registradores Modbus foi estabelecido para a comunicação entre o CLP e a IHM. Os endereços 180, 181, 182 e 183 foram associados, respectivamente, aos estados de irrigação ativa,

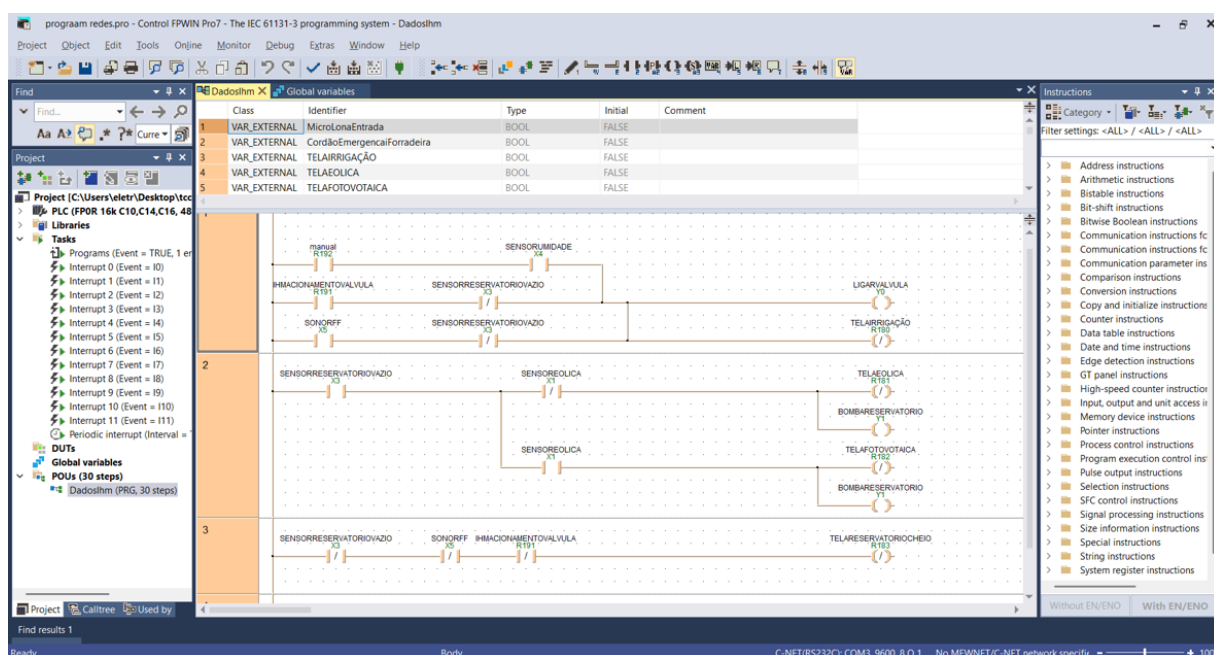
abastecimento por energia eólica, abastecimento por energia fotovoltaica e reservatório cheio em standby.

O sistema supervisório baseou-se no protocolo Modbus RTU ou Modbus TCP, permitindo o monitoramento e o controle tanto no painel local quanto remotamente por computador, conforme mencionado nas anotações técnicas.

Em complemento, a Figura 15 documenta a estrutura do projeto desenvolvido no software Control FPCWIN Pro 7, voltado para o CLP Panasonic FP0R.

A imagem evidencia a organização dos programas (Programs) e a extensa lista de interrupções (Interrupt 0 a 251), cada uma associada a um evento específico. Essa configuração viabilizou o tratamento de múltiplos sinais de entrada (sensores de umidade, boia, fontes renováveis) e a geração das saídas correspondentes (acionamento da bomba e das válvulas solenoides).

Figura 15 - Estrutura do projeto no software Control FPCWIN Pro 7



Fonte: Autoria Própria (2026).

O emprego de interrupções garantiu o determinismo necessário para as respostas do sistema em tempo real, condição essencial para a automação da irrigação.

Os testes concluíram que a integração entre as telas da IHM, os registradores Modbus e o programa estruturado no CLP ocorreu de forma estável, com a correta troca de informações e o acionamento confiável dos atuadores.

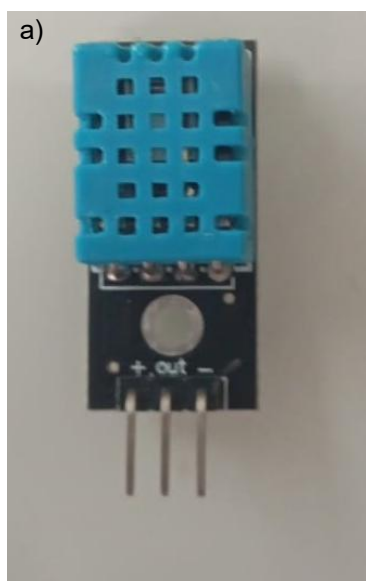
As pendências identificadas (ajuste da válvula de saída do reservatório, adaptação dos isopores para as plantas e finalização de rotinas específicas) ficaram programadas para a próxima etapa de desenvolvimento.

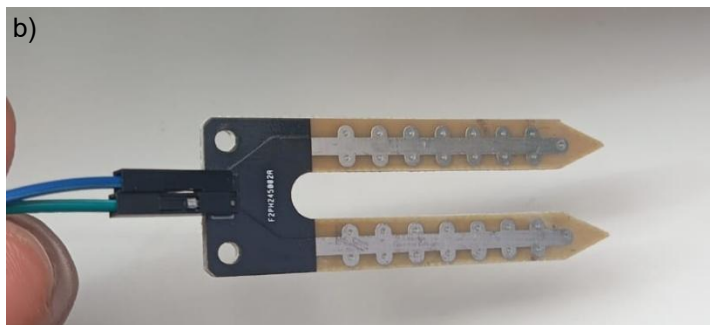
5.9. Teste 8 - Validação e substituição de componentes

Durante a fase de ajustes finos do protótipo, foram avaliados diferentes componentes periféricos, e as substituições foram realizadas sempre que o desempenho se mostrou insatisfatório.

A Figura 16 documenta o primeiro sensor testado, cujo sistema apresentou alta sensibilidade a temperaturas elevadas, comprometendo a confiabilidade das leituras em ambiente rural. Diante desse problema, o sensor foi substituído por um modelo mais robusto, adequado às variações térmicas do campo (Figura 17).

Figura 16 – a) Primeiro sensor testado (descartado por sensibilidade a altas temperaturas); b) modelo substituído adotado.



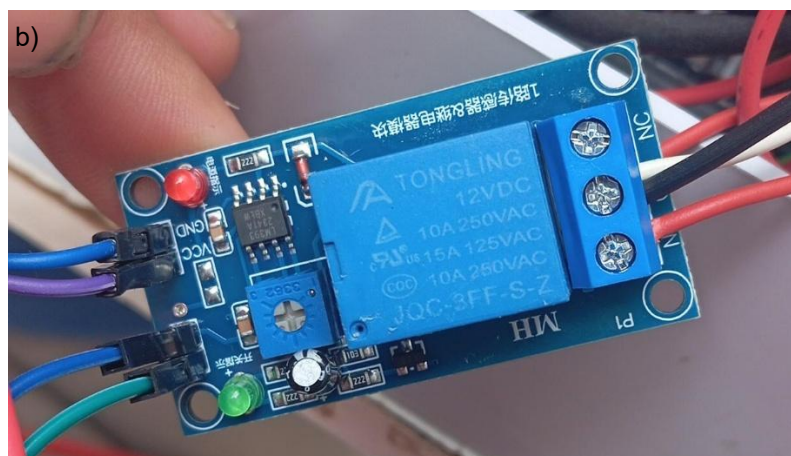
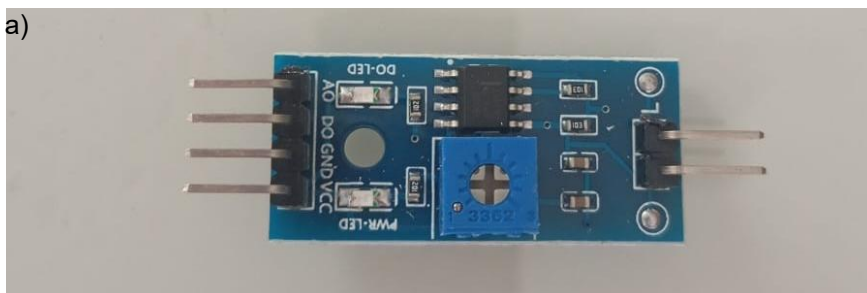


Fonte: Autoria Própria (2026).

No que se refere à aquisição de sinais dos sensores, a Figura 17 mostra o primeiro leitor utilizado, que convertia o sinal para digital. Esse dispositivo provocava alteração no sinal sempre que conectado ao CLP, inviabilizando a leitura correta.

A substituição ocorreu por um modelo com saída por contato seco, o qual eliminou as interferências elétricas e garantiu a integridade da comunicação com o CLP.

Figura 17 – a) primeiro leitor de sensor com saída digital (descartado por alteração do sinal ao conectar ao CLP); b) modelo substituto com contato seco.



Fonte: Autoria Própria (2026).

A escolha do controlador também passou por avaliações. Um primeiro CLP foi testado, mas mostrou-se inviável devido a problemas de comunicação com os demais componentes do sistema. O equipamento foi então substituído pelo CLP Panasonic FP0R-C14RS, que atendeu plenamente aos requisitos de conectividade e processamento lógico.

Por fim, o subsistema de armazenamento de energia também foi validado. A primeira bateria utilizada não suportou a potência demandada pelo circuito, resultando em falhas operacionais. A substituição pela bateria UNIPOWER (12V 35Ah) resolveu a limitação de corrente e proporcionou a autonomia necessária para o sistema.

A Figura 18 apresenta o indicador de desempenho do sistema, com todos os subsistemas operando a 100% da capacidade, confirmando a eficácia dos ajustes realizados.

Figura 18 - indicador de desempenho do sistema mostrando 100% de funcionamento nos principais subsistemas (geração de energia, comunicação e acionamento da irrigação).



Fonte: Autoria Própria (2026).

Os testes validaram a comunicação Modbus RTU entre CLP e IHM, a programação em Ladder e a integração dos sistemas eólico e fotovoltaico. A substituição dos componentes inadequados (sensores, leitor, CLP e bateria) eliminou as falhas operacionais.

Ao final, todos os subsistemas operaram de forma estável e integrada. O protótipo mostrou-se pronto para a operação autônoma, atendendo aos objetivos de conservação de água e emprego de energias renováveis na agricultura.

6. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolveu um protótipo funcional de irrigação automatizada que integra um Controlador Lógico Programável (CLP), sensores capacitivos de umidade do solo e um sistema híbrido de energia composto por fonte solar fotovoltaica e eólica.

A revisão da literatura permitiu identificar as principais deficiências dos sistemas de irrigação tradicionais (baixa eficiência hídrica e energética), bem como as soluções tecnológicas consolidadas em nível mundial, como o uso de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), sensores capacitivos de umidade do solo e fontes renováveis híbridas (solar e eólica). Os estudos de caso analisados — nos Estados Unidos, Índia, China, Alemanha e Brasil — forneceram parâmetros concretos para a escolha dos componentes, a arquitetura de controle e as estratégias de comunicação (Modbus RTU), além de alertarem para armadilhas como a fragilidade de sensores resistivos e a necessidade de redundância energética.

A solução atendeu aos objetivos específicos estabelecidos, tais como a arquitetura de controle com lógica em Ladder, a supervisão por meio de Interface Homem-Máquina (IHM) com comunicação Modbus RTU, o bombeamento direto por energia eólica e a operação off-grid (independente da rede elétrica).

Esses elementos demonstraram, em escala reduzida, o potencial de redução do desperdício de água e energia na irrigação.

Os testes realizados comprovaram a eficácia da comunicação entre CLP e IHM, bem como a autonomia proporcionada pelas fontes renováveis.

Além disso, a pesquisa de campo evidenciou que a propriedade rural visitada ainda depende exclusivamente de métodos tradicionais de irrigação (baseados em chuvas), o que reforça a relevância de sistemas automatizados de baixo custo, especialmente voltados para a agricultura familiar.

Como principal limitação, o protótipo foi desenvolvido em escala reduzida. Contudo, os resultados obtidos indicam viabilidade técnica para futura replicação em campo. O trabalho sugere, como continuidade, a implementação em escala real, a adoção de lógica fuzzy para maior precisão no controle e a expansão do monitoramento remoto via nuvem.

Como sugestão de aprimoramento do protótipo, a lógica fuzzy apresenta-se como uma evolução em relação à lógica booleana tradicional (restrita a 0 e 1).

Diferentemente do controle binário, a lógica fuzzy admite valores intermediários, permitindo configurar múltiplos níveis de irrigação conforme condições variáveis, como temperatura elevada, ocorrência de chuva ou tempo úmido.

A implementação dessa técnica poderia ser realizada via programação integrada a dispositivo Sonoff com conectividade Wi-Fi ou rede celular, viabilizando o monitoramento remoto e a tomada de decisão mais flexível e precisa.

Trabalhos futuros podem explorar essa abordagem para aumentar a eficiência hídrica e energética do sistema.

Dessa forma, a conclusão do TCC sintetiza adequadamente as contribuições do projeto, reconhece suas limitações e aponta direções para trabalhos futuros, cumprindo seu papel de fechamento coerente da pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

ADETUNLA, Adedotun; ROMINIYI, Oluwasina; ADARAMOLA, Bernard; ADEOYE, Adeyinka. Development of a wind turbine for a hybrid solar-wind power system. *Heliyon*, v. 8, n. 11, e11458, nov. 2022. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11458.

ALBUQUERQUE, Rodrigo Sampaio de. Sistema de irrigação inteligente para agricultura familiar baseado em IoT. 2019. 60 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Computação) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uema.br/handle/123456789/876>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ALFA INSTRUMENTOS. Protocolo de Comunicação Modbus RTU/ASCII. Versão 1.0, 2000. Disponível em: https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/modbus/modbus_manual.pdf. Acesso em: 8 maio 2026.

ANCTECH. Intelligent Irrigation of 4000 acres of rice paddies, Chongming, Shanghai, China. Estudo de caso, 2025. Disponível em: <https://www.anctech.com/anli/info.aspx?id=373>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ANJOS, G. H. A.; CESTARI, Y. A. Controle de irrigação usando inversor de frequência em rede Modbus. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br>. Acesso em: 13 maio 2026.

BORGES, Rafael C.; BEUTER, Carlos H.; DOURADO, Vitória C.; BENTO, Murilo E. C. Internet of Things Application in an Automated Irrigation Prototype Powered by Photovoltaic Energy. *Energies*, v. 17, n. 9, 2219, 2024. DOI: 10.3390/en17092219.

CAL.NET. Terranova Ranch case study: smart irrigation automation. **Cal.net** Case Studies, 2025. Disponível em: <https://www.cal.net>. Acesso em: 10 mar. 2026.

CHÁVEZ, J. L.; PIERCE, F. J.; ELLIOTT, T. V. Precision Irrigation with Wireless Monitoring and Control System Technology. In: 5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings. Phoenix, Arizona: American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), 2010. p. IRR10-1044. DOI: 10.13031/2013.35830. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org>. Acesso em: 13 maio 2026.

CNIPA. PLC-based solar energy automatic irrigation system and irrigation method thereof. Patente CN106034999A. Depositante: Chongqing University of Science and Technology. Data de publicação: 26 out. 2016. Disponível em: <https://eureka.patnap.com/patent-CN106034999A>. Acesso em: 10 mar. 2026.

CULTYVATE. Precision irrigation with remote sensing for rice farmers. In: FRONTIER TECH HUB, NITI Aayog, 2025. Disponível em: <https://www.frontiertechhub.in>. Acesso em: 10 mar. 2026.

DEBILI, Narimene; HAOUAM, Abdeslam; CHENNI, Rachid. Design and optimization of automatic solar irrigation-based PLC. *Energetika*, v. 69, n. 1, p. 1-13, 2023. DOI: 10.6001/energetika.2023.69.1.1.

DESPOTOVIĆ, Željko V.; STEVANOVIĆ, Ilija R.; RODIĆ, Aleksandar. Hybrid uninterruptible power supply system for irrigation of vegetable crops. *Zbornik radova Elektrotehnički institut Nikola Tesla*, v. 33, n. 33, p. 49-58, 2023. DOI: 10.5937/zeint33-48022.

EMBRAPA. Tecnologia da Embrapa é usada para desenvolver sistema automático de irrigação. Embrapa Instrumentação, São Carlos, 10 abr. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/33188097/tecnologia-da-embrapa-e-usada-para-desenvolver-sistema-automatico-de-irrigacao>. Acesso em: 10 mar. 2026.

EMBRAPA AGRICULTURA DIGITAL. Irriga Certo: aplicativo para gestão da irrigação. In: Portal Embrapa – Soluções Tecnológicas, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas>. Acesso em: 10 mar. 2026.

EMBRAPA CERRADOS. Manejo de irrigação com cobertura plástica do solo na produção de mandioca de mesa no Cerrado. In: Portal Embrapa – Soluções Tecnológicas, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas>. Acesso em: 10 mar. 2026.

EMBRAPA PANTANAL. Protótipo autônomo de irrigação energizado por célula fotovoltaica. In: Portal Embrapa – Soluções Tecnológicas, 2013. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas>. Acesso em: 10 mar. 2026.

EMBRAPA AGROINDÚSTRIA TROPICAL. Energia eólica pode ser alternativa para pequenas propriedades. Embrapa Notícias, Fortaleza, 1º jun. 2004. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/17961474/energia-eolica-pode-ser-alternativa-para-pequenas-propriedades>. Acesso em: 10 mar. 2026.

EMERGENT CONNECT. Iron Horse Vineyards: IoT connectivity for precision viticulture. In: PRECISION FARMING DEALER, 2025. Disponível em: <https://www.precisionfarmingdealer.com>. Acesso em: 10 mar. 2026.

FONTES, I. R. Sistema de supervisão e controle de irrigação utilizando técnicas de inteligência artificial. 2003. Tese (Doutorado em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Botucatu, 2003. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br>. Acesso em: 13 maio 2026.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE. Innovation Lab APV 2.0 – Coupling of Crop Production and Photovoltaics. Fraunhofer ISE, Freiburg,

2022. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/innovation-lab-apv-2-0.html>. Acesso em: 10 mar. 2026.

GARCIA JUNIOR, Ervaldo. Introdução a Sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados – SCADA. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2019.

GERMAN WATER PARTNERSHIP. Alton Automation GmbH – Member Profile. German Water Partnership, Berlin, 2025. Disponível em: <https://germanwaterpartnership.de/en/mitgliederprofile/alton-automation-gmbh/>. Acesso em: 10 mar. 2026.

GUARESE, G. B. M. Arquitetura híbrida de comunicação para ambientes de automação industrial: protocolos IEEE 802.15.4 e Modbus RTU sobre RS485. Revista da Graduação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), v. 5, n. 1, 2012. Disponível em: <https://revistaseletronicas.pucrs.br>. Acesso em: 13 maio 2026.

HOCHSCHULE GEISENHEIM UNIVERSITY. iSoBeD: Digital and AI-supported approaches for sustainable irrigation in vegetables and viticulture. Hochschule Geisenheim University, Geisenheim, 2025. Disponível em: <https://www.hs-geisenheim.de/en/persons/person/161>. Acesso em: 10 mar. 2026.

IMMS GMBH. EXPRESS: Experimental field for data-driven networking and digitalisation in agriculture. Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme, 2025. Disponível em: <https://www.imms.de/en/references/projects/d/express-3966.html>. Acesso em: 10 mar. 2026.

KALIDAS, S. et al. Smart drip irrigation system using wireless sensor network and ZigBee technology. E3S Web of Conferences, v. 567, 01005, set. 2024. DOI: 10.1051/e3sconf/202456701005. Disponível em: <https://www.e3s-conferences.org>. Acesso em: 10 mar. 2026.

KOWSHIK, K. V. Renewable energy-powered canal automation using SCADA for efficient water resource management. In: GREEN SUMMIT ON GREEN & DIGITAL TECHNOLOGY 2024, MNIT Jaipur. Anais [...], 2024.

LAKHIAR, Imran Ali; YAN, Haofang; ZHANG, Chuan; WANG, Guoqing; HE, Bin; HAO, Beibei; HAN, Yujing; WANG, Biyu; BAO, Rongxuan; SYED, Tabinda Naz; CHAUHDARY, Junaid Nawaz; RAKIBUZZAMAN, Md. A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints. Agriculture, v. 14, n. 7, 1141, jul. 2024. DOI: 10.3390/agriculture14071141.

LIBORD BROKING. Shakti Pumps receives Rs 65.20 crore order for solar water pumping systems under PM-KUSUM scheme in Madhya Pradesh. Libord Broking Research Report, 2025. Disponível em: <https://www.libordbroking.com>. Acesso em: 10 mar. 2026.

LUMO PRECISION IRRIGATION. Pump-to-plant automation: smart valves and pump control. World Pumps, 2025. Disponível em: <https://www.worldpumps.com>. Acesso em: 10 mar. 2026.

MORAES, Maria J.; OLIVEIRA FILHO, Delly; MANTOVANI, Everardo C.; MONTEIRO, Paulo M. B.; MENDES, André L. C.; DAMIÃO, Jorge H. A. C. Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1075-1088, nov./dez. 2014.

MORSI, Iman; AHMED, Maged. Smart irrigation system using PLC, SCADA, and fuzzy control. Edelweiss Applied Science and Technology, v. 8, n. 6, p. 9101-9120, 2024. DOI: 10.55214/25768484.816.3947.

NAIS (National Agricultural Information Service). 光伏节能灌溉智能控制装置. Patente CN203575261U. Depositante: Tarim University. Inventores: Li Jianjun, Wang Wei, Zhang Hongzhou, Liao Jiean. Data de publicação: 2014. Disponível em: <http://agri.nais.net.cn/patentdetails/A0AD800BD6454A3B8B55C3047F1529A2.htm>. Acesso em: 10 mar. 2026.

NAIS (National Agricultural Information Service). 一种用于雨水收集处理与循环利用的智能监控系统. Patente CN203896933U. Inventor: Wang Hui. Data de publicação: 2014. Disponível em: <http://agri.nais.net.cn/patentdetails/4C329795A2B942D983F395C22D131610.html>. Acesso em: 10 mar. 2026.

NETAFIM; AMAZON INDIA. Water conservation partnership: precision irrigation for gourds, tomatoes, corn and vegetables in Bengaluru and Hyderabad. United News of India (UNI) , 2026. Disponível em: <https://www.uniindia.com>. Acesso em: 10 mar. 2026.

NOGUEIRA, R. J. S. G. Framework para o desenvolvimento de aplicações orientadas à agricultura de precisão baseadas em redes de sensores e atuadores sem fios. 2014. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Informática e Computação) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2014. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt>. Acesso em: 13 maio 2026.

O'SHAUGHNESSY, S. A. et al. ISSCADA system for automated deficit irrigation management in cotton: comparing automated methods with manual neutron probe-based scheduling. Frontiers in Plant Science, v. 14, 2023. DOI: 10.3389. Disponível em: <https://www.frontiersin.org>. Acesso em: 10 mar. 2026.

OSTFALIA HOCHSCHULE. 4DRain: Spatial and temporal water distribution under irrigation machines. Ostfalia Hochschule, Suderburg, 2025. Disponível em: <https://wasser-suderburg.de/en/4draineng/>. Acesso em: 10 mar. 2026.

OSTFALIA HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN. Next milestone reached: First prototype in the SmartCity Irrigation joint project

completed. Ostfalia Hochschule, Wolfsburg, 2025. Disponível em: https://www.ostfalia.de/en/university/news/news/13-08-2025_naechster-meilenstein-erreicht-erster-prototyp-im-verbundprojekt-smartcity-irrigation-fertiggestellt. Acesso em: 10 mar. 2026.

PANDA, Samarendra Nath; SAIKIA, Ranjita; SAGAR; SWAMY, G. Narayana; PANOTRA, Narinder; YADAV, Kamalkant; SINGH, Bal Veer; RATHI, Shivam; SINGH, Rajan; PANDEY, Shivam Kumar. Solar energy's role in achieving sustainable development goals in agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, v. 14, n. 5, p. 10-31, maio 2024. DOI: 10.9734/IJECC/2024/v14i54167.

PATLE, G. T. Development and evaluation of automated wireless sensor network-based drip irrigation system for protected cultivation. *CIGR Journal*, v. 27, n. 4, dez. 2025. Disponível em: <https://cigrjournal.org>. Acesso em: 10 mar. 2026.

PHOENIX CONTACT GMBH & CO. KG. Ressourcenschonende Grünflächenbewässerung im All Electric Society Park. *Facility Management – Fachzeitschrift & Fachmagazin*, 8 jul. 2024. Disponível em: <https://www.facility-management.de/artikel/ressourcenschonende-gruenflaechenbewaesserung-4123361.html>. Acesso em: 10 mar. 2026.

POLAT, Turgay; ÇOLAK, Ahmet. The use of hose reel irrigation machines and energy efficient components in irrigation. *Soil Studies*, v. 13, n. 1, p. 55-63, jul. 2024. DOI: 10.21657/soilst.1520606.

PURDUE UNIVERSITY. Microinverter powered by solar energy for smart irrigation: USDA-funded research project. *Purdue University News*, West Lafayette, 2024. Disponível em: <https://www.purdue.edu/news>. Acesso em: 10 mar. 2026.

ROCHA, Luís Othávio de Santos; GUIMARÃES, Carla Regina Rocha; OLIVEIRA, Rosângela Aparecida Pereira de. Exploração do uso eficiente de recursos hídricos na agricultura: investigação de técnicas de irrigação e tecnologias para a minimização do desperdício de água. *Revista Foco*, Curitiba, v. 17, n. 4, e4950, p. 01-18, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n4-128.

RWE RENEWABLES. New opportunity for the energy transition and agriculture: RWE plans innovative demonstration plant for agrivoltaics. *Solarnews*, 2023. Disponível em: https://www.solarnews.es/solarnews_internacional/2023/01/02/new-opportunity-for-the-energy-transition-and-agriculture-rwe-plans-innovative-demonstration-plant-for-agrivoltaics/. Acesso em: 10 mar. 2026.

SCIENCEDIRECT. Crop2Cloud platform: real-time data integration using fuzzy logic for irrigation scheduling. *ScienceDirect*, 2025. DOI: 10.1016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SEED STUDIO. Sensor de Umidade, Temperatura e CE do Solo com protocolo MODBUS-RTU RS-485. *Wiki Seeed Studio*, 2023. Disponível em:

https://wiki.seeedstudio.com/SenseCAP_Probe/Soil-Moisture-Temperature-EC-Sensor/. Acesso em: 13 maio 2026.

SEHR, Martin A.; LOHSTROH, Marten; WEBER, Matthew; UGALDE, Ines; WITTE, Martin; NEIDIG, Joerg; HOEME, Stephan; NIKNAMI, Mehrdad; LEE, Edward A. Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 17, n. 5, p. 3523-3533, maio 2021. DOI: 10.1109/TII.2020.3007764.

SOUZA, Thiago de Santana. Sistema de automação e monitoramento de irrigação em uma horta comunitária. Engineering & Technology Scientific Journal, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2025. DOI: 10.55977/etsjournal.v01i01.e025002.

SPRINGER. SCADA-assisted remote monitoring architecture for solar irrigation systems. In: Communications in Computer and Information Science (CCIS) , Springer, 2025. DOI: 10.1007/978-3-03. Disponível em: <https://link.springer.com>. Acesso em: 10 mar. 2026.

TARIQ, Ghulam Hasnain; ASHRAF, Muhammad; HASNAIN, Umar Sohaib. Solar technology in agriculture. In: Modern agricultural technology. IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.98266.

TEIXEIRA, Santiago Coelho. Projeto de irrigação automática com monitoramento remoto e energy harvesting. 2025. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Sorocaba, 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (UFRN). Aula 04 – Protocolo Modbus e Padrão OPC. Natal: Material Didático, [2025?]. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/53/4/5>. Acesso em: 8 maio 2026.

USDA ARS (AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE). SCADA system for variable rate irrigation (VRI) management. Research Project #3090-13000-015-037-I, Bushland, Texas, 2023. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov>. Acesso em: 10 mar. 2026.

USDA NRCS (NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE). Solar-powered microinverter for smart irrigation. Grant NR243A750011G012, 2024. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov>. Acesso em: 10 mar. 2026.

WIRELESS LOGIC. Sustainable vertical planting with BEEOTOPIA: sensor-controlled irrigation for building facades. Wireless Logic Success Stories, 2025. Disponível em: <https://wirelesslogic.com/success-stories/beeotopia>. Acesso em: 10 mar. 2026.

YAO, Kai-Chao; LIN, Cheng-Lung; PAN, Chih-Hsuan. Industrial Sustainable Development: The Development Trend of Programmable Logic Controller Technology. Sustainability, v. 16, n. 14, 6230, 2024. DOI: 10.3390/su16146230.

