

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL AUTOMATIZADO PARA RIEGO POR ASPERSIÓN

Walther Hernán Casimiro Urcos
Roger Octavio Quinteros Osorio
Jorge Armando Hinojosa Bautista
Angel Ricardo Tello Conde
Adolfo Osorio Osorio



DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN
DE
**CONTROL
AUTOMATIZADO**
PARA
RIEGO POR ASPERSIÓN

Walther Hernán Casimiro Urcos

Roger Octavio Quinteros Osorio

Jorge Armande Hinojosa Bautista

Angel Ricardo Tello Conde

Adolio Dsorio Osorio

Dirección Editorial: PhD. Jorge Luis León-González
Diseño de portada y edición: DI. Yunisley Bruno-Díaz

ISBN: 978-1-968794-52-1

DOI: <https://doi.org/10.64092/GHHS8237>

© Walther Hernán Casimiro Urcos, 2026. All rights reserved.

© Roger Octavio Quinteros Osorio, 2026. All rights reserved.

© Jorge Armando Hinojosa Bautista, 2026. All rights reserved.

© Angel Ricardo Tello Conde, 2026. All rights reserved.

© Adolfo Osorio Osorio, 2026. All rights reserved.

La evaluación científica y metodológica de la obra se realizó a partir del método de Revisión por Pares Abierta (Open Peer Review).

Este libro es una publicación de acceso abierto con los principios de Creative Commons Attribution 4.0 International License, que permite el uso, intercambio, adaptación, distribución y transmisión en cualquier medio o formato, siempre que dé el crédito apropiado al autor, origen y fuente del material gráfico. Si el uso del material gráfico excede el uso permitido por la normativa legal deberá tener permiso directamente del titular de los derechos de autor.



SOPHIA EDITIONS

8404 N Rome Ave, Tampa,
Florida, USA

Email: contact@sophiaeditions.com

Phone: +1 (813) 699-2557

<https://sophiaeditions.com/>

PhD. Juan Gabriel Rivera-Ortiz, Ana G. Méndez University, Estados Unidos

PhD. Armanda Matos, Universidade de Coimbra, Portugal

PhD. Domingo Antonio Lilón-Larrauri, Universidad de Pécs, Hungría

PhD. Frida Díaz-Barriga Arceo, Universidad Nacional Autónoma de México, México

PhD. Lok Raj Sharma, Makawanpur Multiple Campus, Nepal

PhD. Pamela Marccone-Dapelo, Universidad de Playa Ancha, Chile

PhD. Sébastien Quenot, Università di Corsica, Francia

PhD. Rafael Ravina-Ripoll, Universidad de Cádiz, España

PhD. Karen Pesantes-Aldana, Universidad Privada Antenor Orrego, Perú

PhD. Pablo Páramo-Bernal, Universidad Pedagógica Nacional, Colombia

PhD. Eduardo Somarribas-Chávez, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica

PhD. Lázaro Pino-Rivero, Lone Star College, Estados Unidos

PhD. Anurag Hazarika, Global Interfaith University, Estados Unidos

PhD. Setyamartana Parman, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan, Indonesia

PhD. Vicenç Font-Moll, Universidad de Barcelona, España

PhD. Ricardo Rivero-Ortega, Universidad de Salamanca, España

PhD. María Elena Estrada-Martínez, Colegio Palms Day School, Estados Unidos

PhD. Annette Lourdes Padilla-Gómez, Instituto de Educación de Aguascalientes, México

PhD. José Fernando Escobedo-Gálvez, Universidad Señor de Sipán, Perú

PhD. Ahmed G. Hegazy, National Research Centre, Egipto

PhD. Lilibeth Portillo-Rumbo, Universidad Autónoma de Tlaxcala, México

PhD. Ana María Téllez-López, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

PhD. Alexandra Verónica Parra-Cárdenas, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador

PhD. Faisal A. Alnaser, Imperial College London, Reino Unido

PhD. Berlan Rodríguez-Pérez, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú

PhD. José Alberto Rivera-Costales, Universidad de Santiago de Compostela, España

PhD. Claudia Wasserman, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

PhD. Enrique Rafael Farfán-Heredia, Universidad Autónoma del Carmen, México

PhD. Lali Viviana Cedeño-Sánchez, Universidad de Guayaquil, Ecuador

PhD. Odette Martínez-Pérez,
Universidad Bolivariana
del Ecuador, Ecuador

PhD. Moacir Gadotti,
Universidad de São
Paulo, Brasil

**PhD. Cesar Augusto
Bernal-Torres,** Universidad
de La Sabana, Colombia

**PhD. Lázaro Jesús
Ojeda-Quintana,** URBE
University, Estados Unidos

**PhD. Ángel Deroncele-
Acosta,** Universidad San
Ignacio de Loyola, Perú

**PhD. Rafael Gutiérrez-
Núñez,** Universidad
de Ciencias Médicas
de Granma, Cuba

**PhD. Alfredo Noré Saluanja-
Muacachila,** Universidade
do Namibe, Angola

**PhD. Ronald Antonio
Prieto-Pulido,** Universidad
Simón Bolívar, Colombia

**PhD. Nurian Yamileth
Luna-Laínez de Quintanilla,**
Universidad Gerardo
Barrios, El Salvador

**PhD. Lina María Cano-
Vásquez,** Universidad
Pontificia Bolivariana,
Colombia

**PhD. Jarosław
Korpysa,** University of
Szczecin, Polonia

PhD. Silvia Finocchio,
Universidad Nacional de
La Plata, Argentina

**PhD. Pablo Pérez-
Navarro,** Universidad
de Coimbra, Portugal

**PhD. Oscar José Alejo-
Machado,** Instituto
Superior Tecnológico de

Investigación Científica
e Innovación, Ecuador

**PhD. Juan Díaz-
Godino,** Universidad
de Granada, España

**PhD. Thiago Duarte-
Pimentel,** Universidade
Federal de Juiz de
Fora, Brasil

**PhD. Guadalupe Velázquez-
Vázquez,** Benemérita
Universidad Autónoma
de Puebla, México

**PhD. Lillian Rocio Pintado-
Sosa,** Universidad Ana
G. Méndez, Puerto Rico

PhD. Alexandru Manole,
ARTIFEX University of
Bucharest, Rumanía

PhD. Alina Borysova,
Kharkiv State Academy
of Culture, Ucrania

PhD. Irina Sokolova,
Don State Technical
University, Rusia

PhD. Nadezhda Fedko,
Rostov State Transport
University, Rusia

**PhD. Samikshya
Madhukullya,** Global
Interfaith University,
Estados Unidos

**PhD. Roberto Maurice
Robert,** 21st Century
Open University, Wyoming,
Estados Unidos.

Prefacio	i
Introducción	x

Capítulo 1. Fundamentos científicos, hidráulicos y tecnológicos del riego automatizado

1.1. Gestión sostenible del agua y eficiencia hídrica	1
1.2. Fundamentos y métodos de los sistemas de riego	20
1.3. Diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión	38
1.4. Automatización industrial aplicada a los sistemas de riego	46

Capítulo 2. Diseño, integración y control del sistema automatizado de riego por aspersión

2.1. Diseño técnico y selección de los componentes del sistema	74
2.2. Construcción e integración del sistema eléctrico e hidráulico	92
2.3. Programación, supervisión y validación del funcionamiento	96

Capítulo 3. Operación, validación y mantenimiento del sistema automatizado de riego por aspersión

3.1. Puesta en marcha del sistema automatizado	107
3.2. Funcionamiento del sistema en modo manual	123
3.3. Funcionamiento del sistema automatizado de riego	133
3.4. Condiciones de seguridad antes fallas eléctricas o paro de seguridad	144
3.5. Resultados de la implementación del sistema automatizado	156

3.6. Estrategias de mantenimiento y diagnóstico de fallas159

Referencias169

PREFACIO

Pocas creaciones humanas han ejercido una influencia tan profunda sobre el desarrollo de las sociedades como la capacidad para gestionar el agua. Allí donde fue posible captar, conducir, almacenar y distribuir este recurso surgieron ciudades, prosperó la agricultura, se consolidaron las economías y se sentaron las bases del progreso científico y tecnológico. En la actualidad, esa relación adquiere una dimensión aún más trascendente. El crecimiento demográfico, la expansión de las actividades productivas, la degradación de los ecosistemas y los efectos del cambio climático han convertido al agua en uno de los recursos estratégicos más importantes del siglo XXI. Su disponibilidad y su gestión eficiente condicionan no solo la seguridad alimentaria y el desarrollo económico, sino también la estabilidad ambiental y el bienestar de millones de personas.

Paradójicamente, aunque el planeta posee una enorme cantidad de agua, solo una pequeña fracción está disponible para satisfacer las necesidades humanas y de los ecosistemas. Esta realidad obliga a superar los enfoques tradicionales basados exclusivamente en incrementar la oferta hídrica y orienta la atención hacia un objetivo mucho más ambicioso: administrar el recurso con criterios de eficiencia, sostenibilidad e innovación tecnológica. Hoy el verdadero desafío no consiste únicamente en disponer de agua, sino en utilizarla de manera inteligente, reduciendo pérdidas, optimizando cada unidad empleada y garantizando su disponibilidad para las generaciones futuras.

La ingeniería ha respondido a este desafío mediante una profunda transformación conceptual. Durante décadas, el éxito de los proyectos hidráulicos estuvo asociado principalmente a la construcción de grandes infraestructuras capaces de captar, almacenar y transportar volúmenes cada vez mayores de agua. Sin embargo, las condiciones actuales exigen una

visión diferente. El énfasis se desplaza progresivamente hacia el diseño de sistemas capaces de administrar el recurso con precisión, incorporar información en tiempo real y adaptar su funcionamiento a las condiciones cambiantes del entorno. Esta evolución ha situado a la automatización, la instrumentación y la transformación digital entre los pilares fundamentales de la ingeniería hidráulica contemporánea (Grievson et al., 2022).

La automatización industrial ha sido uno de los principales motores de esta transformación. Lo que comenzó como un conjunto de tecnologías destinadas a reducir la intervención humana en los procesos manufactureros evolucionó hasta convertirse en un paradigma capaz de integrar sensores, dispositivos electrónicos, sistemas de control, redes de comunicación y plataformas inteligentes para supervisar procesos complejos con elevados niveles de precisión. Su incorporación al ámbito de la gestión del agua ha abierto nuevas posibilidades para optimizar el funcionamiento de las infraestructuras hidráulicas, permitiendo que numerosas decisiones operativas ya no dependan exclusivamente de la experiencia del operador, sino del análisis continuo de información generada por el propio sistema.

En este escenario, los sistemas de riego representan uno de los campos de aplicación más prometedores de la automatización. Durante décadas, la programación del riego respondió principalmente a horarios preestablecidos o a la observación directa de las condiciones del terreno. Aunque estos procedimientos permitieron sostener la producción agrícola y el mantenimiento de áreas verdes, también generaron aplicaciones excesivas o insuficientes de agua, incrementando las pérdidas por evaporación, escorrentía e infiltración profunda. La evolución de la electrónica y de las tecnologías de control ha permitido sustituir gradualmente estos esquemas tradicionales por sistemas capaces de suministrar únicamente el volumen de agua requerido, en el momento oportuno y bajo las condiciones más favorables para el desarrollo de la vegetación.

La integración de sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas, caudalímetros, electroválvulas, electrobombas y Controladores Lógicos Programables ha dado origen a sistemas capaces de interpretar continuamente las condiciones del entorno y ejecutar respuestas automáticas sin comprometer la confiabilidad del proceso hidráulico. Cuando estas tecnologías se complementan con plataformas de supervisión, Internet de las Cosas, computación en la nube e inteligencia artificial, el sistema de riego deja de ser una infraestructura pasiva para convertirse en una red inteligente que aprende del comportamiento de las variables ambientales, optimiza el consumo de recursos y facilita la toma de decisiones basada en información objetiva.

Esta transformación tecnológica posee implicaciones que trascienden el ámbito estrictamente ingenieril. Cada litro de agua ahorrado mediante un sistema automatizado representa una contribución concreta a la conservación de un recurso cada vez más escaso; cada kilovatio de energía optimizado reduce los costos operativos y disminuye la huella ambiental de la infraestructura; cada decisión ejecutada automáticamente incrementa la precisión del sistema y libera al operador de tareas repetitivas para concentrarse en actividades de mayor valor técnico. La automatización, por tanto, no debe entenderse únicamente como un avance tecnológico, sino como una herramienta estratégica para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas hidráulicos y contribuir al cumplimiento de los objetivos internacionales relacionados con la gestión responsable del agua.

El presente libro se inscribe plenamente dentro de esta visión. *Diseño e implementación de control automatizado para riego por aspersión* constituye una obra que integra de manera coherente los fundamentos científicos de la gestión hídrica, los principios de la ingeniería hidráulica, las bases de la automatización industrial y las tecnologías digitales aplicadas al control de sistemas de riego. Esta articulación convierte al texto en una referencia que supera el enfoque tradicional de los manuales especializados, ya que no estudia aisladamente cada componente del sistema, sino que explica las relaciones funcionales que permiten

convertir un conjunto de dispositivos hidráulicos y electrónicos en una infraestructura inteligente orientada a optimizar el uso del agua.

Uno de los aspectos más valiosos de esta publicación radica en su enfoque eminentemente interdisciplinario. A lo largo de sus capítulos convergen conocimientos procedentes de la hidráulica, la mecánica de fluidos, la electrónica, la instrumentación, la programación, el control automático y la gestión de los recursos hídricos. Esta integración responde a la realidad de la ingeniería contemporánea, donde los problemas técnicos rara vez pueden resolverse desde una única disciplina. Diseñar un sistema automatizado de riego exige comprender simultáneamente el comportamiento del agua dentro de una red presurizada, la lógica de funcionamiento de los dispositivos electrónicos, la arquitectura de los sistemas de control y las necesidades fisiológicas de la vegetación. Solo mediante esa visión integral es posible desarrollar soluciones eficientes, confiables y adaptadas a las exigencias actuales.

La obra adquiere un valor adicional al fundamentarse en una experiencia de investigación aplicada desarrollada en la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, Perú. Este hecho demuestra el papel que desempeñan las instituciones de educación superior como espacios de generación de conocimiento, innovación tecnológica y transferencia hacia la sociedad. Las universidades ya no limitan su misión a la formación de profesionales; hoy constituyen centros donde la investigación se convierte en soluciones concretas para atender problemas reales relacionados con la sostenibilidad, la productividad y el desarrollo tecnológico. El sistema automatizado presentado en este libro constituye una muestra de cómo el conocimiento científico puede transformarse en una herramienta capaz de mejorar la eficiencia en el uso del agua y fortalecer la gestión de los recursos naturales.

La investigación que da origen a esta obra constituye un ejemplo de ese compromiso con la generación de soluciones tecnológicas orientadas a responder a necesidades concretas del entorno. El

sistema de control automatizado desarrollado para los jardines de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle demuestra que la innovación no depende exclusivamente de tecnologías complejas o de grandes inversiones, sino de la capacidad para integrar adecuadamente el conocimiento científico, el diseño ingenieril y la comprensión de los problemas reales. Esta perspectiva convierte al proyecto presentado en un referente de investigación aplicada, donde cada decisión de diseño responde a criterios técnicos sustentados en principios hidráulicos, electrónicos y de automatización.

Lejos de limitarse a describir la construcción de un sistema de riego, los autores desarrollan una visión integral que permite comprender las múltiples dimensiones involucradas en la gestión moderna del agua. El lector encontrará una explicación rigurosa de los fundamentos científicos relacionados con la eficiencia hídrica, la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, los métodos de riego, el diseño hidráulico de sistemas presurizados, la automatización industrial y los principios que sustentan el funcionamiento de los diferentes componentes electrónicos e hidráulicos que intervienen en un sistema inteligente de riego. Esta secuencia temática responde a una estructura cuidadosamente organizada, donde cada capítulo constituye el fundamento del siguiente, facilitando una comprensión progresiva y coherente del proyecto tecnológico desarrollado.

Especial atención merece el tratamiento que la obra concede a la automatización industrial como disciplina integradora. Con frecuencia, los textos especializados analizan de manera independiente los sistemas hidráulicos o los dispositivos electrónicos, dificultando que el lector comprenda cómo interactúan dentro de una instalación real. En cambio, este libro demuestra que un sistema automatizado solo alcanza su máximo desempeño cuando todos sus componentes funcionan como parte de un proceso coordinado. La información generada por los sensores adquiere sentido únicamente cuando es interpretada por un controlador; las decisiones del controlador solo producen resultados cuando son ejecutadas correctamente por los actuadores; y todo el sistema únicamente cumple su

propósito cuando esa interacción consigue distribuir el agua con la presión, el caudal y la uniformidad requeridos. Esta concepción sistémica constituye uno de los mayores aportes conceptuales de la obra.

Otro aspecto destacable es el equilibrio alcanzado entre el rigor científico y la aplicabilidad práctica. Los autores no se limitan a presentar conceptos teóricos, sino que los vinculan permanentemente con situaciones reales de diseño, operación y mantenimiento. Esta orientación facilita que el lector comprenda no solo el funcionamiento individual de bombas, electroválvulas, sensores, tuberías, aspersores o Controladores Lógicos Programables, sino también la lógica que sustenta su selección, integración y coordinación dentro de un sistema automatizado de riego. De esta manera, el conocimiento adquiere una dimensión aplicada que favorece su utilización tanto en proyectos académicos como en desarrollos profesionales.

La importancia de este enfoque resulta aún más evidente en el contexto de la transformación digital que experimenta la ingeniería contemporánea. El avance de tecnologías como el Internet de las Cosas, la computación en la nube, el análisis masivo de datos, la inteligencia artificial y los sistemas ciberfísicos está modificando profundamente la forma en que se conciben las infraestructuras hidráulicas. Los sistemas de riego del futuro serán capaces de comunicarse entre sí, aprender de las condiciones ambientales, anticipar necesidades de mantenimiento, optimizar automáticamente el consumo energético y adaptar sus estrategias de funcionamiento a escenarios climáticos cambiantes. Preparar a los futuros ingenieros para participar activamente en esa transformación constituye uno de los grandes retos de la educación superior, y este libro aporta una base sólida para afrontar ese desafío.

La publicación también pone de manifiesto el enorme potencial que poseen las tecnologías accesibles cuando son empleadas con criterios de ingeniería. En numerosas ocasiones, la innovación suele asociarse exclusivamente con equipos sofisticados o soluciones de elevado costo. Sin embargo, la experiencia

desarrollada por los autores demuestra que la verdadera innovación reside en la capacidad para integrar componentes confiables, metodologías rigurosas y criterios científicos dentro de un diseño funcional que responda eficazmente a una necesidad específica. Esta visión resulta especialmente valiosa para instituciones educativas, gobiernos locales, empresas y organizaciones que buscan modernizar sus sistemas de riego mediante soluciones técnicamente viables y económicamente sostenibles.

Desde esta perspectiva, el presente libro trasciende el ámbito estrictamente universitario. Su contenido ofrece herramientas de gran utilidad para estudiantes de ingeniería hidráulica, ingeniería agrícola, ingeniería electrónica, ingeniería mecatrónica, ingeniería ambiental e ingeniería industrial, así como para investigadores, docentes, consultores y profesionales dedicados al diseño, operación y modernización de sistemas hidráulicos. Del mismo modo, constituye una referencia de interés para instituciones públicas y privadas comprometidas con la gestión eficiente del agua, la sostenibilidad ambiental y la incorporación de tecnologías inteligentes en la administración de sus infraestructuras.

La vigencia de una obra técnica no depende únicamente de la actualidad de las tecnologías que describe, sino de la solidez de los principios que la sustentan. Los equipos evolucionan, los lenguajes de programación cambian, aparecen nuevos sensores, plataformas de comunicación y algoritmos de inteligencia artificial; sin embargo, los fundamentos de la ingeniería permanecen inalterables. Comprender el comportamiento del agua, interpretar correctamente los fenómenos hidráulicos, diseñar sistemas confiables, seleccionar adecuadamente los componentes y aplicar criterios rigurosos de automatización seguirán siendo competencias esenciales para quienes asuman la responsabilidad de desarrollar las infraestructuras que demandará la sociedad durante las próximas décadas.

En este sentido, la presente obra no pretende ofrecer soluciones universales ni recetas invariables para el diseño de sistemas

automatizados de riego. Su propósito es mucho más ambicioso: proporcionar al lector los fundamentos científicos, tecnológicos y metodológicos que le permitan analizar cada problema desde una perspectiva crítica, comprender las relaciones existentes entre los diferentes componentes de un sistema automatizado y desarrollar soluciones adaptadas a las particularidades de cada contexto. La ingeniería encuentra su verdadero valor cuando el conocimiento adquirido se transforma en capacidad para resolver problemas concretos mediante decisiones técnicamente fundamentadas.

Asimismo, este libro constituye una invitación permanente a investigar. Cada capítulo pone de manifiesto que el conocimiento científico es un proceso dinámico que evoluciona continuamente gracias a la observación, la experimentación y la innovación. Las tecnologías descritas representan el estado actual de un campo en permanente desarrollo, donde continuamente surgen nuevos materiales, dispositivos electrónicos, protocolos de comunicación, plataformas digitales y herramientas de análisis que amplían las posibilidades para optimizar la gestión del agua. Esta realidad exige profesionales con una actitud de aprendizaje permanente, capaces de actualizar sus conocimientos e incorporar críticamente los avances tecnológicos que contribuyan a mejorar el desempeño de los sistemas hidráulicos.

Resulta igualmente destacable el compromiso que esta obra manifiesta con la formación de ingenieros capaces de integrar conocimientos provenientes de distintas disciplinas. Los desafíos contemporáneos relacionados con la sostenibilidad, la seguridad hídrica y la transformación digital no admiten soluciones fragmentadas. Diseñar un sistema automatizado de riego implica comprender simultáneamente principios de hidráulica, electrónica, instrumentación, programación, control automático, eficiencia energética y gestión ambiental. Esta integración constituye uno de los rasgos distintivos de la ingeniería del siglo XXI y representa, al mismo tiempo, una de las principales fortalezas de esta publicación.

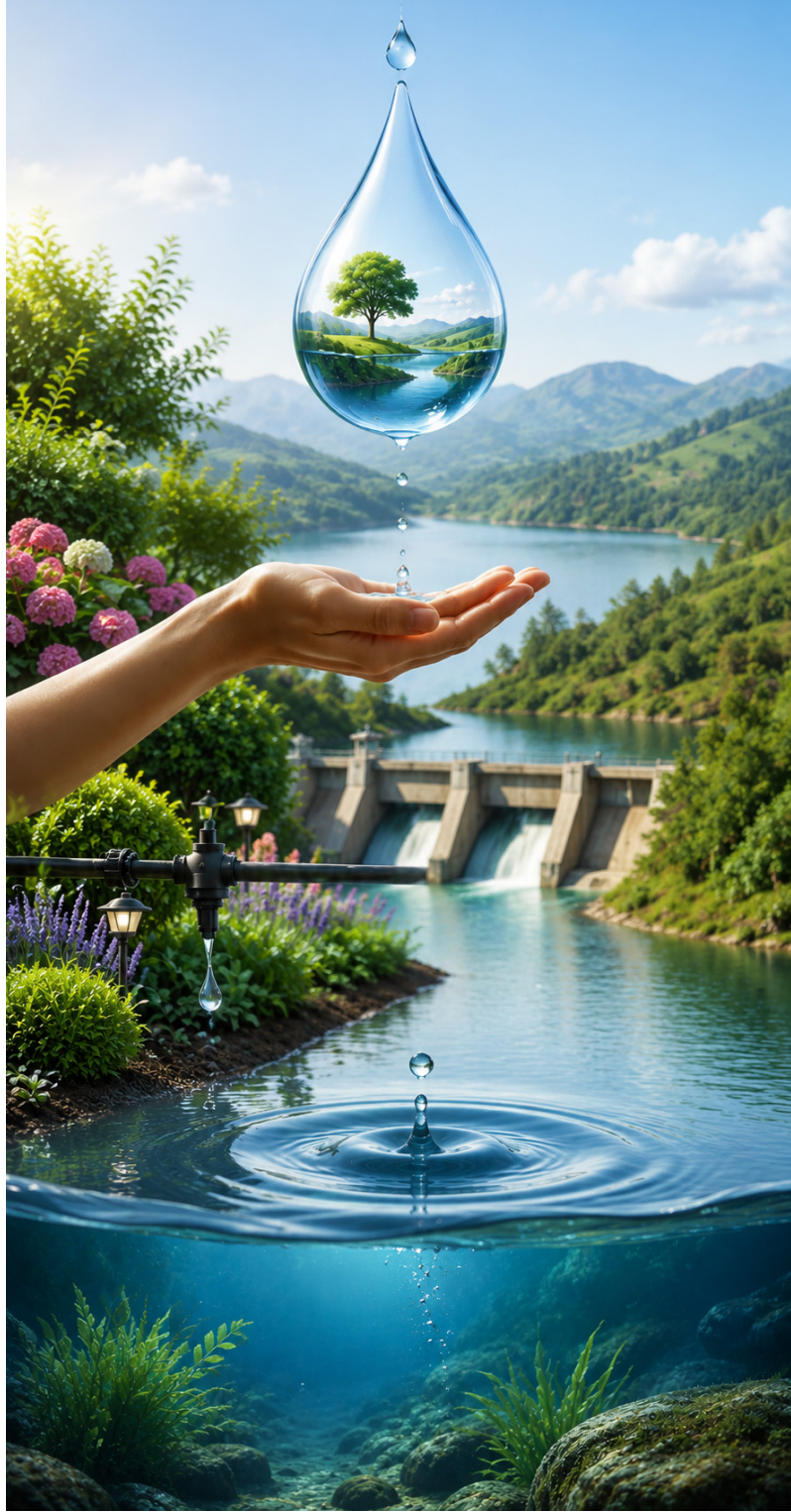
Los autores demuestran que la investigación desarrollada en el ámbito universitario posee un enorme potencial para generar soluciones tecnológicas con impacto social. El proyecto descrito en estas páginas evidencia cómo el conocimiento científico puede trascender el laboratorio para convertirse en una herramienta orientada a optimizar el uso del agua, reducir el consumo energético, fortalecer la sostenibilidad institucional y contribuir al bienestar colectivo. Esta capacidad de transformar conocimiento en soluciones concretas representa una de las misiones más valiosas de la educación superior y uno de los pilares sobre los cuales debe construirse la ingeniería del futuro.

Confiamos en que este libro contribuya a fortalecer la formación de estudiantes, motive nuevas investigaciones, impulse proyectos de innovación tecnológica y sirva como referencia para profesionales comprometidos con la gestión eficiente del agua. Si las ideas aquí desarrolladas inspiran nuevos proyectos, estimulan la búsqueda de soluciones innovadoras o motivan a futuros ingenieros a afrontar con responsabilidad los desafíos relacionados con la sostenibilidad de los recursos hídricos, los objetivos que dieron origen a esta obra habrán sido plenamente alcanzados.

Porque administrar eficientemente el agua ya no constituye únicamente un desafío técnico. Es una responsabilidad científica, una prioridad ambiental y un compromiso ético con las generaciones futuras. Cada avance en automatización, cada mejora en la eficiencia hidráulica y cada innovación aplicada al uso racional del recurso representan un paso hacia un modelo de desarrollo más sostenible, donde la ingeniería continúa demostrando que el conocimiento es la herramienta más poderosa para transformar la realidad.

Los Autores

INTRODUCCIÓN



El agua constituye el recurso natural más determinante para la continuidad de la vida, el funcionamiento de los ecosistemas y el desarrollo de las actividades productivas. Su disponibilidad condiciona la seguridad alimentaria, la salud pública, la conservación de la biodiversidad, la generación de energía y el crecimiento económico de las naciones. No obstante, el incremento sostenido de la demanda, la expansión urbana, la intensificación de la agricultura, el deterioro de las fuentes hídricas y los efectos del cambio climático han situado la gestión eficiente del agua entre los principales desafíos científicos, tecnológicos y ambientales del siglo XXI. En este contexto, la optimización de cada unidad de agua utilizada ha dejado de ser únicamente una necesidad operativa para convertirse en una prioridad estratégica para alcanzar un desarrollo verdaderamente sostenible.

La agricultura continúa siendo la actividad que concentra el mayor consumo de agua dulce a escala mundial. Sin embargo, una proporción significativa de este recurso aún se pierde como consecuencia de sistemas de distribución poco eficientes, infraestructuras hidráulicas con limitadas capacidades de control y prácticas de riego que no siempre responden a las necesidades reales de los cultivos o de las áreas verdes. Estas pérdidas generan repercusiones que trascienden el ámbito hidráulico, pues incrementan el consumo energético, elevan los costos de operación, favorecen el deterioro de los recursos naturales y reducen la sostenibilidad de los sistemas de producción. Ante esta realidad, la ingeniería contemporánea enfrenta el reto de desarrollar soluciones capaces de incrementar la eficiencia del uso del agua sin comprometer la confiabilidad, la productividad ni la viabilidad económica de las instalaciones.

Responder a este desafío ha requerido una profunda evolución tecnológica. Durante gran parte del siglo pasado, los sistemas de riego se diseñaban fundamentalmente para garantizar el suministro de agua mediante criterios hidráulicos relativamente estáticos, donde la programación dependía en gran medida de horarios preestablecidos y de la experiencia del operador. Aunque estos métodos permitieron importantes avances en el

desarrollo agrícola y urbano, las exigencias actuales demandan infraestructuras capaces de adaptarse dinámicamente a las condiciones ambientales, optimizar el consumo de recursos y operar con elevados niveles de precisión. Esta transformación ha impulsado la incorporación de tecnologías de automatización que integran sensores, actuadores, Controladores Lógicos Programables, sistemas de supervisión y plataformas digitales dentro de una arquitectura capaz de monitorear continuamente el proceso hidráulico y ejecutar decisiones automáticas basadas en información objetiva.

La convergencia entre la hidráulica, la electrónica, la informática y las telecomunicaciones ha modificado profundamente la concepción tradicional de los sistemas de riego. En la actualidad, estos sistemas ya no se limitan a transportar agua desde una fuente de abastecimiento hasta una superficie determinada, sino que constituyen plataformas tecnológicas capaces de medir variables ambientales, interpretar condiciones de operación, regular caudales, controlar presiones y optimizar automáticamente los ciclos de riego. Esta evolución refleja el tránsito desde infraestructuras predominantemente mecánicas hacia sistemas inteligentes que incorporan principios propios de la Industria 4.0 y de la transformación digital, ampliando considerablemente las posibilidades para administrar de manera eficiente un recurso cada vez más valioso.

Dentro de este escenario, el riego por aspersión ocupa un lugar destacado por su capacidad para distribuir el agua con elevados niveles de uniformidad sobre superficies continuas, característica que lo convierte en una alternativa especialmente adecuada para jardines, parques, campos deportivos, áreas verdes institucionales y numerosos sistemas agrícolas. Su funcionamiento mediante redes hidráulicas presurizadas facilita la sectorización del terreno, el control del caudal y la incorporación de dispositivos electromecánicos que permiten automatizar completamente la operación del sistema. Estas características han favorecido su integración con tecnologías de monitoreo y control, consolidándolo como uno de los métodos

más versátiles para proyectos donde la eficiencia hidráulica y la automatización constituyen objetivos prioritarios.

Sin embargo, la automatización de un sistema de riego representa mucho más que la incorporación de equipos electrónicos. Su diseño exige comprender la interacción existente entre fenómenos hidráulicos, variables ambientales, arquitectura de control, programación lógica, instrumentación, sistemas eléctricos y criterios de operación. El desempeño global de la instalación depende de la adecuada integración de todos estos elementos dentro de un proceso coordinado donde cada componente cumple una función específica y contribuye al funcionamiento estable del conjunto. En consecuencia, el desarrollo de soluciones automatizadas demanda una visión interdisciplinaria que combine fundamentos científicos con criterios de ingeniería aplicada, permitiendo transformar el conocimiento teórico en sistemas capaces de responder eficazmente a las necesidades del entorno.

Precisamente sobre esta concepción se desarrolla la presente obra. *Diseño e implementación de control automatizado para riego por aspersión* surge como resultado de un proceso de investigación orientado a integrar los principios de la ingeniería hidráulica y la automatización industrial en el desarrollo de una solución tecnológica destinada a optimizar el riego de las áreas verdes de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, en Perú. Más que documentar la construcción de un sistema específico, el libro expone los fundamentos científicos y metodológicos que sustentan cada decisión de diseño, proporcionando al lector una comprensión integral de los procesos involucrados en la planificación, implementación y evaluación de un sistema automatizado de riego.

La presente publicación no fue concebida únicamente para documentar los resultados de una investigación académica. Su propósito trasciende la descripción de un caso de estudio específico y se orienta a ofrecer un marco conceptual y metodológico que pueda servir de referencia para el diseño, implementación y evaluación de sistemas automatizados de

riego en diferentes contextos. Bajo esta perspectiva, el proyecto desarrollado se convierte en un medio para ilustrar la aplicación de principios de ingeniería ampliamente transferibles, demostrando cómo la integración de conocimientos provenientes de distintas disciplinas permite construir soluciones técnicamente sólidas y ambientalmente responsables.

Uno de los aspectos distintivos de esta obra radica en que aborda el problema desde una perspectiva sistémica. Con frecuencia, los sistemas de riego son analizados exclusivamente desde el punto de vista hidráulico, mientras que la automatización suele estudiarse como un campo independiente centrado en la programación de controladores, el diseño de circuitos eléctricos o la instrumentación electrónica. En contraste, este libro demuestra que el desempeño de un sistema automatizado depende de la interacción permanente entre todos sus componentes. Una red hidráulica correctamente dimensionada pierde eficiencia si la estrategia de control resulta inadecuada; del mismo modo, un sistema de automatización sofisticado difícilmente alcanzará un funcionamiento óptimo cuando la infraestructura hidráulica presenta deficiencias de diseño. Comprender esta interdependencia constituye uno de los pilares sobre los cuales se estructura el contenido de la obra.

Desde esta perspectiva, la automatización deja de entenderse como la simple sustitución de operaciones manuales por procesos automáticos y pasa a concebirse como un mecanismo para optimizar el funcionamiento integral de una infraestructura. Cada sensor instalado, cada señal procesada por el Controlador Lógico Programable, cada electroválvula accionada y cada electrobomba puesta en funcionamiento forman parte de una secuencia cuidadosamente coordinada cuyo objetivo consiste en suministrar únicamente el volumen de agua requerido, con la presión adecuada y en el momento más oportuno. Esta capacidad de integrar información, procesarla y transformarla en decisiones automáticas constituye una de las mayores fortalezas de la ingeniería moderna y representa uno de los ejes conceptuales que sustentan el presente libro.

El desarrollo de soluciones con estas características exige, además, una formación profesional que responda a las nuevas demandas de la transformación digital. La ingeniería contemporánea requiere especialistas capaces de interpretar simultáneamente fenómenos físicos, diseñar algoritmos de control, comprender la arquitectura de sistemas electrónicos, analizar variables ambientales y evaluar el comportamiento dinámico de procesos complejos. En consecuencia, la preparación de los futuros ingenieros ya no puede limitarse al dominio aislado de una disciplina, sino que debe promover una visión integradora donde la hidráulica, la automatización, la electrónica, la informática y la gestión ambiental converjan para resolver problemas cada vez más complejos.

Esta realidad explica el creciente protagonismo que han adquirido las tecnologías digitales dentro de la gestión de los recursos hídricos. La incorporación de sensores inteligentes, redes industriales de comunicación, sistemas de adquisición de datos, plataformas de supervisión, Internet de las Cosas, computación en la nube e inteligencia artificial está modificando profundamente la manera en que se planifican, operan y mantienen las infraestructuras hidráulicas. Hoy es posible supervisar continuamente el comportamiento de una instalación, detectar anomalías antes de que se produzcan fallas críticas, optimizar automáticamente los ciclos de operación y generar información útil para mejorar permanentemente la eficiencia del sistema. Estas capacidades amplían considerablemente el horizonte de la automatización y consolidan un nuevo paradigma de gestión basado en el monitoreo continuo, el análisis de datos y la toma de decisiones fundamentada en evidencia.

Aunque esta obra centra su atención en un sistema automatizado de riego por aspersión, los principios desarrollados poseen un alcance mucho más amplio. Los criterios de diseño, la metodología empleada para integrar componentes hidráulicos y electrónicos, las estrategias de programación implementadas y los procedimientos de evaluación descritos pueden adaptarse a una gran diversidad de aplicaciones relacionadas con el abastecimiento de agua, el control de procesos industriales, la

automatización de instalaciones hidráulicas y la administración inteligente de infraestructuras. Esta característica incrementa significativamente el valor formativo del texto y amplía su utilidad para profesionales e investigadores interesados en diferentes campos de la ingeniería.

Asimismo, el libro pone de manifiesto la importancia de la investigación aplicada como mecanismo para vincular la universidad con las necesidades de la sociedad. Los problemas relacionados con la disponibilidad y el aprovechamiento eficiente del agua demandan respuestas sustentadas en evidencia científica y validadas mediante experiencias reales. En este sentido, el proyecto desarrollado demuestra cómo un entorno universitario puede convertirse en un laboratorio de innovación tecnológica donde los conocimientos adquiridos durante la formación profesional se transforman en soluciones concretas capaces de mejorar la eficiencia operativa, reducir el consumo de recursos y fortalecer la sostenibilidad institucional.

La experiencia presentada en esta obra pone de relieve que la innovación tecnológica no depende exclusivamente de la incorporación de equipos de última generación, sino de la capacidad para diseñar soluciones donde cada componente desempeñe una función claramente definida dentro de una arquitectura coherente y eficiente. La selección de sensores, electroválvulas, electrobombas, tuberías, aspersores, dispositivos de protección eléctrica y sistemas de control responde a un proceso de análisis técnico orientado a garantizar la confiabilidad, la estabilidad operativa y el uso racional del recurso hídrico. De esta manera, el lector comprenderá que el éxito de un sistema automatizado no radica en la complejidad de sus elementos individuales, sino en la adecuada integración de todos ellos para alcanzar un objetivo común.

A lo largo del libro también se evidencia que la automatización constituye un proceso de mejora continua. La implementación de un sistema de control no representa el punto final del proyecto, sino el inicio de una etapa permanente de evaluación, ajuste y optimización. La información obtenida mediante los

dispositivos de monitoreo permite identificar oportunidades para perfeccionar la programación de los ciclos de riego, mejorar la eficiencia energética, reducir tiempos de operación, anticipar necesidades de mantenimiento y adaptar el funcionamiento del sistema a las variaciones propias de las condiciones ambientales. Esta capacidad de aprendizaje continuo constituye uno de los rasgos distintivos de las infraestructuras inteligentes y una de las principales ventajas que ofrecen las tecnologías de automatización aplicadas a la gestión de los recursos hídricos.

El lector encontrará, además, un tratamiento equilibrado entre los fundamentos teóricos y su aplicación práctica. Cada concepto desarrollado responde a la necesidad de comprender los principios científicos que sustentan el funcionamiento del sistema, pero también de explicar cómo esos conocimientos pueden materializarse en decisiones concretas de ingeniería. Esta articulación entre teoría y práctica favorece una comprensión más profunda de los procesos analizados y proporciona herramientas útiles para enfrentar proyectos similares en diferentes contextos profesionales o académicos.

Con ese propósito, la obra desarrolla progresivamente los contenidos que conforman el diseño integral del sistema automatizado. Inicialmente, se examina la importancia del agua como recurso estratégico y se presentan los principios que orientan la gestión integrada de los recursos hídricos y el uso eficiente del riego. Posteriormente, se estudian los fundamentos hidráulicos que sustentan el diseño de sistemas por aspersión, abordando los criterios necesarios para la selección y dimensionamiento de sus principales componentes. Sobre esta base, se incorporan los conceptos esenciales de la automatización industrial, la instrumentación electrónica y los Controladores Lógicos Programables, explicando la función que desempeña cada elemento dentro del sistema de control. Finalmente, se describe el proceso de diseño, implementación y validación del sistema desarrollado, integrando los conocimientos expuestos previamente en una experiencia de ingeniería aplicada.

Esta secuencia no responde únicamente a un criterio didáctico. Refleja el propio proceso seguido durante el desarrollo de la investigación, donde cada etapa proporcionó los fundamentos necesarios para avanzar hacia la siguiente. Antes de automatizar un sistema es indispensable comprender su comportamiento hidráulico; antes de programar un controlador resulta imprescindible conocer el funcionamiento de los dispositivos que este administrará; y antes de evaluar el desempeño global de la instalación es necesario garantizar que cada uno de sus componentes opere de manera coordinada. Esta lógica metodológica acompaña al lector durante toda la obra y facilita la comprensión de las relaciones existentes entre los diferentes elementos que conforman el sistema.

Otro de los aportes relevantes del libro consiste en destacar la importancia del diseño ingenieril como un proceso sustentado en el análisis y la toma de decisiones. En cada proyecto tecnológico existen múltiples alternativas para resolver un mismo problema; sin embargo, seleccionar la solución más adecuada requiere evaluar criterios técnicos, económicos, operativos y ambientales de manera simultánea. Los autores muestran que la ingeniería no se limita a aplicar procedimientos estandarizados, sino que implica analizar información, comparar opciones, anticipar escenarios de funcionamiento y justificar cada decisión mediante fundamentos científicos. Esta forma de abordar el diseño fortalece el pensamiento crítico y contribuye a la formación de profesionales capaces de desarrollar soluciones innovadoras con elevados niveles de responsabilidad técnica.

En un contexto donde la sostenibilidad ocupa un lugar prioritario dentro de las agendas nacionales e internacionales, la optimización del uso del agua adquiere una relevancia que trasciende el ámbito de la ingeniería. Cada avance orientado a reducir pérdidas, incrementar la eficiencia de los sistemas de distribución y aprovechar de manera racional los recursos naturales representa una contribución al desarrollo sostenible. Desde esta perspectiva, la automatización de los sistemas de riego no debe entenderse únicamente como una estrategia para modernizar infraestructuras, sino como una herramienta que

favorece una gestión más responsable del agua, disminuye el consumo energético y fortalece la resiliencia de las instituciones frente a los desafíos ambientales contemporáneos.

Por ello, esta obra aspira a convertirse no solo en una fuente de consulta técnica, sino también en un estímulo para la investigación, la innovación y el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas orientadas a mejorar la gestión del recurso hídrico. Los conocimientos aquí reunidos buscan proporcionar al lector una base científica sólida sobre la cual pueda construir proyectos propios, adaptar metodologías a diferentes realidades y continuar ampliando las fronteras del conocimiento en un campo cuya importancia continuará creciendo durante las próximas décadas.

La rápida evolución de la ingeniería obliga también a comprender que las soluciones desarrolladas en la actualidad constituyen el punto de partida para nuevas generaciones de tecnologías. Los sistemas automatizados de riego incorporan hoy sensores inteligentes, Controladores Lógicos Programables y plataformas de supervisión; sin embargo, en un futuro próximo estos mismos sistemas integrarán con mayor intensidad algoritmos de inteligencia artificial, modelos predictivos, gemelos digitales, análisis masivo de datos y redes de comunicación cada vez más sofisticadas. La capacidad para interpretar información en tiempo real, anticipar condiciones de operación y optimizar automáticamente el funcionamiento de las instalaciones transformará profundamente la manera en que se administran los recursos hídricos. En consecuencia, formar profesionales capaces de comprender los fundamentos de estas tecnologías constituye una inversión estratégica para afrontar los desafíos que plantea la transformación digital de la ingeniería.

Esta perspectiva confiere especial relevancia a la formación basada en proyectos reales de investigación aplicada. La resolución de problemas complejos exige desarrollar competencias que trascienden la adquisición de conocimientos teóricos, incorporando habilidades relacionadas con el análisis crítico, el diseño de soluciones, la experimentación, la validación

de resultados y la mejora continua. Precisamente por ello, el proyecto presentado en esta obra adquiere un valor que supera el ámbito institucional donde fue desarrollado. La experiencia demuestra que las universidades pueden desempeñar un papel decisivo en la generación de tecnologías orientadas a responder a necesidades concretas de la sociedad, fortaleciendo simultáneamente la investigación, la innovación y la formación de profesionales comprometidos con el desarrollo sostenible.

Otro de los aportes fundamentales del libro reside en su capacidad para integrar conocimientos que habitualmente se estudian de manera independiente. Los fenómenos hidráulicos, los sistemas eléctricos, la electrónica industrial, la instrumentación, la programación de Controladores Lógicos Programables y el diseño de sistemas de control convergen aquí como partes de una misma solución tecnológica. Esta integración favorece una comprensión más amplia del proceso de diseño ingenieril y permite al lector identificar las relaciones funcionales que existen entre disciplinas aparentemente diferentes, pero profundamente complementarias cuando el propósito consiste en desarrollar sistemas automatizados eficientes y confiables.

Desde esta perspectiva, la automatización deja de ser concebida exclusivamente como una herramienta destinada a incrementar la productividad o reducir la intervención humana. Su verdadero alcance radica en la posibilidad de transformar la información en decisiones, optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles y garantizar que cada proceso opere bajo criterios de eficiencia, precisión y sostenibilidad. En el caso específico de los sistemas de riego, esta capacidad adquiere una importancia extraordinaria, ya que cada decisión de control influye directamente sobre el consumo de agua, el gasto energético, la vida útil de los equipos y el desempeño global de la infraestructura hidráulica.

Las páginas que conforman esta obra han sido concebidas con el propósito de acompañar al lector en ese proceso de comprensión integral. Más que presentar una sucesión de conceptos técnicos, el libro propone un recorrido progresivo

que permite interpretar la lógica que sustenta el diseño de un sistema automatizado de riego, desde los principios generales de la gestión del recurso hídrico hasta la implementación práctica de un sistema de control basado en tecnologías industriales. De esta manera, el lector no solo adquiere conocimientos específicos sobre cada componente, sino que desarrolla una visión sistémica indispensable para abordar proyectos de ingeniería con un enfoque interdisciplinario.

La organización del contenido responde a una secuencia metodológica cuidadosamente estructurada. Los capítulos iniciales presentan los fundamentos relacionados con la importancia del agua, la gestión integrada de los recursos hídricos y los sistemas de riego, proporcionando el contexto necesario para comprender la trascendencia de una administración eficiente del recurso. Posteriormente, se desarrollan los principios hidráulicos que sustentan el diseño de instalaciones por aspersión, así como los conceptos esenciales de la automatización industrial, la instrumentación electrónica y la programación de Controladores Lógicos Programables. Finalmente, estos conocimientos convergen en el diseño, implementación y evaluación de un sistema automatizado desarrollado en un entorno universitario, permitiendo apreciar cómo la teoría se materializa en una solución tecnológica funcional y técnicamente fundamentada.

Esta estructura facilita que el libro pueda ser utilizado con distintos propósitos. Para el estudiante, constituye una guía que articula los fundamentos científicos con su aplicación práctica. Para el docente, ofrece un recurso que favorece la enseñanza integrada de la hidráulica, la automatización y los sistemas de control. Para el investigador, proporciona una experiencia susceptible de ser ampliada, adaptada o replicada en nuevos escenarios. Para el profesional de la ingeniería, representa una referencia metodológica útil para el desarrollo de proyectos relacionados con la automatización de infraestructuras hidráulicas y la optimización del uso del agua.

Finalmente, conviene recordar que los grandes desafíos de la ingeniería contemporánea no podrán resolverse únicamente mediante avances tecnológicos. Será igualmente indispensable contar con profesionales capaces de comprender la complejidad de los problemas, integrar conocimientos provenientes de múltiples disciplinas y asumir la responsabilidad ética que implica administrar recursos esenciales para la vida. El agua constituye uno de esos recursos, y su gestión eficiente representa uno de los mayores compromisos de nuestra generación.

Con ese espíritu ha sido concebida esta obra. Los autores aspiran a que las páginas que siguen contribuyan a fortalecer la formación académica, estimular nuevas investigaciones y promover el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a una utilización cada vez más eficiente, inteligente y sostenible del agua. Si este libro logra inspirar nuevas iniciativas de innovación, fomentar el pensamiento crítico y demostrar que la ingeniería puede convertirse en una herramienta para mejorar la calidad de vida y proteger los recursos naturales, habrá cumplido plenamente el propósito que motivó su elaboración.



01.

Fundamentos científicos, hidráulicos y tecnológicos del riego automatizado

1.1. Gestión sostenible del agua y eficiencia hídrica

El agua constituye uno de los recursos naturales más importantes para el desarrollo de la humanidad. Desde las primeras civilizaciones, su disponibilidad ha condicionado el establecimiento de los asentamientos humanos, el desarrollo de la agricultura, el crecimiento de las ciudades y la expansión de las actividades económicas. En la actualidad, su importancia trasciende el abastecimiento para consumo humano, ya que interviene directamente en la producción de alimentos, la generación de energía, los procesos industriales, la conservación de los ecosistemas y la protección de la salud pública. Esta diversidad de funciones ha consolidado al agua como un recurso estratégico para el



desarrollo sostenible, cuya gestión constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI.

Aunque el agua cubre aproximadamente el 71 % de la superficie terrestre, únicamente una pequeña proporción corresponde a agua dulce disponible para satisfacer las necesidades humanas. La mayor parte del recurso hídrico del planeta permanece almacenada en océanos, glaciares y acuíferos profundos, lo que restringe la cantidad de agua accesible para el abastecimiento de la población y el desarrollo de las actividades productivas. En consecuencia, el principal problema no radica en la existencia del recurso, sino en la disponibilidad efectiva de agua de calidad, su distribución espacial y la capacidad para administrarla de forma sostenible (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2023).

La creciente demanda de agua representa uno de los mayores retos para la sostenibilidad mundial. El crecimiento demográfico, la expansión urbana, el desarrollo industrial y la intensificación de la producción agrícola han incrementado de manera significativa la presión sobre los recursos hídricos. Entre todos los sectores económicos, la agricultura continúa siendo el principal consumidor de agua dulce, al utilizar aproximadamente el 70 % de las extracciones mundiales. Esta realidad pone de manifiesto la necesidad de implementar estrategias que incrementen la eficiencia en el uso del recurso, al tiempo que garanticen la seguridad alimentaria y la conservación de los ecosistemas (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021ab).

La relevancia estratégica del agua no se limita a su contribución al desarrollo económico. Los ecosistemas acuáticos desempeñan funciones esenciales para el equilibrio ambiental, entre ellas la regulación del ciclo hidrológico, la recarga de acuíferos, la conservación de la biodiversidad y la regulación del clima. Cuando estos ecosistemas se degradan como consecuencia

de la contaminación, la sobreexplotación o las transformaciones en el uso del suelo, también disminuye su capacidad para suministrar agua en cantidad y calidad suficientes a las generaciones presentes y futuras. Por esta razón, la protección del recurso hídrico constituye un componente indispensable de las políticas orientadas al desarrollo sostenible.

La importancia del agua ha sido reconocida por la comunidad internacional mediante su incorporación en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. En este marco, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 plantea garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todas las personas, mediante acciones dirigidas a mejorar la calidad del recurso, incrementar la eficiencia en su utilización, proteger los ecosistemas relacionados con el agua y fortalecer la cooperación entre los distintos actores involucrados (Organización de las Naciones Unidas, 2015). El cumplimiento de este objetivo resulta indispensable para avanzar en metas vinculadas con la reducción de la pobreza, la seguridad alimentaria, la salud, la educación y el desarrollo económico.

A estos desafíos se añaden los efectos del cambio climático, que han modificado los patrones de precipitación, incrementado la frecuencia e intensidad de los eventos extremos y alterado la disponibilidad de agua en numerosas regiones del mundo. Las sequías prolongadas, las inundaciones y el acelerado retroceso de los glaciares comprometen la capacidad de los sistemas hídricos para satisfacer las demandas de la población y de los sectores productivos. Estas condiciones incrementan la incertidumbre respecto a la disponibilidad futura del recurso y refuerzan la necesidad de adoptar estrategias que promuevan un uso más eficiente y resiliente del agua (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

En este contexto, el concepto de seguridad hídrica ha adquirido una importancia creciente. Este enfoque



busca garantizar el acceso sostenible a cantidades suficientes de agua de calidad adecuada para satisfacer las necesidades humanas, preservar los ecosistemas y reducir los riesgos asociados a fenómenos hidrológicos extremos. Alcanzar este propósito exige la articulación de políticas públicas, la planificación territorial, el fortalecimiento institucional y la incorporación de innovaciones tecnológicas que favorezcan un aprovechamiento responsable del recurso en todos los sectores de la sociedad.

El agua debe entenderse como un recurso estratégico cuya gestión condiciona el desarrollo económico, el bienestar social y la sostenibilidad ambiental. Su disponibilidad limitada, el incremento continuo de la demanda y los efectos del cambio climático hacen necesario superar los enfoques tradicionales de administración del recurso y avanzar hacia modelos sustentados en los principios de eficiencia, equidad y conservación. Desde esta perspectiva, surge la necesidad de adoptar esquemas de gestión capaces de coordinar el aprovechamiento del agua considerando de manera integrada sus dimensiones ambiental, económica y social. Este planteamiento constituye el fundamento de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, enfoque que se desarrolla en el siguiente apartado (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. El agua como recurso estratégico para el desarrollo sostenible.

Dimensión	Contribución del recurso hídrico
Social	Abastecimiento de agua potable, salud pública y bienestar.
Económica	Agricultura, industria, energía y desarrollo productivo.
Ambiental	Conservación de ecosistemas, biodiversidad y regulación climática.
Estratégica	Seguridad hídrica, resiliencia y sostenibilidad del desarrollo.

Fuente:Elaboración propia con base en el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2023); Organización de las Naciones Unidas (2015); Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2021); y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2023).

- **Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)**

El reconocimiento del agua como un recurso estratégico para el desarrollo sostenible ha impulsado la adopción de nuevos enfoques orientados a mejorar su administración. Durante gran parte del siglo XX, la gestión del agua se centró principalmente en incrementar la oferta mediante la construcción de infraestructura hidráulica, como presas, reservorios, canales y sistemas de trasvase. Aunque estas obras permitieron ampliar la disponibilidad del recurso para diversos sectores productivos, con el paso del tiempo se comprobó que el aumento de la infraestructura, por sí solo, no garantizaba una gestión sostenible. La creciente competencia entre los distintos usuarios, la degradación de los ecosistemas y la necesidad de armonizar intereses sociales, económicos y ambientales evidenciaron las limitaciones de este modelo y condujeron a la búsqueda de un enfoque más integral.

Como resultado de esta evolución surgió la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, conocida internacionalmente como Integrated Water Resources Management. La Global Water Partnership (2000) la define como un proceso que promueve el desarrollo y la gestión coordinada del agua, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el propósito de maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas. Esta definición continúa siendo la referencia conceptual más aceptada y ha servido de base para las políticas hídricas impulsadas por organismos internacionales como las Naciones Unidas, la Organización de las



Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

La principal característica de este enfoque consiste en considerar que el agua no puede gestionarse de manera aislada ni desde una perspectiva exclusivamente sectorial. Su aprovechamiento involucra de forma simultánea dimensiones hidrológicas, ambientales, económicas, sociales e institucionales, por lo que las decisiones deben adoptarse teniendo en cuenta la interacción entre todos estos componentes. Desde esta perspectiva, el agua deja de concebirse únicamente como un insumo para la producción o el consumo humano y pasa a formar parte de un sistema complejo en el que intervienen múltiples actores con intereses y responsabilidades compartidas.

Uno de los principios fundamentales de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos es la gestión por cuencas hidrográficas. La cuenca constituye la unidad natural donde se desarrollan los procesos hidrológicos y convergen las actividades humanas que influyen sobre la cantidad y la calidad del agua. Administrar el recurso bajo este enfoque permite comprender las relaciones entre las zonas altas y bajas de una cuenca, evaluar los efectos de las actividades económicas sobre los ecosistemas y planificar acciones orientadas al aprovechamiento sostenible del recurso en todo el territorio.

Otro principio esencial es la participación de los actores involucrados. Este enfoque reconoce que la gestión del agua no puede depender exclusivamente de las instituciones gubernamentales, sino que requiere la participación activa de agricultores, empresas, comunidades, organizaciones de la sociedad civil, universidades y entidades públicas. La incorporación de estos actores fortalece la gobernanza del agua, facilita la resolución de conflictos y favorece la adopción de decisiones acordes con las necesidades de los distintos usuarios.

La planificación basada en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos también busca equilibrar el desarrollo económico con la conservación ambiental. En lugar de concentrarse únicamente en incrementar la oferta de agua, este enfoque procura optimizar su aprovechamiento mediante la protección de los ecosistemas acuáticos, la conservación de las fuentes de abastecimiento y la atención de las necesidades actuales sin comprometer la disponibilidad del recurso para las generaciones futuras. De este modo, la sostenibilidad ambiental deja de entenderse como un objetivo independiente y pasa a integrarse en todos los procesos de planificación hídrica.

La relevancia de este enfoque ha sido reconocida por la comunidad internacional mediante su incorporación en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. La meta 6.5 del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 promueve la implementación de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en todos los niveles, considerando la cooperación entre instituciones y la gestión coordinada de los recursos hídricos compartidos (Organización de las Naciones Unidas, 2015). Este reconocimiento refleja el consenso internacional sobre la necesidad de fortalecer modelos de gobernanza capaces de responder a los desafíos relacionados con la disponibilidad y el aprovechamiento del agua.

La literatura científica respalda ampliamente la importancia de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos como estrategia para mejorar la sostenibilidad del recurso. Grigg (2024) señala que este enfoque favorece una mayor coordinación institucional, fortalece la planificación territorial y facilita la incorporación del conocimiento científico en la toma de decisiones. Asimismo, destaca que su evolución reciente incorpora progresivamente herramientas digitales que mejoran el monitoreo de los recursos hídricos y aumentan la capacidad de respuesta frente a escenarios de creciente incertidumbre.

Pese a sus ventajas, la implementación de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos enfrenta importantes desafíos. Saravanan et al. (2009); y Tyagi (2024) sostienen que la gestión integrada no debe interpretarse como un modelo único aplicable a todos los países, debido a que las condiciones ambientales, sociales e institucionales difieren considerablemente entre regiones. La efectividad de este enfoque depende, por tanto, de la capacidad de cada país para adaptar sus principios a las características de sus cuencas hidrográficas, su marco normativo y su estructura institucional.

En la actualidad, la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos constituye el paradigma de referencia para orientar la administración sostenible del agua. Su principal aporte consiste en integrar la planificación territorial, la gobernanza, la participación social y la conservación ambiental dentro de un mismo proceso de gestión. Al mismo tiempo, su aplicación exige mecanismos que permitan evaluar objetivamente los resultados obtenidos y determinar si las políticas implementadas contribuyen realmente a mejorar el aprovechamiento del recurso. Con este propósito, la comunidad internacional ha desarrollado diversos indicadores destinados a medir la eficiencia en el uso del agua (Figura 1.1).



Figura 1.1. Principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH).

Fuente: Elaboración propia a partir de Global Water Partnership (2000); Grigg (2024); Organización de las Naciones Unidas (2015); Saravanan et al. (2009).

• **Indicadores internacionales de eficiencia hídrica**

La implementación de políticas orientadas a la gestión sostenible del agua requiere mecanismos que permitan evaluar objetivamente sus resultados. La existencia de planes, programas o estrategias de gestión, por sí sola, no garantiza un uso eficiente del recurso hídrico; por ello, es indispensable disponer de indicadores capaces de medir el desempeño alcanzado, identificar oportunidades de mejora y verificar el cumplimiento de las metas establecidas. En este contexto, los indicadores internacionales de eficiencia hídrica representan herramientas esenciales para apoyar la planificación, el seguimiento y la evaluación de la gestión del agua.

Un indicador puede definirse como una medida cuantitativa o cualitativa que proporciona información sobre el comportamiento de un fenómeno durante un período determinado. En el ámbito de la gestión hídrica, estos instrumentos permiten conocer el grado de aprovechamiento del recurso, evaluar el impacto de las políticas implementadas y establecer comparaciones entre regiones o países. Su utilización fortalece la toma de decisiones basada en evidencia, al orientar las inversiones y las acciones de mejora hacia los ámbitos que presentan mayores niveles de vulnerabilidad.

Con la adopción de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, las Naciones Unidas establecieron un sistema internacional de indicadores destinado a evaluar el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6. Dentro de este marco destacan dos indicadores estrechamente vinculados con la eficiencia en el uso del agua: el Indicador 6.4.1, denominado Cambio en la eficiencia del uso del agua a lo largo del tiempo, y el Indicador 6.4.2, correspondiente al

Nivel de estrés hídrico. Ambos constituyen el principal referente internacional para valorar el desempeño de los países en materia de aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos (United Nations, 2024).

El Indicador 6.4.1 evalúa la productividad del agua desde una perspectiva económica. Su finalidad es determinar la capacidad de un país para generar valor agregado utilizando una determinada cantidad de agua. Para ello, relaciona el valor económico producido por los sectores agrícola, industrial y de servicios con el volumen total de agua utilizado. Un incremento de este indicador refleja una mejora en la eficiencia del uso del recurso, al evidenciar que es posible mantener o incrementar la producción sin aumentar proporcionalmente el consumo de agua. La metodología oficial para su cálculo ha sido desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, organismo custodio de este indicador dentro del sistema de seguimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021a).

El Indicador 6.4.2 mide el nivel de presión que ejercen las actividades humanas sobre los recursos hídricos renovables. Expresa la relación entre el volumen anual de agua extraída y la disponibilidad de recursos hídricos renovables en un territorio determinado. Valores elevados indican una mayor presión sobre las fuentes de abastecimiento y, por tanto, una mayor vulnerabilidad frente a escenarios de escasez. Su análisis facilita la identificación de cuencas o regiones donde resulta prioritario fortalecer las medidas de conservación, mejorar la eficiencia en el uso del agua o incorporar tecnologías que reduzcan el consumo del recurso.

Aunque estos indicadores constituyen el estándar internacional para evaluar el desempeño hídrico de los países, diversos investigadores coinciden en que la eficiencia del agua no puede analizarse

exclusivamente desde una perspectiva económica o hidrológica. Pires et al. (2017), al evaluar diferentes metodologías aplicadas a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, concluyen que una valoración integral debe incorporar indicadores relacionados con la calidad del agua, la protección de los ecosistemas, la gobernanza, la participación de los usuarios y la capacidad institucional. Desde esta perspectiva, la eficiencia hídrica debe entenderse como un concepto multidimensional que integra variables ambientales, sociales, económicas y de gestión.

En el ámbito agrícola, donde se concentra el mayor consumo de agua dulce a escala mundial, uno de los indicadores más utilizados es la productividad del agua. Este indicador relaciona la cantidad de producción obtenida con el volumen de agua empleado durante el proceso productivo. Su aplicación facilita la comparación entre distintos métodos de riego, la evaluación de tecnologías para el manejo del agua y la cuantificación de los beneficios derivados de la modernización de los sistemas hidráulicos. Por ello, la productividad del agua se ha consolidado como uno de los principales parámetros para evaluar proyectos orientados a incrementar la eficiencia hídrica en la agricultura (Zhai et al., 2020).

La aplicación sistemática de estos indicadores aporta múltiples beneficios para la gestión del recurso hídrico. Además de facilitar el seguimiento del desempeño institucional, contribuye al establecimiento de metas de mejora, favorece la comparación de resultados entre diferentes territorios y proporciona fundamentos técnicos para la asignación de recursos e inversiones. También suministra información objetiva para valorar el impacto de nuevas tecnologías y determinar su contribución a la optimización del uso del agua.

Los indicadores internacionales de eficiencia hídrica constituyen instrumentos esenciales para evaluar la sostenibilidad de la gestión del agua y orientar el



perfeccionamiento continuo de las políticas públicas. Su aplicación permite medir objetivamente el desempeño alcanzado e identificar oportunidades para incrementar la productividad del recurso. En países como el Perú, donde la disponibilidad de agua presenta marcados contrastes territoriales, estos indicadores proporcionan una base técnica sólida para fortalecer la planificación y respaldar la toma de decisiones (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Principales indicadores internacionales de eficiencia hídrica.

Indicador	Organismo responsable	Finalidad
ODS 6.4.1 Cambio en la eficiencia del uso del agua	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura	Evaluar el valor económico generado por unidad de agua utilizada.
ODS 6.4.2 Nivel de estrés hídrico	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura / Organización de las Naciones Unidas	Medir la presión ejercida sobre los recursos hídricos renovables.
Productividad del agua agrícola	FAO	Determinar la producción obtenida por unidad de agua consumida.
Indicadores de gestión integrada de los recursos hídricos	Organización de las Naciones Unidas	Evaluar el grado de implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Fuente: Elaboración propia a partir de Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021ab); Pires et al. (2017); United Nations (2024).

• **Gestión eficiente del agua en el Perú**

La gestión eficiente del agua representa uno de los principales desafíos para el desarrollo sostenible del Perú. Aunque el país dispone de una importante riqueza hídrica en comparación con otras naciones de América Latina, la distribución del recurso presenta profundas desigualdades territoriales que condicionan

su disponibilidad para la población y los diferentes sectores productivos. Por ello, la problemática del agua en el país no depende únicamente de la cantidad disponible, sino también de la forma en que el recurso es administrado, distribuido y aprovechado.

Uno de los rasgos más característicos de la realidad hídrica peruana es la marcada concentración espacial de los recursos de agua superficial. La vertiente del Atlántico reúne aproximadamente el 97 % de la disponibilidad hídrica nacional, mientras que la vertiente del Pacífico, donde se concentra cerca de dos tercios de la población y gran parte de la actividad económica, dispone de una fracción significativamente menor. Esta distribución desigual mantiene una presión constante sobre los recursos hídricos de la costa, especialmente en las regiones con mayor desarrollo agrícola, industrial y urbano, donde la demanda de agua supera con frecuencia la disponibilidad natural del recurso (Perú. Autoridad Nacional del Agua, 2015).

A esta realidad se añaden los efectos de la variabilidad climática y del cambio climático. La disminución progresiva de los glaciares andinos, las modificaciones en los patrones de precipitación y la mayor frecuencia de eventos extremos, como sequías e inundaciones, afectan la regulación natural de las cuencas hidrográficas y generan incertidumbre sobre la disponibilidad futura del agua. Estas condiciones refuerzan la importancia de fortalecer la planificación hídrica e incorporar estrategias orientadas a mejorar la eficiencia y la resiliencia en el uso del recurso.

Durante los últimos años, el Perú ha fortalecido un marco institucional orientado hacia la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. La Ley N.º 29338 (Congreso de la República del Perú, 2009), Ley de Recursos Hídricos, estableció el Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos, reconoció la cuenca hidrográfica como la unidad básica de planificación y asignó a la Autoridad Nacional del Agua la responsabilidad de





conducir la gestión del recurso a escala nacional. A ello se suman la Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos y el Plan Nacional de Recursos Hídricos, que constituyen los principales instrumentos para orientar el aprovechamiento sostenible del agua y fortalecer la coordinación entre las instituciones responsables de su gestión.

Pese a estos avances, diversos organismos internacionales coinciden en que persisten importantes desafíos para alcanzar una gestión eficiente del agua. El estudio *Water Governance in Peru*, elaborado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, identifica como principales limitaciones la fragmentación institucional, las diferencias de capacidades entre los distintos niveles de gobierno, la necesidad de fortalecer la coordinación multisectorial y la insuficiente utilización de instrumentos económicos y tecnológicos para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico. El informe también señala que el fortalecimiento de la gobernanza es un requisito indispensable para mejorar la seguridad hídrica y avanzar hacia el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.

El sector agrícola representa el mayor consumidor de agua del país y concentra gran parte de los esfuerzos dirigidos a incrementar la eficiencia hídrica. Aunque durante las últimas décadas se ha ampliado la superficie equipada con sistemas de riego tecnificado, una proporción considerable de las áreas agrícolas continúa utilizando métodos tradicionales de riego por gravedad, caracterizados por pérdidas importantes ocasionadas por infiltración profunda, escorrentía superficial y evaporación. Estas condiciones reducen la productividad del agua y limitan la capacidad de respuesta frente a escenarios de creciente escasez, especialmente en las regiones costeras.

La necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua también se extiende a otros ámbitos, como las

áreas verdes urbanas, los parques, las instituciones educativas y los espacios públicos. En muchos de estos lugares, el riego continúa realizándose mediante procedimientos manuales o programaciones fijas que no consideran variables ambientales, como la humedad del suelo, la temperatura o las precipitaciones. Como resultado, son frecuentes las aplicaciones excesivas o insuficientes de agua, lo que incrementa el consumo del recurso y eleva los costos de operación y mantenimiento.

La modernización de la gestión hídrica exige avanzar hacia modelos sustentados en información, monitoreo y control. Disponer de datos confiables sobre el comportamiento de los sistemas de riego, el estado del suelo y las condiciones climáticas resulta indispensable para optimizar la toma de decisiones y mejorar la productividad del agua. La incorporación de tecnologías digitales ofrece, por tanto, una oportunidad para complementar las políticas públicas existentes y fortalecer las capacidades de gestión de los diferentes sectores usuarios del recurso.

Las universidades desempeñan un papel fundamental en este proceso mediante el desarrollo de investigaciones aplicadas dirigidas a resolver problemas específicos del contexto nacional. La validación de tecnologías para el uso eficiente del agua favorece la generación de soluciones adaptadas a las condiciones climáticas, económicas y operativas del país, además de facilitar la transferencia de conocimiento hacia instituciones públicas y privadas. Este enfoque adquiere especial relevancia en proyectos destinados a optimizar el riego de áreas verdes, donde la incorporación de sistemas de control automatizado puede reducir de forma significativa el consumo de agua.

La gestión eficiente del agua en el Perú demanda la integración de la planificación, el fortalecimiento institucional, la innovación tecnológica y el desarrollo de capacidades. Aunque el país dispone de un marco



normativo y de planificación alineado con los principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, aún es necesario incorporar soluciones tecnológicas que incrementen la eficiencia operativa de los sistemas de distribución y riego. En este contexto, la automatización y la digitalización emergen como herramientas con un elevado potencial para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico (Tabla 1.3).

Tabla 1.3. Principales desafíos para la gestión eficiente del agua en el Perú.

Desafío	Situación actual	Orientación para la mejora
Distribución desigual del recurso	Alta disponibilidad en la Amazonía y limitada oferta en la costa	Planificación por cuencas y gestión integrada
Variabilidad climática	Mayor incertidumbre en la disponibilidad de agua	Gestión adaptativa y fortalecimiento del monitoreo
Eficiencia del riego	Predominio de métodos tradicionales en diversos sectores	Tecnificación de los sistemas de riego
Gobernanza	Necesidad de mayor articulación interinstitucional	Fortalecimiento del SN-GRH y de los Consejos de Cuenca
Innovación	Limitada incorporación de tecnologías de monitoreo y control	Digitalización y automatización de la gestión hídrica

Fuente: Elaboración propia a partir de Organisation for Economic Co-operation and Development (2021); y Perú. Autoridad Nacional del Agua (2009, 2015).

La evolución de las tecnologías digitales ha transformado profundamente la forma en que se administran los recursos naturales. En el ámbito de la gestión del agua, la incorporación de sistemas de automatización y herramientas digitales ha sustituido progresivamente los métodos tradicionales de operación por sistemas inteligentes capaces de supervisar, analizar y controlar los procesos en tiempo real. Esta transformación representa uno de los avances tecnológicos más

importantes de las últimas décadas, al favorecer la optimización del uso del recurso hídrico mediante decisiones sustentadas en información objetiva y actualizada.

Tradicionalmente, los sistemas de riego operaban mediante procedimientos manuales o programaciones preestablecidas que rara vez consideraban las condiciones reales del suelo, la vegetación o las variables climáticas. Como resultado, era frecuente la aplicación excesiva o insuficiente de agua, lo que generaba pérdidas por evaporación, escorrentía superficial e infiltración profunda. Además de incrementar el consumo del recurso, estas prácticas reducían la eficiencia operativa de los sistemas de riego y elevaban los costos de mantenimiento. La automatización surge como respuesta a estas limitaciones, al ofrecer un control preciso y adaptable del suministro de agua.

Desde el punto de vista tecnológico, la automatización consiste en la utilización de dispositivos electrónicos y sistemas de control capaces de ejecutar operaciones de forma autónoma a partir de la información obtenida mediante sensores o equipos de medición. En los sistemas de riego, esta tecnología regula el funcionamiento de bombas, electroválvulas y otros componentes hidráulicos considerando variables como la humedad del suelo, la temperatura ambiente, la radiación solar y las precipitaciones. De este modo, el suministro de agua responde a las necesidades reales del sistema y no únicamente a horarios previamente establecidos.

La automatización moderna mantiene una estrecha relación con el proceso de digitalización, entendido como la incorporación de tecnologías capaces de transformar los datos procedentes del entorno físico en información útil para la toma de decisiones. Sensores, equipos de adquisición de datos, redes de comunicación y plataformas digitales registran





de forma continua el comportamiento del sistema de riego y generan información que facilita la supervisión de su funcionamiento. Esta capacidad de monitoreo permanente representa uno de los principales aportes de la transformación digital aplicada a la gestión del agua.

En este proceso, el Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT) ha cobrado una relevancia creciente. Esta tecnología interconecta sensores, actuadores y dispositivos electrónicos mediante redes de comunicación, favoreciendo el intercambio continuo de información entre los distintos componentes del sistema. En un sistema de riego inteligente, por ejemplo, los sensores transmiten datos sobre la humedad del suelo a un controlador que analiza la información y ejecuta automáticamente las acciones necesarias para mantener condiciones óptimas de riego. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos señala que la digitalización del sector hídrico favorece una gestión basada en datos, incrementa la eficiencia operativa y mejora la capacidad de respuesta frente a escenarios de creciente incertidumbre (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022).

Otro componente fundamental corresponde a los Controladores Lógicos Programables (PLC), ampliamente utilizados en la automatización industrial por su confiabilidad, robustez y facilidad de programación. Estos dispositivos reciben información procedente de diferentes sensores, la procesan mediante programas previamente diseñados y generan señales de control para accionar bombas, válvulas, motores y otros dispositivos del sistema hidráulico. Gracias a esta capacidad de procesamiento, los PLC automatizan secuencias de operación complejas, reducen la intervención humana y mejoran la precisión de los procesos de riego.

La supervisión de estos procesos se complementa con plataformas de control y monitoreo que muestran en

tiempo real el estado del sistema, registran variables históricas, generan alarmas y facilitan el diagnóstico de posibles fallas. Estas herramientas optimizan la operación de la infraestructura hidráulica y sirven de base para implementar estrategias de mantenimiento preventivo y mejora continua. Además de incrementar la eficiencia en el uso del agua, fortalecen la confiabilidad y la disponibilidad de los sistemas automatizados.

La incorporación de estas tecnologías ha dado lugar al concepto de riego inteligente, caracterizado por la integración de sensores, sistemas de control y plataformas digitales para administrar el agua de acuerdo con las condiciones reales del entorno. Diversas investigaciones demuestran que estos sistemas reducen significativamente el consumo de agua sin afectar el desarrollo de la vegetación ni la productividad agrícola. Del mismo modo, favorecen un uso más eficiente de la energía y disminuyen la necesidad de supervisión permanente por parte del operador (Wolfert et al., 2017).

En el contexto peruano, donde una parte importante de las áreas agrícolas y de las áreas verdes urbanas continúa utilizando procedimientos convencionales de riego, la incorporación de tecnologías de automatización representa una oportunidad para incrementar la eficiencia en el aprovechamiento del recurso hídrico y mejorar la sostenibilidad de los sistemas de mantenimiento. Su aplicación resulta especialmente pertinente en instituciones públicas, universidades y espacios urbanos, donde es posible optimizar el consumo de agua mediante soluciones tecnológicas de costo relativamente accesible y con importantes beneficios operativos.

La automatización y la digitalización (Figura 1.2) representan hoy componentes esenciales de la gestión moderna del agua, más allá de su condición de innovación tecnológica. La integración de sensores, controladores, redes de comunicación y sistemas de



supervisión convierte los datos generados por el sistema en decisiones automáticas orientadas a optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico. Estos principios tecnológicos sustentan el sistema automatizado de riego por aspersión desarrollado en la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, Perú.



Figura 1.2. Integración de tecnologías para la automatización del riego.

1.2. Fundamentos y métodos de los sistemas de riego

El riego representa una de las aplicaciones más importantes de la ingeniería hidráulica y agrícola,



al proporcionar un mecanismo controlado para suministrar agua cuando las precipitaciones naturales no son suficientes para satisfacer las necesidades hídricas de la vegetación. Su desarrollo ha contribuido a incrementar la productividad agrícola, asegurar la disponibilidad de alimentos y mantener áreas verdes en espacios urbanos, industriales e institucionales. En la actualidad, los sistemas de riego desempeñan un papel esencial para garantizar un uso eficiente del agua, especialmente en regiones donde la disponibilidad del recurso es limitada o presenta una elevada variabilidad estacional.

Desde una perspectiva técnica, un sistema de riego puede definirse como el conjunto integrado de componentes hidráulicos, mecánicos y de control destinados a captar, conducir, distribuir y aplicar agua de manera uniforme sobre una superficie determinada, con el propósito de satisfacer los requerimientos hídricos de la vegetación. Esta definición evidencia que un sistema de riego trasciende el simple transporte de agua desde una fuente de abastecimiento hasta el terreno, ya que incorpora criterios de eficiencia hidráulica, uniformidad de aplicación y confiabilidad operativa para administrar el recurso.

La evolución de los sistemas de riego ha estado estrechamente vinculada al desarrollo de la ingeniería hidráulica. Los primeros sistemas se basaban en la conducción del agua mediante canales abiertos y utilizaban la gravedad como único mecanismo de distribución. Posteriormente, la incorporación de tuberías presurizadas, equipos de bombeo y dispositivos de regulación mejoró el control del caudal y amplió las posibilidades de aplicación del agua. En la actualidad, la modernización del riego trasciende la simple sustitución de infraestructura e incorpora mejoras técnicas, operativas e institucionales dirigidas a optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles y la calidad del servicio ofrecido a los usuarios. La Organización de las Naciones Unidas para





la Alimentación y la Agricultura define este proceso como una transformación que integra innovación tecnológica, fortalecimiento de la gestión y mejora continua del desempeño de los sistemas de riego.

El objetivo fundamental de un sistema de riego es suministrar el volumen de agua necesario para cubrir las demandas hídricas de las plantas en el momento oportuno y con la mayor uniformidad posible. Alcanzar este propósito exige mantener un equilibrio entre el suministro de agua y las necesidades del cultivo o de la vegetación, evitando tanto el déficit hídrico como las aplicaciones excesivas. Un riego insuficiente afecta el crecimiento vegetal y disminuye la productividad, mientras que un exceso de agua incrementa las pérdidas por percolación profunda, escorrentía superficial y evaporación, además de favorecer procesos de degradación del suelo.

Además del abastecimiento hídrico, los sistemas modernos de riego persiguen objetivos relacionados con la eficiencia operativa, la conservación de los recursos naturales y la sostenibilidad económica. Entre ellos destacan la reducción de pérdidas durante el transporte y la aplicación del agua, la optimización del consumo energético, la disminución de los costos de operación y mantenimiento, así como el incremento de la productividad del agua, entendida como la capacidad de obtener mayores beneficios utilizando menores volúmenes del recurso. Por ello, la eficiencia del sistema depende tanto de su diseño hidráulico como de las condiciones bajo las cuales es operado y gestionado.

Desde el punto de vista estructural, todo sistema de riego está integrado por un conjunto de componentes que actúan de manera coordinada para garantizar el transporte y la distribución del agua. Aunque la configuración específica varía según el método de riego empleado, la mayoría de los sistemas comparte una arquitectura básica formada por una fuente de

abastecimiento, un sistema de impulsión cuando las condiciones topográficas lo requieren, una red de conducción, dispositivos de regulación, elementos de distribución y emisores encargados de aplicar el agua sobre la superficie de riego. El funcionamiento coordinado de estos componentes determina el desempeño hidráulico del sistema y su capacidad para distribuir el recurso de manera uniforme.

La fuente de abastecimiento constituye el origen del agua utilizada por el sistema y puede estar representada por ríos, reservorios, pozos, lagunas o redes de distribución. Cuando la presión natural resulta insuficiente, se incorporan equipos de impulsión, generalmente bombas hidráulicas, cuya función es proporcionar la energía necesaria para transportar el agua a través de la red. Posteriormente, la red de conducción distribuye el recurso hacia los diferentes sectores de riego mediante tuberías principales y secundarias, mientras que diversos dispositivos de regulación controlan el caudal y la presión antes de que el agua llegue a los emisores.

La uniformidad de aplicación representa uno de los aspectos fundamentales en el diseño y la operación de cualquier sistema de riego. Desde la ingeniería de riego, un sistema eficiente debe suministrar el volumen requerido de agua con una distribución homogénea sobre toda la superficie atendida. Diferencias significativas en la aplicación generan zonas con déficit o exceso de humedad, afectan el desarrollo de la vegetación y disminuyen el aprovechamiento del recurso. Por esta razón, organismos especializados como la American Society of Agricultural and Biological Engineers (2023) consideran que la evaluación del desempeño de un sistema debe integrar criterios hidráulicos, agronómicos y de gestión, valorando el funcionamiento del conjunto y no únicamente el comportamiento individual de sus componentes.



Durante los últimos años, la evolución tecnológica ha ampliado el concepto tradicional de sistema de riego. En la actualidad, estos sistemas integran conocimientos de hidráulica, mecánica, electrónica, instrumentación y tecnologías digitales para mejorar el control operativo y optimizar la utilización del agua. Esta integración ha impulsado el desarrollo de infraestructuras más flexibles y adaptables, capaces de responder a diferentes condiciones de operación e incorporar procesos de monitoreo y control que incrementan la eficiencia del sistema. Antes de abordar estas tecnologías, resulta necesario comprender las distintas formas en que el agua puede aplicarse sobre el terreno (Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Componentes generales de un sistema de riego.

Componente	Función principal
Fuente de abastecimiento	Proporcionar el recurso hídrico al sistema.
Sistema de impulsión	Generar la presión necesaria cuando el flujo por gravedad es insuficiente.
Red de conducción	Transportar el agua desde la fuente hasta las áreas de riego.
Dispositivos de regulación	Controlar el caudal, la presión y la distribución del agua.
Red de distribución	Conducir el agua hacia los diferentes sectores de aplicación.
Emisores	Aplicar el agua de forma uniforme sobre la superficie de riego.

Fuente: Elaboración propia a partir de Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024).

Los métodos de aplicación del agua constituyen uno de los elementos fundamentales en el diseño y operación de los sistemas de riego, ya que determinan la forma en que el recurso hídrico es distribuido sobre la superficie cultivada y, en consecuencia, su eficiencia de aprovechamiento. La selección del método más adecuado depende de factores como las características del cultivo, las condiciones del suelo, la disponibilidad de agua, la topografía y los objetivos de manejo. En

términos generales, los métodos de aplicación pueden agruparse en riego superficial, riego presurizado y riego localizado, cada uno con principios de funcionamiento, ventajas y limitaciones particulares que se describen a continuación.

- **Riego superficial**

El riego superficial representa uno de los métodos más antiguos y ampliamente utilizados para la aplicación del agua en las actividades agrícolas. Su funcionamiento se basa en el desplazamiento del agua sobre la superficie del terreno aprovechando la pendiente natural o artificial del suelo, de modo que la infiltración ocurre de forma progresiva a medida que el agua avanza. A diferencia de los sistemas presurizados, este método no requiere equipos de bombeo para distribuir el recurso, ya que su operación descansa fundamentalmente en la topografía del terreno y en un adecuado diseño hidráulico de los canales de conducción.

Desde la ingeniería de riego, el riego superficial puede definirse como el método mediante el cual el agua se aplica directamente sobre la superficie del suelo y se distribuye por gravedad hasta cubrir el área de cultivo. Su eficiencia está determinada por variables como la pendiente del terreno, la velocidad de infiltración del suelo, la longitud de los sectores de riego y el caudal suministrado. Cuando estos factores no se controlan adecuadamente, pueden producirse pérdidas importantes por escorrentía superficial, infiltración profunda o una distribución no uniforme del agua (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024).

Entre las principales ventajas del riego superficial destacan su relativa simplicidad constructiva y los bajos costos de instalación, especialmente en zonas con disponibilidad de agua y condiciones topográficas favorables. A ello se suma un menor consumo energético, ya que aprovecha la gravedad como mecanismo de transporte del agua, lo que lo





convierte en una alternativa económicamente viable para extensas áreas agrícolas. Estas características explican su permanencia como uno de los métodos de riego más utilizados en numerosos países en desarrollo y en cultivos de gran superficie.

No obstante, este método también presenta limitaciones importantes. La uniformidad en la aplicación del agua suele ser inferior a la alcanzada con los sistemas presurizados, debido a que el tiempo de infiltración varía a lo largo del recorrido del flujo. Además, las pérdidas por evaporación, escorrentía y percolación profunda pueden reducir considerablemente la eficiencia cuando el diseño hidráulico o el manejo operativo no son adecuados. Estas limitaciones han impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas a mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico mediante métodos de aplicación con mayor precisión y control.

El riego superficial comprende diferentes modalidades de aplicación, entre las que destacan el riego por inundación, el riego por surcos y el riego por melgas. El riego por inundación consiste en cubrir completamente la superficie del terreno con una lámina de agua y se utiliza ampliamente en cultivos como el arroz. El riego por surcos distribuye el agua a través de pequeños canales paralelos abiertos entre las hileras de cultivo, favoreciendo la infiltración gradual hacia la zona radicular. Por su parte, el riego por melgas emplea franjas rectangulares delimitadas por bordos laterales que facilitan una distribución más uniforme del agua sobre terrenos previamente nivelados. Aunque estas modalidades presentan diferencias en su diseño y operación, todas comparten el mismo principio hidráulico basado en el flujo superficial por gravedad.

El riego superficial continúa desempeñando un papel relevante en la agricultura mundial. Sin embargo, la creciente necesidad de incrementar la productividad del agua y reducir las pérdidas ha favorecido la expansión

de métodos que ofrecen un mayor control sobre la distribución del recurso. Entre ellos sobresalen los sistemas presurizados, cuya operación se fundamenta en la utilización de presión hidráulica para conducir y aplicar el agua con mayores niveles de precisión.

- **Riego presurizado**

Los sistemas de riego presurizado representan una evolución tecnológica respecto a los métodos tradicionales de aplicación del agua. Su funcionamiento se basa en la utilización de presión hidráulica, generada mediante bombas o por el aprovechamiento de diferencias de nivel, para transportar el agua a través de tuberías cerradas hasta los dispositivos encargados de distribuirla sobre la superficie de riego. Este principio de operación ofrece un mayor control sobre el caudal, la presión y la uniformidad de aplicación, favoreciendo un uso más eficiente del recurso hídrico.

A diferencia del riego superficial, donde la distribución del agua depende principalmente de la gravedad, los sistemas presurizados emplean una red hidráulica diseñada para mantener condiciones de operación relativamente constantes en todos los puntos del sistema. La incorporación de tuberías, válvulas, reguladores de presión y dispositivos emisores mejora el control sobre la cantidad de agua aplicada, reduce las pérdidas por escorrentía superficial y aumenta la uniformidad del riego. Estas características han impulsado su adopción en la agricultura moderna, así como en áreas verdes urbanas, parques, jardines e instalaciones institucionales (International Commission on Irrigation and Drainage, 2022).

Los sistemas presurizados comprenden dos grandes métodos de aplicación del agua. El primero corresponde al riego por aspersión, en el que el agua es impulsada a presión hacia emisores que la distribuyen en forma de gotas, simulando una precipitación artificial. Este método resulta especialmente adecuado para áreas verdes, césped, jardines, campos deportivos y





diversos cultivos agrícolas debido a su capacidad para proporcionar una cobertura uniforme sobre amplias superficies.

El segundo método corresponde al riego localizado, mediante el cual el agua se aplica directamente en la zona radicular de las plantas a través de emisores de bajo caudal. Dentro de esta categoría se incluyen el riego por goteo y la microaspersión, sistemas que suministran pequeñas cantidades de agua con alta frecuencia y elevados niveles de eficiencia. Por sus características, el riego localizado se utiliza principalmente en cultivos permanentes, frutales, viveros y horticultura intensiva, donde la optimización del consumo de agua resulta prioritaria.

Entre las principales ventajas de los sistemas presurizados destacan su elevada uniformidad de aplicación, la reducción de pérdidas durante la distribución del agua, la posibilidad de operar en terrenos con diferentes condiciones topográficas y la facilidad para incorporar tecnologías de automatización y control. También facilitan la sectorización del riego, la programación de los ciclos de funcionamiento y la integración de sensores y dispositivos electrónicos que optimizan la gestión del recurso hídrico.

No obstante, su implementación también presenta algunas limitaciones. La inversión inicial suele ser superior a la requerida por los sistemas superficiales debido a la instalación de tuberías, bombas y equipos de regulación. Además, demandan un mantenimiento preventivo adecuado para garantizar el correcto funcionamiento de los emisores y evitar problemas asociados con obstrucciones o variaciones de presión. A pesar de estas exigencias, la elevada eficiencia en el uso del agua y la facilidad para incorporar tecnologías inteligentes han consolidado al riego presurizado como una de las alternativas más utilizadas en los proyectos contemporáneos de ingeniería hidráulica.

El riego presurizado constituye, además, la plataforma tecnológica sobre la que se desarrollan los sistemas automatizados de distribución del agua. Entre sus diferentes modalidades, el riego por aspersión sobresale por su capacidad para proporcionar una cobertura uniforme en áreas verdes y por la facilidad con la que puede integrarse con sistemas electrónicos de monitoreo y control. Estas características explican su amplia utilización en proyectos de automatización destinados a mejorar la eficiencia en el aprovechamiento del recurso hídrico.

- **Riego localizado**

El riego localizado representa uno de los métodos de aplicación del agua con mayor eficiencia hidráulica disponibles en la actualidad. Su principio de funcionamiento consiste en suministrar el agua directamente en la zona de mayor actividad radicular de la planta mediante emisores de bajo caudal, reduciendo considerablemente las pérdidas por evaporación, escorrentía superficial y percolación profunda. A diferencia del riego por aspersión, donde el agua se distribuye sobre toda la superficie, el riego localizado concentra la aplicación en el entorno inmediato de las raíces, optimizando el aprovechamiento del recurso hídrico (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024).

Este método forma parte de los sistemas presurizados y requiere una red de tuberías que transporta el agua hasta emisores diseñados para liberar pequeños caudales de forma continua o intermitente. La baja intensidad de aplicación favorece condiciones relativamente estables de humedad en el suelo, estimulando el desarrollo radicular y reduciendo el estrés hídrico de las plantas. Gracias a estas características, el riego localizado se emplea ampliamente en cultivos de alto valor económico, viveros, frutales, horticultura intensiva e invernaderos, donde el control preciso del suministro





de agua constituye un factor determinante para la productividad.

Dentro del riego localizado destacan dos modalidades principales: el riego por goteo y la microaspersión. El riego por goteo distribuye el agua mediante goteros instalados a lo largo de tuberías laterales, liberando pequeños volúmenes directamente sobre el suelo o en las proximidades del sistema radicular. Su principal ventaja radica en la elevada eficiencia de aplicación que, en condiciones adecuadas, puede superar el 90 %, reduciendo significativamente el consumo de agua y limitando el crecimiento de malezas al humedecer únicamente la zona requerida por la planta. Además, facilita la aplicación simultánea de fertilizantes mediante sistemas de fertirrigación, incrementando la eficiencia en el uso de nutrientes y disminuyendo los costos de manejo agronómico (Howell, 2021).

La microaspersión, por su parte, utiliza emisores que generan pequeñas gotas de agua distribuidas sobre una superficie limitada alrededor de cada planta. Aunque también pertenece a los sistemas de riego localizado, presenta un radio de cobertura mayor que el riego por goteo, lo que favorece el humedecimiento parcial del suelo y mejora las condiciones microclimáticas en cultivos que requieren una mayor humedad ambiental. Esta modalidad resulta especialmente adecuada para frutales, viveros, cultivos ornamentales y algunas especies forestales, donde la distribución localizada del agua favorece un desarrollo más uniforme de las plantas.

Entre las principales ventajas del riego localizado destacan la elevada eficiencia en el uso del agua, la reducción de pérdidas durante la aplicación, la posibilidad de automatizar completamente el sistema y la facilidad para integrar procesos de fertirrigación y monitoreo. Al suministrar únicamente el volumen de agua requerido por cada planta, también disminuye el consumo energético y favorece un aprovechamiento

más racional de los recursos disponibles (Chauhdar et al., 2024).

No obstante, este método presenta algunas limitaciones que deben considerarse durante el diseño y la operación del sistema. Su implementación requiere una mayor inversión inicial debido a la cantidad de tuberías, emisores y dispositivos de filtrado necesarios para garantizar un funcionamiento adecuado. Además, los goteros y microaspersores son susceptibles a procesos de obstrucción ocasionados por sedimentos o precipitados químicos presentes en el agua, por lo que resulta indispensable incorporar sistemas de filtración y establecer programas periódicos de mantenimiento preventivo. Estas medidas contribuyen a garantizar la confiabilidad y la durabilidad de la instalación.

El riego localizado constituye una alternativa altamente eficiente para aquellos cultivos en los que el suministro de agua puede concentrarse en zonas específicas del terreno. Sin embargo, cuando el objetivo es irrigar superficies continuas cubiertas por césped o áreas verdes de uso recreativo e institucional, este método puede generar distribuciones menos uniformes y dificultar el mantenimiento homogéneo de la vegetación. En estas condiciones, el riego por aspersión ofrece ventajas operativas derivadas de su capacidad para proporcionar una cobertura uniforme y facilitar la automatización de la distribución del agua (Tabla 1.5).

Tabla 1.5. Comparación de los principales métodos de aplicación del agua en los sistemas de riego.

Método de riego	Presión requerida	Eficiencia de aplicación	Uniformidad	Inversión inicial	Aplicaciones más frecuentes
Superficial	Baja	Baja–Media (40–70 %)	Baja	Baja	Grandes extensiones agrícolas



Método de riego	Presión requerida	Eficiencia de aplicación	Uniformidad	Inversión inicial	Aplicaciones más frecuentes
Surcos	Baja	Media (60–75 %)	Media	Baja	Cultivos en hileras
Inundación	M u y baja	Baja (40–60 %)	Baja	M u y baja	Arroz, pastos y cultivos extensivos
Aspersión	Media	Alta (75–90 %)	Alta	Media	Áreas verdes, jardines, parques, agricultura
Goteo	Media–Alta	Muy alta (90–95 %)	Muy alta	Alta	Frutales, horticultura, cultivos permanentes
M i -croaspersión	Media	Alta (85–90 %)	Alta	Alta	Frutales, viveros y cultivos ornamentales

Fuente: Elaboración propia a partir de American Society of Agricultural and Biological Engineers (2020); Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024); Howell (2021); International Commission on Irrigation and Drainage (2022).

La comparación de los diferentes métodos de aplicación del agua evidencia que cada sistema responde a necesidades específicas de manejo, disponibilidad del recurso y características del cultivo. Los sistemas superficiales continúan siendo una alternativa viable en explotaciones agrícolas extensivas debido a sus bajos costos de implementación; sin embargo, presentan menores niveles de uniformidad y eficiencia hidráulica. Por el contrario, los sistemas presurizados ofrecen un mayor control sobre la distribución del agua, reducen las pérdidas e incrementan la productividad del recurso. Dentro de los sistemas presurizados, el riego por goteo y la microaspersión alcanzan los mayores

niveles de eficiencia al concentrar la aplicación en la zona radicular de las plantas. No obstante, cuando se requiere mantener una cobertura uniforme sobre superficies continuas, como jardines, parques, campos deportivos o áreas verdes universitarias, el riego por aspersión resulta más adecuado, ya que distribuye el agua de forma homogénea y facilita la sectorización, la programación horaria y la incorporación de sistemas de automatización.

La selección del método de riego no depende exclusivamente de la eficiencia hidráulica, sino también de la compatibilidad entre las características del sistema, el tipo de vegetación y los objetivos del proyecto. Este criterio adquiere especial relevancia en el diseño de sistemas automatizados para áreas verdes, donde la uniformidad de aplicación y la facilidad de control influyen directamente en el desempeño del sistema.

La selección del método de riego representa una de las decisiones más importantes durante el diseño de un sistema hidráulico, ya que condiciona la eficiencia en el uso del agua, el consumo energético, los costos de operación y el desempeño general de la instalación. No existe un sistema de riego universalmente superior; la elección debe responder a las características específicas del proyecto y a las condiciones donde será implementado. Por esta razón, el diseño requiere un análisis integral de factores técnicos, económicos y ambientales que permitan identificar la alternativa más apropiada para cada aplicación.

Uno de los primeros criterios corresponde a la disponibilidad del recurso hídrico. El volumen de agua disponible condiciona el tipo de sistema que puede implementarse y determina el nivel de eficiencia requerido. Cuando el recurso es limitado, conviene emplear métodos que reduzcan las pérdidas durante la distribución y aplicación del agua, favoreciendo un mayor aprovechamiento de cada unidad suministrada.





En cambio, en zonas con abundante disponibilidad hídrica y bajos costos de captación, pueden utilizarse sistemas con menores niveles de eficiencia sin comprometer significativamente la operación del proyecto (Pereira et al., 2021).

La topografía del terreno representa otro criterio determinante. Las pendientes pronunciadas dificultan la aplicación uniforme del agua mediante métodos superficiales y favorecen pérdidas por escorrentía, mientras que los sistemas presurizados compensan parcialmente estas variaciones mediante el control hidráulico de la presión. La configuración geométrica del área de riego también influye en la distribución de tuberías, la sectorización del sistema y la ubicación de los emisores.

Las propiedades físicas del suelo desempeñan igualmente un papel fundamental. La textura, la estructura y la velocidad de infiltración determinan la capacidad del suelo para almacenar agua y condicionan la frecuencia de riego. Los suelos arenosos presentan altas tasas de infiltración y requieren aplicaciones más frecuentes con menores volúmenes, mientras que los suelos arcillosos poseen mayor capacidad de retención, lo que permite establecer intervalos de riego más prolongados. Un diseño adecuado debe considerar estas características para evitar pérdidas por percolación profunda o saturación del terreno.

El tipo de vegetación constituye otro criterio de selección. Los cultivos extensivos, los frutales, los viveros, el césped ornamental y las áreas verdes presentan requerimientos hídricos diferentes y demandan métodos específicos de aplicación del agua. Mientras los cultivos arbóreos pueden beneficiarse del riego localizado, las superficies cubiertas por césped requieren una distribución homogénea sobre toda el área para garantizar un crecimiento uniforme y preservar la calidad estética del paisaje.

Las condiciones climáticas también influyen en el comportamiento del sistema de riego. Variables como la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la radiación solar afectan las pérdidas por evaporación y modifican la eficiencia de aplicación del agua. En regiones con fuertes vientos, por ejemplo, algunos métodos de riego experimentan reducciones en la uniformidad de distribución, aspecto que debe considerarse durante la etapa de diseño.

Desde el punto de vista económico, la selección del método de riego exige evaluar la inversión inicial, los costos de operación y el mantenimiento esperado durante la vida útil del sistema. En muchos casos, sistemas con mayores costos de instalación resultan económicamente más convenientes gracias al ahorro de agua, energía y mano de obra obtenido durante su funcionamiento. Por ello, la evaluación económica debe considerar el ciclo completo de operación y no únicamente el costo inicial de implementación (Evans y Sadler, 2008).

Los proyectos modernos incorporan además un criterio relacionado con el grado de automatización requerido. La integración de sensores, controladores electrónicos y plataformas de monitoreo exige que el sistema hidráulico sea compatible con procesos de control automático. Esta condición favorece el empleo de sistemas presurizados, cuya operación puede programarse y supervisarse con mayor facilidad, optimizando la distribución del agua y reduciendo significativamente la intervención del operador.

La selección del método de riego responde, por tanto, a un proceso de evaluación multicriterio en el que intervienen factores hidráulicos, agronómicos, económicos y tecnológicos. La adecuada integración de estos elementos favorece el diseño de sistemas más eficientes y mejor adaptados a las necesidades específicas de cada proyecto. Estos criterios sustentan





la elección del riego por aspersión para el presente trabajo tecnológico.

La elección del método de riego constituye una decisión de ingeniería que debe responder a las características particulares del proyecto y no únicamente a la eficiencia teórica de cada sistema. En el diseño e implementación del sistema automatizado para los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú, la selección del riego por aspersión se fundamenta en criterios técnicos, funcionales y operativos que lo convierten en la alternativa más adecuada para las condiciones existentes.

Uno de los principales factores corresponde al tipo de cobertura vegetal presente en las áreas verdes universitarias. Los jardines están conformados predominantemente por césped ornamental y especies vegetales distribuidas de manera continua sobre superficies relativamente amplias. Estas características requieren una distribución homogénea del agua, condición que puede alcanzarse eficientemente mediante aspersores correctamente dimensionados y ubicados.

Otro aspecto determinante es la uniformidad de aplicación. A diferencia de los sistemas de riego localizado, diseñados para suministrar agua únicamente en la zona radicular de plantas individuales, el riego por aspersión reproduce una precipitación artificial capaz de cubrir de manera uniforme superficies extensas. Esta característica adquiere especial importancia en jardines institucionales, donde la homogeneidad del crecimiento vegetal constituye un requisito tanto estético como funcional.

Desde la perspectiva hidráulica, el sistema de aspersión facilita la sectorización de las áreas de riego, dividiendo el jardín en zonas independientes de operación. Esta configuración mejora el control del caudal disponible, reduce las variaciones de presión y favorece la programación secuencial del funcionamiento de

los diferentes sectores. Como resultado, el sistema opera con mayor estabilidad hidráulica y optimiza el aprovechamiento del recurso disponible.

Otro criterio relevante es su compatibilidad con sistemas de automatización. Los aspersores funcionan mediante electroválvulas que pueden ser controladas fácilmente por Controladores Lógicos Programables (PLC), temporizadores o sistemas inteligentes basados en sensores ambientales. Esta característica facilita la integración del sistema hidráulico con plataformas de supervisión y control, favoreciendo la programación automática de los ciclos de riego y reduciendo considerablemente la necesidad de intervención manual.

El riego por aspersión también ofrece ventajas importantes desde el punto de vista del mantenimiento. La disposición superficial de los emisores simplifica las labores de inspección, limpieza y sustitución de componentes, contribuyendo a mantener la continuidad operativa del sistema con menores tiempos de intervención. Además, la amplia disponibilidad comercial de aspersores, válvulas y accesorios normalizados favorece la sostenibilidad técnica y económica del proyecto a largo plazo.

Diversos estudios recientes coinciden en que los sistemas de riego por aspersión continúan siendo una de las alternativas más adecuadas para el mantenimiento de áreas verdes urbanas, parques y jardines institucionales, especialmente cuando se integran con tecnologías de automatización y monitoreo. La combinación de una adecuada uniformidad de aplicación, facilidad de sectorización y compatibilidad con sistemas electrónicos de control incrementa la eficiencia operativa y optimiza el uso del agua sin afectar la calidad de la cobertura vegetal (Playán y Mateos, 2020).

La selección del riego por aspersión para el presente proyecto responde a una evaluación integral de las





características del terreno, la vegetación existente, la infraestructura disponible y los objetivos tecnológicos del sistema. Estas condiciones respaldan su elección como la alternativa técnicamente más adecuada para implementar un sistema automatizado orientado a mejorar la eficiencia del riego en los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú.

1.3. Diseño hidráulico del sistema de riego por aspersión

El sistema de riego por aspersión representa un método de aplicación del agua basado en la conducción hidráulica a presión, mediante el cual el recurso hídrico se distribuye sobre la superficie del terreno en forma de gotas que simulan una precipitación natural. Su funcionamiento se fundamenta en la transformación de la energía hidráulica generada por una fuente de presión en energía cinética, haciendo posible que el agua sea proyectada por los aspersores y distribuida uniformemente sobre el área de riego. Este principio diferencia al riego por aspersión de los métodos superficiales, en los cuales la distribución depende exclusivamente de la gravedad y de las características topográficas del terreno (International Commission on Irrigation and Drainage, 2022).

Desde el punto de vista hidráulico, el proceso se inicia en la fuente de abastecimiento, que puede corresponder a un reservorio, un pozo, una red de agua o cualquier otra infraestructura capaz de suministrar el caudal requerido por el sistema. La disponibilidad y la calidad del agua son factores determinantes para garantizar el funcionamiento continuo de la instalación, ya que influyen directamente en el desempeño de los equipos hidráulicos y en la vida útil de los emisores.

Una vez captada, el agua es impulsada mediante una bomba hidráulica cuya función es proporcionar la presión necesaria para vencer las pérdidas de carga producidas durante el transporte y asegurar

que todos los aspersores operen dentro de su rango de funcionamiento. La bomba incorpora la energía al sistema hidráulico, haciendo posible la circulación del agua a través de la red de tuberías con el caudal y la presión establecidos durante el diseño. La selección de este equipo debe considerar parámetros como el caudal total requerido, la altura dinámica total y la eficiencia energética del sistema (Playán y Mateos, 2020).

A continuación, el agua presurizada circula por una red de tuberías conformada, por lo general, por una tubería principal y varias tuberías secundarias o ramales de distribución. La tubería principal transporta el caudal desde la estación de bombeo hasta las diferentes zonas de riego, mientras que las tuberías secundarias conducen el agua hacia los sectores donde se encuentran instalados los aspersores. Durante este recorrido se producen pérdidas de energía ocasionadas por la fricción con las paredes internas de las tuberías y por la presencia de accesorios hidráulicos, como codos, tees, reducciones y válvulas. Por ello, el dimensionamiento adecuado de la red representa uno de los aspectos fundamentales del diseño hidráulico.

La distribución del agua entre los diferentes sectores del sistema se realiza mediante electroválvulas, dispositivos electromecánicos encargados de controlar automáticamente el paso del agua hacia cada zona de riego. Cuando reciben una señal eléctrica procedente del sistema de control, abren o cierran el flujo hidráulico, de modo que únicamente el sector programado entra en funcionamiento. Esta sectorización optimiza el caudal disponible, reduce la potencia requerida por la bomba y facilita la programación secuencial del riego. Aunque su operación depende del sistema de automatización, desde el punto de vista hidráulico las electroválvulas cumplen la función de regular el flujo dentro de la red de distribución.





El agua llega finalmente a los aspersores, dispositivos diseñados para transformar la energía de presión en energía cinética mediante el paso del agua a través de una boquilla calibrada. Al salir por la boquilla, el chorro impacta sobre un mecanismo difusor o un brazo giratorio que fragmenta el flujo en gotas de diferentes tamaños y las distribuye radialmente sobre la superficie de riego. El alcance del chorro, el tamaño de las gotas, la velocidad de rotación y el patrón de distribución dependen de variables como la presión de operación, el diámetro de la boquilla y el diseño interno del aspersor.

Como resultado de este proceso se genera una precipitación artificial cuyo propósito es reproducir una lluvia uniforme sobre el terreno. Para alcanzar una adecuada distribución del agua, los aspersores no operan de manera aislada, sino formando una red de cobertura en la que las áreas de alcance de cada emisor se superponen parcialmente. Este principio de superposición representa uno de los fundamentos del diseño hidráulico del riego por aspersión, ya que compensa la disminución del caudal en los extremos del patrón de distribución y mejora la uniformidad del riego.

Desde la ingeniería hidráulica, el funcionamiento del sistema puede interpretarse como una secuencia continua de transformación y transferencia de energía. En primer lugar, la bomba incorpora energía hidráulica al agua; después, esa energía se transmite a través de la red de tuberías hasta los aspersores y, finalmente, los emisores transforman la presión en movimiento del agua para producir la dispersión de gotas sobre el terreno. Cada una de estas etapas debe mantenerse dentro de los rangos establecidos durante el diseño para garantizar un funcionamiento estable y una distribución homogénea del recurso.

En los sistemas modernos, esta secuencia hidráulica puede integrarse con tecnologías de control automático que regulan la operación de bombas, electroválvulas

y sectores de riego de acuerdo con programas previamente definidos o con información procedente de sensores ambientales. No obstante, cualquiera que sea el nivel de automatización incorporado, el principio hidráulico permanece invariable: captar el agua, presurizarla, transportarla, regular su distribución y aplicarla sobre la superficie mediante aspersores que generan una precipitación artificial uniforme.

Comprender este principio resulta indispensable para el diseño de un sistema de riego por aspersión, ya que facilita la identificación de la función específica de cada componente y la comprensión de las relaciones entre presión, caudal, distribución y uniformidad de aplicación. Del mismo modo, proporciona las bases técnicas necesarias para el análisis de los componentes hidráulicos que integran este tipo de sistema (Figura 1.3).



Figura 1.3. Principio de funcionamiento de un sistema de riego por aspersión.

Fuente: Elaboración propia a partir de American Society of Agricultural and Biological Engineers (2020); International Commission on Irrigation and Drainage (2022); Playán y Mateos (2020).

- **Componentes hidráulicos del sistema**

El funcionamiento eficiente de un sistema de riego por aspersión depende de la adecuada integración de un conjunto de componentes hidráulicos encargados de captar, transportar, controlar y distribuir el agua hasta la superficie de riego. Cada elemento cumple una función específica dentro del circuito hidráulico y su selección debe realizarse considerando las condiciones de operación, la demanda de caudal, la presión de trabajo y las características del área a irrigar. Desde el punto de vista de la ingeniería, el desempeño global del sistema no depende únicamente de la calidad individual de sus componentes, sino del equilibrio hidráulico que exista entre ellos (Ravikumar, 2023).

La configuración de un sistema de riego por aspersión puede variar según la magnitud del proyecto; sin embargo, la mayoría de las instalaciones comparte una estructura básica integrada por una fuente de abastecimiento, un sistema de bombeo, una red de tuberías, dispositivos de control hidráulico, accesorios y aspersores. La interacción adecuada entre estos elementos garantiza que el agua llegue a cada emisor con la presión y el caudal previstos durante el diseño.

- **Fuente de abastecimiento**

La fuente de abastecimiento constituye el punto de origen del recurso hídrico utilizado por el sistema de riego. Dependiendo de las condiciones del proyecto, el suministro puede provenir de reservorios, pozos, lagunas, ríos o redes públicas de distribución. La elección de la fuente debe considerar tres aspectos fundamentales: disponibilidad permanente del recurso, calidad del agua y capacidad para satisfacer el caudal máximo requerido durante la operación.

La calidad del agua representa un criterio técnico de gran importancia, ya que la presencia de sólidos suspendidos, sedimentos o materia orgánica puede ocasionar obstrucciones en tuberías y emisores, reduciendo la eficiencia hidráulica y aumentando los costos de mantenimiento. Por esta razón, en la mayoría de los sistemas modernos se incorporan filtros y dispositivos de protección antes del ingreso del agua a la red de distribución.

1. Sistema de bombeo

Cuando la presión natural no resulta suficiente para alimentar la instalación, es necesario incorporar un sistema de bombeo encargado de suministrar la energía hidráulica requerida por la red de riego. La bomba transforma la energía mecánica del motor en energía de presión, permitiendo impulsar el agua desde la fuente de abastecimiento hasta los aspersores.

El dimensionamiento de la bomba constituye una etapa crítica del diseño hidráulico, ya que debe satisfacer simultáneamente el caudal requerido por el sistema y la altura dinámica total, considerando tanto las diferencias de nivel como las pérdidas de carga producidas durante el transporte del agua. Una bomba sobredimensionada incrementa innecesariamente el consumo energético, mientras que una de capacidad insuficiente provoca caídas de presión que afectan la uniformidad del riego (Eisenhauer et al., 2021).

2. Red de conducción

La red de conducción transporta el agua presurizada desde la estación de bombeo hasta los diferentes sectores de riego. Está conformada por una tubería principal y varias tuberías secundarias o laterales, diseñadas para distribuir el caudal con las menores pérdidas de energía posibles.

La tubería principal soporta el mayor caudal del sistema y conecta la fuente de abastecimiento con las distintas zonas de distribución. Debido a ello, generalmente





posee un mayor diámetro y está diseñada para mantener velocidades de circulación compatibles con los criterios de diseño hidráulico.

Las tuberías secundarias conducen el agua hacia cada sector de riego y alimentan directamente los aspersores. Su diámetro depende del número de emisores instalados, del caudal requerido por cada ramal y de la presión mínima necesaria para garantizar el funcionamiento adecuado de los dispositivos de aplicación.

Actualmente, los materiales más empleados son el policloruro de vinilo (PVC) para aplicaciones presurizadas y el polietileno de alta densidad (HDPE), debido a su resistencia a la corrosión, baja rugosidad interna, facilidad de instalación y larga vida útil.

3. Válvulas de control

Las válvulas constituyen los elementos responsables de regular el paso del agua dentro de la red hidráulica. Su función principal consiste en controlar el caudal, aislar sectores para mantenimiento y proteger la instalación frente a variaciones de presión.

En los sistemas automatizados predominan las **electroválvulas**, dispositivos que permiten abrir o cerrar automáticamente el flujo de agua mediante señales eléctricas provenientes del controlador. Gracias a esta característica, es posible sectorizar el riego, optimizar el caudal disponible y programar secuencias de funcionamiento independientes para cada zona.

Adicionalmente, el sistema puede incorporar válvulas de retención, reguladores de presión y válvulas de purga, cuya finalidad es mantener condiciones hidráulicas estables y proteger la infraestructura frente a golpes de ariete o sobrepresiones.

4. Accesorios hidráulicos

Los accesorios hidráulicos permiten la interconexión de todos los elementos que conforman la red de

distribución. Entre ellos se incluyen codos, tees, uniones, adaptadores, reducciones, acoples y tapones.

Aunque estos componentes no participan directamente en la aplicación del agua, su selección influye en las pérdidas locales de carga y en la confiabilidad mecánica de la instalación. Por ello, durante el diseño hidráulico deben considerarse criterios relacionados con el material, el diámetro nominal, la presión de trabajo y la compatibilidad entre los diferentes elementos del sistema.

5. Aspersores

Los aspersores representan el elemento terminal del sistema hidráulico y cumplen la función de transformar la energía de presión del agua en una precipitación artificial distribuida sobre la superficie de riego. Su funcionamiento depende del paso del agua a través de una boquilla calibrada, donde el flujo adquiere velocidad y posteriormente se fragmenta en gotas mediante mecanismos rotativos o de impacto.

Las características del aspersor determinan variables fundamentales como el caudal descargado, el radio de cobertura, el patrón de distribución y la intensidad de precipitación. Por ello, la selección del emisor debe realizarse considerando la presión disponible, el espaciamiento entre aspersores, el tipo de vegetación y la uniformidad requerida por el proyecto.

La Norma Internacional ISO 15886-2:2021 establece los requisitos de diseño y funcionamiento para los aspersores de riego, definiendo criterios relacionados con su desempeño hidráulico, los ensayos de funcionamiento y los métodos de evaluación. Estas especificaciones representan una referencia técnica fundamental para garantizar la calidad, la confiabilidad y el desempeño de los emisores utilizados en sistemas presurizados (International Organization for Standardization, 2021ab).





Los diferentes componentes hidráulicos integran una infraestructura donde cada elemento desempeña una función específica para asegurar el transporte, la regulación y la distribución del agua. La adecuada selección y coordinación de estos componentes favorece el mantenimiento de condiciones estables de presión y caudal, factores indispensables para alcanzar una elevada uniformidad de aplicación. La Tabla 1.6 resume las principales características y funciones de los componentes hidráulicos empleados en los sistemas de riego por aspersión.

Tabla 1.6. Componentes hidráulicos de un sistema de riego por aspersión.

Componente	Función principal	Aspectos técnicos de selección
Fuente de abastecimiento	Suministrar el recurso hídrico	Disponibilidad, calidad del agua y caudal
Sistema de bombeo	Generar la presión necesaria	Caudal, altura dinámica y eficiencia energética
Tubería principal	Conducir el agua hacia los sectores	Diámetro, material y pérdidas de carga
Tuberías secundarias	Distribuir el agua hacia los emisores	Presión de operación y número de aspersores
Electroválvulas	Controlar el flujo por sectores	Compatibilidad con el sistema de automatización
Válvulas hidráulicas	Regular y proteger la red	Presión nominal y mantenimiento
Accesorios hidráulicos	Interconectar los componentes	Material, diámetro y resistencia
Aspersores	Aplicar el agua sobre el terreno	Caudal, radio de cobertura y uniformidad

Fuente: Elaboración propia a partir de Eisenhauer et al. (2021); International Organization for Standardization (2021); Ravikumar (2023).

1.4. Automatización industrial aplicada a los sistemas de riego

La automatización industrial representa una de las transformaciones tecnológicas más importantes de los

sistemas productivos contemporáneos. Su desarrollo ha favorecido la sustitución de operaciones manuales por procesos controlados automáticamente mediante dispositivos electrónicos, sistemas de supervisión y algoritmos de control, incrementando la precisión, la confiabilidad y la eficiencia de las operaciones. En sus primeras etapas, la automatización estuvo orientada principalmente a la industria manufacturera; sin embargo, el avance de la electrónica, la instrumentación y las tecnologías de la información impulsó su incorporación en otros sectores, entre ellos la gestión de los recursos hídricos y los sistemas de riego.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la automatización puede definirse como el conjunto de tecnologías destinadas a controlar un proceso con una intervención humana mínima mediante la adquisición de información del entorno, su procesamiento lógico y la ejecución automática de acciones previamente programadas. Bajo este enfoque, un sistema automatizado integra sensores, dispositivos de control, actuadores y mecanismos de comunicación que operan de forma coordinada para mantener el proceso dentro de los parámetros establecidos. Esta concepción trasciende la simple sustitución de la operación manual, al incorporar funciones de supervisión, toma de decisiones y respuesta automática frente a variaciones en las condiciones de operación.

La evolución de la automatización ha estado estrechamente vinculada al desarrollo de la electrónica digital. Los primeros sistemas industriales utilizaban mecanismos electromecánicos basados en relés y temporizadores, cuya capacidad de adaptación era limitada y requería modificaciones físicas para cambiar la lógica de operación. La aparición de los Controladores Lógicos Programables (PLC) durante la segunda mitad del siglo XX transformó este panorama al hacer posible que la secuencia de control pudiera modificarse mediante programación, aumentando la flexibilidad, la confiabilidad y la facilidad de mantenimiento. Más





adelante, la incorporación de sensores inteligentes, redes industriales, interfaces hombre-máquina (HMI), sistemas SCADA y, recientemente, tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial dio origen a sistemas capaces de operar de manera autónoma y adaptarse dinámicamente a las condiciones del proceso.

En el ámbito del riego, la automatización responde a la necesidad de optimizar el uso del agua y reducir la dependencia de procedimientos manuales. Tradicionalmente, el inicio y la finalización de los ciclos de riego dependían de la experiencia del operador, quien abría y cerraba válvulas manualmente o seguía horarios fijos sin considerar las condiciones reales del suelo o del ambiente. Este tipo de operación incrementa la probabilidad de aplicar volúmenes de agua superiores o inferiores a los requeridos, afectando tanto la eficiencia del sistema como el desarrollo de la vegetación. La incorporación de sistemas automáticos supera estas limitaciones mediante el control programado de los ciclos de riego y el uso de información procedente de sensores y dispositivos de monitoreo.

Un sistema de riego automatizado puede definirse como una instalación hidráulica cuya operación es regulada automáticamente mediante dispositivos electrónicos capaces de ejecutar decisiones previamente programadas o fundamentadas en datos obtenidos en tiempo real. En este tipo de sistemas, variables como el tiempo de funcionamiento, la presión, la humedad del suelo, el nivel de agua o las condiciones climáticas sirven de base para determinar el momento oportuno de iniciar, mantener o detener el riego. De esta forma, la distribución del agua deja de depender exclusivamente de la intervención del operador y pasa a regirse por criterios objetivos definidos durante el diseño del sistema.

Desde la perspectiva del control automático, un sistema de riego automatizado desarrolla un ciclo continuo integrado por tres etapas fundamentales: adquisición

de información, procesamiento y ejecución de acciones. En la primera etapa, los sensores capturan información relacionada con el estado del sistema o del entorno. A continuación, un controlador procesa esos datos de acuerdo con una lógica previamente programada y determina la acción correspondiente. Finalmente, los actuadores ejecutan las órdenes emitidas por el controlador, activando bombas, abriendo o cerrando electroválvulas o modificando la secuencia de funcionamiento del sistema. Este ciclo constituye la base de los sistemas modernos de automatización industrial y garantiza una operación continua con elevados niveles de precisión.

La incorporación de la automatización en los sistemas de riego aporta beneficios que van más allá de la reducción de la mano de obra. Diversos estudios muestran que el control automatizado mejora la eficiencia en el uso del agua, reduce el consumo energético, disminuye los errores operativos y optimiza la uniformidad de aplicación. Cuando la automatización se integra con sensores de humedad, estaciones meteorológicas o plataformas de monitoreo, los programas de riego pueden ajustarse dinámicamente de acuerdo con las condiciones reales del entorno, favoreciendo un aprovechamiento más racional del recurso hídrico. Revisiones recientes indican que la integración de sensores, automatización e IoT puede reducir el consumo de agua entre un 20 % y un 30 %, además de incrementar la productividad de los cultivos y la eficiencia global del sistema.

En parques, jardines, campus universitarios y áreas verdes institucionales, la automatización adquiere una relevancia adicional debido a la necesidad de mantener condiciones homogéneas de riego sobre superficies continuas. La programación automática por sectores distribuye el agua de forma secuencial, evita sobrecargas hidráulicas, optimiza la presión disponible y facilita el mantenimiento del sistema. Además, la posibilidad de modificar los programas





de operación incrementa la flexibilidad frente a los cambios estacionales y a las nuevas necesidades de mantenimiento.

Otro aspecto relevante corresponde a la confiabilidad operacional. Mientras los sistemas manuales dependen de la disponibilidad y experiencia del operador, un sistema automatizado ejecuta la secuencia de riego con alta repetibilidad, reduciendo la variabilidad entre ciclos y minimizando el riesgo de omisiones o errores humanos. Esta característica adquiere especial importancia en instalaciones de funcionamiento permanente, donde la continuidad del servicio resulta esencial para conservar las áreas verdes y optimizar el uso de los recursos disponibles.

La automatización industrial aplicada al riego representa, además, el punto de convergencia entre la hidráulica y la ingeniería de control. El desempeño del sistema ya no depende únicamente del diseño hidráulico de tuberías, válvulas y aspersores, sino también de la capacidad del sistema de control para coordinar la operación de todos sus componentes. Esta integración constituye el fundamento de los sistemas inteligentes de riego utilizados en la agricultura de precisión y en la gestión moderna de espacios verdes.

La automatización aplicada al riego representa una evolución tecnológica orientada a incrementar la eficiencia, la confiabilidad y la sostenibilidad en la distribución del agua. Más que sustituir la operación manual, incorpora funciones de supervisión, control y toma de decisiones que adaptan el funcionamiento del sistema a las condiciones reales de operación. Estas capacidades han convertido a la automatización en uno de los pilares tecnológicos para el desarrollo de sistemas de riego modernos, eficientes y sostenibles (Figura 1.4).



Figura 1.4. Estructura básica de un sistema automatizado de riego.

La Tabla 1.7 presenta una comparación general entre los sistemas de riego manual y los sistemas de riego automatizados, considerando los principales aspectos operativos y tecnológicos que los diferencian. Esta comparación permite apreciar las ventajas que ofrece la automatización en términos de precisión, eficiencia en el uso del agua y reducción de la intervención humana durante la operación del sistema.



Tabla 1.7. Diferencias entre un sistema de riego manual y un sistema automatizado.

Criterio	Sistema manual	Sistema automatizado
Operación	Depende del operador	Programada automáticamente
Inicio y finalización del riego	Manual	Automática
Control del tiempo	Variable	Preciso y programable
Consumo de agua	Mayor variabilidad	Optimizado según la programación o sensores
Supervisión	Permanente	Periódica o remota
Integración tecnológica	Limitada	PLC, sensores, actuadores y comunicaciones

La automatización de un sistema de riego no depende únicamente de la incorporación de dispositivos electrónicos, sino de la adecuada integración de todos los elementos que participan en el proceso de adquisición de información, procesamiento de datos y ejecución de acciones de control. Desde esta perspectiva, la arquitectura de un sistema automatizado puede entenderse como la organización funcional de los componentes encargados de supervisar y regular la distribución del agua de forma coordinada y con una mínima intervención humana. Una arquitectura correctamente diseñada garantiza que las decisiones de control se ejecuten de manera oportuna, confiable y segura, optimizando el funcionamiento hidráulico del sistema y el uso eficiente del recurso hídrico (International Society of Automation, 2021).

En términos generales, un sistema automatizado de riego se organiza en cuatro niveles funcionales: adquisición de datos, procesamiento de información, ejecución de acciones y supervisión del sistema. Cada uno cumple una función específica dentro del proceso de control y se comunica con los demás mediante señales eléctricas o protocolos de comunicación industrial. Esta estructura favorece una operación secuencial, desde la detección de una condición hasta la ejecución automática de una acción sobre la infraestructura hidráulica.

El primer nivel corresponde a la adquisición de datos, donde intervienen los sensores encargados de captar información del proceso o del entorno. Dependiendo de las características del proyecto, pueden emplearse sensores de humedad del suelo, presión, caudal, nivel de agua, temperatura o lluvia. Estos dispositivos transforman una variable física en una señal eléctrica que posteriormente es enviada al controlador. La calidad y confiabilidad de la información obtenida representan un aspecto esencial para el correcto funcionamiento del sistema, ya que las decisiones de control dependen directamente de los datos suministrados por estos instrumentos.

El segundo nivel está representado por el Controlador Lógico Programable (PLC), considerado el núcleo del sistema automatizado. Su función consiste en recibir las señales provenientes de los sensores, procesarlas de acuerdo con una lógica previamente programada y generar las órdenes necesarias para controlar los diferentes actuadores del sistema. A diferencia de los sistemas basados exclusivamente en temporizadores o relés, el PLC facilita la modificación de la secuencia de operación mediante programación, adaptándose a nuevas condiciones de funcionamiento sin necesidad de alterar el cableado eléctrico. Esta flexibilidad ha convertido al PLC en uno de los dispositivos de control más utilizados en aplicaciones industriales y en sistemas automatizados de riego (Bolton, 2021).





Desde el punto de vista funcional, el PLC ejecuta continuamente un ciclo conocido como *scan cycle*, durante el cual lee el estado de las entradas, procesa el programa almacenado en su memoria y actualiza el estado de las salidas. Este proceso se repite cientos o miles de veces por segundo, lo que garantiza una respuesta rápida frente a los cambios en las condiciones del sistema y un control continuo de la operación.

El tercer nivel corresponde a los actuadores, dispositivos encargados de ejecutar físicamente las órdenes emitidas por el controlador. En los sistemas de riego por aspersión, los actuadores más comunes son las electroválvulas y los sistemas de bombeo. Las electroválvulas controlan el paso del agua hacia cada sector de riego, mientras que las bombas suministran la presión necesaria para alimentar la red hidráulica. Cuando el PLC activa una salida digital, envía una señal eléctrica que provoca la apertura de una electroválvula o el arranque de la bomba, iniciando el suministro de agua hacia la zona programada. De este modo, la automatización integra directamente el sistema de control con la infraestructura hidráulica.

El cuarto nivel corresponde a la supervisión y operación, donde el usuario puede visualizar el estado del sistema, modificar los parámetros de funcionamiento y supervisar las condiciones de operación. En aplicaciones industriales, esta función suele implementarse mediante interfaces hombre-máquina (HMI) o sistemas SCADA, que representan gráficamente el proceso y registran información histórica sobre su funcionamiento. Aunque no todos los proyectos requieren plataformas avanzadas de supervisión, la incorporación de interfaces de monitoreo facilita las labores de operación, mantenimiento y diagnóstico del sistema automatizado.

La interacción entre estos cuatro niveles establece un flujo continuo de información y control. Inicialmente, los sensores detectan las condiciones del sistema y transmiten la información al PLC. A continuación, el controlador procesa esos datos de acuerdo con la lógica programada y determina la acción correspondiente. Finalmente, los actuadores ejecutan las órdenes emitidas y modifican el estado del proceso hidráulico. Este ciclo de control se repite de forma permanente, garantizando una operación estable y adaptada a las necesidades del sistema.

En los últimos años, la arquitectura de los sistemas automatizados ha evolucionado hacia modelos más abiertos e interconectados. La incorporación de redes industriales, protocolos de comunicación como Modbus, Ethernet/IP o PROFINET y tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) ha favorecido la integración de los sistemas de riego con plataformas de supervisión remota, aplicaciones móviles y servicios en la nube. Esta evolución facilita el monitoreo en tiempo real, el análisis histórico de datos y la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, incrementando la eficiencia operativa y la disponibilidad del sistema (Lee et al., 2022).

En el presente proyecto tecnológico, la arquitectura propuesta integra los componentes hidráulicos del sistema de riego por aspersión con un sistema de control basado en PLC, automatizando la apertura y el cierre de las electroválvulas, el control de la bomba y la programación de los ciclos de riego de acuerdo con las necesidades de las áreas verdes de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú. Esta integración representa el fundamento tecnológico de la solución desarrollada y ejemplifica la aplicación de la automatización industrial a la gestión eficiente del agua (Figura 1.5).





Figura 1.5. Arquitectura general de un sistema automatizado de riego por aspersión.

La arquitectura de un sistema automatizado de riego se organiza en diferentes niveles funcionales, cada uno encargado de desempeñar una tarea específica dentro del proceso de control. La integración de estos niveles permite captar información del sistema, procesarla, ejecutar las acciones correspondientes y supervisar el funcionamiento general de la instalación. La Tabla 1.8 resume los principales elementos que conforman esta arquitectura y la función que desempeña cada uno de ellos.

Tabla 1.8. Elementos funcionales de la arquitectura de un sistema automatizado de riego.

Nivel funcional	Elementos principales	Función
Adquisición de datos	Sensores de humedad, presión, caudal, nivel y lluvia	Captar información del proceso.
Control	PLC	Procesar la información y ejecutar la lógica de control.
Ejecución	Electroválvulas, bombas y relés	Ejecutar las órdenes del controlador.
Supervisión	HMI o SCADA	Monitorear, configurar y visualizar el funcionamiento del sistema.

La automatización de los sistemas de riego ha experimentado una evolución significativa durante la última década, impulsada por el desarrollo de las tecnologías digitales, la creciente disponibilidad de sensores inteligentes y la necesidad de optimizar el uso del agua frente a escenarios de escasez hídrica y cambio climático. Si bien los primeros sistemas automatizados se basaban principalmente en temporizadores y controladores programables para ejecutar secuencias predefinidas de riego, la tendencia actual se orienta hacia sistemas inteligentes capaces de analizar información en tiempo real, adaptarse a las condiciones ambientales y apoyar la toma de decisiones mediante herramientas avanzadas de análisis de datos (Liakos et al., 2018).

Uno de los avances más importantes ha sido la incorporación del Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT) en los sistemas de riego. Esta tecnología conecta sensores, controladores, estaciones meteorológicas y dispositivos hidráulicos mediante redes de comunicación que facilitan el intercambio continuo de información. Gracias a esta conectividad, es posible supervisar el estado del sistema desde plataformas web o aplicaciones móviles, acceder a





información en tiempo real y modificar los programas de riego sin necesidad de desplazarse físicamente al lugar de instalación. La integración del IoT incrementa la capacidad de supervisión y favorece una gestión más eficiente de los recursos hídricos, especialmente en instalaciones de gran extensión o distribuidas geográficamente (Jawad et al., 2017).

Otra tendencia relevante es la incorporación de sensores inteligentes capaces de medir variables ambientales y del suelo con altos niveles de precisión. Además de los tradicionales sensores de humedad, actualmente se emplean dispositivos para registrar la temperatura del suelo, la radiación solar, la conductividad eléctrica, la velocidad del viento, la precipitación y la evapotranspiración. La combinación de estas variables proporciona una visión más completa de las necesidades hídricas de la vegetación y hace posible que los programas de riego respondan a las condiciones reales del entorno, en lugar de operar únicamente con horarios preestablecidos. Como resultado, aumenta la eficiencia en la aplicación del agua y disminuye el riesgo de riegos innecesarios.

En los últimos años, la computación en la nube (cloud computing) se ha convertido en un componente fundamental de los sistemas modernos de automatización. Mediante plataformas en la nube es posible almacenar grandes volúmenes de información generados por sensores y controladores, facilitando su análisis histórico, la elaboración de reportes y la supervisión remota de múltiples instalaciones. Estas plataformas también favorecen el intercambio de información entre diferentes usuarios y la administración centralizada de sistemas de riego ubicados en distintas zonas geográficas, mejorando la gestión de la infraestructura hidráulica y simplificando las tareas de mantenimiento.

Paralelamente, la inteligencia artificial (IA) adquiere un papel cada vez más importante en la automatización

del riego. A diferencia de los sistemas tradicionales, que ejecutan reglas previamente definidas, los algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar grandes cantidades de datos históricos y detectar patrones de comportamiento que contribuyen a optimizar la programación del riego. Modelos basados en redes neuronales, árboles de decisión o técnicas de aprendizaje profundo han demostrado un elevado potencial para estimar las necesidades hídricas, predecir el contenido de humedad del suelo y ajustar automáticamente los tiempos de operación del sistema en función de variables climáticas y agronómicas (Benos et al., 2021).

Otra línea de desarrollo corresponde a la integración de los sistemas de riego dentro del paradigma de la Agricultura 4.0, concepto que promueve la utilización de tecnologías digitales para incrementar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción agrícola. Bajo este enfoque, los sistemas automatizados de riego dejan de funcionar como instalaciones independientes y pasan a formar parte de plataformas integradas donde interactúan sensores, drones, imágenes satelitales, sistemas de posicionamiento global (GPS) y herramientas de análisis geoespacial. Esta integración facilita una gestión diferenciada del agua de acuerdo con las características específicas de cada sector del terreno, favoreciendo un aprovechamiento más racional del recurso.

La automatización también evoluciona hacia modelos de mantenimiento predictivo, donde la información generada por sensores y equipos hidráulicos se utiliza para anticipar posibles fallas antes de que afecten la operación del sistema. El monitoreo continuo de variables como la presión, el caudal, el consumo energético o el tiempo de funcionamiento facilita la identificación de anomalías asociadas con fugas, obstrucciones, desgaste de bombas o fallas en electroválvulas, reduciendo los costos de mantenimiento correctivo y mejorando la disponibilidad operativa de la instalación.



Un desarrollo emergente es el uso de los gemelos digitales (*Digital Twins*), representaciones virtuales de sistemas físicos que simulan su comportamiento en tiempo real mediante datos procedentes de sensores instalados en la infraestructura. En los sistemas de riego, esta tecnología facilita la evaluación de diferentes escenarios de operación, la optimización de la programación del riego y el análisis del impacto de posibles modificaciones antes de implementarlas físicamente. Aunque su aplicación aún se encuentra en una etapa de consolidación, diversos estudios la consideran una de las tecnologías con mayor potencial para la gestión inteligente del agua durante los próximos años.

A pesar de estos avances, la adopción de tecnologías de última generación depende de factores como la disponibilidad de infraestructura de comunicaciones, la inversión económica, la capacitación del personal y las necesidades específicas de cada proyecto. En numerosos sistemas de riego para áreas verdes, parques y jardines institucionales, los Controladores Lógicos Programables (PLC) continúan siendo la solución predominante debido a su robustez, confiabilidad, facilidad de programación y amplia experiencia acumulada en aplicaciones industriales. La incorporación progresiva de sensores inteligentes y plataformas de supervisión puede realizarse de manera gradual, aprovechando la flexibilidad de estos controladores para integrarse con nuevas tecnologías.

En el presente proyecto, la automatización se fundamenta en un sistema de control basado en PLC para gestionar el funcionamiento del riego por aspersión en los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú. Esta solución ofrece un nivel de automatización confiable y escalable que optimiza la operación del sistema y, al mismo tiempo, mantiene abierta la posibilidad de incorporar en el futuro tecnologías como el monitoreo remoto, los sensores inteligentes, las plataformas IoT

o las herramientas de inteligencia artificial. Con ello, el proyecto responde a las necesidades actuales de la institución y se mantiene alineado con las tendencias internacionales orientadas hacia una gestión más eficiente, sostenible e inteligente del recurso hídrico (Figura 1.6).



Figura 1.6. Evolución tecnológica de la automatización aplicada al riego.

La evolución de las tecnologías digitales ha impulsado el desarrollo de soluciones cada vez más avanzadas para la automatización del riego, mejorando la eficiencia operativa, la capacidad de monitoreo y la gestión del recurso hídrico. La incorporación de herramientas

como el Internet de las Cosas, los sensores inteligentes, la inteligencia artificial y los gemelos digitales permite optimizar la toma de decisiones y avanzar hacia sistemas de riego más precisos, conectados e inteligentes. La Tabla 1.9 presenta las principales tendencias tecnológicas y sus aplicaciones en los sistemas automatizados de riego.

Tabla 1.9. Principales tendencias tecnológicas en la automatización del riego.

Tendencia	Característica principal	Aplicación en sistemas de riego
Internet de las Cosas (IoT)	Conectividad entre dispositivos	Supervisión y control remoto
Sensores inteligentes	Medición en tiempo real	Ajuste automático del riego
Computación en la nube	Almacenamiento y procesamiento de datos	Gestión centralizada y análisis histórico
Inteligencia Artificial	Aprendizaje y optimización automática	Predicción de necesidades hídricas
Agricultura 4.0	Integración de tecnologías digitales	Gestión de precisión del recurso hídrico
Gemelos digitales	Simulación del sistema físico	Evaluación y optimización de escenarios

Los componentes constituyen la base funcional de un sistema automatizado de riego, ya que permiten captar información del proceso, ejecutar las acciones de control y supervisar el funcionamiento de la instalación. La integración adecuada de estos dispositivos garantiza una operación confiable, eficiente y segura, favoreciendo la automatización de las tareas de distribución del agua y optimizando el desempeño del sistema en diferentes condiciones de operación. En los apartados siguientes se describen los principales componentes empleados en este tipo de sistemas y las funciones que desempeñan dentro de la arquitectura de control.

- **Controlador Lógico Programable (PLC)**

Un Controlador Lógico Programable (PLC) es un equipo electrónico diseñado para supervisar y automatizar procesos industriales mediante la ejecución de instrucciones previamente programadas. Su función principal consiste en recibir información procedente de sensores, procesarla de acuerdo con una lógica de control y generar órdenes dirigidas a actuadores, como motores, electroválvulas, contactores o sistemas de señalización, con el propósito de ejecutar acciones específicas dentro de un sistema automatizado. Además del control secuencial de equipos y procesos, los PLC incorporan funciones para gestionar temporizadores, contadores, operaciones lógicas, cálculos matemáticos y procesamiento de datos, lo que amplía considerablemente su campo de aplicación en la automatización industrial (Bermeo et al., 2021).

La arquitectura de un PLC está orientada a garantizar un funcionamiento confiable, seguro y continuo, incluso en entornos industriales con elevadas exigencias operativas. A diferencia de los sistemas informáticos de propósito general, estos controladores utilizan un modelo de ejecución determinista que asegura tiempos de respuesta predecibles y favorece la estabilidad de las operaciones de control. Asimismo, disponen de plataformas estandarizadas que facilitan la comunicación con una amplia variedad de dispositivos industriales y favorecen la escalabilidad de las aplicaciones, permitiendo adaptar el sistema a nuevas necesidades sin modificar significativamente su estructura de control (Sehr et al., 2021).

Los avances tecnológicos de los últimos años han ampliado considerablemente las capacidades de estos controladores. En la actualidad, los PLC incorporan mayores prestaciones de procesamiento, comunicación industrial e integración con redes de datos, sistemas de supervisión y tecnologías propias de la Industria 4.0, como el Internet de las Cosas (IoT). Estas capacidades





favorecen la implementación de estrategias avanzadas de control, incluido el control predictivo, además del intercambio de información con plataformas de supervisión y monitoreo. Como resultado, es posible optimizar el desempeño de los procesos industriales, reducir los tiempos de respuesta, incrementar la eficiencia operativa, racionalizar el uso de los recursos y simplificar las labores de monitoreo, diagnóstico y mantenimiento de los sistemas automatizados (Rivero-Contreras et al., 2025).



Figura 1.6. Controlador Lógico Programable.

- **Sensor de humedad**

Un sensor de humedad (Figura 1.7) es un dispositivo electrónico diseñado para determinar de manera indirecta el contenido de agua presente en el suelo mediante la medición de propiedades eléctricas, como la resistencia, la capacitancia o la constante dieléctrica, las cuales varían en función del nivel de humedad existente. La información obtenida es procesada para proporcionar datos confiables que facilitan el monitoreo continuo de las condiciones hídricas del terreno. Gracias a esta capacidad, los sensores de humedad constituyen uno de los principales elementos de los sistemas automatizados de riego, ya que proporcionan la información necesaria para optimizar el uso del agua, mejorar la eficiencia de la aplicación del riego y favorecer una gestión más sostenible del recurso hídrico (Caicedo et al., 2021).

En el contexto de la Agricultura 4.0, estos dispositivos han adquirido una importancia creciente debido a su

capacidad para evaluar en tiempo real la disponibilidad de agua en el suelo. Muchos sensores modernos estiman el contenido de humedad gravimétrica a partir de variaciones en la capacitancia eléctrica, sustituyendo métodos tradicionales de medición que requieren mayor tiempo y esfuerzo. Para garantizar mediciones confiables, es necesario calibrarlos de acuerdo con las características físicas y la textura del suelo donde serán instalados, ya que estos factores influyen directamente en la respuesta del sensor (Picado et al., 2024).

La integración de los sensores de humedad con tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) ha ampliado significativamente sus posibilidades de aplicación. Además de registrar información de manera continua, estos dispositivos pueden transmitir los datos a plataformas de monitoreo remoto, facilitando la supervisión del estado hídrico del suelo desde computadoras o dispositivos móviles. Esta conectividad permite generar alertas automáticas cuando el contenido de humedad alcanza valores críticos, como la capacidad de campo o el punto de marchitez permanente, apoyando la toma de decisiones sobre el momento más adecuado para iniciar o detener el riego y favoreciendo un uso más eficiente del recurso hídrico (Picado et al., 2024).

El desarrollo reciente de materiales avanzados también ha impulsado la evolución de estos dispositivos. Actualmente se investigan sensores fabricados con materiales conductores de alta sensibilidad y estabilidad, capaces de mantener un desempeño confiable bajo diferentes condiciones ambientales. Entre estas innovaciones destacan los sensores elaborados con tintas conductoras obtenidas a partir de materiales carbonosos derivados del procesamiento térmico de residuos agrícolas, los cuales representan una alternativa sostenible para aplicaciones de monitoreo ambiental, agricultura de precisión y otros sectores donde el control de la humedad resulta determinante (Castro et al., 2024).





Figura 1.7. Sensor de humedad y temperatura.

- **Electroválvula**

Una electroválvula (Figura 1.8) es un dispositivo electromecánico diseñado para controlar automáticamente el paso de un fluido mediante la apertura, el cierre o la regulación del flujo dentro de una tubería. Su funcionamiento se basa en la acción de un solenoide que, al recibir una señal eléctrica procedente del sistema de control, desplaza un mecanismo interno encargado de modificar la posición del obturador o carrete, permitiendo o interrumpiendo el paso del fluido. Gracias a este principio de operación, las electroválvulas constituyen uno de los elementos fundamentales de los sistemas automatizados, ya que posibilitan ejecutar las órdenes generadas por el controlador de forma rápida, precisa y repetitiva (Lalaleo, 2025).

La selección de una electroválvula depende de diversos factores, entre ellos el tipo de fluido, la presión de trabajo, la temperatura de operación, el caudal requerido y el nivel de automatización del proceso. Debido a su confiabilidad y versatilidad, estos dispositivos se utilizan ampliamente en sectores como la industria petrolera, energética, de abastecimiento de agua, tratamiento de aguas residuales y sistemas de riego automatizado, donde forman parte de la infraestructura encargada de controlar la distribución de los fluidos.

Desde el punto de vista constructivo, una electroválvula incorpora componentes mecánicos y eléctricos cuya interacción determina su correcto funcionamiento. Entre ellos destacan el solenoide, responsable del accionamiento electromagnético, y el carrete o elemento móvil, encargado de establecer la comunicación entre los diferentes conductos internos del cuerpo de la válvula. Durante la operación, estos componentes están sometidos a esfuerzos mecánicos y eléctricos que pueden ocasionar desgaste o fallas progresivas. Por esta razón, las variaciones en parámetros como la corriente del solenoide o las vibraciones del dispositivo se utilizan cada vez con mayor frecuencia para evaluar el estado operativo de la electroválvula mediante técnicas de monitoreo inteligente y algoritmos de inteligencia artificial, favoreciendo la detección temprana de anomalías y la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo (Yáñez et al., 2021).



Figura 1.8. Electroválvula de solenoide.

- **Electrobomba**

Una electrobomba (Figura 1.9) es un equipo electromecánico diseñado para transportar agua u otros líquidos mediante la conversión de la energía eléctrica en energía hidráulica. Su funcionamiento se inicia cuando un motor eléctrico transmite movimiento al eje y al impulsor de la bomba, el cual incrementa la velocidad del fluido y posteriormente transforma esa



energía en presión, generando el caudal necesario para conducir el líquido de manera eficiente a través de la red de tuberías. Gracias a este principio de funcionamiento, las electrobombas desempeñan un papel fundamental en los sistemas de abastecimiento de agua, riego agrícola, procesos industriales y numerosas aplicaciones domésticas (Ramírez y Sánchez, 2024).

Entre los diferentes tipos de electrobombas, las bombas centrífugas destacan por su diseño relativamente simple, su elevado rendimiento hidráulico y su capacidad para proporcionar un flujo continuo. Estas características han favorecido su amplia utilización en instalaciones agrícolas, industriales y de abastecimiento de agua, donde ofrecen un funcionamiento confiable y una elevada eficiencia operativa. Además, el comportamiento hidráulico de estos equipos puede analizarse mediante herramientas de simulación computacional, lo que facilita la evaluación del flujo interno, la optimización del diseño y la mejora de su desempeño antes de la fabricación o instalación del sistema (Rojas Suárez et al., 2021).

Los avances en la automatización industrial han ampliado las capacidades operativas de las electrobombas mediante su integración con sensores, Controladores Lógicos Programables (PLC), variadores de frecuencia y sistemas de supervisión. Esta integración facilita el monitoreo continuo de las condiciones de operación y el ajuste automático de variables como la presión, el caudal o la velocidad de funcionamiento, incrementando la eficiencia energética, reduciendo el desgaste de los componentes y mejorando la confiabilidad del sistema. La incorporación de fuentes de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica, amplía además las posibilidades de aplicación de estos equipos en sistemas de riego y abastecimiento de agua, favoreciendo soluciones más eficientes y sostenibles para la gestión del recurso hídrico (Botterón et al., 2022; Ramírez y Sánchez, 2024).

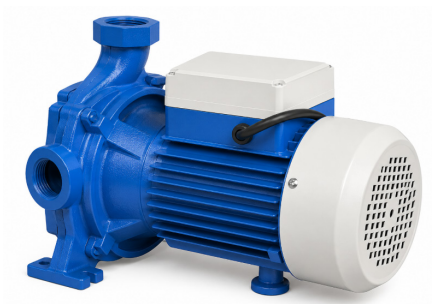


Figura 1.9. Electrobomba centrífuga.

- **HMI (Interfaz hombre máquina)**

Se entiende como un medio de interacción que funciona como una especie de “ventana” del proceso, permite que una persona pueda observar lo que está ocurriendo en una máquina o sistema, y al mismo tiempo realizar ajustes o cambios sobre las variables que se desean controlar. Esta interfaz puede presentarse en equipos especiales como paneles de operador o también en una computadora, donde cumple funciones de supervisión, monitoreo y control. Dicho de forma más simple, el HMI es la herramienta que traduce el lenguaje técnico del sistema a una forma visual, clara y manejable, ayudando al usuario a tomar decisiones rápidas y a operar el proceso con mayor seguridad y precisión (Orbe y Peña, 2023).

Una interfaz hombre-máquina (HMI) constituye el punto de enlace tecnológico mediante el cual un operador humano puede observar el estado de un proceso o equipo y, al mismo tiempo, emitir órdenes de control sobre él. En aplicaciones de banco de pruebas y validación experimental, este tipo de interfaz suele integrarse mediante pantallas táctiles que traducen variables físicas, como velocidad, sentido de giro o condiciones de falla, en representaciones gráficas comprensibles para el usuario. Su propósito principal es reducir la complejidad técnica del sistema subyacente (Figura 1.10); permitiendo que tanto especialistas como estudiantes interactúen con equipos industriales

de manera segura, intuitiva y eficiente (Aguila Pérez et al., 2025).



Figura 1.10. Interfaz Hombre-Máquina (HMI, Human-Machine Interface).

- **Interruptores**

Los interruptores son dispositivos de maniobra y protección (Figura 1.11) utilizados en los sistemas eléctricos para controlar el paso de la corriente mediante la apertura o el cierre de un circuito. Su función principal es garantizar una operación segura de las instalaciones, permitiendo desconectar el suministro cuando se presentan anomalías como sobrecargas, cortocircuitos o fugas de corriente, evitando así daños en los equipos y riesgos para las personas. Además, contribuyen a la confiabilidad y continuidad del servicio eléctrico, facilitan las labores de mantenimiento y mejoran la seguridad de las instalaciones residenciales, comerciales e industriales al reducir la probabilidad de accidentes eléctricos (Rodríguez, 2023).

Los interruptores de potencia (como los IGBT y diodos) constituyen los componentes fundamentales de los sistemas conmutados. De acuerdo con el documento, la naturaleza operativa de estos elementos genera fluctuaciones no deseadas en las señales de corriente y voltaje. Para mitigar el impacto de este fenómeno en los entornos de simulación digital, los interruptores se representan mediante un enfoque matemático denominado “modelo promedio”

Esta metodología se enfoca de manera exclusiva en las propiedades de conmutación de los interruptores, aislando su comportamiento del resto de la topología circuital. La función principal de esta abstracción es suprimir las ondas de alta frecuencia provocadas por el parpadeo de apertura y cierre, logrando retener con precisión la dinámica transitoria lenta del sistema. En consecuencia, los interruptores dejan de operar bajo funciones lógicas binarias y pasan a ser modelados como fuentes dependientes de tensión y corriente. Esto optimiza drásticamente el rendimiento informático, reduciendo los tiempos de procesamiento en microredes hasta en un 99.78% (Benavidez et al., 2024).

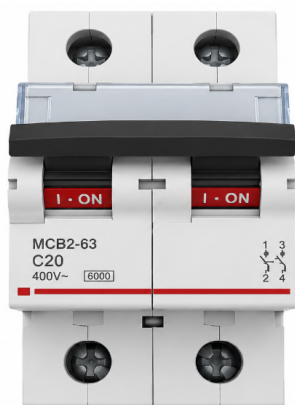


Figura 1.11. Interruptor termomagnético bipolar.

- **Relé térmico**

Con base en el documento que usted proporcionó, la definición indica que el relé térmico (Thermal Overload Relay - TOR) es un dispositivo de protección (Figura 1.12) que opera mediante el calentamiento de un elemento bimetalico producido por el paso de la corriente eléctrica. Cuando la corriente supera el valor ajustado durante un tiempo determinado, el bimetálico se deforma y activa el mecanismo de disparo, interrumpiendo el funcionamiento del motor para evitar daños por sobrecarga. Además, el tiempo de actuación depende de la magnitud de la corriente y del valor de

calibración establecido, lo que permite adaptar su respuesta a las condiciones de operación del equipo. Por ello, el relé térmico constituye un elemento esencial para incrementar la seguridad, proteger los motores eléctricos y prolongar la vida útil de los sistemas industriales automatizados (Tripus, 2025).

El relé térmico es un dispositivo de protección diseñado para resguardar los motores eléctricos frente a condiciones de sobrecarga que podrían afectar su funcionamiento o provocar daños permanentes. Su principio de operación se basa en la respuesta térmica de un elemento bimetálico que se deforma cuando la corriente supera el valor ajustado durante un tiempo determinado. Cuando esto ocurre, el mecanismo de disparo abre el circuito de mando e interrumpe el funcionamiento del motor antes de que el incremento de temperatura ocasione daños en los devanados. Para asegurar una protección eficiente, el relé debe calibrarse de acuerdo con la corriente nominal del motor y las características de la carga. De este modo, se reduce el riesgo de fallas, se mejora la seguridad del sistema y se prolonga la vida útil de los equipos eléctricos (Puspita y Darmawan, 2023).



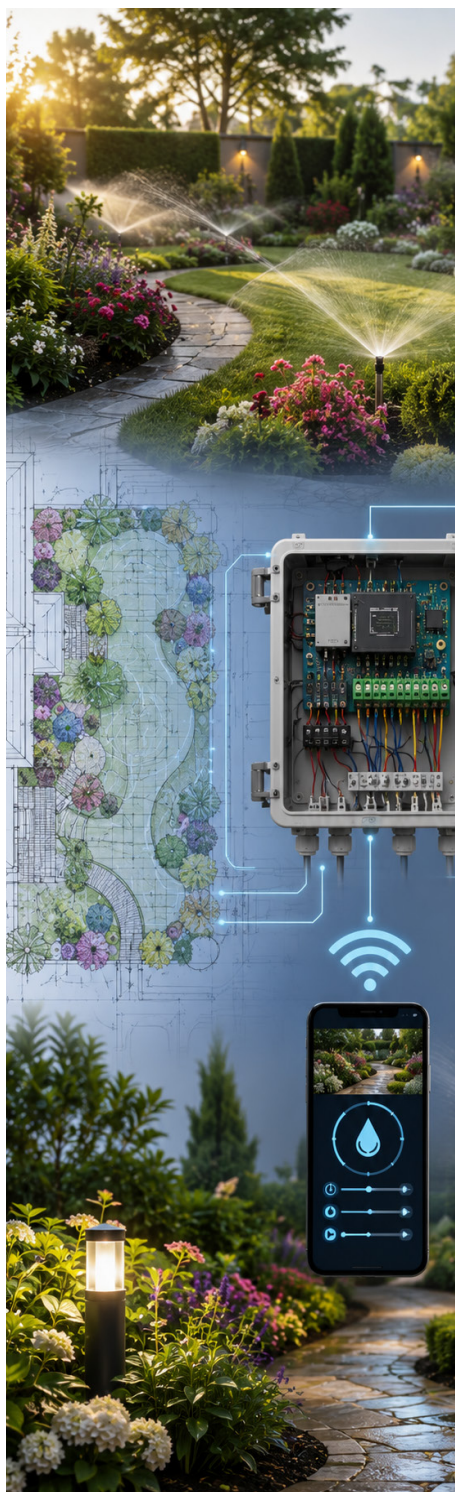
Figura 1.12. Relé térmico utilizado en sistemas automatizados de riego.

establecer que la gestión eficiente del agua constituye un elemento esencial para responder a los desafíos asociados con la creciente demanda del recurso, la variabilidad climática y la necesidad de fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de producción y de las áreas verdes. En este contexto, la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y los indicadores internacionales de eficiencia proporcionan un marco de referencia para orientar el aprovechamiento responsable del agua y respaldar la toma de decisiones basada en criterios técnicos.

El estudio de los métodos de riego y de los principios hidráulicos evidenció que la selección de un sistema de riego debe fundamentarse en las características del terreno, la vegetación, la disponibilidad del recurso hídrico y los requerimientos operativos del proyecto. Para el caso analizado, el riego por aspersión representa una alternativa técnicamente adecuada por su capacidad para proporcionar una distribución uniforme del agua y por su compatibilidad con sistemas de automatización y control.

Finalmente, la revisión de los componentes hidráulicos, eléctricos y de automatización permitió identificar las bases técnicas necesarias para el diseño de un sistema de riego automatizado. La integración de sensores, controladores lógicos programables, actuadores e interfaces de supervisión favorece un control más preciso del proceso de riego, contribuyendo al uso racional del agua y proporcionando el soporte tecnológico para el desarrollo e implementación del sistema presentado en los capítulos siguientes.





02.

Diseño, integración y control del sistema automatizado de riego por aspersión

2.1. Diseño técnico y selección de los componentes del sistema

El diseño técnico constituye la etapa fundamental para el desarrollo de un sistema automatizado de riego por aspersión, ya que establece la arquitectura funcional que integra los subsistemas hidráulico, eléctrico y de control en una infraestructura capaz de operar de manera coordinada, eficiente y segura. En esta fase se definen la configuración general del sistema, la interrelación entre sus componentes y los criterios de selección de los equipos responsables de la captación, impulsión, distribución y control del agua, garantizando que cada elemento contribuya al cumplimiento de los requerimientos hidráulicos y de automatización del proceso.

La arquitectura propuesta (Figura 2.1) comprende el recorrido completo del agua desde el reservorio hasta su aplicación mediante aspersores, así como el flujo de información que permite supervisar continuamente las condiciones de humedad del suelo y regular automáticamente el funcionamiento del sistema. Para ello, se integran un sensor de humedad del suelo, un Controlador Lógico Programable (PLC), una electrobomba, una electroválvula y una interfaz Hombre-Máquina (HMI), cuyos procesos de adquisición de datos, procesamiento de señales y accionamiento de los dispositivos de campo permiten ejecutar el riego únicamente cuando las condiciones de operación así lo requieren.

Desde una perspectiva funcional, el diseño técnico no se limita a la disposición física de los componentes, sino que establece la estrategia de integración entre los elementos hidráulicos, eléctricos y electrónicos que intervienen en el sistema. Esta concepción garantiza la transmisión eficiente de energía, agua e información entre los diferentes subsistemas, favoreciendo la optimización del recurso hídrico, la reducción de la intervención manual, el incremento de la confiabilidad operativa y la mejora de la eficiencia del riego en los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú.



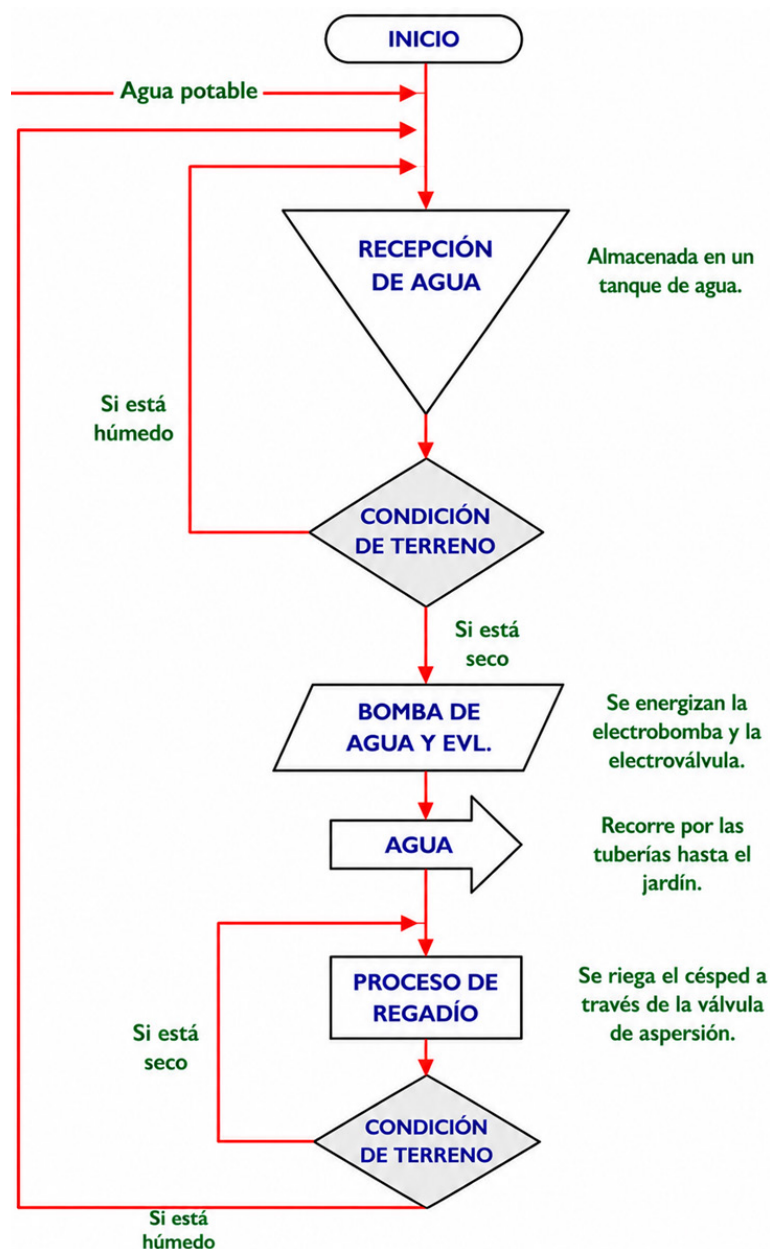


Figura 2.1. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema automatizado de riego por aspersión.

• Plano eléctrico

El plano eléctrico constituye el documento técnico que define la arquitectura de los circuitos eléctricos y de

control del sistema automatizado de riego por aspersión. Su función es representar de forma normalizada la interconexión de los dispositivos eléctricos, electrónicos y de automatización que intervienen en el proceso, proporcionando la información necesaria para la construcción, operación, mantenimiento y ampliación de la instalación.

En este plano se identifican los circuitos de alimentación, protección, mando y potencia, así como las relaciones funcionales entre la fuente de energía, el Controlador Lógico Programable (PLC), el contactor, el relé térmico, la electrobomba, la electroválvula, los sensores de humedad del suelo, los pulsadores de marcha y parada y los diferentes dispositivos de protección eléctrica. Del mismo modo, se especifican el recorrido del cableado, la asignación de las entradas y salidas del PLC, la identificación de los conductores y la distribución de los distintos niveles de tensión empleados durante la operación del sistema.

La elaboración del plano (Figura 2.2) responde a los criterios establecidos por las normas internacionales de representación de instalaciones eléctricas, lo que favorece la correcta interpretación de los esquemas, facilita el montaje del tablero de control y simplifica las labores de inspección, mantenimiento y diagnóstico de fallas. Asimismo, constituye una herramienta fundamental para futuras modificaciones o ampliaciones de la instalación, al ofrecer una representación clara y organizada de todas las conexiones eléctricas y de control.

En el sistema automatizado de riego por aspersión implementado en la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú, el plano eléctrico asegura la integración funcional entre los circuitos de potencia, mando y control, garantizando una operación segura, confiable y eficiente de los equipos que intervienen en el proceso de automatización (Tabla 2.1).



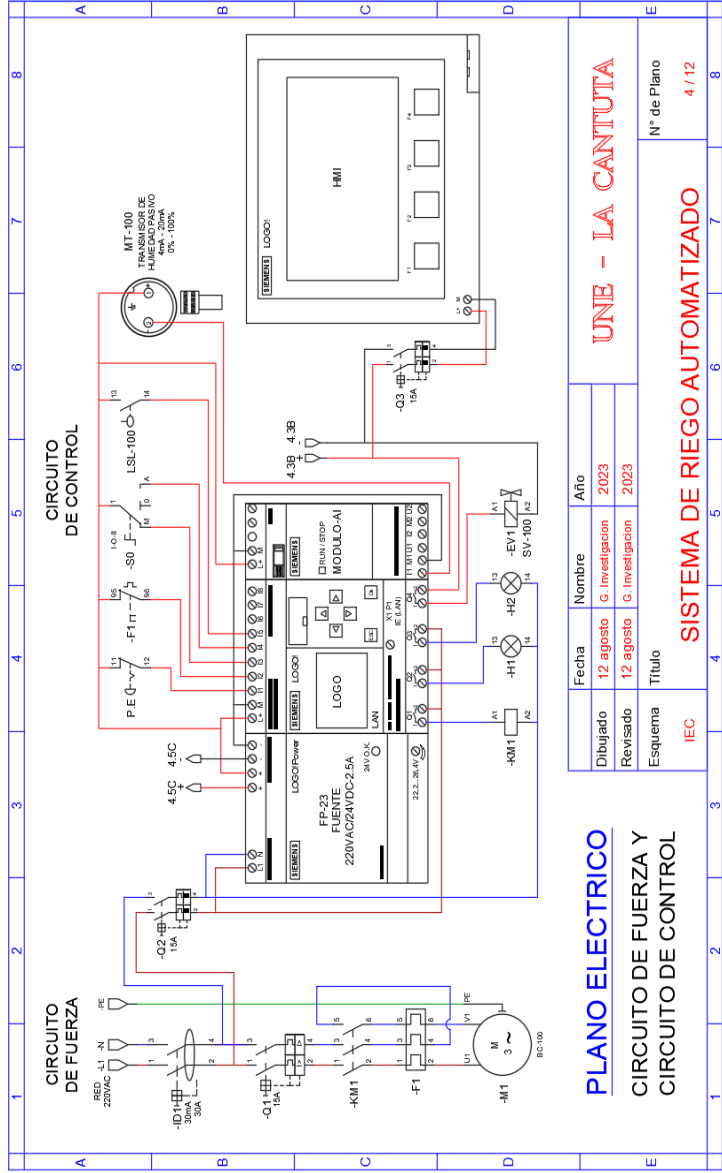


Figura 2.2. Plano eléctrico del sistema automatizado de riego por aspersión.

Tabla 2.1. Componentes del tablero eléctrico de control.

Elemento	Función	Especificaciones técnicas
Gabinete metálico	Aloja y protege todos los dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema de control.	Gabinete metálico con grado de protección IP54; montaje mural; puerta con cerradura; placa de montaje galvanizada.
Interruptor termomagnético	Protege el circuito contra cortocircuitos y sobrecorrientes.	Monofásico, 220 VAC, 2 polos, corriente nominal según la carga instalada (6–10 A), curva C.
Fuente de alimentación	Convierte la tensión de la red en 24 VDC para alimentar el PLC y los dispositivos electrónicos.	Entrada 220 VAC; salida 24 VDC; corriente de salida 2 A; protección contra sobrecarga y cortocircuito.
PLC Siemens S7-1200	Ejecuta la lógica de control del sistema automatizado de riego.	CPU S7-1200; alimentación 24 VDC; entradas y salidas digitales integradas; comunicación PROFINET; programación mediante TIA Portal.
Contactor	Conmuta la alimentación de la electrobomba de acuerdo con la orden emitida por el PLC.	Bobina 24 VDC; contactos de potencia para motor de 0,5 HP; montaje en riel DIN.
Relé térmico	Protege la electrobomba frente a sobrecargas prolongadas.	Rango de ajuste 0–5 A; rearme manual y automático; clase de disparo 10.
Transformador 220/24 VAC	Suministra alimentación a la electroválvula.	Entrada 220 VAC; salida 24 VAC; capacidad aproximada de 30 VA.
Borneras de conexión	Facilitan la distribución y organización del cableado eléctrico.	Borneras para conductores de 2,5 mm ² ; montaje en riel DIN; identificación mediante marcadores.





Elemento	Función	Especificaciones técnicas
Pulsador de marcha (START)	Permite iniciar manualmente el funcionamiento del sistema.	Contacto normalmente abierto (NA); color verde; diámetro de montaje 22 mm; tensión de control 24 VDC.
Pulsador de parada (STOP)	Permite detener manualmente el funcionamiento del sistema.	Contacto normalmente cerrado (NC); color rojo; diámetro de montaje 22 mm; tensión de control 24 VDC.
Parada de emergencia	Detiene inmediatamente el sistema ante una condición de riesgo.	Pulsador tipo seta; enclavamiento mecánico; contacto NC; diámetro 22 mm; color rojo con fondo amarillo.
Selector Manual/Automático	Permite seleccionar el modo de operación del sistema.	Selector de dos posiciones mantenidas; contactos NA/NC; tensión de control 24 VDC.
Lámparas piloto	Indican el estado operativo del sistema y de los equipos.	LED de 22 mm; alimentación 24 VDC; colores verde (operación), amarillo (advertencia) y rojo (falla).
Canaletas y riel DIN	Organizan y soportan los dispositivos y el cableado dentro del tablero.	Riel DIN de 35 mm; canaletas ranuradas de PVC autoextinguible.

Diseño hidráulico

El diseño hidráulico constituye una de las etapas fundamentales en el desarrollo del sistema automatizado de riego por aspersión, ya que comprende el dimensionamiento y la integración de los componentes responsables del transporte y la distribución del agua desde la fuente de abastecimiento hasta los emisores. Su propósito es garantizar que cada aspersor opere bajo las condiciones de caudal y presión requeridas para proporcionar una aplicación uniforme del agua sobre el área de riego, minimizando pérdidas hidráulicas, sobrepresiones y deficiencias en la distribución.

En el sistema automatizado implementado en los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú, el suministro de agua se realiza desde un reservorio mediante una electrobomba monofásica de 0,5 HP, seleccionada en función de su capacidad para proporcionar un caudal máximo aproximado de 35 L/min, suficiente para satisfacer los requerimientos de la red hidráulica diseñada. El funcionamiento de la electrobomba es gobernado por un Controlador Lógico Programable (PLC), el cual procesa continuamente la información suministrada por los sensores de humedad del suelo y activa el sistema únicamente cuando el contenido de humedad desciende por debajo del valor de referencia previamente establecido.

La conducción del agua se efectúa a través de una red de tuberías de PVC para conducción a presión, seleccionadas por su elevada resistencia a la corrosión, baja rugosidad interna, facilidad de instalación y reducido requerimiento de mantenimiento. El dimensionamiento de las tuberías considera el caudal de diseño y las pérdidas de carga admisibles, con el propósito de mantener una presión adecuada en toda la instalación y asegurar el funcionamiento óptimo de los aspersores.

El control del flujo hidráulico se realiza mediante una electroválvula alimentada a 24 VAC, instalada aguas abajo de la electrobomba. Este dispositivo regula automáticamente la apertura y el cierre del paso del agua de acuerdo con las señales emitidas por el PLC, permitiendo que el suministro hidráulico se produzca únicamente durante los ciclos de riego programados. La operación sincronizada entre la electrobomba y la electroválvula optimiza el aprovechamiento del recurso hídrico y evita consumos innecesarios de agua.

La aplicación del agua sobre el área de riego se lleva a cabo mediante aspersores distribuidos estratégicamente para lograr una adecuada





superposición de sus áreas de cobertura y maximizar la uniformidad de riego. La separación entre los emisores se establece considerando su radio de alcance, el caudal de descarga y la presión de operación especificada por el fabricante, criterios que favorecen una distribución homogénea del agua y reducen la aparición de zonas con déficit o exceso de humedad.

El sistema hidráulico se complementa con diversos accesorios, entre los que se incluyen válvulas de paso, tees, codos, uniones y adaptadores, cuya función consiste en interconectar los diferentes elementos de la instalación, facilitar las operaciones de mantenimiento y disminuir las pérdidas de carga localizadas. En conjunto, el diseño hidráulico proporciona la infraestructura necesaria para garantizar una distribución eficiente y uniforme del agua, constituyendo el soporte físico sobre el cual opera el sistema de control automatizado implementado para el riego de los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú.

La electrobomba constituye el elemento encargado de proporcionar la energía hidráulica necesaria para impulsar el agua desde el reservorio hacia la red de distribución del sistema automatizado de riego por aspersión. Su selección responde al análisis de los requerimientos hidráulicos del sistema, considerando el caudal demandado por los aspersores, la presión de operación y las pérdidas de carga generadas a lo largo de las tuberías y accesorios. Estos criterios garantizan que el suministro de agua se realice bajo las condiciones necesarias para mantener un funcionamiento eficiente y uniforme de la instalación.

En el sistema desarrollado se empleó una electrobomba monofásica de 0,5 HP, seleccionada por su capacidad para proporcionar un caudal máximo aproximado de 35 L/min, suficiente para abastecer la superficie de riego diseñada (Figura 2.3 y 2.4). Su operación es gobernada por el Controlador Lógico Programable

(PLC), el cual, mediante el accionamiento de un contactor, controla automáticamente los ciclos de encendido y apagado de acuerdo con la información suministrada por los sensores de humedad del suelo. Esta estrategia de control permite optimizar el consumo de agua y energía, reducir la intervención manual y garantizar un funcionamiento confiable del sistema de riego. Las principales especificaciones técnicas de la electrobomba utilizada se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la electrobomba utilizada en el sistema automatizado de riego por aspersión.

Característica	E s p e c i f i - cación
Tipo de alimentación	Monofásica
Tensión nominal	220–240 VAC
	
m	
n	
450 VAC	

Figura 2.3. Electro­bomba periférica monofásica empleada en el sistema de riego.



Figura 2.4. Capacitor permanente CBB60 de 6 µF y 450 VCA utilizado en la electrobomba del sistema de riego.



• **Electroválvula**

La electroválvula constituye el dispositivo electromecánico responsable de regular automáticamente el flujo de agua dentro del sistema hidráulico del riego por aspersión. Su funcionamiento se basa en el accionamiento de una bobina alimentada con una tensión de 24 VAC, cuya energización es controlada por el Controlador Lógico Programable (PLC) a partir de la información suministrada por los sensores de humedad del suelo. Esta estrategia de control permite abrir o cerrar el paso del agua de manera automática, garantizando que el riego se realice únicamente cuando las condiciones de humedad del terreno así lo requieren.

La incorporación de este componente incrementa la precisión del proceso de riego al sincronizar el suministro de agua con el funcionamiento de la electrobomba, evitando consumos innecesarios y favoreciendo un aprovechamiento más eficiente del recurso hídrico. Asimismo, su reducido tiempo de respuesta, elevada confiabilidad operativa y bajo requerimiento de mantenimiento contribuyen a optimizar el desempeño del sistema automatizado, eliminando la necesidad de intervención manual durante las operaciones de apertura y cierre del circuito hidráulico.

La electroválvula empleada en el sistema funciona con una tensión nominal de alimentación de 24 VAC y recibe energía a través de un transformador AC/AC con una entrada de 230 VAC y una corriente de entrada de 100 mA (Figura 2.5 y 2.6); proporcionando una salida de 24 VAC y 650 mA para el accionamiento de la bobina. Estas características garantizan una alimentación eléctrica estable y compatible con el sistema de control, asegurando una respuesta rápida y confiable durante los ciclos de apertura y cierre del circuito hidráulico.





Figura 2.5. Electroválvula utilizada para el control automático del riego.



Figura 2.6. Transformador de alimentación AC/AC de 24 VCA para sistemas de riego.

• Aspersores

Los aspersores constituyen los elementos emisores del sistema hidráulico y son responsables de aplicar el agua sobre la superficie de riego mediante un patrón de lluvia artificial que favorece una distribución uniforme de la humedad en el suelo. Su selección se fundamenta en criterios técnicos como el área de cobertura, la presión de operación, el caudal de descarga, el radio de alcance y la uniformidad de aplicación, con el

propósito de garantizar una adecuada dotación de agua en toda la superficie irrigada.

La disposición espacial de los aspersores se establece de manera que sus áreas de cobertura se superpongan adecuadamente, reduciendo la formación de zonas con déficit o exceso de humedad y mejorando la eficiencia de aplicación del agua. Esta configuración favorece un aprovechamiento más racional del recurso hídrico y contribuye a mantener condiciones homogéneas de humedad en el terreno.

La operación de los aspersores se encuentra integrada (Figura 2.7) al sistema de control automatizado, de modo que el suministro de agua se produce únicamente cuando el Controlador Lógico Programable (PLC) activa simultáneamente la electrobomba y la electroválvula, de acuerdo con la información proporcionada por los sensores de humedad del suelo. Esta estrategia de operación optimiza el consumo de agua, incrementa la eficiencia del sistema de riego y reduce la necesidad de intervención manual durante el funcionamiento de la instalación.



Figura 2.7. Aspersores.

• Tuberías de distribución

Las tuberías constituyen la infraestructura hidráulica encargada de conducir el agua desde la electrobomba hasta los aspersores (Figura 2.8); garantizando el suministro del caudal y la presión requeridos para el adecuado funcionamiento del sistema de riego por aspersión. Su diseño hidráulico contempla criterios técnicos como el diámetro nominal, la longitud de los tramos, el material de fabricación y las pérdidas de carga distribuidas y localizadas, con el propósito de optimizar el comportamiento hidráulico de la instalación y reducir el consumo energético asociado al bombeo.

En este sistema se emplean tuberías de policloruro de vinilo (PVC) para conducción a presión, seleccionadas por su elevada resistencia a la corrosión, baja rugosidad interna, facilidad de instalación, reducido peso y mínimos requerimientos de mantenimiento. Estas características contribuyen a disminuir las pérdidas por fricción y a prolongar la vida útil de la red hidráulica.

Un dimensionamiento adecuado de las tuberías permite mantener una presión de servicio uniforme en todos los puntos de la instalación, evitando caídas excesivas de presión que puedan afectar el desempeño de los aspersores. Como resultado, se favorece una distribución homogénea del agua, se incrementa la eficiencia hidráulica del sistema de riego y se optimiza el aprovechamiento del recurso hídrico.



Figura 2.8. Instalación de la red hidráulica del sistema automatizado de riego por aspersión.



- **Accesorios hidráulicos**

Los accesorios hidráulicos comprenden elementos como codos, tees, uniones, adaptadores, válvulas de paso y conectores, cuya función es interconectar los diferentes componentes de la red de tuberías y orientar el flujo del agua de acuerdo con el diseño hidráulico establecido. Aunque constituyen elementos auxiliares de la instalación, su adecuada selección e integración resultan esenciales para garantizar la continuidad hidráulica, la estabilidad mecánica y la confiabilidad operativa del sistema de riego por aspersión.

La selección de estos componentes se realiza considerando criterios técnicos como el diámetro nominal, la presión de trabajo, el tipo de conexión y la compatibilidad con las tuberías y demás elementos de la instalación. Asimismo, deben presentar una adecuada resistencia mecánica y un elevado nivel de hermeticidad para soportar las condiciones de operación sin comprometer el desempeño del sistema.

Una correcta disposición de los accesorios hidráulicos facilita las labores de montaje, inspección, mantenimiento y futuras ampliaciones de la red, además de contribuir a minimizar las pérdidas de carga localizadas y reducir el riesgo de fugas. En conjunto, estos componentes favorecen la eficiencia hidráulica, incrementan la confiabilidad del sistema automatizado y garantizan una distribución adecuada del agua durante los ciclos de riego.

- **Sensor de humedad**

El sensor de humedad del suelo constituye el principal elemento de instrumentación del sistema automatizado de riego, ya que proporciona la variable de proceso utilizada por el sistema de control para determinar las necesidades hídricas del terreno. Su función consiste en medir de forma continua el contenido de humedad del suelo y transmitir esta información al Controlador Lógico Programable (PLC) Siemens S7-1200 mediante

una señal analógica estandarizada de 4–20 mA. Este tipo de señal ofrece una elevada inmunidad al ruido eléctrico y garantiza una transmisión confiable de la información, incluso en instalaciones donde existen perturbaciones electromagnéticas o largas distancias entre el sensor y el controlador.

El principio de funcionamiento del sensor se fundamenta en la variación de las propiedades eléctricas del suelo en función de su contenido de agua, permitiendo estimar el porcentaje de humedad en un rango de medición comprendido entre 0 % y 100 %. La señal analógica recibida por el PLC es acondicionada y escalada para obtener el valor real de humedad del terreno, el cual es comparado continuamente con los valores de referencia establecidos en el programa de control.

En el sistema implementado se establecen umbrales de operación del 35 % para iniciar el riego y del 55 % para finalizarlo, incorporando una banda de histéresis que evita conmutaciones frecuentes de la electrobomba y la electroválvula cuando la humedad del suelo oscila alrededor de los valores de referencia. Esta estrategia de control incrementa la estabilidad operativa del sistema, reduce el desgaste de los componentes electromecánicos y optimiza el consumo de agua y energía durante el proceso de riego.

La integración del sensor de humedad con el PLC (Figura 2.9) permite automatizar completamente la toma de decisiones relacionada con el suministro de agua, eliminando la necesidad de supervisión manual continua y asegurando que el riego se realice únicamente cuando las condiciones del suelo lo requieren. Como resultado, se mejora la eficiencia en el uso del recurso hídrico, se favorece una distribución adecuada de la humedad en el terreno y se garantiza un funcionamiento confiable del sistema automatizado implementado en los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”,



Perú. En la tabla 2.3 se describen las especificaciones técnicas del sensor de humedad del suelo.

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del sensor de humedad del suelo.

Característica	Especificación técnica
Tipo de sensor	Sensor de humedad para suelo
Variable medida	Humedad del suelo
Rango de medición	0 % – 100 %
Señal de salida	4–20 mA (analógica)
Alimentación	24 VDC
Fuente de alimentación	Fuente propia
Tipo de integración	Entrada analógica al PLC Siemens S7-1200
Aplicación	Control automático del sistema de riego por aspersión
Función principal	Medición continua de la humedad del suelo para activar o detener el riego automáticamente
Beneficios	Alta confiabilidad, reducción del consumo de agua, mejora de la eficiencia del riego y automatización del proceso.

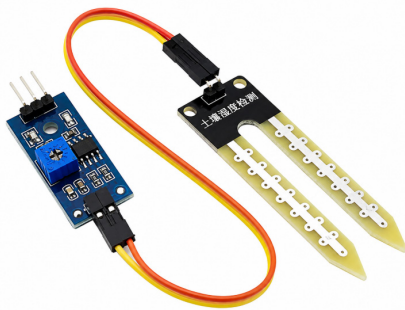


Figura 2.9. Sensor de humedad del suelo utilizado en el sistema de riego automatizado.

En este proyecto de investigación sobre el diseño e implementación de un sistema automatizado de riego por aspersión mediante PLC, y considerando las especificaciones técnicas de los componentes

descritos se realizaron una tabla de selección de componentes de la siguiente manera:

Tabla 2.4. Equipos y especificaciones técnicas del sistema de riego automatizado.

Equipo o dispositivo	Función	Especificaciones técnicas
PLC Siemens S7-1200	Control y automatización del sistema de riego mediante el procesamiento de señales de entrada y la activación de los actuadores.	CPU Siemens S7-1200; alimentación 24 VDC; entradas y salidas digitales integradas; comunicación PROFINET/Ethernet; programación mediante TIA Portal; posibilidad de expansión con módulos de E/S analógicas y digitales.
Sensor de humedad del suelo MT-100	Medición continua del porcentaje de humedad del suelo para determinar el inicio y fin del riego.	Rango 0–100 %; salida 4–20 mA; alimentación 24 VDC; alta precisión.
Electroválvula	Control automático de la apertura y cierre del paso de agua hacia los aspersores.	Alimentación 24 VAC; válvula solenoide de 1 pulgada; transformador 220/24 VAC.
Electrobomba	Impulsión del agua desde el reservorio hacia la red de distribución.	Motor monofásico 220–240 VAC; 0,5 HP; 2,0 A; 3450 rpm; caudal máximo 35 L/min; condensador 6 µF–450 VAC.
Contactor	Maniobra de la electrobomba por orden del PLC.	Bobina 24 VDC; contactos para motor 0,5 HP; montaje en riel DIN.
Relé térmico	Protección del motor contra sobrecargas.	Rango 0–5 A; rearme manual/automático.
Fuente de alimentación	Alimentación del PLC y dispositivos de control.	Entrada 220 VAC; salida 24 VDC; 1,5–2 A.
HMI	Supervisión y operación del sistema.	Pantalla táctil compatible con S7-1200; comunicación Ethernet/PROFINET.

2.2. Construcción e integración del sistema eléctrico e hidráulico

El tablero de control constituye el núcleo de operación del sistema automatizado de riego por aspersión, ya que integra los dispositivos eléctricos, electrónicos, de protección y de maniobra responsables del control, supervisión y accionamiento de los diferentes componentes de la instalación. Su diseño se fundamenta en criterios de seguridad eléctrica, confiabilidad operativa, organización del cableado, facilidad de mantenimiento y posibilidad de ampliación, garantizando un funcionamiento estable y seguro del sistema.

La construcción del tablero se inició con la selección de un gabinete metálico con grado de protección IP54, apropiado para instalaciones expuestas a ambientes con presencia de humedad y partículas de polvo. En su interior se instalaron rieles de montaje tipo DIN destinados a la fijación ordenada de los equipos eléctricos, así como canaletas plásticas ranuradas para el guiado, protección y organización del cableado, favoreciendo la accesibilidad durante las labores de inspección y mantenimiento.

Entre los principales componentes incorporados al tablero se encuentran un interruptor termomagnético general, un contactor para el accionamiento de la electrobomba, un relé térmico ajustable de cero a cinco amperios para la protección del motor frente a sobrecargas, una fuente de alimentación de veinticuatro voltios de corriente continua destinada al suministro eléctrico del Controlador Lógico Programable y de los sensores, un transformador que reduce la tensión de doscientos veinte voltios de corriente alterna a veinticuatro voltios de corriente alterna para alimentar la electroválvula, el Controlador Lógico Programable Siemens LOGO!, borneras de conexión, pulsadores de marcha y parada, un selector de funcionamiento manual y automático, así como lámparas piloto para la señalización del estado operativo del sistema.



El interruptor termomagnético proporciona protección frente a cortocircuitos y sobrecorrientes, mientras que el relé térmico protege el motor contra sobrecargas prolongadas o condiciones de bloqueo mecánico, reduciendo el riesgo de daños en el equipo y aumentando la seguridad de la instalación.

El Controlador Lógico Programable se ubicó en la zona central del tablero con el propósito de facilitar las actividades de programación, inspección y mantenimiento. Asimismo, todas las conexiones eléctricas fueron identificadas mediante códigos alfanuméricos conforme a la norma internacional IEC 81346, permitiendo una rápida localización de los conductores y simplificando las tareas de diagnóstico y mantenimiento.

Las entradas analógicas del controlador reciben la señal estandarizada de cuatro a veinte miliamperios proveniente del sensor de humedad del suelo, mientras que las salidas digitales controlan el funcionamiento del contactor de la electrobomba y de la electroválvula, ejecutando la lógica de control programada para el sistema de riego.

La distribución interna de los componentes se realizó separando físicamente los circuitos de potencia de los circuitos de control, con el objetivo de reducir las interferencias electromagnéticas, mejorar la compatibilidad electromagnética entre los equipos e incrementar la confiabilidad del sistema durante su operación.

Antes de la puesta en servicio del tablero de control se efectuaron pruebas de continuidad eléctrica, resistencia de aislamiento, verificación de polaridad y comprobación del apriete de todas las conexiones, asegurando el correcto funcionamiento de los dispositivos y el cumplimiento de las condiciones de seguridad eléctrica requeridas para la operación del sistema.





La implementación de este tablero de control permitió automatizar el funcionamiento del sistema de riego de los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú. A diferencia del método tradicional, basado en el riego por inundación utilizando el agua proveniente de las acequias que abastecen el campus universitario, la solución propuesta suministra el agua únicamente cuando las condiciones de humedad del suelo así lo requieren. Para ello, los sensores instalados en puntos estratégicos del área verde transmiten continuamente la información al Controlador Lógico Programable, el cual procesa las señales recibidas y gobierna el funcionamiento de la electrobomba y de la electroválvula de acuerdo con los valores de humedad previamente establecidos. Esta estrategia permite optimizar el uso del recurso hídrico, reducir significativamente el desperdicio de agua, disminuir la intervención del personal encargado del riego y garantizar un proceso automatizado, continuo y confiable, ajustado a las necesidades reales de humedad de los jardines.

Una vez concluida la construcción del tablero de control, se procedió a la interconexión eléctrica de todos los dispositivos que conforman el sistema automatizado de riego por aspersión, verificando la correspondencia entre el diseño eléctrico y la disposición física de los equipos. Esta etapa permitió integrar los elementos de potencia, control e instrumentación, garantizando una operación segura, confiable y coordinada del sistema.

La instalación eléctrica se estructuró en dos subsistemas claramente diferenciados: el circuito de potencia y el circuito de control. Esta separación responde a criterios de seguridad eléctrica, compatibilidad electromagnética y facilidad de mantenimiento, además de contribuir a reducir las interferencias entre los diferentes niveles de tensión presentes en la instalación.

El circuito de potencia es el encargado de suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de

la electrobomba. Está constituido por una alimentación monofásica de doscientos veinte voltios de corriente alterna, un interruptor termomagnético para la protección frente a sobrecorrientes y cortocircuitos, un contactor responsable del accionamiento del motor, un relé térmico para la protección contra sobrecargas y el motor monofásico de la electrobomba. Durante la operación del sistema, el Controlador Lógico Programable energiza la bobina del contactor, provocando el cierre de sus contactos principales y permitiendo el suministro de energía al motor de la electrobomba.

Por su parte, el circuito de control opera con tensiones reducidas de veinticuatro voltios de corriente continua y veinticuatro voltios de corriente alterna, destinadas a la alimentación de los dispositivos de automatización y supervisión. Este circuito integra el Controlador Lógico Programable, el sensor de humedad del suelo, los pulsadores de marcha y parada, el selector de funcionamiento manual y automático, la electroválvula y la interfaz hombre-máquina, encargada de supervisar el estado operativo del sistema y facilitar la interacción del usuario con el proceso automatizado.

El sensor de humedad del suelo transmite continuamente al Controlador Lógico Programable una señal analógica estandarizada de cuatro a veinte miliamperios, proporcional al contenido de humedad presente en el terreno. El controlador procesa esta información y la compara con los valores de referencia definidos en la estrategia de control. Cuando la humedad desciende por debajo del umbral establecido, el Controlador Lógico Programable activa simultáneamente la electroválvula y el contactor de la electrobomba, iniciando el suministro de agua hacia la red hidráulica. Por el contrario, cuando el contenido de humedad alcanza el valor programado, el controlador desenergiza ambos dispositivos, interrumpiendo automáticamente el proceso de riego.



La integración de los circuitos de potencia y control permite coordinar de manera eficiente el funcionamiento de todos los componentes del sistema automatizado, garantizando una respuesta oportuna a las variaciones de humedad del suelo, optimizando el consumo de agua y energía, y proporcionando un elevado nivel de confiabilidad durante la operación del sistema de riego por aspersión. La red hidráulica del sistema automatizado de riego por aspersión está integrada por los siguientes componentes, dispuestos según la dirección del flujo del agua (Figura 2.10):



Figura 2.10. Esquema general del funcionamiento de la red hidráulica del sistema de riego automatizado.

El sistema fue diseñado procurando minimizar pérdidas de carga mediante trayectorias cortas y reduciendo el número de accesorios innecesarios. Todas las uniones fueron selladas mediante adhesivo para PVC a presión, evitando fugas de agua durante la operación.

2.3. Programación, supervisión y validación del funcionamiento

La programación del Controlador Lógico Programable constituye el componente central del sistema automatizado de riego por aspersión, ya que define la lógica de control responsable de supervisar las condiciones de humedad del suelo, procesar la información proveniente de los dispositivos de instrumentación y ejecutar las acciones necesarias para garantizar un suministro eficiente del agua. A través del programa desarrollado se coordinan el funcionamiento de la electrobomba, la electroválvula y los dispositivos de supervisión, permitiendo que el sistema opere

de forma autónoma y responda en tiempo real a las variaciones de humedad presentes en el terreno.

El programa de control fue desarrollado bajo una arquitectura modular, lo que facilita su comprensión, mantenimiento y futuras ampliaciones. Esta estructura permite organizar las diferentes funciones del sistema en bloques independientes, encargados de la adquisición de señales, el procesamiento de la información, la toma de decisiones, el accionamiento de los actuadores y la supervisión de las condiciones de seguridad. La modularidad del programa favorece además la localización de posibles fallas, simplifica las tareas de diagnóstico y proporciona mayor flexibilidad para incorporar nuevos dispositivos o estrategias de control sin modificar la estructura general del sistema.

El primer módulo corresponde a la adquisición de datos del sensor de humedad del suelo. El Controlador Lógico Programable recibe continuamente una señal analógica estandarizada de cuatro a veinte miliamperios, emitida por el sensor instalado en el área de riego. Esta señal representa el contenido de humedad del suelo y es procesada mediante un procedimiento de escalamiento que permite convertir la corriente eléctrica en un valor porcentual comprendido entre cero y cien por ciento. La utilización de una señal analógica estandarizada proporciona una elevada inmunidad frente a perturbaciones eléctricas y garantiza una transmisión confiable de la información entre el sensor y el controlador.

Una vez obtenido el valor real de humedad, el programa ejecuta un proceso de comparación con los parámetros de referencia previamente establecidos por el usuario. Para el sistema desarrollado se definieron dos umbrales de operación: un límite inferior correspondiente al treinta y cinco por ciento de humedad, utilizado como condición para iniciar el riego, y un límite superior del cincuenta y cinco por ciento, empleado para finalizar el suministro de agua. La utilización de dos valores de referencia





diferentes incorpora una banda de histéresis que evita el accionamiento repetitivo de la electrobomba y de la electroválvula cuando la humedad oscila alrededor del punto de consigna. Esta estrategia incrementa la estabilidad del sistema, reduce el desgaste de los componentes electromecánicos y prolonga la vida útil de los equipos.

Cuando el contenido de humedad desciende por debajo del umbral inferior, el programa interpreta que existe una demanda de riego y genera las órdenes necesarias para iniciar el proceso de irrigación. En primer lugar, el Controlador Lógico Programable verifica que no existan condiciones de fallo que impidan la operación segura del sistema. Posteriormente activa las salidas digitales destinadas al accionamiento de la electroválvula y del contactor de la electrobomba, permitiendo el paso del agua hacia la red hidráulica y el funcionamiento del sistema de aspersión. Durante todo el ciclo de riego el controlador continúa monitoreando permanentemente la señal del sensor, evaluando las condiciones de humedad del suelo para determinar el momento adecuado de finalizar la operación.

El control de la electrobomba se realiza mediante un contactor gobernado por una salida digital del Controlador Lógico Programable. Cuando el programa detecta la necesidad de riego, energiza la bobina del contactor, provocando el cierre de sus contactos principales y permitiendo el suministro de energía eléctrica al motor monofásico. Esta estrategia evita que el controlador alimente directamente una carga de potencia, incrementando la seguridad eléctrica y garantizando un accionamiento confiable del sistema hidráulico.

De forma sincronizada con la electrobomba, el programa controla el funcionamiento de la electroválvula mediante una segunda salida digital. La apertura de la válvula

únicamente se produce cuando la electrobomba se encuentra en funcionamiento, evitando presiones innecesarias en la red de tuberías y mejorando el comportamiento hidráulico de la instalación. Esta coordinación entre ambos actuadores permite optimizar el consumo de agua, reducir esfuerzos mecánicos sobre los componentes y garantizar una distribución uniforme del caudal hacia los aspersores.

Además de las rutinas de control, el programa incorpora funciones destinadas a garantizar la seguridad operativa del sistema. Entre las principales condiciones supervisadas se encuentran la pérdida o ausencia de señal proveniente del sensor de humedad, las sobrecargas del motor de la electrobomba y la activación del circuito de parada de emergencia. Ante cualquiera de estas situaciones, el Controlador Lógico Programable interrumpe inmediatamente el funcionamiento del sistema, desenergiza los actuadores y genera la correspondiente condición de alarma para informar al operador sobre la anomalía detectada. Estas rutinas de protección contribuyen a preservar la integridad de los equipos, reducir el riesgo de averías y asegurar una operación confiable del sistema automatizado.

Antes de su implementación física, la programación fue sometida a un proceso de validación mediante simulación, verificándose el correcto funcionamiento de la lógica de control, la respuesta de las entradas y salidas, la secuencia de operación de los actuadores y la actuación de las rutinas de protección bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Esta etapa permitió identificar y corregir posibles inconsistencias en el programa antes de su puesta en servicio, garantizando que el sistema respondiera de manera estable y eficiente durante su operación en los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú (Figura 2.11).



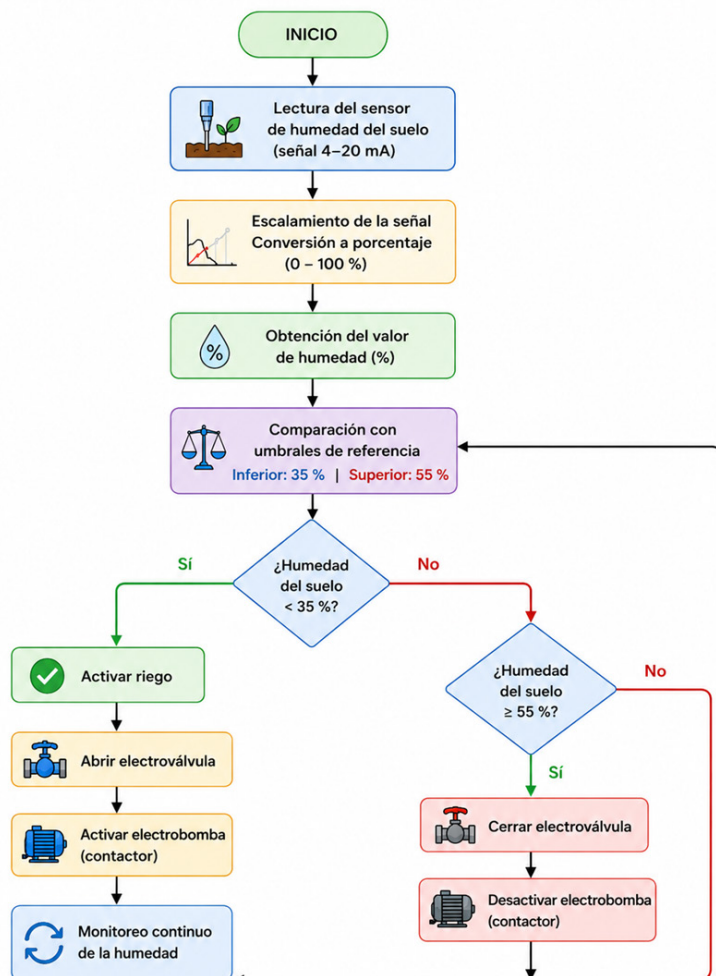


Figura 2.11. Diagrama de flujo de la lógica de funcionamiento del sistema automatizado de riego por aspersión.

La Interfaz Hombre-Máquina constituye el medio de comunicación entre el operador y el sistema automatizado de riego, permitiendo supervisar en tiempo real el estado de funcionamiento de los equipos, visualizar las principales variables del proceso y ejecutar acciones de control sin necesidad de acceder directamente al Controlador Lógico Programable. Su incorporación mejora la interacción entre el usuario

y el sistema, facilita las labores de operación y mantenimiento y contribuye a una gestión más eficiente del proceso de riego.

El diseño de la interfaz se desarrolló bajo criterios de simplicidad, claridad visual y facilidad de operación, procurando que la información relevante pudiera ser interpretada de manera rápida y precisa por el personal responsable del sistema. La distribución de los elementos gráficos se organizó siguiendo una estructura jerárquica que permite identificar de forma inmediata el estado operativo del sistema, reduciendo la probabilidad de errores durante la supervisión y la toma de decisiones.

La pantalla principal concentra la información más importante del proceso de riego, mostrando de forma permanente el porcentaje de humedad del suelo medido por el sensor, el estado de funcionamiento de la electrobomba, la condición operativa de la electroválvula, el modo de funcionamiento seleccionado, las alarmas activas y la fecha y hora del sistema. Esta información proporciona al operador una visión global del comportamiento de la instalación y facilita el seguimiento continuo de las variables que intervienen en el proceso de automatización.

El porcentaje de humedad del suelo constituye la variable principal de supervisión, ya que refleja en tiempo real las condiciones hídricas del terreno y permite verificar el comportamiento del algoritmo de control implementado en el Controlador Lógico Programable. Simultáneamente, la interfaz informa si la electrobomba y la electroválvula se encuentran activadas o desactivadas, permitiendo comprobar que las órdenes generadas por el controlador son ejecutadas correctamente por los actuadores del sistema.

La interfaz incorpora además la posibilidad de seleccionar el modo de funcionamiento manual o automático. En el modo automático, el Controlador





Lógico Programable ejecuta todas las acciones de control de acuerdo con la información suministrada por el sensor de humedad del suelo y con los parámetros de operación previamente establecidos. En el modo manual, el operador puede intervenir directamente sobre los actuadores para realizar pruebas de funcionamiento, inspecciones técnicas o labores de mantenimiento, sin modificar la lógica general del programa de control.

La pantalla de operación manual permite controlar individualmente la electrobomba y la electroválvula mediante comandos de encendido, apagado, apertura y cierre. Esta funcionalidad resulta especialmente útil durante las etapas de puesta en marcha, verificación del sistema y mantenimiento preventivo, ya que facilita la comprobación del correcto funcionamiento de cada dispositivo antes de iniciar la operación automática del sistema de riego.

Con el propósito de adaptar el funcionamiento del sistema a las necesidades específicas del área irrigada, la interfaz dispone de una pantalla de configuración desde la cual es posible modificar los principales parámetros de operación. Entre ellos se incluyen los valores mínimo y máximo de humedad del suelo utilizados como referencia para el inicio y la finalización del riego, así como los tiempos de retardo y protección incorporados en la estrategia de control. Para preservar la integridad del programa y evitar modificaciones no autorizadas, el acceso a esta pantalla se encuentra restringido mediante un sistema de autenticación con contraseña.

Como complemento a las funciones de supervisión y configuración, la Interfaz Hombre-Máquina incorpora una pantalla destinada a la gestión de alarmas. En ella se registran automáticamente la fecha, la hora, el tipo de falla detectada y la duración del evento, generando un historial que facilita las actividades de diagnóstico, mantenimiento preventivo y análisis del

comportamiento del sistema. El almacenamiento de esta información permite identificar fallas recurrentes, evaluar la confiabilidad de los equipos y planificar oportunamente las intervenciones de mantenimiento.

Con el fin de facilitar la interpretación visual del estado operativo del sistema, el diseño de la interfaz emplea una codificación cromática basada en criterios ampliamente utilizados en la automatización industrial. El color verde identifica el funcionamiento normal del sistema; el amarillo señala condiciones de advertencia que requieren atención por parte del operador; el rojo indica la presencia de fallas que demandan una intervención inmediata; mientras que el azul se utiliza para presentar información general del proceso. Esta organización visual favorece una rápida identificación de las condiciones de operación y mejora la interacción entre el operador y el sistema automatizado.

La integración de la Interfaz Hombre-Máquina con el Controlador Lógico Programable proporciona un entorno de supervisión confiable e intuitivo que simplifica las tareas de operación, mantenimiento y configuración del sistema de riego por aspersión. Asimismo, incrementa la seguridad operacional al ofrecer información permanente sobre el estado de los equipos y las variables de proceso, permitiendo una respuesta oportuna ante cualquier condición anómala y contribuyendo a una gestión eficiente del recurso hídrico en los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú.

La lógica de funcionamiento constituye la secuencia operativa mediante la cual el sistema automatizado de riego por aspersión coordina la adquisición de información, el procesamiento de datos y el accionamiento de los diferentes dispositivos eléctricos e hidráulicos para garantizar una aplicación eficiente del agua. Su diseño permite que todas las decisiones relacionadas con el inicio, mantenimiento y finalización del riego sean ejecutadas automáticamente por





el Controlador Lógico Programable, eliminando la necesidad de intervención permanente del operador y asegurando una respuesta inmediata frente a las variaciones de humedad del suelo.

El proceso se inicia con la medición continua del contenido de humedad del suelo mediante el sensor instalado en el área de riego. Este dispositivo transmite al Controlador Lógico Programable una señal analógica estandarizada de cuatro a veinte miliamperios, proporcional al porcentaje de humedad presente en el terreno. Una vez recibida la señal, el controlador ejecuta el proceso de acondicionamiento y escalamiento correspondiente para convertir la corriente eléctrica en una variable expresada en porcentaje, la cual es comparada permanentemente con los valores de referencia establecidos durante la configuración del sistema.

Mientras el contenido de humedad permanezca por encima del umbral mínimo programado, el sistema mantiene el estado de espera, conservando desenergizados la electrobomba y la electroválvula. Durante esta condición el Controlador Lógico Programable continúa supervisando continuamente la información suministrada por el sensor, permitiendo detectar de forma inmediata cualquier variación que requiera el inicio del proceso de riego.

Cuando la humedad del suelo disminuye por debajo del límite inferior establecido, el controlador ejecuta automáticamente la secuencia de puesta en marcha del sistema. Antes de energizar los actuadores, verifica la ausencia de fallas eléctricas, confirma la validez de la señal proveniente del sensor de humedad y comprueba que no exista ninguna condición de alarma que impida el funcionamiento seguro de la instalación. Una vez satisfechas estas condiciones, el programa activa la electroválvula para habilitar el paso del agua hacia la red hidráulica y, tras un breve intervalo de estabilización, energiza el contactor que alimenta el

motor de la electrobomba. Como consecuencia, el agua es impulsada desde el reservorio hacia la tubería principal y distribuida a los aspersores, iniciándose el proceso de irrigación de los jardines.

Durante todo el ciclo de riego el Controlador Lógico Programable mantiene un monitoreo continuo de la humedad del suelo y del estado operativo de los diferentes dispositivos del sistema. Esta supervisión permanente permite adaptar el funcionamiento de la instalación a las condiciones reales del terreno y detectar oportunamente cualquier anomalía que pueda comprometer la seguridad o la eficiencia del proceso. La utilización de una banda de histéresis entre los valores de inicio y finalización del riego evita conmutaciones frecuentes de la electrobomba y de la electroválvula cuando la humedad oscila alrededor del punto de consigna, proporcionando mayor estabilidad al sistema y reduciendo el desgaste de los componentes electromecánicos.

Una vez que la humedad alcanza el valor máximo programado, el Controlador Lógico Programable ejecuta automáticamente la secuencia de parada. En esta etapa se desenergiza el contactor de la electrobomba, se interrumpe el suministro de agua y posteriormente se ordena el cierre de la electroválvula, restableciendo el estado inicial del sistema. Simultáneamente, el controlador registra el evento en la memoria de operación, permitiendo su posterior consulta desde la Interfaz Hombre-Máquina como parte del historial de funcionamiento y mantenimiento.

La lógica de control incorpora además rutinas destinadas a garantizar la seguridad operacional de la instalación. Si durante el funcionamiento se detecta pérdida de señal del sensor de humedad, sobrecarga del motor de la electrobomba, interrupción del suministro eléctrico o activación del sistema de parada de emergencia, el Controlador Lógico Programable interrumpe inmediatamente el proceso de riego,



desenergiza los actuadores y genera la correspondiente condición de alarma en la Interfaz Hombre-Máquina. El sistema permanece bloqueado hasta que la causa de la falla sea identificada y corregida por el operador autorizado, evitando reinicios no controlados que puedan comprometer la integridad de los equipos.

La estrategia de control implementada integra de manera coordinada los sistemas de instrumentación, automatización y supervisión, permitiendo que el riego responda exclusivamente a las necesidades hídricas del suelo. Como resultado, se optimiza el aprovechamiento del recurso hídrico, se reduce el consumo energético asociado al funcionamiento de la electrobomba, disminuye la intervención manual del personal encargado del mantenimiento de las áreas verdes y se incrementa la confiabilidad del proceso. La implementación de esta lógica de funcionamiento constituye el elemento integrador del sistema automatizado desarrollado para los jardines de la Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”, Perú, demostrando la aplicación de tecnologías de automatización industrial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del riego por aspersión.



03.

Operación, validación y mantenimiento del sistema automatizado de riego por aspersión

3.1. Puesta en marcha del sistema automatizado

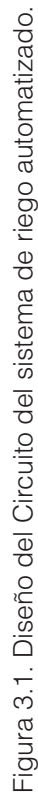
La implementación de sistemas automatizados de riego constituye un avance significativo en la optimización del uso del recurso hídrico y en la modernización de las actividades agrícolas. No obstante, el éxito de estos sistemas no depende únicamente de la incorporación de equipos eléctricos, electrónicos y de control, sino también del establecimiento de procedimientos operativos que garanticen una puesta en marcha segura, ordenada y confiable. En este contexto, el diseño de una secuencia de energización claramente definida resulta indispensable para reducir la posibilidad de errores humanos, proteger la integridad de los equipos y



asegurar la seguridad del personal responsable de la operación y el mantenimiento.

Con este propósito, el procedimiento de puesta en marcha del sistema fue diseñado bajo un enfoque de seguridad por etapas, en el que cada acción ejecutada por el operador activa una respuesta controlada y previamente programada dentro del sistema automatizado. Esta estrategia permite energizar progresivamente los diferentes circuitos eléctricos, verificando el correcto funcionamiento de cada componente antes de habilitar la siguiente etapa del proceso. De esta manera, se minimiza la exposición de los equipos a sobrecorrientes, transitorios de tensión y arranques intempestivos que podrían afectar la estabilidad del sistema de control o reducir la vida útil de sus componentes.

La aplicación rigurosa de este procedimiento garantiza no solo el funcionamiento adecuado del Controlador Lógico Programable, la Interfaz Hombre-Máquina y los dispositivos de potencia, sino también una operación más segura, estable y confiable del sistema automatizado de riego por aspersión. Asimismo, facilita las labores de inspección, supervisión y mantenimiento, contribuyendo a preservar la continuidad operativa de la instalación y a incrementar la confiabilidad del proceso de riego. Las Figuras 3.1 y 3.2 presentan la secuencia general de puesta en marcha del sistema.



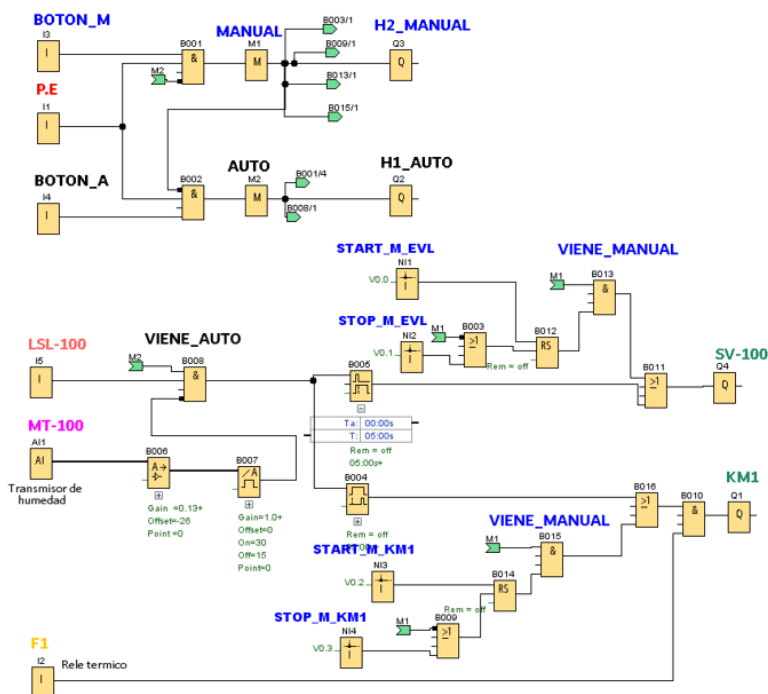


Figura 3.2. Diseño de la programación del control automatizado del sistema de riego por aspersión.

A continuación, se detalla el protocolo paso a paso para el encendido del sistema:

Paso 1: Apertura e inspección visual

Antes de interactuar físicamente con cualquiera de los interruptores de potencia o de control, la primera línea de defensa del operador es una inspección visual minuciosa. Para llevarla a cabo de manera adecuada, se debe realizar la apertura cuidadosa de la puerta frontal del gabinete TC-21. Este paso inicial, aunque parezca sencillo, es sumamente crítico en entornos agrícolas donde factores ambientales como el polvo, el calor extremo o pequeños insectos pueden ingresar al compartimento eléctrico. Durante este reconocimiento



rápido, el encargado de la puesta en marcha debe enfocar su atención en la integridad física de las borneras de conexión, el estado general del PLC Logo de Siemens, y las condiciones estructurales del contactor. Es imperativo confirmar que no existan signos evidentes de sobrecalentamiento en los conductores plásticos, rastros visibles de condensación o humedad acumulada que puedan provocar un cortocircuito catastrófico, o cables que se hayan aflojado debido a las vibraciones mecánicas propias de la instalación. Esta verificación preliminar actúa como un filtro preventivo fundamental que asegura que el sistema se encuentra en un estado físico óptimo antes de recibir cualquier tipo de carga de energía eléctrica (Figura 3.3 y 3.4).

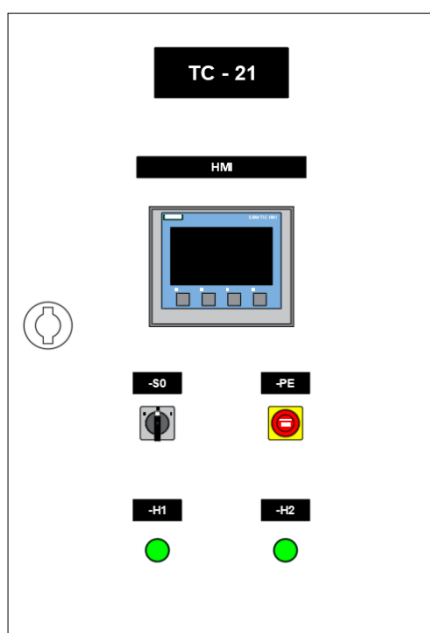


Figura 3.3 Tablero eléctrico TC-21 utilizado para el control del sistema de riego automatizado.



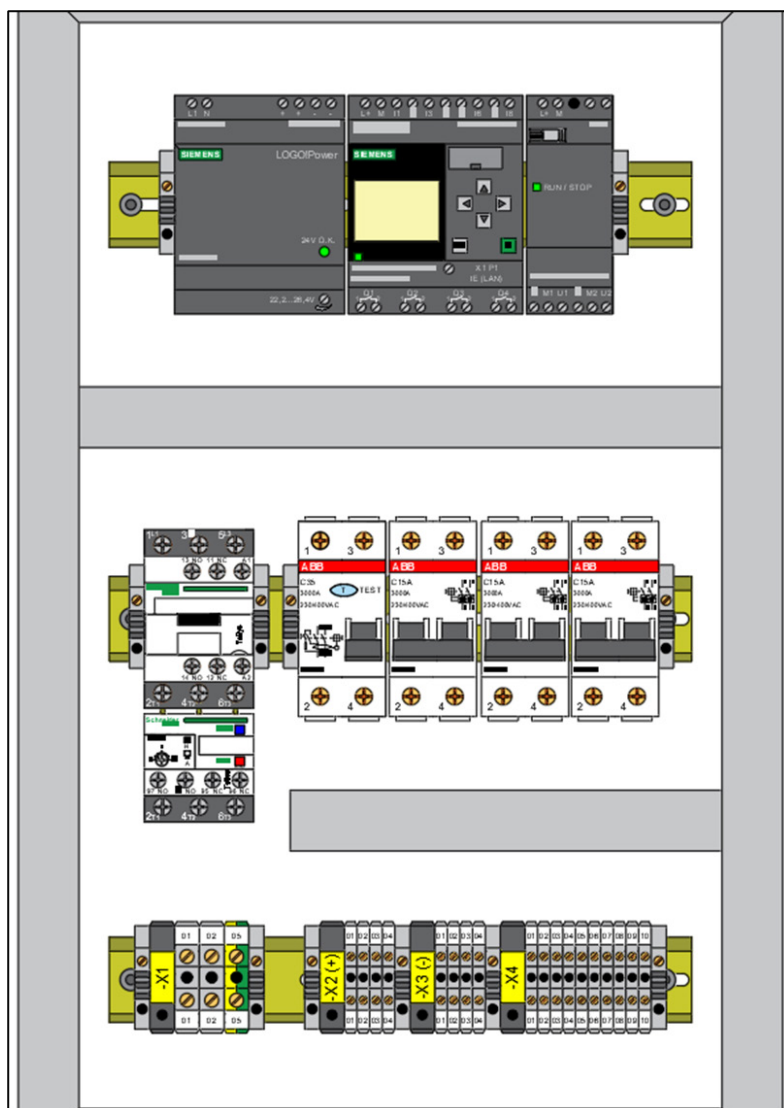


Figura 3.4. Vista interna del tablero TC – 21.

Paso 2: Activación de la barrera de seguridad (-ID1)

Una de las máximas prioridades al operar tableros de control industrial es la protección del operador frente a riesgos eléctricos. Una vez que se ha constatado que el interior del gabinete se encuentra en condiciones óptimas para operar, se da inicio formal a la secuencia de energización activa. En este punto, la seguridad humana se antepone a cualquier función de la máquina, por lo que el primer elemento físico que debe ser accionado es el interruptor diferencial -ID1. Este componente actúa como el escudo protector principal de todo el sistema de riego automatizado. Al elevar manualmente su palanca de activación, no solo estamos permitiendo que la energía eléctrica comience a circular, sino que estamos estableciendo un centinela activo capaz de detectar de inmediato cualquier fuga mínima de corriente o derivación accidental hacia la tierra. Al asegurar este primer nivel de protección contra descargas eléctricas que puedan poner en riesgo la vida del operador, la corriente de 220 VAC se distribuye de manera segura hacia las partes superiores de los disyuntores termomagnéticos -Q1 y -Q2. Esta fase de preparación asegura que cualquier cortocircuito o falla de aislamiento que ocurra más adelante en la cadena sea interceptada y neutralizada antes de que cause daños materiales o lesiones graves al operario (Figura 3.5).



Figura 3.5. Levantar el Interruptor diferencial -ID1.

Paso 3: Habilitación de la fuerza del motor (-Q1)

Con la red eléctrica general debidamente protegida y monitorizada por el interruptor diferencial, el operador procede a dar el siguiente paso lógico en la preparación del sistema: la habilitación de la potencia de bombeo. Esto se consigue mediante el accionamiento del interruptor termomagnético -Q1. Este dispositivo tiene la responsabilidad crucial de gestionar y proteger la línea eléctrica destinada exclusivamente a alimentar la electrobomba monofásica de 0.5 HP, que es el verdadero corazón hidráulico de esta instalación de riego. Al accionar esta llave, el sistema queda con la potencia de fuerza lista y a la expectativa del comando lógico, pero de forma segura y aislada. La elección de una protección dedicada como el -Q1 garantiza que las altas corrientes de arranque que típicamente demandan los motores eléctricos al iniciar su giro no desestabilicen el funcionamiento de los componentes más sensibles del tablero. En caso de que se presente una sobrecarga mecánica en la bomba o una falla en sus bobinados, este disyuntor se disparará de manera independiente, protegiendo la inversión económica que representa el motor sin interrumpir por completo la energía de los sistemas lógicos (Figura 3.6).



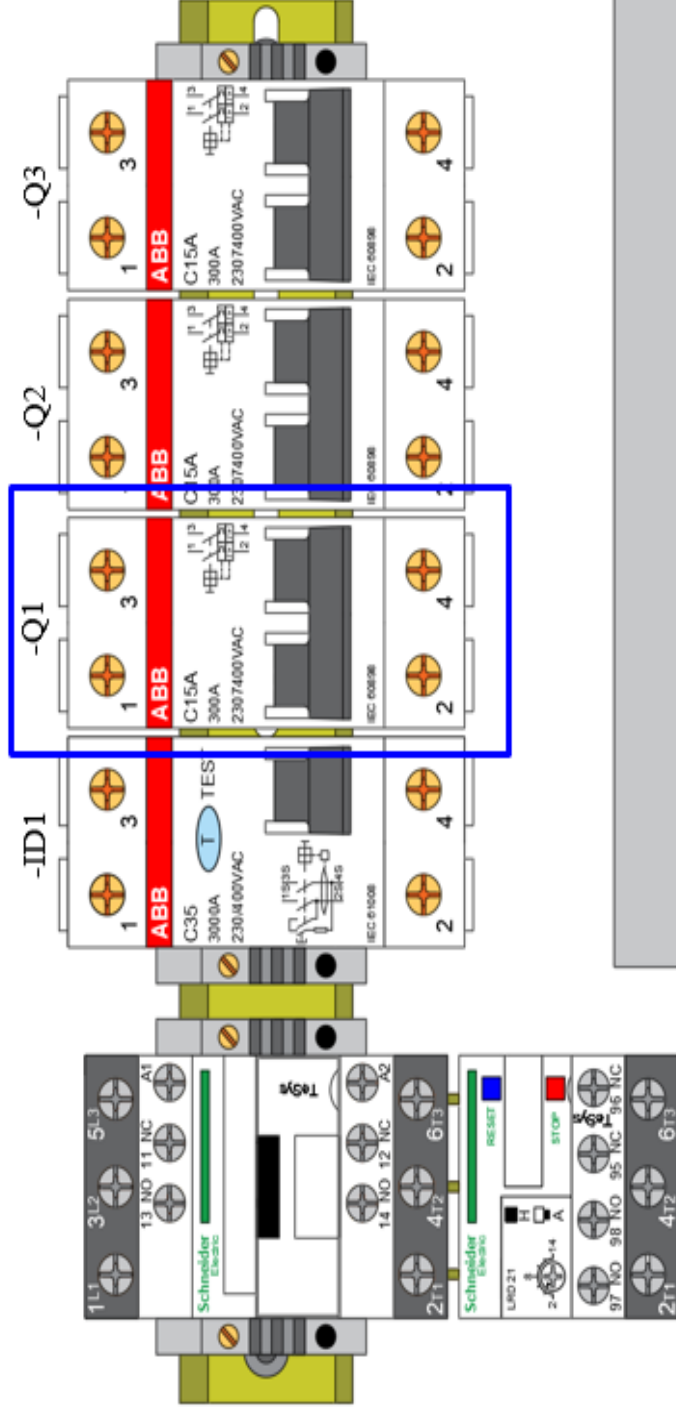


Figura 3.6. Levantar el Interruptor Termomagnético -Q1.

Paso 4: Alimentación del cerebro del sistema (-Q2)

Una vez asegurada la línea de fuerza, el siguiente paso de la secuencia operativa consiste en dar vida al núcleo inteligente del tablero. Para lograr esto, el operador debe levantar la palanca del interruptor termomagnético -Q2. La activación de este disyuntor permite el paso de la corriente alterna de 220 VAC directamente hacia la fuente de alimentación del sistema, la cual se encarga de realizar una transformación y rectificación sumamente precisa para entregar un flujo constante de 24 VDC. Con este voltaje continuo y estabilizado, el cerebro digital del sistema, representado por el Controlador Lógico Programable (PLC) Logo de Siemens, se enciende de forma automática. El operador podrá confirmar visualmente que este paso se ha completado con éxito al observar cómo el indicador luminoso frontal del PLC cambia de estado, señalando que el microprocesador interno ha iniciado su rutina de autodiagnóstico y está ejecutando el programa de riego de manera interna. Esta separación de la alimentación de control mediante el interruptor -Q2 es clave para aislar la electrónica del ruido eléctrico externo (Figura 3.7 y 3.8).



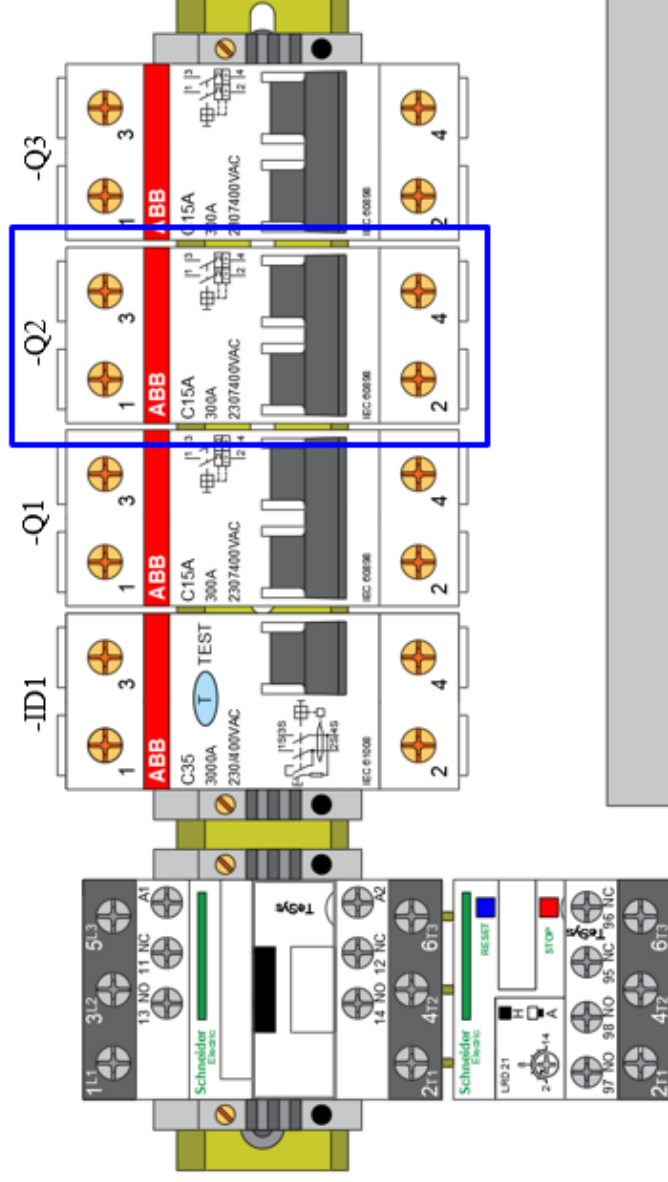


Figura 3.7. Levantar el Interruptor Termomagnético -Q2.

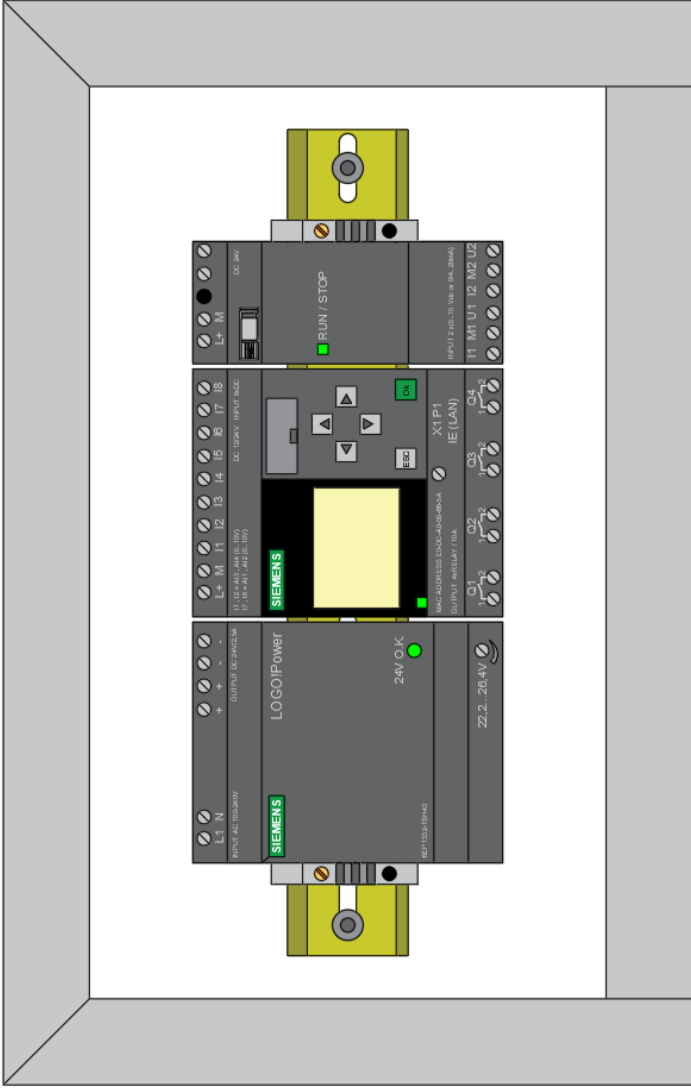


Figura 3.8. Lógico Programable Logo encendido.

Paso 5: Activación de la interfaz visual (-Q3)

Finalmente, el último equipo electrónico necesario para completar la puesta en marcha consiste en establecer el canal de comunicación directa entre el operador humano y el cerebro automatizado del sistema. Esto se consigue mediante el accionamiento del interruptor termomagnético -Q3. Al elevar esta palanca, se suministran los 24 VDC que provienen de la fuente de alimentación hacia la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) de Siemens. Tras un breve periodo de inicialización, la pantalla táctil se encenderá completamente, mostrando al operador el menú de control principal y los diversos parámetros operativos del sistema en tiempo real. A partir de este momento, el usuario tiene el control total en la palma de su mano, pudiendo visualizar alarmas, modificar tiempos de riego o supervisar el estado de los sensores. La habilitación dedicada del -Q3 asegura que la pantalla HMI reciba una corriente de alimentación sumamente limpia y estable, libre de cualquier tipo de interferencia residual generada durante las fases anteriores de la puesta en marcha, garantizando así una respuesta táctil óptima e ininterrumpida durante toda la jornada de trabajo (Figura 3.9 y 3.10).



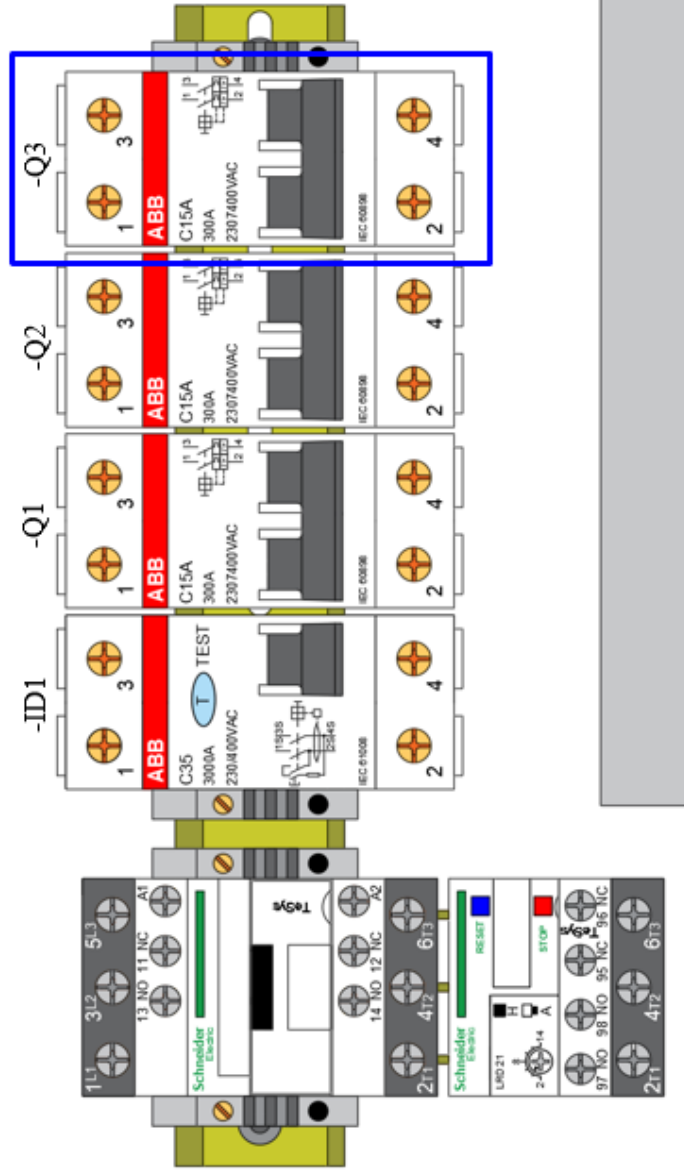


Figura 3.9. Levantar el Interruptor Termomagnético -Q3.



Figura 3.10. Interfaz Hombre-Máquina encendido.

Esta secuencia de energización escalonada, que inicia con el interruptor diferencial de protección y continúa progresivamente con el circuito de potencia del motor, el Controlador Lógico Programable y la Interfaz Hombre-Máquina, responde a un criterio de diseño orientado a garantizar la seguridad y la confiabilidad operativa del sistema. Su implementación permite mitigar los riesgos asociados a perturbaciones eléctricas y asegurar el funcionamiento estable de los dispositivos de control durante la puesta en marcha. Al establecer este orden de activación, se evita que los transitorios de tensión y los picos de corriente generados durante el arranque del motor afecten el desempeño del Controlador Lógico Programable o provoquen reinicios inesperados de la Interfaz Hombre-Máquina. Asimismo, esta secuencia garantiza que, al iniciar la ejecución del programa de control, todos los dispositivos de protección se encuentren plenamente operativos y que los sensores realicen su proceso inicial de verificación y calibración.

en un entorno eléctrico estable y libre de interferencias electromagnéticas, favoreciendo así un funcionamiento seguro, confiable y continuo del sistema automatizado de riego.

3.2. Funcionamiento del sistema en modo manual

Para iniciar las tareas de mantenimiento o ejecutar un ciclo de riego bajo control directo del operador en las áreas verdes de la Facultad de Tecnología, es necesario acceder al gabinete metálico que alberga el sistema de control automatizado, identificado como tablero TC-21. El primer paso consiste en desactivar el funcionamiento automático del sistema para habilitar la operación manual. Con este propósito, el operador debe accionar el interruptor selector de tres posiciones identificado como -S0, el cual, en condiciones normales, permanece ubicado en la posición central correspondiente al estado de apagado o neutro, señalada con el número “0”.

Para habilitar el modo manual, la perilla del selector debe girarse hacia la posición izquierda, identificada con la letra “M”. Esta acción cierra los contactos internos del interruptor y envía una señal eléctrica de baja tensión a una de las entradas digitales del Controlador Lógico Programable Siemens LOGO!, informando que el sistema operará bajo el control directo del usuario. Como respuesta a esta condición, el programa de control activa la salida de relé Q3, energizando la lámpara piloto de color verde identificada como -H2, ubicada en la puerta del tablero de control.

La iluminación continua de este indicador constituye la confirmación visual de que el modo manual ha sido habilitado correctamente. A partir de este momento, el sistema queda preparado para recibir las órdenes emitidas por el operador a través de la Interfaz Hombre-Máquina, permitiendo controlar de forma directa la electrobomba, la electroválvula y los demás dispositivos asociados al proceso de riego. Las Figuras



3.11 presentan el procedimiento de selección del modo manual y la señalización correspondiente del sistema.

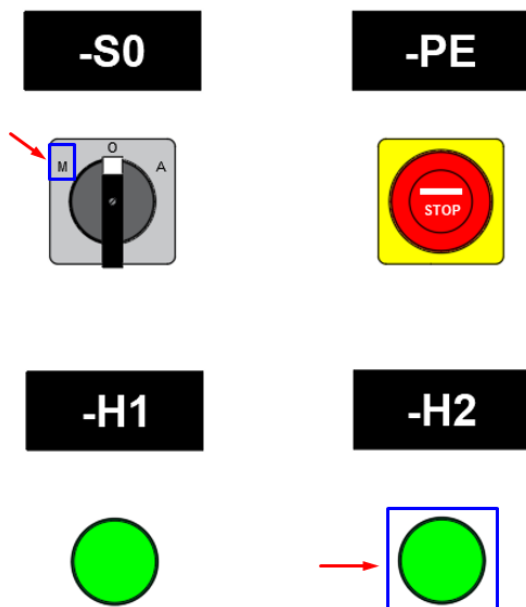


Figura 3.11. Selector en posición “M” y -H2 encendido.

- **Acceso y visualización en la Interfaz Hombre-Máquina**

Una vez confirmada la activación del modo manual mediante la señalización luminosa del tablero de control, el operador debe interactuar con la Interfaz Hombre-Máquina, que constituye el principal medio de comunicación entre el usuario y el sistema automatizado de riego. Al energizarse, la pantalla táctil muestra inicialmente una ventana de bienvenida con información institucional relacionada con el proyecto de automatización desarrollado para la universidad.

Para acceder a las funciones de supervisión y control del sistema hidráulico, el operador debe seleccionar el botón identificado como “PROCESO”. Esta acción permite cambiar a la pantalla principal de operación, en la cual se presenta una representación gráfica del sistema de riego automatizado. En dicha interfaz se visualizan, en tiempo real, los principales componentes

del proceso, incluyendo la cisterna, la electrobomba, la electroválvula, la red de distribución y los dispositivos de control, facilitando la supervisión y el accionamiento de los diferentes elementos durante la operación manual. La Figura 3.12 muestra la pantalla de acceso al proceso de riego automatizado.

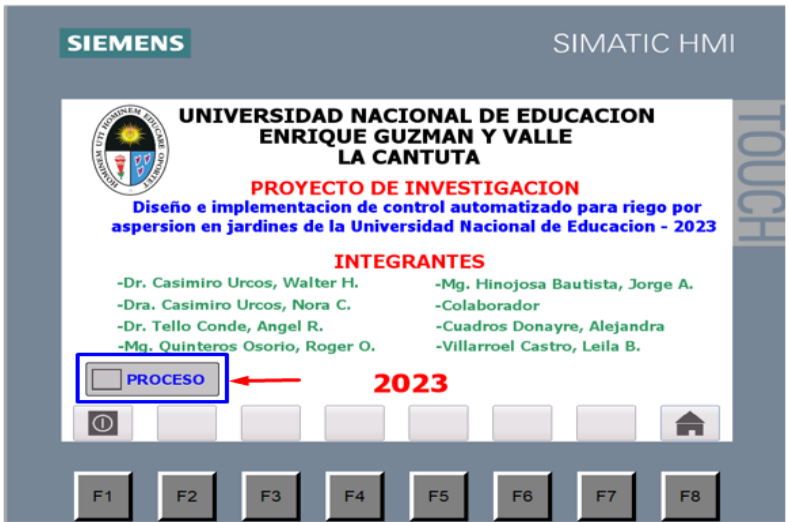


Figura 3.12. Presionar el botón “PROCESO”.

- **Pantalla de visualización del riego en modo manual**

Al seleccionar la opción “PROCESO”, la Interfaz Hombre-Máquina realiza la transición desde la pantalla de bienvenida hacia la pantalla principal de supervisión y control del sistema de riego. Esta interfaz presenta una representación gráfica del proceso, en la que se muestran los principales componentes de la instalación hidráulica, entre ellos la cisterna, la electrobomba, la electroválvula, la red de tuberías y los elementos de distribución del agua, permitiendo al operador supervisar el estado operativo de cada uno de ellos en tiempo real.

Una vez que el selector físico ha sido conmutado al modo manual, la interfaz despliega en la parte superior de la pantalla un indicador de estado con la

leyenda “MANUAL ACTIVADO”, resaltado mediante un recuadro de color amarillo. Esta señal visual confirma que el sistema ha ingresado correctamente al modo de operación manual y que las decisiones relacionadas con el inicio, la continuidad y la finalización del riego dependen exclusivamente de las acciones ejecutadas por el operador. En consecuencia, el control automático basado en las lecturas del sensor de humedad del suelo permanece temporalmente deshabilitado, permitiendo que el usuario gobierne directamente los actuadores del sistema a través de la Interfaz Hombre-Máquina. La Figura 3.13 muestra la pantalla de operación correspondiente al modo manual.

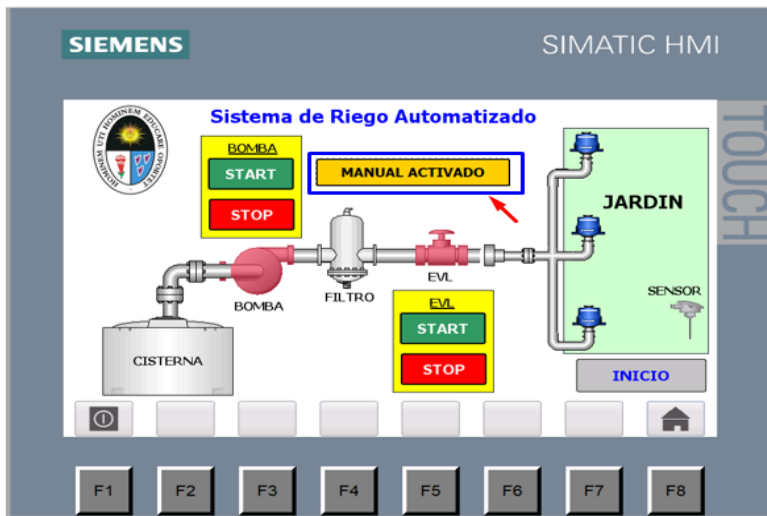


Figura 3.13. En la pantalla del HMI se observa que esta “MANUAL ACTIVADO”.

- **Apertura manual de la electroválvula**

Una vez habilitado el modo manual, el operador puede controlar de forma independiente los principales actuadores del sistema desde la Interfaz Hombre-Máquina. La secuencia de operación ha sido diseñada para garantizar un funcionamiento hidráulico seguro, por lo que la apertura de la electroválvula debe realizarse antes del arranque de la electrobomba. Este procedimiento permite establecer previamente el

paso del agua hacia la red de distribución, evitando incrementos bruscos de presión y reduciendo el riesgo de golpes de ariete en las tuberías.

Para habilitar el flujo de agua, el operador debe presionar el botón virtual identificado con la palabra “START”, ubicado debajo del símbolo correspondiente a la electroválvula en la pantalla de supervisión. Esta orden es enviada al Controlador Lógico Programable, el cual activa la salida de control destinada a energizar la bobina del solenoide de la electroválvula. Como consecuencia, el mecanismo interno del dispositivo se desplaza, permitiendo la apertura del conducto y el paso del agua hacia la red hidráulica.

De manera simultánea, la Interfaz Hombre-Máquina actualiza el estado operativo del actuador mediante un cambio de color en su representación gráfica. El símbolo de la electroválvula pasa del color rojo, que indica el estado cerrado, al color verde, confirmando que el dispositivo ha sido activado correctamente y que el sistema se encuentra preparado para el arranque de la electrobomba. La Figura 3.14 muestra el procedimiento de apertura manual de la electroválvula.

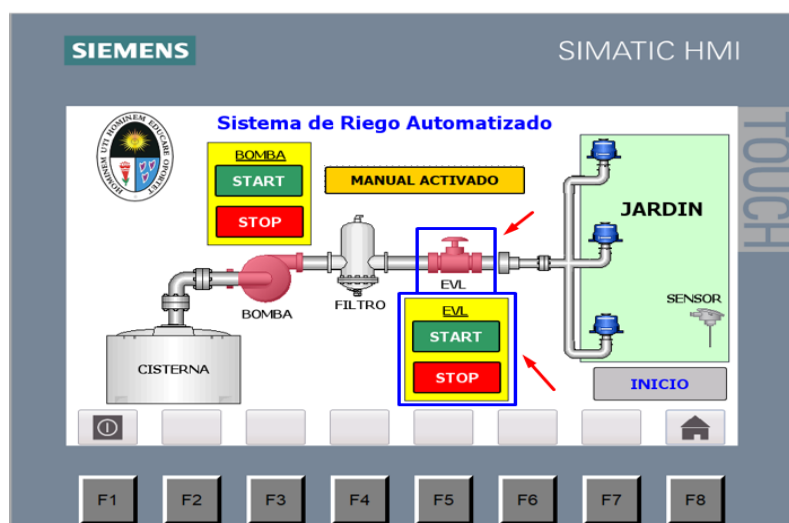


Figura 3.14. Presionar el botón “START” de EVL para que se abra

- **Arranque manual de la electrobomba de 0,5 HP**

Una vez confirmada la apertura de la electroválvula y verificado que la línea hidráulica se encuentra habilitada para el paso del agua, el operador puede iniciar la puesta en marcha de la unidad de bombeo. Esta secuencia de operación garantiza que el sistema disponga de una vía de circulación abierta antes de presurizar la red, reduciendo el riesgo de sobrepresiones y protegiendo la integridad de los componentes hidráulicos.

En la pantalla de la Interfaz Hombre-Máquina, la representación gráfica de la electrobomba se encuentra identificada con la denominación “BOMBA”. Para iniciar su funcionamiento en modo manual, el operador debe presionar el botón virtual “START”, ubicado debajo del símbolo correspondiente al equipo.

Al recibir esta instrucción, la Interfaz Hombre-Máquina transmite la orden al Controlador Lógico Programable, el cual activa la salida de control destinada al contactor electromagnético de potencia instalado en el tablero TC-21. Como consecuencia, el contactor cierra sus contactos principales y permite el suministro de energía eléctrica al motor monofásico de 0,5 HP, iniciándose el giro del impulsor y el bombeo del agua desde la cisterna hacia la red de distribución del sistema de riego.

De forma simultánea, la Interfaz Hombre-Máquina actualiza el estado operativo de la electrobomba mediante un cambio en su representación gráfica, pasando del color rojo, que indica el estado de reposo, al color verde, que confirma su funcionamiento. Esta indicación visual permite verificar que la unidad de bombeo se encuentra operando correctamente y que el agua está siendo impulsada con la presión requerida para abastecer los aspersores del jardín. La Figura 3.15 muestra el procedimiento de arranque manual de la electrobomba.



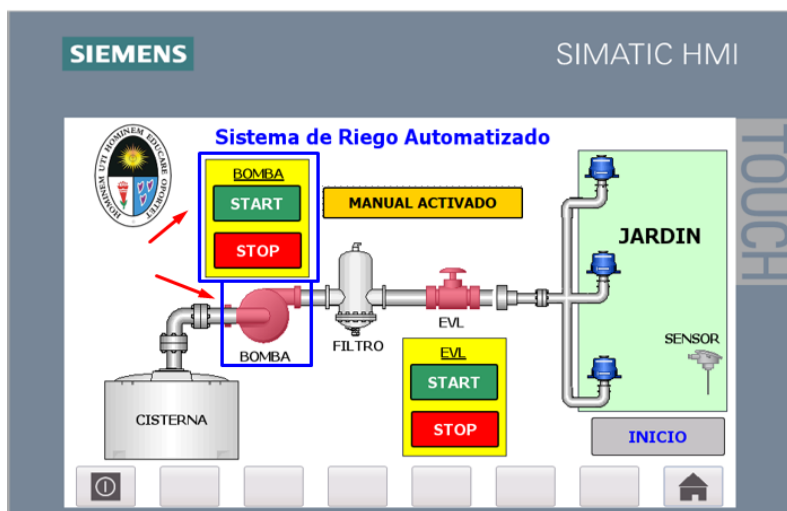


Figura 3.15. Presionar el botón “START” de BOMBA para que energice.

- **Supervisión del sistema durante el riego manual**

Una vez que la electroválvula ha sido abierta y la electrobomba se encuentra en funcionamiento, el agua es impulsada desde la cisterna, atraviesa el filtro de discos y se distribuye hacia los tres aspersores instalados en el jardín experimental de 24 m². En esta etapa, el sistema opera completamente bajo control manual, por lo que el Controlador Lógico Programable mantiene deshabilitada la lógica de decisión automática basada en las lecturas del sensor de humedad del suelo. En consecuencia, la continuidad del riego depende exclusivamente de las decisiones adoptadas por el operador.

Durante este periodo, el responsable de la operación debe supervisar continuamente el comportamiento del sistema, verificando que los aspersores emerjan correctamente, mantengan un patrón uniforme de distribución del agua y cubran de manera homogénea toda la superficie de riego. Asimismo, es necesario comprobar que no existan fugas en las tuberías, conexiones o accesorios hidráulicos, así como confirmar



el funcionamiento estable de la electrobomba y de la electroválvula durante todo el ciclo de operación.

De forma simultánea, el operador debe controlar el nivel de agua disponible en la cisterna para garantizar un suministro continuo y evitar que la electrobomba opere en condiciones de vacío o con un caudal insuficiente, situaciones que podrían provocar fenómenos de cavitación, sobrecalentamiento o desgaste prematuro de sus componentes mecánicos. Con base en la inspección visual del estado del terreno y en su criterio técnico, el operador determinará el momento en que el suelo haya alcanzado el nivel de humedad requerido para el adecuado desarrollo de la vegetación, procediendo entonces a ejecutar la secuencia de parada del sistema. La Figura 3.16 muestra el funcionamiento del sistema durante la operación manual.

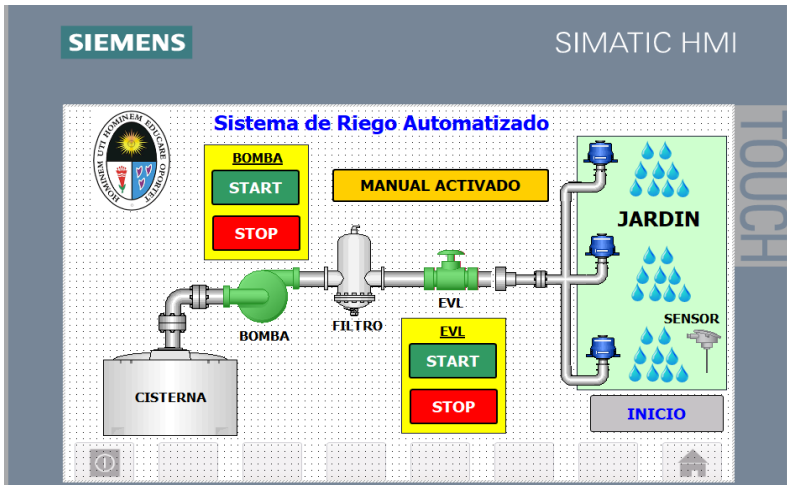


Figura 3.16. BOMBA y EVL energizado y abierto.

- Parada manual del sistema automatizado de riego

Una vez que el operador verifica, mediante la inspección visual del terreno, que el jardín ha recibido la cantidad de agua requerida, debe ejecutar la secuencia de parada del sistema. Al igual que durante la puesta en marcha, el proceso de detención debe realizarse siguiendo un orden previamente establecido

para garantizar la seguridad operativa y preservar la integridad de los componentes hidráulicos y eléctricos. Esta secuencia evita variaciones bruscas de presión en la red de tuberías, minimiza el riesgo de golpes de ariete y contribuye a prolongar la vida útil de la electrobomba, la electroválvula y los accesorios del sistema.

El primer paso consiste en detener la electrobomba, manteniendo abierta la electroválvula durante unos instantes para permitir la disipación gradual de la presión residual presente en la red hidráulica. Para ello, el operador debe seleccionar el botón virtual “STOP” correspondiente a la electrobomba en la pantalla de la Interfaz Hombre-Máquina. Esta instrucción es enviada al Controlador Lógico Programable, el cual desactiva la salida de control asociada al contactor electromagnético de potencia. Como consecuencia, se interrumpe el suministro de energía eléctrica al motor de la electrobomba, produciéndose su desaceleración hasta la detención completa. Simultáneamente, la representación gráfica de la electrobomba cambia del color verde al color rojo, indicando que el equipo ha quedado fuera de servicio.

Una vez confirmada la detención de la electrobomba, el operador debe proceder al cierre de la electroválvula principal. Para ello, debe presionar el botón virtual “STOP” ubicado debajo del símbolo correspondiente a la electroválvula en la Interfaz Hombre-Máquina. El Controlador Lógico Programable desenergiza la bobina del solenoide, permitiendo que el mecanismo interno de la válvula retorne a su posición de reposo y cierre completamente el paso del agua hacia la red de distribución. De forma simultánea, la representación gráfica de la electroválvula cambia del color verde al color rojo, confirmando que el flujo hidráulico ha sido interrumpido y que el sistema ha concluido correctamente el ciclo de riego manual. La Figura 3.17 muestra el procedimiento de parada manual del sistema automatizado de riego.



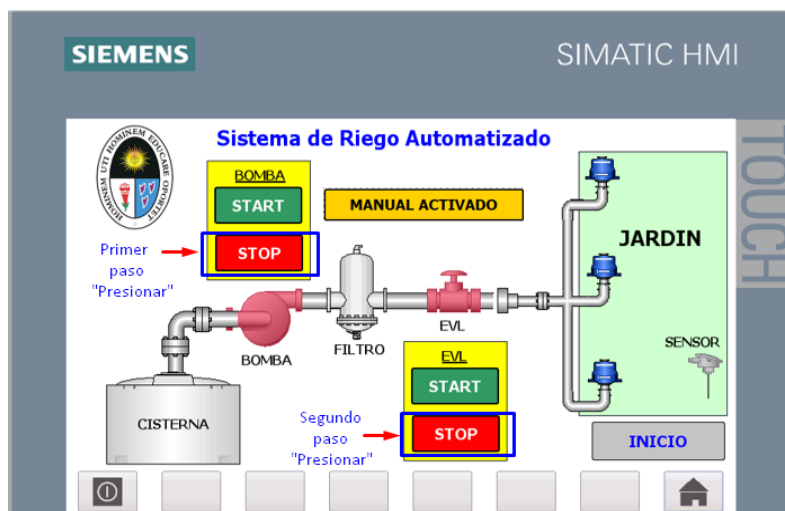


Figura 3.17. 1ro presionar el botón “STOP” de la bomba y 2do presionar el botón “STOP” de EVL.

Para concluir el ciclo de operación manual y evitar el inicio de nuevos ciclos de riego bajo este modo de funcionamiento, el operador debe regresar al tablero de control TC-21 y colocar el selector -S0 en la posición central “0”, correspondiente al estado de reposo. Esta acción deshabilita el modo manual, apaga la lámpara piloto verde identificada como -H2 y restablece el sistema a su condición de espera, dejándolo preparado para una nueva operación o para su posterior funcionamiento en modo automático. La Figura 3.18 muestra el procedimiento de retorno del selector a la posición de reposo.

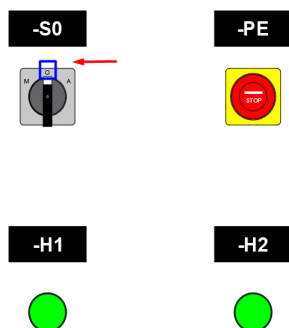


Figura 3.18. El selector -S0 se pone en posición “0” y se apaga la luz indicadora -H2.

3.3. Funcionamiento del sistema automatizado de riego

Una vez concluida la configuración inicial del sistema y verificado el correcto funcionamiento de sus componentes, el sistema automatizado de riego puede operar en modo automático. En esta modalidad, el Controlador Lógico Programable asume el control integral del proceso, procesando continuamente la información suministrada por los sensores de campo para decidir, de manera autónoma, el inicio y la finalización de cada ciclo de riego. De este modo, se optimiza el uso del recurso hídrico, se reduce la intervención del operador y se garantiza que el suministro de agua responda a las necesidades reales de humedad del suelo y a las condiciones de seguridad establecidas para la instalación. A continuación, se describe la secuencia de funcionamiento del sistema durante la operación automática.

a) Transición al modo automático mediante el selector físico -S0

Para habilitar el funcionamiento automático del sistema de riego, el operador debe accionar el selector de tres posiciones identificado como -S0, ubicado en la puerta frontal del tablero de control TC-21. Con este propósito, la perilla debe girarse desde la posición de reposo o manual hasta la posición marcada con la letra "A", correspondiente al modo automático. Esta acción deshabilita el control manual y transfiere la gestión del proceso al programa de control almacenado en el Controlador Lógico Programable Siemens LOGO!, el cual asume la supervisión y el control de todos los actuadores del sistema conforme a las condiciones establecidas en su lógica de programación.

Al posicionar el selector en modo automático, la señal de control de 24 VDC es aplicada a la entrada digital correspondiente del Controlador Lógico Programable, el cual reconoce el cambio de estado y ejecuta la rutina de operación automática. Como confirmación



de esta condición, se energiza la lámpara piloto verde identificada como -H1, ubicada en la puerta del tablero de control. La iluminación continua de este indicador constituye la evidencia visual de que el sistema ha abandonado el modo manual y que las decisiones relacionadas con el accionamiento de la electrobomba de 0,5 HP y de la electroválvula serán ejecutadas automáticamente a partir de las señales suministradas por los sensores de campo y de la lógica de control programada. La Figura 3.19 muestra el procedimiento de selección del modo automático.

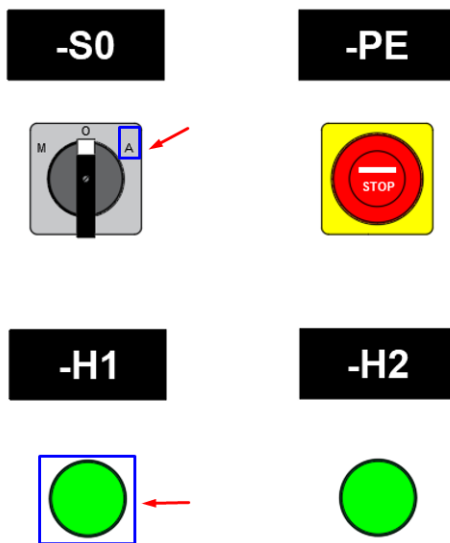


Figura 3.19. Selector en posición “A” y -H1 encendido.

b) Acceso y visualización en la pantalla táctil de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Una vez confirmado el funcionamiento en modo automático mediante la señalización del tablero de control, el operador debe interactuar con la Interfaz Hombre-Máquina para supervisar el estado del sistema. Al energizarse, la pantalla táctil muestra inicialmente una ventana de bienvenida con información institucional relacionada con el proyecto de automatización desarrollado para la universidad.

Para acceder a la pantalla principal de supervisión, el operador debe seleccionar el botón virtual identificado con la palabra “PROCESO”. Esta acción permite que la Interfaz Hombre-Máquina cambie a la pantalla de operación, en la cual se presenta una representación gráfica del sistema automatizado de riego. En dicha interfaz se visualizan los principales componentes de la instalación, incluyendo la cisterna, la electrobomba, la electroválvula, la red de distribución y los dispositivos de medición y control, permitiendo al operador supervisar en tiempo real el comportamiento del proceso sin intervenir directamente sobre su funcionamiento. La Figura 3.20 muestra el acceso a la pantalla principal del sistema automatizado de riego.



Figura 3.20. Presionar el botón “PROCESO”.

c) Pantalla de visualización de Riego Automático

Una vez accedida la pantalla principal de supervisión, la Interfaz Hombre-Máquina muestra en la parte superior un indicador de estado con la leyenda “AUTO ACTIVADO”. Esta señal confirma que el sistema opera bajo la modalidad automática y que la comunicación



entre la Interfaz Hombre-Máquina y el Controlador Lógico Programable se encuentra establecida correctamente. A partir de este momento, la ejecución de las maniobras de control deja de depender de la intervención directa del operador y pasa a ser gestionada por la lógica de control programada.

En esta modalidad, los botones virtuales destinados al arranque y la parada de la electrobomba y de la electroválvula permanecen deshabilitados para impedir acciones manuales que puedan interferir con la secuencia automática de operación. En consecuencia, la Interfaz Hombre-Máquina cumple principalmente funciones de supervisión, visualización y diagnóstico, permitiendo al personal de operación monitorear en tiempo real el estado de los actuadores, las variables del proceso y las condiciones generales de funcionamiento del sistema automatizado de riego. La Figura 3.21 muestra la pantalla de supervisión correspondiente al modo automático.

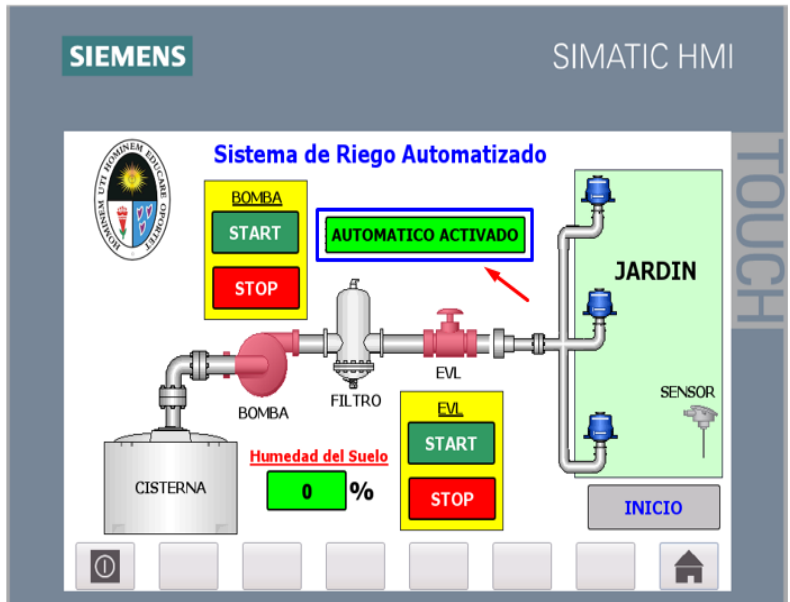


Figura 3.21. En la pantalla del HMI se observa que esta “AUTO ACTIVADO”.

d) Monitoreo continuo y transducción de la humedad del suelo por el sensor MT-100

Con el sistema operando en modo automático, el monitoreo continuo de la humedad del suelo constituye la variable principal sobre la cual se fundamenta la lógica de control del riego. Para ello, se emplea el sensor industrial de humedad del suelo MT-100, instalado en una zona representativa del jardín con el propósito de obtener mediciones confiables del contenido de agua disponible en el entorno radicular del césped. Este dispositivo realiza mediciones de forma permanente, proporcionando valores de humedad en un rango comprendido entre el 0 %, correspondiente a un suelo completamente seco, y el 100 %, equivalente a un suelo totalmente saturado.

El sensor MT-100 convierte la magnitud física de la humedad del suelo en una señal analógica normalizada de 4 a 20 mA, adecuada para su transmisión con alta inmunidad al ruido eléctrico. Esta señal es conducida hasta el módulo de expansión analógica del Controlador Lógico Programable Siemens LOGO!, donde es acondicionada, digitalizada y procesada por el programa de control. Posteriormente, el valor de humedad calculado se transmite a la Interfaz Hombre-Máquina para su visualización en tiempo real, permitiendo al operador supervisar continuamente el estado hídrico del terreno.

La adquisición continua de esta información constituye la base para la toma de decisiones del sistema automatizado, ya que el Controlador Lógico Programable compara permanentemente el valor de humedad medido con los umbrales establecidos en la estrategia de control. De esta manera, el inicio y la finalización del riego se ejecutan de forma automática, garantizando un suministro de agua acorde con las necesidades reales del cultivo y optimizando el aprovechamiento del recurso hídrico. La Figura 3.22 muestra el monitoreo de la humedad del suelo mediante el sensor MT-100.



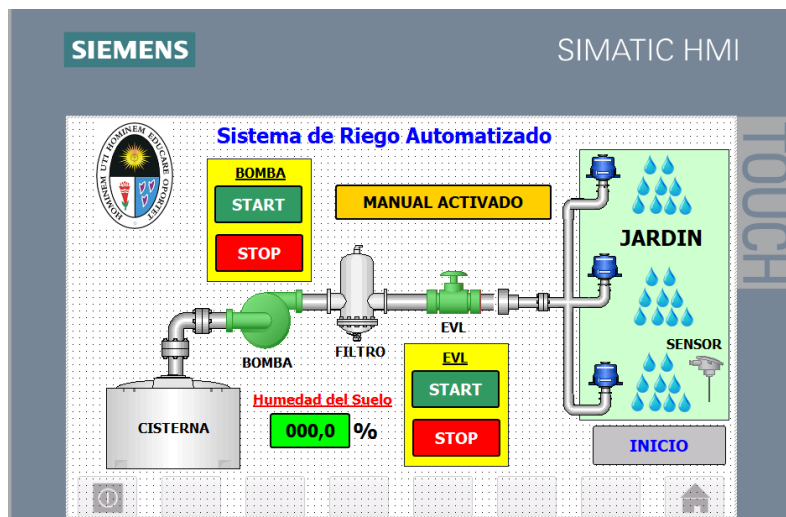


Figura 3.22. Todos los equipos trabajan de forma automática registrando el porcentaje de humedad del suelo.

e) Activación automática ante condiciones de sequedad extrema (Humedad < 15%)

La activación automática del sistema de riego se produce cuando el contenido de humedad del suelo desciende por debajo del umbral mínimo establecido en la estrategia de control. Para ello, el Controlador Lógico Programable Siemens LOGO! ejecuta de forma continua un algoritmo de control de tipo Todo-Nada (ON-OFF), evaluando permanentemente la señal suministrada por el sensor de humedad MT-100. Cuando el valor de humedad medido es inferior al 15 %, el controlador identifica una condición de déficit hídrico y determina la necesidad de iniciar un nuevo ciclo de riego para restablecer las condiciones óptimas de humedad del terreno.

Una vez detectada esta condición, el Controlador Lógico Programable ejecuta una secuencia automática de arranque diseñada para proteger la integridad de la instalación hidráulica. En primer lugar, activa la salida digital Q4, energizando la bobina de la electroválvula SV-100 con una tensión de 24 VDC, lo que provoca la apertura del conducto principal y habilita el paso

del agua hacia la red de distribución. Posteriormente, el programa incorpora un retardo de seguridad de cinco segundos con el propósito de estabilizar el flujo hidráulico y reducir la posibilidad de golpes de ariete durante el arranque del sistema.

Finalizado este intervalo, el Controlador Lógico Programable activa la salida digital Q1, energizando el contactor electromagnético -KM1, el cual conecta la alimentación eléctrica del motor monofásico de la electrobomba BC-100 de 0,5 HP. Con la electroválvula abierta y la electrobomba en funcionamiento, el agua es impulsada desde la cisterna hacia la red de distribución y los aspersores, iniciándose automáticamente el ciclo de riego conforme a las condiciones establecidas por la estrategia de control.

f) Desactivación programada por saturación óptima de humedad (Humedad > 33%)

Durante el ciclo de riego, el sensor de humedad MT-100 monitorea continuamente el contenido de agua presente en el suelo, registrando el incremento progresivo de la humedad como resultado de la irrigación realizada por los aspersores. Mientras el valor medido permanezca por debajo del límite superior establecido en la estrategia de control, el Controlador Lógico Programable mantiene activadas tanto la electrobomba como la electroválvula para garantizar un suministro continuo de agua. En este sistema, el umbral máximo de operación se ha fijado en un 33 % de humedad, valor que proporciona un nivel adecuado de hidratación del suelo sin provocar saturación ni un consumo innecesario del recurso hídrico.

Cuando la señal analógica procedente del sensor indica que la humedad del suelo ha alcanzado o superado el 33 %, el Controlador Lógico Programable ejecuta automáticamente la secuencia de parada siguiendo el orden inverso al utilizado durante el arranque. En primer lugar, desactiva la salida digital Q1, desenergizando el





contactor electromagnético -KM1 e interrumpiendo el suministro de energía al motor de la electrobomba, lo que provoca su detención. A continuación, el programa mantiene abierta la electroválvula durante un retardo de seguridad de cinco segundos, permitiendo la disipación gradual de la presión existente en la red hidráulica y reduciendo el riesgo de golpes de ariete.

Finalizado este intervalo, el Controlador Lógico Programable desactiva la salida digital Q4, desenergizando la bobina de la electroválvula EVL (SV-100) y provocando el cierre del conducto principal de agua. Esta estrategia de apagado secuencial disminuye las solicitaciones mecánicas sobre las tuberías, válvulas, uniones y demás accesorios hidráulicos, contribuyendo a preservar la integridad del sistema y a prolongar la vida útil de sus componentes.

g) Protección preventiva ante desabastecimiento en la cisterna mediante el sensor LSL-100

El funcionamiento confiable del sistema automatizado de riego depende no solo de las condiciones de humedad del suelo, sino también de la disponibilidad de agua en la cisterna de almacenamiento de 1100 litros. La operación de la electrobomba en ausencia de agua podría ocasionar un funcionamiento en seco, provocando sobrecalentamiento, cavitación y daños en componentes críticos como el sello mecánico, el impulsor y los rodamientos. Con el fin de prevenir esta condición, el sistema incorpora un interruptor flotador de nivel bajo identificado como LSL-100, instalado en el interior de la cisterna para supervisar permanentemente el nivel de agua disponible.

El sensor LSL-100 se encuentra conectado a la entrada digital I5 del Controlador Lógico Programable Siemens LOGO!, desde donde informa continuamente el estado del nivel de agua en la cisterna. Cuando el volumen almacenado desciende por debajo del nivel mínimo de operación, el flotador cambia de estado y envía una

señal al controlador, indicando una condición de nivel bajo que activa la estrategia de protección del sistema.

Ante esta situación, la lógica de seguridad del Controlador Lógico Programable tiene prioridad sobre el algoritmo de control basado en la humedad del suelo. En consecuencia, aunque el sensor MT-100 detecte un contenido de humedad inferior al umbral de activación del riego (15 %), el controlador inhibe el arranque de la electrobomba o, si esta ya se encuentra en funcionamiento, ordena su detención inmediata para evitar la operación en vacío. Simultáneamente, la Interfaz Hombre-Máquina muestra una indicación de alarma que informa al operador sobre la condición de nivel bajo en la cisterna, permitiendo adoptar las acciones correctivas necesarias antes de restablecer el funcionamiento automático del sistema. La Figura 3.23 muestra el funcionamiento del sistema de protección por nivel bajo de agua en la cisterna.

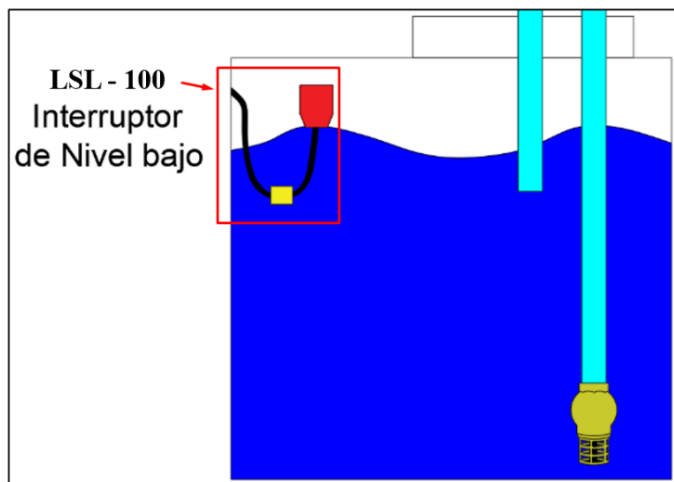


Figura 3.23. Interruptor de nivel bajo “LSL - 100” que está ubicado internamente en la Cisterna.

3.4. Condiciones de seguridad antes fallas eléctricas o paro de seguridad

La operación de un sistema automatizado de riego requiere la incorporación de mecanismos de protección



que garanticen una respuesta segura ante condiciones anormales de funcionamiento. En este apartado se describen los principales dispositivos de seguridad, la secuencia general de operación del sistema y el procedimiento de validación experimental realizado para comprobar el desempeño integral de la instalación.

a) Resguardo eléctrico del motor por sobrecargas mediante el relé térmico -F1

Además de supervisar las variables hidráulicas y los niveles de agua, el tablero de control TC-21 incorpora dispositivos de protección eléctrica destinados a preservar la integridad del sistema de potencia y garantizar la operación segura de la electrobomba. En el circuito de fuerza que alimenta el motor monofásico se encuentra instalado un relé térmico de sobrecarga, identificado como -F1, acoplado mecánicamente al contactor principal. Su función consiste en monitorear de forma continua la corriente absorbida por el motor, cuyo valor nominal de operación se sitúa entre 1 A y 1,5 A durante condiciones normales de funcionamiento.

Cuando se presenta una condición anómala, como el bloqueo del impulsor, el desgaste o agarrotamiento de los rodamientos, la obstrucción de la tubería de succión o fluctuaciones severas de la tensión de alimentación, la corriente consumida por el motor aumenta por encima del valor ajustado en el relé térmico. En estas circunstancias, las láminas bimetálicas internas del dispositivo se calientan debido al efecto Joule, se deforman y accionan el mecanismo de disparo, provocando la apertura del contacto auxiliar normalmente cerrado 95-96. Como consecuencia, se interrumpe la señal de control que llega a la entrada I2 del controlador Siemens LOGO!, desenergizando la bobina del contactor -KM1 y desconectando inmediatamente la electrobomba para evitar daños por sobrecalentamiento del motor.

De manera simultánea, el sistema de supervisión desarrollado en la interfaz HMI detecta el estado de protección y modifica automáticamente la representación gráfica de la bomba, mostrando un color amarillo como indicación de advertencia. Esta señal informa al operador que se ha producido una condición de sobrecarga y que es necesario realizar una inspección del sistema, identificar la causa de la falla y restablecer manualmente el relé térmico antes de reanudar el funcionamiento del sistema de riego automático. Las características de este mecanismo de protección se presentan en las figuras 3.24 y 3.25.

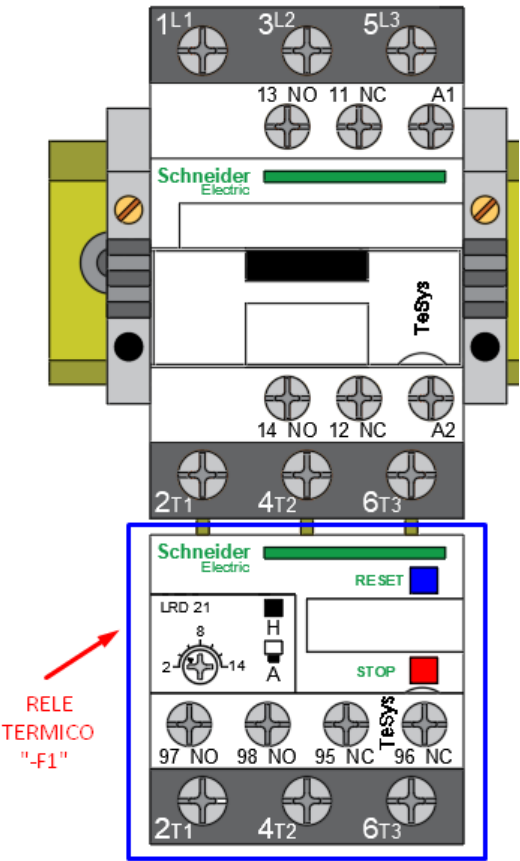


Figura 3.24. Dispositivo de protección Relé Térmico “-F1”.



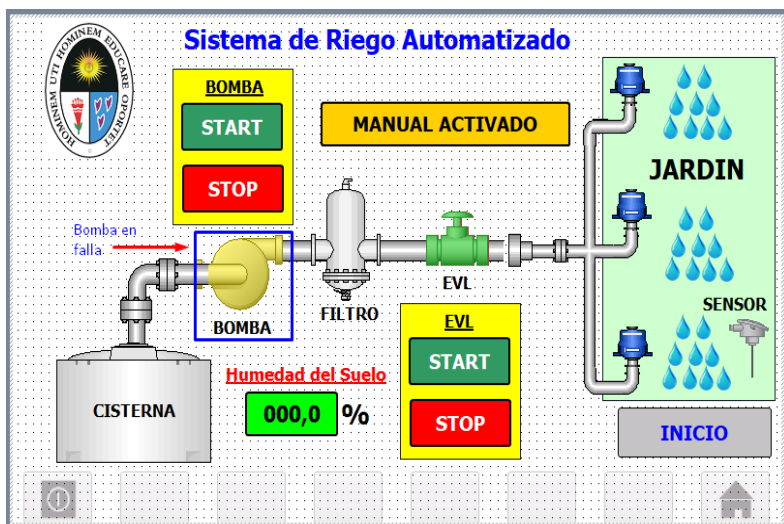


Figura 3.25. Dispositivo de protección Relé Térmico “-F1”.

b) Parada de emergencia absoluta mediante el pulsador -PE ante incidentes en campo

Con el propósito de garantizar la seguridad de las personas y proteger el sistema ante situaciones de riesgo, el tablero de control TC-21 incorpora un mecanismo de interrupción de emergencia con la máxima prioridad dentro de la lógica de control. Este dispositivo corresponde a un pulsador de parada de emergencia con enclavamiento mecánico, tipo cabeza de hongo, identificado como -PE, instalado en la puerta frontal del tablero para facilitar su acceso inmediato por parte del operador.

El pulsador de emergencia se encuentra conectado al circuito de control y transmite su estado a la entrada I1 del controlador Siemens LOGO!. Durante la operación normal, el contacto normalmente cerrado del pulsador permanece cerrado, permitiendo el funcionamiento del sistema. Sin embargo, cuando el operador detecta una condición de peligro, como la rotura de una tubería, una fuga de agua, una posible falla eléctrica o cualquier situación que represente un riesgo para las personas o los equipos, basta con presionar el pulsador -PE para

activar la parada de emergencia. Esta acción provoca la apertura inmediata del contacto normalmente cerrado, interrumpiendo la señal que llega a la entrada I1 del PLC. Como resultado, el programa de control desenergiza las bobinas del contactor principal y de las electroválvulas, deteniendo de forma inmediata el funcionamiento de la electrobomba y de todos los actuadores asociados al sistema de riego.

Una vez eliminada la causa que originó la emergencia y verificado que existen condiciones seguras para reiniciar la operación, el operador debe restablecer el pulsador girando la cabeza del dispositivo en el sentido indicado por el fabricante. Esta acción libera el mecanismo de enclavamiento, restablece el contacto normalmente cerrado y permite que el sistema vuelva a operar conforme a la lógica automática programada. La ubicación e instalación del pulsador de parada de emergencia se muestran en la Figura 3.26.

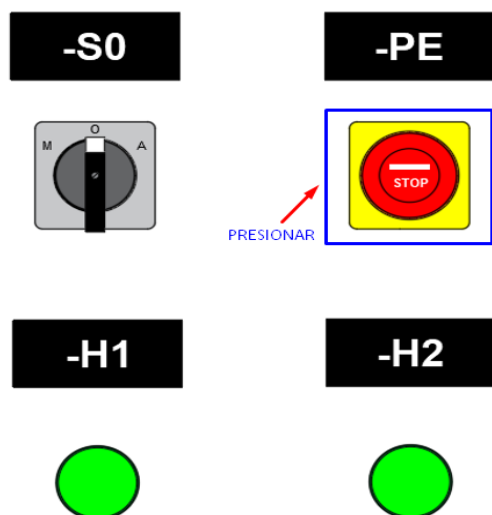


Figura 3.26. Presionar Parada de Emergencia “-PE”.

El funcionamiento del sistema automatizado de riego se desarrolla mediante una secuencia ordenada de operaciones que integra el monitoreo continuo de la humedad del suelo, el procesamiento de señales por el controlador lógico programable (PLC Siemens





LOGO!) y la actuación coordinada de los dispositivos hidráulicos y eléctricos. Esta lógica de control permite optimizar el consumo de agua, evitar el riego innecesario y garantizar que la irrigación se realice únicamente cuando las condiciones del terreno así lo requieren. A continuación, se describen las principales etapas que conforman el ciclo operativo del sistema.

Paso 1. Almacenamiento inicial del recurso hídrico

El ciclo operativo comienza con el ingreso de agua potable al tanque cisterna de almacenamiento. Este depósito constituye la reserva principal del sistema y garantiza la disponibilidad del volumen de agua necesario para abastecer la electrobomba durante cada ciclo de riego.

Paso 2. Monitoreo preventivo de la humedad del suelo

El sensor de humedad realiza mediciones continuas del contenido de agua presente en el suelo. Cuando los valores registrados indican que el terreno conserva un nivel de humedad adecuado, el PLC mantiene deshabilitado el proceso de riego, evitando el consumo innecesario del recurso hídrico.

Paso 3. Procesamiento de señales y toma de decisiones

Cuando el sensor detecta que la humedad del suelo desciende por debajo del umbral establecido, transmite la señal correspondiente al PLC Siemens LOGO!. El controlador procesa la información de acuerdo con la lógica de programación implementada y genera las órdenes necesarias para iniciar el ciclo de riego, activando la electroválvula y energizando la electrobomba.

Paso 4. Presurización e impulsión del agua

Una vez puesta en funcionamiento la electrobomba, el agua almacenada en la cisterna es succionada e impulsada a presión a través de la red de tuberías de PVC. El sistema hidráulico transporta el caudal hasta el área verde del pabellón administrativo, manteniendo las condiciones de presión requeridas para el correcto funcionamiento de los aspersores.

Paso 5. Distribución uniforme mediante aspersión

Al llegar al área de riego, el agua es distribuida por tres aspersores rotativos emergentes, los cuales generan una cobertura homogénea sobre la superficie del césped. Esta distribución uniforme favorece una irrigación eficiente, reduciendo pérdidas por escorrentía, encharcamientos y zonas con riego insuficiente.

Paso 6. Supervisión continua durante el riego

Mientras el sistema permanece en funcionamiento, el sensor de humedad continúa realizando mediciones en tiempo real. Estas lecturas son enviadas de forma permanente al PLC, permitiendo ajustar la duración del riego de acuerdo con las condiciones reales del suelo y evitando la aplicación excesiva de agua.

Paso 7. Finalización automática del ciclo

Cuando el sensor registra que la humedad del suelo ha alcanzado el valor programado como condición de finalización, el PLC interrumpe las señales de salida, ordenando el cierre de la electroválvula y la desenergización de la electrobomba. De esta manera, el suministro de agua se detiene automáticamente sin intervención del operador.



Paso 8. Restablecimiento del estado de espera

Concluido el proceso de riego, el sistema retorna a su estado de reposo. El controlador lógico permanece monitoreando continuamente la humedad del suelo, mientras la cisterna conserva la reserva de agua disponible o inicia su proceso de reabastecimiento cuando sea necesario. Una vez que la humedad desciende nuevamente por debajo del umbral establecido, el sistema reinicia automáticamente un nuevo ciclo de operación.

Con el propósito de verificar el correcto funcionamiento, la confiabilidad y la seguridad del sistema de riego por aspersión diseñado para las áreas verdes de la Facultad de Tecnología de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, Perú, se desarrolló un protocolo de pruebas experimentales tanto en laboratorio como en campo. Estas evaluaciones permitieron validar el desempeño de los componentes eléctricos, electrónicos e hidráulicos, así como comprobar el funcionamiento de la lógica de control implementada en el controlador lógico programable (PLC) Siemens LOGO!.

En una primera etapa se realizaron las pruebas de energización y distribución eléctrica del tablero de control TC-21. Durante esta fase se verificó el correcto funcionamiento del interruptor diferencial y de los interruptores termomagnéticos identificados como -Q1, -Q2 y -Q3. Una vez energizado el tablero, se comprobó la operación de la fuente de alimentación, del PLC Siemens LOGO! y de la interfaz hombre-máquina (HMI), verificándose además la adecuada respuesta de la pantalla táctil durante la navegación y la ejecución de los comandos de operación.

Posteriormente, se efectuaron las pruebas en modo manual. Para ello, el selector de operación -S0 se posicionó en la modalidad «Manual», activándose la luz piloto verde -H2 como indicación del estado de



funcionamiento. Desde la pantalla HMI, en la ventana correspondiente al proceso, se realizaron de forma secuencial las maniobras de apertura de la electroválvula y puesta en marcha de la electrobomba monofásica de 0,5 HP. Durante estas pruebas se confirmó el adecuado transporte del agua a través de la red de tuberías hasta los tres aspersores instalados en el jardín de 24 m². Asimismo, se verificó que la secuencia de parada manual se ejecutara correctamente, desenergizando primero la electrobomba y posteriormente cerrando la electroválvula, con el fin de minimizar la ocurrencia de sobrepresiones transitorias o golpes de ariete en la red hidráulica.

Finalmente, se desarrollaron las pruebas correspondientes al modo automático mediante una estrategia de control ON-OFF. Al colocar el selector -S0 en la posición «Automático», se activó la luz piloto -H1 y la interfaz HMI indicó el cambio de estado del sistema. Durante esta etapa se verificó la adquisición continua de datos provenientes del sensor de humedad del suelo MT-100, cuya señal fue previamente calibrada mediante los parámetros de ganancia y desplazamiento (offset) definidos en la programación del PLC. Los resultados demostraron que, cuando el nivel de humedad descendía por debajo del 15 %, el controlador ordenaba la apertura de la electroválvula y, después de un retardo programado de cinco segundos, energizaba la electrobomba para iniciar el riego. De igual forma, al alcanzarse un nivel de humedad del 33 % o detectarse un nivel bajo de agua en la cisterna mediante el interruptor de nivel LSL-100, el PLC desactivaba automáticamente la electroválvula y la electrobomba, deteniendo el proceso de irrigación. Estas pruebas confirmaron el correcto funcionamiento de la estrategia de control implementada y evidenciaron la capacidad del sistema para gestionar el riego de forma automática, segura y eficiente.

Para validar la efectividad del sistema de riego por aspersión diseñado para la Facultad de Tecnología,



se procedió a unificar los registros de campo con los ensayos prácticos del tablero de control y la interfaz HMI. La prueba experimental se expone a continuación de forma detallada:

1. Caracterización del espacio físico

La fase inicial de la experimentación requirió una delimitación geométrica precisa del área de estudio. En primer lugar, se realizó la limpieza del terreno, eliminando piedras, residuos y otros elementos que dificultaban las labores de medición e instalación del sistema de riego. Una vez acondicionada el área de trabajo, se efectuó el levantamiento dimensional del jardín ubicado junto al pabellón administrativo de la Facultad de Tecnología mediante el empleo de una cinta métrica. Las mediciones obtenidas determinaron que el terreno presentaba una geometría rectangular con dimensiones de 5,40 m de longitud y 4,20 m de ancho, lo que corresponde a una superficie total de 22,68 m² destinada a la cobertura del sistema de riego por aspersión. La delimitación y medición del área experimental se muestran en la figura 3.27.



Figura 3.27. Terreno de área de para el regado automático.

2. Capacidad de reserva hídrica

Paralelamente, se evaluó el comportamiento hidráulico del sistema de almacenamiento mediante una cisterna con capacidad nominal de 1100 L. Durante las pruebas de llenado y vaciado se verificó la disponibilidad del volumen de agua requerido para abastecer el sistema de riego durante ciclos consecutivos de operación, sin depender de un suministro continuo desde la red pública. Asimismo, se comprobó el funcionamiento del sensor de nivel instalado en la cisterna, verificándose la correcta detección de los niveles de operación definidos en la lógica de control. Las observaciones realizadas durante los ensayos permitieron constatar que la estructura del depósito y su capacidad de almacenamiento proporcionan condiciones adecuadas para la succión de la electrobomba, manteniendo un flujo estable y evitando perturbaciones hidráulicas que puedan afectar el desempeño del sistema. La cisterna utilizada durante las pruebas experimentales se presenta en la figura 3.28.



Figura 3.28. Cisterna de 1100 litros.

3. Implementación e instalación de la tubería y componentes de riego

El ensamble e instalación de la red hidráulica se realizó de forma secuencial con el propósito de garantizar la estanqueidad del sistema y la adecuada conducción del flujo de agua. El montaje comenzó en la línea de succión con la instalación de una válvula de retención (válvula check), cuya función consiste en impedir el retorno del agua y mantener cebada la tubería de aspiración, favoreciendo el correcto funcionamiento de la electrobomba. Posteriormente, se instaló una electrobomba monofásica de 0,5 HP alimentada a 220 VAC, encargada de suministrar la presión y el caudal requeridos para el proceso de riego.

En la línea de impulsión se incorporó un filtro de anillas destinado a retener sedimentos e impurezas presentes en el agua, reduciendo la posibilidad de obstrucción de los elementos de distribución. A continuación, se instaló una electroválvula de 24 VDC; utilizada como elemento de control del flujo y accionada automáticamente por el PLC Siemens LOGO! de acuerdo con la lógica de programación implementada. Para conformar el trazado de la red hidráulica se emplearon tuberías, codos y accesorios de PVC de alta presión, unidos mediante adhesivo para PVC con el fin de asegurar conexiones herméticas y minimizar pérdidas de carga por fugas.

Finalmente, se efectuó la instalación de los tres aspersores rotativos emergentes, distribuidos de acuerdo con la geometría del área de estudio para proporcionar una cobertura uniforme del jardín. La configuración adoptada permitió una distribución adecuada del agua sobre la superficie irrigada, favoreciendo la eficiencia hidráulica del sistema de riego. El proceso de instalación de la red hidráulica y la disposición final de los aspersores se presentan en las figuras 3.29 y 3.30.





Figura 3.29. Filtro y Electroválvula montado en la tubería.



Figura 3.30. Aspersores.



4. Montaje e integración del tablero eléctrico y equipos de control

Una vez concluida la instalación de la red hidráulica, se procedió al montaje y fijación del tablero eléctrico de control TC-21. El gabinete fue instalado en una ubicación que facilita las labores de operación y mantenimiento, manteniendo al mismo tiempo condiciones adecuadas de protección para los equipos eléctricos y electrónicos. Este tablero constituye el centro de control del sistema automatizado, ya que integra los dispositivos responsables del procesamiento de señales, la protección eléctrica y el accionamiento de los diferentes actuadores.

En el interior del tablero se instaló el controlador lógico programable (PLC) Siemens LOGO!, encargado de ejecutar la lógica de control del sistema de riego. Para su alimentación se incorporó una fuente de corriente continua regulada de 24 VDC, destinada a suministrar una tensión estable para el funcionamiento del PLC y de los dispositivos de control asociados. Esta configuración permite el procesamiento confiable de las señales provenientes de los sensores y la generación de las órdenes de control dirigidas a la electrobomba y a la electroválvula.

Asimismo, se integró una interfaz hombre-máquina (HMI) Siemens, modelo KTP de 7 pulgadas con comunicación Profinet (PN), destinada a la supervisión y operación del sistema. Mediante esta interfaz, el operador puede visualizar en tiempo real el estado de funcionamiento del sistema, monitorear las variables de proceso e interactuar con los diferentes modos de operación implementados en la programación del PLC, facilitando las tareas de supervisión y control del sistema automatizado. La instalación del tablero de control y de los principales equipos electrónicos se muestra en las figuras 3.31 y 3.32.



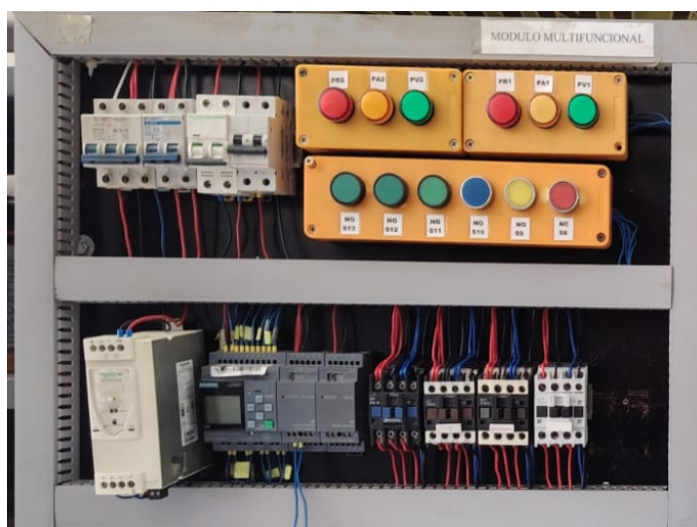


Figura 3.31. Logo Siemens de 24 VDC.



Figura 3.32. HMI KTP700 Basic de 7".

La incorporación de dispositivos de protección eléctrica y de parada de emergencia fortaleció la seguridad operativa del sistema, permitiendo una respuesta rápida ante condiciones que podrían comprometer la integridad de los equipos o la seguridad del operador.

La secuencia de funcionamiento diseñada integró de manera coordinada el monitoreo, el procesamiento de señales y el accionamiento de los dispositivos



hidráulicos y eléctricos, favoreciendo una operación continua y organizada durante los ciclos de riego.

Las pruebas realizadas en laboratorio y en campo permitieron comprobar la correcta integración de los componentes hidráulicos, eléctricos y de control, verificando que el sistema respondiera conforme a las condiciones previstas durante las diferentes etapas de operación.

La implementación y validación experimental confirmaron la viabilidad técnica del sistema automatizado de riego para su aplicación en áreas verdes universitarias, proporcionando una base para su operación confiable y su mantenimiento posterior.

3.5. Resultados de la implementación del sistema automatizado

Para la obtención de los resultados, en primer lugar, se desarrolló el proceso de recolección de datos. Según Hernández et al. (2010), la recolección de datos implica “elaborar un plan detallado de procedimientos que nos conduzca a reunir datos con un propósito específico” (p. 198). En concordancia con este planteamiento, inicialmente se efectuó el reconocimiento del área de estudio con el propósito de identificar sus características físicas y establecer las condiciones para la implementación del sistema de riego por aspersión.

A partir de esta evaluación preliminar se diseñó el sistema experimental y se realizaron las mediciones correspondientes para la selección e instalación de los componentes hidráulicos, eléctricos y electrónicos, considerando las normas y especificaciones técnicas aplicables. Posteriormente, mediante la observación directa, la manipulación controlada de los equipos y la ejecución de pruebas de funcionamiento, se verificó el desempeño del sistema automatizado de riego instalado en los jardines del pabellón administrativo de la Facultad de Tecnología.

Durante la fase experimental se registraron las principales variables de operación mediante los instrumentos de medición incorporados al sistema. Para ello se empleó un manómetro para medir la presión hidráulica, un sensor de humedad del suelo MT-100 para registrar el porcentaje de humedad, un voltímetro de corriente alterna para monitorear la tensión de alimentación de la electrobomba y un amperímetro de corriente alterna para medir la corriente consumida por el motor monofásico durante los diferentes estados de funcionamiento.

A partir de la integración de los registros experimentales obtenidos durante las pruebas de campo y del análisis del comportamiento del sistema automatizado de riego, se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Optimización del uso del agua y caracterización del área experimental.** La delimitación del jardín permitió establecer una superficie rectangular de 5,40 m × 4,20 m, equivalente a 22,68 m². Durante las pruebas experimentales se determinó que un volumen aproximado de 250 L por ciclo de riego proporciona una distribución adecuada de la humedad sobre el área de estudio. El abastecimiento de agua se realizó mediante una cisterna con capacidad de 1100 L, verificándose a través de la interfaz hombre-máquina (HMI) el volumen suministrado durante cada ciclo de operación.
- **Comportamiento de las variables eléctricas del sistema.** Durante las pruebas de funcionamiento de la electrobomba monofásica de 0,5 HP se monitorearon continuamente la tensión de alimentación y la corriente consumida. Los registros obtenidos mostraron una tensión comprendida entre 220 VAC y 223 VAC, mientras que la corriente de operación se mantuvo entre 1,0 A y 1,5 A. Estos valores se encontraron dentro del rango previsto para el funcionamiento normal del equipo, sin evidenciar condiciones de sobrecarga durante los ensayos realizados.





- **Desempeño de la red hidráulica y distribución del riego.** La distribución del agua se realizó mediante una electroválvula hidráulica de una pulgada (modelo 100 DV), alimentada con 24 VDC, y una red de tres aspersores rotativos emergentes. La configuración adoptada, conformada por dos aspersores ubicados en los extremos con un ángulo de cobertura de 90° y un aspersor central ajustado a 180° , permitió obtener una cobertura uniforme sobre la superficie de $22,68 \text{ m}^2$ evaluada durante las pruebas de campo.
- **Funcionamiento del sistema de control automatizado.** El controlador lógico programable Siemens LOGO! ejecutó la secuencia de control programada durante las pruebas experimentales, coordinando el accionamiento de la electrobomba, la electroválvula y los dispositivos de protección instalados en el tablero TC-21. Asimismo, se verificó el funcionamiento de los interruptores termomagnéticos, el contactor, el relé térmico y los pulsadores de mando, comprobándose la correcta respuesta de estos elementos durante las maniobras de arranque, operación y parada del sistema.
- **Evaluación de la estrategia de control automático.** Las pruebas experimentales confirmaron el funcionamiento de la estrategia de control ON-OFF implementada mediante el sensor de humedad del suelo MT-100. Se verificó que, cuando la humedad descendía por debajo del 15 %, el PLC recibía la señal analógica de 4–20 mA procedente del sensor y ejecutaba automáticamente la apertura de la electroválvula y el arranque de la electrobomba. Del mismo modo, al alcanzarse una humedad del 33 %, el controlador ordenaba la detención del riego conforme a la lógica programada. Adicionalmente, se comprobó el funcionamiento del sistema de protección por nivel bajo de agua mediante el interruptor LSL-100, el cual inhibió el funcionamiento de la electrobomba cuando el nivel de agua en la cisterna descendió por

debajo del límite establecido, evitando su operación en vacío.

Con el propósito de evaluar el desempeño del sistema automatizado de riego por aspersión, se realizaron pruebas experimentales en las que se analizaron las principales variables hidráulicas, eléctricas y de control durante las diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos permitieron verificar el comportamiento del sistema, validar la estrategia de automatización implementada y comprobar el funcionamiento integrado de los componentes que conforman la instalación.

3.6. Estrategias de mantenimiento y diagnóstico de fallas

El mantenimiento preventivo y el mantenimiento predictivo constituyen estrategias complementarias para garantizar la confiabilidad, disponibilidad y continuidad operativa de los equipos industriales. El mantenimiento preventivo se basa en la ejecución programada de inspecciones, ajustes y sustitución de componentes con el propósito de prevenir la aparición de fallas y mantener las condiciones normales de operación. Por su parte, el mantenimiento predictivo utiliza el monitoreo continuo de variables de funcionamiento y el análisis de datos para detectar anomalías y estimar la ocurrencia de posibles fallas antes de que estas afecten el desempeño del sistema. La aplicación integrada de ambas estrategias permite pasar de un enfoque reactivo a una gestión del mantenimiento basada en la planificación y el análisis de la condición de los equipos. Como resultado, se reducen las paradas no programadas, se optimiza el uso de los recursos de mantenimiento, disminuyen los costos de operación y se incrementan la confiabilidad, la disponibilidad y la seguridad de los procesos industriales (Muñoz y Muñoz, 2025).

El mantenimiento preventivo es un escudo planificado que localiza y soluciona desgastes menores antes de que ocurra una avería catastrófica. Esta estrategia busca optimizar costos y cuidar los activos, garantizando una producción fluida, segura y libre de interrupciones imprevistas en la industria (Pulido et al. 2024).

- **Gestión y mantenimiento del tablero de control TC-21**





Limpieza interna del tablero: Mensualmente se realiza la limpieza del interior del tablero TC-21 mediante aire comprimido seco a baja presión, con el propósito de eliminar polvo, partículas y residuos que puedan afectar el funcionamiento de los componentes eléctricos y electrónicos. Asimismo, se verifica la ausencia de humedad y de evidencias de corrosión en el PLC Siemens LOGO!, la interfaz hombre-máquina (HMI), la fuente de alimentación y los demás dispositivos instalados.

Verificación y ajuste de conexiones eléctricas: Semestralmente se inspeccionan y ajustan las conexiones eléctricas de las bornas de control y de potencia, incluyendo los interruptores termomagnéticos (-Q1, -Q2 y -Q3), el interruptor diferencial (-ID1), el contactor y los demás elementos del tablero. Esta actividad permite mantener una adecuada continuidad eléctrica y reducir la posibilidad de calentamientos ocasionados por conexiones flojas.

Verificación de los dispositivos de protección: Mensualmente se comprueba el funcionamiento del relé térmico (-F1), del pulsador de parada de emergencia (-PE) y del interruptor diferencial (-ID1) mediante la ejecución de pruebas funcionales. Estas verificaciones permiten confirmar la correcta actuación de los sistemas de protección y la desconexión oportuna del circuito de potencia cuando se presentan condiciones de falla.

- **Mantenimiento de la electrobomba y de la red hidráulica**

Inspección de la electrobomba: Trimestralmente se realiza una inspección visual del conjunto motor-bomba para verificar el estado del sello mecánico, la ausencia de fugas, ruidos y vibraciones anormales, así como el correcto funcionamiento del equipo. Además, se mide la corriente absorbida mediante una pinza amperimétrica para comprobar que el motor opere dentro del rango nominal de 1,0 A a 1,5 A.

Limpieza del sistema de filtración y de los aspersores: Cada quince días se desmonta y limpia el filtro de discos para eliminar sedimentos e impurezas acumuladas. Simultáneamente, se inspeccionan y limpian las boquillas de los tres aspersores, con el fin de evitar obstrucciones que afecten el caudal, la presión y la uniformidad de distribución del agua.

Inspección de la electroválvula: Bimestralmente se verifica el estado del solenoide de 24 VDC y del mecanismo de accionamiento de la electroválvula, comprobando su correcta apertura y cierre, así como la ausencia de fugas durante los estados energizado y desenergizado.

- **Mantenimiento de la instrumentación de campo**

Limpieza y verificación del sensor de humedad

MT-100: Cada dos meses se retira el sensor de humedad del suelo MT-100 para eliminar residuos, depósitos minerales o material orgánico adherido a sus electrodos. Posteriormente, se verifica la estabilidad de las lecturas obtenidas para garantizar la confiabilidad de las mediciones empleadas por el sistema de control.

Verificación del interruptor de nivel LSL-100:

Trimestralmente se realiza una prueba funcional del interruptor de nivel LSL-100 mediante la activación manual del flotador instalado en la cisterna. Durante esta prueba se verifica que el PLC Siemens LOGO! inhiba el funcionamiento de la electrobomba cuando el nivel de agua desciende por debajo del límite establecido, confirmando el correcto funcionamiento del sistema de protección contra operación en seco.

El mantenimiento predictivo se basa en el monitoreo y análisis de variables de funcionamiento con el propósito de evaluar la condición de los equipos y detectar posibles anomalías antes de que se conviertan en fallas. Esta estrategia permite programar oportunamente las intervenciones de mantenimiento, reducir las paradas no planificadas y contribuir a la confiabilidad,



disponibilidad y vida útil de los componentes del sistema (Mafla et al., 2024).

- **Inspección termográfica del tablero de control TC-21**

Monitoreo de la distribución térmica: Trimestralmente se realiza una inspección mediante cámara termográfica infrarroja con el sistema de riego en condiciones normales de operación. Esta evaluación permite identificar incrementos anormales de temperatura en los interruptores termomagnéticos (-Q1, -Q2 y -Q3), el interruptor diferencial (-ID1), el contactor, las bornas y las conexiones eléctricas del tablero TC-21.

Evaluación de anomalías térmicas: Los resultados obtenidos durante la inspección se comparan con los valores de referencia establecidos para los diferentes componentes. Cuando se detectan temperaturas superiores a las condiciones normales de funcionamiento, se programa la revisión o el reemplazo del elemento afectado, reduciendo la probabilidad de fallas asociadas al calentamiento de conexiones o dispositivos eléctricos.

- **Monitoreo de la condición de la electrobomba**

Análisis de la corriente de operación: Periódicamente se registra la corriente absorbida por la electrobomba durante su funcionamiento. Los valores medidos se comparan con el rango nominal de operación, comprendido entre 1,0 A y 1,5 A. Variaciones sostenidas respecto a este intervalo pueden indicar desgaste mecánico, incremento de la carga hidráulica o alteraciones en el funcionamiento del motor, por lo que requieren una evaluación técnica.

Monitoreo de vibraciones y ruido: Mediante un analizador portátil de vibraciones o equipos equivalentes se inspecciona periódicamente el conjunto



motor-bomba para detectar incrementos anormales en los niveles de vibración o ruido. Estos indicadores pueden estar asociados con desgaste de rodamientos, desalineaciones del eje, desbalance del impulsor u otras condiciones que afecten el funcionamiento del equipo.

- **Evaluación predictiva de sensores y actuadores**

Análisis del comportamiento del sensor MT-100:

Los registros históricos almacenados y visualizados en la interfaz hombre-máquina (HMI) permiten evaluar la estabilidad de las mediciones del sensor de humedad del suelo MT-100. Variaciones persistentes en la respuesta del sensor, pérdida de sensibilidad o modificaciones en su comportamiento durante los ciclos de riego pueden indicar la necesidad de realizar labores de limpieza, recalibración o sustitución del dispositivo.

Verificación de la bobina de la electroválvula:

Semestralmente se mide la resistencia eléctrica de la bobina de la electroválvula de 24 VDC para verificar su condición de funcionamiento. Cambios significativos respecto al valor nominal pueden indicar deterioro del devanado o del aislamiento eléctrico, permitiendo programar el mantenimiento correspondiente antes de que se presente una falla durante la operación del sistema.

La Tabla 3.1 presenta las principales fallas que pueden presentarse durante la operación del sistema automatizado de riego por aspersión, incluyendo los síntomas observables en la interfaz hombre-máquina (HMI), las posibles causas técnicas y las acciones correctivas recomendadas. Esta información constituye una guía para facilitar el diagnóstico, reducir los tiempos de intervención y restablecer el funcionamiento normal del sistema de manera segura y eficiente.



Tabla 3.1. Guía de diagnóstico y solución de fallas del sistema automatizado de riego.

Problema de Equipo	Anomalías o Síntoma visual en el HMI	Posible Causa	Acción sugerida
Electro-bomba (M1)	Indicador de BOMBA en color amarillo (HMI). La bomba no arranca.	Disparo del relé térmico (-F1) por sobrecorriente o sobrecarga prolongada.	1. Verificar el consumo de corriente con una pinza amperimétrica (rango normal: 1 A a 1.5 A) 2. Comprobar que la turbina de la bomba no esté atascada por sedimentos. 3. Presionar el botón físico de “RESET” en el relé térmico dentro del tablero.
	Indicador de BOMBA en color rojo (HMI). La bomba no arranca ya sea modo manual o automático.	Activación de la parada de emergencia de manera accidental (-PE)	1. Desenclavar la parada de emergencia (-PE) girándola a su posición original.
Electro-válvula (S V - 100)	La bomba funciona y genera presión, pero no sale agua por los aspersores.	Bobina del solenoide quemada, ausencia de tensión de 24 VDC o diafragma de la válvula obstruido.	1. Verificar la tensión de salida en el relé Q4 del PLC LOGO. 2. Comprobar la integridad de la bobina midiendo su resistencia con un Multímetro. 3. Limpiar manualmente el filtro interno de la electroválvula para retirar cualquier acumulación de arena.



	Indicador de la electroválvula en color rojo (HMI). La electroválvula no activa ya sea modo manual o automático.	Activación de la parada de emergencia de manera accidental (-PE)	1. Desenclavar la parada de emergencia (-PE) girándola a su posición original.
Tablero de control	Todo el sistema se apaga instantáneamente. HMI y PLC sin energía.	Disparo del interruptor diferencial (-ID1) o corte de energía eléctrica de la Red	1. Inspeccionar físicamente el área verde para descartar fugas de agua críticas o contacto eléctrico accidental. 2. Comprobar con un multímetro que existe la Red de energía eléctrica a 220 VAC. 3. Restablecer el interruptor -ID1 o las llaves termomagnéticas correspondientes.
Sensor de Humedad (M T - 100)	El riego automático no arranca o no se detiene nunca. Lecturas incoherentes en HMI.	Pérdida de calibración en el bucle de corriente de 4 mA a 20 mA, sulfatación en bornes de conexión o mala ubicación física del electrodo.	1. Medir con un multímetro el lazo de corriente para asegurar la señal analógica. 2. Limpiar y reajustar los bornes en el módulo de ampliación analógica. 3. Verificar que el sensor esté en contacto directo con el suelo y libre de piedras o raíces compactas.
Interruptor de Nivel (L S L - 100)	La electroválvula abre, pero la bomba no arranca. HMI muestra alarma de nivel bajo.	Cisterna vacía o boya del interruptor de nivel atascada físicamente.	1. Comprobar visualmente el volumen de agua disponible en la cisterna. 2. Si el nivel es óptimo, verificar que el flotador del LSL-100 tenga libre movimiento y no esté obstruido por sarro o sedimentos en el fondo.



Filtro de retención de impurezas	Visualización HMI no aplica. Los Aspersores tienen bajo alcance ya sea por pérdida constante de agua alrededor del cuerpo del filtro. Mostrando una presión inestable en la red de distribución.	Acumulación crítica de sedimentos, algas o partículas de arena en los canales de los discos debido a un agua de suministro con alta turbidez. o desgaste o resequedad en el empaque circular (O-ring) de la carcasa.	1. Detener el sistema por seguridad y despresurizar la tubería de riego. 2. Desenroscar la tapa del portafiltro y extraer el cartucho de discos con cuidado. 3. Aflojar la rosca del núcleo para liberar las anillas y lavarlas con agua limpia a presión, usando un cepillo de cerdas suaves para remover la suciedad incrustada. 4. Reensamblar el conjunto, asegurando que el empaque de jebe (O-ring) quede bien asentado antes de ajustar la tapa exterior.
----------------------------------	--	--	---

La implementación del sistema automatizado de riego por aspersión permitió integrar de manera eficiente los componentes hidráulicos, eléctricos y electrónicos mediante el empleo del Controlador Lógico Programable Siemens LOGO! y la Interfaz Hombre-Máquina, logrando un funcionamiento coordinado en los modos de operación manual y automático. La secuencia de puesta en marcha, operación y parada desarrollada favoreció una gestión organizada del proceso y facilitó la supervisión del sistema durante las pruebas experimentales.

La validación experimental confirmó el correcto desempeño de la estrategia de control implementada, basada en el monitoreo continuo de la humedad del suelo mediante el sensor MT-100 y en la actuación automática de la electrobomba y la electroválvula conforme a los umbrales de operación establecidos. Asimismo, los ensayos demostraron el adecuado comportamiento de las variables eléctricas e hidráulicas,



así como una distribución uniforme del agua sobre el área de estudio, verificando el funcionamiento previsto del sistema durante las condiciones evaluadas.

Finalmente, la incorporación de dispositivos de protección eléctrica, junto con las estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo y la guía de diagnóstico de fallas, proporciona una base técnica para preservar la confiabilidad operativa del sistema, facilitar la detección oportuna de anomalías y apoyar las labores de operación y mantenimiento, contribuyendo a prolongar la vida útil de los equipos que integran el sistema automatizado de riego por aspersión.



- Aguila Pérez, A., Orozco Rojas, J. M., Torres Cedillo, S. G., Cortés Pérez, J., Cruz Deviana, M. R., Reyes Solís, A., & Delgadillo Torres, M. de la L. (2025). Desarrollo e implementación de una interfaz hombre-máquina a un banco de pruebas empleado para la validación de métodos inversos de identificación de fallas en sistemas rotodinámicos. *RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación*, 3(5), 55–62. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15175738>
- American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2020). *ASABE standards 2020*. ASABE. <https://www.proceedings.com/content/057/057694webtoc.pdf>
- American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2023). *ASABE standards 2023*. ASABE.
- Benos, L., Bechar, A., & Bochtis, D. (2021). Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. *Sensors*, 21(11), 3758. <https://doi.org/10.3390/s21113758>
- Bermeo Varón, L. A., Álvarez, J. G., & Mantilla Arenas, W. (2021). Comparación del desempeño de un controlador PID sobre el proceso de nivel usando un controlador lógico programable y un sistema embebido. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(4), 622–632. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000400622>
- Bolton, W. (2021). *Programmable logic controllers* (7th ed.). Elsevier.





- Botterón, F., Rojas, J. G., & Aguirre, G. Y. (2022). Control de una bomba centrífuga monofásica comercial para irrigación de huertas rurales utilizando energía solar fotovoltaica. *+Ingenio: Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 3(2). <https://doi.org/10.36995/j.masingenio.2021.03.02.002>
- Caicedo-Rosero, L. C., Méndez-Ávila, F. J., Gutiérrez-Zeferino, E., & Flores-Cuautle, J. J. A. (2021). Medición de humedad en suelos: Revisión de métodos y características. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(17), 1–8. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7035>
- Castro-Ladino, J. R., Mesa, S., & Hoyos-Ayala, D. A. (2025). Sensor de humedad basado en carbono derivado de cascarilla de arroz. *Ingeniería y Competitividad*, 27(2), e20314751. <https://doi.org/10.25100/iyc.v27i2.14751>
- Chauhdary, J. N., Li, H., Jiang, Y., Pan, X., Hussain, Z., Javaid, M., & Rizwan, M. (2024). Advances in sprinkler irrigation: A review in the context of precision irrigation for crop production. *Agronomy*, 14(1), 47. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010047>
- Congreso de la República del Perú. (2009). *Ley N.º 29338, Ley de Recursos Hídricos*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-29338.pdf>
- Eisenhauer, D. E., Martin, D. L., Heeren, D. M., & Hoffman, G. J. (2021). *Irrigation systems management*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/ISM.2021>
- Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Research*, 44(7), W00E04. <https://doi.org/10.1029/2007WR006200>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021a). *Progress on change in water-use efficiency: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.4.1*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb6413en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021b). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture 2021: Systems at breaking point*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *Irrigation management*. FAO. <https://www.fao.org/land-water/water/agricultural-water-management/irrigation>

Global Water Partnership. (2000). *Integrated water resources management* (TAC Background Papers No. 4). Global Water Partnership. <https://gwpo-gwp.org/wp-content/uploads/2026/04/04-integrated-water-resources-management-2000-english.pdf>

Grievson, O., Holloway, T., & Johnson, B. (Eds.). (2022). *A strategic digital transformation for the water industry*. IWA Publishing. https://iwa-website-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/IWA_2022_Digital_Water_Book_web_f682885c7a.pdf

Grigg, N. S. (2024). Framework and function of integrated water resources management in support of sustainable development. *Sustainability*, 16(13), Article 5441. <https://doi.org/10.3390/su16135441>

Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2), 281–289. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>



International Commission on Irrigation and Drainage. (2022). Economics of Irrigation System. https://icid-ciid.org/Knowledge/basic_term/42/Irrigation

International Organization for Standardization. (2021a). *ISO 15886-2:2021.Agricultural irrigation equipment—Sprinklers—Part2:Designandoperationrequirements*. ISO. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/77748/b76afdce97f8401bacd528432d54c99c/ISO-15886-2-2021.pdf>

International Organization for Standardization. (2022b). ISO 15886-3:2022. Agricultural irrigation equipment—Sprinklers—Part 3: Characterization of distribution and test methods. ISO. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/78122/4eeda5960fa84f-12b95ce41f8e578114/ISO-15886-3-2021.pdf>

Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M., & Ismail, M. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 17(8), Article 1781. <https://doi.org/10.3390/s17081781>

Lalaleo Saltos, K. F. (2025). *Desarrollo de un sistema de automatización conforme a la norma ANSI/ISA-101.01-2015, destinado a facilitar la operación de apertura y cierre remoto de las electroválvulas de ingreso a los tanques de almacenamiento en la estación Santo Domingo, perteneciente al poliducto Esmeraldas-Quito* [Tesis de maestría, Universidad Estatal Península de Santa Elena].

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), Article 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>

- Mafla-Yépez, C., Castejon, C., Rubio, H., & Morales, C. (2024). A vibration analysis for the evaluation of fuel rail pressure and mass air flow sensors on a diesel engine: Strategies for predictive maintenance. *Sensors*, 24(5), Article 1551. <https://doi.org/10.3390/s24051551>
- Muñoz Pinto, D. J., & Muñoz Pinto, D. A. (2025). Mantenimiento preventivo y predictivo en centrales telefónicas: Revisión teórica. *Revista Athenea*, 6(22), 18–28. <https://doi.org/10.47460/athenea.v6i22.108>
- Orbe Peña, J. G., & Pungaña Zambrano, H. A. (2023). *Implementación de la interfaz hombre-máquina (HMI) para el medidor de energía multiparámetro Sentron PAC del laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná* [Trabajo de titulación de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi].
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2021). *Water governance in Peru* (OECD Studies on Water). OECD Publishing. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/03/water-governance-in-peru_0980e96a/568847b5-en.pdf
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. ONU. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Perú. Autoridad Nacional del Agua. (2009). *Política y estrategia nacional de recursos hídricos del Perú*. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/1073.pdf>





- Perú. Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Plan Nacional de Recursos Hídricos*. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/1418.pdf>
- Picado Mora, E., Araya Quesada, D., Ruiz Granados, N., & Sibaja Granados, J. (2024). Emisión de datos del sensor de humedad “EDANA” para la utilización en diferentes labores agrícolas. *Investiga.TEC*, 17(50), 10–15. <https://doi.org/10.18845/itec.v17i50.7160>
- Pires, A., Morato, J., Peixoto, H., Botero, V., Zuluaga, L., & Figueroa, A. (2017). Sustainability assessment of indicators for integrated water resources management. *Science of the Total Environment*, 578, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.217>
- Pulido de León, L. A., García Treviño, I. L., Medina Álvarez, M. A., & Méndez, F. D. L. S. (2024). Optimización del plan de mantenimiento preventivo para equipos de mecanizado por arranque de viruta mediante análisis de fiabilidad y costos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 4760–4780. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.13929
- Puspita, T., & Darmawan, I. A. (2023). *Thermal overload relay (TOR) sebagai sistem proteksi motor induksi 3 fasa pada mesin molding biofuel pelletizer di PT. Sejin Lestari Furniture*. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, 2(2), 168–181. <https://doi.org/10.55606/jtmei.v2i2.1773>
- Ramírez Chávez, F. J., & Sánchez Henao, J. E. (2024). *Diseño de un sistema mecatrónico de control de electrobombas para el abastecimiento eficiente de agua en predios elevados o de alto consumo* [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira].
- Ravikumar, V. (2023). *Sprinkler and drip irrigation: Theory and practice*. Springer.

- Rivero-Contreras, R. E., Zamarreño, J. M., & Tadeo, F. (2025). Avances en el control predictivo para controladores lógicos programables. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 23(1), 13–24. <https://doi.org/10.4995/riai.2025.22466>
- Rodríguez Ortiz, L. E. (2026). Factores que determinan el uso de los interruptores diferenciales en las instalaciones domiciliarias, año 2025. *Arandu UTIC*, 13(1), 309–323. <https://doi.org/10.69639/arandu.v13i1.1917>
- Rojas Suárez, J. P., Vergel Ortega, M., & Orjuela Abril, S. (2021). Investigaciones con CFD aplicadas a bombas centrífugas. *Boletín Redipe*, 10(9), 515–525. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i9.1458>
- Romero, R., Muriel, J. L., García, I., & Muñoz de la Peña, D. (2012). Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural Water Management*, 114, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.026>
- Saravanan, V. S., McDonald, G. T., & Mollinga, P. P. (2009). Critical review of integrated water resources management: Moving beyond polarised discourse. *Natural Resources Forum*, 33(1), 76–86. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2009.01210.x>
- Sehr, M. A., Lohstroh, M., Weber, M., Ugalde, I., Witte, M., Neidig, J., Hoeme, S., Niknami, M., & Lee, E. A. (2021). Programmable logic controllers in the context of Industry 4.0: Current practice and future opportunities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), 3523–3535. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3007764>
- Tripus. (2025, 20 de mayo). *Protecting a three-phase motor from burning out*. <https://tripus.com/blog/protecting-a-three-phase-motor-from-burning-out/>





- Tyagi, N. K. (2024). Impact of concepts and spatial scales on irrigation efficiency for sustainable water resources management: A review. *Journal of Agricultural Engineering (India)*, 61(1), 77–92. <https://doi.org/10.52151/jae2024611.1827>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2023). *The United Nations world water development report 2023: Partnerships and cooperation for water*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384655>
- United Nations. (2024). The Sustainable Development Goals Report. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
- Yáñez, D., Molina, I., & Gallardo, A. (2021). Uso de algoritmo K-media para detectar estado de funcionamiento de electroválvula. *Ecuadorian Science Journal*, 5(3), 220–238. <https://doi.org/10.46480/esj.5.3.157>
- Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for Agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, Article 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>



Walther Hernán Casimiro-Urcos

Doctor en Educación y Magíster en Docencia Universitaria por la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle (Perú); Licenciado en Educación por la misma universidad y Bachiller en Ingeniería Electrónica por la Universidad Ricardo Palma (Perú). Investigador del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) e inscrito en el Registro Nacional Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (REGINA), especialista en metodología de la investigación científica y tratamiento de datos en investigación cuantitativa. Cuenta con estudios posdoctorales en Didáctica de la Investigación por la Universidad Autónoma de España de Durango (México); Investigación Cualitativa por la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina); Sistemas Diacrónicos y Sincrónicos de la Investigación Científica, y Comunicación, Educación y Cultura por la Universidad Santo Tomás (Colombia). Es director y editor de la revista científica *Delectus* y catedrático en programas de maestría y doctorado en universidades del Perú y Latinoamérica. Sus líneas de investigación

Diseño e implementación de control
automatizado para riego por aspersión



comprenden Educación y Salud, así como Metodología y Didáctica de la Investigación Científica. Es evaluador por pares de revistas científicas, consultor universitario en investigación, ponente en congresos nacionales e internacionales y autor y coautor de artículos publicados en revistas indexadas en bases de datos de alto impacto.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7876-0681>



Roger Octavio Quinteros-Osorio

Maestro en Docencia Universitaria, Licenciado en Educación con especialidad en Electricidad y egresado del Doctorado en Ciencias de la Educación. Cuenta con una amplia trayectoria como docente de educación superior en la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle (Perú). Posee experiencia en la formación de profesionales en las áreas de electricidad, automatización industrial, hidráulica, electrohidráulica, electroneumática y control de procesos industriales. Asimismo, ha desempeñado funciones académicas y de gestión universitaria, contribuyendo al fortalecimiento de la educación tecnológica y la innovación pedagógica. Su experiencia investigadora comprende proyectos relacionados con competencias laborales, desempeño docente, diseño curricular, automatización industrial y educación tecnológica. Ha participado también en la elaboración



de textos y materiales académicos especializados para la formación profesional en ingeniería y tecnología, con publicaciones sobre automatismo eléctrico, neumática, hidráulica y control mediante controladores lógicos programables. Su labor académica se orienta al desarrollo de la investigación, la innovación educativa y la formación de profesionales con competencias técnicas y científicas de alto nivel.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8016-9910>



Jorge Armando Hinojosa-Bautista

Maestro en Ciencias de la Educación con mención en Docencia Universitaria y Licenciado en Educación, con especialidad en Electricidad, por la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle (Perú). Cuenta con más de nueve años de experiencia en docencia universitaria e investigación en el área de automatización industrial. Se desempeña como docente nombrado y coordinador de carrera en la Facultad de Tecnología de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, donde desarrolla actividades de gestión académica y docencia en electricidad, automatización y control. Asimismo, participa como investigador colaborador en proyectos relacionados con inteligencia artificial aplicada a proyectos universitarios, competencias digitales y control automatizado. Cuenta con especializaciones en redacción y publicación de



artículos científicos, instrumentación y control industrial, y docencia en educación superior. Es especialista en programación de controladores lógicos programables, sistemas de control con supervisión y adquisición de datos, neumática, electroneumática y diseño asistido por computadora para aplicaciones industriales. Es autor del libro *El servicio educativo de calidad y el aprendizaje por competencias* (2024) y de manuales universitarios de laboratorio sobre neumática, tableros de control y controladores lógicos programables.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5054-9937>



Angel Ricardo Tello-Conde

Docente de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle (Perú). Doctor en Ciencias de la Educación, Magíster en Ciencias de la Educación con mención en Docencia Universitaria y egresado de las maestrías en Administración de la Educación y Gestión Pública. Se desempeñó como director de Contrataciones y Adquisiciones de la Universidad Nacional de Educación. Actualmente es director de la Escuela Profesional de Metalmeccánica y docente del Programa de Estudios de Educación con especialidad en Mecánica de Producción. Es autor y coautor de artículos científicos publicados en revistas científicas indexadas, con líneas de investigación orientadas a la



educación tecnológica, la formación profesional y la gestión educativa.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5762-3431>



Adolfo Osorio-Osorio

Doctor en Ciencias de la Educación y Maestro en Ciencias de la Educación con mención en Educación Tecnológica. Licenciado en Educación, con especialidad en Electricidad, y con Segunda Especialidad en Psicopedagogía y Problemas de Aprendizaje. Asimismo, cuenta con estudios en Matemática Pura, que fortalecen su formación académica y enfoque interdisciplinario. Posee amplia experiencia como docente universitario y de educación superior tecnológica, desempeñándose en la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle y en el Instituto de Educación Superior Tecnológico Público Manuel Seoane Corrales. Su trayectoria comprende las áreas de educación tecnológica, electricidad, automatización industrial, control de procesos, tecnologías aplicadas y formación basada en competencias. Cuenta con diplomados y programas de especialización en automatización, inteligencia artificial, competencias digitales, redes industriales y proyectos tecnológicos. Su actividad académica se complementa con la investigación científica y la producción intelectual, con publicaciones en revistas



indexadas y estudios vinculados con la innovación educativa, inteligencia emocional, estrategias de aprendizaje y gestión académica. Su labor se orienta a la investigación aplicada y a la incorporación de tecnologías emergentes en la educación.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0399-2359>



✦✦ Conocimiento que transforma sociedades
✦✦ Tú inspírate, nosotros publicamos

La creciente presión sobre los recursos hídricos exige transformar la forma en que se diseña, opera y gestiona el riego. En este contexto, *Diseño e implementación de control automatizado para riego por aspersión* presenta una propuesta integral que articula la ingeniería hidráulica, la automatización industrial y las tecnologías digitales para desarrollar sistemas capaces de optimizar el uso del agua con altos niveles de eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad. La obra supera el enfoque convencional de los manuales técnicos al integrar los fundamentos científicos de la gestión hídrica con el diseño, la implementación, la programación, la validación y el mantenimiento de un sistema automatizado de riego por aspersión desarrollado a partir de una experiencia de investigación aplicada. A lo largo de sus capítulos, el libro aborda la gestión sostenible del agua, los principios hidráulicos del riego por aspersión, el diseño e integración de componentes eléctricos, electrónicos e hidráulicos, la programación de Controladores Lógicos Programables, la supervisión del sistema, los mecanismos de protección ante fallas, la evaluación del desempeño y las estrategias de mantenimiento. Desde una perspectiva interdisciplinaria, demuestra cómo la interacción entre sensores, actuadores, sistemas de control y redes hidráulicas permite construir infraestructuras inteligentes capaces de reducir el consumo de agua y energía, mejorar la operación y fortalecer la sostenibilidad ambiental. Más que documentar un proyecto específico, esta publicación ofrece un marco metodológico transferible para el diseño de sistemas automatizados aplicables a la agricultura, áreas verdes e infraestructuras hidráulicas. Por su equilibrio entre rigor científico y aplicación práctica, constituye una referencia para estudiantes, docentes, investigadores y profesionales de las ingenierías hidráulica, agrícola, ambiental, electrónica, mecatrónica e industrial, así como para instituciones comprometidas con la innovación tecnológica y la gestión eficiente de los recursos hídricos. En un escenario marcado por la transformación digital, el Internet de las Cosas y la inteligencia artificial, esta obra aporta las bases conceptuales y técnicas necesarias para impulsar una nueva generación de sistemas de riego inteligentes orientados a la seguridad hídrica y al desarrollo sostenible.

SOPHIA
EDITIONS



ISBN: 978-1-968794-52-1



9 781968 794521 >