

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA Y CONTROL DE REGADÍO DE PALTAS
UTILIZANDO RASPBERRY PI Y ZIGBEE**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Claudio Andrés López Caneo

Profesor Guía:

Mag. Loreto Marín Carcey



**CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO
ACADÉMICO**

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: DISEÑO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA Y CONTROL DE REGADÍO DE PALTAS UTILIZANDO RASPBERRY PI Y ZIGBEE

Nombre del candidato(a): Claudio Andrés López Caneo

Carrera / Grado: Ingeniería de ejecución en Control e Instrumentación industrial

Campus: Viña del mar **Departamento:** Electrotecnia e informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Berto Modin Carcey, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

- 6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 22/10/2025 Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21-10-2025

Firma:

RESUMEN

KEYWORDS: ZIGBEE, RASPBERRY, TELEMETRÍA, XBEE.

El presente trabajo se enfoca en la automatización del sistema de riego en una parcela agrícola de 2 hectáreas ubicada en la comuna de Quillota, dedicada al cultivo de paltas. La problemática identificada radica en la ineficiencia del riego tradicional, el cual opera de manera manual, generando un uso inadecuado de los recursos hídricos, mayor esfuerzo físico por parte de los trabajadores, y baja precisión en el suministro de agua según las necesidades reales del cultivo.

Con el fin de dar solución a este escenario, se planteó como objetivo principal optimizar el riego mediante la implementación de un sistema automatizado y monitoreado de forma remota, capaz de responder de manera eficiente a las condiciones del suelo y del entorno.

La propuesta técnica consistió en la integración de una unidad de control basada en Raspberry Pi, que se comunica de manera inalámbrica con sensores de humedad de suelo y sensores de nivel de agua. Además, se incorporaron electroválvulas y una bomba de agua, que son activadas en función de los datos recolectados. Todos estos elementos se interconectan por medio de una red Zigbee, lo que permite una arquitectura flexible, escalable y de bajo consumo energético.

Desde el punto de vista operativo, el sistema permite el monitoreo en tiempo real y el control remoto a través de una aplicación web o móvil, ofreciendo a los encargados una plataforma amigable para la toma de decisiones. El sistema también incluye almacenamiento de datos históricos, lo cual permite analizar el comportamiento del riego y realizar ajustes estratégicos en función del análisis de desempeño.

En cuanto a la evaluación económica, se realizó una cotización de componentes, justificando la inversión en base a los beneficios de largo plazo, tales como el ahorro de agua, disminución de costos operativos y mayor sustentabilidad del cultivo. Se comparó la alternativa basada en Raspberry Pi con opciones que utilizan PLC o Arduino, concluyendo que la solución seleccionada representa el mejor equilibrio entre tecnología, flexibilidad y costo.

Finalmente, se abordaron aspectos técnicos como el análisis de suelo y la capacidad de campo, selección de sensores, características de la bomba y electroválvulas, y las consideraciones para la instalación y mantención del sistema. Esto permitió garantizar una implementación robusta, alineada con los objetivos definidos y adaptable a las condiciones específicas del predio.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1 CAPÍTULO 1: PROBLEMAS Y OBJETIVOS	2
1 PROBLEMAS Y OBJETIVOS.....	3
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	3
1.2 Botánica del palto.....	3
1.2.1 Características generales de variedades comerciales importantes en Chile.....	4
1.3 Participación de Chile en el comercio internacional de paltos	7
1.4 Manejo del cultivo	8
1.4.1 Suelo	8
1.4.2 Clima	8
1.4.3 Agua	10
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.5.1 Descripción del problema	11
1.5.2 Importancia de resolverlo.....	12
1.5.3 Involucrados.....	12
1.6 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.6.1 Requerimientos	13
1.6.2 Alternativa seleccionada.....	17
1.7 OBJETIVOS	19
1.7.1 Objetivo general.....	19
1.7.2 Objetivos específicos.....	19
2 CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL PROTOTIPO DEL PROYECTO.....	21
2 DESARROLLO DEL PROTOTIPO DEL PROYECTO.....	22
2.1 ESQUEMA GENERAL DE LA SOLUCIÓN Y SUS PRINCIPALES COMPONENTES	22
2.1.1 XBEE	24
2.1.2 XCTU.....	29
2.1.3 Python.....	38
2.1.4 Visual Studio	40
2.1.5 Raspberry PI.....	42
2.1.6 Raspberry PI OS	42
2.2 SENSORES Y ACTUADORES	44

2.2.1	Sensor de humedad	44
2.2.2	Sensor de nivel de agua	54
2.2.3	Electroválvula.....	57
2.2.4	Bomba de agua	59
2.3	CONSIDERACIONES DE IMPLEMENTACIÓN	62
2.4	RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO	70
3	CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA	76
3	EVALUACIÓN ECONÓMICA	77
3.1	Análisis de costos del proyecto.....	77
3.1.1	Costos de desarrollo del proyecto	77
3.1.2	Costos de instalación en terreno	80
3.2	MANTENIMIENTO DEL PROYECTO.....	83
3.2.1	Mantenimiento preventivo.....	83
3.2.2	Mantenimiento Correctivo	83
3.3	JUSTIFICACIÓN DE GASTOS.....	83
	CONCLUSIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Fruto de variedad Hass	4
Figura 1-2 Fruto de variedad Fuerte	5
Figura 1-3 Fruto de variedad Negra de la Cruz	6
Figura 1-4 Fruto de variedad Bacon (izquierda) y Hass (derecha)	6
Figura 1-5 Diagrama de Ishikawa del proyecto	11
Figura 2-1 Esquema general de elementos de control	23
Figura 2-2 Diagrama de flujo del sistema	23
Figura 2-3 Módulo Xbee con y su pinout	25
Figura 2-4. Protocolos de comunicación Xbee	28
Figura 2-5. Adaptador USB Xbee explorer	29
Figura 2-6 Logo digi XCTU	30
Figura 2-7 Paso uno de configuración xbee en XCTU	31
Figura 2-8 Paso dos de configuración xbee en XCTU	31
Figura 2-9. Paso tres de configuración xbee en XCTU	32
Figura 2-10. Paso cuatro de configuración xbee en XCTU	33
Figura 2-11. Paso cinco de configuración xbee en XCTU	34
Figura 2-12. Paso seis de configuración xbee en XCTU	34
Figura 2-13. Paso siete de configuración xbee en XCTU	35
Figura 2-14. Paso ocho de configuración xbee en XCTU	36
Figura 2-15. Paso nueve de configuración xbee en XCTU	37
Figura 2-16. Paso diez de configuración xbee en XCTU	37
Figura 2-17. Referencia de Python	38
Figura 2-18. Instalación de Python en Windows.	39
Figura 2-19. Comando de instalación de librería oficial de digi para xbee.	39
Figura 2-20. Comandos básicos para controlar los Xbee por Python	40
Figura 2-21 Ejemplo de interfaz Visual Studio Code	41
Figura 2-22. Extensiones recomendadas para Visual Studio Code	41
Figura 2-23. Distribución de pines GPIO Raspberry PI 3	42
Figura 2-24. Descarga de Raspberry PI OS.	43

Figura 2-25. Interfaz del escritorio de Raspberry PI OS	44
Figura 2-26 Contenido de agua del suelo por volumen.....	45
Figura 2-27 Potencial hídrico	46
Figura 2-28. Constante dieléctrica de materiales	46
Figura 2-29. Comparación de suelos con diferentes humedades.....	47
Figura 2-30 Sensor Alternativo de humedad de suelo.....	50
Figura 2-31 Sonda Aquacheck AQC11.....	51
Figura 2-32 Conexión sonda Aquacheck AQ11	52
Figura 2-33. Sensor de humedad de suelo prototipo.	53
Figura 2-34. Esquema de conexión de sensor de humedad a Xbee.	54
Figura 2-35. Sensor de nivel de agua tipo flotador	56
Figura 2-36. Configuración Pull up/Pull down con resistencia.	56
Figura 2-37. Esquema de conexión sensor de nivel a Xbee.	57
Figura 2-38. Válvula solenoide de 24V	58
Figura 2-39. Esquema de conexión electroválvula a Xbee.....	59
Figura 2-40 Referencia de bomba de agua 220V	60
Figura 2-41. Esquema de conexión del prototipo de la bomba a Xbee.....	61
Figura 2-42 Esquema de conexión de la bomba a Xbee	61
Figura 2-43 Diseño de instalación de sensor de humedad	63
Figura 2-44 Alerta nivel de pozo bajo	71
Figura 2-45 Riego detenido.....	72
Figura 2-46 Activación del riego.....	73
Figura 2-47 Circuito nodo bomba y nodo sensor de nivel	74
Figura 2-48 Circuito nodo sensor de humedad y nodo electroválvula	75

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS:

PLC	: Controlador Lógico Programable
Xbee	: Módulo de comunicación inalámbrica Zigbee
ADX	: Analog Digital X – entrada analógica en XBee
API	: Interfaz de programación de aplicaciones
Comando AT	: Conjunto de comandos de control para módulos de comunicación
IEEE	: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
PAN ID	: Identificador de red de área personal
USB	: Universal Serial Bus
Módulo RF	: Módulo de radiofrecuencia
PC	: Computadora personal
VS Code	: Visual Studio Code – entorno de desarrollo
LAN	: Local Area Network – red de área local
microSD	: Tarjeta de memoria micro Secure Digital
DSI	: Display Serial Interface – interfaz para pantallas
GPIO	: General Purpose Input/Output – entradas y salidas de propósito general
GNU/Linux	: Sistema operativo libre basado en Linux
ARM	: Arquitectura de procesadores Advanced RISC Machines
IOT	: Internet of Things – Internet de las cosas
WIFI	: Wireless Fidelity – tecnología de red inalámbrica
Acceso SSH	: Secure Shell – protocolo seguro de acceso remoto
VWC	: Volumetric Water Content – contenido volumétrico de agua
TDR	: Time Domain Reflectometry – técnica de medición en suelos/cables
FDR	: Frequency Domain Reflectometry – técnica de medición en frecuencia
CLP	: Controlador Lógico Programable (versión en español)
TTL	: Transistor-Transistor Logic – nivel lógico estándar
ADC	: Analog to Digital Converter – conversor analógico-digital

I/O	: Input/Output – entradas y salidas
SSR	: Solid State Relay – relé de estado sólido
UF	: Unidad de Fomento – valor financiero en Chile
AGM	: Absorbent Glass Mat – tipo de batería sellada de plomo-ácido
DSSS	: Direct Sequence Spread Spectrum
HH	: Horas hombre – mide la cantidad de horas de trabajo

B. SIMBOLOGÍA:

VCC	: Tensión de alimentación en circuitos digitales
PWMX	: Modulación por ancho de pulso en canal X
RSSI	: Indicador de intensidad de señal recibida
DIOX	: Pin digital de entrada/salida número X
CTS	: Clear to Send – señal de control en comunicación serial
GHz	: Gigahercios – frecuencia
GB	: Gigabyte – unidad de almacenamiento
Bits	: Unidad mínima de información digital
b/g/n	: Estándares Wi-Fi IEEE 802.11
mm	: Unidad de medida de longitud
Cm	: Centímetro – unidad de longitud
mA	: Mili Amper – Unidad de corriente eléctrica
%	: Porcentaje
°C	: Grados Celsius – unidad de temperatura
VDC	: Voltios en corriente continua
V	: Unidad de voltaje
Ω	: Ohm – unidad de resistencia eléctrica
ON/OFF	: Encendido/Apagado
GND	: Tierra o referencia en circuitos eléctricos
AC	: Corriente alterna

DC	: Corriente continua
Tx	: Transmisión en comunicación serial
Rx	: Recepción en comunicación serial
mAh	: Miliamperio-hora – capacidad de batería
Kg	: Kilogramo – unidad de masa
mW	: mili Watts
~	: Virgulilla – aproximadamente a un valor
m ³	: metros cúbicos
mmhos/cm	: milimhos por centímetro – unidad para medir la conductividad eléctrica
pH	: medida que indica el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia

INTRODUCCIÓN

La optimización del riego en la agricultura moderna es un desafío clave para garantizar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, energéticos y laborales. En este contexto, el presente proyecto se enfoca en la implementación de un sistema automatizado de riego en una parcela de 2 hectáreas, ubicada en la ciudad de Quillota, destinada al cultivo de paltos. El objetivo principal es modernizar el proceso de riego mediante el uso de tecnologías que permitan monitorear, controlar y distribuir el recurso hídrico de manera eficiente, sostenible y rentable.

El sistema propuesto integrará una Raspberry Pi como controlador principal, encargada de gestionar las operaciones del sistema y procesar la información obtenida. Los sensores de humedad de suelo y nivel de agua jugarán un papel fundamental en la recolección de datos, los cuales serán transmitidos de forma inalámbrica mediante módulos Zigbee, asegurando una comunicación robusta y eficiente en toda la parcela. Por otro lado, se instalarán actuadores como electroválvulas y una bomba de agua, que automatizarán la distribución del riego por zonas según las necesidades hídricas detectadas.

Adicionalmente, el sistema contará con paneles solares y baterías que alimentarán los dispositivos, promoviendo un uso energético sostenible. Los equipos se montarán en mástiles ubicados estratégicamente sobre la altura de los árboles para garantizar una línea de visión óptima entre los nodos y el controlador. El monitoreo y la configuración del sistema se realizarán de manera remota a través de una página web o aplicación móvil, lo que permitirá gestionar el riego de forma eficiente desde cualquier ubicación.

La implementación de este sistema no solo contribuirá a la reducción del esfuerzo físico de los trabajadores y a la minimización de errores humanos, sino que también mejorará la productividad y salud de los cultivos al asegurar un riego preciso y uniforme. En definitiva, este proyecto representa un avance tecnológico significativo que responde a las necesidades del sector agrícola actual, alineándose con los principios de sostenibilidad y eficiencia en el manejo de los recursos.

CAPÍTULO 1: PROBLEMAS Y OBJETIVOS

1 PROBLEMAS Y OBJETIVOS

En este capítulo se detallan las problemáticas relacionadas con el sistema de riego manual en una parcela agrícola, las cuales ocasionan un uso ineficiente de los recursos hídricos y energéticos, limitando la productividad y afectando la sostenibilidad del cultivo. Estas ineficiencias han llevado a la necesidad de explorar alternativas que ofrezcan soluciones efectivas, destacándose entre ellas la implementación de un sistema de automatización de riego, con el objetivo de mejorar el control y optimizar los recursos de manera más eficiente. Asimismo, se aborda la botánica del palto, las características de las distintas variedades cultivadas, la participación de Chile en el comercio internacional y las principales consideraciones asociadas al manejo del cultivo.

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

Es necesaria la implementación de un sistema de riego automatizado en una parcela ubicada en la ciudad de Quillota, destinada al cultivo de paltas. Esta necesidad surge de la intención de optimizar el uso de los recursos hídricos, garantizando una gestión eficiente y sostenible, además de reducir el esfuerzo físico requerido por los trabajadores, promoviendo así una operación agrícola más eficiente y moderna.

1.2 BOTÁNICA DEL PALTO

El palto (*Persea americana* Mill.), también conocido como aguacate, es originario del continente americano, aunque su cultivo comercial es relativamente reciente. Pertenece a la familia *Lauraceae* y está relacionado con el lingue (*Persea lingue*), especie nativa de los bosques del sur de Chile. Se trata de un árbol perenne que mantiene sus hojas durante todo el año, alcanzando alturas de hasta 12 metros y copas de aproximadamente 14 metros de diámetro.

Las variedades actuales de palto se han obtenido mediante hibridaciones de distintos materiales genéticos trasladados desde su centro de origen, y pueden clasificarse según altura, forma, tamaño del fruto, color del follaje y adaptación a condiciones climáticas. Con base en estas características, se reconocen tres razas principales: mexicana, guatemalteca y antillana.

En Chile, los cultivares más relevantes son Hass, Fuerte, Negra de La Cruz (o Prada), Bacon, Edranol y Zutano. La variedad Hass, de origen californiano, presenta predominancia genética de la raza guatemalteca y es sensible a heladas, especialmente en plena floración, resistiendo solo

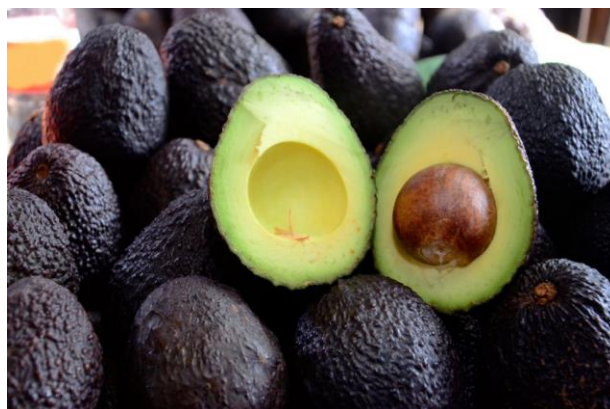
hasta $-1,1$ °C. Destaca por su alta productividad, alcanzando rendimientos promedio de 12 toneladas por hectárea entre los 6 y 8 años, con una calidad sobresaliente debido a su contenido de aceite, que puede llegar al 20%. Su precocidad es elevada, ya que permite obtener cosechas desde el segundo o tercer año, con un periodo de recolección que puede extenderse de julio a marzo.

El ciclo fenológico del palto Hass incluye dos brotaciones, una en primavera (7 de septiembre al 21 de diciembre) y otra en otoño (29 de marzo al 17 de mayo), siendo la primera más intensa. El crecimiento radicular también presenta dos etapas: una en primavera-verano (28 de octubre al 3 de febrero) y otra entre marzo y mediados de mayo. En la zona de Quillota (V Región), la floración ocurre entre el 21 de octubre y el 13 de noviembre, seguida de la cuaja. Posteriormente, se producen dos caídas de frutos: la primera desde mediados de noviembre hasta fines de diciembre, y la segunda, o regulación natural de carga, entre marzo y abril.

1.2.1 Características generales de variedades comerciales importantes en Chile

a) Hass, ver Figura 1-1

- Híbrido de raza guatemalteca y raza mexicana.
- Fruto color negro y redondeado.
- Producción potencial de 10 a 25 toneladas por hectárea.
- Período flor a fruto: 12 a 16 meses.
- Cosecha: agosto a noviembre.
- Calibre: dependiente de riego, carga, manejos de cultivo.



Fuente: <https://paltahass.cl>

Figura 1-1 Fruto de variedad Hass

b) Fuerte, ver Figura 1-2

- Híbrido de raza guatemalteca y raza mexicana.
- Crecimiento desordenado, piel verde.
- Producción baja, 8 a 10 toneladas por hectárea.
- Época de cosecha: agosto a octubre. En algunas localidades a partir de julio.
- Sensible a bajas temperaturas.
- Alta sensibilidad a nitrógeno.

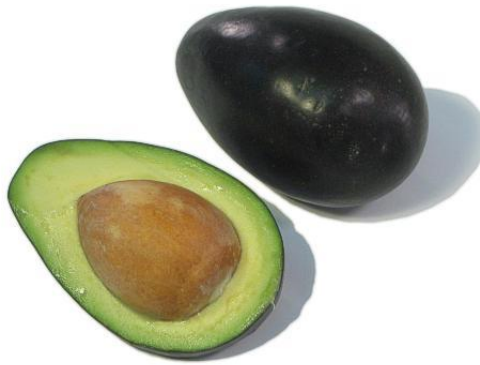


Fuente: <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/ed6c1587-da54-4e32-97d8-5932431f5a37/content>

Figura 1-2 Fruto de variedad Fuerte

c) Negra de La Cruz, ver Figura 1-3.

- Híbrido de raza mexicana y raza guatemalteca.
- Buen aspecto del fruto, color negro.
- Alta resistencia al frío (-5°C).
- Producción baja: 6 a 7 toneladas por hectárea.
- Época de cosecha: abril a julio. Debido a la mayor resistencia a heladas su cultivo se desarrolla en áreas donde Hass y otros cultivares no toleran bajas temperaturas.



Fuente: <https://www.organicosas.com/productos-naturales-organicos/frutas-y-verduras-organicas/palta-champion-organica-1-kilo>

Figura 1-3 Fruto de variedad Negra de la Cruz

d) Bacon, ver Figura 1-4.

- Híbrido de raza mexicana y raza guatemalteca.
- Resistente a frío, gran altura.
- Cosecha: julio a enero.
- Producción: 14 toneladas por hectárea en valles interiores y 20 toneladas por hectárea en zonas costeras.



Fuente: <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/ed6c1587-da54-4e32-97d8-5932431f5a37/content>

Figura 1-4 Fruto de variedad Bacon (izquierda) y Hass (derecha)

e) Edranol

- Híbrido de raza guatemalteca y raza mexicana.
- Importante polinizante de paltos Hass.
- Baja producción y muy variable en el tiempo.
- Cosecha: septiembre a noviembre.

f) Raza mexicana

- Semilla de plántulas de raza mexicana.
- Variedad mexicana, resistente a bajas temperaturas, buena germinación y buen crecimiento.
- Importante portainjerto.
- Cosecha entre marzo a mayo.

g) Esther

- Cultivar proveniente de Hass. Tamaño del árbol semi-enano.
- 25 meses de flor a fruto.
- Producción: 20 a 25 toneladas por hectárea.
- Gran tamaño
- Alta sensibilidad a plaga de trips del palto (*Heliethrips haemorroidalis*).

1.3 PARTICIPACIÓN DE CHILE EN EL COMERCIO INTERNACIONAL DE PALTOS

De acuerdo con antecedentes proporcionados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, la superficie mundial destinada al cultivo de palto (*Persea americana* Mill.) superaba en el año 2003 las 340 mil hectáreas, registrando un incremento anual cercano al 2% durante la década de 1990-2000. México concentraba la mayor superficie cultivada con 94 mil hectáreas, seguido por Estados Unidos con 26,4 mil hectáreas y Chile con 21,9 mil hectáreas. En el ámbito del comercio internacional, los principales países exportadores en esos años correspondían a México, Chile, Sudáfrica, España e Israel. En el caso de Chile, el principal destino de exportación era Estados Unidos, al igual que en México, favorecido por los beneficios derivados de tratados comerciales como el NAFTA y el TLC, así como por ventajas comparativas asociadas a la distancia y a los volúmenes de producción, posicionando a México como su principal competidor en dicho mercado.

La superficie nacional cultivada con paltos se estima en 21.983 hectáreas, ubicándose en el tercer lugar de importancia dentro de la fruticultura chilena, después de la vid y el manzano. Entre 1990 y 2002, la superficie paltos aumentó de 8.190 a más de 21.800 hectáreas, proyectándose un crecimiento sostenido impulsado por la alta rentabilidad del cultivo orientado principalmente a la exportación. Este incremento productivo se ha acompañado de una oferta creciente, en concordancia con las mayores exigencias de calidad de los mercados internacionales,

estimándose que aproximadamente 18.000 hectáreas corresponden al cultivar Hass. La producción nacional se concentra principalmente en la Región de Valparaíso y la Región Metropolitana, las cuales representan en conjunto más del 80% del total, mientras que las regiones de Coquimbo y O'Higgins aportan alrededor del 17%. En el mercado interno, el consumo de palta se mantiene de manera continua durante todo el año, con una participación creciente de productores y empresas exportadoras en la comercialización, lo que permite garantizar estándares de calidad y fortalecer las cotizaciones del producto.

1.4 MANEJO DEL CULTIVO

El manejo del cultivo requiere considerar diversos factores fundamentales para optimizar la producción, entre los cuales destacan el tipo de suelo, las condiciones climáticas, así como la calidad y cantidad del recurso hídrico disponible.

1.4.1 Suelo

El establecimiento de un huerto de paltos requiere suelos con una profundidad mínima de un metro en condiciones de terreno plano, considerando al menos 70 centímetros para el desarrollo del sistema radical y 30 centímetros adicionales destinados al drenaje, debido a que aproximadamente el 80% de las raíces de esta especie se concentran en los primeros 30 centímetros del perfil del suelo. La principal limitante para este cultivo corresponde a la presencia de suelos de textura arcillosa con deficiencias de drenaje, mientras que las condiciones más favorables se observan en suelos de textura liviana, sueltos y con una alta proporción de piedras, lo que favorece el desarrollo radicular y una adecuada aireación. En términos edáficos, resulta fundamental que el suelo presente un elevado porcentaje de macroporos, característica vinculada a una buena estructura y generalmente asociada a un mayor contenido de materia orgánica. Estos macroporos permiten un movimiento eficiente tanto del agua como del oxígeno, siendo este último indispensable en la zona radical para la absorción de agua y nutrientes, así como para el desarrollo de nuevas raíces que garantizan el crecimiento y productividad de la planta.

1.4.2 Clima

En Chile, el clima constituye uno de los factores determinantes para el cultivo del palto, dado que el país no dispone de amplias superficies con clima subtropical, condición óptima para el desarrollo natural de esta especie. En consecuencia, este aspecto debe ser evaluado

rigurosamente al momento de seleccionar la especie y el cultivar a establecer, así como en el diseño del huerto y en la planificación de eventuales inversiones destinadas a reducir riesgos productivos. Dentro de los factores climáticos que deben considerarse se incluyen los siguientes:

a) Temperatura

El palto presenta una alta sensibilidad a las bajas temperaturas, siendo el cultivar Hass particularmente vulnerable, ya que experimenta daños cuando las temperaturas descienden por debajo de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Asimismo, resulta fundamental que durante el período de floración se disponga de condiciones térmicas óptimas, lo cual en Chile ocurre en escasas zonas. Estudios han demostrado que, con temperaturas diurnas entre 20 y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y nocturnas cercanas a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, se favorece una fecundación exitosa y una adecuada cuaja de frutos.

b) Viento

Este factor incide de manera significativa en el crecimiento de los paltos, especialmente durante los primeros años, al provocar doblamientos y deformaciones estructurales. Asimismo, ocasiona daños mecánicos en la planta, malformaciones en los frutos, caída de flores y frutos. Adicionalmente, el viento incrementa la demanda hídrica de las plantas y dificulta el vuelo de las abejas, lo que repercute negativamente en el proceso de polinización.

c) Radiación solar

Un exceso de radiación solar genera el denominado “golpe de sol”, que ocasiona daño por calor, marchitamiento, decoloración foliar, resequedad en la corteza y afectación en los frutos. Para mitigar este problema, se recomienda aplicar cal o látex agrícola de color blanco en el tronco y las ramas principales, además de mantener un adecuado equilibrio en la distribución del follaje. La radiación constituye, asimismo, un factor determinante en la evapotranspiración del cultivo, por lo que debe considerarse al establecer el balance entre los requerimientos hídricos del palto y la disponibilidad de agua en un área específica. A modo de referencia, en la zona de Quillota las necesidades hídricas del cultivo se estiman entre 8.000 y 10.000 m^3 , mientras que en zonas áridas y con mayores niveles de radiación pueden alcanzar hasta aproximadamente 18.000 m^3 .

d) Precipitaciones

Las precipitaciones naturales en las zonas productoras de palto representan un aporte a la disponibilidad hídrica a través de la recarga de reservas de aguas nieve, aguas lluvia y aguas subterráneas. No obstante, debido a que estas precipitaciones se concentran en los meses de invierno, su contribución directa al requerimiento hídrico del cultivo a nivel predial resulta poco significativa. En consecuencia, para alcanzar rendimientos competitivos, es necesario suplir las

necesidades del palto mediante un manejo de riego adecuado, utilizando recursos provenientes de canales, pozos, norias, drenes o tranques acumuladores, entre otras fuentes.

e) Humedad relativa del aire

En el caso del palto, una alta humedad relativa contribuye a mitigar condiciones de estrés, mientras que una baja humedad relativa tiende a agravarlas, especialmente cuando se asocian a déficit hídrico. Al ser una especie originaria de zonas con clima subtropical, el palto presenta un mejor desempeño fisiológico, particularmente en procesos como la transpiración y la fotosíntesis, cuando la humedad relativa se aproxima a las condiciones de su lugar de origen. En la zona central de Chile, este parámetro presenta un rango medio entre 62% y 85%; sin embargo, existen áreas como el valle de Codpa, en la Región de Arica y Parinacota, donde la humedad relativa media alcanza solo un 39%. Esta condición resulta altamente restrictiva para la producción, ya que incrementa significativamente los requerimientos hídricos del cultivo y afecta de manera directa su funcionamiento fisiológico.

1.4.3 Agua

Es fundamental considerar los requerimientos hídricos del palto en etapa de plena producción, los cuales varían entre 8.000 y 10.000 m³ por hectárea en la zona central de Chile. No obstante, en áreas más áridas del norte o en sectores próximos a la cordillera, estas necesidades pueden alcanzar hasta 18.000 m³ por hectárea al año. Junto con la cantidad de agua, la frecuencia de disponibilidad resulta igualmente relevante, ya que depende de las características del suelo y del sistema de riego empleado. En cuanto a la calidad del agua, se ha determinado que el rango óptimo de pH para riego en este cultivo se sitúa entre 5,0 y 5,5. Sin embargo, en la mayoría de las zonas productoras del país, el pH fluctúa entre 6,5 y 7,5, lo que no constituye una limitante significativa a menos que supere este último valor. Un aspecto más restrictivo para la producción y calidad de la fruta corresponde a la conductividad eléctrica del agua, ya que valores superiores a 0,75 mmhos/cm reflejan una salinidad excesiva que afecta negativamente el rendimiento del cultivo.

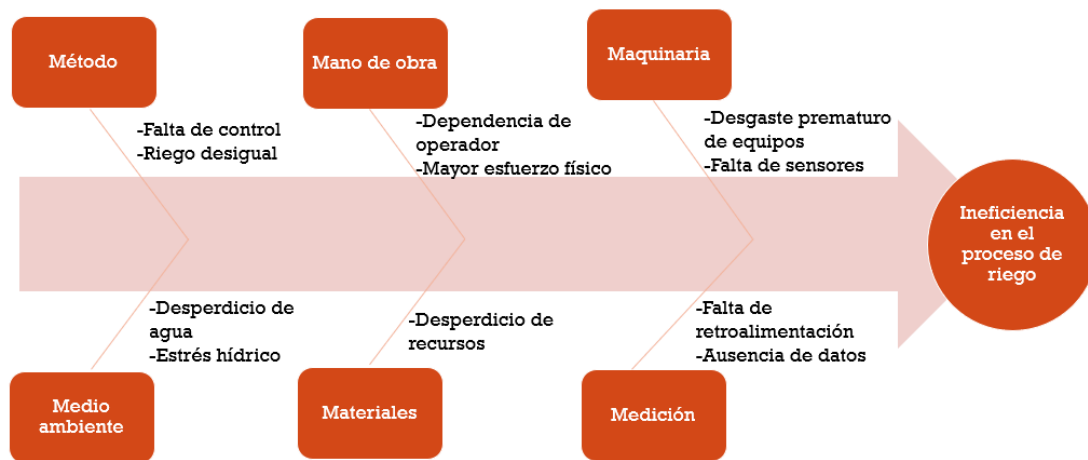
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El principal problema es la ineficiencia en el proceso de riego debido a la falta de un sistema automatizado. Esto genera un uso inadecuado de agua y energía, riego desigual en los

cultivos, mayor dependencia de la mano de obra y un control limitado sobre las condiciones del terreno, lo que afecta negativamente la productividad y los recursos.

1.5.1 Descripción del problema

En la Figura 1-5 se desglosa en un diagrama de Ishikawa la problemática del proyecto.



Fuente: Elaboración propia en base a los antecedentes del proyecto

Figura 1-5 Diagrama de Ishikawa del proyecto

a. Métodos (procedimientos de riego manual o sin control automatizado)

- Uso excesivo o insuficiente de agua debido a la falta de control preciso.
- Riego desigual entre diferentes sectores de la parcela.
- Falta de seguimiento a las condiciones del suelo (humedad) y niveles de agua.

b. Mano de obra (recursos humanos involucrados)

- Dependencia de operadores para encender y apagar las bombas de manera manual.
- Posibilidad de errores humanos, como olvidos o sobrecarga de trabajo.
- Mayor esfuerzo físico y tiempo invertido en las tareas de riego.

c. Equipos (infraestructura y dispositivos de riego)

- Desgaste prematuro de bombas y válvulas debido a un uso continuo o incorrecto.
- Falta de integración de sensores que monitoreen la humedad o el nivel del pozo.
- Ineficiencia en la distribución del agua por la falta de un control adecuado sobre los actuadores.

d. Medio ambiente (factores externos)

- Variaciones en la disponibilidad de agua en el pozo sin un sistema que regule el riego en función del nivel.
- Desperdicio de agua en áreas innecesarias debido a la falta de ajuste por zonas.
- Estrés hídrico en las plantas por exceso o falta de riego en diferentes momentos.

e. Materiales (recursos utilizados)

- Desperdicio de agua en áreas con menor necesidad.
- Falta de optimización en el uso de recursos hídricos, lo que incrementa los costos de operación.
- Ineficiencia en el uso de energía para las bombas.

f. Mediciones (control y monitoreo)

- Ausencia de datos precisos sobre la humedad del suelo y el nivel del pozo.
- Incapacidad de realizar ajustes automáticos en el riego según las condiciones ambientales.
- Falta de retroalimentación para mejorar la eficiencia del sistema de riego.

1.5.2 Importancia de resolverlo

Se busca resolver la ineficiencia en el riego causada por la ausencia de un sistema automatizado, con el fin de mejorar el uso racional del agua y la energía, reducir la dependencia de la mano de obra, evitar el desperdicio de recursos y asegurar un riego adecuado para los cultivos. Esto contribuirá a mantener la salud óptima de las plantas y a incrementar la productividad de la parcela. El objetivo principal es optimizar los recursos hídricos y energéticos, garantizar un crecimiento homogéneo de los cultivos, maximizar la rentabilidad de la plantación y reducir los costos operativos, logrando así una producción agrícola más eficiente y sostenible a largo plazo.

1.5.3 Involucrados

Los principales afectados por la ineficiencia en el riego sin automatización son diversos actores claves. En primer lugar, los propietarios de la parcela enfrentan pérdidas económicas al no poder optimizar el uso de agua y energía, lo que se traduce en menores rendimientos y mayores costos operativos. Los trabajadores agrícolas también se ven impactados, ya que el riego manual incrementa su carga laboral y el riesgo de errores, afectando su productividad y generando un desgaste físico innecesario. Los cultivos, por su parte, sufren directamente las consecuencias de un riego desigual, lo que provoca estrés hídrico y compromete la salud, calidad y productividad de las plantas. Los administradores o encargados de la plantación enfrentan mayores dificultades

para gestionar eficientemente los recursos, debido a la falta de control sobre el sistema de riego y la dependencia de procesos manuales. Además, el medio ambiente se ve perjudicado por el desperdicio de agua y energía, lo que contribuye al deterioro de los recursos naturales y compromete la sostenibilidad de la producción a largo plazo. Por último, los clientes o consumidores finales también pueden verse afectados si la producción disminuye o si la calidad de los cultivos se deteriora, lo que impactaría la disponibilidad y el costo de los productos en el mercado.

1.6 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Una solución efectiva para mejorar y transformar el proceso de riego sería implementar un sistema de riego automatizado inteligente, que combine tecnologías de monitoreo y control para optimizar el uso de recursos.

1.6.1 Requerimientos

Un sistema de riego automático requiere una serie de componentes y características clave para funcionar de manera eficiente. A continuación, en la tabla 1-1, se detallan los principales requerimientos:

Tabla 1-1. Requerimientos para un sistema automático de riego.

N°	Requerimientos	Criterio de aceptación	Descripción
1	Sensores	Para medir el nivel de humedad y activar el riego cuando sea necesario.	El sistema debe contar con sensores de nivel, humedad y temperatura.
		Para monitorear la cantidad de agua disponible en pozos o tanques.	
		Para adaptar el riego según las condiciones ambientales.	
		Para controlar la cantidad de agua suministrada y evitar fugas o problemas de presión.	

2	Controladores y actuadores	Para gestionar el sistema, activando y desactivando el riego según la información recibida de los sensores.	El sistema debe contar con un controlador de riego programable, electroválvulas, bomba de agua.
		Para abrir o cerrar el paso del agua en los diferentes sectores del terreno.	
		Para suministrar agua desde el pozo o tanque, regulada según las necesidades del riego.	
3	Sistema de comunicación	Para integrar todos los componentes y permitir la recopilación y envío de datos en tiempo real.	El sistema debe contar con tecnología IoT (Internet de las cosas) y protocolo de comunicación inalámbrica (Zigbee y Wi-Fi)
		Para conectar sensores, actuadores y el controlador de manera remota y eficiente.	
4	Plataforma de gestión y telemetría	Para que el operador pueda monitorear el sistema en tiempo real, ajustar configuraciones, programar el riego y recibir alertas.	El sistema debe contar con una interfaz de usuario (aplicación o plataforma web), registro de datos históricos, alertas y notificaciones
		Para almacenar la información de los sensores y analizar el uso del agua, eficiencia del riego y posibles mejoras.	
		Para advertir sobre fallos en los equipos, bajo nivel de agua, condiciones climáticas adversas o cualquier anomalía.	
5	Almacenamiento de agua	Para acumular agua cuando no se esté regando o cuando el nivel del pozo sea insuficiente.	El sistema necesita tanque de almacenamiento de agua y un sistema de control del nivel de llenado del tanque
		Para asegurarse de que el tanque se llene de manera automática cuando sea necesario.	

6	Energía	Para alimentar los sensores y electroválvulas	El sistema necesita ser alimentado por paneles solares y baterías.
7	Seguridad	Para proteger la información transmitida y evitar accesos no autorizados al sistema.	El sistema debe contar con autenticación y cifrado de datos

Fuente: Elaboración propia en base a los requerimientos de un sistema de automatización de riego.

Estos requerimientos permiten construir un sistema de riego automático con telemetría que sea eficiente, escalable y fácil de gestionar, proporcionando un control preciso del riego y la posibilidad de optimizar los recursos a través de la monitorización en tiempo real.

1.6.2 Alternativas de solución

Esta sección presenta un análisis detallado de diversas opciones para resolver la ineficiencia en el riego de una parcela agrícola sin automatización. Se proponen cuatro alternativas de solución, enfocadas en el tipo de controlador más idóneo para atender las necesidades del sistema de riego.

1.6.2.1 Alternativa N°1: "Hacer nada"

La primera alternativa consiste en no realizar cambios y mantener el sistema de riego tal como está, es decir, con un control manual y sin automatización. Aunque esta opción no requiere inversión inmediata, acarrea diversas desventajas a largo plazo:

- Desperdicio de recursos: Se continuará utilizando agua y energía de manera ineficiente, lo que incrementará los costos operativos y afectará la sostenibilidad del cultivo.
- Dependencia de la mano de obra: El proceso de riego seguiría siendo manual, lo que implica un mayor uso de recursos humanos, con la posibilidad de cometer errores y el aumento de los costos laborales.
- Riesgo para la productividad: La falta de un control preciso sobre el riego afectaría negativamente la salud de las plantas, resultando en una menor productividad y calidad de los cultivos.

Aunque esta alternativa evita gastos iniciales, las consecuencias a largo plazo como el aumento de costos y la reducción de la eficiencia productiva la hacen poco viable en un escenario competitivo y orientado hacia la sostenibilidad.

1.6.2.2 Alternativa N°2: “Automatización y telemetría con Arduino”

La segunda alternativa propone implementar un sistema automatizado utilizando la plataforma Arduino. Esta solución es económica y flexible, adecuada para parcelas pequeñas o medianas. Ofrece las siguientes características:

- Monitoreo básico: Posibilidad de integrar sensores de humedad y nivel de agua, permitiendo el control automático del riego por zonas.
- Control remoto: Con módulos de comunicación, el sistema puede ser gestionado a distancia, reduciendo la dependencia de la mano de obra.
- Bajo costo: Arduino es una plataforma accesible en términos de inversión inicial y mantenimiento.

Sin embargo, su principal desventaja radica en su capacidad limitada para manejar entornos más complejos o condiciones ambientales adversas, lo que puede afectar la confiabilidad del sistema a largo plazo.

1.6.2.3 Alternativa N°3: “Automatización y telemetría con Raspberry”

Esta alternativa plantea la automatización mediante Raspberry Pi, una plataforma más potente y versátil que Arduino. Ofrece:

- Procesamiento avanzado: Permite integrar análisis de datos en tiempo real, gestión remota y una interfaz gráfica intuitiva.
- Conectividad superior: Facilita la comunicación mediante redes Wi-Fi o Ethernet, mejorando la capacidad de supervisión y control.
- Ampliabilidad: Puede adaptarse a sistemas más complejos en el futuro, ofreciendo mayor flexibilidad.

Sin embargo, esta solución implica un costo ligeramente mayor y requiere conocimientos técnicos especializados para su implementación y mantenimiento, lo que podría ser una limitación inicial.

1.6.2.4 Alternativa N°4: "Automatización y telemetría con PLC"

La cuarta alternativa utiliza un Controlador Lógico Programable (PLC), una opción robusta y confiable, especialmente diseñada para sistemas industriales. Sus ventajas incluyen:

- Alta durabilidad: Los PLC están diseñados para operar en condiciones adversas y con alta precisión.
- Escalabilidad: Permiten la integración de tecnologías adicionales en el futuro, como sistemas de telemetría avanzados o inteligencia artificial.
- Confiabilidad: Ofrecen una operación estable y segura, adecuada para proyectos de mayor envergadura.

A pesar de sus beneficios, esta solución es la más costosa en términos de inversión inicial y podría requerir personal capacitado para su instalación y configuración.

1.6.3 Alternativa seleccionada

A partir de las alternativas de solución presentadas previamente, se llevará a cabo un análisis basado en criterios que permitan determinar cuáles son las más factibles de implementar. Cada criterio será evaluado en una escala de calificación del 1 al 5, donde 1 corresponde a "Muy deficiente" y 5 a "Óptimo", como se puede observar en la tabla 1-2 de puntuación de las alternativas. La suma de las calificaciones asignadas a cada criterio generará un puntaje total, y la alternativa que obtenga la mayor puntuación será seleccionada para su implementación.

Tabla 1-2. Tabla de puntuación de alternativas de solución.

Tabla de Puntuación de Alternativas de Solución				
Muy deficiente	Deficiente	Aceptable	Bueno	Óptimo
1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración propia en base a escala de evaluación.

Los criterios a considerar para la toma de decisión serán cuatro: innovación, beneficios, tiempo y costos. El criterio de innovación evaluará el grado de modernización que aporta cada alternativa al sistema de riego, considerando la incorporación de mejoras tecnológicas o procesos novedosos que optimicen el uso de los recursos. En cuanto a los beneficios, se analizarán los impactos positivos de cada opción, como el ahorro de agua y energía, la mejora en la productividad, la reducción de costos operativos y la sostenibilidad a largo plazo. El criterio de tiempo se centrará en evaluar la duración estimada para la implementación de cada alternativa, considerando tanto la instalación como la puesta en marcha, con el objetivo de seleccionar una solución que pueda ejecutarse de manera eficiente sin comprometer la calidad del sistema. Por último, el criterio de costos analizará la inversión económica requerida para cada opción, incluyendo gastos iniciales, mantenimiento y posibles actualizaciones futuras, con el propósito de identificar la alternativa más rentable y sostenible dentro de las limitaciones presupuestarias. Estos cuatro criterios permitirán realizar una evaluación integral y objetiva, garantizando que la decisión final se alinee con los objetivos del proyecto y las necesidades específicas del sistema de riego.

En la tabla 1-3 se presentan los resultados de la evaluación de los criterios correspondientes a cada alternativa, junto con la puntuación final obtenida. Esta puntuación será determinante para la toma de decisiones y establecerá el curso de acción a seguir.

Tabla 1-3. Evaluación de las alternativas.

Característica/Alternativa	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Innovación	1	2	3	4
Beneficio	1	4	4	4
Tiempo	4	3	3	3
Costos	2	4	4	1
Puntuación total	8	13	14	12

Fuente: Elaboración propia en base a escala de evaluación.

Tras evaluar las diferentes opciones, se ha decidido implementar la alternativa 3: Automatización y telemetría con Raspberry Pi. Esta elección se basa en las ventajas tecnológicas que ofrece, como su capacidad de procesamiento avanzado, conectividad superior y flexibilidad para futuras ampliaciones del sistema. Además, esta alternativa se ajusta al presupuesto disponible, equilibrando costos moderados con un alto rendimiento técnico.

1.7 OBJETIVOS

En esta sección se definen los objetivos que se buscan alcanzar con el desarrollo del proyecto de mejora del sistema de riego de una parcela agrícola. Estos objetivos están alineados con la necesidad de optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia operativa.

1.7.1 Objetivo general

- Optimizar el riego de una parcela agrícola mediante la implementación de un sistema de automatización y monitoreo remoto, mejorando la eficiencia en el uso de agua y energía.

1.7.2 Objetivos específicos

- Plantear el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto orientado a la supervisión y control del riego a distancia, concebido como una mejora futura que permitirá la gestión y el ajuste de parámetros en tiempo real, aunque no se implementa en la presente etapa del proyecto.
- Diseñar y desarrollar una lógica de control desde su base, que integre los datos de los sensores y optimice el funcionamiento del sistema, asegurando el uso eficiente de los recursos y la automatización del riego.
- Desarrollar un prototipo funcional del sistema de riego automatizado que permita validar su operatividad, eficiencia y adaptabilidad al entorno agrícola real.
- Seleccionar los sensores, actuadores y dispositivos de comunicación más adecuados para las condiciones técnicas y operativas del proyecto, asegurando su compatibilidad, eficiencia y fiabilidad.

- Realizar una evaluación económica que incluya la inversión inicial, el mantenimiento y el retorno esperado, para evaluar la viabilidad económica y asegurar la rentabilidad del sistema automatizado a largo plazo.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL PROTOTIPO DEL PROYECTO

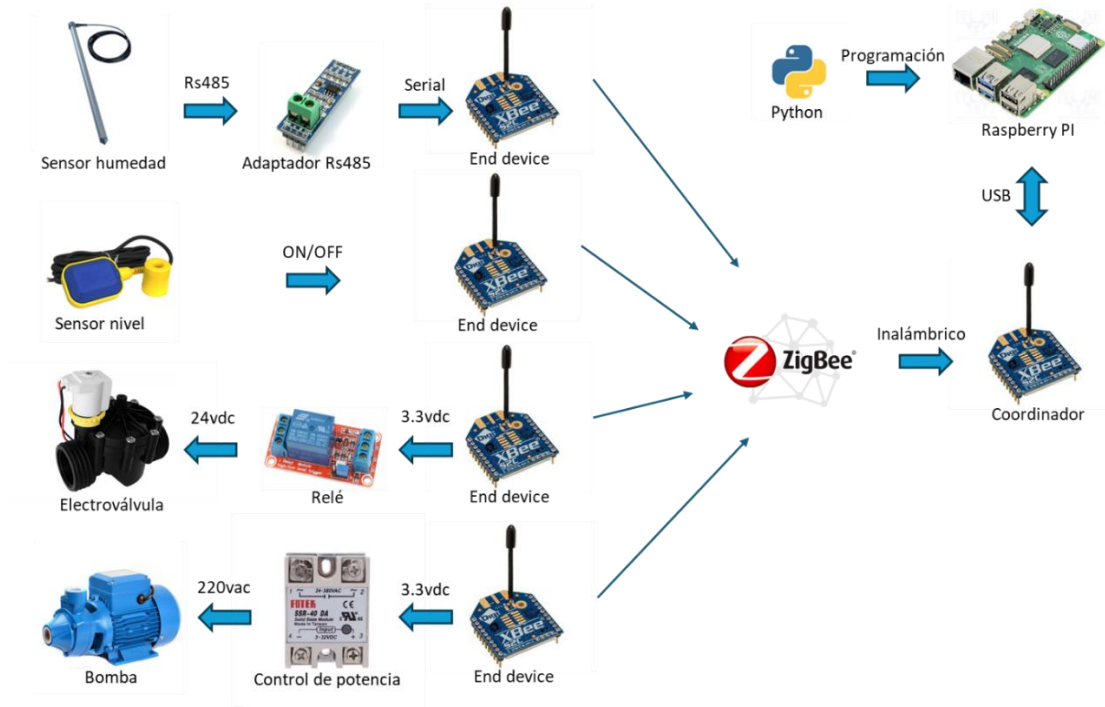
2 DESARROLLO DEL PROTOTIPO DEL PROYECTO

En el presente capítulo se desarrolla la base fundamental para la implementación del prototipo del proyecto. Se abordan los elementos esenciales que permiten la ejecución de los objetivos previamente definidos, incluyendo el análisis técnico de los componentes necesarios y el diseño del sistema de automatización y telemetría.

2.1 ESQUEMA GENERAL DE LA SOLUCIÓN Y SUS PRINCIPALES COMPONENTES

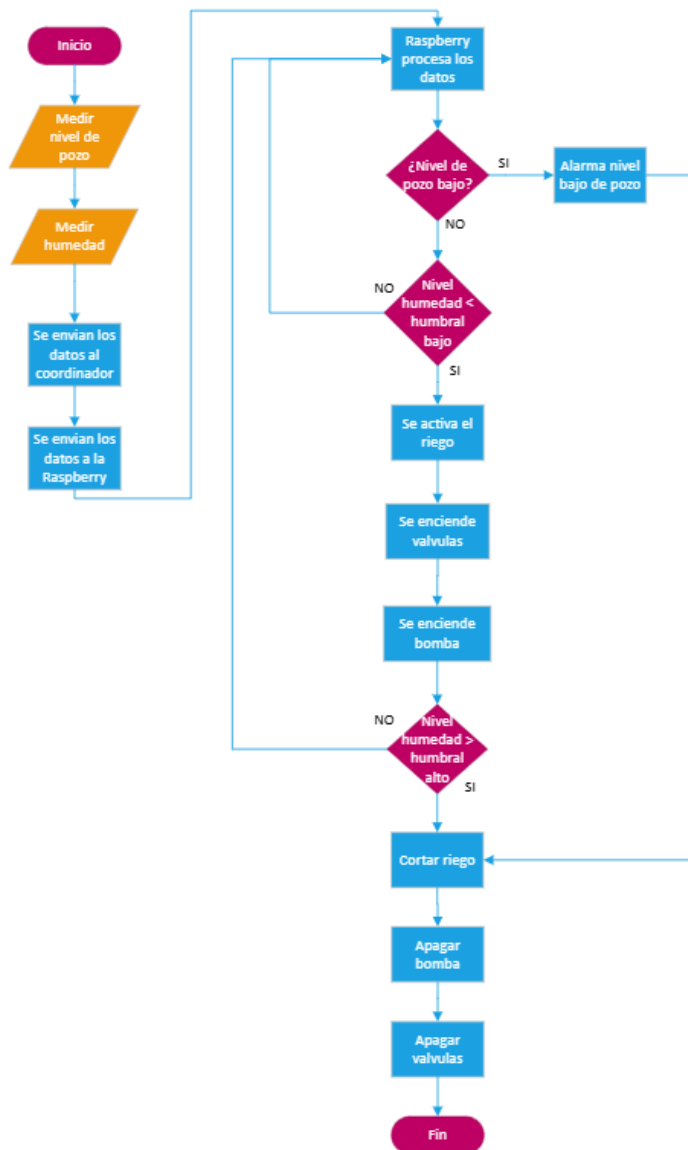
A continuación, se presenta un esquema general del sistema propuesto, ver Figura 2-1, el cual ilustra de manera simplificada la interacción entre los distintos componentes involucrados en la automatización del riego. El sistema estará conformado por sensores de humedad del suelo y un sensor de nivel de agua, distribuidos estratégicamente en la parcela. Estos sensores, conectados a módulos de comunicación inalámbrica Zigbee, transmiten los datos hacia una unidad central de control basada en una Raspberry Pi. Esta unidad procesa la información recibida, aplicando una lógica de control previamente definida para evaluar las condiciones del terreno y determinar la necesidad de riego. En caso de ser requerido, la Raspberry Pi envía señales de activación a través de la misma red inalámbrica hacia los actuadores remotos, que incluyen electroválvulas y una bomba de agua. Dichos actuadores están asociados a módulos de relé, alimentados mediante paneles solares y baterías, que permiten conmutar el paso de energía hacia los elementos hidráulicos del sistema.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que permite comprender de manera más clara el funcionamiento del sistema y el desarrollo de la lógica de control implementada para resolver la problemática de riego ineficiente en la parcela agrícola, ver figura 2-2. Este diagrama ilustra la secuencia de operaciones que sigue el sistema, desde la lectura de los sensores de humedad y nivel de agua, el análisis de los datos mediante condiciones preestablecidas, hasta la activación o desactivación de los actuadores involucrados, como las electroválvulas y la bomba de agua, todo ello bajo una estructura automatizada y supervisada remotamente a través de la unidad de control principal basada en Raspberry Pi.



Fuente: Elaboración propia en base a elementos generales de la solución

Figura 2-1 Esquema general de elementos de control



Fuente: Elaboración propia en base al planteo de la solución

Figura 2-2 Diagrama de flujo del sistema

2.1.1 XBEE

El módulo inalámbrico XBee S2 es un dispositivo de comunicación de radiofrecuencia diseñado para aplicaciones de transmisión de datos en redes inalámbricas de baja potencia. A continuación, se presentan sus principales características técnicas:

a) Características generales

- Frecuencia de operación: 2.4 GHz.
- Estándar de comunicación: IEEE 802.15.4 / ZigBee.
- Topologías soportadas: Punto a punto, punto a multipunto y malla.
- Modulación: DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).

b) Alimentación y consumo

- Voltaje de alimentación (VCC): 2.1 V a 3.6 V (típico 3.3 V).
- Consumo en transmisión: ~45 mA (a 3.3 V, con potencia máxima).
- Consumo en recepción: ~31 mA.
- Consumo en modo inactivo: < 1 μ A (modo de suspensión).

c) Potencia y alcance

- Potencia de transmisión (Tx): +3 dBm (aproximadamente 2 mW).
- Sensibilidad de recepción (Rx): -100 dBm.
- Alcance en línea de vista: Hasta 120 m en interiores y hasta 1.2 km en exteriores con antena de fábrica.
- Tasa de datos: 250 kbps.

d) Entradas y salidas (I/O)

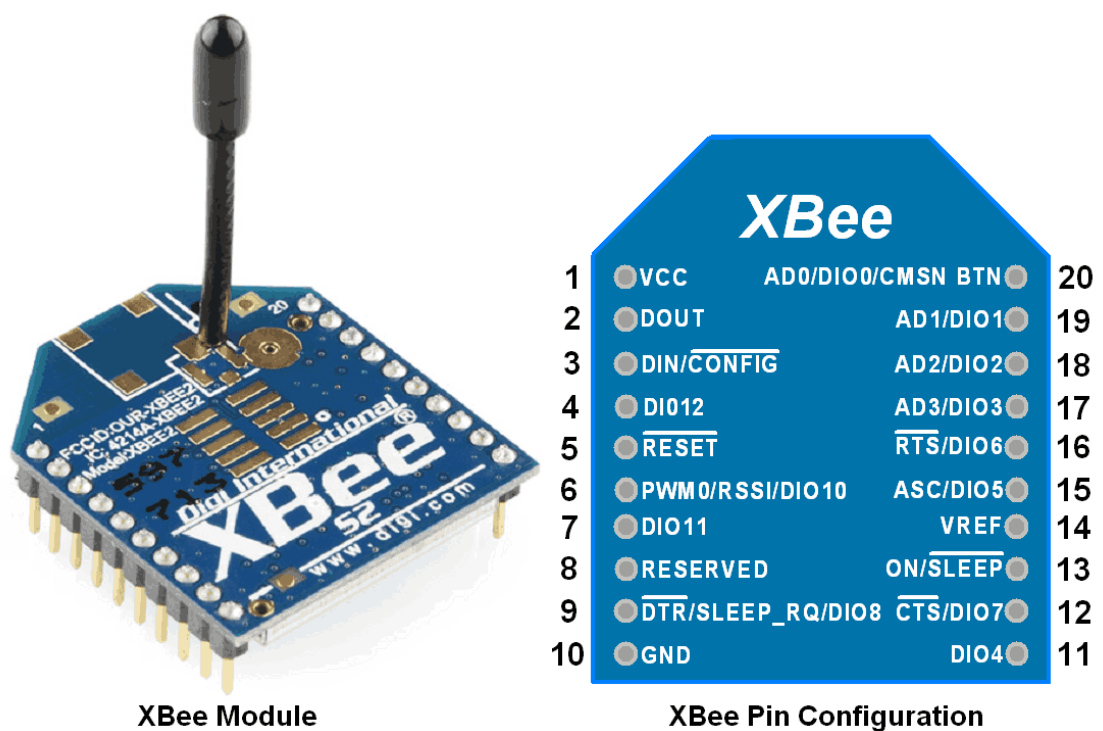
- Cantidad de pines configurables: Hasta 15 pines digitales/analógicos.
- Entradas analógicas (ADC): 4 disponibles (DIO0, DIO1, DIO2, DIO3).
- Resolución ADC: 10 bits.
- Rango de voltaje de entrada en pines analógicos: 0 a 1.2 V (referencia interna).

- Entradas digitales: Compatibles con niveles lógicos de 0 – 3.3 V.

e) Dimensiones y entorno

- Dimensiones: 24.4 mm x 32.9 mm.
- Temperatura de operación: -40 °C a +85 °C.

Tal como se observa en la Figura 2-3, el módulo Xbee S2 cuenta con un total de 20 pines. La función de cada uno de ellos se detalla en la tabla 2-1 que se presenta a continuación.



Fuente: <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/xbee-module>

Figura 2-3 Módulo Xbee con y su pinout

Tabla 2-1. Pinout Xbee

Nº de pin	Nombre	Dirección	Descripción
1	VCC	-	Fuente de alimentación
2	DOUT	Salida	Salida de datos UART
3	DIN/CONFIG	Entrada	Datos UART en
4	DO8	Salida	Salida digital 8

Nº de pin	Nombre	Dirección	Descripción
5	RESTABLECIMIENTO	Entrada	Restablecimiento del módulo (pulso de reinicio ≥ 200 nS)
6	PWM0/RSSI	Salida	Salida PWM 0 / Indicador de intensidad de señal recibida
7	PWM1	Salida	Salida PWM 1
8	Reservado	-	No conectar
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	Entrada	Control de sueño o entrada digital 8
10	GND	-	Tierra
11	AD4/DIO4	Entrada/ Salida	Entrada analógica 4/ E/S digital 4
12	CTS/DIO7	Entrada/ Salida	Control de flujo de borrado para envío o E/S digitales 7
13	ENCENDIDO/SUSPENDIDO	Salida	Indicador de estado del módulo, Alto = ENCENDIDO, Bajo = DORMIR
14	VREF	Entrada	Voltaje de referencia para ADC
15	ASOCIADO/AD5/DIO5	Entrada/ Salida	Indicador asociado, entrada analógica 5 o E/S digital 5
16	RTS/AD6/DIO6	Entrada/ Salida	Control de flujo de solicitud de envío, entrada analógica 6 o E/S digital 6
17	AD3/DIO3	Entrada/ Salida	Entrada analógica 3 o E/S digital 3
18	AD2/DIO2	Entrada/ Salida	Entrada analógica 2 o E/S digital 2

Nº de pin	Nombre	Dirección	Descripción
19	AD1/DIO1	Entrada/ Salida	Entrada analógica 1 o E/S digital 1
20	AD0/DIO0	Entrada/ Salida	Entrada analógica 0 o E/S digital 0

Fuente: <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/xbee-module>

2.1.1.1 Modos de funcionamiento

Los módulos XBee pueden operar en dos modos principales de comunicación: el modo transparente (AT) y el modo de interfaz de programación de aplicaciones (API).

a) Modo transparente (comandos AT):

En este modo, los datos disponibles en el pin DIN se transmiten directamente al módulo receptor. Esta forma de comunicación es adecuada para configuraciones punto a punto o punto a multipunto, ya que no requiere encapsulación de los datos.

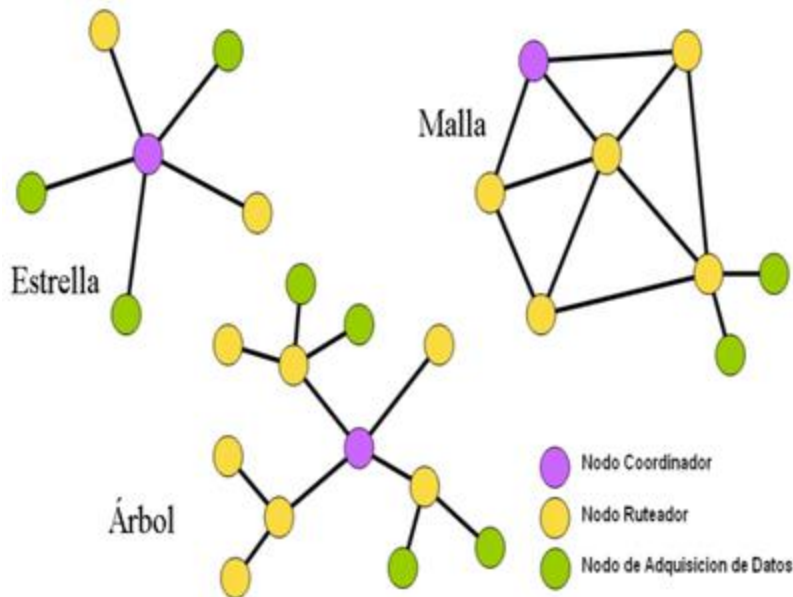
b) Modo API (Application Programming Interface):

En el modo API, los datos se encapsulan dentro de una estructura denominada frame o trama. Esta trama incluye un delimitador de inicio, la longitud de la trama, el tipo de trama, los datos, una suma de comprobación, entre otros campos. Este modo permite una comunicación más robusta y controlada, facilitando la configuración de parámetros y la recepción de confirmaciones de entrega de paquetes.

2.1.1.2 Protocolo ZigBee

El protocolo ZigBee se basa en el estándar IEEE 802.15.4 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, al cual se le incorporan funciones adicionales de enrutamiento y configuración de red. Este protocolo se utiliza para establecer redes de área personal (PAN)

mediante el uso de radios de bajo consumo. Una de sus principales características es la capacidad de operar en topología de red en malla (ver figura 2-4), lo que permite extender el alcance de comunicación entre dispositivos. Cuando la distancia entre dos radios excede su capacidad de transmisión directa, se emplea un nodo intermedio o router que actúa como repetidor, reenviando los mensajes hasta alcanzar el destino, lo que posibilita la comunicación entre radios ubicados a mayor distancia.



Fuente: <https://customer.garza.es/es/support/solutions/articles/79000139253-conexión-zigbee-3-0-qué-es-y-cómo-funciona-#:~:text=Zigbee%20es%20un%20protocolo%20de,saturación%20de%20la%20red%20Wifi.>

Figura 2-4. Protocolos de comunicación Xbee

Los dispositivos ZigBee se clasifican en tres tipos principales: coordinador, router y dispositivo final. El coordinador es el encargado de crear y gestionar la red, seleccionando el canal y el identificador de red personal (PAN ID) tanto en su versión de 64 bits como de 16 bits. Además, permite que routers y dispositivos finales se unan a la red, facilita el enrutamiento de datos y puede actuar como puente de comunicación con otras redes. El router, por su parte, debe unirse previamente a una red ZigBee para poder transmitir, recibir o reenviar datos. Una vez integrado, permite que otros dispositivos se unan y colabora en el enrutamiento actuando como nodo intermedio. Finalmente, el dispositivo final no tiene la capacidad de iniciar una red ni de enrutar información; su función se limita a comunicarse exclusivamente a través de su nodo padre, que puede ser un coordinador o un router. Debido a esta funcionalidad restringida, los dispositivos finales pueden operar en modos de bajo consumo energético para optimizar el uso de la batería.

2.1.1.3 Configuración de Xbee

La configuración de los módulos XBee, ya sea en relación con sus modos de funcionamiento o con su tipo de rol dentro de la red, se realiza mediante la herramienta de software X-CTU, proporcionada por Digi International. Esta aplicación permite configurar los parámetros del dispositivo, evaluar su rendimiento y actualizar el firmware de forma sencilla y eficiente. Para establecer una red XBee, es necesario contar con al menos dos dispositivos de radio XBee, cada uno conectado a través de un adaptador USB como se ve en la figura 2-5. Esta disposición permite la creación de redes funcionales según los requerimientos del sistema.



Fuente: <https://hubot.cl/producto/xbee-usb-explorer-interfaz-a-usb-a-serial-sku-635/>

Figura 2-5. Adaptador USB Xbee explorer

2.1.2 XCTU

XCTU es una aplicación gratuita y multiplataforma desarrollada por Digi International (ver logo en figura 2-6), diseñada para facilitar la configuración, prueba y actualización de los módulos XBee RF. A través de una interfaz gráfica intuitiva, permite a los desarrolladores interactuar con estos dispositivos de forma sencilla, ya sea en modo AT o API. Entre sus funcionalidades principales se incluyen la configuración de redes, la gestión de dispositivos, la prueba de alcance, y la actualización de firmware, permitiendo restaurar configuraciones y gestionar automáticamente los cambios de modo y velocidad de transmisión. Además, integra herramientas como el generador e intérprete de tramas API, la consola AT, la consola API, el explorador y recuperador de firmware, lo que amplía significativamente su versatilidad en entornos de prueba

y desarrollo. XCTU es compatible con los sistemas operativos Windows, macOS y Linux, y puede descargarse directamente desde el sitio web oficial de Digi International: <https://es.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/digi-xbee-tools/xctu>.



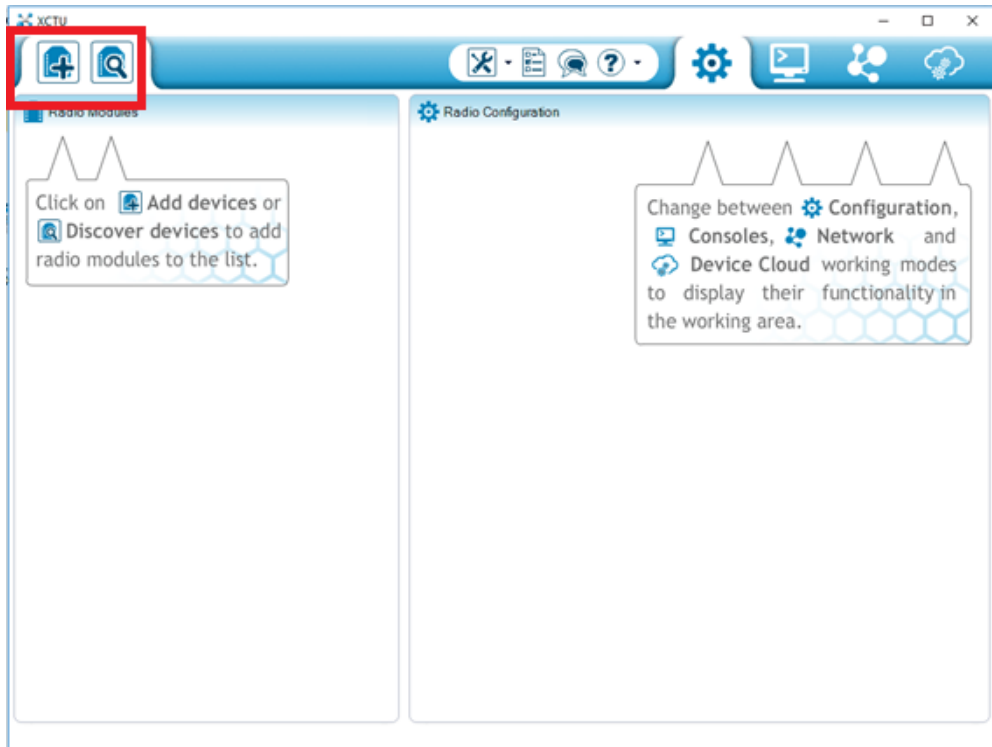
Fuente: <https://es.digi.com/blog/post/2017/xctu-next-generation-configuration-platform-for-xb>

Figura 2-6 Logo digi XCTU

2.1.2.1 Configuración de XCTU

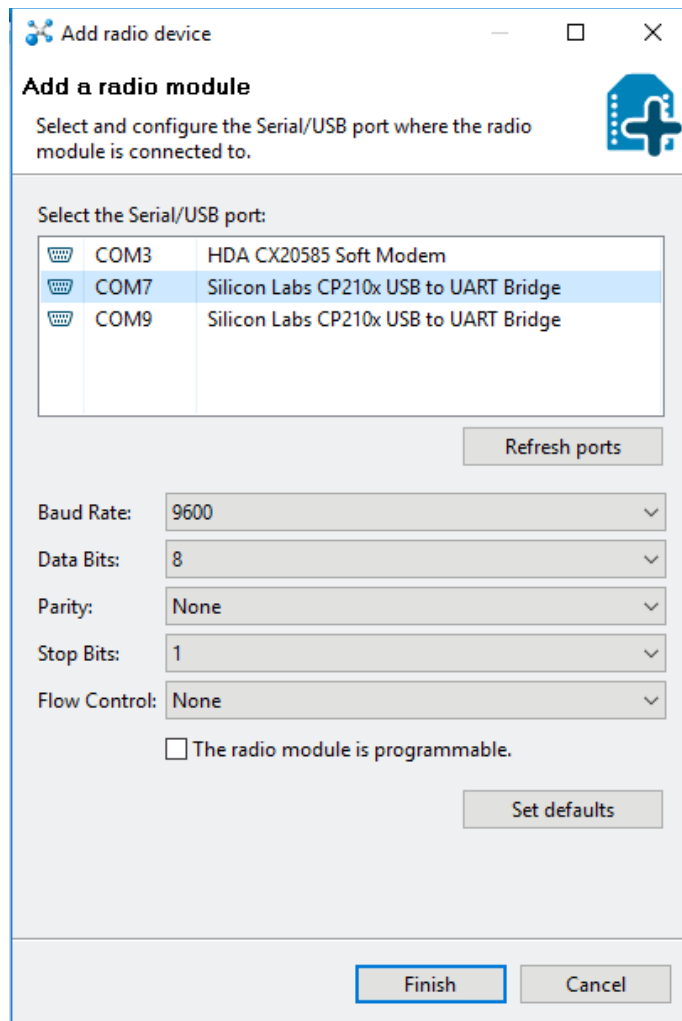
Para llevar a cabo la configuración de los módulos XBee, en primer lugar, es necesario conectarlos al puerto serie del computador utilizando el adaptador USB junto con su respectivo cable. Posteriormente, se debe abrir el software XCTU y seleccionar la opción ubicada en la parte superior izquierda de la interfaz, con el propósito de registrar e incorporar el dispositivo al entorno de trabajo.

A continuación, se desplegará la ventana “Agregar dispositivo de radio”, en la cual será necesario seleccionar el puerto USB correspondiente al dispositivo XBee conectado, tal como se muestra en la Figura 2-7. Posteriormente, se debe establecer la velocidad en baudios, configurada por defecto en 9600, y ajustar los parámetros de bits de datos, paridad y bits de parada según corresponda. Para facilitar el procedimiento, se recomienda mantener la configuración predeterminada, como se observa en la Figura 2-8, y hacer clic en Finalizar. De este modo, el dispositivo XBee quedará agregado al entorno de trabajo. Finalmente, se debe repetir el mismo proceso para incorporar el segundo dispositivo XBee.



Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

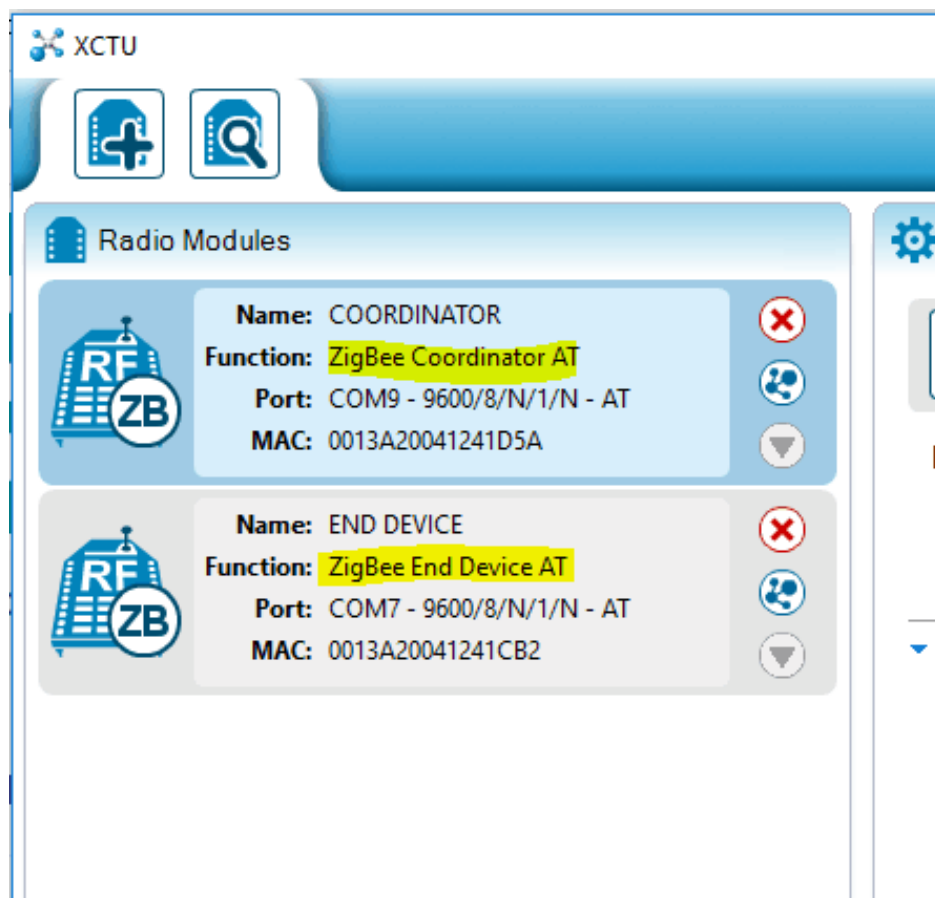
Figura 2-7 Paso uno de configuración xbee en XCTU



Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-8 Paso dos de configuración xbee en XCTU

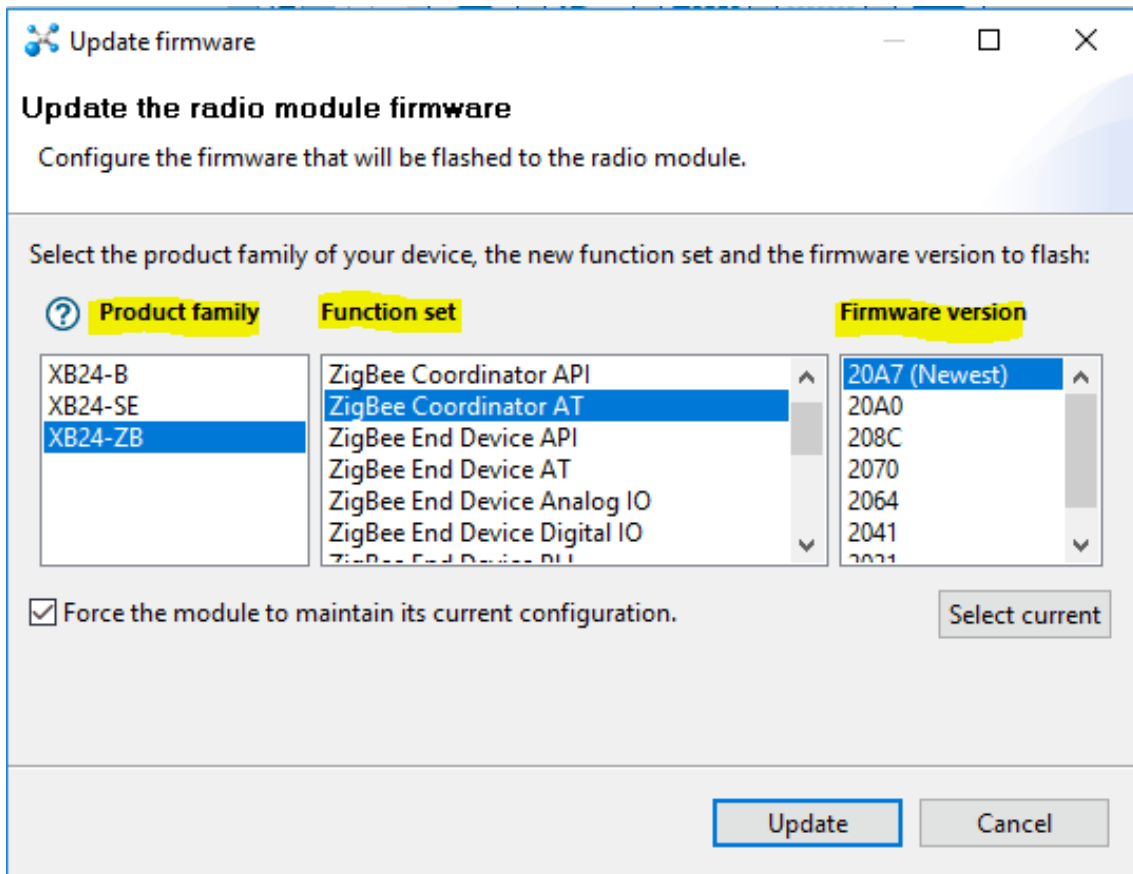
Una vez finalizada la configuración, ambos dispositivos se visualizarán en la esquina superior izquierda de la interfaz de XCTU, junto con sus respectivos parámetros en el panel derecho, tal como se observa en la Figura 2-9. En este caso, uno de los módulos ha sido configurado como Coordinador, mientras que el otro se ha establecido como Dispositivo Final, ambos operando en modo transparente (comando AT).



Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-9. Paso tres de configuración xbee en XCTU

Para modificar el modo de funcionamiento y el conjunto de funciones del dispositivo XBee, se debe hacer clic en la opción Actualizar, ubicada en la parte superior derecha de la interfaz. A continuación, se desplegará la ventana Actualizar firmware, en la cual es posible seleccionar la familia de productos XBee, el conjunto de funciones que define el modo de operación, el tipo de función asignado al dispositivo y la versión de firmware correspondiente.



Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-10. Paso cuatro de configuración xbee en XCTU

Una vez que los dispositivos XBee han sido actualizados con el firmware correspondiente, resulta fundamental verificar al menos tres parámetros esenciales: en primer lugar, la velocidad de transmisión debe ser idéntica en cada dispositivo; en segundo lugar, el PAN ID debe ser único para todos los dispositivos que conforman la misma red; y en tercer lugar, el canal de operación debe coincidir en todos los equipos de la red.

Posteriormente, se deben establecer los parámetros de configuración de los módulos XBee, tales como el PAN ID, el canal (CH) y el esquema de comunicación en modo de unidifusión utilizando el direccionamiento largo de 64 bits, tal como se observa en la Figura 2-11. En este ejemplo, se ha configurado el PAN ID = 1234, en el cual el coordinador es el encargado de seleccionar el canal.

Para implementar el direccionamiento largo de 64 bits, los parámetros de dirección de origen del coordinador (SH y SL) deben configurarse como los parámetros de dirección de destino del dispositivo final (DH y DL), y viceversa. Finalmente, se debe asegurar que la velocidad de transmisión permanezca constante en todos los dispositivos de la red.

The screenshot displays the XCTU interface for configuring a Coordinator node. On the left, the 'Radio Modules' panel shows two modules: 'COORDINATOR' (ZigBee Coordinator AT) and 'END DEVICE' (ZigBee End Device AT). The 'COORDINATOR' module is highlighted with a red box. Below this panel, the text 'Coordinator Setting' is written in red. On the right, the 'Radio Configuration' panel for the 'COORDINATOR' node is shown. It features a list of parameters with input fields and status icons. The following table summarizes the visible configuration parameters:

Parameter	Value
ID PAN ID	1234
SC Scan Channels	FFFF Bitfield
SD Scan Duration	3 exponent
ZS ZigBee Stack Profile	0
NJ Node Join Time	FF x 1 sec
OP Operating PAN ID	1234
OI Operating 16-bit PAN ID	E95D
CH Operating Channel	16
NC Number of Re...ing Children	A

Below the main parameters, there is an 'Addressing' section with the following parameters:

Parameter	Value
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	41241D5A
MY 16-bit Network Address	0
DH Destination Address High	13A200
DL Destination Address Low	41241CB2
NI Node Identifier	COORDINATOR

Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-11. Paso cinco de configuración xbee en XCTU

The screenshot displays the XCTU interface for configuring an End Device node. On the left, the 'Radio Modules' panel shows two modules: 'COORDINATOR' (ZigBee Coordinator AT) and 'END DEVICE' (ZigBee End Device AT). The 'END DEVICE' module is highlighted with a red box. Below this panel, the text 'End Device Setting' is written in red. On the right, the 'Radio Configuration' panel for the 'END DEVICE' node is shown. It features a list of parameters with input fields and status icons. The following table summarizes the visible configuration parameters:

Parameter	Value
ID PAN ID	1234
SC Scan Channels	FFFF Bitfield
SD Scan Duration	3 exponent
ZS ZigBee Stack Profile	0
NJ Rejoin Policy	FF
JN Join Notification	Disabled [0]
OP Operating PAN ID	1234
OI Operating 16-bit PAN ID	E95D
CH Operating Channel	16

Below the main parameters, there is an 'Addressing' section with the following parameters:

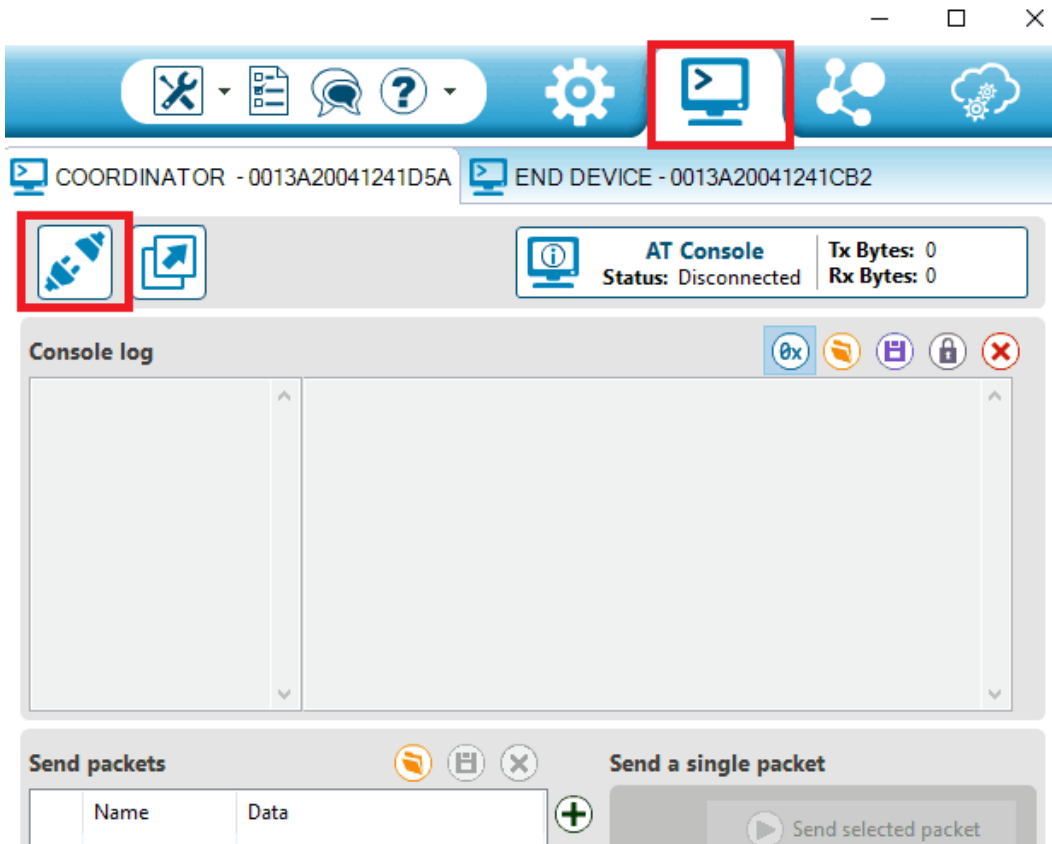
Parameter	Value
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	41241CB2
MY 16-bit Network Address	D6DA
MP 16-bit Parent Address	0
DH Destination Address High	13A200
DL Destination Address Low	41241D5A

Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-12. Paso seis de configuración xbee en XCTU

Para realizar la prueba de comunicación, es necesario abrir la consola de X-CTU haciendo clic en el ícono ubicado en la esquina superior derecha de la ventana principal. A continuación, se debe seleccionar la opción Abrir, lo que permitirá acceder a la consola, tal como se aprecia en la Figura 2-13.

Desde este entorno, es posible enviar y recibir datos entre los dispositivos XBee, verificando de manera práctica que la comunicación haya sido establecida correctamente y que los módulos se encuentren operando bajo la configuración definida.

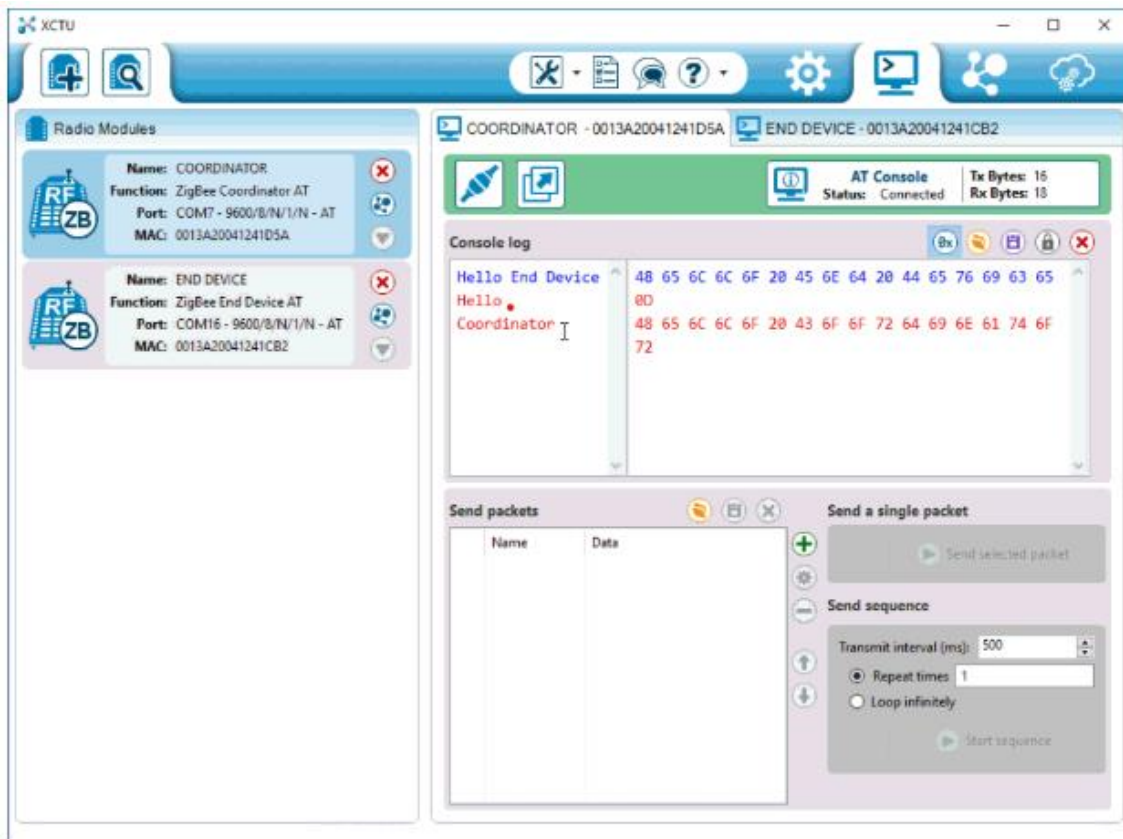


Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-13. Paso siete de configuración xbee en XCTU

A continuación, se debe ingresar un mensaje en el registro de la consola del coordinador. Dicho mensaje se visualizará automáticamente en el registro de la consola del dispositivo final, y viceversa, tal como se ilustra en la Figura 2-14.

Este procedimiento permite comprobar de manera práctica la correcta comunicación entre los dispositivos XBee, asegurando que la transmisión y recepción de datos se realiza de forma adecuada dentro de la red configurada.



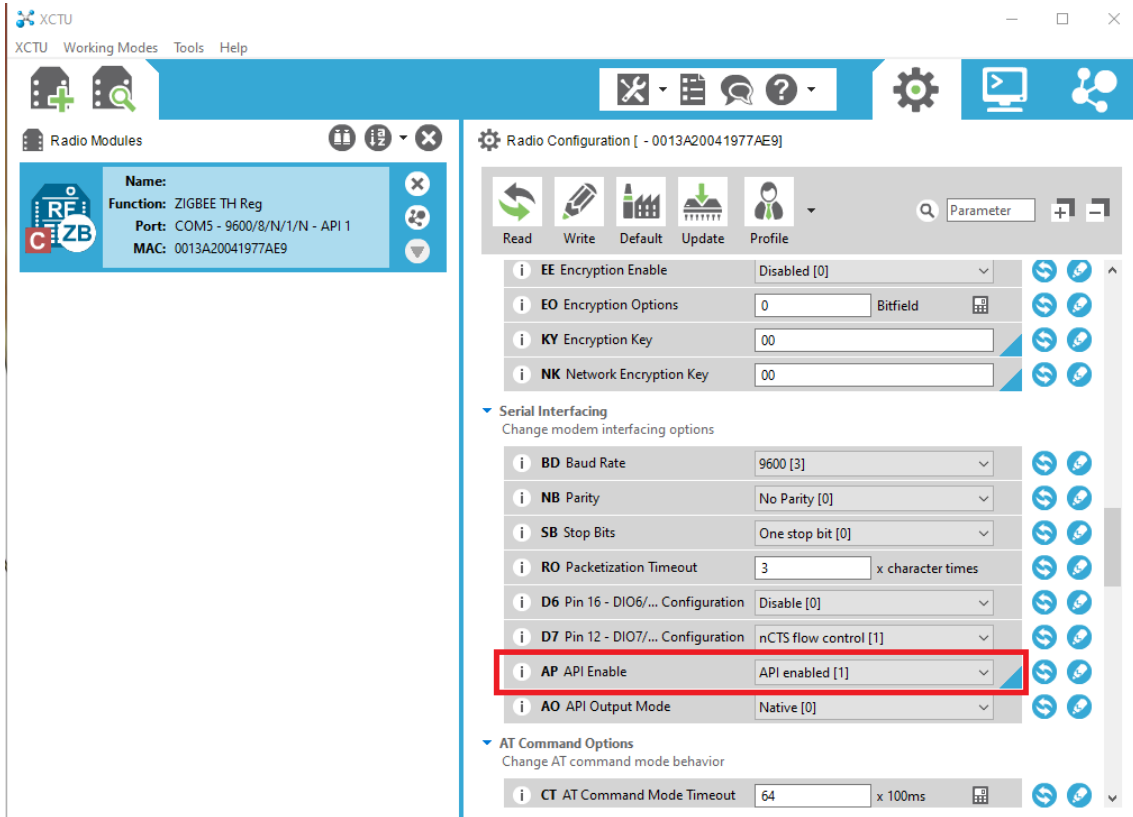
Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-14. Paso ocho de configuración xbee en XCTU

2.1.2.2 Operación en modo API

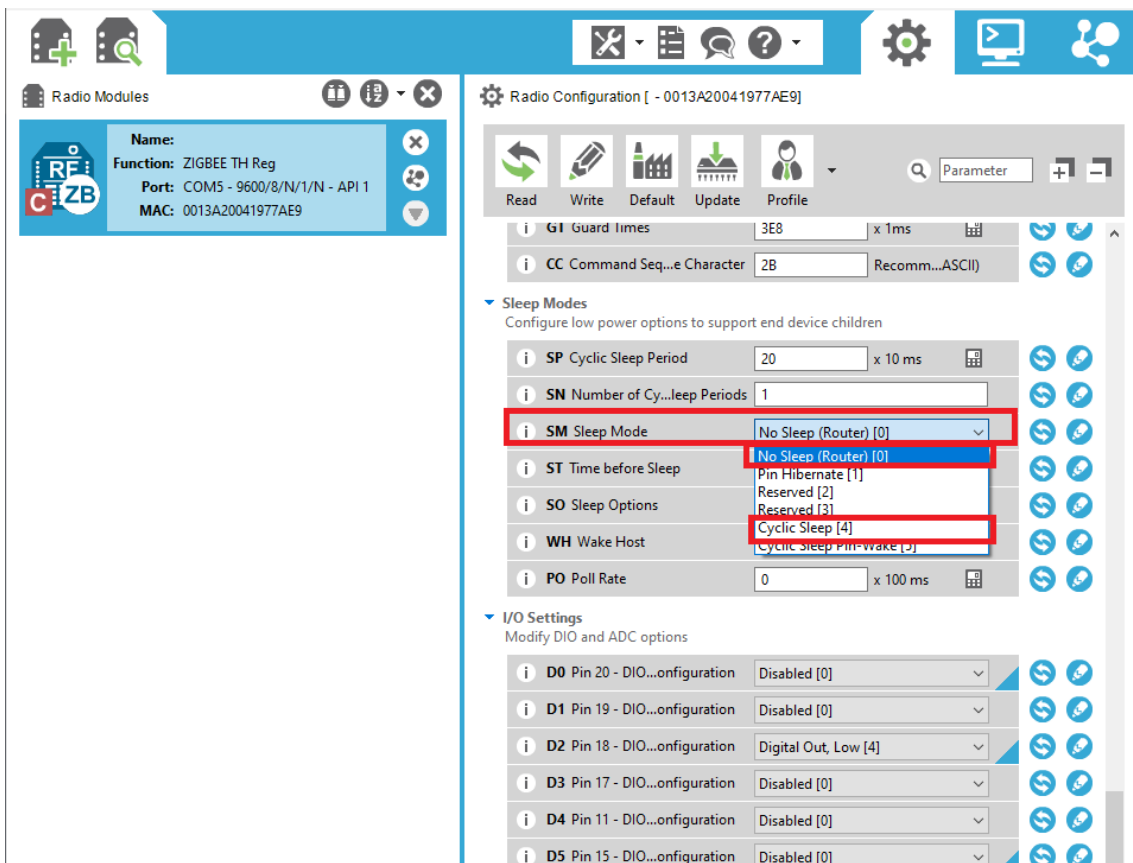
Para operar los módulos XBee en modo API y programarlos mediante Python, es necesario ajustar la configuración de todos los dispositivos de la red en los apartados Serial Interfacing y Sleep Mode, tal como se observa en las Figuras 2-15 y 2-16.

En este proceso, los dispositivos configurados como coordinador o router deben establecerse en el modo de suspensión No Sleep, garantizando su disponibilidad permanente dentro de la red. En cambio, los dispositivos finales se recomienda configurarlos en Cyclic Sleep, con el fin de optimizar el consumo energético sin afectar su correcto desempeño en la comunicación inalámbrica.



Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-15. Paso nueve de configuración xbee en XCTU

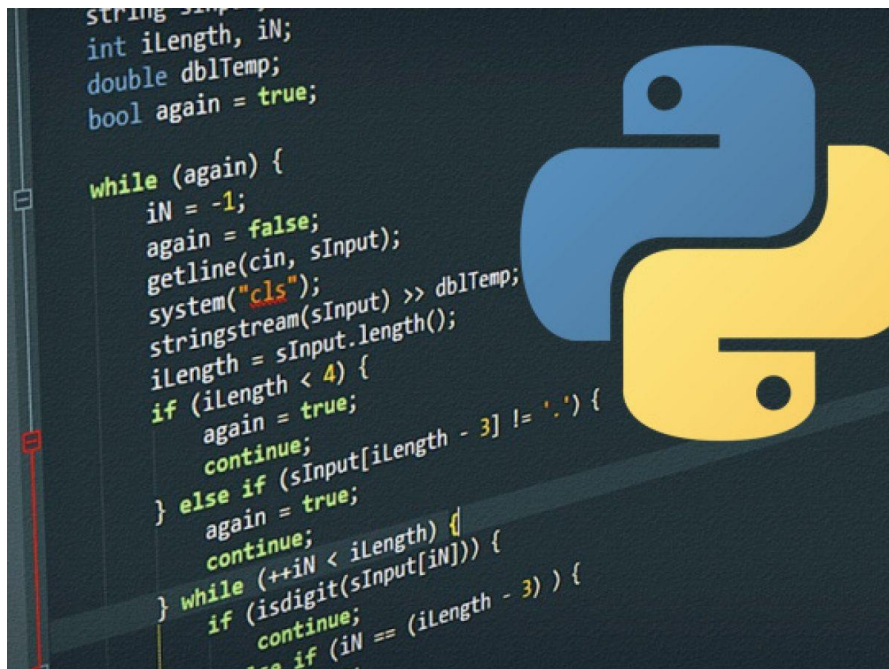


Fuente: Elaboración propia en base a configuración en digi xctu

Figura 2-16. Paso diez de configuración xbee en XCTU

2.1.3 Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel, versátil y de código abierto, ampliamente reconocido por su sintaxis clara, legible y similar al lenguaje natural, como se puede observar en el ejemplo de la figura 2-17, lo que facilita tanto su aprendizaje como su uso profesional. Su carácter abierto permite a cualquier usuario utilizar, modificar y distribuir su código sin restricciones. Python se emplea en una amplia variedad de campos, incluyendo el desarrollo web, la automatización de tareas, la ciencia de datos, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático. Además, es un lenguaje multiparadigma, ya que admite programación orientada a objetos, imperativa y funcional. Al ser interpretado, el código se ejecuta directamente sin necesidad de compilación previa, y su tipado dinámico permite declarar variables sin especificar su tipo. Estas características hacen de Python una herramienta poderosa y accesible, utilizada tanto por principiantes como por desarrolladores experimentados.

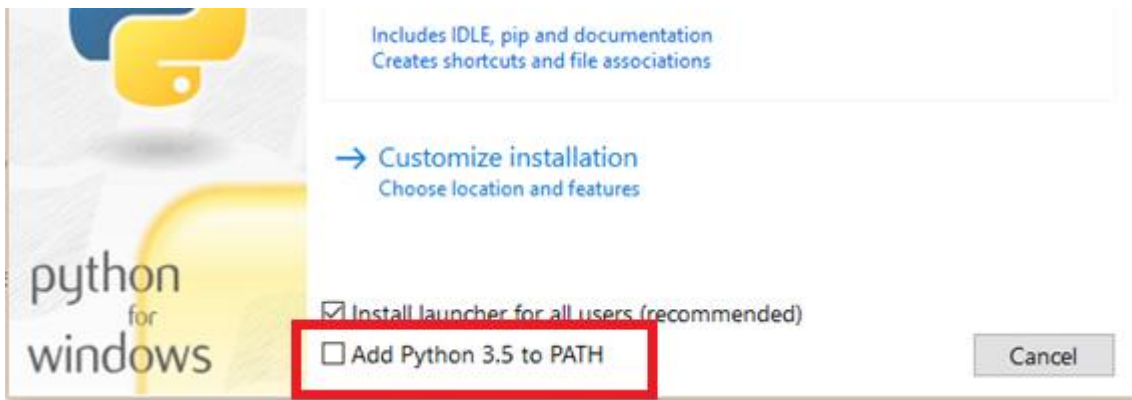


Fuente: <https://talently.tech/blog/cuanto-gana-programador-python-peru/>

Figura 2-17. Referencia de Python

2.1.3.1 Instalación de Python

Para instalar Python, primero se debe acceder al sitio oficial <https://www.python.org/downloads> y descargar la última versión disponible de Python 3 para el sistema operativo Windows. Durante el proceso de instalación, es fundamental marcar la opción "Add Python to PATH", como en el ejemplo de la figura 2-18, lo cual asegurará que el sistema reconozca el intérprete de Python desde cualquier ubicación en la línea de comandos, facilitando así su uso posterior.



Fuente: <https://www.python.org/downloads>

Figura 2-18. Instalación de Python en Windows.

Una vez instalado Python, se debe abrir la terminal del sistema (se puede buscar “cmd” o “Símbolo del sistema” en el menú de inicio), se debe escribir el siguiente comando: “pip install digi-xbee”, como se muestra en la figura 2-19. Esta instrucción descargará e instalará la librería oficial de Digi para Python, la cual permite controlar y gestionar los módulos XBee de forma eficiente mediante scripts y aplicaciones personalizadas.

```

Microsoft Windows [Versión 10.0.19045.5371]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\Yayo>pip install digi-xbee
Requirement already satisfied: digi-xbee in c:\users\yayo\appdata\local\programs\python\python313\lib\site-packages (1.5.0)
Requirement already satisfied: pyserial>=3 in c:\users\yayo\appdata\local\programs\python\python313\lib\site-packages (from digi-xbee) (3.5)

[notice] A new release of pip is available: 25.0.1 -> 25.1.1
[notice] To update, run: python.exe -m pip install --upgrade pip

C:\Users\Yayo>

```

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-19. Comando de instalación de librería oficial de digi para xbee.

En la figura 2-20 se presentan algunos comandos básicos utilizados para controlar los módulos XBee mediante Python. Estos comandos permiten establecer comunicación, enviar y recibir datos, así como configurar diversos parámetros del dispositivo. Para obtener información más detallada y consultar la documentación oficial de la librería de Digi, se recomienda visitar el enlace:

https://xbplib.readthedocs.io/en/stable/getting_started_with_xbee_python_library.html.

```

1 from digi.xbee.devices import XBeeDevice, RemoteXBeeDevice, XBee64BitAddress
2 from digi.xbee.io import IOLine, IOValue, IOMode
3
4 xbee = XBeeDevice("COM5", 9600)
5 xbee.open()
6 xbee.set_sync_ops_timeout(10) # Esperará hasta 10 segundos una respuesta
7
8 # Declarar un objeto XBEE remoto.
9 remote1 = RemoteXBeeDevice(xbee, XBee64BitAddress.from_hex_string("0013A20041C8F2BD")) #Nodo basado en una dirección de 64 bits.
10 remote2 = RemoteXBeeDevice(xbee, XBee64BitAddress.from_hex_string("0013A2004253705C"))
11
12 # Configurar la línea DIO1_AD1 del dispositivo local para que sea una salida digital (establezca alta de forma predeterminada).
13 xbee.set_io_configuration(IOLine.DIO1_AD1, IOMode.DIGITAL_OUT_HIGH)
14
15 # Obtener el modo de configuración de la línea DIO1_AD1.
16 io_mode = xbee.get_io_configuration(IOLine.DIO1_AD1)
17
18 # Configurar la línea DIO1_AD1 del dispositivo remoto a la salida digital
19 remote1.set_io_configuration(IOLine.DIO1_AD1, IOMode.DIGITAL_OUT_LOW)
20
21 # Obtener el modo de configuración de la línea remota DIO1_AD1.
22 io_mode = remote1.get_io_configuration(IOLine.DIO1_AD1)
23
24 # Establecer la línea DIO1_AD1 LOW/HIGH.
25 io_state1 = remote1.set_dio_value(IOLine.DIO1_AD1, IOValue.LOW)
26 io_state2 = remote2.set_dio_value(IOLine.DIO1_AD1, IOValue.LOW)
27
28 # Obtener el valor del DIO1_AD1
29 value1 = remote1.get_dio_value(IOLine.DIO1_AD1)
30 value2 = remote2.get_dio_value(IOLine.DIO1_AD1)
31
32 xbee.close()
33

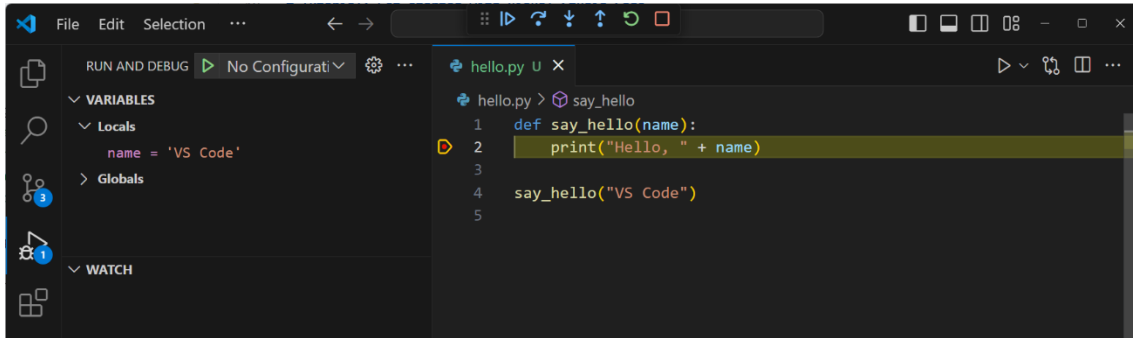
```

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-20. Comandos básicos para controlar los Xbee por Python

2.1.4 Visual Studio

Visual Studio Code (VS Code), ver figura 2-21, es un editor de código fuente gratuito y de código abierto, desarrollado por Microsoft, ampliamente utilizado por desarrolladores para escribir, editar y depurar código en diversos lenguajes de programación. Está disponible para Windows, macOS y Linux, y se destaca por ser un editor ligero y eficiente, que ofrece un rendimiento óptimo sin consumir excesivos recursos del sistema. VS Code incluye soporte integrado para lenguajes como JavaScript, TypeScript y Node.js, y puede ampliarse mediante un amplio ecosistema de extensiones para añadir compatibilidad con otros lenguajes como Python, C++, C# y Java, entre muchos más. Además, incorpora herramientas avanzadas de desarrollo como integración con sistemas de control de versiones (Git), funcionalidades de depuración, y una interfaz totalmente personalizable, permitiendo ajustar temas, fuentes y atajos de teclado según las preferencias del usuario.

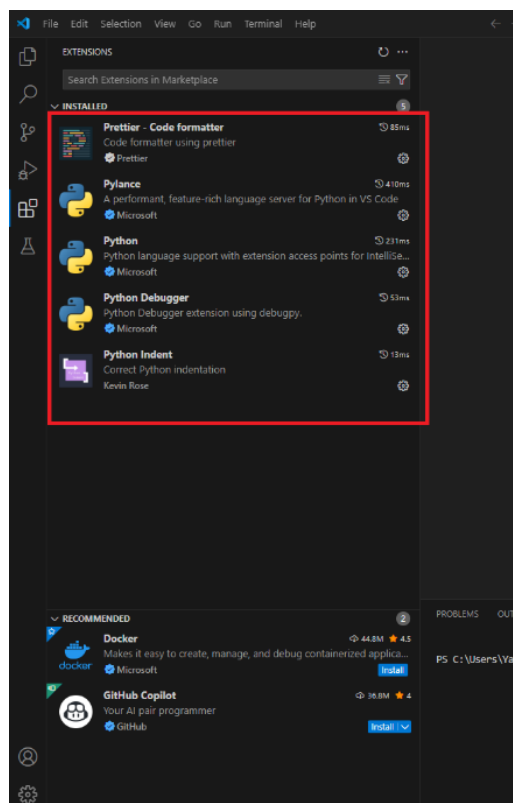


Fuente: <https://code.visualstudio.com/docs/getstarted/getting-started>

Figura 2-21 Ejemplo de interfaz Visual Studio Code

2.1.4.1 Extensiones

En la figura 2-22 se observan algunas extensiones disponibles en Visual Studio Code que facilitan la programación del código, al mejorar la experiencia del desarrollador mediante funciones como el resaltado de sintaxis, la autocomprobación, la depuración integrada y la gestión de entornos virtuales. Estas extensiones son especialmente útiles para trabajar con lenguajes como Python, permitiendo optimizar el flujo de trabajo y aumentar la productividad en el desarrollo de aplicaciones.

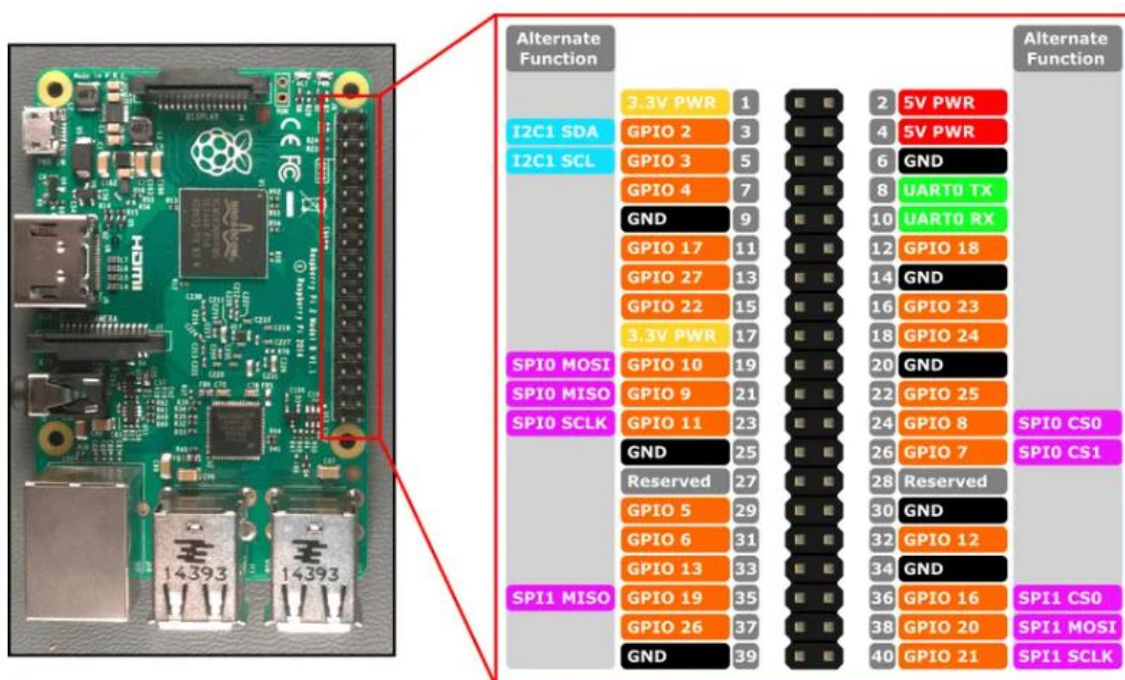


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-22. Extensiones recomendadas para Visual Studio Code.

2.1.5 Raspberry Pi

La Raspberry Pi, ver figura 2-23, desempeñará un papel fundamental en la implementación del sistema de riego automatizado, actuando como el núcleo central de control y procesamiento. Este dispositivo se encargará de coordinar la integración de los distintos componentes del sistema, facilitando la comunicación entre sensores, actuadores y la interfaz de usuario. En particular, el modelo Raspberry Pi 3B/3B+ presenta características técnicas destacadas, como un chipset Broadcom BCM2837 a 1.2 GHz con arquitectura ARM Cortex-A53 de 64 bits y cuatro núcleos, memoria LPDDR2 de 1 GB, coprocesador multimedia Videocore IV, y conectividad mediante LAN inalámbrica 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.1 de bajo consumo y puerto Ethernet 10/100 Mbps. Además, dispone de múltiples interfaces físicas, incluyendo 4 puertos USB 2.0, un conector HDMI, un conector de audio/vídeo compuesto de 3.5 mm, una ranura para tarjeta microSD, un conector DSI para pantalla, 40 pines GPIO y una antena de chip integrada. Su compatibilidad con distribuciones GNU/Linux basadas en ARM y con Windows 10 IoT, junto con sus dimensiones compactas de 85 x 56 x 17 mm, lo convierten en una solución versátil y eficaz para aplicaciones de automatización.



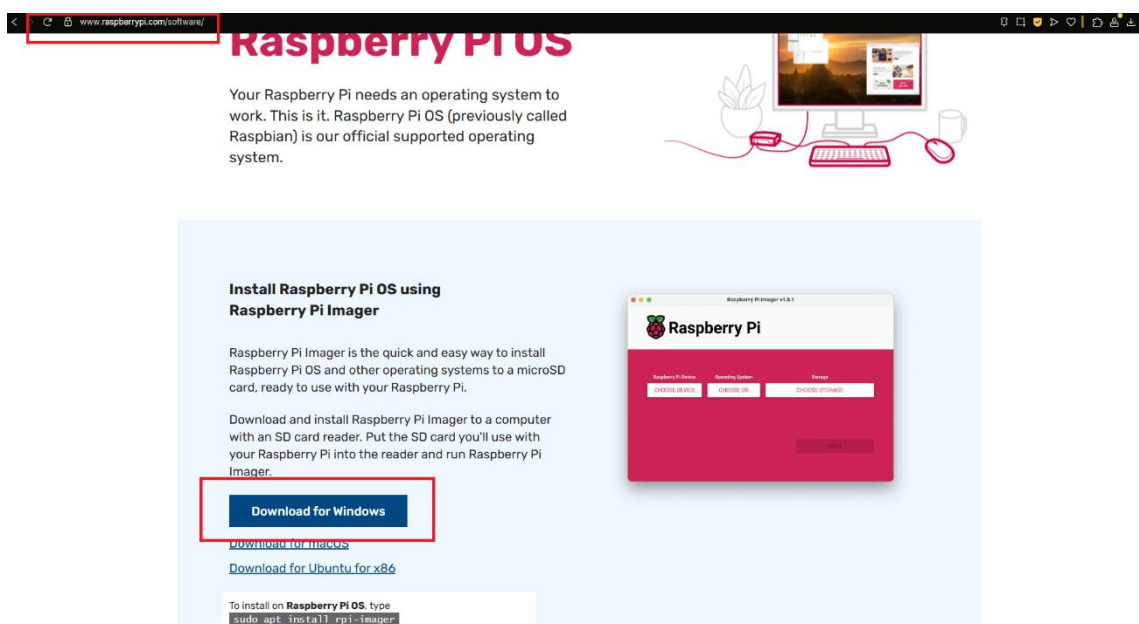
Fuente: <https://raspberrypi.cl/raspberry-pi-3b/>

Figura 2-23. Distribución de pines GPIO Raspberry Pi 3.

2.1.6 Raspberry Pi OS

Para preparar la Raspberry Pi como unidad central del sistema, se requiere disponer de los siguientes materiales: una Raspberry Pi (modelo 3 o superior, siendo utilizada en este proyecto la

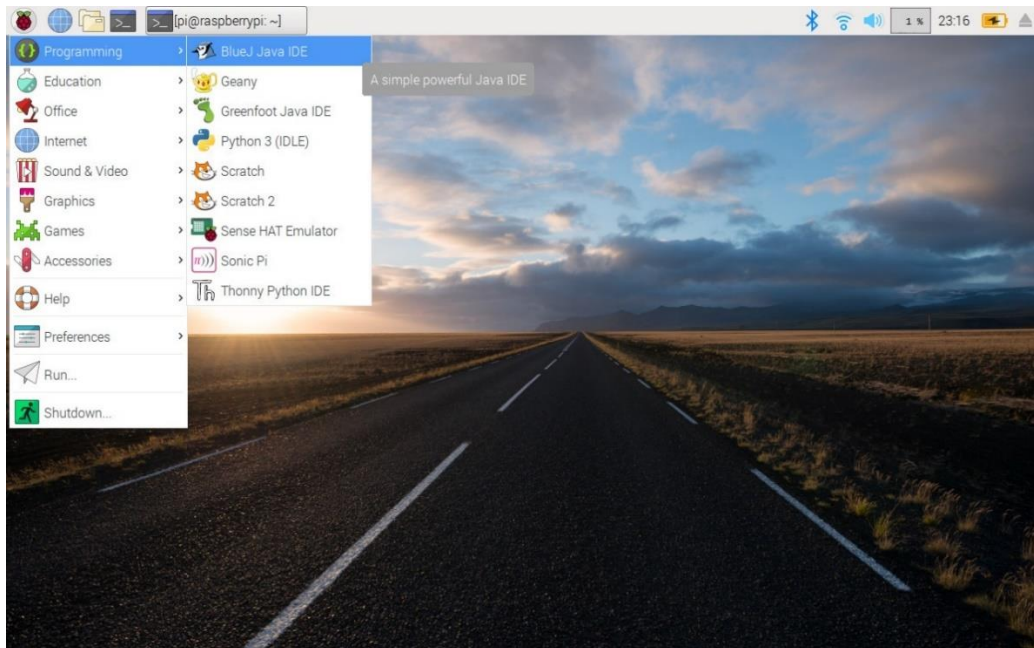
versión Raspberry Pi 4), una tarjeta microSD de al menos 16 GB y clase 10, un lector de tarjetas SD para el ordenador, una fuente de alimentación adecuada para la Raspberry Pi, y acceso a internet mediante WiFi o conexión por cable Ethernet. De manera opcional, puede emplearse un monitor, teclado y ratón si no se opta por el acceso remoto. El primer paso del proceso consiste en descargar el software Raspberry Pi Imager desde el sitio oficial (<https://www.raspberrypi.com/software/>). Este programa, disponible para Windows, macOS y Ubuntu, permite instalar el sistema operativo deseado en la tarjeta microSD de manera sencilla.



Fuente: <https://www.raspberrypi.com/software/>

Figura 2-24. Descarga de Raspberry Pi OS.

Una vez instalado el software Raspberry Pi Imager, ver figura 2-24, se procede a la instalación del sistema operativo en la tarjeta microSD. Para ello, se debe abrir el programa y hacer clic en "Choose OS", seleccionando la opción "Raspberry Pi OS (32-bit)", recomendada por su estabilidad y compatibilidad. Luego, al hacer clic en "Choose Storage", se debe seleccionar la tarjeta microSD insertada en el lector. De manera opcional, es posible acceder a configuraciones avanzadas presionando Ctrl + Shift + X, donde se puede activar el acceso SSH, configurar la red WiFi (ingresando el nombre de la red y la contraseña), y establecer el nombre de host del dispositivo. Finalmente, se debe hacer clic en "Write" para comenzar la instalación del sistema operativo y esperar a que el proceso concluya. Completada esta etapa, se retira la tarjeta microSD del computador y se inserta en la Raspberry Pi. Al conectar la Raspberry Pi a un monitor (si aplica) y suministrarle energía, se inicia el sistema y se presenta el asistente de configuración inicial, en el cual se deben definir parámetros como el idioma, la zona horaria, la conexión WiFi y la actualización del sistema. En la figura 2-25 se puede observar un ejemplo de la interfaz completamente configurada.



Fuente: <https://www.raspberrypi.com/news/introducing-pixel>

Figura 2-25. Interfaz del escritorio de Raspberry PI OS

2.2 SENSORES Y ACTUADORES

El proyecto consta de una serie de sensores y actuadores que se detallarán a continuación, cada uno con un rol específico dentro del sistema de riego automatizado, permitiendo el monitoreo de variables ambientales y el control del flujo de agua según las condiciones detectadas.

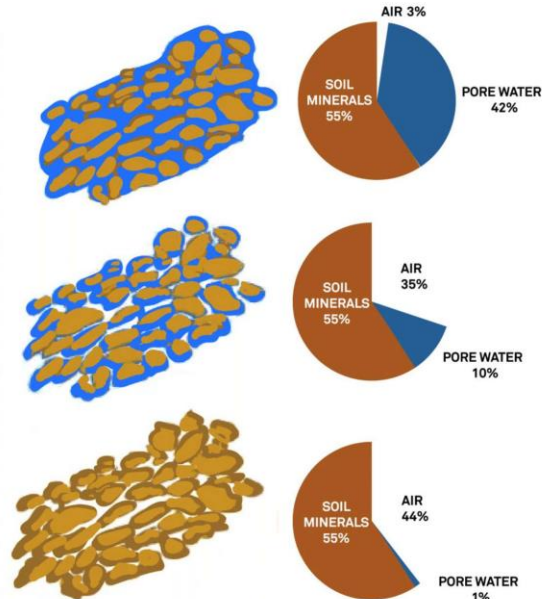
2.2.1 Sensor de humedad

En la actualidad, una simple búsqueda en Internet ofrece una amplia variedad de sensores para medir la humedad del suelo, desde dispositivos analógicos con dial hasta sensores electrónicos compatibles con microprocesadores. Esta gran diversidad puede resultar confusa al momento de seleccionar un sensor confiable, robusto, preciso y cuyos datos sean técnicamente válidos. Una de las principales dificultades radica en la ambigüedad del término “sensor de humedad del suelo”, ya que puede hacer referencia tanto al contenido de agua (cantidad o porcentaje de agua en el suelo) como al potencial hídrico, también conocido como succión del suelo, que describe el estado energético del agua disponible. El contenido de agua puede expresarse en función del peso o del volumen del suelo, siendo este último el enfoque más utilizado en mediciones in situ, ya que representa el contenido volumétrico de agua (VWC).

WATER CONTENT: AMOUNT

θ is volumetric water content (VWC)
 V_w is the volume of water
 V_T is total sample volume

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$



Fuente: <https://metergroup.com/es/measurement-insights/soil-moisture-sensors-how-they-work-why-some-are-not-research-grade/>

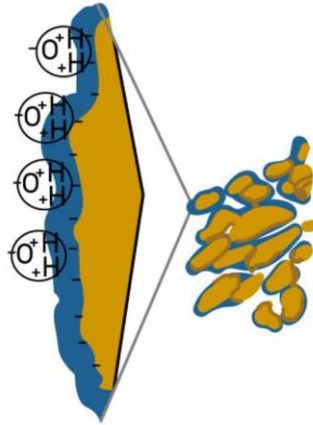
Figura 2-26 Contenido de agua del suelo por volumen

A la derecha de la figura 2-26 se presenta una representación gráfica del contenido volumétrico de agua (VWC), expresado en términos del porcentaje relativo de minerales, agua y aire presentes en el suelo. Es importante distinguir el VWC del potencial hídrico, ya que este último se refiere al estado energético del agua en el suelo, el cual está determinado principalmente por la adhesión de las moléculas de agua a las partículas del suelo. La figura 2-27 muestra una ilustración de la capa límite de agua que rodea las partículas del suelo (representada en azul), la cual se adelgaza a medida que disminuye la humedad del suelo. En estas condiciones, las moléculas de agua remanentes se adhieren con mayor fuerza a las superficies sólidas, reduciendo así su energía potencial y dificultando su disponibilidad para las plantas. Por lo tanto, si el objetivo es evaluar o predecir la disponibilidad de agua para las plantas o el comportamiento dinámico del agua en el suelo, es recomendable utilizar sensores de potencial hídrico o sensores de potencial mátrico.

Las técnicas de detección de humedad del suelo más comunes corresponden a los métodos de resistencia y a los métodos dieléctricos, estos últimos representados principalmente por sensores TDR, FDR. Al seleccionar un método de medición, es fundamental considerar la aplicación específica. Por ejemplo, si bien los sensores resistivos son económicos, responden adecuadamente a los cambios en el contenido de agua y resultan sencillos de incorporar en proyectos de bajo costo o bricolaje, su aplicación se limita mayormente a contextos de jardinería doméstica debido a su escasa precisión y durabilidad. En cambio, los sensores dieléctricos, que se basan en la capacidad del suelo para almacenar carga eléctrica, ofrecen una medición más robusta y precisa del contenido de humedad, lo que los convierte en una solución más eficaz y profesional para aplicaciones agrícolas, científicas o industriales.

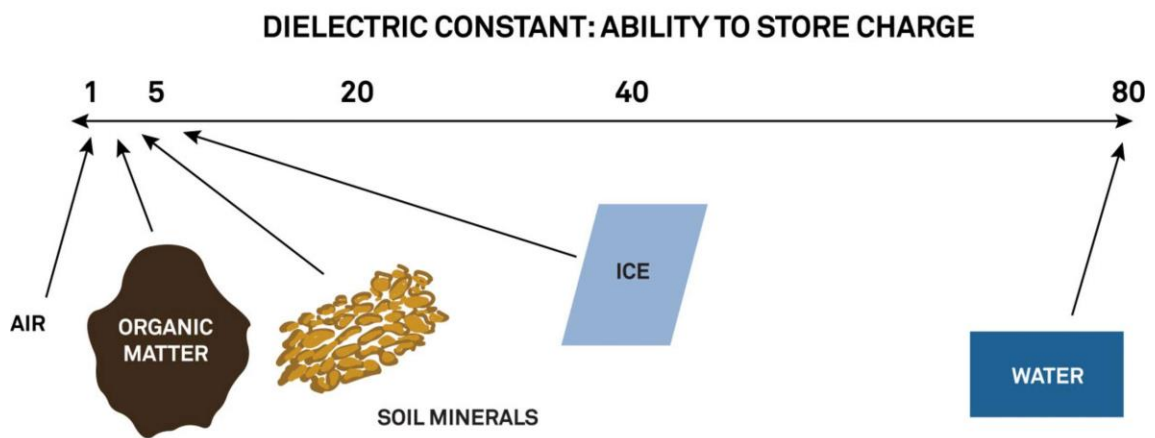
WATER (MATRIC) POTENTIAL: ENERGY

Sum of matric forces (adhesive) and cohesive, Ψ_m) and others (osmotic, gravitational, and pressure)



Fuente: <https://metergroup.com/es/measurement-insights/soil-moisture-sensors-how-they-work-why-some-are-not-research-grade/>

Figura 2-27 Potencial hídrico

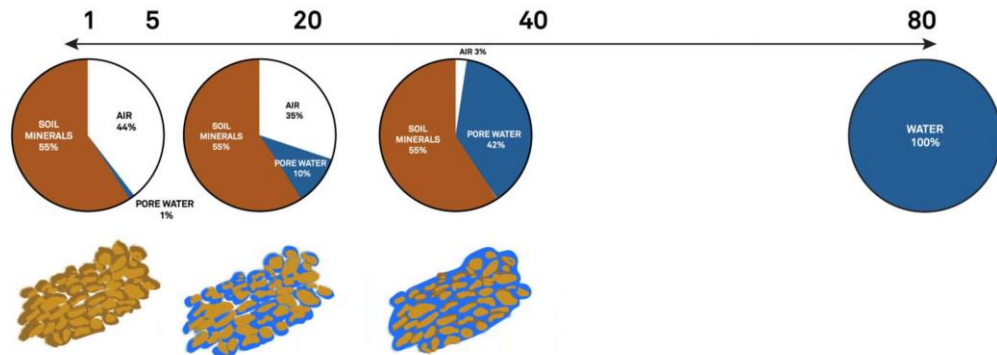


Fuente: <https://metergroup.com/es/measurement-insights/soil-moisture-sensors-how-they-work-why-some-are-not-research-grade/>

Figura 2-28. Constante dieléctrica de materiales

Cada material del suelo tiene una capacidad única de almacenar carga eléctrica, denominada constante dieléctrica, como se ve en la figura 2-28. La escala dieléctrica asigna arbitrariamente un valor de 1 al aire y luego relaciona otros materiales con ese valor. El suelo es

una mezcla de sólidos, líquidos y gases. Cada uno de ellos tiene un dieléctrico diferente, pero en general, todos tienen valores dieléctricos bajos en comparación con el agua, como se ve en la figura 2-29. Por lo tanto, cuando se mide la capacidad de almacenamiento de carga del suelo mediante un sensor dieléctrico, el agua y el aire son los únicos elementos que cambian significativamente en función del volumen, por lo que podemos relacionarlo con el contenido volumétrico de agua.



Fuente: <https://metergroup.com/es/measurement-insights/soil-moisture-sensors-how-they-work-why-some-are-not-research-grade/>

Figura 2-29. Comparación de suelos con diferentes humedades.

Las técnicas de medición dieléctrica (sensor TDR, sensor FDR, sensores de capacitancia) no son todas iguales. De hecho, algunas pueden actuar más como sensores de resistencia dependiendo de su frecuencia de medida y del diseño del circuito. Polarizar con éxito las moléculas de agua evitando polarizar los iones disueltos depende de la rapidez con que se produzca esta polarización, o de la frecuencia de medición. A frecuencias más bajas, los sensores dieléctricos polarizan el agua y las sales, lo que los hace increíblemente sensibles a la salinidad del suelo. Sin embargo, a medida que aumenta la frecuencia de medición (alrededor de 50 MHz y por encima) esta influencia se reduce. Así que si un sensor funciona en el rango de los kHz (como un sensor dieléctrico de económico) no significa que ese sensor pueda evitar los muchos factores que merman la precisión del sensor. En la tabla 2-2 se hace una comparativa de las diferentes tecnologías para medir humedad de suelo.

Tabla 2-2 Comparación de sensores de humedad de suelo

Comparación de sensores			
Sensor	Pros	Contras	Cuando utilizar
Resistivo	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo consumo de energía. - Bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Precisión deficiente - Los sensores se degradan con el tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> - No importa la precisión
Sonda TDR (dominio de tiempo)	<ul style="list-style-type: none"> - Las mediciones continuas se pueden registrar mediante un datalogger. - Precisión con calibración específica del suelo (2-3%). 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso complejo - Difícil instalación - No opera en condiciones de alta salinidad - Gran consumo de energía 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de laboratorios
Sonda FDR (capacitivo)	<ul style="list-style-type: none"> - Las mediciones continuas se pueden registrar mediante un datalogger. - Fácil instalación. - Precisión con calibración específica del suelo (2-3%). - Bajo consumo de energía. - Precios competitivos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible a suelos salinos - Componentes de baja calidad pueden comprometer la precisión y estabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requieren múltiples puntos de medición - Se requiere un sistema de fácil implementación y bajo mantenimiento - Se requiere un bajo consumo de energía

Fuente: Elaboración propia

En base al análisis técnico desarrollado previamente, se concluye que la tecnología más adecuada para satisfacer los requerimientos del presente proyecto de automatización de riego es la sonda de humedad de tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry). Este tipo de sensor ofrece una buena relación entre precisión, estabilidad frente a la salinidad y costo. Para la selección específica del modelo, se consideran tres criterios clave: el tamaño del campo (2 hectáreas), lo que determina que dos sondas bien ubicadas son suficientes para obtener datos representativos; el tipo de cultivo (palto), cuya raíz principal alcanza profundidades promedio de hasta 40 cm, por lo que se requiere una sonda de al menos 60 cm que permita mediciones a 30 y 60 cm; y finalmente, el tipo de suelo, que en este caso es heterogéneo con baja salinidad, condición compatible con el uso de sensores FDR.

a) Sonda Alternativa

Este sensor de humedad y temperatura de suelo, como se ve en la figura 2-30, integra dos sensores internos, permitiendo medir tanto la constante dieléctrica como la temperatura del suelo. Su diseño robusto y versatilidad lo hacen adecuado para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo riego eficiente, agricultura de precisión, invernaderos, experimentación científica y monitoreo en campo abierto. Para cumplir con los requerimientos del presente proyecto de automatización de riego en cultivos de palto, se propone la instalación de dos sondas: una a 30 cm y otra a 60 cm de profundidad, con el fin de abarcar adecuadamente el perfil radicular del cultivo. Este modelo presenta una tensión de funcionamiento de 10 a 30 VDC, salida análoga de 4-20 mA o digital RS485 según la versión, y grado de protección IP68, lo que garantiza un funcionamiento confiable en condiciones exigentes. La precisión de medición de humedad es de $\pm 2\%$ en el rango de 0 a 50% y $\pm 3\%$ entre 50 y 100%, mientras que la temperatura se mide con una precisión de $\pm 0,5$ °C. El costo unitario es de \$49.000 CLP (IVA incluido), por lo que la inversión total por las dos sondas necesarias asciende a \$98.000 CLP por sector de riego.



Fuente: <https://zamper.cl/hum/sensor-de-humedad-y-temperatura-de-suelo-4-20ma-soil-moisture-sensor>

Figura 2-30 Sensor Alternativo de humedad de suelo

b) Sonda Aquacheck AQC11

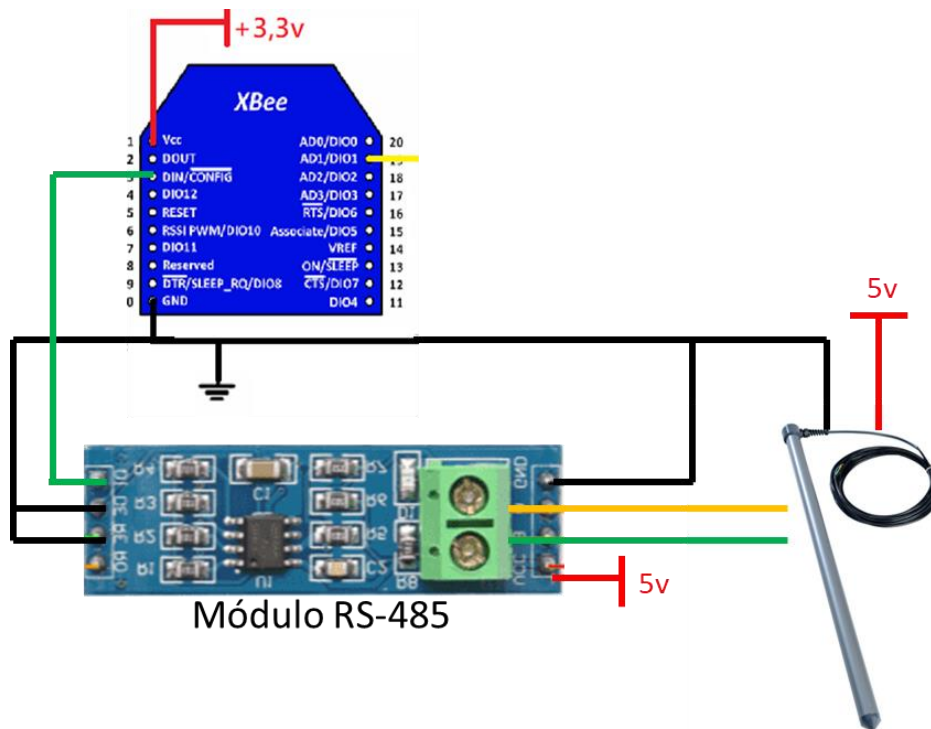
La sonda de humedad y temperatura del suelo, que se observa en la figura 2-31, está especialmente diseñada para instalaciones permanentes, permitiendo realizar mediciones a distintas profundidades mediante la incorporación de múltiples sensores distribuidos a lo largo de su estructura. Este modelo cuenta con un cable de 6 metros de longitud y está disponible en versiones que integran entre 2 y 15 sensores, según el largo total de la sonda. Para el presente proyecto, se ha determinado como opción óptima la sonda de 60 cm de longitud con 4 sensores integrados, cuyo valor asciende a \$732.269 CLP según cotización del proveedor Alphaomega. Las especificaciones técnicas de esta sonda incluyen un rango de medición de humedad del suelo entre 1.000 y 32.000, y un rango de temperatura de 0°C a 50°C con una resolución de 0,2°C. Su construcción en plástico de alta resistencia, junto con un diseño que soporta temperaturas operativas de 0°C a 50°C, la convierten en una solución robusta y precisa para proyectos de monitoreo agrícolas a largo plazo.



Fuente: <https://www.darrera.com/es/producto/aqc11-sonda-humedad-temperatura-suelo/>

Figura 2-31 Sonda Aquacheck AQC11

La sonda de humedad y temperatura seleccionada para este proyecto opera con una tensión de alimentación de 4 a 12 VDC y presenta un consumo máximo de 20 mA. Su salida de datos se realiza mediante interfaces RS-485 o SDI-12, RS-485 es un estándar de interfaz de comunicación serie que define las características eléctricas para sistemas de comunicación multipunto, permitiendo la transmisión de datos a largas distancias, alrededor de 1200 metros, en entornos ruidosos gracias a su señalización balanceada con pares trenzados de dos hilos. A diferencia del RS-232, RS-485 es un estándar de comunicación diferencial, donde se interpreta la diferencia de voltaje entre dos líneas (A y B), lo que lo hace más resistente a las interferencias electromagnéticas, diseñadas para conexión con dataloggers convencionales. Sin embargo, estas interfaces no son directamente compatibles con módulos XBee, por lo que es necesario incorporar un adaptador que convierta la señal RS-485 a comunicación serial TTL, como se observa en la figura 2-32. En el mercado existen adaptadores económicos basados en el chip MAX485, cuyo voltaje de operación es de 5VDC, lo que los convierte en una solución adecuada para integrarse con microcontroladores. Este adaptador permite la correcta interpretación de los datos provenientes de la sonda, facilitando su integración al sistema de automatización de riego implementado mediante tecnología XBee.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-32 Conexión sonda Aquacheck AQ11

2.2.1.1 Prototipo

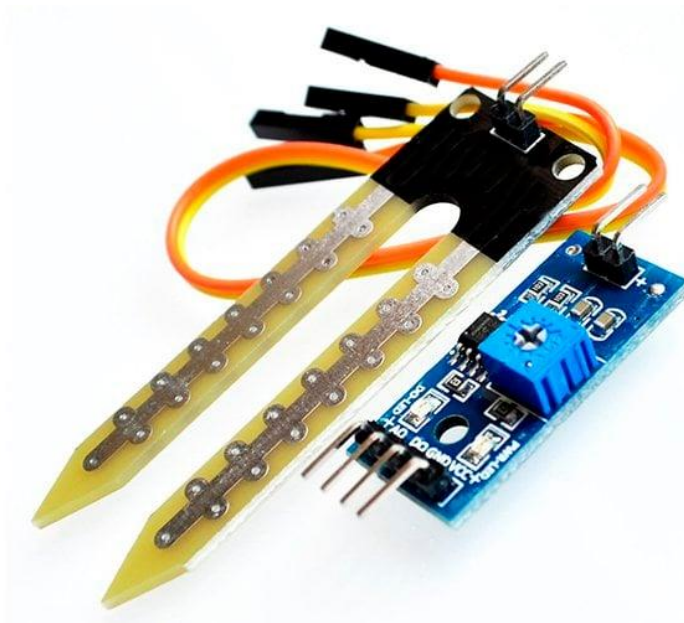
Para el desarrollo del prototipo del sistema de riego automatizado se ha utilizado un sensor de humedad de suelo resistivo de bajo costo y tecnología sencilla, ver figura 2-33, el cual resulta ideal para aplicaciones domésticas. Este sensor permite detectar la cantidad de humedad presente en el suelo circundante mediante un principio resistivo: utiliza dos sondas para conducir una corriente eléctrica a través del suelo y medir su resistencia eléctrica. A mayor contenido de agua en el suelo, menor será la resistencia, ya que el agua facilita la conducción eléctrica; por el contrario, en suelos secos la resistencia aumenta debido a la escasa conductividad del medio.

Este tipo de sensor ofrece características técnicas que lo hacen adecuado para prototipos funcionales: opera con un voltaje entre 3.3VDC y 5VDC, cuenta con una salida analógica para lecturas precisas del nivel de humedad y una salida digital configurable, útil para establecer umbrales de riego. Su sensibilidad puede ajustarse manualmente mediante un potenciómetro integrado (de color azul), y posee indicadores LED para alimentación (rojo) y para el estado de la salida digital (verde). Además, presenta un diseño compacto con dimensiones de PCB de 30 mm x 16 mm y una sonda de 60 mm x 30 mm, con orificios para montaje que facilitan su instalación.

En cuanto a su conexionado, el sensor cuenta con cuatro pines principales:

- VCC: Alimentación (3.3VDC–5VDC)
- GND: Tierra
- D0: Salida digital (alto o bajo, según el umbral configurado)
- A0: Salida analógica (proporcional al nivel de humedad)

Aunque no es tan preciso como sensores de gama profesional como las sondas TDR o FDR, este sensor proporciona una solución práctica, económica y suficientemente confiable para proyectos de automatización en entornos domésticos o de prueba.



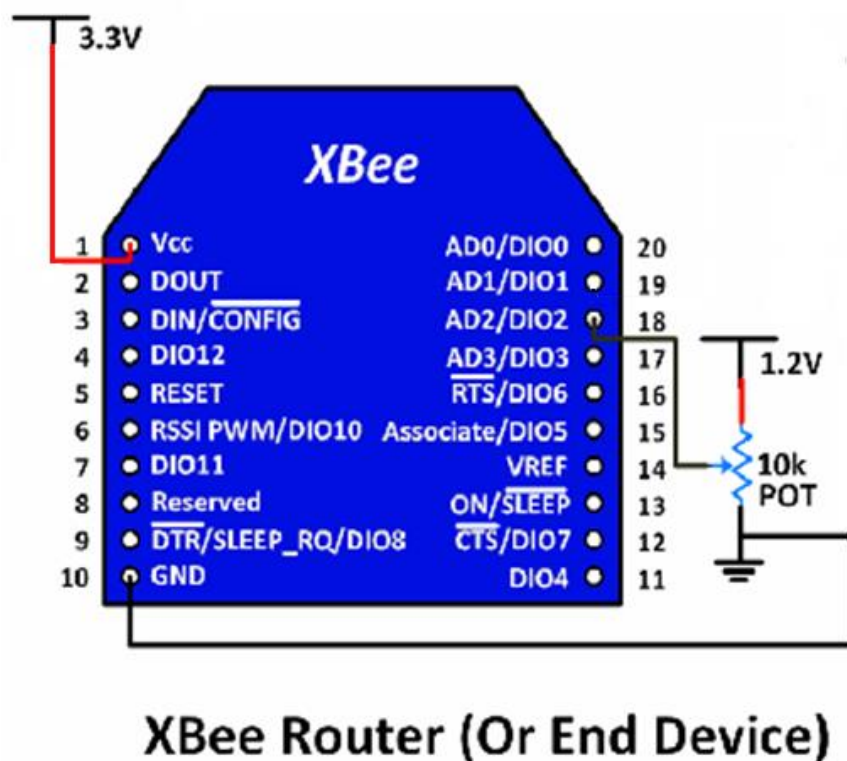
Fuente: <https://afel.cl/products/sensor-humedad-suelo-higrometro>

Figura 2-33. Sensor de humedad de suelo prototipo.

En la figura 2-34 se presenta un ejemplo de conexión del sensor de humedad del suelo simulado mediante un potenciómetro, lo cual permite emular variaciones en la humedad detectada y probar el sistema sin necesidad de insertar el sensor en el suelo. Esta práctica es especialmente útil durante las fases iniciales de desarrollo y depuración del sistema.

Es fundamental tener en cuenta que los módulos XBee S2C, utilizados para la transmisión de datos desde el sensor, poseen un rango de lectura analógica limitado de 0 a 1.2 voltios en sus entradas ADC (Digital I/O configuradas como ADC). Por lo tanto, si se utiliza un sensor cuya salida analógica opera en un rango superior, como es habitual en sensores alimentados a 3.3VDC o 5VDC, es necesario emplear un divisor de tensión que adapte el voltaje a los niveles aceptados por el XBee.

El divisor de tensión puede realizarse con dos resistencias conectadas en serie entre la salida del sensor (o potenciómetro) y tierra, tomando la señal de lectura en el punto medio. La elección de los valores resistivos debe realizarse de forma que el voltaje de salida nunca exceda los 1.2VDC cuando la salida del sensor esté al máximo. Por ejemplo, para adaptar una señal de 0–5V a 0–1.2VDC se puede usar una combinación de resistencias como 10k Ω y 3.3k Ω . Esta precaución protege el pin analógico del XBee y garantiza mediciones precisas dentro del rango permitido, evitando daños al dispositivo y errores de lectura en el sistema.



Fuente: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/xbee/>

Figura 2-34. Esquema de conexión de sensor de humedad a Xbee.

2.2.2 Sensor de nivel de agua

Existen diversos tipos de sensores diseñados para medir el nivel de líquidos en tanques. La elección del sensor adecuado depende del tipo de líquido, la precisión requerida, el entorno de operación y el presupuesto disponible. A continuación, se describen los principales tipos:

a) Sensores de nivel hidrostáticos

- Funcionamiento: Miden la presión ejercida por la columna de líquido sobre el fondo del tanque. Esta presión se convierte en una estimación del nivel del líquido.

- Ventajas: Bajo costo, fácil instalación y buena precisión para aplicaciones simples.
- Desventajas: Requieren compensación por presión atmosférica. Su precisión disminuye en tanques muy altos o en líquidos de densidad variable.

b) Sensores de nivel ultrasónicos

- Funcionamiento: Emiten pulsos ultrasónicos hacia la superficie del líquido y calculan el tiempo que tarda el eco en regresar.
- Ventajas: Sin contacto directo con el líquido. Funcionan con una amplia variedad de fluidos.
- Desventajas: Pueden verse afectados por la temperatura, vapores, espuma o turbulencia superficial.

c) Sensores de nivel de radar

- Funcionamiento: Funcionan de forma similar a los ultrasónicos, pero usando ondas de radiofrecuencia para mejorar la precisión y penetración.
- Ventajas: Alta precisión, incluso en condiciones adversas. Ideales para entornos industriales exigentes.
- Desventajas: Suelen ser más costosos y requieren una correcta configuración.

d) Sensores de flotador

- Funcionamiento: Incorporan un flotador que sube o baja con el nivel del líquido. Este movimiento activa un contacto eléctrico (interruptor).
- Ventajas: Muy económicos, robustos y fáciles de instalar.
- Desventajas: Menor precisión y no aptos para líquidos viscosos o con sólidos en suspensión.

e) Sensores capacitivos

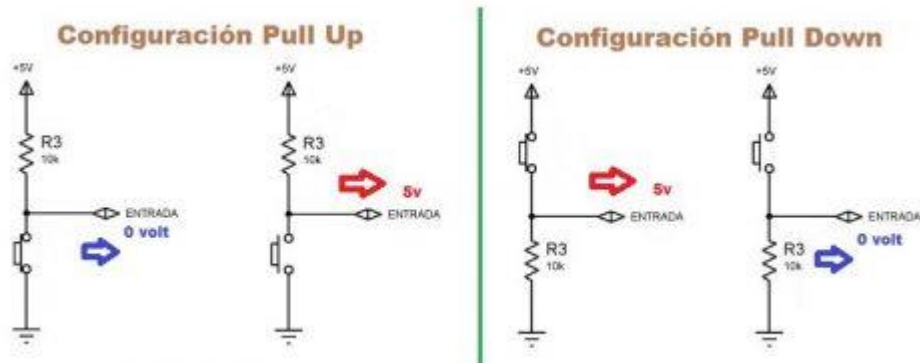
- Funcionamiento: Detectan cambios en la capacitancia causados por la presencia de líquido entre dos electrodos.
- Ventajas: Precisión razonable, sin partes móviles, adecuados para líquidos conductivos o con sólidos.
- Desventajas: Sensibles a condiciones ambientales como temperatura y formación de espuma.



Fuente: <https://aguaplanet.cl/producto/sensor-de-nivel-de-liquidos-de-5mts/>

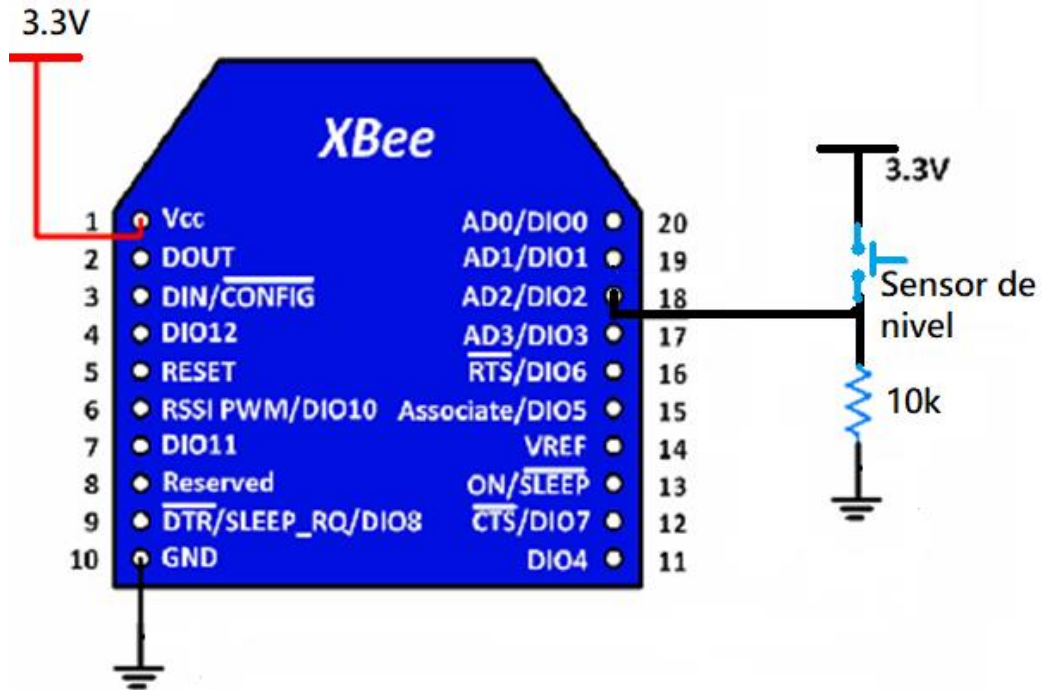
Figura 2-35. Sensor de nivel de agua tipo flotador

En este proyecto se utiliza un sensor de nivel de agua tipo flotador debido a su simplicidad, bajo costo y fiabilidad en entornos agrícolas, ver figura 2-35. Este sensor funciona como un interruptor ON/OFF que envía una señal al módulo XBee cuando detecta niveles mínimo o máximo de agua, permitiendo el control del sistema de riego y la bomba. Como su salida es digital, se requiere una configuración pull-down (resistencia de 10 k Ω entre la entrada del XBee y GND) para asegurar una lectura estable del estado del sensor, tal como se muestra en la figura 2-36 y 2-37.



Fuente: <https://ditecnomakers.com/resistencias-pull-up-y-pull-down/>

Figura 2-36. Configuración Pull up/Pull down con resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-37. Esquema de conexión sensor de nivel a Xbee.

2.2.3 Electroválvula

Una electroválvula es un dispositivo electromecánico, como se ve en la figura 2-38, utilizado para controlar el flujo de fluidos, ya sean líquidos o gases, en sistemas hidráulicos o neumáticos. Su funcionamiento se basa en una bobina solenoide que, al ser energizada, genera un campo magnético capaz de mover un émbolo o pistón, permitiendo la apertura o cierre de la válvula y, por ende, el paso del fluido. Cuando la corriente deja de circular, el émbolo retorna a su posición original cerrando nuevamente el conducto. Este mecanismo permite realizar funciones como la interrupción, distribución, dosificación o mezcla de fluidos de forma automática. Las electroválvulas pueden clasificarse según su número de vías, siendo las de dos vías las más comunes, utilizadas para abrir o cerrar el paso de manera sencilla. Su alimentación eléctrica varía entre corriente alterna (CA) y corriente continua (CC), con voltajes típicos de 12V o 24V. En el contexto de este proyecto de automatización de riego, se emplea una electroválvula de dos vías, accionada eléctricamente, que permite controlar el suministro de agua de forma remota y precisa mediante la integración con módulos XBee y una unidad central de procesamiento.

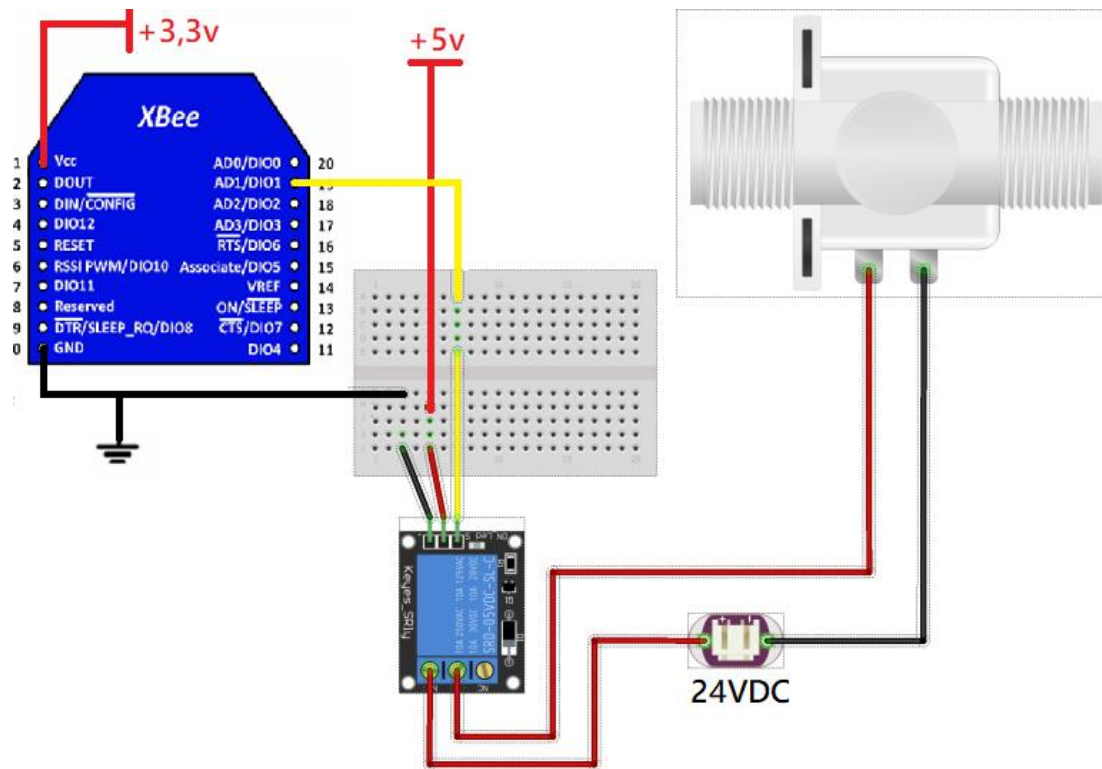


Fuente: <https://comercialderiegos.com/product/valvula-solenoides-agricola-riego/>

Figura 2-38. Válvula solenoide de 24V

Para encender la electroválvula mediante el módulo XBee, es necesario utilizar un relé de 5V que actúe como interruptor controlado electrónicamente, junto con una fuente de alimentación adicional de 24VDC que proporcione la energía necesaria para accionar la válvula. En esta configuración, el XBee envía una señal de control al relé, que a su vez permite o interrumpe el paso de corriente desde la fuente de 24V hacia la electroválvula, tal como se ilustra en la figura 2-39. Este sistema garantiza un aislamiento adecuado entre el circuito de control de baja potencia y el componente de potencia que requiere mayor voltaje para su funcionamiento.

En el prototipo desarrollado, se emplea una única electroválvula simulada mediante un LED, con el objetivo de representar su funcionamiento básico. Sin embargo, en la implementación real del proyecto se contempla el uso de una electroválvula general conectada a la salida de la bomba principal, además de una electroválvula independiente por cada sector de riego de la parcela. Para el caso actual, se han considerado dos sectores diferenciados, aunque el sistema ha sido diseñado con un enfoque escalable, permitiendo la incorporación de más sectores de riego en función de futuras ampliaciones del cultivo o cambios en la planificación agrícola.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-39. Esquema de conexión electroválvula a Xbee.

2.2.4 Bomba de agua

La elección de la bomba de agua adecuada para un pozo depende de varios factores clave, como la profundidad del pozo, el caudal requerido, la altura de elevación y el uso previsto (doméstico, riego, etc.). Las bombas sumergibles son recomendadas para pozos profundos, típicamente superiores a 7 metros, mientras que las bombas de superficie son más adecuadas para pozos de menor profundidad. Es esencial evaluar las necesidades específicas del proyecto antes de seleccionar la bomba para garantizar que cumpla con los requisitos técnicos y operativos. Para sistemas de riego, se aconseja utilizar bombas con impulsor de alta presión para asegurar un flujo constante de agua limpia. Si el agua contiene sólidos, como en el caso de pozos de aguas cargadas, una bomba sumergible con impulsor de canal es ideal para manejar estos sólidos. Para el abastecimiento de agua limpia en un hogar, una bomba con impulsor periférico es eficiente, ya que ofrece una presión constante y un ahorro energético significativo a largo plazo.

En este proyecto, el sistema de riego ya se encuentra implementado, y el enfoque principal consiste en optimizar el encendido y apagado de la bomba de agua. La bomba utilizada es el modelo 2ACm 150H de la marca LEO, de tipo superficial con impulsor de alta presión, similar a la referencia de la figura 2-40, seleccionada específicamente debido a que el pozo no supera los 5 metros de profundidad, lo que la hace adecuada para garantizar un suministro eficiente y constante de agua dentro de los parámetros del sistema.

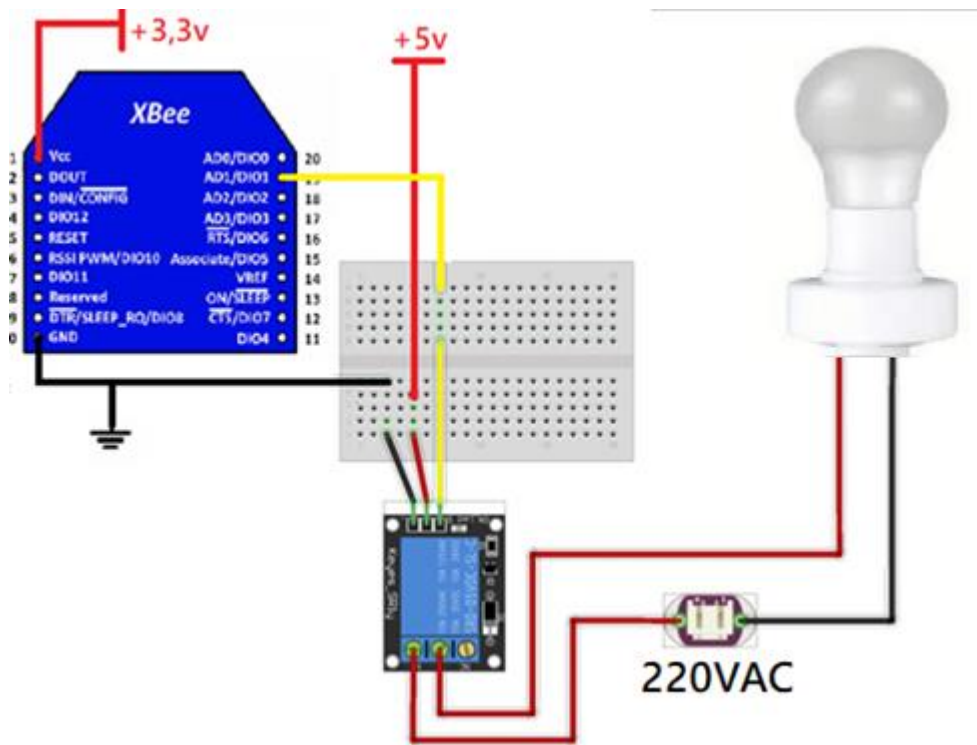
La bomba de succión modelo 2ACm 150H cuenta con una potencia de 1,5 kW (2 HP) y funciona con una alimentación de 220 V. Su caudal máximo es de 120 litros por minuto (7,2 m³/h) y alcanza una succión de hasta 8 metros de profundidad. El cuerpo está fabricado en hierro fundido con tratamiento antióxido, soporta líquidos con temperaturas de hasta 40 °C e incorpora protector térmico en motores monofásicos de hasta 1,5 kW. Su grado de protección es IPX4, lo que asegura un funcionamiento confiable en condiciones agrícolas exigentes.



Fuente: <https://www.riegostore.cl/bomba-centrifuga-2acm-150h-20-hp-112-x-1-leo>

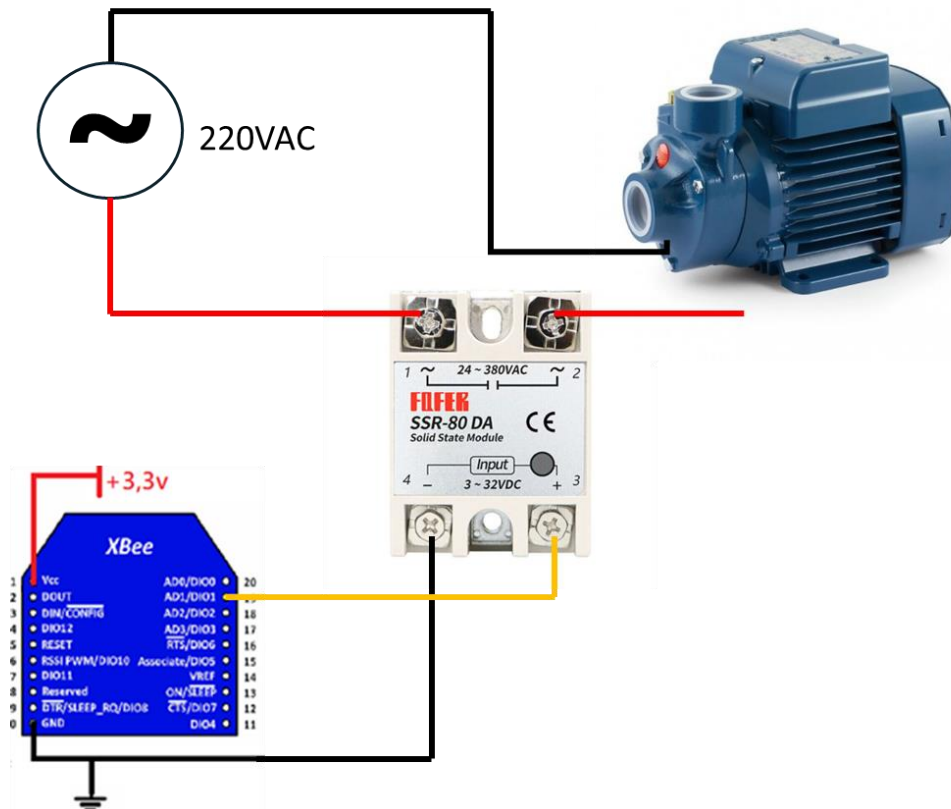
Figura 2-40 Referencia de bomba de agua 220V

Para el encendido de la bomba de agua en este proyecto, se requiere un sistema de control que garantice seguridad, aislamiento y capacidad de conmutación suficiente para manejar cargas de mayor potencia. Aunque en el prototipo se emplea un relé de 5V controlado por el módulo XBee para representar el encendido de la bomba, como se ve en la figura 2-41, en la implementación real del proyecto se recomienda utilizar un contactor o relé de estado sólido (SSR) adecuado al voltaje y corriente nominal de la bomba, en combinación con un módulo de control intermedio. Este módulo puede ser un relé de 5V que active el contactor, permitiendo que el sistema de bajo voltaje controle una carga de mayor potencia de forma segura. Esta arquitectura permite mantener la lógica de control a bajo voltaje, compatible con el Xbee, mientras se garantiza un control seguro y eficiente del suministro eléctrico hacia la bomba. La figura 2-42 muestra el diagrama representativo de la conexión.



Fuente: Elaboración propia en base a las necesidades del proyecto.

Figura 2-41. Esquema de conexión del prototipo de la bomba a Xbee.



Fuente: Elaboración propia en base a las necesidades del proyecto.

Figura 2-42 Esquema de conexión de la bomba a Xbee

2.3 CONSIDERACIONES DE IMPLEMENTACIÓN

Para garantizar una implementación adecuada y eficiente del proyecto de automatización del sistema de riego, se deben considerar cuidadosamente diversos aspectos técnicos relacionados con la instalación de los dispositivos y equipos. A continuación, se detallan las principales recomendaciones:

a. Incorporación de dispositivos en una caja estanca

Cada nodo de la red inalámbrica, compuesto por el microcontrolador Zigbee, la batería y el regulador de voltaje, debe ser alojado en una caja estanca. Esto garantizará la protección de los componentes electrónicos frente a condiciones climáticas adversas como lluvia, humedad, polvo o exposición prolongada al sol. Estas cajas deben contar con un diseño resistente al agua y a los rayos UV, y deben estar debidamente selladas para evitar el ingreso de agentes externos que puedan comprometer el funcionamiento del equipo.

b. Instalación en mástiles sobre postes

Los dispositivos que componen la red inalámbrica, como los nodos Zigbee, deben ser instalados sobre mástiles firmemente fijados a postes. Esto permitirá que los equipos queden por encima de la altura de los árboles en la parcela, asegurando una línea de vista directa entre los nodos y el controlador principal. Mantener una línea de vista sin obstrucciones es crucial para garantizar una transmisión eficiente de los datos y minimizar la pérdida de señal en la red inalámbrica. Los mástiles deben ser robustos y estables, capaces de resistir las condiciones climáticas locales, como el viento, sin comprometer su posición.

c. Orientación e inclinación del panel solar

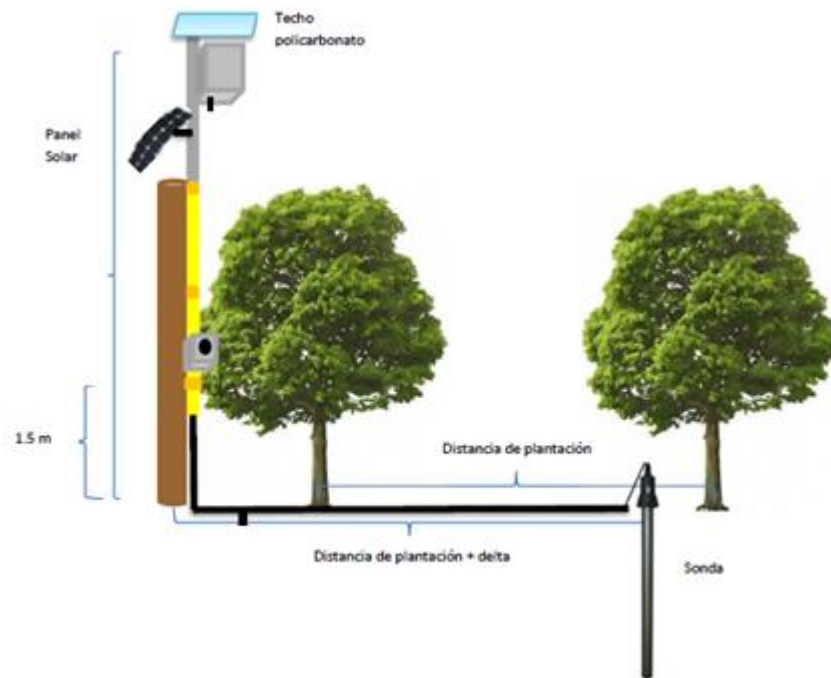
El panel solar, encargado de suministrar energía a cada nodo, debe ser instalado con una orientación hacia el norte (en el hemisferio sur) para maximizar la captación de luz solar durante el día. Asimismo, debe ajustarse con una inclinación de 45 grados, ya que este ángulo optimiza la exposición a la radiación solar y mejora la eficiencia de generación energética. Es fundamental verificar que no existan sombras proyectadas sobre el panel, especialmente durante las horas de mayor radiación solar, para evitar pérdidas en la capacidad de carga.

d. Consideraciones generales

Además de estas recomendaciones específicas, se debe realizar una inspección previa del terreno para identificar las mejores ubicaciones para los postes y mástiles, considerando la distribución de los árboles y la disposición de la parcela. También es importante realizar pruebas de conectividad inalámbrica y ajuste de orientación del panel solar una vez instalado, para garantizar que el sistema funcione correctamente y cumpla con los objetivos de automatización del riego.

Estas medidas no solo garantizarán la protección y el correcto funcionamiento de los equipos, sino que también contribuirán a la sostenibilidad y durabilidad del sistema a largo plazo.

En la figura 2-43 se muestra un diseño de la instalación del sensor de humedad de suelo.



Fuente: Elaboración propia basado en las necesidades del proyecto

Figura 2-43 Diseño de instalación de sensor de humedad

2.4 CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS COMPONENTES

Se considera el consumo energético constante del módulo XBee configurado como coordinador, el cual permanece en operación continua recibiendo paquetes de datos de manera ininterrumpida. Dado su consumo relativamente elevado, se recomienda alimentarlo directamente desde la red eléctrica mediante su correspondiente adaptador de voltaje. En contraste, los módulos configurados como end devices con sensores presentan un bajo consumo energético y, al encontrarse alejados de una fuente eléctrica, se alimentan mediante baterías. Por otra parte, los end devices que controlan electroválvulas requieren una mayor demanda de energía durante el accionamiento de estas, por lo que se opta por la utilización de dos baterías conectadas en paralelo, manteniendo el voltaje nominal y aumentando la capacidad de corriente disponible. Adicionalmente, se realiza una estimación referencial del consumo del relé de estado sólido (SSR), considerando que dicho nodo, al igual que el coordinador, se alimenta directamente desde la red eléctrica mediante su adaptador correspondiente. Esta segmentación permite una evaluación más precisa del consumo energético por nodo, facilitando el dimensionamiento

adecuado de los sistemas de alimentación, especialmente en configuraciones autónomas basadas en energía solar.

a) Xbee como coordinador:

- Corriente de operación constante: 45 mA
- Voltaje de alimentación: 3.3V
- Tiempo de funcionamiento diario: 24 horas
- Consumo diario:

$$\text{Consumo diario} = 45 \text{ mA} \times 24 \text{ h} = 1080 \text{ mAh/día}$$

b) Xbee como end device:

- Corriente en la transmisión (Tx): 45 mA
- Voltaje de alimentación: 3.3V
- Duración estimada por recepción: 100 ms (0.1 s) por evento
- Frecuencia de recepción: cada 5 segundos → 17280 recepciones al día
- Tiempo total activo por día:

$$0.1 \frac{\text{s}}{\text{recepción}} \times 17280 \frac{\text{recepciones}}{\text{día}} = 1724 \frac{\text{s}}{\text{día}}$$

- Consumo energético total:

$$\text{Corriente} \times \text{tiempo activo} = 45 \text{ mA} \times \frac{1724}{3600} \text{ hora} = 480 \text{ mAh/día}$$

c) Sonda Aquacheck:

- Corriente en transmisión: 20 mA (máxima)
- Voltaje de alimentación: 4-12 V
- Duración estimada de cada transmisión: 100 ms = 0.1 segundos
- Frecuencia de transmisión: cada 5 segundos
- Número de transmisiones por día: 17280 transmisiones por día
- Consumo en reposo del orden de μ amper, por lo que se considera despreciable
- Consumo diario estimado:

$$\text{Consumo por transmision} = 20 \text{ mA} \times 0.1 \text{ s} = 2 \text{ mAs}$$

$$\text{Consumo diario} = 2 \text{ mAs} \times 17280 = 34560 \text{ mAs}$$

$$\text{Convertido en mAh: } \frac{34560}{3600} = 9.6 \text{ mAh/dia}$$

d) Electroválvula

- Tensión de operación: 24 V
- Corriente promedio: 215 mA = 0.215 A
- Tiempo de operación diario: 2 horas (estimado)
- Consumo diario:

$$\text{Consumo diario} = 215 \text{ mA} \times 2 \text{ h} = 430 \text{ mAh/dia}$$

e) Regulador de carga

- Corriente de operación constante: <10 mA
- Voltaje de operación 12V o 24V
- Consumo diario:

$$\text{Consumo diario} = 10 \text{ mA} \times 24 \text{ h} = 240 \text{ mAh/dia}$$

f) Relé de estado sólido (SSR)

- Corriente de operación: 5 – 15 mA
- Voltaje de operación: 3 – 32V
- Tiempo de operación diario: 2 horas (estimado)
- Consumo diario:

$$\text{Consumo diario} = 15 \text{ mA} \times 2 \text{ h} = 30 \text{ mAh/dia}$$

2.4.1 Baterías del sistema

En base a los requerimientos del sistema, se definen dos tipos de batería: una de 12V para los nodos finales conectados a sensores y el coordinador, y otra de 24V para los nodos que activan

las electroválvulas. Para determinar la capacidad adecuada de las baterías se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Capacidad de batería (Ah)} = \frac{\text{Consumo diario (Wh)} \times \text{Autonomía (días)}}{\text{Tensión nominal (V)} \times \text{Profundidad de descarga}}$$

La profundidad de descarga o Depth of Discharge (DoD) es el nivel hasta el cual se permite descargar la batería sin dañarla, para las baterías de AGM/gel es de un 50% y un 80% para baterías de litio.

En las Tablas 2-3, 2-4, 2-5 y 2-6 se realiza el cálculo del consumo energético diario en watt-hora (Wh) de cada nodo del sistema, considerando tanto su función como los componentes asociados.

Tabla 2-3 Nodo "sensor"

Carga	Consumo diario (mAh)	Energía diaria (W*h)
Xbee (End device)	480	1.58
Regulador de carga (12V)	240	2.88
Sonda Aquacheck (5V)	9.6	0.048
Total		4.5

Fuente: Elaboración propia en base a los consumos eléctricos de los componentes.

$$\text{Capacidad de batería (Ah)} = \frac{4.5 \times 3}{12 \times 0.5} = 2.25 \text{ Ah}$$

Tabla 2-4 Nodo "electroválvula"

Carga	Consumo diario (mAh)	Energía diaria (W*h)
Xbee (End device)	480	1.58
Regulador de carga (24V)	240	5.7
Electroválvula (24V)	430	10.32
Total		17.6

Fuente: Elaboración propia en base a los consumos eléctricos de los componentes.

$$\text{Capacidad de batería (Ah)} = \frac{17.6 \times 3}{24 \times 0.5} = 4.4 \text{ Ah}$$

Tabla 2-5 Nodo "bomba"

Carga	Consumo diario (mAh)	Energía diaria (W*h)
Xbee (End device)	480	1.58
Regulador de carga (12V)	240	2.88
SSR	30	0.1
Total		4.56

Fuente: Elaboración propia en base a los consumos eléctricos de los componentes.

$$\text{Capacidad de batería (Ah)} = \frac{4.56 \times 3}{12 \times 0.5} = 2.28 \text{ Ah}$$

Tabla 2-6 Nodo "coordinador"

Carga	Consumo diario (mAh)	Energía diaria (W*h)
Xbee (Coordinador)	1080	3.56
Regulador de carga (12V)	240	2.88
Total		6.44

Fuente: Elaboración propia en base a los consumos eléctricos de los componentes.

$$\text{Capacidad de batería (Ah)} = \frac{6.44 \times 3}{12 \times 0.5} = 3.22 \text{ Ah}$$

Se contempla utilizar baterías de 12V y 7 Ah marca Ultracell, tecnología AGM (Absorbent Glass Mat), selladas y libres de mantenimiento, ver figura 2-44. Estas baterías garantizan una autonomía superior a tres días para los nodos de bajo consumo y aproximadamente dos días para los nodos con mayores demandas energéticas. Su valor unitario es de \$14.147 (IVA incluido). Para los nodos que operan a 12V se utilizará una batería, mientras que, para el nodo asociado a la electroválvula, que requiere 24V, se emplearán dos baterías conectadas en serie. Cada unidad presenta un peso aproximado de 1 kg y dimensiones de 50 × 50 × 50 cm.



Fuente: <https://www.virec.cl/producto/bateria-12v-7a-h-agm-ultracell/>

Figura 2-44 Batería 12V 7A-H AGM Ultracell

2.4.2 Paneles solares del sistema

Para determinar la potencia necesaria del panel solar en este proyecto, se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Potencia del panel solar (W)} = \frac{\text{Consumo diario (Wh)}}{\text{Horas solares pico} \times \text{Eficiencia del sistema}}$$

En la zona central de Chile, como la comuna de Quillota, se consideran en promedio entre 4.5 y 5.5 horas solares pico por día. La eficiencia del sistema fotovoltaico se estima entre 0.8 y 0.9, lo cual contempla las pérdidas por temperatura, suciedad en los paneles, cableado y regulación de carga. Estos valores permiten dimensionar adecuadamente el panel solar para asegurar una operación autónoma y continua del sistema de riego automatizado.

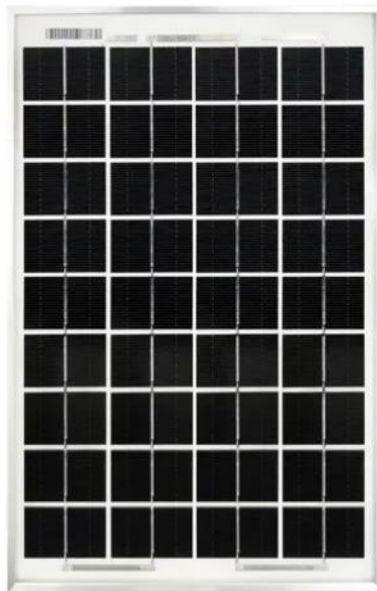
Para los nodos de menor consumo, correspondientes a sensores, coordinador y bomba, se estima un requerimiento energético aproximado de 5 Wh diarios.

$$\text{Potencia del panel solar (W)} = \frac{5}{4.5 \times 0.8} = 1.39 \text{ W}$$

Mientras que, para los nodos de mayor consumo, correspondientes a las electroválvulas, se estima un requerimiento energético de aproximadamente 18 Wh diarios.

$$\text{Potencia del panel solar (W)} = \frac{18}{4.5 \times 0.8} = 5 \text{ W}$$

En base a los cálculos previos, se recomienda emplear un panel solar de al menos 10 W para los nodos de menor consumo y uno de 15 W para los nodos de mayor consumo, con el fin de asegurar una recarga adecuada incluso en días parcialmente nublados, ver figura 2-45. Los precios estimados son \$17.400 y \$19.990 pesos chilenos, ambos con IVA incluido.



Fuente: <https://enertik.com/cl/tienda/fotovoltaica/paneles-solares/panel-solar-enertik-monocristalino-100w/>

Figura 2-45 Panel solar Enertik PS-10M 12V 10W

2.4.3 Regulador de carga del sistema

El controlador de carga solar de 12V o 24V , ver figura 2-46, constituye un componente fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema de alimentación autónomo mediante energía solar. Diseñado para regular la energía proveniente de los paneles solares, este dispositivo protege las baterías contra sobrecargas, descargas profundas y otros riesgos eléctricos, asegurando un funcionamiento óptimo y prolongando su vida útil. Utiliza tecnología PWM (modulación por ancho de pulso), lo que permite una carga más estable y eficiente. Está equipado con indicadores LED que permiten supervisar en tiempo real el estado de carga, el funcionamiento general y la presencia de eventuales fallos. Su diseño compacto y robusto facilita su instalación en espacios reducidos, tanto en interiores como en exteriores, siendo ideal para aplicaciones residenciales, rurales o comunitarias que dependen de energía solar. Es compatible con baterías de plomo-ácido, AGM, gel o litio, y cuenta con terminales dedicados para la conexión de paneles solares, baterías y cargas.



Fuente: <https://feelsecure.cl/products/controlador-de-carga-solar-12v>

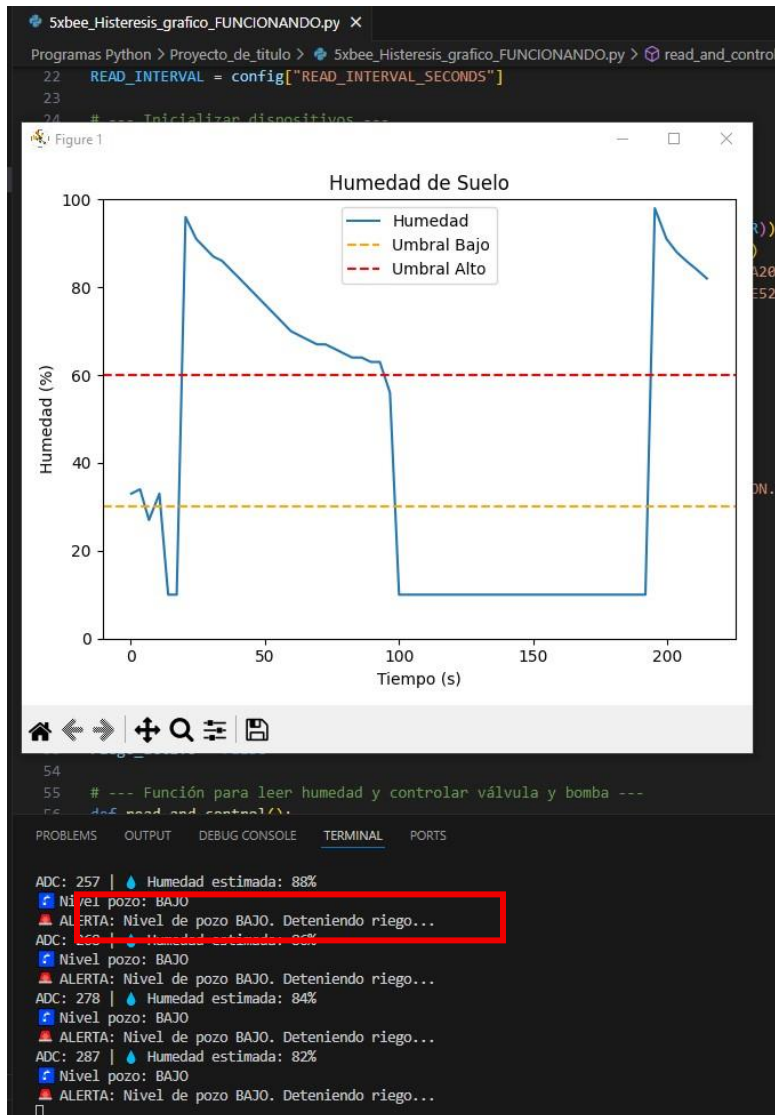
Figura 2-46 Regulador de Carga Solar Digital 12V

2.5 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

A continuación, se exponen los principales resultados obtenidos a partir de la implementación del prototipo del sistema de monitoreo de riego. Este sistema fue diseñado utilizando una sonda de humedad de suelo, módulos de comunicación XBee S2C y diversos componentes electrónicos que permiten la simulación del comportamiento de un sistema de riego automatizado. Se incorporan imágenes representativas de cada estado funcional del prototipo, junto con una breve descripción del comportamiento observado.

a. **Alerta por nivel de agua bajo**

El programa evidencia la activación de una alerta que indica un nivel bajo en el pozo. Esta condición es detectada por el sensor de nivel, cuya señal es transmitida al nodo coordinador mediante el módulo XBee. Al registrarse esta condición, el sistema responde desactivando el riego de forma preventiva (ver Figura 2-47).

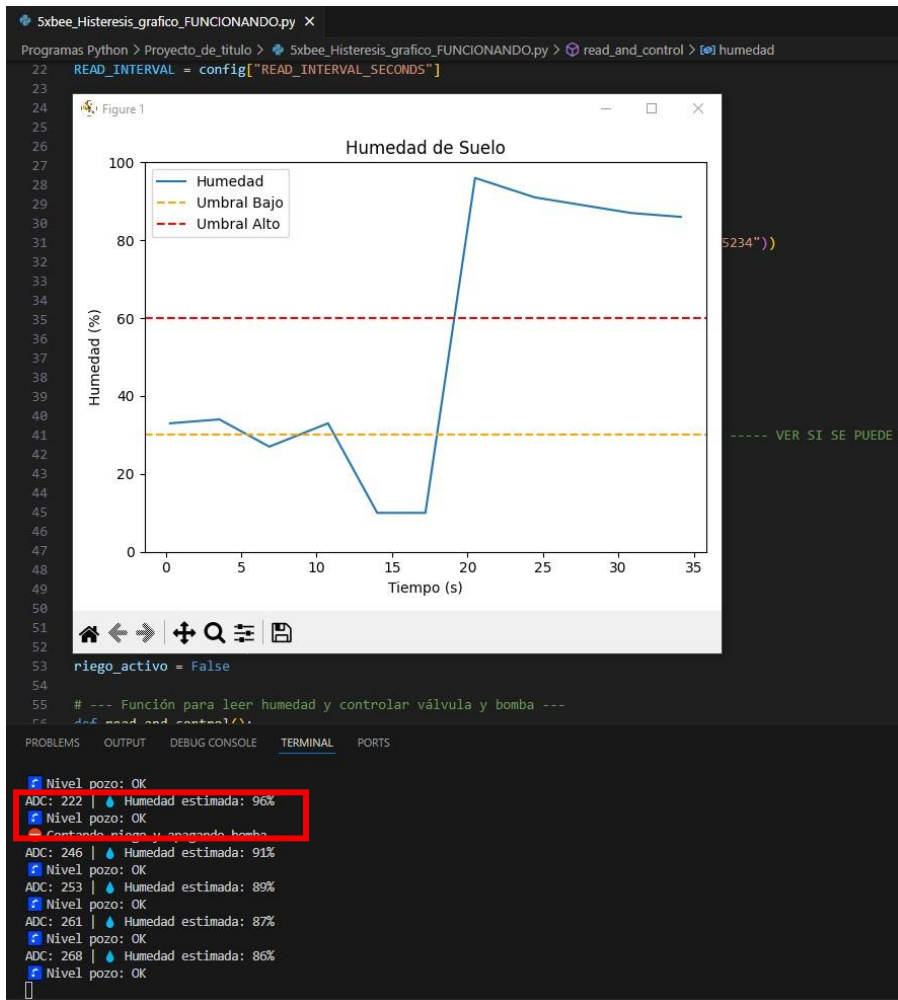


Fuente: Elaboración propia en base al comportamiento del sistema

Figura 2-47 Alerta nivel de pozo bajo

b. Riego detenido por humedad alta

El sistema cuenta con umbrales de humedad definidos. Cuando la lectura de la sonda de humedad supera el valor límite superior configurado, se desactiva automáticamente el riego, con el fin de evitar el exceso de agua en el suelo. Este comportamiento fue validado en el prototipo, observándose una correcta respuesta del sistema ante esta condición (ver Figura 2-48).

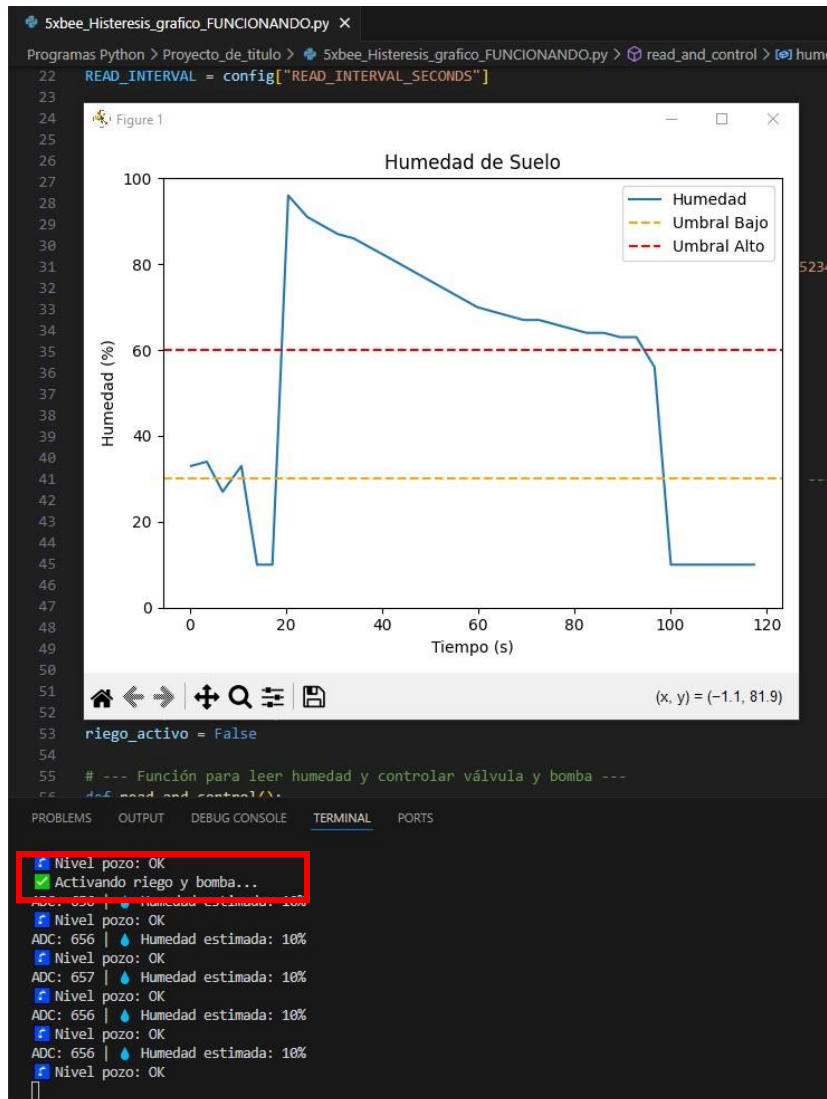


Fuente: Elaboración propia en base al comportamiento del sistema

Figura 2-48 Riego detenido

c. Activación del riego por humedad baja y nivel de pozo adecuado

Quando la lectura de humedad está por debajo del umbral inferior configurado y el sensor de nivel indica que el pozo posee un volumen de agua suficiente, el sistema activa el riego. Esta condición se visualizó con la activación de los actuadores asociados (simulados mediante indicadores LED), lo cual evidencia un funcionamiento coordinado entre los sensores de humedad y nivel de agua (ver Figura 2-49).

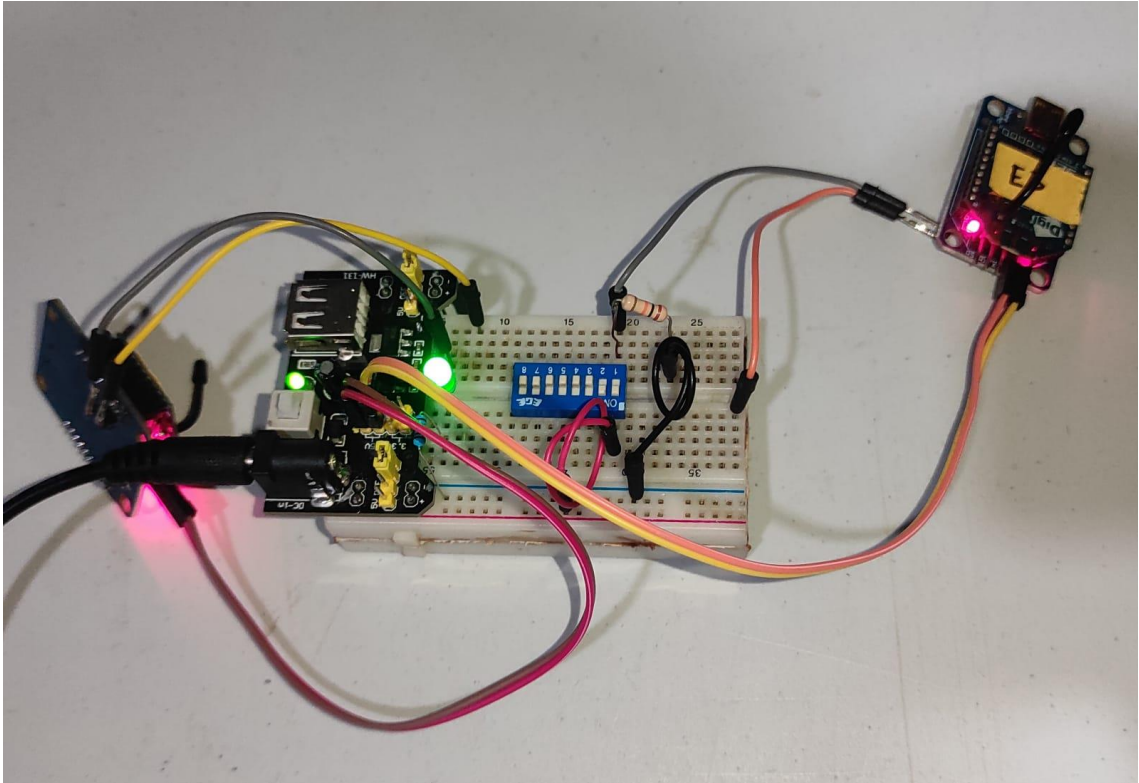


Fuente: Elaboración propia en base al comportamiento del sistema

Figura 2-49 Activación del riego

d. Simulación de bomba de agua activa

La activación de la bomba de agua fue simulada mediante un LED verde, el cual se enciende al recibir la señal correspondiente desde el nodo coordinador. Esta condición se presenta únicamente cuando tanto el nivel del pozo como la humedad del suelo se encuentran dentro de los rangos establecidos para activar el sistema de riego (ver Figura 2-50).



Fuente: Elaboración propia en base al prototipo implementado

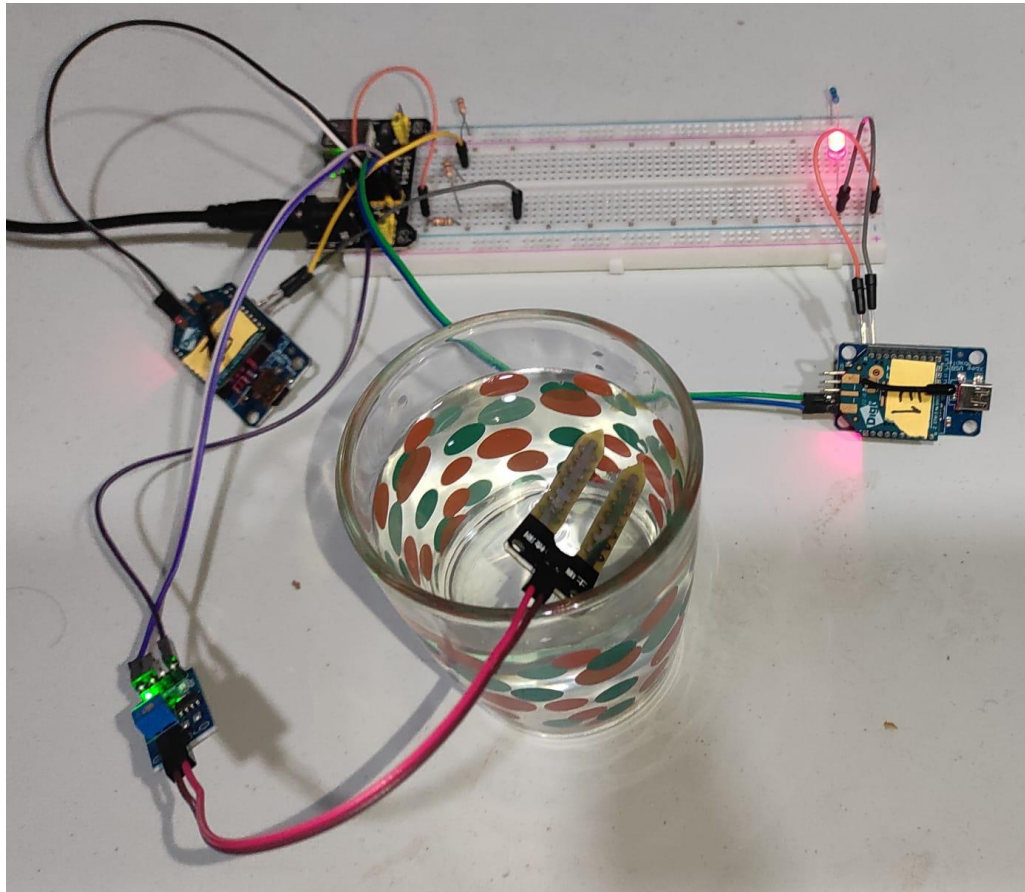
Figura 2-50 Circuito nodo bomba y nodo sensor de nivel

e. Simulación de sensor de nivel de agua

Para simular el comportamiento del sensor de nivel, se utilizó un DIP switch con una configuración *pull-down*, lo cual permite representar de forma sencilla el cambio de estado del sensor (ON/OFF) (ver Figura 2-50). Esta implementación facilitó las pruebas del sistema ante variaciones en el nivel de agua sin requerir un sensor físico de nivel.

f. Funcionamiento del sensor de humedad y activación de electroválvula

Durante la simulación, se observó el comportamiento del sistema ante distintas condiciones de humedad del suelo. La activación de la electroválvula fue representada mediante un LED rojo, el cual se encendía cuando la humedad descendía por debajo del umbral mínimo. Este comportamiento permitió validar la lógica de control implementada en el prototipo (ver Figura 2-51).



Fuente: Elaboración propia en base al prototipo implementado

Figura 2-51 Circuito nodo sensor de humedad y nodo electroválvula

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian el correcto funcionamiento de los distintos módulos del sistema de monitoreo de riego, así como la comunicación inalámbrica entre los nodos mediante los módulos XBee. La integración de sensores y actuadores simulados permitió replicar condiciones reales y verificar el comportamiento del sistema frente a distintos escenarios. Asimismo, las pruebas realizadas se efectuaron con los módulos XBee a una distancia aproximada de 10 metros sin línea de vista, comprobando la estabilidad y confiabilidad de la transmisión de datos en dichas condiciones.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN ECONÓMICA

3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo se expone la evaluación económica del sistema propuesto, considerando los costos asociados a las distintas etapas del proyecto. Se analizan los gastos de mano de obra correspondientes al desarrollo, prototipado e implementación en terreno, junto con el detalle de los costos de materiales requeridos para su ejecución. Asimismo, se incluyen las estimaciones de mantenimiento necesarias para garantizar la operatividad y sostenibilidad del sistema a largo plazo.

3.1 ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO

En el análisis de costos del proyecto se estableció como criterio de referencia la Unidad de Fomento (UF), ver Tabla 3-1 , con el fin de justificar adecuadamente los montos asociados y evitar la depreciación del valor de los materiales a lo largo del tiempo. Los costos fueron organizados en dos categorías principales: en primer lugar, los costos relacionados al desarrollo del proyecto, que consideran las horas hombre dedicadas al diseño, programación y elaboración de documentación técnica, junto con los gastos asociados al desarrollo del prototipo; en segundo lugar, los costos asociados a la instalación en terreno, los cuales contemplan tanto la mano de obra requerida para la implementación del sistema como la adquisición de materiales e insumos necesarios para la puesta en marcha.

Tabla 3-1 Tabla del valor UF al día

Valor del precio de la UF el día 30-09-2025	
Valor UF	\$39.485,65

Fuente: <https://valoruf.cl/>

3.1.1 Costos de desarrollo del proyecto

Los costos asociados a la etapa de desarrollo se dividen en dos: el diseño de ingeniería, realizado por un ingeniero de ejecución en Instrumentación y Control Industrial, y los costos vinculados al armado del prototipo.

Para el diseño de ingeniería, se consideró la carta Gantt, ver Tabla 3-2, correspondiente al tiempo requerido para el desarrollo del proyecto, estableciendo una jornada laboral de 8 horas diarias, 5 días a la semana. Bajo esta planificación, el desarrollo contempla un total aproximado de 6 semanas de trabajo, lo que equivale a 240 horas laborales. Según los antecedentes de mercado disponibles al 30-09-2025 (fuente: <https://cl.computrabajo.com>), un ingeniero de

Los costos correspondientes a la adquisición de materiales destinados al desarrollo del prototipo se presentan de manera detallada en la Tabla 3-4, donde se desglosan los componentes requeridos junto con sus valores asociados.

Tabla 3-4 Tabla de costos de materiales del prototipo en UF

Componente	Precio unitario (\$)	Cantidad	Subtotal (\$)	Subtotal (UF)
Raspberry PI 4	79.990	1	79.990	2,03
Fuente Raspberry	6.000	1	6.000	0,15
Fuente de alimentación 5v y 3.3v	2.500	3	7.500	0,19
Sensor de humedad de suelo	2.510	2	5.020	0,13
Sensor de nivel tipo flotador	4.750	1	4.750	0,12
Electroválvula 12V	8.650	1	8.650	0,22
Soquete ampolleta	1.500	1	1.500	0,04
Ampolleta 220V	4.000	1	4.000	0,10
Xbee	32.000	6	192.000	4,86
Xbee explorer	8.700	6	52.200	1,32
Resistencias 220Ω	100	2	200	0,01
Resistencias 10kΩ	100	6	600	0,02
Leds	150	2	300	0,01
Cargador 12V 1A	3.000	3	9.000	0,23
Cables protoboard	100	20	2.000	0,05
Multímetro	12.000	1	12.000	0,30
Modulo relé	3.100	2	6.200	0,16
Alargador	6.000	3	18.000	0,46
Protoboard	2.900	3	8.700	0,22
Cable micro-USB	3.900	2	7.800	0,20
Total			426.410	10,80

Fuente: Elaboración propia en base a los costos del prototipo.

3.1.2 Costos de instalación en terreno

Los costos asociados a la instalación en terreno se clasifican en dos categorías: mano de obra y materiales.

En lo referente a la mano de obra, se consideran los siguientes profesionales:

- Ingeniero de ejecución en control e instrumentación industrial, responsable de la configuración y conexión de los dispositivos, además de la realización de las pruebas finales. El sueldo promedio estimado para este cargo corresponde a \$1.360.373 CLP mensuales, de acuerdo con los datos publicados en www.chiletrabajo.cl al 30-09-2025.
- Técnico agrícola, encargado de la instalación de las sondas de humedad de suelo, con un sueldo mensual promedio de \$731.149 CLP, de acuerdo con los datos publicados en www.chiletrabajo.cl al 30-09-2025.
- Ayudante de instalación, destinado a labores de montaje de equipos en postes, excavación de zanjas y apoyo general en la implementación, con un sueldo equivalente al salario mínimo legal en Chile, estimado en \$529.000 CLP mensuales al 30-09-2025.

El tiempo total proyectado para la implementación en terreno corresponde a dos semanas, conforme a lo establecido en la carta Gantt presentada en la Tabla 3-5.

Para el pago de los trabajadores se considerará un cálculo proporcional a los días efectivamente trabajados. Para ello, se toma como base el sueldo mensual dividido en 20 días laborales, lo que permite obtener el valor diario de cada trabajador. Posteriormente, este valor se multiplica por los 12 días correspondientes a las dos semanas de implementación proyectadas. El detalle de estos costos se presenta en la Tabla 3-6.

Tabla 3-5 Carta Gantt de la instalación en Terreno del Proyecto

Actividad / Tiempo (días)	semana 1					semana 2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Preparación del terreno										
Inspección inicial del lugar	■									
Nivelación y adecuación de zonas críticas	■									
Marcado de sectores de riego	■									
Instalación hidráulica										
Instalación de electroválvulas y accesorios	■	■								
Instalación eléctrica y de control										
Montaje del tablero eléctrico	■									
Cableado de relés, contactores y protecciones		■	■							
Conexión de la bomba de agua			■	■						
Instalación de reguladores de carga y baterías				■	■					
Montaje de paneles solares					■					
Instalación de sensores y actuadores										
Instalación de sensores de humedad en sectores definidos				■	■					
Instalación de la sonda de nivel en el pozo					■					
Montaje y cableado de electroválvulas por sector					■					
Instalación del módulo coordinador y los end devices (XBee)							■	■		
Integración y puesta en marcha										
Pruebas de comunicación entre dispositivos								■	■	
Configuración inicial del sistema de monitoreo									■	■
Verificación de la lógica de control									■	■
Prueba de riego por sectores									■	■
Capacitación y entrega										
Capacitación al usuario en operación y mantenimiento										■

Fuente: Elaboración propia en base a las actividades requeridas para la implementación del proyecto.

Tabla 3-6 Profesionales requeridos para implementación

Profesionales requeridos para implementación				
Cargos	Cantidad	N° de días	Valor total (\$)	Valor total (UF)
Ing. Ejec. en Control e Instrumentación Industrial	1	12	816.223	20,67
Tec. Agrícola	1	12	438.689	11,10
Ayudante	1	12	317.400	8,04
		Total	1.571.846	39,81

Fuente: Elaboración propia en base a los profesionales requeridos para la implementación.

Además, se presentan los costos asociados a los materiales requeridos para la instalación en terreno del sistema, considerando los componentes necesarios para la conexión, montaje y

puesta en marcha del proyecto. El detalle de estos materiales y sus valores estimados se muestra en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7 Costos totales de materiales en terreno

Componentes	Precio Unitario (\$)	Cantidad	Subtotal (\$)	Subtotal (UF)
Hardware				
Raspberry PI 4	79990	1	79990	2,03
Xbee	32000	8	256000	6,48
Sensores				
Sonda de humedad FDR	730000	2	1460000	36,98
Adaptador Max485	6000	2	12000	0,30
Sensor de nivel tipo flotador	12990	1	12990	0,33
Actuadores				
Relé estado sólido (SSR)	4500	1	4500	0,11
Electroválvula 24V	18500	3	55500	1,41
Modulo relé 5V	4500	3	13500	0,34
Alimentación y energía				
Panel solar 10W	17400	5	87000	2,20
Panel solar 15W	19990	3	59970	1,52
Controlador de carga solar	6000	8	48000	1,22
Batería de 12V 7Ah	14200	11	156200	3,96
PCB circuito	5000	8	40000	1,01
Estructura y montaje				
Mástil metálico 3 metros	6800	8	54400	1,38
Caja estanca IP65	6500	8	52000	1,32
Soporte y fijación	20000	1	20000	0,51
Software				
Licencia (XCTU, Python, VSCode)	0	1	0	0,00
Otros				
Cables, conectores y materiales varios	20000	1	20000	0,51
Total			\$2.432.050	61,59

Fuente: Elaboración propia en base a los costos de materiales.

3.2 MANTENIMIENTO DEL PROYECTO

Para mantener el sistema en óptimas condiciones, se proponen dos tipos de mantenimiento: preventivo, que contempla revisiones periódicas y limpieza general del sistema, y correctivo, aplicado ante fallas para restablecer su funcionamiento de forma rápida y eficiente.

3.2.1 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo tiene como objetivo evitar fallas y garantizar un funcionamiento continuo y eficiente del sistema. Para los sensores de humedad y nivel, se recomienda una limpieza periódica, verificación de calibración si aplica, y revisión de cables o conectores. En el caso de las electroválvulas, debe comprobarse su funcionamiento mecánico y la correcta alimentación eléctrica. La bomba de agua requiere monitoreo del caudal y la presión, además de inspecciones eléctricas y mantenimiento según especificaciones del fabricante. El sistema energético, compuesto por paneles solares y baterías, debe mantenerse limpio, con revisiones de carga y conexiones. Finalmente, la Raspberry Pi y los módulos Zigbee deben someterse a reinicios controlados, actualizaciones de software y revisiones físicas para garantizar su operatividad.

3.2.2 Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo se aplica cuando se presenta una falla en el sistema, y su objetivo es restablecer la operatividad del proyecto. Las acciones incluyen el reemplazo de sensores afectados por humedad, corte de cables, la sustitución de electroválvulas que se encuentren atascadas o quemadas y la reparación del sistema solar ante desconexiones o daños físicos en paneles o reguladores. Asimismo, puede ser necesaria la reprogramación o el reemplazo de la Raspberry Pi si se detectan fallos en la lógica de control o comunicación, así como la reinstalación o el ajuste de los módulos Zigbee cuando se identifiquen pérdidas de conectividad.

3.3 JUSTIFICACIÓN DE GASTOS

La implementación del sistema de automatización de riego propuesto constituye una inversión estratégica orientada a responder a las necesidades actuales del sector agrícola. En primer lugar, permite una optimización significativa en el uso del recurso hídrico, aspecto especialmente relevante en regiones afectadas por la escasez, como la comuna de Quillota, al aplicar riego únicamente cuando el suelo lo requiere gracias al monitoreo continuo mediante

sensores de humedad. En segundo término, contribuye a la reducción de costos operativos mediante la automatización de procesos, disminuyendo la necesidad de mano de obra y mejorando la eficiencia en el uso de recursos energéticos y fertilizantes.

Asimismo, el sistema favorece el incremento de la productividad y la calidad del cultivo, garantizando un suministro de agua preciso que mejora la salud y el rendimiento de los árboles. Su diseño incorpora conectividad remota, lo que permite al agricultor supervisar y controlar el riego en tiempo real, optimizando la toma de decisiones y facilitando una gestión más eficiente. Además, el uso de energía solar para su funcionamiento promueve la sostenibilidad y la autonomía operativa, permitiendo su implementación en zonas sin infraestructura eléctrica. El sistema también ofrece escalabilidad, ya que admite la incorporación futura de nuevos sensores y tecnologías compatibles con plataformas IoT, asegurando su vigencia tecnológica a largo plazo.

Desde una perspectiva económica, la inversión se justifica plenamente al considerar los beneficios financieros y de eficiencia que genera a mediano y largo plazo. El gasto inicial, correspondiente al diseño de ingeniería, desarrollo del prototipo e instalación en terreno, debe entenderse como una inversión orientada a mejorar la productividad y sostenibilidad del proceso agrícola. La automatización del riego reduce la necesidad de supervisión constante y la intervención manual en tareas repetitivas, conllevando un ahorro permanente en los costos de operación y mantenimiento.

Adicionalmente, la disminución del consumo de agua y energía, junto con la prevención de pérdidas derivadas del riego ineficiente, contribuye a un retorno de la inversión en el corto plazo, especialmente en zonas donde el costo del recurso hídrico impacta directamente en la rentabilidad del cultivo. Para garantizar una evaluación económica precisa y evitar la depreciación del valor de los materiales, los costos fueron expresados en Unidades de Fomento (UF), asegurando su actualización en el tiempo.

En resumen, este proyecto representa una solución técnica, económica y ambientalmente sólida frente a los desafíos de la agricultura moderna. Su implementación permite avanzar hacia una gestión agrícola más inteligente, eficiente y sostenible, reafirmando que la inversión inicial se traduce en beneficios duraderos para la productividad y competitividad del sector.

3.4 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL PROYECTO

La evaluación de la rentabilidad del sistema de automatización de riego propuesto se fundamenta en la relación entre la inversión inicial requerida y los beneficios económicos que genera a lo largo del tiempo. Este análisis considera tanto los costos de implementación como los ahorros operativos derivados de la optimización del recurso hídrico, la reducción de consumo energético y la disminución de la mano de obra asociada a las tareas de riego.

El costo total de inversión contempla los gastos de desarrollo, prototipado e instalación en terreno, expresados en Unidades de Fomento (UF) para mantener su valor real en el tiempo. A partir de estos costos, se proyecta un escenario de ahorro operativo estimado entre un 25% y un 35% respecto a los métodos tradicionales de riego, principalmente debido al uso más eficiente del agua y la energía, así como a la reducción de horas hombre requeridas para la operación y supervisión del sistema (ver Tabla 3-8).

Considerando una vida útil promedio de cinco años para los equipos principales (sensores, válvulas, bomba y módulos de comunicación), y un mantenimiento anual de bajo costo, se estima que el periodo de retorno de la inversión (Payback) se encuentra entre cuatro y cinco años, dependiendo de las condiciones específicas del predio y la frecuencia de riego.

El análisis costo-beneficio demuestra que, a pesar de la inversión inicial en el desarrollo y la implementación tecnológica, el sistema presenta una rentabilidad positiva a mediano plazo, respaldada por la reducción sostenida de costos operativos y el incremento de la eficiencia productiva. En consecuencia, el proyecto puede considerarse económicamente viable y técnicamente justificado, contribuyendo a una gestión agrícola más rentable y competitiva.

Tabla 3-8 Resumen de inversión, ahorro y retorno estimado del sistema automatizado de riego

Concepto	Descripción	Valor estimado [UF]	Observaciones
Inversión inicial total	Incluye desarrollo de ingeniería, prototipo, materiales e instalación en terreno	105 UF	65 UF en materiales y 40 UF en mano de obra
Costo anual de mantenimiento	Incluye mantenimiento preventivo y correctivo menor	2 UF/año	Aproximadamente un 2% del valor total
Ahorro anual por optimización hídrica	Reducción del consumo de agua entre 30% y 40%	12 UF/año	Basado en consumo promedio por superficie de riego
Ahorro anual por eficiencia energética	Uso de energía solar y control automatizado de bomba	5 UF/año	En comparación con un sistema convencional
Ahorro anual por reducción de mano de obra	Disminución de tareas manuales de control y supervisión	8 UF/año	Corresponde a un operario parcial
Ahorro total anual estimado	Suma de ahorros operativos	25 UF/año	Ahorro proyectado a partir del segundo año
Periodo estimado de retorno (payback)	Tiempo para recuperar la inversión inicial mediante los ahorros generados	4,2 años	$105 \text{ UF} / 25 \text{ UF} \approx 4,2 \text{ años}$
Vida útil estimada del sistema	Duración de componentes principales	≥ 5 años	Requiere mantenimiento preventivo anual

Fuente: Elaboración propia en base a retorno estimado de la inversión.

3.5 EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA Y AMBIENTAL

La sostenibilidad del proyecto no solo se evalúa desde el punto de vista financiero, sino también desde su impacto ambiental y su capacidad para mantener un funcionamiento eficiente en el tiempo. El sistema propuesto favorece una gestión responsable de los recursos naturales mediante la implementación de tecnologías que promueven el ahorro hídrico y energético.

El control automatizado del riego, basado en la lectura continua de los sensores de humedad del suelo, permite aplicar únicamente el volumen de agua necesario para mantener las condiciones óptimas del cultivo. Esta funcionalidad puede generar una reducción del consumo de agua entre un 30% y un 40%, dependiendo del tipo de suelo y del régimen climático, contribuyendo directamente a la conservación del recurso en zonas afectadas por escasez hídrica, como la Región de Valparaíso.

Desde el punto de vista energético, el uso de energía solar fotovoltaica como fuente principal de alimentación garantiza un sistema autónomo, con baja dependencia de la red eléctrica y sin emisiones de carbono durante su operación. Además, la vida útil de los módulos fotovoltaicos, superior a los 15 años, asegura la continuidad del sistema con un mantenimiento mínimo.

En términos económicos, el bajo costo de mantenimiento preventivo y la posibilidad de escalar el sistema mediante la incorporación de nuevos sensores o actuadores refuerzan su sostenibilidad a largo plazo. De esta manera, el proyecto integra los tres pilares de la sostenibilidad; económico, ambiental y técnico, consolidándose como una solución viable, eficiente y alineada con las exigencias de una agricultura moderna y responsable con el entorno.

CONCLUSIONES

El presente proyecto abordó de manera integral la problemática asociada a la ineficiencia del sistema de riego tradicional empleado en una parcela destinada al cultivo de paltos en la comuna de Quillota. El sistema previo, basado en un control manual efectuado directamente por los trabajadores, presentaba importantes limitaciones operativas, entre las que destacaban el uso ineficiente del recurso hídrico, la elevada demanda de mano de obra, la dependencia constante del operador y la falta de precisión en el control del riego, factores que repercutían negativamente en la productividad y sostenibilidad del cultivo.

Frente a esta situación, se estableció como objetivo principal optimizar el proceso de riego mediante el desarrollo e implementación de un sistema automatizado con capacidad de monitoreo remoto. La solución propuesta integró tecnologías de automatización y comunicación inalámbrica, diseñando un prototipo compuesto por sensores de humedad de suelo, sensores de nivel de agua, electroválvulas y una bomba, todos interconectados mediante una red Zigbee y gestionados desde una unidad central basada en una Raspberry Pi. Esta arquitectura permitió disponer de un sistema inteligente, capaz de supervisar en tiempo real las condiciones del entorno y ejecutar acciones automáticas orientadas al uso racional del agua, reduciendo significativamente la intervención humana y mejorando la eficiencia energética del proceso.

El desarrollo del sistema consideró rigurosamente los aspectos técnicos necesarios para garantizar su fiabilidad en entornos agrícolas, seleccionando componentes con prestaciones adecuadas y asegurando una instalación adaptable a las condiciones topográficas del terreno. El prototipo implementado demostró la viabilidad técnica y funcional del diseño, validando su desempeño en condiciones reales de operación.

Desde la perspectiva económica, la inversión inicial se justifica ampliamente por los beneficios que el sistema ofrece en términos de ahorro de agua, disminución de costos operativos y aumento de la productividad. Además, el análisis comparativo con otras alternativas tecnológicas, como la implementación mediante PLC, evidenció que la solución con Raspberry Pi presenta una mejor relación costo-beneficio, mayor flexibilidad de programación y posibilidades de expansión hacia plataformas IoT.

En síntesis, el proyecto constituye una propuesta innovadora, eficiente y sostenible, que responde a las necesidades actuales del sector agrícola frente a la escasez hídrica y la demanda de modernización tecnológica. Su implementación contribuye a una gestión más inteligente del riego, promoviendo el desarrollo de una agricultura de precisión orientada a la optimización de los recursos y al fortalecimiento de la productividad sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

Electronic Wing

<https://www.electronicwings.com/sensors-modules/xbee-module>

[visitado: Enero 2025]

Digi

<https://es.digi.com/blog/post/2017/xctu-next-generation-configuration-platform-for-xb>

[visitado: Enero 2025]

Python

<https://www.python.org>

[visitado: Diciembre 2024]

XBPLIB (Librería Xbee Python)

https://xbplib.readthedocs.io/en/stable/getting_started_with_xbee_python_library.html.

[visitado: Enero 2025]

Sensa cultivo

<https://sensacultivo.es/2022/06/06/sondas-de-humedad-en-suelo-tipos-y-caracteristicas-principales/>

[visitado: Febrero 2025]

Meter group (Sensores de humedad)

<https://metergroup.com/es/measurement-insights/soil-moisture-sensors-how-they-work-why-some-are-not-research-grade/>

[visitado: Julio 2025]

Alpha-omega (Cotización sondas Aquacheck)

https://www.alphaomega-electronics.com/es/humedad-del-suelo/5419-sensor-sdi-12-para-humedad-y-temperatura-del-suelo-portatil-aquacheck-aqc11.html#/opcion_sensores-aqc11_sdi_12_2_sensors_200mm

[visitado: Julio 2025]

El Cultivo del Palto.

Lemus S., Gamalier; Ferreyra E., Raúl; Gil M., Pilar; Sepúlveda R., Paulina; Maldonado B., Patricio; Toledo G., Carlos; Barrera M., Cristián, Celedón de A., José Miguel.

Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile.

Boletín INIA Nº 129. 80 pp.

[visitado: Agosto 2025]