

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

PROTOTIPO DE SOLUCIÓN PARA MONITOREO REMOTO DE PLC LOGO CON TECNOLOGÍA LORA
PARA ZONAS SIN CONECTIVIDAD A INTERNET

Trabajo de Titulación para optar al título
profesional de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Alan Gamalier Vergara Muñoz

Profesor Guía:

Mag. Víctor Cardenas Schweiger

2026



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: PROTOTIPO DE SOLUCIÓN PARA MONITOREO REMOTO DE PLC LOGO CON TECNOLOGÍA LORA PARA ZONAS SIN CONECTIVIDAD A INTERNET

Nombre del candidato(a): ALAN GAMALIER VERGARA MUÑOZ

Carrera / Grado: Ingeniero de Ejecución en CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Campus: VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA **Departamento:**

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Cárdenas Schweiger, 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: 05/04/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05/04/2026

Firma: 

RESUMEN

KEYWORDS: LORA, TELEMETRÍA, MONITOREO, TRANSMISIÓN.

Este trabajo de título tiene como objetivo principal diseñar e implementar un prototipo de sistema de telemetría con tecnología LORA que actúe para resolver una limitación de conectividad, específicamente se utilizará para monitorear y manejar a distancia un sistema controlado por un PLC LOGO, con la ausencia de una infraestructura de telecomunicación viable (sin acceso a internet o redes cableadas). Este problema se da en un contexto del sector rural, específicamente en una pequeña empresa productora de paltas, que cuenta con un terreno aproximadamente de 1 hectárea donde la caseta de monitoreo se encuentra en un extremo del terreno y el sector de control del regadío se encuentra en el otro extremo, esta condición impide el monitoreo en tiempo real de variables cruciales como el estado actual de las bombas, el flujo de agua y las lecturas de sensores de humedad del suelo, etc. Para lograr el objetivo propuesto, el prototipo contará con la integración de tres componentes principales: un PLC Siemens LOGO, una tarjeta de desarrollo con microcontrolador STM32 y un módulo de comunicación de radiofrecuencia LoRa. La estrategia de diseño se enfoca en establecer un enlace de comunicación robusto, de bajo consumo energético y que no dependa de redes externas.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: PROBLEMAS Y OBJETIVOS	2
1 PROBLEMAS Y OBJETIVOS	3
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	3
1.2 PROBLEMÁTICA	4
1.2.1 Descripción del problema	5
1.2.2 Importancia de resolverlo	5
1.2.3 Involucrados	6
1.3 PROPUESTAS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA	7
1.4 REQUERIMIENTOS	7
1.5 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	9
1.5.1 Alternativa N°1: “Continuar con el Monitoreo Manual y Reactivo”	9
1.5.2 Alternativa N°2: “Instalación de Enlace Cableado (Fibra Óptica/Cobre) de Larga Distancia”	10
1.5.3 Alternativa N°3: “Implementación de Telemetría Inalámbrica con Tecnología LoRa” ...	10
1.6 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	11
1.6.1 Alternativa seleccionada	12
1.7 SOFTWARES A UTILIZAR	13
1.7.1 STM32IDE	13
1.7.2 LOGO! Soft Comfort V8.3	13
1.8 OBJETIVOS.....	13
1.8.1 Objetivo general	14
1.8.2 Objetivos específicos.....	14
CAPÍTULO 2: DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPO	15
2 DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO.....	16

2.1	ARQUITECTURA GENERAL DE LA SOLUCIÓN	16
2.2	FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE TRANSMISIÓN APLICADA (LORA).....	17
2.2.1	Principios de la modulación LoRa (Long Range)	17
2.2.2	Parámetros clave de configuración	19
2.3	SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.....	21
2.4	DISEÑO DE LA INTERFAZ DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL (PLC - TRANSCEPTOR)	22
2.4.1	Capa física y de enlace (hardware).....	23
2.4.2	Protocolo Modbus TCP/IP	24
2.4.3	Configuraciones necesarias para comunicación	25
2.5	DESARROLLO DE FIRMWARE DEL TRANSCEPTOR (TRANSMISOR Y RECEPTOR) PARA PROTOTIPO	26
2.6	INTEGRACIÓN DEL PROTOTIPO.....	27
CAPITULO 3:	PUESTA EN MARCHA Y RESULTADOS.....	30
3	PUESTA EN MARCHA Y RESULTADOS.....	31
3.1	PRIMERA ETAPA (OBTENCIÓN DE DATOS DE PLC)	31
3.2	SEGUNDA ETAPA (ENLACE INALÁMBRICO).....	33
3.3	TERCERA ETAPA (VISUALIZACIÓN DE DATOS EN COMPUTADOR).....	35
3.4	CUARTA ETAPA (PRUEBA PROTOTIPO COMPLETO)	37
3.5	CONSUMO.....	38
3.6	ESCALABILIDAD.....	38
3.6.1	Evolución hasta una red LoRaWAN	38
3.7	COSTOS	39
CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1.-Diagrama funcional del proyecto.	16
Figura 2-2.- Ejemplo de modulación.....	18
Figura 2-3.- Otra vista del ejemplo de modulación.	18
Figura 2-4.- Diagrama de conexión.....	23
Figura 2-5.- Direcciones Modbus PLC.	24
Figura 2-6.- Configuración servidor Modbus.	25
Figura 2-7.- Diagrama de funcionamiento general de prototipo.....	26
Figura 2-8.- Diagrama de flujo firmware.....	27
Figura 2-9.- PLC logo a utilizar.	28
Figura 2-10.- Prototipo de tarjeta transceptora.	28
Figura 2-11.- Conexión tarjeta transceptora - PLC.....	29
Figura 2-12.- Conexión tarjeta transceptora - PC.	29
Figura 3-1.- Configuración de red PLC.	31
Figura 3-2.- Configuración de red tarjeta transceptora 1.	32
Figura 3-3.- Dirección Modbus de puerto análogo.....	32
Figura 3-4.- Respuesta de PLC.....	33
Figura 3-5.- Firmware modulación LoRa.....	33
Figura 3-6.- Vista desde altura terreno de empresa.....	34
Figura 3-7.- Parámetro RSSI de mensajes recibidos.	35
Figura 3-8.- Configuración IP computador.	36
Figura 3-9.- comunicación TCP/IP computador - tarjeta.	36
Figura 3-10.- comunicación sistema completo.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.- Requerimientos del proyecto.....	7
Tabla 1-2.-Escala de calificación de alternativas.....	11
Tabla 1-3.-Evaluación de criterios.....	12
Tabla 2-1.- Configuración modulación LoRa.....	21
Tabla 3-1.- Consumo tarjetas transceptoras.....	38
Tabla 3-2.- Costo materiales.....	39
Tabla 3-3.- Costo HH de proyecto.....	40

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

A. SIGLA

AI	:	Analog Input (Entrada analógica)
AM	:	Analog Memory (Marca analógica)
AQ	:	Analog Output (Salida analógica)
BW	:	Bandwidth (Ancho de banda)
CR	:	Coding Rate (Tasa de codificación)
CSS	:	Chirp Spread Spectrum (Espectro ensanchado por chirp)
DB	:	Data Block (Bloque de datos)
DI	:	Digital Input (Entrada digital)
DNS	:	Domain Name System (Sistema de nombres de dominio)
HMI	:	Human-Machine Interface (Interfaz Humano-Máquina)
IDE	:	Integrated Development Environment (Entorno de desarrollo integrado)
IIoT	:	Industrial Internet of Things (Internet industrial de las cosas)
IoT	:	Internet of Things (Internet de las cosas)
IP	:	Internet Protocol (Protocolo de internet)
LAD	:	Ladder (Escalera)
LoRa	:	Long Range (Largo alcance)
M	:	Memory Flag (Marca o Memoria interna del PLC)
MAC	:	Media Access Control (Control de acceso al medio)
PLC	:	Programmable Logic Controller (Controlador lógico programable)
Q	:	Output (Salida digital o Bobina)
RF	:	Radio Frequency (Radiofrecuencia)

RSSI	:	Received Signal Strength Indicator (Indicador de fuerza de señal recibida)
SF	:	Spreading Factor (Factor de ensanchamiento)
SPI	:	Serial Peripheral Interface (Interfaz periférica serial)
TCP	:	Transmission Control Protocol (Protocolo de control de transmisión)

B. SIMBOLOGÍA

A	:	Amperios
dBm	:	Decibelio-milivatio (Unidad de potencia de señal)
kHz	:	Kilohertz (Unidad de frecuencia)
m	:	metros
MHz	:	Megahertz (Unidad de frecuencia)
mm	:	Milímetros
V	:	Voltios
C°	:	Grados Celsius

INTRODUCCIÓN

La Industria y el Internet de las Cosas Industrial (IIoT) están cambiando los paradigmas de fabricación y gestión hoy en día, lo que ocasiona una necesidad de sistemas de control y de monitorización en tiempo real. La capacidad de extraer información operativa de equipamiento crítico, como los Controladores Lógicos Programables (PLC), sensores, entre otros, es fundamental para la optimización del sistema de control, la gestión de costes energéticos o la mejora de la productividad. Esto también se siente en el sector agrícola, donde la automatización del riego se ha convertido en un requerimiento para lograr un aprovechamiento sostenible del agua sobre todo en sectores de escasez hídrica, sin embargo, a pesar de los avances de las tecnologías, estos sistemas no pueden beneficiarse de su integración en áreas agrícolas rurales o remotas, debido a la escasez de redes de telecomunicaciones, tales como redes de fibra óptica o una cobertura de banda ancha, o en caso de que, si existan opciones, estas son de un alto costo. La implementación de soluciones como puede ser internet satelital representa una inversión excesiva para la mayoría de pequeñas empresas y agricultores, lo que representa la aparición de una brecha tecnológica y económica que frena la adopción de prácticas más eficientes de gestión. Con este motivo, el proyecto de titulación que se presentará se fundamenta en el uso de tecnologías de conectividad inalámbrica de largo alcance (LoRa) como alternativa económica que permita superar el obstáculo señalado. De este modo, se espera demostrar que la posibilidad de establecer un enlace de comunicación robusto y con un consumo bajo y sin dependencia de la infraestructura convencional es factible.

CAPÍTULO 1: PROBLEMAS Y OBJETIVOS

1 PROBLEMAS Y OBJETIVOS

En el presente capítulo, se describen los problemas que enfrenta una pequeña empresa productora de paltas en el contexto del sector rural, las que limitaban la eficiencia de su sistema de riego, disminuyendo su rendimiento en los procesos productivos. Estas deficiencias del sistema operacional, que giran especialmente en torno a la carencia del monitoreo minuto a minuto de sus variables, acaban traduciéndolas en potenciales pérdidas de dinero por la ineficiencia en el uso del agua, desbordes en la detección de fallos de sus equipos (bombas y válvulas) o en la generación de toma de decisiones reactiva.

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

En el ámbito agrícola, principalmente en lo que se refiere al cultivo de paltas, se caracteriza por la alta exigencia de recursos, así como la necesidad de estar muy atento a la gestión del riego, dado que es la única forma de que la cosecha puede ser de la calidad y con el rendimiento requerido al final del ciclo de cultivo. La tendencia que se presenta desde hace unos años en el mundo es la llegada de la Agricultura de Precisión y la disponibilidad de lo que se conoce como Internet Industrial de las Cosas (IIoT), donde los sistemas de Control Automático pueden ayudar a facilitar la gestión del consumo de agua y energía.

En este sentido, la automatización del riego con Controladores Lógicos Programables ha llegado a ser un estándar, los sistemas que los implementan permiten llevar a cabo la gestión en modo local y la programación de las secuencias de bombas, válvulas de apertura y de la lectura de los sensores de campo (humedad, caudal, etc). Una de las características claves es el trabajo con los datos históricos del sistema, permitiendo generar análisis anuales o de ciertos periodos de tiempos, generando una retroalimentación al propio sistema para mejorar procesos, optimizar recursos entre otras cosas. La empresa en la que se abordará el problema es una pequeña productora de paltas, que posee un terreno de una hectárea aproximadamente, al ser una pequeña empresa, la buena gestión de recursos es crítica, por lo que han optado por la

automatización de sus procesos de regadíos, sin embargo, se han presentado una serie de problemas que se abordarán en los siguientes puntos dentro del capítulo.

1.2 PROBLEMÁTICA

Una pequeña empresa familiar que produce paltas, si bien es operante en un sector tradicional, se enfrenta a retos de gestión y de eficiencia que le restan rendimiento de sus operaciones o de los recursos utilizados. Para competir en un entorno marcado por la exigencia de incrementar la calidad y la sostenibilidad, la correcta gestión del recurso hídrico es básico. El sistema de riego de la plantación se encuentra automatizado con un Controlador Lógico Programable (PLC Siemens LOGO), que, en el espacio local hace accionar las bombas, abre las válvulas y lee los sensores (humedad, flujo, etc.). A pesar de contar con esta tecnología de automatización, la empresa presenta problemáticas relevantes debido una crítica desconexión de la información:

- Barrera Geográfica y de Infraestructura: La caseta donde se controla el riego y la casa donde se gestiona todo el proceso se encuentran separadas por considerable distancia (aproximadamente 500 m) y dentro del mismo predio rural. Esa ubicación no tiene acceso a redes de Internet de banda ancha.
- Monitoreo Reactivo y Eficiencia: La falta de un enlace de comunicación entre el PLC y la casa de control hace que el personal deba ir a inspeccionar manualmente, de forma periódica, las bombas, el nivel de humedad y el propio sistema (bombas, etc.). Este proceso genera retrasos en la detección de problemas (avería de bombas, fugas, etc.) que se traduce en pérdidas de producción, sobreconsumo de agua y energía.
- Escasa Disponibilidad de Datos para la Toma de Decisiones: El personal de gestión no cuenta con datos en tiempo real, ni para generar un histórico del comportamiento del sistema, para variables críticas del suelo y el caudal, esto dificulta realizar ajustes previsores y en tiempo real de la estrategia de riego, limitando la capacidad que la empresa

tiene para optimizar sus insumos y cumplir con los altos estándares de calidad que exige el mercado. La necesidad de disponer de una solución tecnológica que mitigue esta brecha de conectividad es necesaria para que la empresa continúe funcionando de una forma eficiente y sostenible.

1.2.1 Descripción del problema

A pesar de contar con la automatización básica provista por el PLC Siemens LOGO y los sensores de campo, la pequeña empresa productora de paltas aún no cuenta con un sistema efectivo que permita aprovechar esta tecnología para una gestión verdaderamente inteligente del riego. El sistema actual se limita a ejecutar secuencias preprogramadas de forma local, mientras que la información generada (estado operacional de las bombas, caudal instantáneo y lecturas de humedad del suelo) permanece confinada en la caseta de riego. La ausencia de un enlace de comunicación viable impide transformar estos datos locales en conocimiento operativo remoto.

1.2.2 Importancia de resolverlo

Superar la interrupción de comunicación existente entre el PLC y la sala de control proporcionará una mejor disponibilidad del sistema de riego para los períodos de producción, acortando los costosos tiempos perdidos de inactividad por mantenimientos correctivos, estos mantenimientos, que hoy en día son imprevisibles y frecuentemente más severos debido a una detección tardía, podrán ser programados y anticipados con la misma claridad de la intervención a realizar. El monitoreo de forma remota del estado operativo de las bombas, el caudal de agua y el nivel de presión, permitirá que, de producirse anomalías incipientes, el personal del mantenimiento sea capaz de anticipar los trabajos a realizar, para conseguir el menor impacto en la producción y, además, tener la ocasión de preparar previamente los materiales necesarios y realizar los pedidos de reposición de repuestos en caso de no contar con ellos.

Por otro lado, la capacidad de obtener lecturas de sensores de humedad y caudal en tiempo real impactará positivamente en la reducción del consumo hídrico y energético. Esto

permitirá optimizar los ciclos de riego, asegurando que el agua se aplique solo cuando sea estrictamente necesario y en la cantidad precisa, en lugar de operar bajo programas estáticos y potencialmente ineficientes. Eliminar el riego ineficiente y garantizar el aporte hídrico óptimo en todo momento es crucial para la calidad del fruto y el rendimiento total del cultivo. Todos estos beneficios como la reducción de los costos económicos asociados a las pérdidas por agua, el sobreconsumo de energía, las averías inesperadas y los tiempos de inactividad prolongados que brindarán a la empresa la posibilidad de redirigir esos recursos hacia los nuevos proyectos o proyectos que deseen hacer crecer o expansión de su tecnología.

1.2.3 Involucrados

Aunque el problema por falta de conectividad tiene un impacto en la rentabilidad y sostenibilidad del predio, también existen roles concretos dentro de la pequeña empresa que tienen un grado concreto de implicación e interés en la solución del problema. La interacción entre estos entes resulta determinante para asegurar que la solución que se proponga tenga no solo un valor tecnológico robusto, sino que también sea viable desde el punto de vista práctico y económico en el ámbito rural.

A continuación, se especifican los entes concretos que participan en el desarrollo y validación del prototipo:

- Dueño/Gerente Agrícola: Principal sujeto beneficiario y cliente final del proyecto. Es la persona responsable de validar en qué medida existe una necesidad real del monitoreo remoto, definir las variables críticas que haya que supervisar (estado de bombas, niveles de caudal y humedad), así como de evaluar, en concreto, el impacto económico y productivo de la solución. Su papel hace que el proyecto se ajuste a los objetivos de eficiencia hídrica y de incremento de la calidad de la palta.
- Técnico de Campo / Operador de Riego: Es el dueño de la operación diaria del sistema de riego y el usuario directo de la información. Será el encargado de retroalimentar al desarrollador con detalles sobre la configuración del PLC LOGO, la secuencia de riego

actual, las anomalías más frecuentes de los equipos (bombas y válvulas) y el registro de tiempos de detención. Su retroalimentación es vital para validar la usabilidad y la pertinencia de la data que el sistema de telemetría transmitirá.

1.3 PROPUESTAS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA

Con el fin de poder superar las dificultades de la desconexión de los datos y del monitoreo reactivo que limitan la buena administración del riego, se pretende llevar a cabo en el presente proyecto de titulación una solución factible y de costo accesible a la pequeña empresa, aprovechando la automatización que ya existe y los datos que cada instante genera el sistema de riego disponible, para que pueda establecer un canal de comunicación para la obtención de datos en tiempo real.

1.4 REQUERIMIENTOS

Independientemente de cuál sea la propuesta tecnológica que se plantee para la solución de la problemática de la desconexión de datos en el sistema de riego, la solución tiene que cumplir un conjunto de requisitos mínimos, que tengan que ver con la viabilidad económica, robustez operativa y adecuación técnica de la solución en la empresa y del entorno rural.

Los requisitos, son los que se ven en la tabla 1-1 a continuación:

Tabla 1-1.- Requerimientos del proyecto.

N°	Requerimiento	Descripción
1	Adquisición de Datos del PLC	El sistema debe ser capaz de extraer variables de estado y de proceso (estado de las bombas, caudal, presión, lecturas de sensores de humedad) directamente desde el PLC Siemens LOGO!.

2	Comunicación a Larga Distancia	El sistema debe ser capaz de establecer un enlace de comunicación entre la caseta de riego y la casa de control, salvando la distancia aproximada de 500m en campo abierto/rural.
3	Monitoreo en Tiempo Real	Los datos críticos del PLC deben ser actualizados y visualizados en la casa de control con una latencia mínima que permita la toma de decisiones oportuna.
4	Viabilidad Económica (Bajo Costo)	La solución no debe implicar una inversión de capital comparable a la instalación de infraestructura de cableado tradicional (fibra/cobre) o licencias de software de alto costo, siendo accesible para una pequeña empresa.
5	Robustez Industrial	El hardware implementado en la caseta de riego debe ser capaz de operar de manera fiable en un entorno industrial/agrícola, tolerando variaciones de temperatura y humedad.
6	Independencia de Internet	La solución no debe depender de la infraestructura de Internet de banda ancha ni de la cobertura celular (3G/4G), la cual es inexistente o inestable en la zona.
7	Bajo Consumo de Energía	El nodo remoto debe estar diseñado para ser energéticamente eficiente, facilitando su eventual autonomía o su mínima demanda energética en la caseta de riego.

8	Escalabilidad	La arquitectura de la solución debe permitir, en el futuro, la fácil incorporación de nuevos sensores o la expansión a otras zonas de la plantación.
---	---------------	--

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

1.5 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Con el objetivo de resolver el problema, se han propuesto tres posibles alternativas. Es necesario someter estas opciones a una evaluación detallada que considere su viabilidad tanto técnica como financiera. Este proceso de análisis crítico es esencial para determinar y elegir la solución que mejor se ajuste a los requerimientos del proyecto.

1.5.1 Alternativa N°1: “Continuar con el Monitoreo Manual y Reactivo”

Esta opción implica la continuación del sistema actual, en otras palabras, mantener la forma en que opera actualmente en la pequeña empresa. Consiste en hacer funcionar el sistema de riego no implementando ninguna solución de telemetría o adquisición de datos remota.

La gestión se realiza a través de intervenciones humanas directas en la caseta de riego. El operador debe dirigirse periódicamente a los 500m hasta donde se encuentren el PLC Siemens LOGO para comprobar visualmente el estado del equipo, la lectura de las salidas del PLC, el estado de las bombas y, en el caso de estar instalados, los valores de los sensores de humedad o flujo. En este esquema, el sistema de riego sigue ejecutando de forma autónoma y local las secuencias programadas. La toma de decisiones (aumentar un ciclo de riego, detectar una anomalía) depende estrictamente de la frecuencia de las inspecciones y de la capacidad del operador para detectar anomalías en el lugar. La información generada por el PLC y la instrumentación está aislada, y cualquier ajuste o solución de fallas se realiza en forma reactiva, es decir, cuando el evento ya ha ocurrido (una avería, una fuga, un riego insuficiente).

1.5.2 Alternativa N°2: “Instalación de Enlace Cableado (Fibra Óptica/Cobre) de Larga Distancia”

Esta alternativa implica salir de la limitación de distancia y de transferencia de datos mediante la instalación de una infraestructura física de red. La propuesta concreta sería tirar una línea de comunicación física entre la caseta de riego y la casa de control, utilizando medios de transmisión de muy alta fiabilidad como el cable de par trenzado de categoría industrial (Cobre) o fibra óptica, dependiendo de la elección del ancho de banda requerido y de la inmunidad al ruido eléctrico del local. La puesta en marcha de esta alternativa supondría realizar un trabajo destacable, que incluso podría pasar por la canalización (enterrada o aérea) a lo largo de los 500m entre ambos puntos para proteger el cableado de la maquinaria agrícola, la intemperie y los animales, una vez finalizada, este enlace permitiría un uso puro del protocolo Modbus TCP/IP mediante red Ethernet permitiendo el módulo de comunicación del PLC conectarse directamente con equipo de supervisión o HMI en la casa de control. Esta alternativa permitiría una conexión rápida con latencia muy baja, habilitando no solo la telemetría del PLC, sino que posteriormente permitiría la posibilidad de videovigilancia o tráfico de datos más exigente.

1.5.3 Alternativa N°3: “Implementación de Telemetría Inalámbrica con Tecnología LoRa”

La presente alternativa se basa en la elección de una solución de conectividad inalámbrica adaptada para el ámbito rural, caracterizada por su capacidad para la transmisión de datos a larga distancia y el consumo energético y los costes de infraestructura más reducidos. La opción consiste en la utilización de la tecnología LoRa (Long Range), haciendo uso de transceptores de radio de bajo costo, como los módulos de la serie SX127x (SX1278), los cuales, a través de la transmisión de pequeñas cargas de datos consiguen cubrir grandes distancias (varios kilómetros en campo abierto), superando, con eficiencia, la distancia de unos 500 metros existente entre la caseta de riego y la casa de control, sin recurrir a repetidores complejos ni a cable físico. La solución requiere llevar a cabo el desarrollo de un transmisor de radio frecuencia en la propia caseta de riego, sustentada en un microcontrolador, el cual tendrá como funciones establecer la comunicación cableada local con el PLC (de acuerdo con el protocolo Modbus TCP/IP), adquirir

datos críticos del PLC, transmitir inalámbricamente esta información mediante el módulo SX127x a su estación base receptora, la cual estará situada en la caseta de control, es decir, se trata de una red de comunicaciones que es totalmente independiente de Internet y de la red celular.

1.6 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Las soluciones propuestas van a estar sometidas a un análisis comparativo articulado en base a unos criterios de interés y que van a permitir determinar la viabilidad de su aplicación. Para el análisis comparativo se utilizará una escala de calificación que va de 1 a 5, donde el 1 corresponde a un valor de muy deficiente y el 5 corresponde a un valor de óptimo, tal y como se explica en la Tabla 1-2 (Escala de calificaciones), la puntuación total de cada alternativa se va a obtener a partir de la suma de las calificaciones individuales por criterio, siendo el resultado de la suma previa el ítem decisivo para determinar la alternativa que va a resultar más adecuada ante la situación-objetivo de los problemas planteados.

Tabla 1-2.-Escala de calificación de alternativas.

Muy deficiente	Deficiente	Aceptable	Bueno	Óptimo
1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración propia en base a escala de evaluación.

La decisión se basará en cinco criterios fundamentales, la primera es la Innovación, ya que se traducirá en un índice que ponderará cuántas ideas y tecnologías nuevas se han aportado. El segundo criterio es el índice Relación Costo-Beneficio, que servirá para medir cuál es el beneficio obtenido a partir de la inversión inicial. A partir de aquí, se aporta el criterio de Factibilidad Técnica, que explicará hasta qué punto es complicado desarrollar la acción e implementarla, el cuarto criterio es el tiempo de Implementación, donde a menor tiempo se le da mayor puntuación. Finalmente, se evaluará la Escalabilidad de cada alternativa, ya que se tendrá en cuenta su posibilidad de crecimiento o su versatilidad en otras áreas de la empresa. La Tabla 1-3

mostrará la evaluación multicriterio explicada, así como la puntuación que servirá para decidirse por la solución más adecuada.

Tabla 1-3.-Evaluación de criterios.

Criterio Alternativas	innovación	inversión/ Ganancia	Factibilidad técnica	Plazo de aplicación	Escalabilidad	Puntuación Final
Alternativa 1	1	5	5	5	1	17
Alternativa 2	3	3	4	2	3	15
Alternativa 3	5	4	4	4	5	22

Fuente: Elaboración propia basada en comparación de alternativas.

1.6.1 Alternativa seleccionada

De acuerdo con la puntuación final obtenida a partir de la evaluación de criterios (Tabla 1-3), la alternativa que mejor se ajusta a los requerimientos para resolver el problema de la desconexión de datos en la plantación de paltas es la Alternativa N° 3: Implementación de telemetría inalámbrica con tecnología LoRa. Dicha alternativa es la única que propone mayores niveles de innovación con respecto a las otras alternativas, aunque lo cierto es que la tecnología LoRa no es una técnica completamente nueva a nivel mundial, su implantación para la telemetría industrial de PLCs en el contexto de las pequeñas empresas agrícolas y en zonas rurales donde existen fuertes limitaciones de infraestructura de comunicación aún no es suficientemente utilizada en el país. La alternativa N° 3 es técnicamente factible de realizar, dando mayor protagonismo al microcontrolador STM32, que se puede combinar con un PLC Siemens LOGO y módulos SX127x. Tiene una alta escalabilidad para ser aplicada en distintas zonas de la plantación o para la inclusión de nuevos sensores en un futuro próximo, también la decisión va por las mejoras y beneficios operativos y económicos que se pueden obtener (por ejemplo, ahorro de agua, de energía, disminución de costes por mantenimiento correctivo).

1.7 SOFTWARES A UTILIZAR

En esta sección se presentan los softwares que se utilizarán para el desarrollo de la solución, tanto como programación, recolección de base de datos, etc.

1.7.1 STM32IDE

STM32CubeIDE es un entorno de desarrollo integrado (IDE), que ha sido desarrollado por STMicroelectronics para programar la extensa familia de microcontroladores STM32 en la que se añaden las funcionalidades del desarrollo de firmware, la depuración y la configuración de los proyectos llevado todo en una única herramienta, convirtiéndose así en un elemento básico para desarrolladores en el campo de los sistemas embebidos.

1.7.2 LOGO! Soft Comfort V8.3

LOGO! Soft Comfort constituye el entorno de programación y simulación que ha desarrollado Siemens, para su gama de relés inteligentes LOGO. Este software destaca por su sencillez y comodidad de uso, lo que lo hace ideal para ingenieros que tienen que aplicar soluciones de control en pequeñas y medianas aplicaciones, así como para principiantes en automatización, de hecho, su interfaz gráfica es intuitiva para la programación, aplicando lenguajes estándar de la industria.

1.8 OBJETIVOS

En esta sección se van a describir los objetivos generales y específicos que se deben alcanzar durante la redacción del presente proyecto, a fin de ser capaz de verificar la viabilidad y pertinencia de implantar una solución telemétrica inalámbrica a partir de tecnología LoRa, para el control remoto de los sistemas de control industrial.

1.8.1 Objetivo general

El objetivo general es diseñar e implementar un prototipo de sistema de telemetría con tecnología LoRa que permita validar la solución escogida anteriormente.

1.8.2 Objetivos específicos

Para cumplir la meta impuesta en el objetivo general, se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Configuración de Comunicación PLC: Configurar el PLC Siemens LOGO como servidor para exponer sus datos mediante el protocolo Modbus TCP/IP.
- Desarrollo Modbus Cliente: Desarrollar el firmware de un equipo basado en un microcontrolador STM32 y un módulo Ethernet W5500, que funcione como Cliente Modbus TCP/IP para adquirir la data del PLC.
- Desarrollo de Estación Base: Desarrollar la estación base receptora LoRa.
- Implementación de Enlace Inalámbrico LoRa: Implementar el enlace de comunicación inalámbrica de largo alcance utilizando módulos SX127x (LoRa).
- Validación del Prototipo: Realizar prueba para validar el alcance (medición de RSSI) y consumo de la comunicación del prototipo.

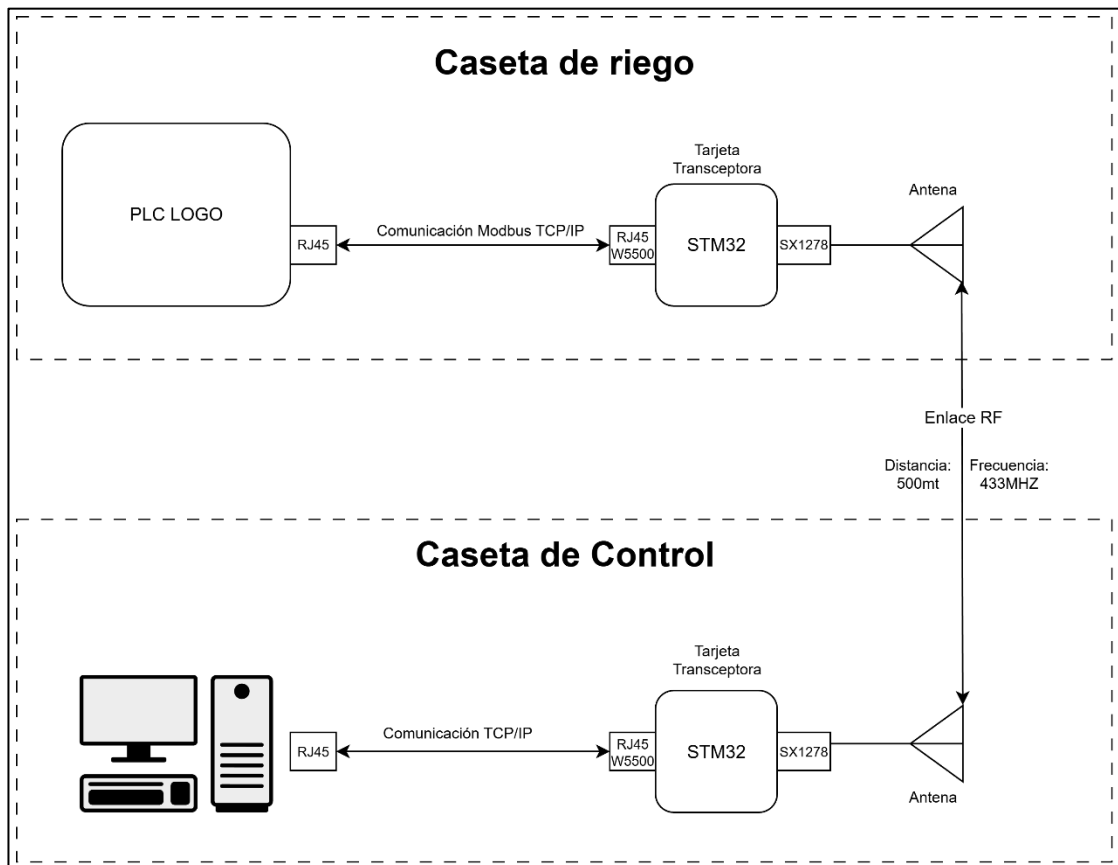
CAPÍTULO 2: DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPO

2 DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Una vez ya hecha la elección de la solución entre todas las opciones que se barajaron, se procede a desarrollar un prototipo para validar la opción elegida, que en este caso es “Implementación de Telemetría Inalámbrica con Tecnología LoRa”, se describirá cada parte de la solución, el por qué se escoge el tipo de hardware a utilizar, las configuraciones necesarias para llevar a cabo el prototipo, etc.

2.1 ARQUITECTURA GENERAL DE LA SOLUCIÓN

En la figura 2-1 se presenta el diagrama funcional del proyecto.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 2-1.-Diagrama funcional del proyecto.

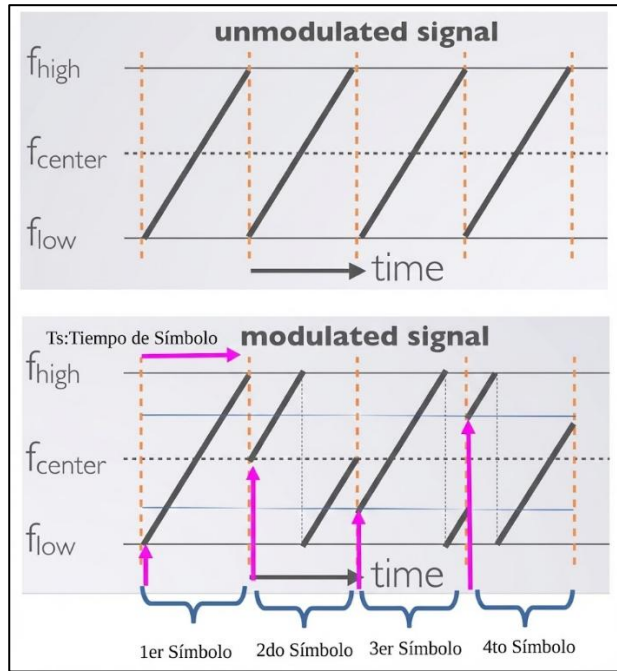
Como se puede observar en el diagrama de la figura 2-1 se contará con 2 tarjetas transceptoras de datos, una que se ubicará en la caseta de riego, la cual se comunicará a través de protocolo Modbus TCP/IP con el PLC LOGO de la marca Siemens, y la otra tarjeta se ubicará en la caseta de control, la que se comunicará con un computador a través de comunicación TCP/IP, estas tarjetas transceptoras cuentan con un microcontrolador Stm32 que es el encargado de controlar los periféricos necesarios para lograr las comunicaciones, entre los periféricos a controlar por el microcontrolador se encuentra el módulo SX1278, que será el encargado de transmisión y recepción de señales de radio frecuencia con modulación LoRa, aparte también estará el módulo w5500, necesario para establecer comunicaciones TCP/IP tanto con el PLC como con el computador a través de los puertos RJ45.

2.2 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA DE TRANSMISIÓN APLICADA (LORA)

La solución escogida funciona para realizar comunicaciones a largas distancias sin utilizar gran infraestructura gracias a la transmisión de radio frecuencia con modulación LoRa, esta modulación se caracteriza por poder realizar decodificaciones de señales incluso por debajo del ruido ambiental, lo cual es clave para lograr el objetivo de alcance de los 500mts, incluso estos módulos cuentan con lo necesario para poder transmitir y recibir señales más allá de los 5km con las configuraciones adecuadas.

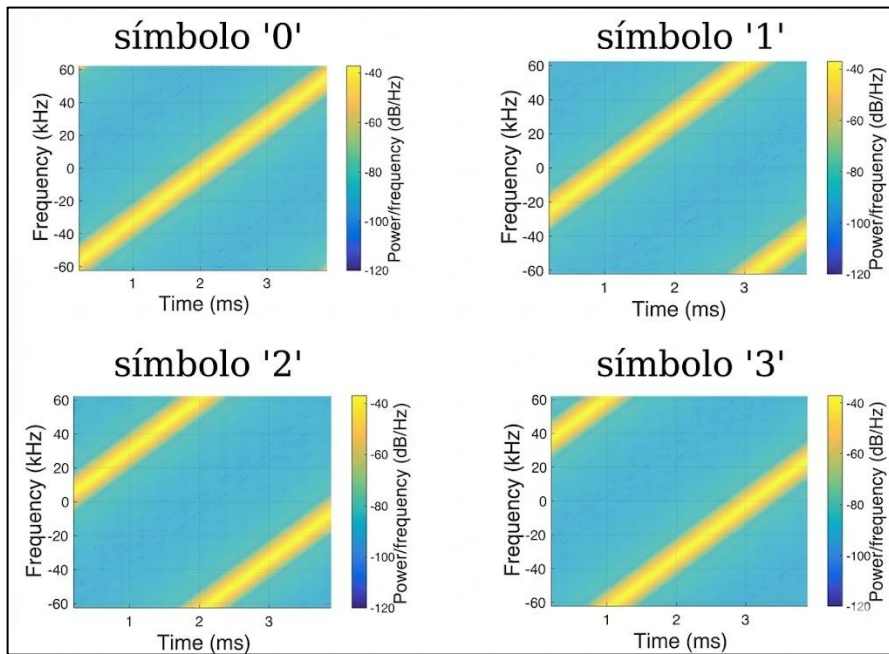
2.2.1 Principios de la modulación LoRa (Long Range)

Para dar solución a la carencia de conectividad en las zonas rurales se adoptó la tecnología LoRa, una técnica de modulación patentada, orientada la mayoría de las veces en la aplicación de Internet de las Cosas (IOT), para ofrecer mejor alcance y bajo consumo de energía a cambio de menor velocidad de transferencia. El fundamento tecnológico de LoRa se basa precisamente en el Espectro Ensanchado por Chirp (CSS - Chirp Spread Spectrum). Esta técnica modula la información codificando los bits en "chirps", que pueden ser definidas como señales sinusoidales que barre linealmente un ancho de banda definido en función del tiempo.



Fuente: medium.com

Figura 2-2.- Ejemplo de modulación.



Fuente: medium.com

Figura 2-3.- Otra vista del ejemplo de modulación.

La figura 2-2 y 2-3 demuestra visualmente cómo LoRa codifica la información, cada símbolo 0, 1, 2, 3 se representa por una posición inicial diferente del "chirp", dentro de la ventana de tiempo y frecuencia asignada. El receptor detecta este desplazamiento para decodificar qué datos se enviaron.

La aplicación de CSS proporciona las siguientes ventajas críticas para el proyecto:

- Inmunidad a ruido: la señal ensanchada se vuelve en gran medida inmune a interferencias de banda estrecha y sobre todo al ruido ambiente típico de entornos exteriores.
- Alta sensibilidad y largo alcance: gracias a la ganancia de procesamiento del CSS el receptor puede demodular señales extremadamente débiles, incluso aquellas por debajo del piso de ruido ambiente (Signal to Noise Ratio negativo). Esto asegura que la robustez del enlace sea suficiente para cubrir los 500m a baja potencia de transmisión.

2.2.2 Parámetros clave de configuración

La flexibilidad de la tecnología LoRa reside en su capacidad para adaptar el rendimiento del enlace de radio a las necesidades específicas de la aplicación mediante el ajuste de parámetros de modulación. Para el presente trabajo, que necesita cubrir una distancia de unos 500m aproximadamente, en un entorno rural posiblemente ruidoso, y considerando el bajo volumen de datos proveniente del PLC, la prioridad del diseño es maximizar el alcance y robustez y sacrificar la velocidad de la transmisión, para esto son 4 los parámetros clave a configurar:

1. **Factor de Ensanchamiento (Spreading Factor)**: es el parámetro más influyente en la modulación LoRa, determina el tiempo de duración del "chirp" ya que indica el número de bits necesarios para codificar un símbolo, los valores van desde SF7 hasta SF12. Al incrementar el Spreading Factor se logra aumentar la duración del símbolo lo que incrementa la acumulación de energía de la señal, con lo que se mejora la SINR (relación señal/interferencia más ruido), por lo tanto, un Spreading Factor fuerte significa mayor

distancia y robustez con respecto a las interferencias. Para contar con los 500m del radio de cobertura, se tendrán que establecer los SF intermedios o fuertes tal como SF9 a SF12.

2. **Ancho de Banda (Bandwidth):** define el rango de frecuencias sobre el cual se extiende el chirp durante su transmisión, los valores estándar en los módulos SX1278 incluyen 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. Un mayor ancho de banda permite aumentar la velocidad de datos, ya que los símbolos se transmiten más rápido, pero al tener un mayor ancho de banda en la recepción permite que se integre más ruido en la señal, por lo que baja la sensibilidad y acorta el alcance, para este proyecto se utilizará un ancho de banda de 125kHz que es un equilibrio entre velocidad y alcance de la señal.

3. **Tasa de Codificación (Coding Rate - CR):** este parámetro es un mecanismo de corrección de errores, para recuperar datos dañados por interferencias, el CR define la cantidad de bits redundantes añadidos a la carga útil, se expresa como una fracción (4/5, 4/6, 4/7, 4/8), donde el denominador indica el total de bits transmitidos por cada 4 bits de información útil, un CR más alto significa mayor redundancia por lo tanto mayor robustez, pero baja la velocidad de transmisión al colocar más datos redundantes, por lo tanto, se escogerá un tasa de codificación de 4/7 que es la opción más equilibrada.

4. **Potencia de transmisión:** Es la potencia de la señal emitida por la antena, medido en decibelios-milivatio (dBm), el módulo SX128 permite ajustar esta potencia, puede ser ajustada a +17 dBm o +20 dBm, una mayor potencia va en beneficio de un mayor alcance, pero también significa un mayor consumo, para este proyecto se escogerá +17dBm de potencia, que se ajusta para el objetivo de los 500 metros.

Tabla 2-1.- Configuración modulación LoRa.

Parámetro	Efecto	Configuración para aplicar	justificación
Factor de ensanchamiento (SF)	Aumenta alcance	SF9	Para alcanzar la sensibilidad necesaria para los 500m
Ancho de banda (BW)	Mejorar sensibilidad	125kHz	BW bajo para mejorar la relación señal-ruido (SNR)
Tasa de codificación	Mayor robustez	4/7	Agrega redundancia a los datos transmitidos
Potencia de transmisión	Aumentar alcance	+17dBm	Opción más equilibrada entre alcance y consumo

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

2.3 SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

El diseño físico del prototipo se fundamenta en una arquitectura modular donde se combinan componentes del ámbito de la automatización industrial con dispositivos del ecosistema del Internet de las Cosas (IoT) y sistemas embebidos, de este modo, la elección de cada uno de los componentes se ha hecho siguiendo unos determinados criterios que evaluaban la compatibilidad de protocolos, la eficiencia energética, la robustez y la viabilidad económica para su implementación en un entorno rural.

A continuación, se describen los cuatro bloques de hardware más relevantes que constituyen la solución:

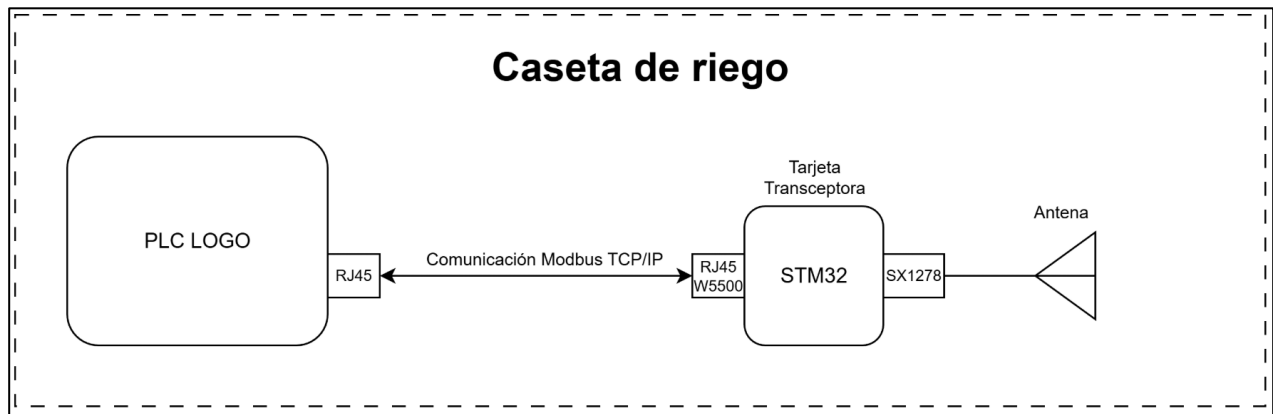
- Microcontrolador STM32F103C8T6: Conocido como "Blue Pill" en su placa de desarrollo, cuenta con múltiples puertos SPI (Serial Peripheral Interface) que son necesarios para controlar los módulos principales de este proyecto que son SX1278 y W5500, y por otro lado su bajo costo ayuda con el objetivo del proyecto.
- Módulo SX1278: Es un transceptor de radiofrecuencia con operación en la banda de los 433Mhz, este módulo es el que permitirá transmitir datos a larga distancia mediante comunicación con modulación LoRa (Long Range), su bajo costo también fue un elemento a considerar en su elección.
- Módulo W5500: Es un controlador ethernet, que permitirá al microcontrolador establecer comunicación con el PLC mediante comunicación Modbus TCP/IP y también permitirá establecer comunicación con un computador el cual estará en la sala de control, esta comunicación será mediante protocolo TCP/IP.
- PLC Siemens LOGO: Este equipo es el que controla el proceso de regadío, ya estaba instalado previamente, los demás componentes son los que deben adaptarse al PLC para poder funcionar en conjunto, será el encargado de dejar a libre disposición de los demás componentes todos los datos que recopile, también podrá ser controlado a través de comandos que provengan de la comunicación por radio frecuencia desde el computador de la caseta de control.

2.4 DISEÑO DE LA INTERFAZ DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL (PLC - TRANSECTOR)

Con el propósito de realizar la extracción de datos desde el sistema de control del riego, se debe diseñar una interfaz que convierta las señales y los protocolos industriales del PLC Siemens LOGO a un formato que pueda ser utilizado por el microcontrolador de la tarjeta transceptora.

2.4.1 Capa física y de enlace (hardware)

La conectividad física se establece mediante dos tramos distintos, aprovechando la modularidad de los componentes seleccionados, como se ve en la figura 2-4.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 2-4.- Diagrama de conexión.

- A. Enlace ethernet (PLC – W5500): El PLC dispone de un puerto Ethernet integrado que opera a 10/100 Mbps, el módulo W5500 actúa como la interfaz de red de la tarjeta transceptora, esta conexión garantiza una transmisión de datos de alta velocidad y robusta en cuanto aislamiento del ruido.
- B. Interfaz serial SPI (W5500 - Microcontrolador): Dado que el microcontrolador STM32 no gestiona los niveles de tensión ni la señalización diferencial de Ethernet directamente, el módulo W5500 se encarga de esta tarea. La comunicación interna entre el W5500 y el STM32 se realiza mediante SPI (Serial Peripheral Interface), el STM32 actúa como el dispositivo maestro y el W5500 como esclavo.

2.4.2 Protocolo Modbus TCP/IP

Sobre la infraestructura física descrita anteriormente, se implementa el protocolo Modbus TCP/IP, este es un estándar de comunicación abierto, ampliamente utilizado en la industria por su simplicidad y robustez, y es soportado nativamente por Siemens.

- Rol del Servidor (PLC Siemens): El PLC se configura para actuar como servidor Modbus, en este rol, el PLC escucha en el Puerto 502 (puerto estándar para Modbus TCP), su función es esperar solicitudes externas y responder a ellas. El PLC tiene un mapeo de las memorias donde las variables del proceso (estado de las bombas Q, lecturas de sensores AI, marcas M) están disponibles para ser leídas o escritas, como lo muestra la figura 2-5.



The screenshot shows the 'Configuración de LOGO!' software interface. The 'Espacio dir. Modbus' section is active, displaying a table with the following data:

Tipo direc.	Rango	Direc. Modbus asignada	Dirección	Ud.
I	1 - 24	Entr. discreta (DI) 1 - 24	R	bit
Q	1 - 20	Bob. 8193 - 8212	R/W	bit
M	1 - 64	Bob. 8257 - 8320	R/W	bit
V	0.0 - 850.7	Bob. 1 - 6808	R/W	bit
AI	1 - 8	Reg. entrada (IR) 1 - 8	R	word
VW	0 - 848	Registro paradas (HR) 1 - 425	R/W	word
AQ	1 - 8	Registro paradas (HR) 513 - 520	R/W	word
AM	1 - 64	Registro paradas (HR) 529 - 592	R/W	word
VX	0.0 - 2047.7	Bob. 16385 - 32768	R/W	bit
VR	0.0 - 511.7	Bob. 32769 - 36864	R/W	bit
VXW	0 - 2046	Registro paradas (HR) 801 - 1824	R/W	word
VRW	0 - 510	Registro paradas (HR) 1825 - 2080	R/W	word

Fuente: Captura sacada de software LOGO! Soft.

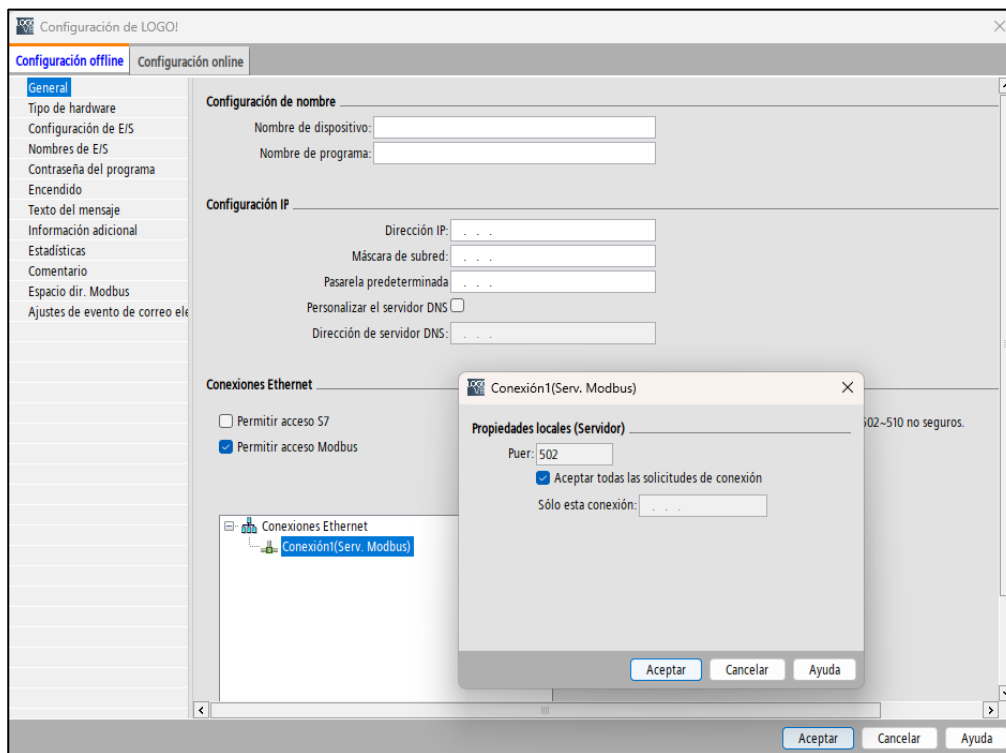
Figura 2-5.- Direcciones Modbus PLC.

- Rol del Cliente (Tarjeta transceptora): El microcontrolador se programa para actuar como cliente Modbus, es el encargado de iniciar la comunicación. El firmware del STM32 establece una conexión TCP/IP con la dirección IP del PLC, construye y envía tramas de solicitud pidiendo la lectura de registros específicos, recibe y procesa la trama de respuesta del PLC para extraer los datos útiles.

En el caso de la tarjeta transeptora que estará en la sala de control se comunicará mediante protocolo TCP/IP con el computador, el cual generará los comandos de consultas que serán enviadas al PLC mediante radiofrecuencia y recibirá las respuestas también por el mismo medio.

2.4.3 Configuraciones necesarias para comunicación

Por parte del PLC y la tarjeta transeptora es necesario dejar configuradas lo que es el direccionamiento IP y mascarar subred (asegurando de que se encuentren en el mismo segmento de red y de que no haya conflicto de direcciones IP), también es necesario dejar al PLC en modo servidor Modbus y habilitado el puerto 502, como se ve en la figura 2-6, en este caso Siemens cuenta con la opción de que el PLC solo responda solicitudes de comunicación de una dirección IP en específico, por esta ocasión se dejará habilitado para que pueda responder cualquier petición.

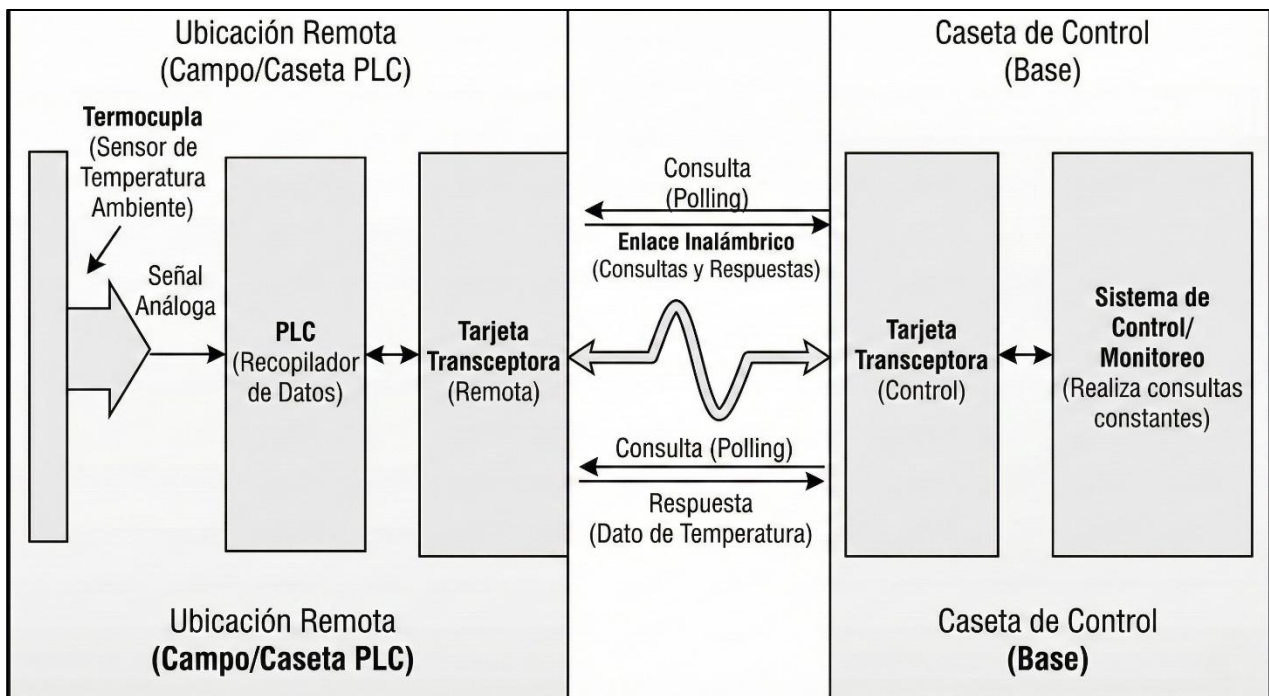


Fuente: Captura sacada de software LOGO! Soft.

Figura 2-6.- Configuración servidor Modbus.

2.5 DESARROLLO DE FIRMWARE DEL TRANSEPTOR (TRANSMISOR Y RECEPTOR) PARA PROTOTIPO

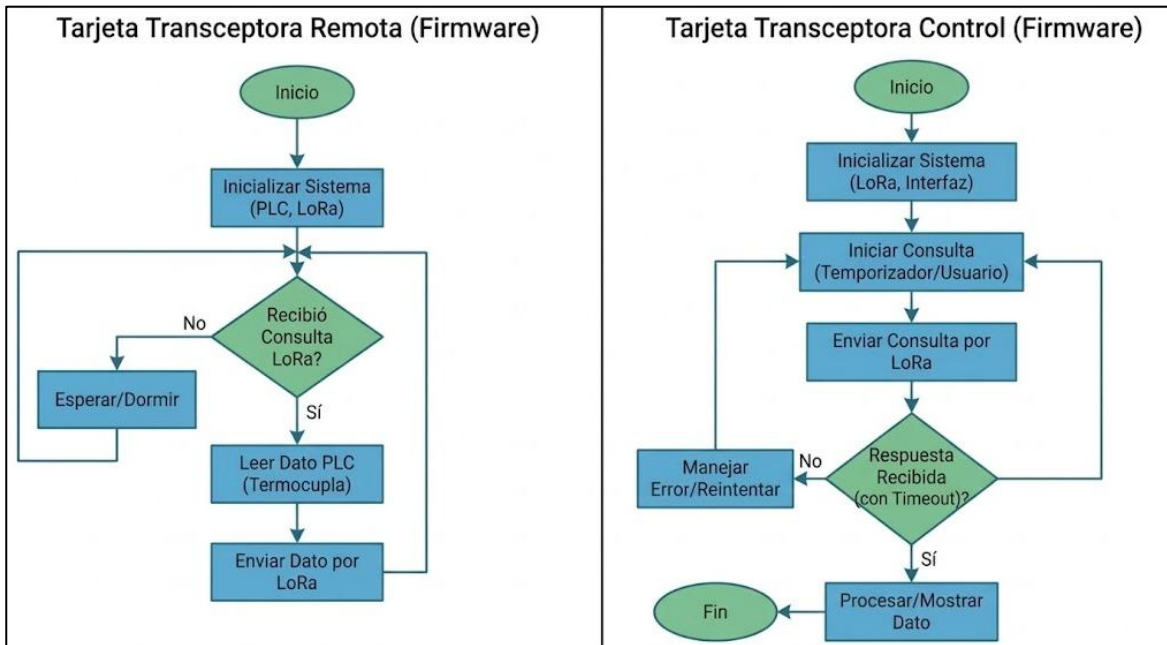
Para el desarrollo del prototipo, el firmware se basará en una demostración de comunicación de datos de una variable análoga del PLC, en este caso será los datos de una termocupla, que estará censando la temperatura ambiente de donde se encuentre y el PLC recopilará esta data, desde la caseta de control (computador) mediante radiofrecuencia se le estará consultando constantemente este dato, todas las consultas y respuestas se harán mediante las tarjetas transceptoras, como muestra la figura 2-7.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 2-7.- Diagrama de funcionamiento general de prototipo.

El firmware de cada tarjeta transceptora que estarán en el prototipo está descrita en el diagrama de flujo en la figura 2-8.

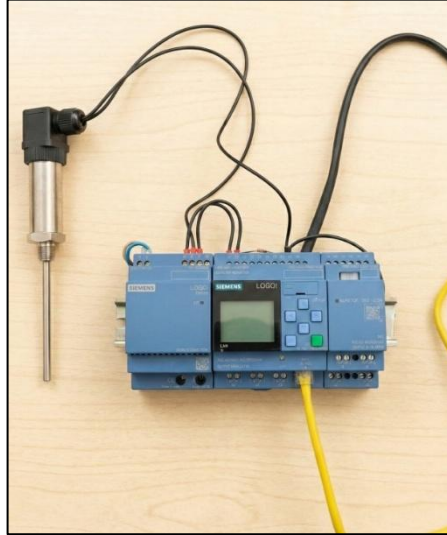


Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 2-8.- Diagrama de flujo firmware.

2.6 INTEGRACIÓN DEL PROTOTIPO

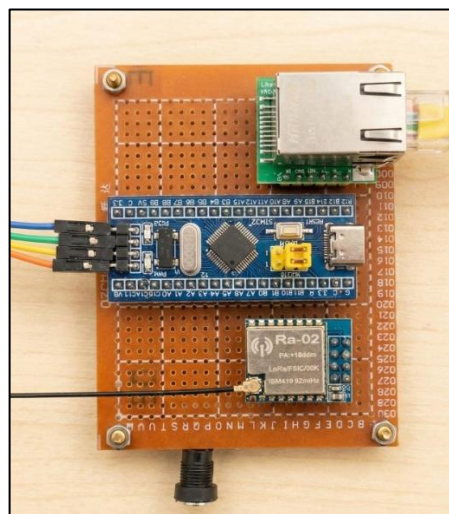
Se procedió con la integración de las partes mencionadas anteriormente, en este caso con el PLC con la conexión a la termocupla mediante una entrada analógica, para obtener data que se transmitirá vía radiofrecuencia cuando llegue la consulta necesaria, como se aprecia en la figura 2-9.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 2-9.- PLC logo a utilizar.

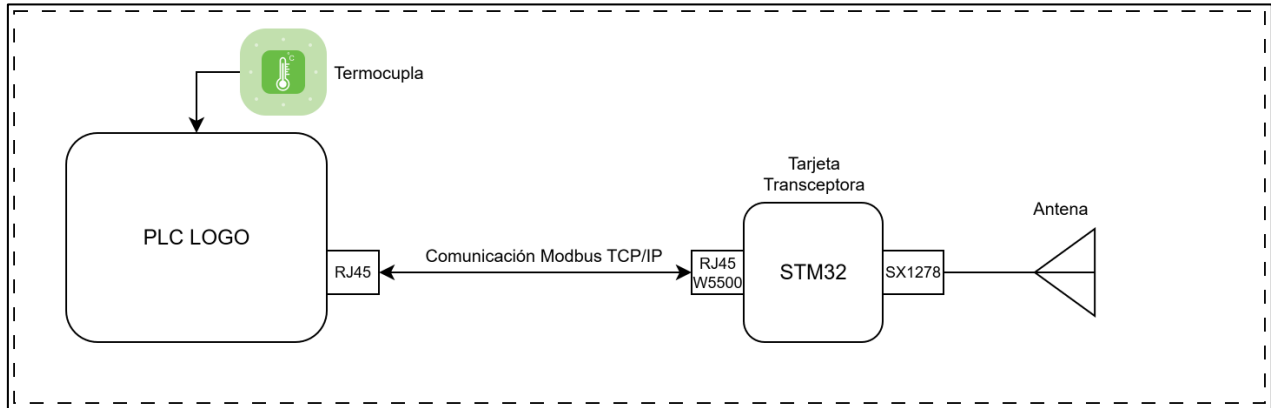
Por otro lado, se tiene el prototipo de la tarjeta transceptora como se ve en la figura 2-10, con todas sus partes mencionadas anteriormente, como lo son la tarjeta desarrolladora con el microcontrolador stm32, el módulo W5500 para conexión ethernet y también el módulo SX1278 para la transmisión por radiofrecuencia con modulación LoRa, como se mencionó anteriormente se utilizarán 2 de estas tarjetas transceptoras, una para trabajar con el PLC y otra para trabajar con un computador y poder visualizar los datos consultados.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 2-10.- Prototipo de tarjeta transceptora.

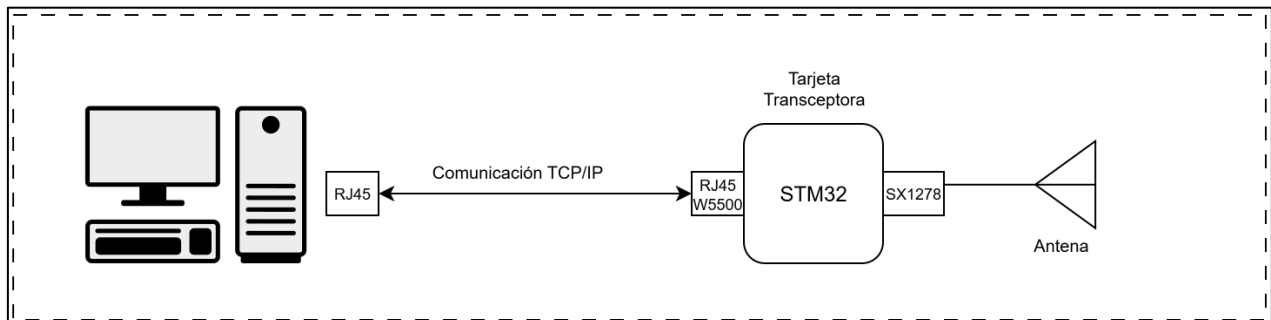
En la figura 2-11 se aprecia el conexionado entre la tarjeta transceptora y el PLC.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 2-11.- Conexión tarjeta transceptora - PLC.

En la figura 2-12 se puede apreciar la conexión de la segunda tarjeta transceptora con el computador mediante ethernet.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 2-12.- Conexión tarjeta transceptora - PC.

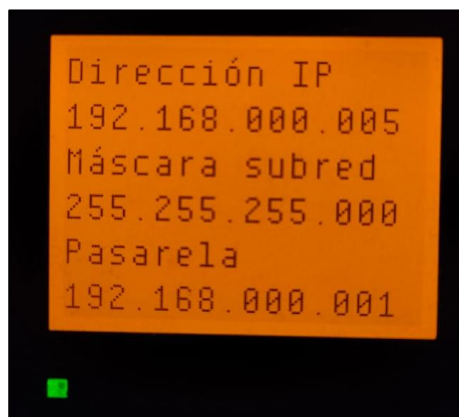
CAPITULO 3: PUESTA EN MARCHA Y RESULTADOS

3 PUESTA EN MARCHA Y RESULTADOS

En este capítulo se detalla la puesta en marcha y validación del prototipo, realizado mediante una metodología de pruebas en escalones y en incrementos. En primer lugar, se corroborará la correcta adquisición de los datos locales mediante Modbus TCP/IP, en segundo lugar, la estabilidad del enlace inalámbrico LoRa a distancia y, por último, la integración con la estación de control.

3.1 PRIMERA ETAPA (OBTENCIÓN DE DATOS DE PLC)

Con la primera tarjeta transceptora que está conectada con el PLC mediante ethernet se deben obtener los datos del puerto analógico en el que está conectada la termocupla, con la termocupla ya conectada, se configuró al PLC para dejarlo como servidor Modbus y se habilitó para recibir consultas por el puerto TCP 502, después se configuró la dirección IP, máscara de subred y pasarela, tanto en el PLC como en el firmware de la tarjeta transceptora como se logra ver en las figuras 3-1 y 3-2 , ambos equipos deben quedar en la misma red y con direcciones IP diferentes para que no hayan conflictos de direccionamiento IP.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-1.- Configuración de red PLC.

```

167 // PASO 2: Configuración de red del STM32
168 uint8_t mac[6] = {0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED};
169 uint8_t ip[4] = {192, 168, 0, 100};
170 uint8_t subnet[4] = {255, 255, 255, 0};
171 uint8_t gateway[4] = {192, 168, 0, 1};
172

```

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-2.- Configuración de red tarjeta transceptora 1.

Después de ya hechas las configuraciones de la red se debe identificar a qué dirección de la memoria del PLC se debe dirigir la consulta para obtener el valor que se está censando desde la termocupla, el sensor está conectado al puerto I7 (Input 7) del PLC, que puede actuar como AI1 (Analogic Input 1), como se puede ver en la figura 3-3 los puertos análogos son solo de lectura y son de tamaño “Word” que corresponden a 16bits, para el PLC que se está usando hay 8 registros de puertos análogos, en este caso se requiere leer el primero (posición 0), que es el del puerto análogo AI1 en el cual está conectada la termocupla, como la comunicación es a través del protocolo Modbus, la función para la lectura de puertos de entrada es de valor (0x04), este valor es estándar en el protocolo Modbus y se debe tener en cuenta para armar la trama de consulta hacia el PLC.



Configuración de LOGO!

Configuración offline | Configuración online

General

- Tipo de hardware
- Configuración de E/S
- Nombres de E/S
- Contraseña del programa
- Encendido
- Texto del mensaje
- Información adicional
- Estadísticas
- Comentario
- Espacio dir. Modbus**
- Ajustes de evento de correo electrónico

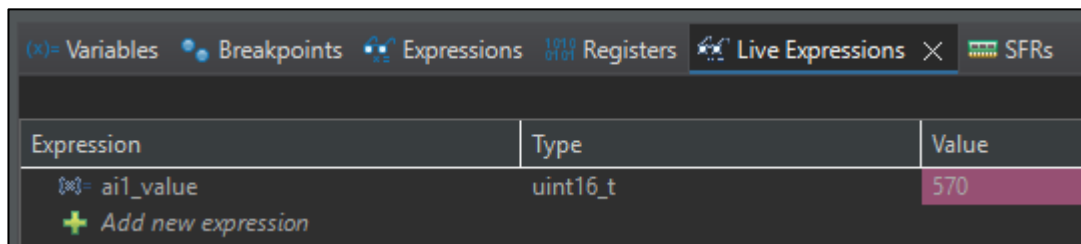
Espacio dir. Modbus

Tipo direc.	Rango	Direc. Modbus asignada	Dirección	Ud.
I	1 - 24	Entr. discreta (DI) 1 - 24	R	bit
Q	1 - 20	Bob. 8193 - 8212	R/W	bit
M	1 - 64	Bob. 8257 - 8320	R/W	bit
V	0.0 - 850.7	Bob. 1 - 6808	R/W	bit
AI	1 - 8	Reg. entrada (IR) 1 - 8	R	word
VW	0 - 848	Registro paradas (HR) 1 - 425	R/W	word
AQ	1 - 8	Registro paradas (HR) 513 - 520	R/W	word
AM	1 - 64	Registro paradas (HR) 529 - 592	R/W	word
VX	0.0 - 2047.7	Bob. 16385 - 32768	R/W	bit
VR	0.0 - 511.7	Bob. 32769 - 36864	R/W	bit
VXW	0 - 2046	Registro paradas (HR) 801 - 1824	R/W	word
VRW	0 - 510	Registro paradas (HR) 1825 - 2080	R/W	word

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-3.- Dirección Modbus de puerto análogo.

Ya teniendo el valor de la función (0x04) y la dirección de lectura del puerto análogo AI1 (0x00) se procedió a enviar la trama al PLC cada 2 segundos para ver la variación de la medición de la temperatura, la respuesta que se obtuvo se puede ver en la figura 3-4, es de un valor de 570 ya que es un valor “crudo” de la termocupla, ese valor se debe escalar para obtener un valor con unidad de medida en °C, al aplicar calor en la termocupla el valor obtenido iba subiendo por lo que se confirmaba que la comunicación entre la tarjeta transceptora (cliente Modbus) y el PLC (servidor Modbus) fue realizada con éxito, en conclusión se cumple con los 2 primeros objetivos específicos propuestos en el capítulo 1.



Expression	Type	Value
ai1_value	uint16_t	570
+ Add new expression		

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-4.- Respuesta de PLC.

3.2 SEGUNDA ETAPA (ENLACE INALÁMBRICO)

Ya resuelta la comunicación Modbus entre el PLC y su respectiva tarjeta transceptora, ahora queda configurar ambas tarjetas transceptoras para generar el enlace inalámbrico con modulación LoRa, como se mencionó anteriormente ambas tarjetas deben tener la misma configuración de modulación (frecuencia, spreadfactor, ancho de banda, condng rate) para poder comunicarse entre ellas, en el firmware de cada tarjeta se realizó tal configuración como se puede ver en la figura 3-5.

```

138 customConfig.frequency = 433000000;
139 customConfig.spreadingFactor = 7;
140 customConfig.bandwidth = 7;
141 customConfig.codingRate = 1;

```

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-5.- Firmware modulación LoRa.

Se procedió a realizar pruebas de comunicación inalámbrica, enviando cada 5s un mensaje de una tarjeta a otra, al hacer esta prueba ambas tarjetas estaban a 1m de distancia aproximadamente, el total de los mensajes enviados fueron recibidos, por lo que se pudo lograr con éxito la comunicación inalámbrica con modulación LoRa, después de esa corroboración de que se estuviesen recibiendo exitosamente los mensajes se llevó a la prueba de distancia, se colocó una de las tarjetas transceptoras en la caseta de riego y la otra en la zona de control, como se ve en la figura 3-6, aproximadamente hay unos 500m de distancia entre ambas ubicaciones, ambas tarjetas están a línea de vista.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-6.- Vista desde altura terreno de empresa.

Expression	Type	Value
ai1_value	uint16_t	575
rssi	int8_t	-85
+ Add new expression		

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

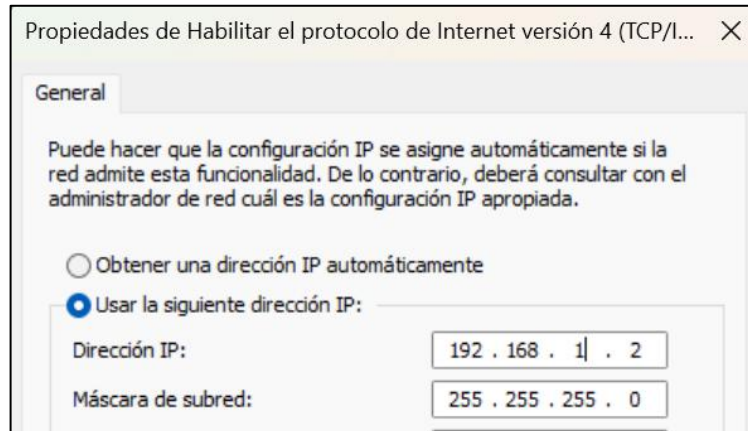
Figura 3-7.- Parámetro RSSI de mensajes recibidos.

Como se ve en la figura 3-7 se habilitó el valor RSSI de cada mensaje recibido, esta medición la hace internamente el módulo sx1278, este valor es un indicador de fuerza de la señal recibida, la unidad de medida es en dBm, el promedio del valor de RSSI es de -85dBm como se ve en la figura 3-7, considerando que en la configuración que se encuentran los módulos sx1278 la sensibilidad de recepción de estos es de unos -130dBm aproximadamente, este valor obtenido es excelente, este valor indica que el enlace es robusto.

3.3 TERCERA ETAPA (VISUALIZACIÓN DE DATOS EN COMPUTADOR)

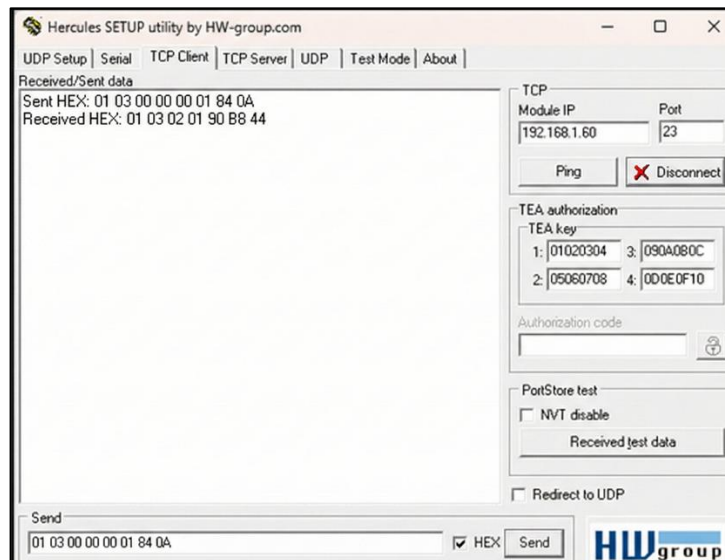
Posterior a la confirmación del buen funcionamiento del enlace inalámbrico, se realizó la comunicación entre la segunda tarjeta transceptora con el computador, para esto se ocupó el programa “Hercules” con el que se puede configurar un TCP Cliente desde el equipo, por lo que en este caso la tarjeta transceptora hará de servidor TCP, la configuración se hace de la misma manera como cuando se hizo anteriormente con el PLC, se debe configurar ambos equipos (computador – tarjeta) en la misma red , se debe habilitar un puerto en el Servidor TCP (tarjeta), para poder realizar la comunicación, en la figura 3-9 se puede ver el programa “Hercules” en modo TCP cliente, y también se puede divisar la dirección IP y el puerto de destino donde irán dirigidas las consultas, en este caso corresponden a las direcciones que se configuró en la tarjeta transceptora, por otro lado en la figura 3-8 se puede ver la configuración IP del computador, se

realizaron pruebas de consultas básicas, con las que se garantizó la buena comunicación entre servidor y cliente TCP.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-8.- Configuración IP computador.

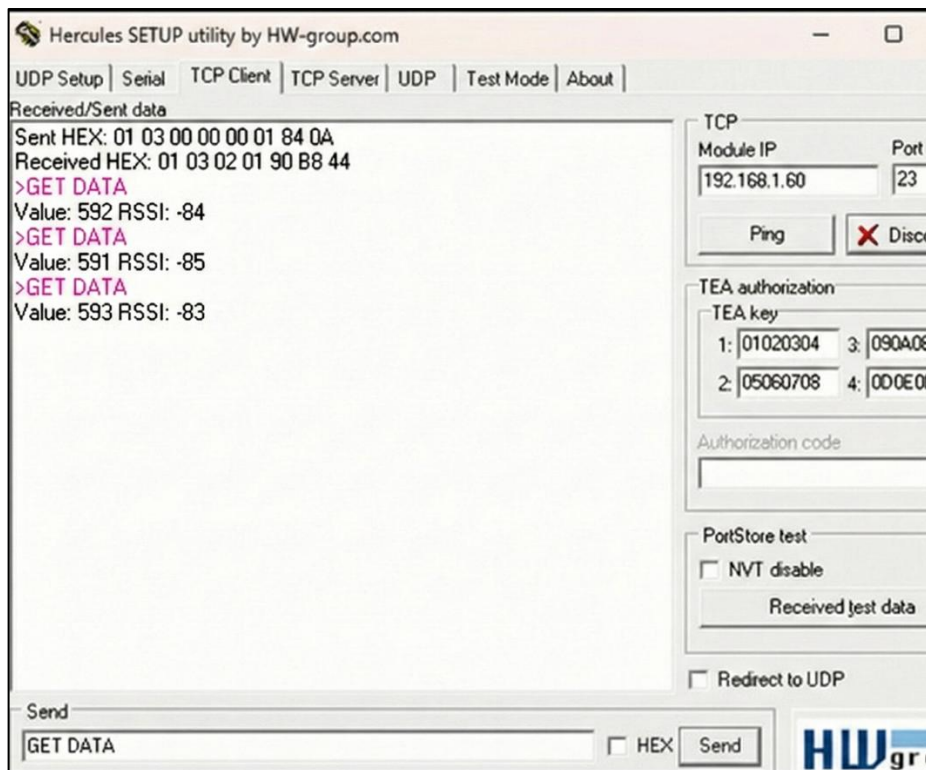


Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-9.- comunicación TCP/IP computador - tarjeta.

3.4 CUARTA ETAPA (PRUEBA PROTOTIPO COMPLETO)

Se procedió con la integración de todas las partes y desde el terminal del programa Hercules se procedió a hacer consultas, las cuales mediante el enlace inalámbrico deben llegar hacia el PLC, como se puede ver en la figura 3-10 al enviar el comando "GET DATA" se obtiene como respuesta el valor 592, este número corresponde al valor censado por la copla que está conectado en el puerto análogo del PLC, también se mantuvo el valor RSSI en cada consulta para saber si se mantiene la robustez del enlace inalámbrico, al recibir correctamente las respuestas a cada consulta realizada se puede decir que se realiza con éxito la implementación del prototipo, cumpliendo con los objetivos propuestos.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Figura 3-10.- comunicación sistema completo.

3.5 CONSUMO

Basado en información de la hoja de datos de cada módulo usado en el prototipo, el consumo de las tarjetas transceptoras sería el que se ve en la tabla 3-1, considerando una alimentación de 3.3Vdc:

Tabla 3-1.- Consumo tarjetas transceptoras.

ESTADO	Corriente estimada	Potencia [Watts]
Máximo	345mA	1,14 W
Típico	140mA	0,46 W
Reposo	25mA	0,08 W

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

3.6 ESCALABILIDAD

Aunque el modelo actual valida satisfactoriamente comunicación entre pares en un caso de uso concreto, la elección del hardware se hizo con la mirada puesta en el futuro; ya que el módulo SX1278 tiene la capacidad técnica para poder hacer la transición de un enlace unidireccional a una topología de red robusta y escalable bajo el estándar LoRaWAN, permitiendo la conexión de varios nodos sin necesidad de cambiar el hardware base.

3.6.1 Evolución hasta una red LoRaWAN

El diseño del prototipo está cimentado en una arquitectura de comunicación P2P (Punto a Punto) bajo la modulación LoRa, la cual permite cubrir el objetivo inicial de conectar una única estación base con un único PLC remoto de una manera barata y eficiente, pero a la vez la selección de hardware (SX1278 de Semtech), otorga a nuestro sistema una gran escalabilidad tecnológica, permitiendo en un futuro dar el salto a una arquitectura de red LoRaWAN sin tener que sustituir el hardware de los nodos finales, esto abriría la posibilidad de monitorear no solo al PLC sino que también más equipos en la red de regadío por ejemplo múltiples sensores de humedad, sensores

de temperatura, variadores de frecuencia, etc, y concentrar toda esa data en un solo punto, que en este caso sería la caseta de control.

3.7 COSTOS

A continuación, se exhibe el análisis económico correspondiente al proyecto, desglosando los costos directos por materiales, insumos y hardware, así como la valorización de las horas en ingeniería necesarias para el diseño, desarrollo del firmware e integración del sistema. Esta evaluación económica tiene por finalidad determinar el costo real de implementación del prototipo y validar su viabilidad económica.

Para la creación de la tabla 3-2 de costos de materiales, se consideraron los costos para fabricar 2 unidades (1 transceptor caseta de riego + 1 transceptor caseta de monitoreo) y la integración con el PLC.

- Valor UF 7 enero 2026: \$39.754 CLP.

Tabla 3-2.- Costo materiales.

Ítem	Componente / Material	Cantidad	Precio Unit. Estimado (UF)	Subtotal (UF)
1	Microcontrolador STM32F103C8T6 ("Blue Pill")	2	0.163UF	0.326UF
2	Módulo Transceptor LoRa SX1278/SX1276 (+ Antena)	2	0.201UF	0.402UF
3	Módulo Ethernet W5500 (SPI a Ethernet)	2	0.238UF	0.476UF
4	Fuente de Poder / Conversor DC-DC (5V/3.3V para lógica)	2	0.1UF	0.2UF
5	PCB, Placas universales, Cables y Conectores (Dupont, RJ45)	Global	0.503UF	0.503UF
6	Insumos Menores (Estaño, termorretráctil, tornillos, pilares menores)	Global	0.251UF	0.251UF
TOTAL MATERIALES				2.158UF

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Para la creación de la tabla 3-3 de costos de Ingeniería y desarrollo del proyecto se tuvieron en cuenta los siguientes criterios para los cálculos:

- Sueldo Mensual Ing. Ejec. En control e instrumentación industrial Referencia: \$1.800.000CLP. **fuente:** <https://www.meganoticias.cl/dato-util/446358-carreras-mejor-pagadas-en-chile-primer-ano-sueldos-pdp-30-04-2024.html>
- Horas laborales mensuales: 160 horas (40 horas semanales).
- Costo por Hora (HH): \$11.250 CLP.
- Valor UF 7 enero 2026: \$39.754 CLP.

Tabla 3-3.- Costo HH de proyecto.

Ítem	Descripción de la Actividad	Horas Estimadas (HH)	Costo Unitario (HH)	Subtotal (CLP)
1	Diseño de Hardware y Arquitectura Selección de componentes, diseño de esquemáticos (SPI, Ethernet), diagramas de conexión y selección de gabinetes.	20	0.28 UF	5.6 UF
2	Desarrollo de Firmware (STM32) Programación en C (STM32CubeIDE), implementación de pila Modbus TCP/IP (W5500) y lógica de transmisión LoRa (SX127x).	60	0.28 UF	16.8 UF
3	Configuración de Equipos Industriales Configuración del PLC LOGO! (IPs, Mapa de Memoria, Servidor Modbus).	10	0.28 UF	2.8 UF
4	Montaje e Integración Ensamblaje físico de PCBs, cableado de prototipos.	15	0.28 UF	4.2UF
5	Pruebas y Validación (Lab y Campo) Pruebas unitarias, pruebas de alcance (LoRa) y validación de datos en PC (Hercules/Monitor).	20	0.28 UF	5.6 UF
	TOTAL INGENIERÍA	125 horas		35 UF

Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del proyecto.

Considerando ambos gastos el costo total para el proyecto es de 37,158UF, el mayor costo radica en las HH de firmware e integración, esto demuestra que el valor agregado no está en comprar hardware caro, sino en la capacidad de desarrollar una solución tecnológica

personalizada para la solución de un problema en específico. El valor de los materiales es bajo en comparación sistemas SCADA comerciales o enlaces de radio industriales dedicados que pueden superar los 12.5UF solo por equipo. Por lo tanto, se concluye que con la solución propuesta se puede resolver el problema por un menor precio a comparación a soluciones que existen en el mercado.

CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del prototipo de sistema de telemetría ha permitido validar exitosamente una solución tecnológica capaz de resolver la problemática de conectividad en entornos agrícolas rurales, superando las barreras de distancia e infraestructura que limitan a los sistemas de monitoreo convencionales. Se concluye que la tecnología LoRa (Long Range), la cual es una técnica de transmisión radial o radio, basada en la modulación de Espectro Ensanchado por Chirp (CSS), fue la más adecuada para este escenario, en comparación con redes de fibra óptica que suponen un gasto elevado o con redes celulares que son muy inestables en zonas rurales, se ha logrado establecer un enlace LoRa que produce una comunicación robusta y estable. La capacidad de esta modulación para poder demodular a partir de señales que poseen niveles muy bajos de potencia (alta sensibilidad) ha permitido cubrir también la distancia que había entre la caseta de riego y la estación de control, asegurando la integridad del contenido de los datos a pesar la existencia de obstáculos y ruido que se halla en el ámbito de campo, el presente proyecto puede demostrar que el establecimiento de redes de telemetría privadas es factible. La solución planteada anteriormente ha permitido deshacerse de la necesidad de contratos de servicios de internet en lugares muy remotos, también se destaca el bajo consumo de las tarjetas transceptoras que hacen posible el enlace, si se compara con tecnologías son tradicionales, implican un elevado consumo energético. Por otra parte, el uso de la solución de transceptor SX1278 permite la oportunidad de escalabilidad en el futuro, hacia una red LoRaWAN fuerte que puede manejar numerosos nodos de sensores en una explotación agrícola amplia.

En conclusión, el presente trabajo de título confirma que la implementación de protocolos de comunicación de larga distancia, en este caso la modulación LoRa proporciona una poderosa herramienta para la agricultura de precisión, constituyendo una solución técnica fiable y escalable para hacer el seguimiento remoto de procesos críticos.

BIBLIOGRAFÍA

SIEMENS. Manual PLC LOGO [en línea]

<https://cache.industry.siemens.com/dl/files/461/16527461/att_82567/v1/Logo_s.pdf>

[Visitado: septiembre 2025].

SIEMENS. MODBUS TCP COMMUNICATION [en línea]

<https://cache.industry.siemens.com/dl/files/923/109813923/att_1117727/v1/109813923_7KN_Powercenter1000_LOGO_DOC_V1_0_en.pdf>

[Visitado: septiembre 2025].

SEMTECH. HOJA DE DATOS SX1278 [en línea]

<https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276_77_78_79.pdf>

[Visitado: septiembre 2025].

WIZNET. HOJA DE DATOS W5500 [en línea]

< https://docs.wiznet.io/img/products/w5500/w5500_ds_v109k.pdf>

[Visitado: septiembre 2025].

ST. HOJA DE DATOS STM32F103C8 [en línea]

< <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>>

[Visitado: septiembre 2025].

MEDIUM.COM. Modulación LoRa: Long Range Modulation [en línea]

<<https://medium.com/pruebas-de-laboratorio-de-la-modulaci%C3%B3n-lora/modulaci%C3%B3n-lora-4ad74cabd59e>>

[Visitado: septiembre 2025].